

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DSP ile SUALTI HABERLEŞME UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Yük. Müh. Murat KUZLU

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Hasan DİNÇER

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DSP ile SUALTI HABERLEŞME UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

Elo. Hab. Yük. Müh. Murat KUZLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 14 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 30 Eylül 2010

**Tez Danışmanı
Prof.Dr. Hasan DİNÇER**

()

**Üye
Prof.Dr. Vedat TAVŞANOĞLU**

()

**Üye
Prof.Dr. B.Siddık YARMAN**

()

**Üye
Yrd.Doc/Dr. Sıtkı ÖZTÜRK**

()

**Üye
Prof.Dr. Sarp ERTÜRK**

()

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER

“DSP ile Sualtı Haberleşme Uygulaması” konulu bu çalışma Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Ana Bilim Dalında “Doktora Bitirme Tezi” olarak hazırlanmıştır. Tüm dünyada daha fazla önem taşımaya başlayan ve kritik olan “Sualtı Haberleşmesi” alanında çalışmak isteyen arkadaşlarıma katkıda bulunması dileğiyle.

Bana bu konuda çalışma olanağı veren gerek lisansüstü gerekse doktora çalışmalarımın yürütülmesi ve değerlendirilmesi sırasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam Sn. Prof. Dr. Hasan DİNÇER’e, çalışmalarım sırasında bana yol gösteren ve destekleyen değerli hocalarım Sn. Yrd. Doç. Dr. Sıtkı ÖZTÜRK’e, Sn. Prof. Dr. Vedat TAVŞANOĞLU’na ve Sn. Prof. Dr. Sıddık YARMAN’a, bu konuda çalışmama destek olan ve bu olanağı sağlayan TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü Müdürü Sn. Doç. Dr. Mustafa TIRIS’a, Enerji Enstitüsü Müdür Yardımcısı Sn. Celal ERGİN’e, çalışma arkadaşlarım Sn. Dr. Yusuf İZGİ, Sn. Dr. Erdiç ÇEKLİ ve Sn. Aziz YILMAZ’a, çalışmalarım sırasında bana her zaman destek olan, hayatım boyunca beni destekleyen ve bugünlere getiren çok değerli aileme sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Murat KUZLU

Ekim, 2010

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER.....	ix
ÖZET.....	xii
İNGİLİZCE ÖZET	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	1
1.2. Problemin Tanımlanması	5
1.3. Yaklaşım Metodu.....	5
1.4. Özgün Katkı.....	6
1.5. Tez Düzeni	7
2. SES KAVRAMI VE SUALTI SES YAYILIMI.....	8
2.1. Ses Nedir	8
2.2. Ses Hızı ve Profili	9
2.3. Ses Basınç Seviyesi (SPL) ve Ses Yoğunluk Seviyesi (SIL)	13
2.4. Hava ve Su Arasındaki dB Dönüşümü	13
2.5. Ses Seviyesi	14
2.6. Sualtı Akustik Yayılımının Temelleri.....	16
2.7. Sualtı Ses İletimi	17
2.8. Sualtı Transdüserleri Tanımlamak İçin Temel Prensipler	18
2.9. Sualtı Transdüseri Parametreleri.....	20
3. TEK YAN BANT MODÜLASYONU ve DEMODÜLASYONU.....	23
3.1. Giriş.....	23
3.2. Tek Yan Bant Tekniğinin Tarihçesi.....	23
3.3. Tek Yan Bant (SSB) ve Çift Yan Bant (DSB) İlişkisi.....	24
3.4. Vericide Tek Yan Bantın (SSB) Elde Edilme Teknikleri.....	29
3.4.1. Weaver yöntemi.....	30
3.4.2. Filtre yöntemi.....	31
3.4.3. Faz yöntemi	32
3.5. Tek Yan Bant (SSB) Demodülasyonu	33
4. DSP TABANLI SUALTI HABERLEŞMESİ.....	35
4.1. Giriş.....	35
4.2. TMS320C5509A DSK Deneme Kartı	37
4.3. DSP Tabanlı Sualtı Haberleşme Sistemi Uygulaması	38
4.4. DSP Tabanlı Sualtı Haberleşme Uygulaması Temel Fonksiyonları ve Donanım Birimleri	40
4.4.1. Sualtı haberleşmesi DSP uygulaması temel fonksiyonları	42
4.4.1.1. Codec ses örnekleyici analog/sayısal dönüştürücüleri	42
4.4.1.2. İşaretin örnekleme oranının değiştirilmesi.....	43
4.4.1.2.1. Seyreltme filtresi	44
4.4.1.2.2. Genişletme filtresi	47

4.4.1.3. Bant geçiren analitik filtre çifti birleşimi	50
4.4.1.4. Taşıyıcı işareti oluşturma	53
4.4.2. DSP tabanlı sualtı haberleşme uygulaması donanım birimleri.....	54
4.4.2.1. Alıcı-Verici işaret işleme birimi.....	54
4.4.2.2. Verici yükselteç katı.....	55
4.4.2.3. Alıcı ön yükselteç katı.....	57
4.4.2.4. Type 8103 hidrofön.....	60
4.5. TMS320C5509A DSK İle Sualtı Haberleşme Uygulamaları	62
4.5.1. TMS320C5509A DSK ile sabit taşıyıcı frekansları kullanılan sualtı haberleşmesi uygulaması	62
4.5.2. TMS320C5509A DSK ile rasgele taşıyıcı frekansları kullanılan sualtı haberleşmesi uygulaması	65
4.5.2.1. Rasgele taşıyıcı frekansı üretme algoritması	66
4.5.2.2. Rasgele taşıyıcı frekansı algılama algoritması.....	67
5. UYGULAMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	69
5.1. Tek DSK İle Yapılan Uygulama Sonuçları	69
5.1.1. Tek DSK ile 8087.5 Hz taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar	70
5.2. İki DSK İle Yapılan Uygulama Sonuçları	78
5.2.1. İki DSK ile 39000 Hz taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar.....	79
5.3. Sualtı Test Havuzunda Yapılan Uygulama Sonuçları.....	83
5.3.1. Hidrofön kalibrasyonu	83
5.3.2. Farklı frekanslarda sualtı test havuzu ölçüm sonuçları.....	85
5.3.3. Sualtı test havuzunda iki DSK ile 8087.5 Hz taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar	91
5.3.4. Sualtı test havuzunda iki DSK ile 16000 Hz rasgele taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar.....	95
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	100
KAYNAKLAR	103
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER	110
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Sualtı ses hız profili	12
Şekil 2.2: Sualtı akustik verici için ses iletimi	15
Şekil 2.3: Farklı yayılım şekillerine göre ses iletimi	17
Şekil 2.4: Transdüser yapısı	19
Şekil 3.1: Mesaj işareti ve genlik frekans spektrumu	26
Şekil 3.2: Taşıyıcı işareti ve genlik frekans spektrumu	27
Şekil 3.3: DSB işareti ve genlik frekans spektrumu	27
Şekil 3.4: USB işareti ve genlik frekans spektrumu	28
Şekil 3.5: Weaver Yöntemi	30
Şekil 3.6: TYB modülasyonlu işaretin filtre yöntemiyle elde edilmesi	31
Şekil 3.7: Filtre yöntemi ile SSB işareti elde edilişi	31
Şekil 3.8: TYB modülasyonlu işaretin faz yöntemiyle elde edilmesi	32
Şekil 3.9: Faz yöntemiyle SSB demodülasyonu	34
Şekil 4.1: 5509A DSK Blok Diyagramı	37
Şekil 4.2: TMS320VC5509A DSK Codec Arayüzü	38
Şekil 4.3: Sualtı haberleşmesi temel uygulama akış diyagramı	39
Şekil 4.4: SSB modülasyonu kullanarak sualtı haberleşmesi DSP uygulaması	41
Şekil 4.5: SSB işareti modülasyon/demodülasyon akış diyagramı	42
Şekil 4.6: Örnekleme oranının ayırık-zamanda azaltılmasının frekans spektrumunda etkisi	45
Şekil 4.7: Frekans spektrumunda örtüşmenin süzgeç kullanımı ile önlenmesi	46
Şekil 4.8: M kat azaltılmalı sistem blok diyagramı	47
Şekil 4.9: Seyreltme filtresi frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu	47
Şekil 4.10: Örnekleme oranının ayırık-zamanda artırılmasının frekans spektrumuna etkisi	49
Şekil 4.11: Ara değerlendirici blok diyagramı	50
Şekil 4.12: Genişletme filtresi frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu	50
Şekil 4.13: I kanalı BPF işareti frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu	52
Şekil 4.14: I kanalı BPF işareti frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu	52
Şekil 4.15: Taşıyıcı işareti elde etme algoritması	54
Şekil 4.16: Alıcı-Verici işaret işleme birimi	55
Şekil 4.17: Verici yükselteç katı blok diyagramı	57
Şekil 4.18: Güç yükselteci devresinin frekansa bağlı gerilim kazancı	57
Şekil 4.19: Ön yükselteç devre blok diyagramı	58
Şekil 4.20: Ön yükselteç devresinin frekansa bağlı gerilim kazancı	58
Şekil 4.21: İşlemsel yükselteç için tersleyen ve terslemeyen kazanç tasarımı	59
Şekil 4.22: DC ofset uygunlaştırıcılı düşük gürültü hidrofön yükselteci	60
Şekil 4.23: Type 8103 Hidrofön	60
Şekil 4.24: Type 8103 için alma frekans karakteristiği	61
Şekil 4.25: 8103, 8104 ve 8105'in verici frekans yanıtı	61
Şekil 4.26: Rasgele taşıyıcı frekansları kullanarak sualtı haberleşmesi DSP uygulaması akış diyagramı	65
Şekil 4.27: Verici için "Rasgele Taşıyıcı Frekansı Üretme Algoritması"	67

Şekil 4.28: Alıcı için “Rasgele Taşıyıcı Frekansı Algılama Algoritması”.....	68
Şekil 5.1: Tek DSK’lı uygulama ortamı	70
Şekil 5.2: Mikrofon sol kanal ses işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	71
Şekil 5.3: Ses işaretinin seyreltme filtresi sonucu (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	71
Şekil 5.4: I kanalı bant geçiren filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	72
Şekil 5.5: I kanalı genişletme filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	72
Şekil 5.6: Q kanalı bant geçiren filtre çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	72
Şekil 5.7: Q kanalı genişletme filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	73
Şekil 5.8: Taşıyıcı işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	73
Şekil 5.9: I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	74
Şekil 5.10: Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	74
Şekil 5.11: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	74
Şekil 5.12: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	75
Şekil 5.13: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	75
Şekil 5.14: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	76
Şekil 5.15: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	76
Şekil 5.16: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	76
Şekil 5.17: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	77
Şekil 5.18: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	77
Şekil 5.19: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	77
Şekil 5.20: İki DSK’lı uygulama ortamı	78
Şekil 5.21: Taşıyıcı işareti (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	79
Şekil 5.22: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	80
Şekil 5.23: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	80
Şekil 5.24: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	80
Şekil 5.25: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	81

Şekil 5.26: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	81
Şekil 5.27: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	81
Şekil 5.28: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	82
Şekil 5.29: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	82
Şekil 5.30: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	83
Şekil 5.31: Hidrofonun alıcı hassasiyetin doğrulanması için kalibrasyon ölçüm sistemi	84
Şekil 5.32: Kalibrasyon ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	84
Şekil 5.33: Sualtı test havuzu ölçüm sistemi.....	88
Şekil 5.34: 8 kHz için su havuzu test ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	89
Şekil 5.35: 12 kHz için su havuzu test ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	90
Şekil 5.36: 16 kHz için su havuzu test ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	90
Şekil 5.37: Sualtı test havuzu uygulama ortamı.....	91
Şekil 5.38: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	92
Şekil 5.39: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	92
Şekil 5.40: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	92
Şekil 5.41: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	93
Şekil 5.42: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	93
Şekil 5.43: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	93
Şekil 5.44: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	94
Şekil 5.45: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	94
Şekil 5.46: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	94
Şekil 5.47: Rasgele taşıyıcı işareti algılama algoritması kullanılarak elde edilen işaretin frekans bölgesi genlik spektrumu.....	96
Şekil 5.48: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	97
Şekil 5.49: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	97
Şekil 5.50: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	97

Şekil 5.51: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	98
Şekil 5.52: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	98
Şekil 5.53: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	98
Şekil 5.54: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu.....	99
Şekil 5.55: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	99
Şekil 5.56: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu	99

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Sesin maddelerdeki yayılımı	12
Tablo 2.2: Sualtı akustik kanallarında farklı mesafeler için bant genişlikleri.....	17
Tablo 5.1: Type 4229 kalibratör ile B&K hidrofona ses basınç seviyeleri	83
Tablo 5.2: Hidrofona alma yanıtı listesi	86
Tablo 5.3: Güç yükselteç devresinin frekansa bağlı gerilim kazanç listesi	86
Tablo 5.4: Ön yükselteç devresinin frekansa bağlı gerilim kazanç listesi	86

SİMGELER

A	:Alan
B	:Suseptans
c	:Ses Hızı
dB	:Decibel, Desibel
d_0	:Referans Uzaklık
F	:Kuvvet
G	:İletkenlik
Hz	:Hertz
I	:Sesin Akustik Yoğunluğu
I_B	:Bias Akımı
k	:Boltzmann Sabiti
ρ	:Yoğunluk
P	:Basınç
Pa	:Pascal
P_e	:Etkin Basınç
P_{in}	:Giriş Gücü
Q_m	:Kalite Faktörü
R	:Direnç
T_0	:Örnekleme Periyodu
W	:Watt
X	:Reaktans
Ω	:Açısal Frekans
Y	:Admitans
Z	:Empedans

Kısaltmalar

A/D	:Analog/Digital, Analog/Sayısal
ADC	:Analog/Digital Converter, Analog/Sayısal Dönüştürücü
AM	:Amplitude Modulation, Genlik Modülasyonu
AYB	:Alt Yan Bant
BOSR	:Base Oversampling Rate, Temel Aşırı Örnekleme Hızı
BPF	:Band Pass Filter, Bant Geçiren Filtre
CCS	:Code Composer Studio
CE	:Chip Enable, Yonga Etkinleştirme
CLKIN	:Clock In, Saat Giriş Sürücü
CLKOUT	:Clock Out, Saat Çıkış Sürücü
CODEC	:Coder / Decoder, Ses A/D Ve D/A Dönüştürücü Tümüleşik Devresi
CPLD	:Complex Programmable Logic Device, Karmaşık Programlanabilir Mantık Aygıtı
CPU	:Central Processing Unit, Merkezi İşlemci Birimi
CSL	:Chip Support Library, Yonga Destek Kütüphanesi
DAC	:Digital/Analog Converter, Sayısal/Analog Dönüştürücü
DARAM	:Dual Access RAM, Çift Erişimli RAM
DC	:Duty Cycle, Görev Döngüsü
DI	:Directivity Index, Yönlülük İndeksi
DIP	:Dual In-Line Package, Çift Hat Paketi
DMA	:Direct Memory Access, Doğrudan Bellek Erişimi
DSB	:Double Side Band, Çift Yan Bant
DSK	:DSP Starter Kit, DSP Deneme Kiti
DSP	:Digital Signal Processor, Sayısal İşaret İşleyici
EMIF	:External Memory Interface, Harici Bellek Arayüzü
EVM	:Evaluation Module, Geliştirme Modülü
FFT	:Fast Fourier Transform, Hızlı Fourier Dönüşümü
FIR	:Finite Impulse Response, Sonlu Tepki Yanıtı
FLASH	:Blok Halinde Silinip Yazılabilen Bellek
GPIO	:General Purpose Input Output, Genel Amaçlı Giriş Çıkış
I	:Inphase, Eş Fazlı
I/O	:Input/Output, Giriş/Çıkış
İC	:Inter-Integrated Circuit, Tümüleşik Devrelerarası
IIR	:Infinite Impulse Response, Sonsuz Tepki Yanıtı
IL	:Intensity Level, Yoğunluk Seviyesi
ISR	:Interrupt Service Routine, Kesme Hizmet Programı
JFET	:Junction Gate Field-Effect Transistor, Birleşik Kapılı Alan Etkili Transistör
JTAG	:Joint Test Action Group, Ortak Test Eylem Grubu
LCD	:Liquid Crystal Display, Likit Kristal Ekran
LCDC	:Liquid Crystal Display Controller, Sıvı Kristal Ekran Denetleyici
LED	:Light Emitting Diode, Işık Yayan Diyot
LPF	:Low Pass Filter, Alçak Geçiren Filtre

LSB	:Lower Side Band, Alt Yan Bant
McBSP	:Multichannel Buffered Serial Port, Çok Kanallı Tamponlanmış Seri Port
MCLK	:Master Clock, Birincil Saat
MMC	:Multimedia Card, Harici Taşınabilir Bellek
MRA	:Maximum Response Axis, Maksimum Yanıt Ekseini
NL	:Noise Level, Gürültü Seviyesi
OCV	:Open Circuit Voltage, Açık Devre Gerilimi
PC	:Personal Computer, Kişisel Bilgisayar
PL	:Pulse Length, Darbe Uzunluğu
PLL	:Phase Locked Loop, Faz Kilitlemeli Çevrim
Q	:Quadrature, Dördün
RAM	:Random Access Memory, Rastgele Erişimli Bellek
RMS	:Root Mean Square, Karesel Ortalamaların Karekökü
ROM	:Read Only Memory, Salt Okunur Bellek
RTC	:Real Time Clock, Gerçek Zamanlı Saat
SARAM	:Single Access RAM, Tek Erişimli RAM
SCLK	:Serial Clock, Seri Saat
SDIN	:Serial Data In, Seri Veri Girişi
SDRAM	:Synchronous Dynamic RAM, Eşzamanlı Dinamik RAM
SIL	:Sound Intensity Level, Ses Yoğunluk Seviyesi
SL	:Source Level, Kaynak Seviyesi
SNR	:Signal To Noise Rate, İşaret Gürültü Oranı
SPL	:Sound Pressure Level, Ses Basınç Seviyesi
SR	:Sample Rate, Örnekleme Hızı
SSB	:Single Side Band, Tek Yan Bant
SSB – SC	:Single Sideband Modulation Supressed Carrier, Taşıyıcısı Bastırılmış Tek Yan Bant Modülasyonu
SSP	:Sound Speed Profile, Ses Hız Profili
STANAG	:Standardization Agreement, Standartlandırma Mutabakatı
TCR	:Transmitting Current Response, İletilen Akım Yanıtı
TI	:Texas Instruments
TL	:Transmitting Loss, İletim Kaybı
TVR	:Transmit Voltage Response, İletim Gerilim Yanıtı
TYB	:Tek Yan Bant
USB	:Upper Side Band, Üst Yan Bant
ÜYB	:Üst Yan Bant

DSP ile SUALTI HABERLEŞME UYGULAMASI

Murat KUZLU

Anahtar Kelimeler: Sualtı Akustik İletişimi, Sualtı Telefonu, DSP, Tek Yan Bant (SSB)

Özet: Sualtı akustik iletişimi, ses frekansındaki işaretleri taşıyıcı işaret olarak kullanarak sualtından ses ve veri haberleşmesi sağlayan bir iletişim sistemidir. Son yıllarda sualtı akustik iletişimi mühendislik ve araştırma alanı olarak hızla büyümektedir. Özellikle denizaltı-gemi, denizaltı-denizaltı ve gemi-denizaltı iletişimi için sualtı akustik iletişimi oldukça önemli hale gelmiŐtir.

Geçmiş yıllardan beri DSP mimarisi ve teknolojisinde büyük gelişmeler sağlanmıştır. Bu yenilikler, DSP'nin daha önce kullanılmadığı, sualtı haberleşmesi gibi, alanlarda da kullanılmasına olanak tanımıştır.

Bu tezde ilk olarak sualtı haberleşme temelleri ve standartları araŐtırılmıŐ ve sualtı haberleşmesi işaret işleme gereksinimlerinin MATLAB ile benzetimi gerçekteŐirilmıŐtir. Daha önce analog olarak gerçekteŐirilen sualtı akustik iletişim uygulaması DSP kullanılarak sayısal ortamda gerçekteŐirilmıŐtir ve sualtı haberleşmesi için alternatif çözümler sunulmuştur.

İlk çözümler iki TMS320VC5509A DSK bordu üzerindeki verici ve alıcı taraf ile taşıyıcısı bastırılmış tek yan bant (SSB - SC) modülasyon tekniği ve STANAG 1074'de tanımlanan frekansı da içeren seçilebilir taşıyıcı frekansları (8,0875 kHz - 39 kHz) kullanılarak geliştirilen sualtı akustik haberleşmesi için bir prototip tasarımıdır.

İkinci çözümler iki TMS320VC5509A DSK bordu üzerindeki verici ve alıcı taraf ile taşıyıcısı bastırılmış tek yan bant (SSB - SC) modülasyon tekniği ve rasgele taşıyıcı frekansları kullanılarak (8 kHz - 16 kHz) geliştirilen sualtı akustik haberleşmesi için bir prototip tasarımıdır.

IMPLEMENTATION OF UNDERWATER COMMUNICATION WITH DSP

Murat KUZLU

Keywords: Underwater Acoustic Communication, Underwater Telephone, DSP, Single Side Band (SSB)

Abstract: Underwater acoustic communication is a communication system that provides underwater voice and data communication using the signals at sound frequency as carrier signal. Underwater acoustic communication is a rapidly growing field of research and applied engineering. It is especially necessary for submarine-ship, submarine-submarine and ship-submarine communications.

Recent years have seen rapid advances in DSP (Digital Signal Processor) architecture technologies. These advances have made it possible for DSP's to be used for applications previously considered unsuitable such as underwater communication.

In this thesis, at first underwater communication fundamentals and standards were investigated and requirements of underwater communication digital signal processing were met by simulation using MATLAB. Underwater acoustic communication applications had been done in an analog environment several times before but in this work it is performed digitally by using DSP, and alternative solutions for underwater communication are presented as well.

The first solution is a prototype design for underwater acoustic communication that was developed via the transmitter and receiver sides on two TMS320VC5509A DSK boards by using single sideband - suppressed carrier (SSB - SC) and selectable carrier frequencies (8,0875 kHz - 39 kHz) including the frequency defined in the STANAG 1074.

The second solution is a prototype design for underwater acoustic communication that was developed via the transmitter and receiver sides on two TMS320VC5509A DSK boards by using upper sideband - suppressed carrier (SSB - SC) and random carrier frequencies (8 kHz - 16 kHz).

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Sualtı kablosuz iletişim teknolojileri, deniz-aşırı petrol sanayisinde uzaktan kontrol, çevresel sistemlerde kirlilik gözlemlene, sualtı sensörleri ile kaydedilen bilimsel verilerin toplanması, insansız sualtı araçları, dalgıçlar arasındaki konuşma iletişimi ve cisim algılama-kurtarma için okyanus tabanının haritasının çıkarılması gibi uygulamalar için oldukça önemlidir. Kablosuz sualtı haberleşmesi akustik dalgaların iletimine dayanmaktadır. Kablosuz sualtı haberleşmesinde radyo dalgaları az kullanılır; çünkü ortam koşullarına bağlı olarak radyo dalgaları ciddi şekilde zayıflamaktadır. Sualtı akustik iletişim kanalları idealden çok uzaktır. Bu kanallar çok sınırlı bant genişliğine sahiptir ve genellikle hem zaman hem de frekans boyutunda ciddi işaret dağılımlarına neden olurlar [1-5].

Akustik taşıyıcının kısa menzilde (birkaç kilometre) kullanılmasının ana nedeni, yüksek haberleşme hızının (birkaç kbyte/sn) elektromanyetik enerjiye göre sualtında çok az bir şekilde soğurulmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, 10 kHz frekansında enerjinin soğurulması elektromanyetik dalgalar için 3000 dB/km iken, akustik dalgalar için 1 dB/km'dir. Bu nedenle, akustik taşıyıcı kullanımı elektromanyetik yayılım kullanımına göre çok daha etkili bir çözümdür [6]. Elektromanyetik dalgalar sualtında uzun mesafelere yayılım yapamaz, bu nedenle kullanılan akustik dalgalar sualtı haberleşmesi sağlamak için oldukça önemlidir [7]. Sualtı akustik haberleşme kanalındaki mevcut bant genişliği iletim kaybının hem frekans hem de mesafe ile artması ile önemli derecede sınırlıdır [1,68]. Sualtı akustik iletişim kanalında yola bağlı kayıp sadece iletim mesafesine değil, aynı zamanda işaret frekansına bağlıdır. Bu nedenle, işe yarar bant genişliği, sualtı akustik sistemini karasal radyo iletişim sisteminden ayıran bir özellik olan iletim mesafesine bağlıdır [69]. Geleneksel haberleşme teknikleri, günümüzde oldukça ileri seviyelerde olmasına rağmen sualtı haberleşmesi için henüz çok gelişmemiştir [11].

Sualtı akustik iletişimi, ses dalgasını taşıyıcı olarak kullanarak sualtından ses ve veri haberleşmesi sağlayan bir iletişim sistemidir [67]. İlk modern sualtı iletişim sistemlerinden olan sualtı telefonu 1940'lı yıllarda 2. Dünya Savaşı'nda ABD tarafından denizaltılarla iletişimi sağlamak için geliştirilmiştir [2,13]. Bu cihaz frekansı 8-11 kHz arasında değişen taşıyıcısı bastırılmış tek yan bant modülasyonunu (SSB) kullanır ve birkaç km mesafeye kadar akustik işaret gönderme kapasitesine sahip bir tasarımdır. Geçmiş birkaç sene içinde, sualtı akustik iletişim sistemlerinde iletim mesafesi ve veri işleme açısından önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Sualtı platformlarının onarımının gerçekleştirilmesinde dalğışlar yerine akustik olarak kontrol edilen robotlar kullanılmış[8]; okyanus diplerinden yüzeye yüksek-kaliteli video iletişimi kurulmuş[9] ve 200 km'den fazla yatay mesafede veri telemetrisi uygulaması gerçekleştirilmiştir [10].

Geçmiş yıllardan beri DSP mimarisi ve teknolojisinde büyük gelişmeler sağlanmıştır. Bu yenilikler, DSP'nin daha önce kullanılmadığı, sualtı haberleşmesi gibi, alanlarda da kullanılmasına olanak tanımıştır. Performans düşümü ve güvenilirlik, cihazın kusurlarına göre zamanla değişir ve mekanik gürültü ve sıcaklık gibi çevresel faktörler de istenmeyen sorunları beraberinde getirir. Sayısal işaret işleme, bu limitlerin hemen hemen hepsini gideren çözümler üretir. Sayısal tekniklerin her ne kadar kendi doğalarından kaynaklanan bazı dezavantajları olsa da, yüksek veri hızlarında ve yüksek frekanslı uygulamalarda analog teknolojilere göre büyük üstünlük sağlamaktadır [52-55].

Sayısal işaret işleme, aktif ve pasif elemanlar kullanarak işaretleri analogdan sayısala, sayısaldan analoga dönüştüren ve sayısal işlemler yapan bir mühendislik dalı olarak tanımlanabilir. Analogdan sayısala dönüştürücüler, örnekleme işlemini kullanarak sürekli bir işareti ayrık sayı kümelerine çevirmektedir. Sayısaldan analoga dönüştürücüler ise, sayısal işaretleri, alçak geçiren filtreler yardımıyla yeniden inşa ederek analog işaretlere çevirmektedir. Sayısal işaretler, DSP'de ikili dijitleri yani bitleri kullanarak ifade edilirler.

Shannon, işarettaki bilginin sonlu sürekli bir işaretin ayrık alt kümesi şeklinde olduğunu gösteren ilk bilim adamıdır. Bunun yanında, bu ayrık işaretin orijinal

işareten herhangi bir bilgi kaybetmeden seçilip alınması için gereken koşulları açıklamıştır. Her ne kadar Joseph Fourier tarafından 1807 yılında keşfedilen Fourier Dönüşümü çok önemli olsa da, günümüz işaret işleme sistemlerinin temeli Shannon tarafından atılmıştır. 1930'larda Nyquist, bir analog işareti iki kat yüksek frekansta örneklemenin, teorik olarak işareti herhangi bir veri kaybı olmadan yeniden inşa etmeye yeteceğini anlattığı örnekleme teorisini kaleme almıştır. Shannon ve Nyquist, işaret işlemede iki temel fikir üretmiştir. 1950'lerde Cooley ve Tukey tarafından keşfedilen Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform), mikroişlemcilerin 1970'lerde gelişimi ve 1980'lerde DSP'lerin keşfi, işaret işleme konusunda hızlı ilerlemeyi beraberinde getirmiştir [52].

Bu çalışmanın amacı daha önce analog olarak gerçekleştirilmiş mevcut uygulamaları olan sualtı haberleşme uygulaması için bir sayısal işaret işlemci kullanarak sualtı haberleşmesi için önerilen tek yan bant (SSB) modülasyon/demodülasyon işlemlerini gerçekleştirebilen DSP tabanlı alternatif çözümler sunmaktır. Bu kapsamda alıcı ve verici taraf olmak üzere iki TMS320VC5509A DSK ile STANAG 1074 standardında tanımlanan frekansı da içeren seçilebilir taşıyıcı frekansları (8,0875 kHz - 39 kHz) ve rasgele taşıyıcı frekansları (8 kHz - 16 kHz) kullanarak geliştirilen taşıyıcısı bastırılmış üst yan bant (SSB - SC) modülasyon tekniği ile sualtı akustik haberleşme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak sualtı haberleşmesinde daha esnek, anlaşılır ve uygulanabilir bir sualtı haberleşmesi ve rasgele taşıyıcı frekansı üretme ve algılama algoritması ile sürekli değişen taşıyıcı frekansları kullanarak daha güvenilir bir sualtı akustik haberleşme prototipi gerçekleştirilmiştir.

Sualtı akustik haberleşme uygulamaları/çalışmaları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

[53]'de farklı sualtı ortamlarında haberleşme için esnek bir sualtı akustik modem tasarlanmıştır. Sualtı akustik modem için fiziksel katman algoritmalarının test ve uygulaması gösterilmiştir. Sunulan fiziksel katmanın çok esnek olduğu ve kolayca değiştirilebileceği görülmüştür.

[25]'de kablosuz sualtı haberleşmesi alıcı verici tasarımı çalışmasında, kablosuz sualtı haberleşmesi karakteristikleri belirtilmiş ve sualtı akustik kanal modeli, alıcı

verici tasarımı ve farklı frekanslar için iletim mesafeleri gösterilmiştir. Kanal frekansı arttıkça akustik enerjinin soğurulmasının arttığı ve iletim mesafesinin azaldığı görülmüştür.

[67]'de basit bir sualtı akustik iletişimi DSP uygulaması anlatılmış, sualtı haberleşmesi için kullanılan DSP ve yazılımının alt katmanları gösterilmiştir.

[69]'da sualtı akustik kanalındaki kapasite ve mesafe ilişkisi belirtilmiş, kanal modelini ve modeli etkileyen nedenler gösterilmiştir. Mesafe ve frekans arasında yüksek frekanslı enerjinin soğurulmasından dolayı ters ilişki olduğu görülmüştür.

[52]'de sayısal işaret işleme (DSP) tabanlı sualtı akustik haberleşme çözümleri, DSP teknolojisinin analog teknolojilere göre üstünlükleri, sistem olarak avantajları belirtilmiş ve temel bir sayısal sualtı haberleşmesi alıcı-verici blokları gösterilmiştir.

[55]'de sayısal işaret işleme (DSP) tabanlı bir sayısal sualtı akustik ses iletişimi üzerinde durulmuş, DSBSC ve SSB modülasyon teknikleri kullanıldığında analog sistemden kaynaklanan çoklu kanal, kanal zayıflaması gibi etkilerin sayısal işaret işlemci kullanılan sistemlerle kolayca üstesinden gelinebildiği görülmüştür.

[5]'de yüksek hızlı sualtı akustik haberleşmesindeki problemler ve verimli bant genişlikli eş zamanlı faz yöntemleri belirtilmiştir. Kullanılan sualtı haberleşme sistemlerinin eş zamansız olduğu bant sınırlı sualtı haberleşmesinde yüksek hızlı veri haberleşmesi için verimli bant genişlikli tekniklerin kullanılması gerektiği görülmüştür.

[54]'de mevcut sualtı sistemlerinin düşük hızlarda veri haberleşmesi yaptığı, gelecek sualtı haberleşme sistemlerinin daha karmaşık algılama algoritmaları kullanılarak daha adaptif ve dinamik olacağı belirtilmiştir. Dinamik sualtı ortamının etkilerine uygun verimli DSP tabanlı sualtı haberleşme uygulaması gerçekleştirildiği görülmüştür.

[30]'da sualtı haberleşme sistemlerinde kullanılan transdüserlerin özellikleri, seçilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar ve transdüser güç transferini etkileyen nedenler belirtilmiştir.

[11]'de sualtı telefonunun geçmişi, bugünü, geleceği ve sualtı telefonunda kullanılan tekniklerden bahsedilmiş ve gelinen noktanın daha ileride olduğu görülmüştür.

1.2. Problemin Tanımlanması

Şu anda kullanılan sualtı haberleşme sistemlerinin çoğunda analog teknolojiler kullanılmaktadır. Sayısal sistemler analog teknolojilere göre pek çok üstün özelliğe sahiptir. DSP tabanlı sistemlerin bir avantajı, eğer gerekirse donanımda bir değişiklik yapmadan sadece yazılımı değiştirerek bağımsız bir yan bant modülasyon sistemi elde edilebilmesidir [52]. Sualtı haberleşmesi için genel olarak kullanılan ve önerilen tek yan bant modülasyon teknikleri Faz, Weaver ya da Filtre metotlarıdır. Bu metotların kullanımında düşünülmesi gereken en önemli faktör yan bantın bastırılmasıdır. Bu metotlar DSP ile rahat bir şekilde gerçekleştirilebilir. Taşıyıcı işareti üretmek için, istenilen frekans aralığında bir osilatör ve kestirim DSP ile kolayca yapılabilir.

Bu gereksinimler ve avantajlar doğrultusunda ortaya çıkan bu çalışmada, sualtı haberleşme sistemlerinin başında gelen sualtı telefonu için alıcı ve verici taraf olmak üzere 2 (iki) TMS320VC5509A DSK ile taşıyıcısı bastırılmış üst yan bant (SSB - SC) modülasyon tekniği kullanılarak STANAG 1074 standardında belirtilmiş frekansta bir sualtı haberleşmesi uygulaması ve rasgele taşıyıcı frekansları kullanarak daha güvenilir bir sualtı akustik haberleşme prototipi gerçekleştirilmiştir.

1.3. Yaklaşım Metodu

Sualtı akustik iletişimi, ses dalgasını taşıyıcı işareti olarak kullanarak sualtından ses ve veri haberleşmesi sağlayan bir iletişim sistemidir. Sistem, ses işaretlerini seçilen çalışma frekansına uygun transdüser üzerinden gönderip, almaktadır. Çoğu sualtı haberleşme sistemleri tek yan bant (SSB) modülasyonu kullanır [11,12]. Sualtı

haberleşmesi için kullanılan modülasyon Taşıyıcısı Bastırılmış Üst Yan Bant (SC-USB) modülasyonudur.

Bu çalışmada sualtı akustik haberleşme sisteminden beklenen yetenekleri karşılayacak ve telefon çalışma frekanslarının ses frekansı bölgesinde olmasından dolayı bu frekans bandına uygun bir DSP işlemcisi seçilmiştir. İstenen modülasyon işaretleri, çalışma frekansları, filtreleme işlemleri sayısal ortamda işaret işleme algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ses uygulamalarında kullanılan CODEC tümleşik devreleri sayesinde ses işaretlerinin sayısal hale dönüştürülmesi ve modülasyon/demodülasyon işaretlerinin ses işaretlerine dönüştürülmesi işlemleri yüksek kalitede ve basitçe karşılanmıştır.

Sualtı haberleşme uygulaması DSP ile gerçekleştirilmeden önce ilk olarak Matlab'da benzetimi yapılmış ve uygulanacak olan filtreler ile bu filtrelere ait karakteristikler belirlenmiştir. Bunun devamında bir işaret üzerinde tek yan bant modülasyon/demodülasyon sonuçları incelenmiş ve son olarak uygulama platformu olan DSP bordu ile sistem gerçekleştirilmiştir. Araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bir model olarak ticari ürünleri içeren birkaç akustik modem uygulaması bulunmaktadır [16-18].

1.4. Özgün Katkı

Sualtı akustik iletişimi son yıllarda daha fazla önem taşımaya başlamış ve özellikle askeri organizasyonlar tarafından denizaltı-gemi, denizaltı-denizaltı ve gemi-denizaltı iletişimi için bu yönde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada daha önce analog olarak gerçekleştirilen sualtı akustik iletişim uygulaması sayısal ortamda DSP ile gerçekleştirilmiş ve sualtı haberleşmesi için alternatif çözümler sunulmuştur. Önerilen sayısal çözümler, eski analog teknolojiye göre daha üstün bir performans sağlamaktadır. DSP'lerdeki gelişmeler ve dönüştürme teknolojileri, sayısal çözümleri daha ekonomik hale getirmiş ve sunulan sayısal sistem baştan sona sistem boyutlarını ve maliyetleri düşürüp, performansı, kalite ve güvenilirliği artırıcı bir yapıya sahip olmuştur. Bu çalışmada sualtı haberleşme uygulaması DSP üzerinde gerçekleştirilmeden önce ilk olarak Matlab'da bir benzetimi yapılmış ve uygulanacak

olan filtreler ile bu filtrelerin karakteristikleri belirlenerek gerçekleştirilebilirliği gösterilmiştir. Sualtı haberleşmesinde daha esnek, anlaşılır ve uygulanabilir bir sualtı haberleşmesi geliştirilecek yöntemlere geniş bir bakış getirilmiştir. Bunun yanında rasgele taşıyıcı frekansı üretme ve algılama algoritması kullanarak sürekli değişen taşıyıcı frekansları kullanılmış ve daha güvenilir bir sualtı akustik haberleşme prototipi gerçekleştirilmiştir.

1.5. Tez Düzeni

Bu çalışma toplam 6 (altı) bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de çalışmanın amacı, kapsamı, yaklaşım metodu ve özgün katkısı hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 2’de sualtı haberleşmesi ve ses temelleri genel ifadelerine yer verilmiş ve temel akustik yayılım matematiksel ifadeleri irdelenmiştir. Bölüm 3’de Tek Yan Bant (SSB) modülasyon/demodülasyon işlemleri, SSB modülasyon ve demodülasyon için kullanılan faz yöntemi incelenmiştir. Bölüm 4’de çalışma boyunca gerçekleştirilmiş uygulama çalışmaları ve uygulama adımları anlatılmış, DSP uygulama ortamı hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bölüm 5’de DSP uygulama sonuçları grafiklerle anlatılmış ve farklı uygulama ortamları için sonuçlar değerlendirilmiştir. Bölüm 6’da çalışma sonuçları yorumlanmış ve ileride yapılabilecek çalışmalar için öneriler verilmiştir.

2. SES KAVRAMI VE SUALTI SES YAYILIMI

2.1. Ses Nedir

Tüm sesler bir şekilde oluşan titreşimlerin sonucudur. Hava basıncının meydana getirdiği etkiden yararlanılarak, mikrofonlar aracılığıyla sesin elektriğe çevrilmesi, bunun tersi bir işlemle de hoparlör vasıtası ile elektriğin sese çevrilmesi sağlanmaktadır.

İnsan gözünün görüş alanı sınırlıdır. Yaklaşık 120°'lik bir açı ile görme yapabiliriz. Ama kulak için bir görüş alanından bahsedilemez. Ses hangi yönden gelirse gelsin kulak tarafından duyulabilir. Bu duyma için ses kaynağına doğru bir yönelme gerekmez. Ses kaynağının yerini bulmak için iki kulak arasındaki uzaklık farkı kullanılır. Çünkü iki kulak arasındaki ses şiddeti farklıdır. İşitme duyumuzun ayrı bir özelliği ise, onu gözden ayrı olarak kullanabiliriz. Bir şeye bakabilir ama başka bir yöndeki sesle ilgilenilebilir. Nasıl ki ışıkta bir görülebilir alan varsa seste de bir duyulabilir alan vardır. Ses belli ortamlarda yayılarak ilerleyebilir. Sesin havada ilerleme hızı saniyede 343 metre iken suda ortalama 1400 metre, katı cisimlerde ise saniyede 6000 metredir [20]. Konuşan kişi yaklaştıkça sesin duyulabilirliği de artar. Buna ses yakınlığı denir, ses yakınlığı kullanılan mikrofonun türüne, mekânın akustiğine, ses kaynağının gücüne, mikrofona gelen doğrudan ve yansıyan işaretlere göre değişme gösterir. Yer değiştiren moleküllerin sayısı büyüdükçe ses dalgası da büyüyecektir. Hareket eden her molekül sayısı bir ses dalgasının büyüklüğünü belirler ve bu genlik olarak adlandırılır. Ses yoğunluğu dB olarak gösterilir. İnsanlar 0 dB ile 120 dB arasında bir ses yoğunluğu alanını işitebilirler. Bu alan dinamik alan olarak isimlendirilir. Suda insan kulağının duyma eşik performansı üzerine çalışılmış [21,22] ve görülmüş ki yüksek frekanslarda sualtı duyma eşiği havadakinden daha yüksektir.

Kulağımız akustik dalga titreşimlerini toplayarak sesi ayırt etmemizi sağlar. Titreşimler ortam içerisindeki moleküller arasında oluşur ve madde içerisinde dalgalar halinde yayılır. Ses dalgaları madde içerisinde ilerledikçe her bir molekül bir diğerine çarpar ve tekrar ilk yerine geri döner. Sonuçta moleküler yapı olarak ortamda bazı bölgeler daha yoğun (condensation) bazıları da daha seyrek (rarefactions) olur [23].

Yayılan bir ses dalgası, alıcı tarafta basınçtaki değişimlere, alçalmalara ve değişken basınç sıkıştırılmalarına göre algılanmaktadır. Kulak yapımız ve insanlar tarafından tasarlanan alıcıların yapısı, bu ses basıncındaki dalgalanmalara karşı hassastır. Ses dalgalarının en genel özellikleri; genlik, dalga boyu ve frekanstır. Bir ses dalgasının genliği, titreşimlerin uzandığı maksimum yayılım miktarı ile orantılıdır. Genlikteki küçük değişiklikler cılız ve ya zayıf bir ses üretirken, büyük değişiklikler ise güçlü ve gürültülü seslerin ortaya çıkmasına neden olur. Bir dalganın dalga boyu, dalganın titreşim süresinin bir turunda gittiği mesafe, iki dalga tepe arası mesafe ya da iki başarılı sıkıştırma alanı arasındaki mesafe olarak adlandırılır. Bir sesin frekansı ise, dalga tanelerinin salınımı ya da osilasyon oranı olarak adlandırılır. İnsan kulağı, frekanstaki artma yönündeki değişimleri yüksek seviyeli ses, genlikteki artışları ise gürültülü ses olarak algılar. İnsanlar genel olarak 20 Hz ile 20000 Hz arasındaki sesleri duymaktadır. 20 Hz'in altındaki sesler infrasonik, 20000 Hz'in üzerindeki sesler ise ultrasonik olarak adlandırılır [26].

2.2. Ses Hızı ve Profili

Herhangi bir dalgada olduğu gibi bir ses dalgasının hızı da frekans ve dalga boyuna matematiksel bir bağıntı ile bağlıdır. Ses hızının temel bir ifadesi (2.1) nolu denklemde verilmiştir:

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad (2.1)$$

β (Newton/m² veya Pa) suyun elastik özelliği (bulk modulus), ρ su yoğunluğunu (kg/m³), c ses hızını (m/sn) gösterir. β suyun elastik özelliği

$$\beta = V \frac{du}{dV} \quad (2.2)$$

formülü ile verilir. V hacim, u akustik basıncı gösterir. Buna göre havada ses hızı $\beta=1.42 \times 10^5$ (Newton/m²) ve $\rho=1.3$ (kg/m³) olmak üzere, yaklaşık 330 m/sn, deniz suyunda ses hızı $\beta=2.06 \times 10^9$ (Newton/m²) ve $\rho=1000$ (kg/m³) olmak üzere, yaklaşık 1435 m/sn olarak bulunur.

Ses hızı profilleri (Sound speed profile, SSP) derinliğe göre ses hızının değişimini gösteren grafiklerdir. SSP'ler hava durumuna, mevsime, tuzluluğa v.b. bağlıdır. Ses hızının derinlik, sıcaklık, tuzluluk v.b. parametrelere bağlılığı deneysel verilere dayanan çeşitli biçimlerde ifade edilmiştir [24].

$$c = 14929 + 3(T-10) - 6.10^{-3}(T-10)^2 - 4.10^{-2}(T-18) \quad (2.3)$$

$$+ 1.2(S-35) - 10^{-2}(T-18)(S-35) + H/61$$

(2.3)'deki eşitlikte T (°C) sıcaklık, S (ppt, parts per thousand) tuzluluğu, H (m) derinlik olarak verilir. Örneğin 10 °C sıcaklıkta yaklaşık 0 m derinlikte 35 ppt oranında tuzlulukta ses hızı 1490 m/sn bulunur. Ses hızının sıcaklık, tuzluluk ve derinlikle değişimini tanımlayan yaklaşık katsayılar

$$\frac{\Delta c}{\Delta T} = 3.4 \frac{m/s}{1^\circ C}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta S} = 1.2 \frac{m/s}{1ppt} \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta H} = 17 \frac{m/s}{1000m}$$

olarak verilir. (2.4) nolu eşitlikte Δc hız değişimini, ΔT sıcaklık değişimini, ΔS tuzluluk değişimini, ΔH derinlik değişimini belirtmektedir. Görüldüğü gibi tüm parametrelerdeki değişimler ses hızının artışına neden olmaktadır [24].

Ses içinden geçtiği ortama bağlı olarak farklı hızlarda hareket eder. 3 (üç) farklı ortam (gaz, sıvı, katı) arasında ses en yavaş gaz/hava ortamında hareket etmektedir. Sesin en hızlı iletildiği ortam en yüksek yoğunluk değerine sahip olan katı ortamlardır. Bunları sıvı ortamlar takip etmektedir. Bulunulan ortamdaki sıcaklık değişiklikleri de sesin hızında farklılıklara sebep olmaktadır.

Gazlı ortamlarda ses özellikleri incelendiğinde ortamdaki moleküllerin çarpışması ile sıkışma ve seyrekleşme bölgelerinde hareket edebildiği görülmüştür. Dolayısıyla sesin hızı moleküler çarpışmalar arasındaki ortalama hıza bağlıdır. Özellikle gaz ortamlarında ortam sıcaklığının moleküler çarpışma hızına etkisi oldukça fazladır. Daha düşük sıcaklıklarda moleküller daha seyrek çarpışarak sesin ortamda daha az hızla iletilmesine yol açtığı bilinmektedir. Örnek vermek gerekirse donma noktası olan 0 °C'teki gazlı ortamda ses 331 m/sn hızla hareket ederken, 20 °C oda sıcaklığında 343 m/sn hızla ilerlemektedir.

Sıvı ortamlarda ses, gazlı ortamlara göre moleküler yapısı daha sıkı olduğundan daha yüksek hızda iletilmektedir. Tatlı suda ses 1482 m/sn hızla iletilmektedir. Bu değer havadaki iletim hızının yaklaşık 4 katıdır. Birçok deniz canlısı sıvı ortamlarındaki bu yüksek ses iletimini kullanarak birbirleri ile uzak mesafelerden iletişim kurabilmekte ve yiyeceklere ulaşabilmektedirler.

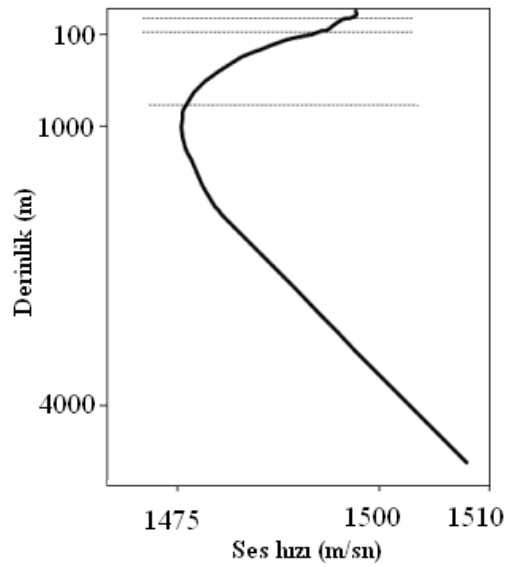
Katı ortamlar sesin en hızlı iletildiği ortamlardır. Bunun sebebi moleküler yapılarının gaz ve sıvı ortamlara kıyasla daha yoğun olmasıdır. Örnek olarak ses dalgaları elik bir maddede hava ortamına kıyasla yaklaşık 17 kat daha hızlı iletilmektedir [23]. Tablo 2.1'de sesin maddelerdeki yayılım listesi verilmiştir.

Sualtındaki ses dalgaları biyolojik ve yapay gürültülerden etkilenmektedir. Özellikle nispeten daha ılık sularda yaşam belirtileri oldukça fazladır. Dolayısıyla bu tip bölgelerde biyolojik gürültü daha fazladır. Akustik işaretlerin iletim mesafesi gürültü ile bastırıldığından zaman zaman önemli düşüşler göstermektedir.

Tablo 2.1: Sesin maddelerdeki yayılımı

Madde	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Hız (m/s)
Gazlar		
Karbon Dioksit	0	259
Oksijen	0	316
Hava	0	331
Hava	20	343
Helyum	0	965
Sıvı		
Kloroform	20	1004
Ethanol	20	1162
Cıva	20	1450
Su	20	1482
Katı		
Kurşun	-	1960
Bakır	-	5010
Cam	-	5640
Çelik	-	5960

Bazı deniz canlıları da yüksek oksijen yoğunluğuna sahiptir ve bu nedenle sualtında hava kabarcıkları yayarlar. Bu hava kabarcıkları ses dalgalarını emmekte, etrafa saçılmalarına neden olmakta, dolayısıyla sesin iletim mesafesinin azalmasına yol açmaktadır. Yüksek tuzluluk değeri de akustik işaretlerin emilmesine, saçılmasına ve dağılmasına neden olmakta, akustik işaretin iletim mesafesini düşürmektedir [23]. Tüm bu örneklerden çıkarılacak sonuç, ses yayılımının daha sıcak ve daha yoğun bölgelerde daha kolay olduğudur. Şekil 2.1’de sualtında ses hız profili verilmiştir.



Şekil 2.1: Sualtı ses hız profili[24]

2.3. Ses Basınç Seviyesi (SPL) ve Ses Yoğunluk Seviyesi (SIL)

Ses Basınç Seviyesi ve Ses Yoğunluk Seviyesi ölçülürken logaritmik gösterge çizelgesi kullanılır ve şu şekilde ifade edilir;

$$SPL(dB) = 20\log(p / p_{ref}) \quad (2.5)$$

$$SIL(dB) = 10\log(I / I_{ref}) \quad (2.6)$$

(2.5) ve (2.6) nolu denklemlerinde verilen p_{ref} referans basıncını, I_{ref} referans yoğunluğunu belirtmektedir. İki yoğunluk arasındaki oranın logaritmasının 10 katı, iki basınç arasındaki oranın logaritmasının 20 katı desibel olarak gösterilmektedir.

SPL ve SIL'nin dB cinsinden değeri, referans yoğunluk (genellikle 1 μ Pa) ve basınç değerlerine göre değişmektedir. SPL ve SIL için birimler, referans yoğunluk (1 μ Pa ya da dB/1 μ Pa) değerine bağlı olarak değişir. Bu terimlere ses ya da yoğunluk seviyesi eklenirse ölçüm birimi de desibel olarak adlandırılır. Çünkü desibel iki değer arasındaki oranı ifade eder ve birimsiz bir büyüklüktür. SPL ve SIL değeri, desibel olarak ölçüldüğünde birbirlerine denktir. SPL ve SIL için referans seviyeleri eşdeğerdir, fakat farklı birimlerle ifade edilirler. Sualtı akustik sistemlerinde referans basınç seviyesi 1 μ Pa olarak gösterilir. Havada ise referans seviye değeri 20 μ Pa'dır. Sudaki referans basınç (p_{ref}), 1 μ Pa rms, su yoğunluğu (ρ_{su}) 1000 kg/m³ ve sudaki ses hızı (c_{su}) 1500 m/s'dir. Genellikle dB cinsinden SIL için birimler, 1 m'deki yoğunluk referansına göre değişir (örneğin, 20 dBre1 μ Pa@1m) [26].

2.4. Hava ve Su Arasındaki dB Dönüşümü

Bölüm 2.3'deki tartışma temel alındığında havadaki 120 dB, kesinlikle sudaki 120 dB değerine eşit değildir. Bu referans ölçümlerindeki farklardan kaynaklanmaktadır. Sualtıdaki bir geminin motoru ile bir jet motoru arasında anlamlı bir karşılaştırma

nasıl yapılabilir. Havada, ses basınç seviyesi, 20 µPa olarak referans alınmıştır. Su basınç seviyesi ise 1 µPa olarak referans alınmaktadır. Desibel olarak verilen eşitliğe göre, hava ve su arasındaki dönüşüm faktörü;

$$20\log(p_{su}/p_{hava}) = 20\log(20 \mu Pa/1 \mu Pa) = 26 dB \quad (2.7)$$

Öyleyse, hava ve sudaki eşit basınç değerleri için, basınç 26 dB farklılık göstermektedir. Karakteristik su empedansı, havadakine göre 3600 kat fazladır ve böylece hava ve sudaki eşit basınçlardaki seslerin yoğunluğu için dönüşüm faktörü 36 dB'dir. Eğer farklı referans basınçları (1µPa ve 20µPa) hesaba katılırsa hava ve suda eşit basınçlardaki yoğunluk ölçümleri 62 dB farklılık göstermektedir. Bu dönüşüm hesabının basitçe kurulan bir ilişkiyle sualtı ve havadaki sesler arasında yapıldığı bilinmelidir. Eğer jet motoru, 140 dB (20 µPa@1m) yoğunlukta ise, sualtı eşdeğer yoğunluğu

$$SIL_{su} = SIL_{hava} + 62 dB = 202 dB \text{ re } 1 \mu Pa \text{ olur.}$$

Su ile hava arasındaki fark, basitçe sudaki SIL havadakinden 62 dB çıkartılmasıyla bulunur. Örneğin, suda 190 dB'lik bir ses meydana getiren bir denizaltı, havada kabaca 128 dB'lik bir ses şiddeti meydana getirir. Bu değerler genellemedir ve sesin frekansına göre değişiklik gösterebilmektedir [26].

2.5. Ses Seviyesi

Bir akustik kaynağın ses seviyesi, bir akustik kaynak tarafından emilen yoğunluğunu referans kaynakla karşılaştırır. Referans kaynak akustik merkezden $r = 1m$ referans uzaklıkta 1W akustik güç harcayan çok yönlü bir kaynaktır. Akustik yoğunluk:

$$I_0 = \frac{P_{a,0}}{A_{sphere}} = \frac{1W}{4\pi(1m^2)} = 0.0796 W/m^2 @ 1m \quad (2.8)$$

dB olarak referans kaynak I_{ref} ilişkisi:

$$I_{0,dB} = 10\log\left(\frac{I_0}{I_{ref}}\right) = 10\log\left(\frac{0.0796}{0.667 \cdot 10^{-18}}\right) = 170.8 \text{ dB re } 1\mu Pa @ 1m \quad (2.9)$$

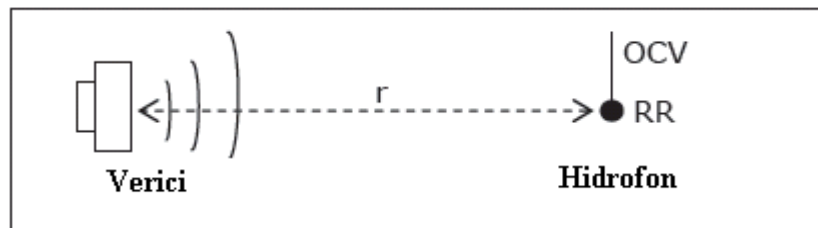
Bilinen referans seviyesi 170.8 dB re 1 μ Pa@1m (2.9) nolu denklemden üretilir. “dB re 1 μ Pa@1m” olan kaynaktan 1m uzaklıktaki referans uzaklıkta 1 μ Pa rms basınçtaki bir yer dalgasının yoğunluğu “yoğunluk seviyesi ilişkisi” olarak iyi anlaşılması gerekir. Çoğu akustik kaynağın 1W’dan farklı bir akustik çıkış gücü vardır ve genellikle çok yönlü değildir. Daha genel bir kaynak olarak kaynak seviyesini bulmak için yönlülüğe göre basit bir (dB) ekleme yaparız.

$$SL = 10\log(P_a) + DI + 170.8 \text{ dB re } 1\mu Pa @ 1m \quad (2.10)$$

P_e akustik çıkış gücü 1W ilişkisi, DI yönlülük ile birçok yönlü kaynak ilişkisi gibi gerçek bir kısaltmadır. Verici gerilim yanıtı, TVR, kaynak seviyesi (2.11) nolu denklemden verilmiştir.

$$SL = TVR + 20\log(V_{rms}) \quad (2.11)$$

TVR değeri, elektrik-akustik verimliliği ve TVR ilişkisi en iyi kullanılan arttırılmış güç seviyesi ile önemli bir derecede düşebileceği için düşük güçte ölçülür. Şekil 2.2’de sualtı akustik verici için ses iletimi basit olarak verilmiştir. Bir verici kaynak seviyesi verici transdüser çevresindeki batırılmış hidrofona gücü ölçülmesi ile zayıflama göz ardı edilerek (2.12) nolu denklemden tahmin edilebilir.



Şekil 2.2: Sualtı akustik verici için ses iletimi[29]

$$SL = 20\log(OCV) - RR + 20\log(r/1m) \quad (2.12)$$

Örnek olarak, hidrofon sonlandırıcısında açık devre (çıkış) gerilimi $OCV = 2.4 V_{rms}$ için $RR = -190 \text{ dB1V}/\mu\text{Pa}$ alıcı yanıtına sahiptir. Bunun anlamı hidrofon yoğunluk seviyesi $IL = 20\log(2.4 V_{rms}) - (-190 \text{ dB } 1\text{V}/\mu\text{Pa}) = 197.6 \text{ dB1V}/\mu\text{Pa}$ 'dır ve eğer hidrofon ve verici arasındaki mesafe $r = 4\text{m}$ ise kaynak seviyesi $SL = IL + 20\log(4\text{m}/1\text{m}) = 209.6 \text{ dB1V}/\mu\text{Pa}@1\text{m}$ olarak hesaplanır [29].

2.6. Sualtı Akustik Yayılmın Temelleri

Sualtıdaki akustik iletişimi temel olarak Yol Kaybı (path loss), Gürültü (noise), Çoklu Yol Etkisi (multi-path), Doppler Etkisi (doppler spread) ve yüksek veya değişken özellikler gösteren Yayılım Gecikmesi (propagation delay) etkilemektedir [27]. Tüm bu faktörler akustik kanalın geçici ve uzaysal değişkenliğini belirleyerek ve sualtındaki akustik kanalın bant genişliğini sınırlı hale getirerek mesafe ve frekansa bağımlı kılmaktadır. Onlarca kilometrede çalışan uzun menzilli sistemler sadece bir kaç kHz frekansa sahipken, ancak onlarca metrede çalışabilen kısa menzilli sistemler 100 kHz frekanstan çok daha fazla bant genişliğine sahip olabilmektedir. Her iki durumda da anılan faktörler düşük bit oranına sebep olmaktadır. Sualtı haberleşmesi uygulamalarında 1 kHz ile 500 kHz arasındaki frekanslar taşıyıcı işaret olarak kullanılabilir. Sualtı akustik cihazlarının büyük çoğunluğu ise 10 kHz ile 100 kHz frekans aralığında çalışmaktadır. Kural olarak sualtında ilerleyen bir akustik işaretin frekansını ne kadar düşürürseniz ses dalgası sualtında o kadar uzak mesafeye gönderilir. Mesela aynı güç/şiddet ile gönderilen 12 kHz frekansa sahip bir akustik işaret 50 kHz'lik bir işaretten daha uzak mesafelerden algılanabilmektedir. Sualtı akustik dalgaların zayıflaması genellikle kaynak mesafesi ile azalır. Bu mesafe ile akustik işaretin zayıflaması frekansa bağlıdır, kaynaktan mesafe artmasıyla daha yüksek frekansta daha güçlü zayıflama olur [28].

Sualtı akustik iletişim hatları menzillerine göre çok uzun, uzun, kısa ve çok kısa hatlar olmak üzere sınıflandırılabilirler. Tablo 2.2'de farklı menziller için sualtı

akustik kanalların bant genişlikleri gösterilmektedir. Ayrıca akustik hatlarını ses hattının yönüne göre dikey ve yatay olarak da kabaca sınıflandırmak mümkündür. Anılan sınıflandırmalara istinaden her birisinin yayılım karakteristiği özellikle Zaman Dağılımı (Time Dispersion), Çoklu Yol Yayılımı (Multi-Path Spread) ve Gecikme Değişimine (Delay Variance) göre farklılık göstermektedir.

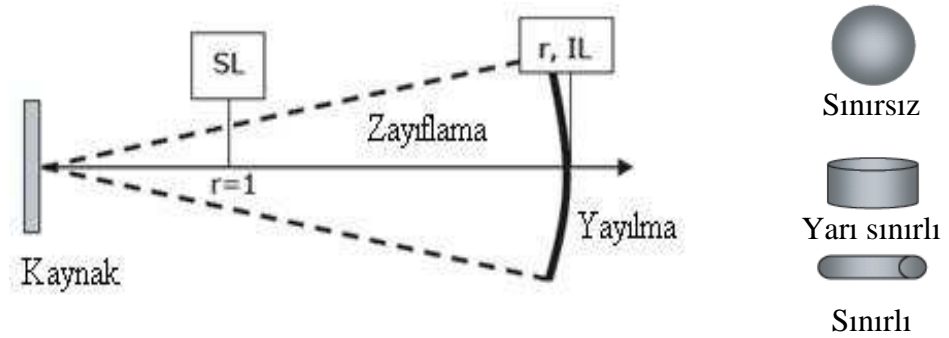
Tablo 2.2: Sualtı akustik kanallarında farklı mesafeler için bant genişlikleri

	Uzaklık (km)	Bant Genişliği (kHz)
Çok Uzak	$20 >$	< 10
Uzak	5-20	5-10
Orta	1-5	~ 20
Kısa	0.1 – 1	20 - 50
Çok Kısa	< 0.1	> 100

Sualtı haberleşmesinde 100 metrenin altında derinlikteki sular için “Sığ Sular”, 100 metreden daha derin sular için “Derin Sular” tanımlaması kullanılır [23].

2.7. Sualtı Ses İletimi

Akustik kaynaklardan elde edilen sesler yoğunluk seviyesi olarak ölçülür ve kaynağa olan uzaklık arttıkça iletim kaybindan (yayılım ve soğurma gibi) dolayı azalır. Küresel yayılım çok yaygındır ve herhangi bir büyük yapıyı yeteri kadar uzağa yerleştirilen uzak alan gereksinim kaynağı için geçerlidir. Silindirik yayılım dip ve yüzey yansımaları sığ suda olur, ses ve güç silindirik olarak yayılır. Ses tam olarak sınırlı olduğunda iletim kaybı formülünde yayılım olmaz ve sadece soğurma kalır. Şekil 2.3’de farklı yayılım şekillerine göre ses iletimi gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Farklı yayılım şekillerine göre ses iletimi[29]

(2.13), (2.14) ve (2.15) nolu denklemlerinde sırası ile küresel, silindirik ve sınırlı yayılım için yoğunluk seviyeleri verilmiştir.

$$IL = SL - TL = SL - 20 \log(r) - \alpha(r - 1m) \quad (2.13)$$

$$IL = SL - TL = SL - 10 \log(r) - \alpha(r - 1m) \quad (2.14)$$

$$IL = SL - TL = SL - \alpha(r - 1m) \quad (2.15)$$

İletim kaybının son terimi zayıflamadır, frekansla önemli derece artar ve bunun yanında basınç, sıcaklık, tuzluluk ve asitlik ile değişir. Doğru yaklaşıklığı bulmak zordur, fakat yaklaşıklık kullanılabilir.

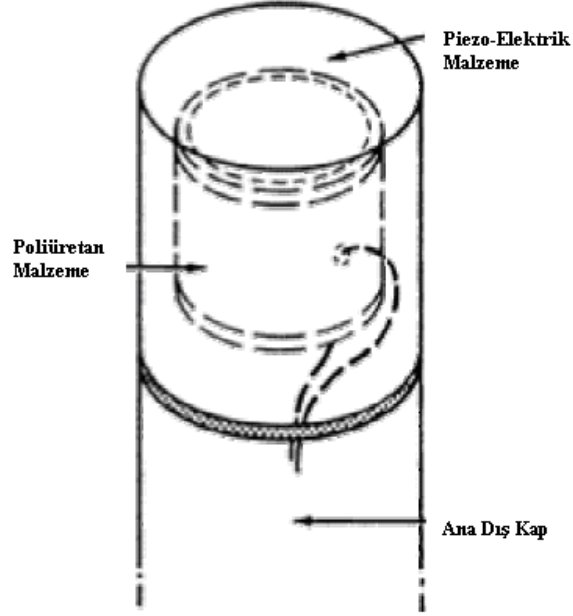
Schulkin&Marsh'in yaklaşıklık terimi, oda sıcaklığında ($T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ve su yüzeyi basınçtaki ($D = 0 \text{ m}$) tatlı su ($S \approx 0 \text{ ppt}$) özel durumda bir frekans $f[\text{kHz}]$ fonksiyonu olarak $\alpha[\text{dB/m}]$ için çok basit formül olarak verilir.

$$\alpha \approx 2.06 * 10^{-7} f^2 (\text{kHz}) \frac{dB}{m} \quad (2.16)$$

2.8. Sualtı Transdüserleri Tanımlamak İçin Temel Prensipler

Ses dalgası veya akustik işaretler genelde transdüserler tarafından oluşturulmaktadır. Transdüser basit bir sualtı anteni görevini gören bir cihaz için kullanılan teknik bir terimdir. Transdüser aldığı elektrik enerjii mekanik enerjiye (titreşimler halinde), mekanik enerji de ses dalgalarına çeviren cihazlardır. Transdüserler uygulamaya bağlı olmakla birlikte genelde hem işareti almak hem de göndermek için kullanılabilir.

Transdüserin kalbi piezo-elektrik seramik elementtir ve genelde poliüretanla kaplanmış silindirik yapıda bir tüp şeklindedirler. Şekil 2.4’de transdüser yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Transdüser yapısı[23]

Transdüserin boyutu gönderilecek frekansa göre tespit edilmektedir. Kural olarak, üretilen işaret frekansı düşürüldükçe transdüserin çapı da büyüyecektir. Örnek vermek gerekirse 12 kHz frekansına sahip bir transdüserin çapı 10 cm iken 50 kHz frekanstaki bir transdüser 2.5 cm çapında olacaktır.

Bir transdüser alıcı bir anten gibi kullanıldığında bu tiplere “hidrofon” ismi verilmektedir. Hidrofonların sualtı akustik dinlemelerinde sıklıkla tercih edildiği bilinmektedir. Hidrofonlar akustik işaretleri algılar ve bu mekanik işareti elektrik enerjisine çevirir. Elektrik enerjisi de elektronik olarak işleminden geçirilir. Hidrofonların birçoğu yönsüz (omni-directional) yani her yönden algılama yapmaktadır. Bu tip hidrofonlara dinleme tipi hidrofon ismi verilir. Genellikle biyolojik gürültü seviyesi ile ilgili olarak eşik seviyesinin belirlenmesi çalışmalarında, deniz altındaki herhangi bir anormal sesin algılanmasında ve sualtı akustik araştırmalarında kullanılmaktadır. Sesin geldiği yön ve mesafeye ihtiyaç duyulduğunda kullanılan özel amaçla üretilmiş hidrofonlar da bulunmaktadır [23].

Transdüserler sıklıkla akustik sistemlerin tümleşik bir bölümü olarak kullanılırlar ve normalde “wet-end” olarak tanımlanırlar. Böylece, transdüseri belirlemek için gerekli parametreler, belirli bir görevi gerçekleştirmek için kurulan sistemin gereksinimlerine göre belirlenebilir. Bu parametreler ve bunların birbirleriyle ilişkileri hakkında genel bilgi olması transdüserlerin belirlenmesini kolaylaştırır. Dahası, bu parametreleri üreticiye iletmek ve bunlar hakkında üreticiyle görüşmek basit ve verimli hale gelir [30].

2.9. Sualtı Transdüseri Parametreleri

Dikkate alınması gereken ilk karakteristik çoğunlukla transdüserin asıl görevinin belirlenmesidir. Yani, projektör mü (iletim için), hidrofona mu (algılama için) veya transdüser mi (hem iletim hem de algılama için) olarak kullanılacağına belirlenmesidir.

Projektör veya hidrofona için kullanılan frekans tanımları farklı anlamlar taşımaktadır. Projektörler genellikle en yüksek akustik çıkışı sağladıkları rezonans frekansı civarında sürülürler. Buna karşın hidrofona daha geniş frekans bandında rezonans frekansı ve daha aşağısında kullanılırlar. Işın örüntüsü, doğrultunun transdüserine bağlı fonksiyonu olarak akustik basıncın (üretilen veya algılanan) bağlı genliğini gösterir. Tüm yönlü desenli bir uzaklıkta küresel bir transdüser için bu yanıt tek biçimlidir. Çoğu uygulamada, örneğin hedef belirlemede veya çevresel gürültüyü azaltmada, ana lobu sağlayan yönlü ışınlar gerekli olabilir. Bu özel şekilli ve/veya transdüserler dizisi kullanılarak başarılabilir. Bazı durumlarda dizi tek bir güç transdüserinin içinde barındırılabilir. Derece olarak ana lobun genişliği ışın genişliği olarak tanımlanır. Farklı ölçütlerin kullanıldığı durumlar olsa da, genel eğilim genişliği yarı kazanç noktasında, diğer bir deyişle maksimum kazancın 3dB altındaki noktada kullanılması yönündedir.

Çoğunlukla ana lobun etrafında yan lob denilen fazladan loblar bulunur. Akustik yanıtın maksimum değerine ulaştığı yön transdüserin maksimum yanıt eksenini (MRA) ya da akustik eksen olarak tanımlanır. Yan lobların düzeyleri, dizinin elemanlarına farklı gerilimler uygulanarak ana ışının genişlemesi karşılığında düşürülebilir. Bu,

genlik gölgeleme (amplitude shading) olarak da adlandırılır. Bazı durumlarda dizinin ana lobunun belirli bir yöne döndürülmesi gerekebilir; buna da ışın yönlendirme (beam steering) denir. Yönlülük indisi (DI), tüm yönlü yerine yönlü transdüser kullanarak işaret gürültü oranındaki (dB) iyileşmeyi gösterir. Bu, ışın örüntüsü veya yan lobların ayrıntılarıyla uğraşmayı gerektirmeden gücün ana lobun bulunduğu maksimum yanıt eksenini boyunca yoğunlaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Yönlülük indisi, dizinin kazancının özel bir durumudur sadece işaret yönsüz bir düzlem dalga ve gürültü izotropik olduğu zaman; yani birim katı açı başına düşen gürültü gücünün aynı olduğu durumlarda geçerlidir. Beklenildiği gibi, küresel bir transdüserin yönlülük indisi sıfırdır. Projektör ya da hidrofona olarak kullanılan transdüserlerin ise yönlülük indisleri aynıdır. Transdüserin yönlülük indisi ışın örüntüsüne bakılarak hatasız olarak bulunabilir.

Transdüserin asıl çalışma gerilimi $1 V_{rms}$ 'den çok daha büyük olabilir ve iletilen gerilim yanıtından (TVR) yüksek bir akustik çıkışa neden olabilir. Bu seviye ses basınç düzeyi (SPL) olarak adlandırılır. Her transdüser için listelenen etmenlerin en düşük eşikleri maksimum sürme düzeyini, dolayısıyla SPL'yi sınırlar. Hava ortamında, sualtı transdüserleri sualtındaki güç düzeyleriyle sürülemez.

Hidrofonaun alış başarımı açık devre gerilim alım duyarlılığı (OCV) olarak ifade edilir. Bu, $1 \mu Pa$ 'lık basınca karşılık, hidrofonaun açık devre uçlarındaki karekök ortalama gerilimidir. Yönlü bir hidrofonda genellikle maksimum yanıt ekseninde verilir. OCV desibel biriminde ifade edilir, örneğin, $dB_{re} V/\mu Pa$. Yani, $-180 dB_{re} 1 V/\mu Pa$ OCV'li bir transdüser, $1 \mu Pa$ basınç için hidrofonaun önünde $10^{-9} V_{rms}$ gerilim üretir. Hidrofonaun OCV değeri daha az negatif oldukça verilen basınç değeri için çıkış gerilimi daha yüksek olacaktır.

Piezoelektrik seramiğin OCV değerini arttırmak için ön yükselteç kullanıldığında, seramiğin empedansının ön yükseltece eşleştirilmesi, belirli bir kesim frekansının altında OCV seviyesinin azalmasına neden olur. Düzgün empedans seçimi düşük frekanslarda OCV düzeyinin kontrol altında tutulmasını sağlar. Ön yükselteç kullanılırsa, fazladan eklenen elektronik elemanların sistemde neden olduğu gürültünün dikkate alınması gerekebilir.

Bir transdüser tamamlandığında bir dizi performans eğrilerini elde etmek için kalibrasyon yapılır. Bu testler genellikle su admitansı, TVR ve/veya OCV ve belirli frekanslardaki ışın örüntülerini içerir. Işın örüntüsü verilerini göstermek için birkaç farklı yol vardır ve bunlar verileri yorumlama kolaylığını etkileyebilir. TVR ve OCV doğrusal veya logaritmik frekans ölçeğine göre çizilebilir. Diğer parametreler bu temel veri değerleri bilinerek hesaplanabilir [30].

3. TEK YAN BANT MODÜLASYONU ve DEMODÜLASYONU

3.1. Giriş

Bilgi işareti tarafından taşıyıcı frekansına ait herhangi bir özelliğin (genlik, frekans, faz) değiştirilerek, bilgi iletilmesine modülasyon denir. En genel tanımıyla işaretin bir taşıyıcı dalga yardımıyla iletim işlemidir. Çeşitli kaynaklar tarafından üretilen temel bant işaretleri kanalda doğrudan iletim için uygun değildir. Bu nedenle, gönderilecek bilgi işareti, iletim kanalına uygun bir biçime dönüştürülmelidir. Bu işlem modülasyon olarak adlandırılır [31].

3.2. Tek Yan Bant Tekniğinin Tarihçesi

1914’de Cari R. Englund isminde bir fizikçi telsizle çalışırken genlik modülasyonlu bir dalganın basit trigonometrik analizini yapmıştır. Bundan iki ay sonra R. A. Heising, laboratuvarda yapay bir hat üzerinde taşıyıcı telefon kanalını andıran tarzda ilk telsiz verici ve alıcı cihazı yapmış ve yan bantları kullanmıştır. Tek yan bant haberleşmesini ilk defa 1915’de John R. Carson düşünmüş ve matematiksel analizini yapmıştır. Telsiz modülasyon analizini yapıp tek yan bant ile taşıyıcı dalganın gönderilmesine gerek olmadığını bulmuştur. Hemen hemen aynı zamanlarda H. D. Arnold’da bu imkânı görerek ABD Donanmasında Arlington’daki telsiz istasyonunda denemeler yapmıştır. Tek yan bantın modüle edici dalganın bütün karakteristiklerini taşıdığı bu denemelerle ortaya çıkarılmıştır [32].

Tek yan bantın filtrelenmesi, tek yan bantla beraber veya yalnız olarak taşıyıcı dalganın filtrelenmesi konusunda ilk patenti alan Carson olmuştur. Bu konu ile ilgili olarak Bell System dışında uğraşan olmamıştır. 1918’de Western Electric şirketi ilk tek yan bantlı ticari telefon sistemini geliştirmiştir.

Tek yan bantın telsiz olarak kullanımını ilk defa 1922'de Espenschied ortaya atmıştır. Birinci Dünya savaşıdan sonra Bell System araştırma mühendisi Rocky Point tarafından 1922'de Amerika'da Long Island ile İngiltere'de Londra yakınında New South Gate arasında tek yan bant tek taraflı haberleşme için kullanılmıştır ve bu deneme 1923 başında duyurulmuştur. İngiltere posta idaresi de bu çalışmaya katılarak 1927 başında New York-Londra arasında haberleşme sistemi kurmuştur. Devam eden bir kaç sene içinde yüksek frekans bandında çalışan ilk deniz aşırı sistem yapılmışsa da 1936'ya kadar bu kısa dalga sistemlerde taşıyıcı ile birlikte her iki yan bant gönderilerek haberleşme yapılmıştır. 1929'da Bell telefon laboratuvarları kısa dalgalarda tek yan bantın kullanılmasını araştırmak üzere özel alıcılar yapmıştır. Bu alıcı kullandığı kristal filtrelerle çift yan bantlı işareti alıp taşıyıcı dalgayı ve yan bantlardan ayırma özelliğine sahipti. Lokal taşıyıcı dalga elde edilmesi ve otomatik frekans kontrolünde yapılabilmesi ile okyanus aşırı haberleşme için tek yan bantla çalışan kısa dalga verici ve alıcılar yapılmasına karar verildi. Yapılan denemeler sonunda 1936'da tek yan bantla çalışan cihazlar üretilmeye başlandı.

İkinci Dünya Savaşında tek yan bantlı sistemler ABD tarafından dünyanın farklı bölgelerindeki silahlı kuvvetlerle haberleşmek için kullanılmıştır. Bunların çoğu telefon devrelerinde çalışan çok kanallı sistemlerdi. Savaştan sonra gerek Bell telefon laboratuvarlarında gerekse Amerika'da ve diğer ülkelerde birçok firma tarafından bu sistem kullanılmış ve geliştirilmeye çalışılmıştır. Bugün tek yan bant metodu uzak iki nokta arasında gönderme için bir standart olarak tanınmakta hava ve deniz araçları haberleşmesi için kullanılmaktadır [32].

3.3. Tek Yan Bant (SSB) ve Çift Yan Bant (DSB) İlişkisi

Tek yan bant (SSB) modülasyonu bant genişliğinin yarısını kullanan genlik modülasyonunun (AM) verimli bir şeklidir. Bu tekniğin en popüler uygulamaları telsiz telefon, sualtı haberleşme gibi ses tabanlı haberleşmelerdir. Genelde kısa dalga frekanslarda banttan yer kazanmak ve düşük güç ile daha verimli iletişim sağlamak amacı ile kullanılır [34].

Tek yan bant modülasyonu (SSB), çift yan bant (DSB) modülasyonuna benzer, ancak SSB tüm tayfı kullanmak yerine alt veya üst yan bandı seçmek için bir filtre kullanır. Alt veya üst yan bandın seçimi, alt yan bant (LSB) veya üst yan bant (USB) modülasyonu ile sonuçlanır.

En basit genlik modülasyonu, taşıyıcılı çift yan bant genlik modülasyonudur. Her iki yan bant da bilgiyi içerdiğinden, tek yan bandı filtre ederek ve taşıyıcıyı bastırarak güç ve bant genişliğinden tasarruf edilebilir.

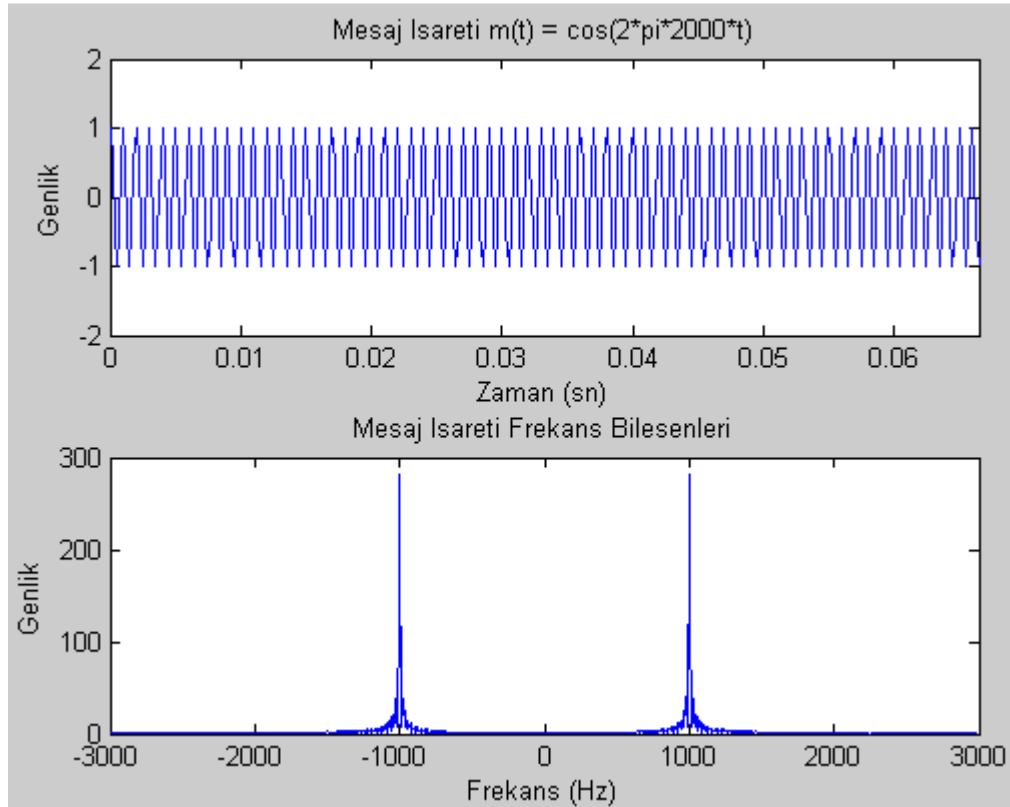
Bugünün gerek sivil ve gerekse askeri alanda artan yayın ihtiyaçları sürekli artmakta fakat kullanılabilir frekans aralığı sınırlıdır. Bu alanda artan istasyon kalabalığı girişimi arttırdığından, buna bir çare olarak bu konuyu araştıranlar tek yan bandın kullanılmasını düşünmüşler. Modülasyon sırasında taşıyıcı dalga frekansının modüle edildiği ses frekansı kadar azalıp arttığı yan bantlar oluşur. Sadece bir yan bant modüle edici dalganın bütün bilgisini taşımaktadır, o halde hem taşıyıcı dalga ve hem de bir tarafın frekansını süzerek tek bir yan bantla iletişim sağlanabilir. Süzülüp atılan yan bant ise başka bir iletişim için kullanılabilirliğinden, eskiden tek bir istasyonun işgal ettiği frekans bandına iki istasyon sığdırmak ve dolayısı ile birbirine girişim yapmadan belli bir frekans bölgesinden istifade edecek istasyon adedini iki katına çıkarmak mümkün olmaktadır. Genlik modülasyonu elde etmek için $c(t) = E_c \cos(\omega_c t)$ olan bir taşıyıcı dalgası üzerine bir $m(t) = E_s \cos(\omega_s t)$ olan ses işareti eklenirse modülasyon sonucu:

$$s(t) = \frac{E_s E_c}{2} \cos[(\omega_c + \omega_s)t] + \frac{E_s E_c}{2} \cos[(\omega_c - \omega_s)t] \quad (3.1)$$

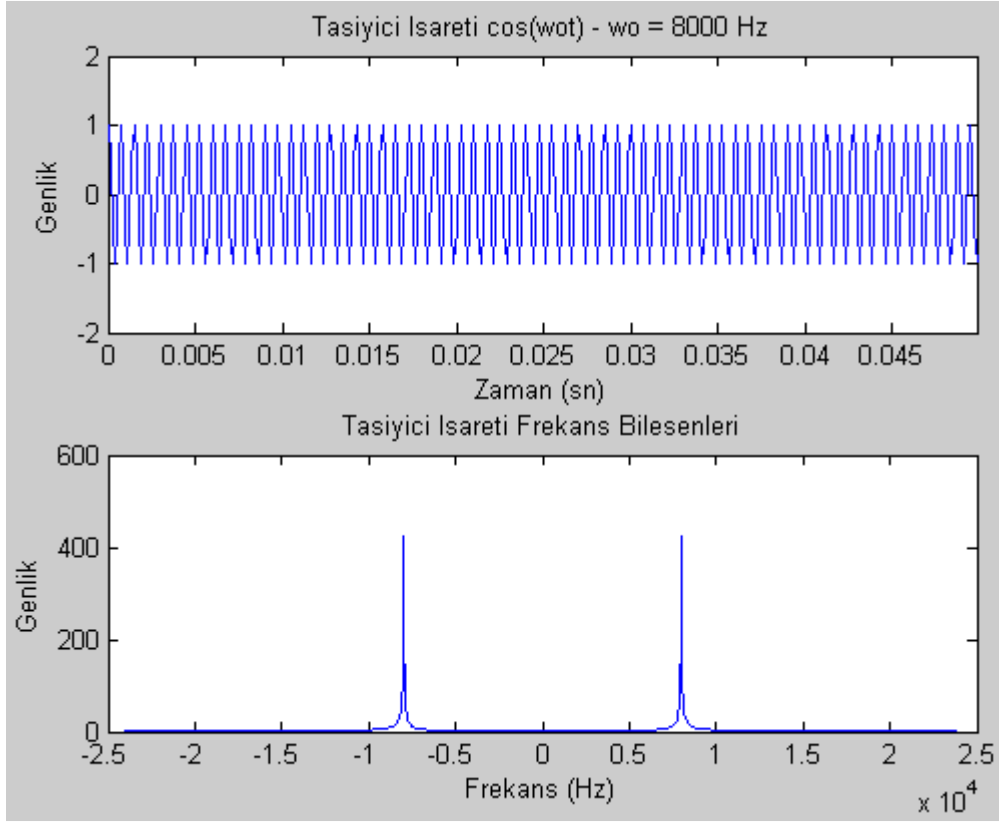
(3.1) nolu denklemde taşıyıcı dalga nasıl bir sinüs işareti ise yan bantlardan her biri de taşıyıcı dalga ile modüle edici dalga frekanslarının farkına (üst yan bant) veya toplamına (alt yan bant) eşit yine bir sinüs işaretidir [32].

Taşıyıcı dalga ile birlikte her iki yan bant veya sadece tek yan bant mevcut olursa modülasyonun genlik şekli hemen hemen aynıdır. Sadece taşıyıcı dalganın frekans değişimleri farklı olur. Bir mesaj işareti ve genlik frekans spektrumu Şekil 3.1'de

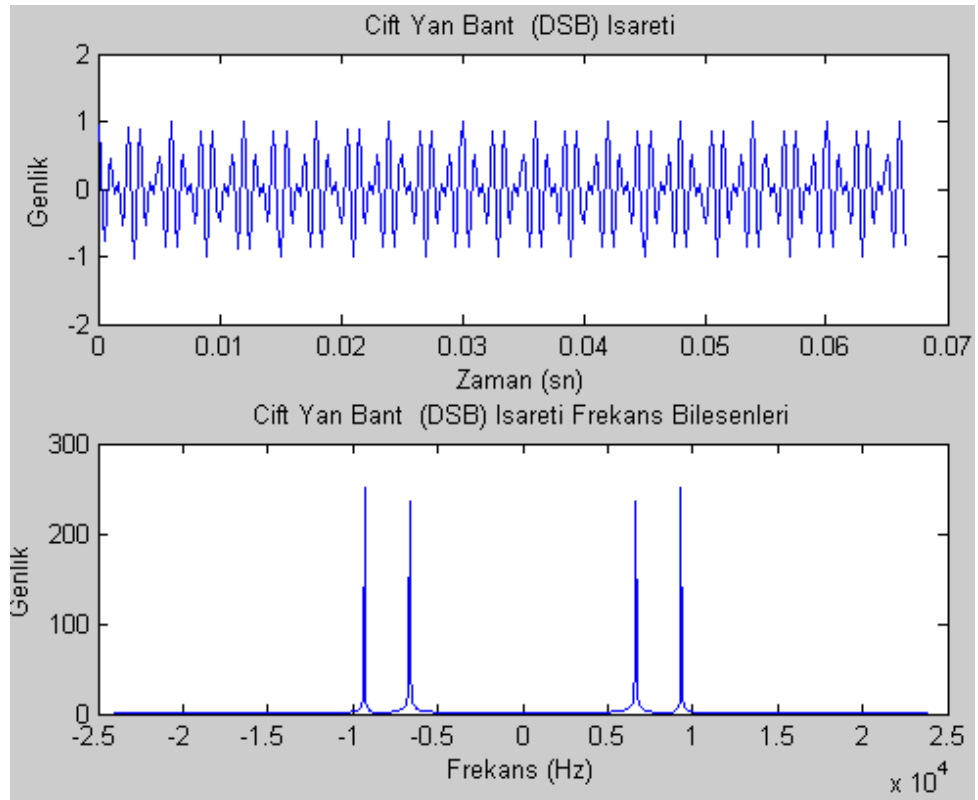
gösterilmiştir. Bu şekillerin her biri hem zamana ve hem de frekansa göre olmak üzere iki şekilde çizilerek anlatılmasının kolaylaştırılması yoluna gidilmiştir. Şekil 3.2’de taşıyıcı işareti ve genlik frekans spektrumu görülmektedir. Bu işaret, genlik değerleri f_c frekanslı taşıyıcı dalga işareti ile çarpılıp genlik modülasyonu elde edilirse elde edilen dalga Şekil 3.3’deki gibi olur. Taşıyıcı dalganın genliği, modüle edici dalgaya göre değiştiği gibi taşıyıcı dalga etrafında modüle edici sesin frekansları kadar farklı yan bant frekansları meydana gelir. Eğer bundan sadece bir yan bantı süzecek olursak şekil yine aynı kalır. Frekansa tabi olarak çizilen eğride ise sadece tek yan bantla taşıyıcı dalga kalır. Taşıyıcı dalga ile birlikte yan bantın biri de süzülüp sadece tek yan bant bırakıldığı zaman Şekil 3.4’deki tek yan bant modülasyonu elde edilmiş olur.



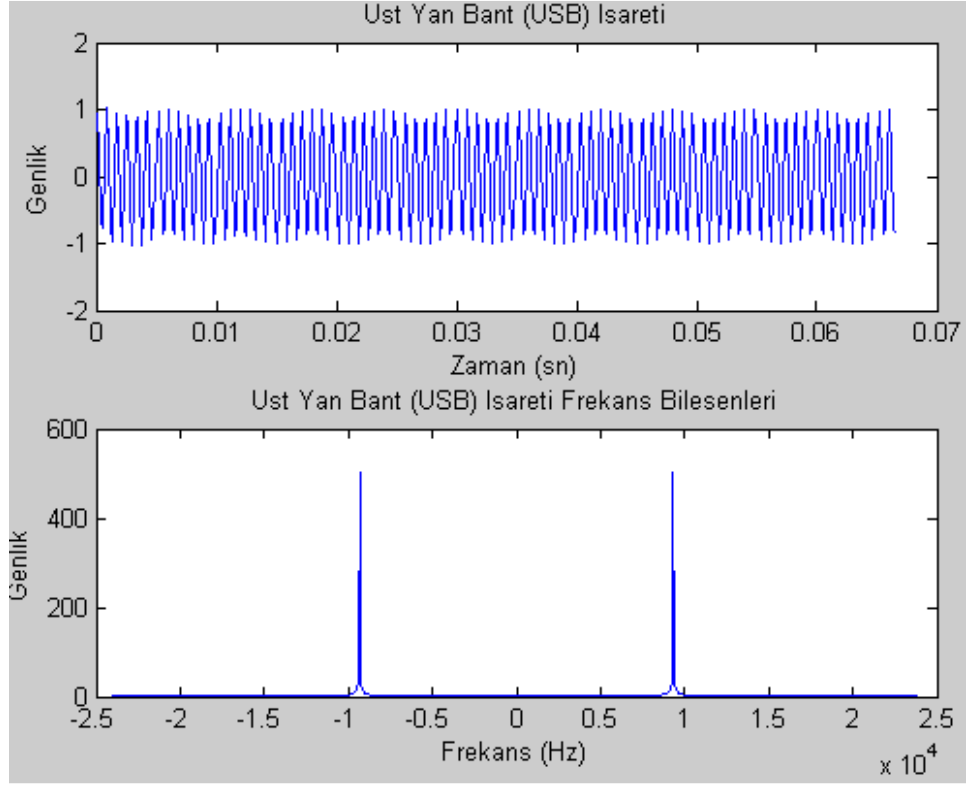
Şekil 3.1: Mesaj işareti ve genlik frekans spektrumu



Şekil 3.2: Taşıyıcı işareti ve genlik frekans spektrumu



Şekil 3.3: DSB işareti ve genlik frekans spektrumu



Şekil 3.4: USB işareti ve genlik frekans spektrumu

Genlik modülasyonlu işaretler alıcıda önce bir tarafı atılarak ve sonra taşıyıcı dalgası süzülerek modüle edici ses frekansları elde edilir. Tek yan bantlı işaretlerde yüksek güçlü taşıyıcı dalga işareti mevcut değildir. Halbu ki tek yan bant halinde gelen işaretlerden modüle edici ses frekanslarını ayırmak için bunların da taşıyıcı dalga frekansı ile karıştırılması gerekir. Tek yan bantlı sistemlerde taşıyıcı dalga işaretinin alıcıda yaratılarak gelen yan bantla karıştırılması zaten gerekir. Sadece alıcı tarafından yaratılan taşıyıcı dalga frekansı tam ve doğru fazda olmazsa demodüle edilen tek yan bant işareti orijinalinden farklı olur. İdeal yayılım şartlarında ve işaretin gürültüye oranı, genlik modülasyonlu alıcıda gürültünün belirlediği noktadan daha iyi olduğu hallerde, yan bant güçleri aynı olan genlik modülasyonlu ve tek yan bantlı vericilerin çalışmaları ve iletişimleri birbirlerinin aynıdır. İki nokta arasındaki veya yerle hava arasındaki uzak mesafe iletişimlerinde tek yan bantın gücü genlik modülasyonundaki bir yan bantın gücüne eşit olduğu takdirde her iki sistem aynı neticeyi vermektedir. Uzun mesafe iletişimlerinde alıcıya birden fazla yoldan gelen dalgalar arasındaki faz farkı dolayısı ile meydana gelen zayıflama hallerinde tek yan

bandın durumu daha iyidir. Tek yan bantla yapılan iletişimin genlik modülasyonuna göre avantajlarını şöyle sıralayabiliriz.

- Modülasyonla elde edilen yan bantlar taşıyıcı dalğanın dörtte biri kadar bir güç taşımaktadır. Taşıyıcı dalga ve bir yan bandın süzülmesi ile vericinin gücü teorik olarak bu kadar azaltılmış ya da aynı güç muhafaza edildiği takdirde vericinin tek yan bantta toplanan gücü dört kat artmış olur. 100 W'lık bir tek yan bant vericisi 400 W bir genlik modülasyonlu vericiye eşdeğerdir.
- İletişimin tek yan banda sıkıştırılması ile tek yan bandın işgal ettiği frekans bölgesi genişliği genlik modülasyonlu işaretin işgal ettiği bölgenin yarısı kadardır. Bu nedenle bir frekans bölgesinde çalışabilecek istasyon sayısı en fazla iki kat fazla olur.
- Tek yan bandın harcanan gücü azalmış olduğundan cihazın verici hacmi ve ağırlığı küçülmüş olmaktadır. Yani belli hacim ve ağırlıktaki tek yan bantlı bir telsizle daha verimli, daha kuvvetli ve daha uzak mesafelere gidebilen bir iletişim imkânı sağlanabilmektedir.

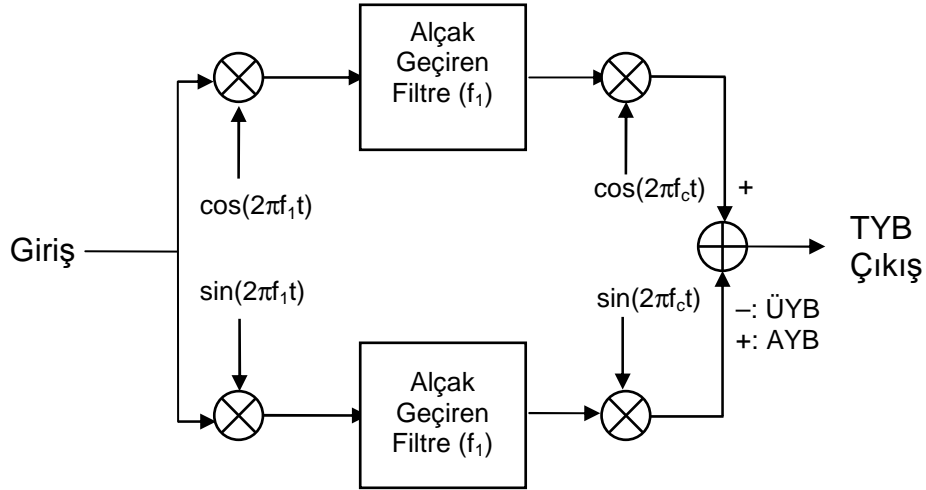
3.4. Vericide Tek Yan Bandın (SSB) Elde Edilme Teknikleri

SSB işareti üretmek için Weaver yöntemi, filtre yöntemi ve faz yöntemi olmak üzere üç temel yol vardır. Weaver yönteminin ilginç olan özelliği istenmeyen yan bantların istenen yan bantla aynı frekans bandına sahip olmasıdır. Diğer bir yaklaşım, en çok bilinen SSB işaret üretme yolu olan filtre yöntemidir. DSB işaretin, SSB yan bant süzgeci olarak da bilinen uygun bir bant geçiren süzgeç kullanılarak süzgeçlenmesi sonucu SSB bir işaret elde edilebilir. Fakat bunu gerçeklemek ve yüksek performanslar elde etmek için gerekli donanımın maliyeti yüksek olmaktadır. Oysa faz yöntemi ile SSB işaret üretmek herhangi bir pahalı süzgeç gerektirmez. Onun yerine hilbert dönüşümü kullanılarak SSB işareti elde edilir. Filtre yönteminin tersine faz yöntemi temel bantta çalışır ve dolayısıyla taşıyıcı frekansının ne olduğu önemli değildir. Tek yan bant modülasyonunu elde etmek için farklı metotlar mevcuttur [35-37].

3.4.1. Weaver yöntemi

Tek yan bandın yaratılmasında kullanılan Weaver yöntemi Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Weaver yöntemi, 1956’da Weaver tarafından önerilmiştir ve bu yöntemde keskin olmayan kesim frekansına sahip filtreler gereklidir. Bu yöntemin ilginç olan özelliği istenmeyen yan bantların istenen yan bantla aynı frekans bandına sahip olmasıdır. SSB Weaver modülatöründe istenmeyen yan bandın bastırılması alçak geçiren filtre durdurma bant zayıflatmasına denktir [41].

Şekil 3.5’de birinci dengeli modülatörlerde frekansı f_1 olan bir taşıyıcı dalganın 90 derece faz farklı kısımları ile ses frekansı çarpılarak daha sonra alçak geçiren bir filtreden geçirilerek çift yan bantları (taşıyıcı süzölmüş) elde edilir. Burada istenen frekanstaki (f_c) bir taşıyıcı dalganın 90 derece faz farklı kısımları çarpılır. İşaret yine iki yan bandın toplamı olur ki çarpma işlemi ile tek yan bant birbirine eklenirken diğer yan bant 180 derece faz farklı olarak elde edilir ve çıkışta tek yan bant kalmış olur. Bu yöntemle tek yan bandın yaratılmasında ne keskin filtreler ne de geniş bantlı 90 derece faz kaydırmalı devrelere gerek yoktur.

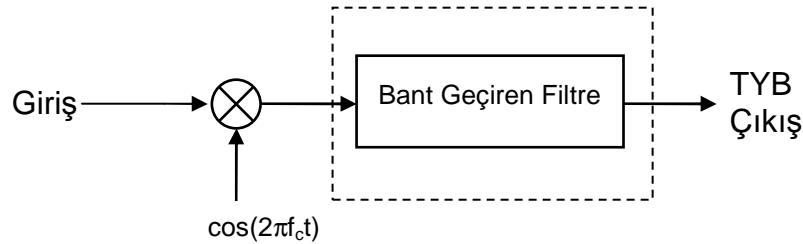


Şekil 3.5: Weaver Yöntemi

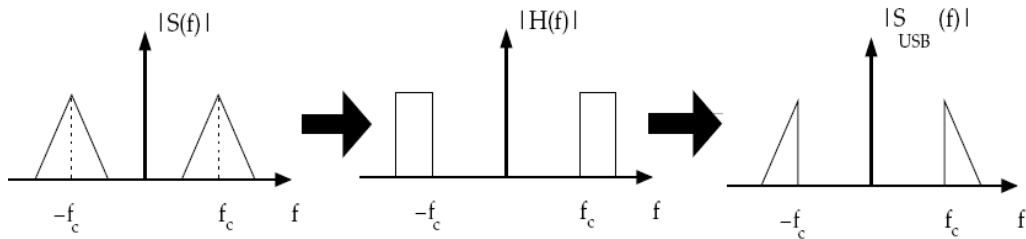
3.4.2. Filtre yöntemi

Bu yöntemde, ilk olarak taşıyıcısı bastırılmış genlik modülasyonlu işaret üretilir ve sonra bu yan bantların birisi bir filtre yardımıyla süzülür ve geriye kalan tek yan bant iletilir. Modülasyon frekansı ne kadar küçük olursa, yan bant frekansları da taşıyıcıya o kadar yaklaşır. Filtrenin frekans cevabı alt ve üst yan bantlar arasındaki frekans boşluğu içinde keskin bir şekilde sönümlenmelidir. Taşıyıcı frekansı ne kadar yüksek olursa bu karakteristiğe sahip bir filtre tasarlamak da o nispette zorlaşır [38].

Kullanılacak taşıyıcı dalga frekansı bizzat filtrelerin seçme kabiliyetine göre belirlendiği gibi bir miktar da, eğer kullanılıyorsa, alıcıdaki otomatik frekans kontrol devresinin kararlılığına bağlı olur. Bazı tip iletişimlerde tek yan bant seçilirken genliği azalmış olarak taşıyıcı dalganın ve hatta bir miktar diğer yan banttan arta kalmış bir miktarın mevcut olması bir sakınca teşkil etmez. Böyle bir durum televizyonda kullanıldığı gibi radyo yayınında da kullanılması mümkündür. Bu tip işaretler bildiğimiz modülatör devrelerinin (taşıyıcı dalga filtrelenmeden) çıkışlarını bir filtreden geçirmekle ve taşıyıcı dalga frekansını filtrenin geçirdiği frekansının kenarına yakın tutmakla elde edilir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de filtre yöntemin daha iyi anlaşılması için tek yan bant adımları frekans spektrumları ile gösterilmiştir.



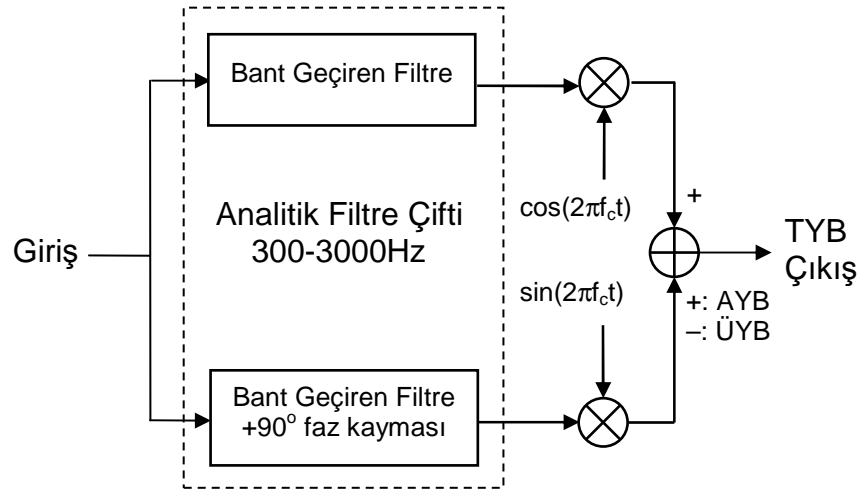
Şekil 3.6: TYB modülasyonlu işaretin filtre yöntemiyle elde edilmesi



Şekil 3.7: Filtre yöntemi ile SSB işareti elde edilişi[39]

3.4.3. Faz yöntemi

Bu yöntemde, mesaj işaretinin taşıyıcı ile çarpımı sonucu elde edilen işaret ile mesaj işareti ve taşıyıcı işaretin Hilbert dönüşümlerinin çarpımı sonucu elde edilen işaret toplanarak veya çıkartılarak yan bantlardan sadece birinin geçmesine izin verilir. Bu yönteme ilişkin blok şema Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: TYB modülasyonlu işaretin faz yöntemiyle elde edilmesi

SSB modülasyonu, DSB modülasyonunda olduğu gibi alt ya da üst yan bant filtre ihtiyacından kaçınmak için $M(\omega-\omega_c)$ ve $M(\omega+\omega_c)$ frekans çifti yaratılmaksızın sadece mesaj işaretinin bir frekans spektrumu elde edilir. Tek frekans spektrumunun elde edilmesi Hilbert dönüştürücüsü kullanılarak yapılabilir. Hilbert dönüşümü ile üretilen iki işaretin arasında tek fark 90 derece faz kaymasıdır. Bu sistemde dengeli modülatörlerde iki tane çift yan bantlı işaret elde edilerek birbirine eklenir. Her bir dengeli modülatörde modüle edici işaretler ve taşıyıcı dalga işaretleri 90 derece faz kaymasına maruz kaldıklarından birbirlerine o şekilde eklenirler ki taşıyıcı dalga kısımları birbirini yok ettiği gibi yan bantlardan birinin kısımları 180 derece faz farkı ile birbirini yok ederken diğer yan bantın kısımları birine eklenerek kuvvetlenmiş ve böylece tek yan bant işareti elde edilmiş olur. Sadece bu sistemdeki modülatör katının birbirinin tamamı ile aynı olması ve tam 90 derece faz farkını bulundurması önemlidir. Bu sistem, ara frekans veya radyo frekans kademesinde herhangi bir noktada sabit frekanslarda tek yan bant yaratmak için uygundur. Eğer taşıyıcı dalga

için ayarlanabilen veya 90 derece faz farklı geniş bantlı bir devre temin edilebilirse bu metot değişken frekanslı tek yan bant sistemi yaratmakta kullanılabilir. Bu yöntemde yan bant filtreleri kullanılmaz. Şüphesiz ki bu iş filtre yöntemi ile yapılamaz [40]. Faz kaydırma yöntemi ile tek yan bant yaratılması yüksek seviye denilen sistemde kullanılmaktadır. Bu tekniğin tatmin edici bir şekilde çalıştığı kabul edilmiştir. Özellikle gelişen işaret işleme teknolojileri bunun gerçekleştirilebilirliğini oldukça kolay hale getirmiştir.

3.5. Tek Yan Bant (SSB) Demodülasyonu

Alıcıda faz yöntemi uygulanarak orijinal işaret tekrar elde edilecektir. Şekil 3.9’da bir sayısal SSB alıcının blok diyagramı gösterilmektedir. Alınan işaret sayısallaştırıldıktan sonra her iki I ve Q kanalındaki işaret taşıyıcı işareti ile çarpılarak temel banda dönüştürülür. Temel banttaki işaret gürültüden ve diğer gereksiz işaretten arındırılmak için bant geçiren filtreden geçirilir. Burada Q kanalındaki bant geçiren filtre aynı zamanda 90 derece faz kaydırma işlemi de yapar. Uygulanan tek yan bant yöntemine göre analitik filtre işareti ile elde edilen iki kanallı işaret toplanır ya da çıkartılır. SSB demodülasyonunda alınan işaret USB ise orijinali işareti tekrar elde etmek için iki kanaldan alınan işaretler toplanır, LSB ise çıkartılır. Klasik SSB demodülasyon yöntemlerinde alıcının çarpım işlemi yaptığı taşıyıcının fazı ile iletim için vericide kullanılan taşıyıcının fazı eşzamanlı hale getirilmelidir. Aksi takdirde elde edilen işarete frekans sapmaları oluşur. 10 Hz’e kadar olan sapma için, konuşma işaretinin anlaşılabilirliğindeki bozulmaları gidermek mümkün olabilmektedir [43]. Kanalın ideal olduğu durumda, tek yan bant demodülasyonu matematiksel olarak (3.2), (3.3), (3.4) ve (3.5) nolu denklemlerinde verilmiştir.

$$x_I(t) = x(t) \cdot \cos^2 w_c t \mp \hat{x}(t) \cdot \cos w_c t \cdot \sin w_c t \quad (3.2)$$

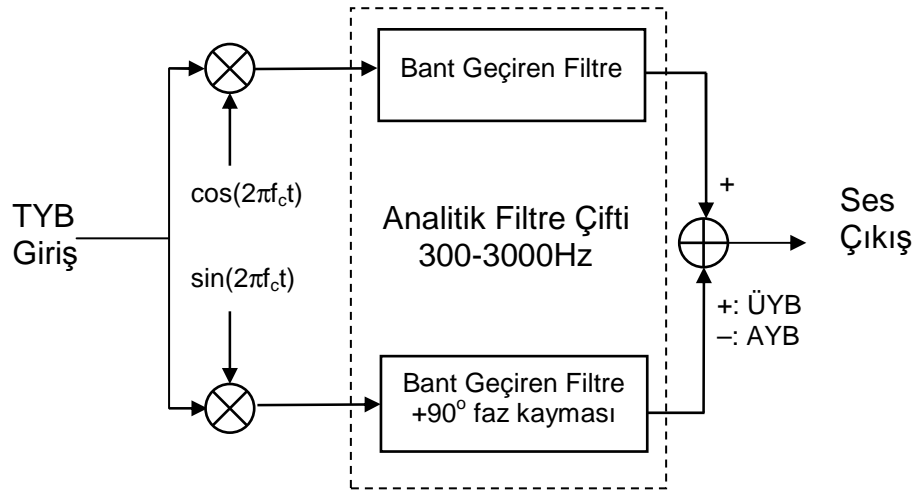
$$x_I(t) = \frac{1}{2} x(t) + \frac{1}{2} x(t) \cos 2w_c t \mp \frac{1}{2} \hat{x}(t) \sin 2w_c t \quad (3.3)$$

Olmak üzere bant geçiren filtre çıkışı $\frac{1}{2}x(t)$ olarak bulunur.

$$x_Q(t) = x(t) \cdot \cos w_c t \mp \hat{x}(t) \cdot \sin w_c t \quad (3.4)$$

$$x_Q(t) = \frac{1}{2}x(t) \cdot \sin 2w_c t \mp \frac{1}{2}\hat{x}(t) \pm \frac{1}{2}\hat{x}(t) \cos 2w_c t \quad (3.5)$$

Olmak üzere 90 derece faz kaydıran bant geçiren filtre çıkışı $\pm \frac{1}{2}x(t)$ olarak bulunur.



Şekil 3.9: Faz yöntemiyle SSB demodülasyonu

4. DSP TABANLI SUALTI HABERLEŞMESİ

Geçmiş yıllardan beri DSP mimarisi ve teknolojisinde büyük gelişmeler sağlanmıştır. Bu yenilikler, DSP'nin daha önce kullanılmadığı alanlarda da kullanılmasına olanak tanımıştır. Bu bölümde, DSP tabanlı sualtı haberleşmesi uygulamasının donanım ve fonksiyonel birimleri anlatılmaktadır.

4.1. Giriş

Ses bağlantısı birçok sualtı aktivitesinde sualtı ve su üstü platformları için olmazsa olmaz bir gereksinimdir [11,44-51]. Sualtı akustik veri transferi ve yayını için gelişmiş sayısal sistemler tasarlanmasına rağmen, bu durum su vasıtasıyla ses iletişimi için geçerli değildir. Ticari olarak kullanımda olan sistemlerin çoğu eski teknolojiler kullanmaktadır ve bu yüzden günümüzde kullanılabilir olan gelişmiş sistemlerle karşılaştırıldığında kısıtlamalara neden olmaktadır. Sayısal sistemlerin bir avantajı dalgıç veya denizaltılar ile su üstü platformları arasında özel iletişim bağlantısına imkân tanınmasıdır, böylece istenmeyen ses girişimi olmaz.

Mobil iletişim teknolojisindeki hızlı gelişme düşük bit oranlarındaki konuşma kodlama metotlarındaki ve DSP'deki ilerlemeler sayesinde mümkün kılındı [56,57]. Gerçek zamanlı sayısal sualtı akustik ses iletişimini başarmak için konuşma işaretleri işleme tabi tutulmalı, sonra transfer edilmeli ve uygun bir modülasyon ve demodülasyon tekniği uygulanarak alınmalıdır. Mikroişlemciler bu tarz uygulamalar için uygun değildir. Dolayısıyla karmaşık işaret işleme hesaplamalarını gerçekleştirmek için DSP olmazsa olmazdır. Bir sayısal haberleşme sistem tasarımında hızlı veri iletimi başarımı en zor görevdir [5,58-61].

Modern veri iletim sistemleri tasarımı kanal dengeleme[58,59], dizi işleme[62] faz yönlendirme ve adaptif ışın şekillendirme[5,60] yüksek veri hızı sağlamak için kapsamlı araştırmaları içerir. Bu metotlar sualü araçları haberleşme sistemleri için çok yararlı olmasına rağmen, dalgıç haberleşmesinde sistem boyutunu büyüttüğü ve işaret işleme karmaşıklığını arttırdığı için uygun değildir [14].

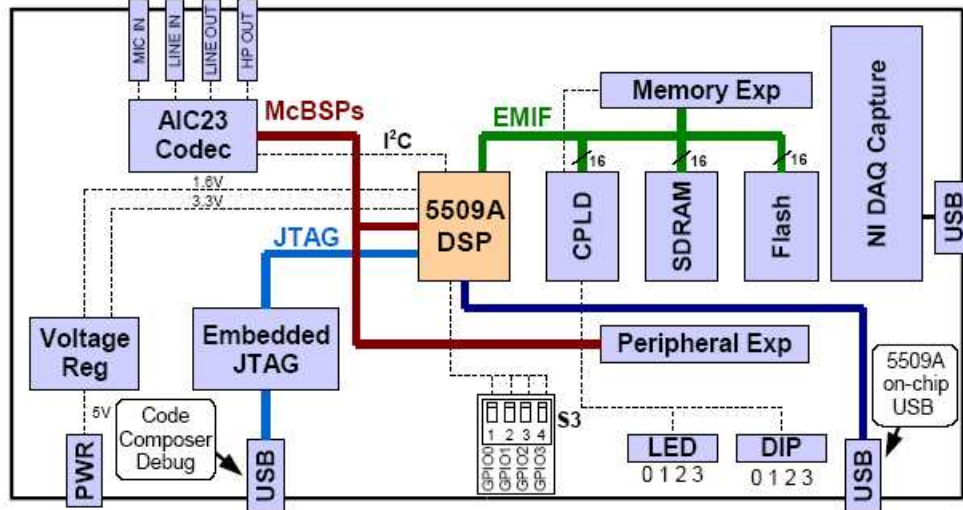
Sayısal teknolojiye geçişin sayısız avantajı mevcuttur. Bunlardan biri, DSP'deki veri uzunluğunu değiştirerek, gerçek hayattaki problemlere daha uygun kestirimlerde bulunulabilir. İşlemler defalarca güvenli bir şekilde tekrarlanabilir ve elektriksel gürültüye hassasiyet oldukça düşüktür, ancak sıfır değildir. Her ne kadar DSP ve analog teknolojilerde hız limitli olsa da, gelişen yarı iletken teknolojisi ve DSP mimarisiyle (paralel veri işleme, daha yüksek kapasiteli hafıza, geniş veri yolu, vb.) birlikte her geçen gün daha performanslı ve hızlı donanımlara sahip olmaktadır. DSP'lerin en büyük avantajı, kolayca programlanabilmeleridir. Eğer eklenmesi gereken bazı yeni yazılımlar olursa, yeni kod aynı tasarıma herhangi yeni bir sınırlama olmadan ve herhangi bir güçlük olmadan yükleme (download) yapmak mümkündür.

Sayısal işaret işleyiciler, sayısal işaretlerde her türlü matematiksel işlem ya da algoritmayı uygulayabilmektedir. Önemli sayıda çalışmada, birçok uygulama çeşidi için matematiksel işlem, modeller ve algoritmalar tanımlanmaktadır. Haberleşmede karıştırma, sentezleme, filtreler ve spektral analiz bunlardan birkaçıdır. Filtreleme, işaret işlemede en önemli ve faydalı konulardan biridir. Genel olarak filtre, kesim frekanslarının zayıflayan frekanslardan ayrılarak geçirildiği önemli bir seçicidir. Bu işlem, geçmiş ve şu andaki işaret örneklerini birleştirerek, çıkış örneğini doğru bir şekilde üretmek için kullanılan bir seçme işlemidir. Bir başka önemli öge de spektral analizdir. İşarete hangi frekansların gösterildiğini hesaplamaya yarar ve frekans bölgesinde işaretin büyüklüğünü biçimlendiren yararlı bir araçtır. Ancak DSP'ler için her şey bu kadar olumlu değildir. DSP'lerin en önemli dezavantajı, örnekleme işlemiyle ortaya çıkan deformasyon ve bozulmadır. Bu durum, örtüşme (aliasing) olarak adlandırılır. Örtüşme, her ne kadar dikkatli bir örnekleme uygulamasıyla minimize edilebilse de, pratik olarak tamamen ortadan kaldırılabilmesi mümkün değildir. Ayrıca, örnekleme ve yeniden oluşturma işlemlerinde kullanılan ADC ve

DAC'lar, yüksek hızlarda keskin kestirimlerin istendiği durumlarda karşımıza büyük bir maliyet çıkarmaktadır. Her ne kadar DSP ve çevre birimlerinin maliyeti her geçen sene düşse de, aynı şey yazılım geliştirme işlemi için pek söylenemez [14,15,19,52].

4.2. TMS320C5509A DSK Deneme Kartı

5509A DSK, TI C55XX DSP ailesi için, kullanıcılara değerlendirme ve geliştirme uygulamaları sağlayan ucuz maliyetli, bağımsız bir geliştirme platformudur. Ayrıca 5509A DSK, TMS320VC5509A DSP için bir donanım referans tasarımı olarak hizmet vermektedir [63]. Şekil 4.1'de DSK blok diyagramı gösterilmektedir.

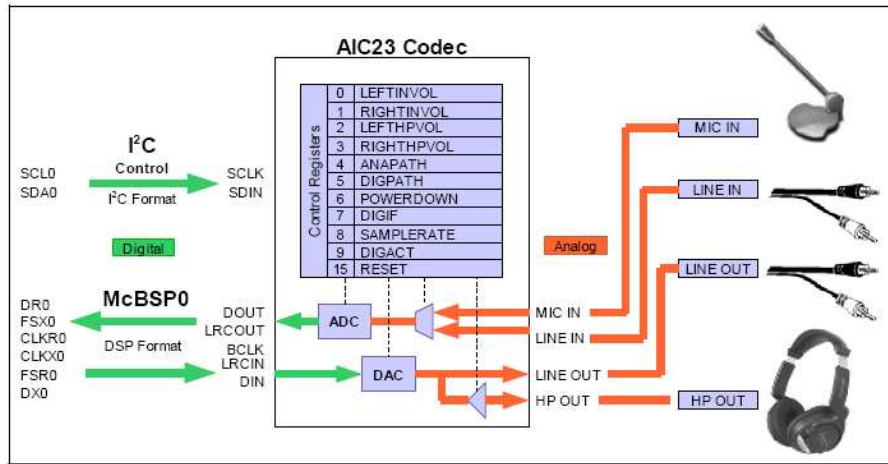


Şekil 4.1: 5509A DSK Blok Diyagramı[63]

5509A DSK Texas Instruments ses işaret giriş ve çıkışı için AIC23B stereo codec kullanır. Codec mikrofon ve hat girişlerindeki analog işaretleri örnekler onları sayısal işarete dönüştürür böylece işaretleri DSP tarafından işlenebilir hale getirir. DSP veri ile işini bitirdiğinde DSP hat ve kulaklık çıkışlarındaki analog işareti geri dönüştürmek için Codec kullanır.

Codec, DSP ile I2C ve McBSP arayüzünü kullanarak haberleşir. I2C kodeğın dahili yapılandırma kaydedicilerini kontrol eder. McBSP sayısal ses örneklerinin alımı gönderilmesi için kullanılır. Kontrol kanalı tipik olarak sadece Codec yapılandırıldığında kullanılır, genelde ses verisi gönderildiğinde boşdur. McBSP0

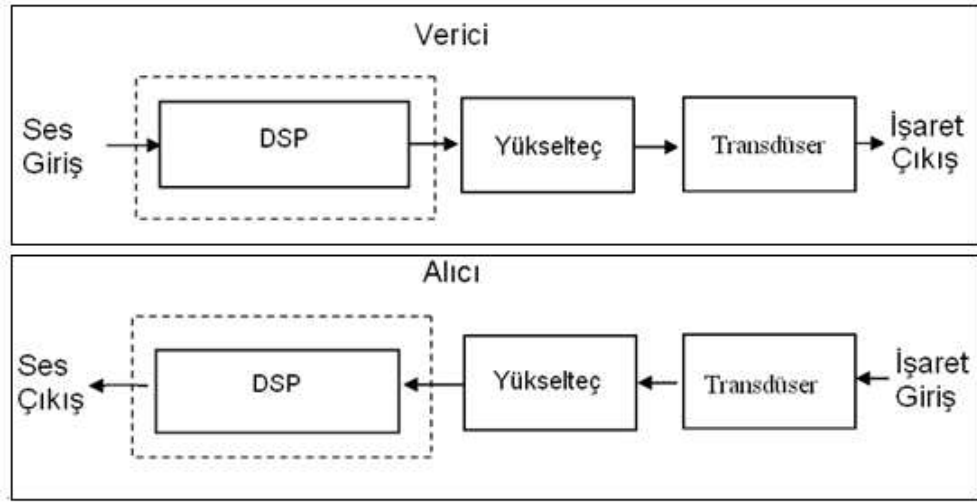
çift-yönlü veri kanalı olarak kullanılır. Tüm ses verisi veri kanalı üzerinden gönderilir ve alınır. Çoğu veri formatı örnekleme genişliği, saat işaret kaynağı ve seri veri formatının 3 (üç) değişkenine bağlı olarak desteklenir. 5509A DSK örnekleri genel olarak birincil modda Codec ile 16 bit örnekleme genişliği kullanır. Böylece DSP tarafında çok çaba harcamadan doğru örnekleme hızında çerçeve eşleme ve bit saatleri üretir. Codec 12 MHz sistem saatine sahiptir. 48 kHz, 44.1 kHz ve 8 kHz gibi yaygın frekanslar üretmek için dahili örnekleme hızı üretimi 12 MHz’i alt frekanslara böler. Şekil 4.2’de 5509A DSK’deki Codec arayüzü gösterilmektedir [63].



Şekil 4.2: TMS320VC5509A DSK Codec Arayüzü[63]

4.3. DSP Tabanlı Sualtı Haberleşme Sistemi Uygulaması

Sualtında ses haberleşmesi için ultrasonik frekanslar kullanan bir takım ticari uygulamalar geliştirilmiştir. Ancak ana hedef, analog teknoloji ile üretilen ve sualtında kullanılan zamanı geçen bu telsizlerin yerine farklı bir teknoloji kullanmaktır. Bu bölümde DSP tabanlı sualtı haberleşme sistemlerinin temel blokları anlatılacaktır. Sualtı haberleşme sistemleri alıcı ve vericiye ait blok diyagramlardan oluşur. Alıcı ve verici tarafta yapılan işlemler birbirini karşılayacak işlemler olup askeri ve ticari uygulamalarda her iki taraf hem alıcı hem verici olabilmektedir. Alıcı ve verici taraf temel üç temel ana birimden oluşmaktadır. Bunlar DSP, Yükselteç ve Transdüserdir. Şekil 4.3’de sualtı haberleşmesi temel uygulama akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Sualtı haberleşmesi temel uygulama akış diyagramı

Verici taraftaki DSP bloğunda analog olarak alınan ses işareti ADC ile sayısalaya dönüştürülerek DSP tarafından işlenebilecek hale getirilir. Sualtı haberleşmesi sistemlerinde işaretin iletilmesi için genel olarak tek yan bant yaklaşımı kullanılır. Genel olarak kullanılan tek yan bant modülasyon tekniği (SSB) ise Faz, Weaver yada Filtre metodudur. Bu metod seçim için düşünülmesi gereken en önemli faktör ise yan bantın bastırılmasıdır. SSB elde etme metodlarından genelde tercih edilen Faz metodudur. Bu yan bant bastırım işlemi, filtreleme, taşıyıcı işareti üretmek için istenilen frekans aralığında kararlı bir osilatör ve kestirimi DSP bloğunda gerçekleştirilir. DSP bloğunun temel görevi analog işareti alıp modülasyonlu işareti elde etmek ve DAC kullanılarak sayısal işareti analog işarete dönüştürmektir. Analog işaretin elde edilmesi sonrasında, işaret istenilen seviyeye yükseltilmesi gerekir bu işlem yükselteç bloğunda yapılmakta olup işareti ne kadar uzak mesafeye göndermek istediğimize ve kullanılacak transdüser giriş limit değerlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Uygulamada verici taraftaki yükselteç kazancımız yaklaşık 150 (43,5 dB)'dir. İşaret yükseltildikten sonra sualtı ortamında iletilmesi gerekmektedir. Transdüser işareti uzak mesafelere sualtından iletilmesini sağlayacak bir akustik çeviricidir ve elektriksel işareti akustik işarete dönüştürerek sualtından gönderilmesini sağlar.

Alıcı taraf, verici taraf ile bütünleyici bir yapıya sahiptir. İlk olarak akustik işaret transdüser ile alınır. Transdüser ile alınan işaretin seviyesi çok düşük olduğu için bir

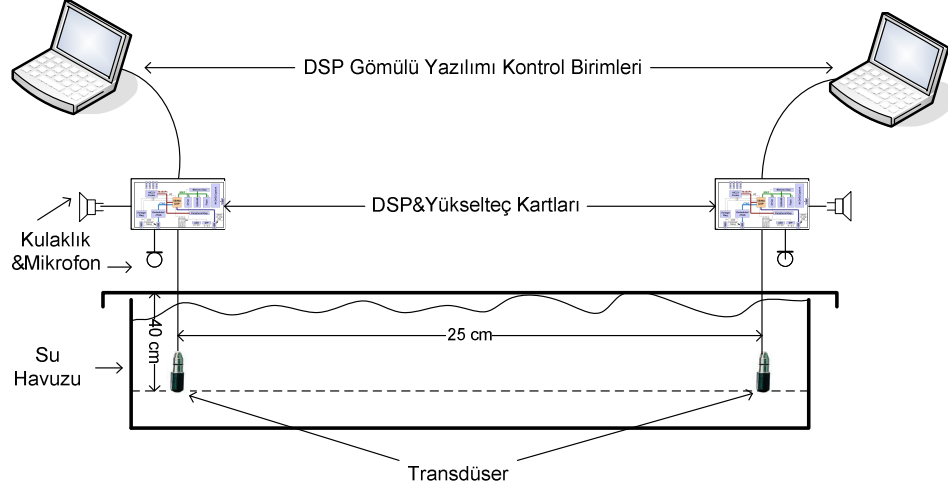
ön yükselteç ile yükseltilecek ve filtrelerden geçirilerek daha anlamlı hale getirilir. Kullanılan ön yükselteç kazancı 273 (48 dB)'tür. Transdüser ile alınan ve yükseltilecek işaret DSP tarafından işlenebilmesi için ADC ile işaret sayısal işarete çevrilir. Daha sonra, bant geçiren filtre ile bant dışındaki gürültü elimine edilerek işaret faz metodu ile demodüle edilir. Sonrasında, filtreleme algoritması uygulanarak ortamdan ve kanaldan kaynaklanan gürültü yok edilir. Son aşamada DSP tarafından demodüle edilen ve gürültüden arındırılan sayısal işareti bir DAC ile analog işarete dönüştürülerek ses işareti haline getirilir. Her ne kadar ses kalitesinden biraz ödün verilse de, güçlü ve kaliteli bir ses işaretine sahip olmak ve anlaşılabilirlik daha önemlidir. Kabul edilebilir bir gürültünün kalması herhangi bir sorun yaratmamaktadır.

4.4. DSP Tabanlı Sualtı Haberleşme Uygulaması Temel Fonksiyonları ve Donanım Birimleri

Sualtı akustik iletişimi işletim yazılımı gömülü sistem alt parçaları gerçekleştirilirken sistemden beklenen yetenekleri karşılayacak bir DSP seçilmiştir. İstenen modülasyon işaretleri, çalışma frekansları, filtreleme işlemleri sayısal ortamda işaret işleme algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ses uygulamalarında kullanılan CODEC tümleşik devreleri sayesinde ses işaretlerinin sayısal hale dönüştürülmesi ve modülasyon/demodülasyon işaretlerinin ses işaretlerine dönüştürülmesi işlemleri yüksek kalitede ve basitçe karşılanmaktadır. Modülasyon/demodülasyon işlemlerinin DSP üzerinde koşacak yazılım ile gerçekleştirilmesi daha sonra ortaya çıkabilecek sayısal haberleşme ihtiyacının yazılım üzerinde yapılacak değişikliklerle, basit olarak yazılımın güncellenmesiyle, sağlanmasına olanak vermektedir. Bu düşünceler ışığında modüller halinde tasarlanmış ve güncellemelerin modüller üzerinde uygulanması kararlaştırılmıştır. Gömülü sistem yazılımında kullanılan programlama dili assembler/C'dir. Bu gömülü sistem yazılımı alt parçası DSP işlemcisine (Texas, TMS320VC5509A) ait uygulama geliştirme ortamında gerçekleştirilmiştir.

Uygulamada alıcı ve verici taraf olmak üzere 2 (iki) TMS320VC5509A DSK ile taşıyıcısı bastırılmış üst yan bant (SSB - SC) modülasyon tekniği kullanılarak sualtı akustik haberleşmesi için bir prototip gerçekleştirilmiştir. DSP tabanlı sualtı

haberleşme uygulaması 2 (iki) adet TMS320VC5509A DSK bordu, 2 (iki) adet LCD ekran, 2 (iki) adet tuş takımı, 2 (iki) adet kulaklık, 2 (iki) adet mikrofon, 2 (iki) adet transdüser, 2 (iki) adet yükselteç, 2 (iki) adet işaret aktarım kablosundan oluşmaktadır. SSB modülasyonu kullanarak sualtı haberleşmesi DSP uygulaması gösterimi Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4: SSB modülasyonu kullanarak sualtı haberleşmesi DSP uygulaması

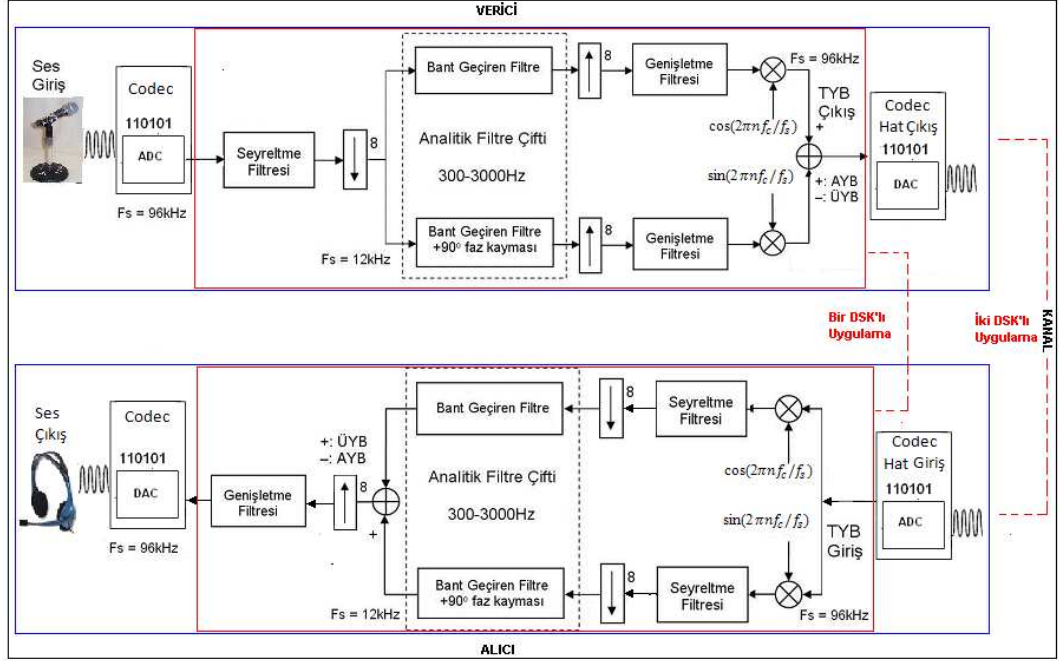
Sualtı haberleşmesinde kullanılan modülasyon Tek Yan Bant (SSB) modülasyonu için genellikle faz yönetimi kullanılır. Bu yöntemde, mesaj işaretinin taşıyıcı ile çarpımı sonucu elde edilen işaret ile mesaj işareti Hilbert dönüşümünün ve taşıyıcı işaretinin çarpımı sonucu elde edilen işaret toplanarak veya çıkartılarak yan bantlardan sadece birinin geçmesine izin verilir.

$$S_{USB}(t) = m(t)\cos(\omega_c t) - m_h(t)\sin(\omega_c t) \quad (4.1)$$

$$S_{LSB}(t) = m(t)\cos(\omega_c t) + m_h(t)\sin(\omega_c t) \quad (4.2)$$

Uygulama DSP bordları ile gerçekleştirilmeden önce Matlab'da benzetimi yapılmış ve uygulanacak olan filtre karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra bir işaret üzerinde tek yan bant modülasyon/demodülasyon sonuçları incelenmiş ve son olarak uygulama; uygulama platformu olan DSP bordları ve sualtı işaret alma ve gönderme

transdüserleri ile gerçekleştirilmiştir. DSP uygulama akış diyagramı Şekil 4.5’de gösterilmektedir.



Şekil 4.5: SSB işareti modülasyon/demodülasyon akış diyagramı

4.4.1. Sualtı haberleşmesi DSP uygulaması temel fonksiyonları

Sualtı haberleşmesi DSP uygulaması temel fonksiyonları DSP’de gerçekleştirilen tüm adımları kapsamaktadır. Bu adımlar işaretin analog olarak alınıp sayısal dönüştürülmesi, sayısal olarak işlenmesi yani modülasyon ve demodülasyon işlemlerini ve tekrar analog işarete dönüştürülmesi işlemlerini içermektedir.

4.4.1.1. Codec ses örnekleyici analog/sayısal dönüştürücüleri

Analog yapıdaki işaretler için sayısal işaret işleme yöntemlerinin üstünlüklerinden faydalanabilmek veya haberleşmede sayısal iletim yöntemlerinin üstünlüklerinden yararlanabilmek için analog işaretlerin sayısal biçime dönüştürülmesi gerekmektedir. Analog işaretler, örnekleme, niceleme ve kodlama işlemlerini yerine getiren analog/sayısal dönüştürücüler (A/D, ADC) kullanılarak sayısal işaretlere dönüştürülmektedir. Sayısal haberleşme sistemleri kullanılarak sayısal işaretlerin iletimi gerçekleştirilebilmektedir [70].

Analog/Sayısal (A/D) çevirim, bir analog işaretin, ikili (binary) durumlarla ifade edildiği bir niceleme işlemidir. Bir işaret alındığında ilk olarak analog olduğu için sayısalaya çevrilmesi gerekir ki sayısal ortamda işlenebilsin ve modüle edilebilsin. Bu yüzden vericide ilk olarak işaret, ADC ile analogdan sayısalaya dönüştürülür. ADC işleminin ilk aşamasını oluşturan örnekleme işleminde analog işaretlerden belirli zaman aralıklarında alınan işaret örnekleri sonucunda işaretler zaman uzayında sayısallaştırılmakta ve ayrık zamanlı işaretler elde edilmektedir. Örnekleme sonucunda zaman uzayında ayrık işaretler elde edilmesine rağmen, işaretin alabileceği değerlerde herhangi bir sınırlandırma olmamaktadır. Niceleme sonrasında işaretin alabileceği değer adedi sınırlandırılmaktadır. Dolayısı ile örnekleme sayesinde zaman uzayında ayrık biçime getirilen işaret niceleme sayesinde de genlik uzayında ayrık biçime getirilmektedir. Örnekleme ve niceleme sonucunda sınırlı sayıda değer alan işaret örnekleri elde edilmektedir. İşaret örneklerinin alabileceği değer adedi sınırlandırıldığından, alınabilecek tüm değerler sayısal sözcüklerle ifade edilmesi mümkün olmaktadır. Özet olarak analog işaretler örnekleme, niceleme ve sayısal kod sözcüklerinin atanması aşamalarından oluşan analog/sayısal dönüşüm işlemleri sonucunda sayısal işaretlere dönüştürülmektedir. Uygulamada Codec örnekleme frekansı 96 kHz olarak ayarlanmış olup her bir örnek 16 bit ile ifade edilmektedir.

4.4.1.2. İşaretin örnekleme oranının değiştirilmesi

Bir ayrık-zamanlı işaretin örnekleme oranının değiştirilmesi için, ayrık-zamanlı işaret bir örnekleme frekansında sürekli-zaman işaretine çevrildikten sonra, sürekli-zaman işaretinin başka örnekleme frekansında tekrar bir ayrık-zamanlı işarete çevrilmesi mümkündür. Alternatif olarak, örnekleme oranı doğrudan ayrık-zamanlı bir sistem ile değiştirilebilmektedir. Uygulamada örnekleme oranının değiştirilmesi için ayrık-zamanlı sistemlerin kullanılması tercih edilmektedir. Ayrık zamanlı işaret işleme ile örnekleme oranının azaltılması veya arttırılması mümkündür. Uygulamadaki seyreltme ve genişletme filtresi işlemleri için ilk olarak Matlab ile filtre katsayıları oluşturulmuş ve DSP yazılımı ile uyumlu Texas Inst. firması tarafından geliştirilen DSPLIB kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.4.1.2.1. Seyreltme filtresi

M bir tam sayı olmak üzere, bir ayrık-zamanlı işaretin örnekleme oranının tamsayı katında azaltılması $x_a[n] = x[Mn]$ şeklinde ifade edilmektedir. $x[n]$ dizisi bir sürekli-zaman işaretinin T_δ örnekleme periyodunda örneklenmiş şekli olarak düşünülecek olursa $x[n] = x_s(nT_\delta)$ ilişkisi geçerli olacaktır. Bu durumda örnekleme oranının değiştirildiği $x_a[n]$ dizisi, aynı sürekli-zaman işaretinin $x_a[n] = x(MnT_\delta) = x(nT'_\delta)$ bağıntısı doğrultusunda $T'_\delta = MT_\delta$ örnekleme periyodunda ($f'_\delta = f_\delta / M$) örneklenmiş biçimi olacaktır. Saniyede alınan örnek sayısını belirten örnekleme frekansı M kat azaltıldığında örnekleme oranı M kat düşürülmektedir.

Örnekleme oranının ayrık-zamanlı olarak M kat azaltılması $x_a[n] = x[Mn]$ bağıntısı doğrultusunda, $x[n]$ işaretinin her M örneğinin tutularak aradaki örneklerin atılması anlamına gelmektedir.

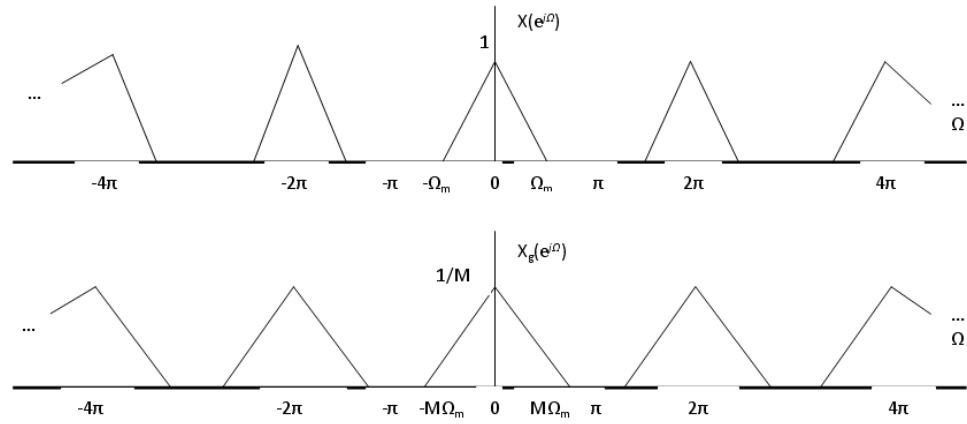
Örnekleme oranını azaltılması işleminde işaretin örnek sayısı azaltıldığından, bilgi kaybı söz konusudur. Eğer ayrık-zamanlı işaret bir sürekli-zaman işaretinin örneklenmesi sonucu elde edilmiş gibi düşünülürse, ilk örnekleme oranı yüksek tutulduğu takdirde zaten fazla örnek alındığından bilgi kaybına neden olmadan örnekleme oranının ayrık-zamanda azaltılması söz konusu olabilmekte, aksi durumda bilgi kaybı meydana gelmektedir. Bilgi kaybı, frekans uzayında örtüşme olarak gözükmemektedir. Bu nedenle örnekleme oranının azaltılması sırasında frekans uzayında meydana gelen değişmelerin incelenmesi gerekmektedir. Ayrık-zamanlı $x[n]$ işareti bir sürekli zaman $x_s(t)$ işaretinin T_δ örnekleme periyodunda örneklenmiş şekli olarak düşünülecek olursa $x[n] = x_s(nT_\delta)$, ayrık zamanlı işaret ile sürekli zaman işaretinin frekans spektrumu arasındaki ilişki

$$X(e^{j\Omega}) = \frac{1}{T_\delta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_s\left(\frac{\Omega}{T_\delta} - \frac{2\pi k}{T_\delta}\right) \quad (4.3)$$

şeklinde oluşmaktadır. Ayrık-zamanlı bir işlem ile örnekleme oranı M kat azaltılmış $x_a[n]=x[Mn]$ dizisinin, aynı sürekli zaman işaretinin $T'_o=MT_o$ periyodunda örneklenmesi sonucu oluştuğu düşünülecek olursa

$$X_o(e^{j\Omega}) = \frac{1}{MT_o} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_s\left(\frac{\Omega}{MT_o} - \frac{2\pi k}{MT_o}\right) \quad (4.4)$$

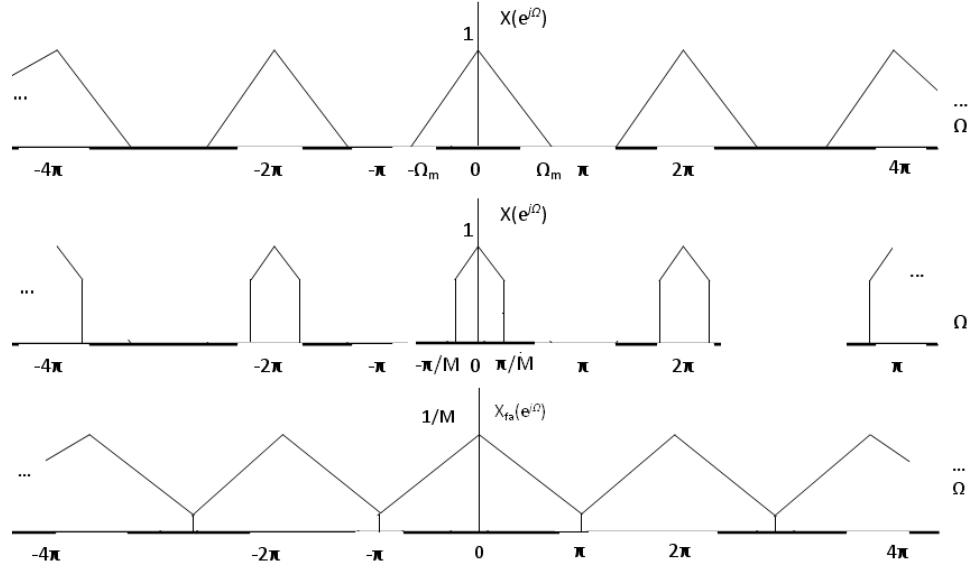
ilişkisi oluşmaktadır. $x[n]$ işaretinin spektrumundan $x_a[n]$ işaretinin spektrumuna geçerken spektrum genliği M kat azalmakta, yani $1/M$ ile çarpılmaktadır. Ayrıca frekans ekseninde spektrumun 2π 'ye göre periyodikliği bozulmadan M kat bir yayılma meydana gelmektedir. Şekil 4.6'da bir ayrık-zamanlı işaretin örnekleme oranının ayrık-zamanda azaltılması nedeniyle işaretin frekans spektrumunda meydana gelen değişiklik gösterilmektedir. Örnek oranının ayrık-zamanlı olarak azaltılması işlemi aşağı örnekleme (downsampling) olarak adlandırılmaktadır [71].



Şekil 4.6: Örneklem oranının ayrık-zamanda azaltılmasının frekans spektrumunda etkisi[71]

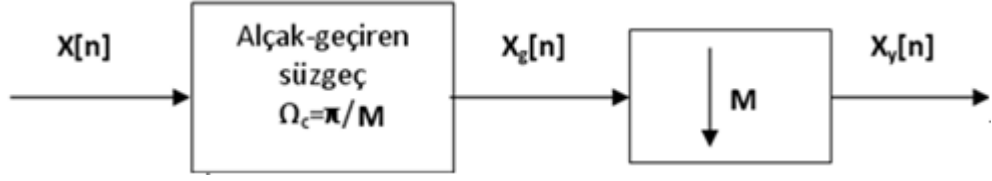
Frekans spektrumunda bir çakışma olmaması için $M\Omega_m \leq \pi$ olmalıdır. Bu nedenle $x[n]$ işaretinin maksimum frekans bileşeni $\Omega_m \leq \pi/M$ bağlantısı sağlanmalıdır. Aksi durumda işaretle bilgi kaybı ve bozulma meydana gelmektedir. Örneklem oranının düşürülmesinden önce, ayrık-zamanlı $x[n]$ işaretinin, kesim frekansı $\omega_c = \pi/M$ olan alçak geçiren süzgeçten geçirilmesiyle örnekleme oranı azaltılmasının frekans spektrumunda örtüşmeye yol açması önlenmektedir. Örtüşmenin bozucu etkisi

önlenmekle beraber, örnekleme oranının örtüşme olmaksızın düşürülmesi için işaret bant genişliğini süzgeç ile daraltıldığından bir miktar bilgi kaybı meydana gelmektedir [71].

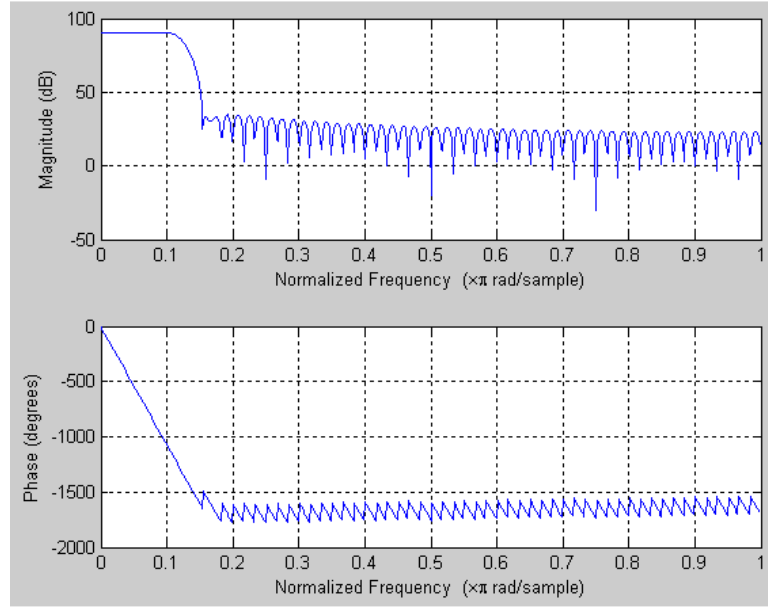


Şekil 4.7: Frekans spektrumunda örtüşmenin süzgeç kullanımı ile önlenmesi[71]

Bazı durumlarda bu kayıp örnek sayısının azaltılması ile elde edilen kazanç için göze alınabilmektedir. Şekil 4.7’de örnekleme oranının azaltılmasından önce kesim frekansı $\Omega_c = \pi/M$ olan alçak geçiren süzgeç kullanımı ile örtüşmenin önlenmesi gösterilmektedir. Uygulamada örnek oranının ayırık zamanlı olarak azaltılması durumunda, her zaman önce alçak geçiren bir süzgeç kullanımı ile frekans spektrumunda örtüşme olasılığı engellenebilmektedir. Şekil 4.8’de örnekleme oranının M kat azaltılmasını gösteren sistem blok diyagramı ve örtüşme önleyen alçak geçiren süzgeç kullanımı gösterilmektedir. Örnek oranının azaltılması için kullanılan bu sistem örnek seyreltici (decimator), bu şekilde gerçekleştirilen örnek azaltma işlemi de örnek seyreltme (decimation) olarak adlandırılmaktadır [71]. Uygulamada 96 kHz örnekleme hızı ile elde edilen işaret 8 kat azaltılarak 12 kHz’lik bir işarete dönüştürülür. Bu sayede DSP’de gerçekleştirilecek işlemlerde hem azalma olur hem de olabilecek gecikmeler en aza indirilir. Şekil 4.9’da uygulamada kullanılan Matlab ile elde edilen seyreltme filtresi gösterilmektedir.



Şekil 4.8: M kat azaltılmalı sistem blok diyagramı[71]



Şekil 4.9: Seyreltme filtresi frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu

4.4.1.2.2. Genişletme filtresi

L bir tamsayı olmak üzere, bir ayrık zamanlı işaretin örnekleme oranının tamsayı katında artırılması

$$x_y[n] = x[n/L] \quad n = 0, \pm L, \pm 2L, \dots \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Uygulamada işaret değerlerinin sadece $n = 0, \pm L, \pm 2L, \dots$ için bulunması yeterli değildir, aradaki örnek değerlerinin de tespit edilmesi gerekmektedir. Örnekleme oranının ayrık-zamanlı işaret işleme sonucu artırılması yukarı-örnekleme (upsampling) olarak adlandırılmaktadır. Yukarı örnekleme işlemi iki bölüm halinde ele alınabilmektedir. Önce $x[n]$ işaretlerinin örnekleri arası

açılarak araya sıfır değerlerinin doldurulması ile zaman ekseninde bir genişletme gerçekleştirilmektedir. Bu durumda oluşan $x_g[n]$ işareti

$$\begin{aligned} x_g[n] &= x[n/L], n = 0, \pm L, \pm 2L, \dots \\ x_g[n] &= 0, \text{ aksi takdirde} \end{aligned} \quad (4.6)$$

veya

$$x_g[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \delta[n - kL] \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. $x_g[n]$ işareti, $x[n]$ işaretinin zaman ekseninde genişletilmiş şekline karşılık gelmektedir. $x_g[n]$ işaretinin Fourier dönüşümü alınarak, genişletilmiş işaret frekans spektrumu

$$X_g(e^{j\Omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \delta[n - kL] \right) e^{j\Omega n} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] e^{j\Omega kL} = X(e^{j\Omega L}) \quad (4.8)$$

şeklinde $x[n]$ işaretinin frekans spektrumu ile ilişkilendirilmektedir. Ayrık-zamanlı işaret frekans spektrumunun 2π 'ye göre periyodikliği bozulmamakta, fakat aralara frekans bileşenleri girmektedir. Ayrık-zamanlı $x[n]$ işareti, bir sürekli-zaman $x_s(t)$ işaretinin T_{δ} örnekleme periyodunda örneklenmiş şekli olarak düşünüldüğünde, ayrık zamanlı işaret ile sürekli zaman işaretinin frekans spektrumu arasındaki ilişki

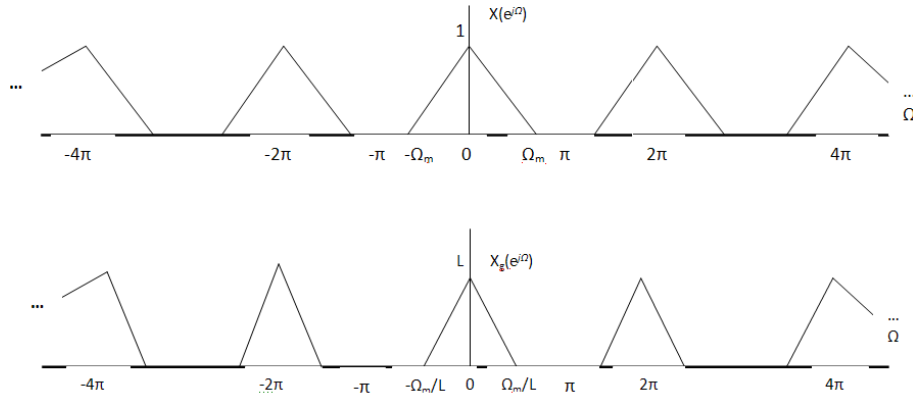
$$X(e^{j\Omega}) = \frac{1}{T_{\delta}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_s\left(\frac{\Omega}{T_{\delta}} - \frac{2\pi k}{T_{\delta}}\right) \quad (4.9)$$

şeklinde bulunmaktadır [71].

Ayrık zamanlı bir işlem ile örnekleme L kat arttırılmış $x_y[n] = x[n/L]$ dizisinin, aynı sürekli zaman işaretinin $T'_\delta = T_\delta/L$ periyodunda örneklenmesi sonucu oluştuğu düşünülecek olursa

$$X_y(e^{j\Omega}) = \frac{L}{T_\delta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_s\left(\frac{\Omega}{T_\delta} - \frac{2\pi k}{T_\delta/L}\right) \quad (4.10)$$

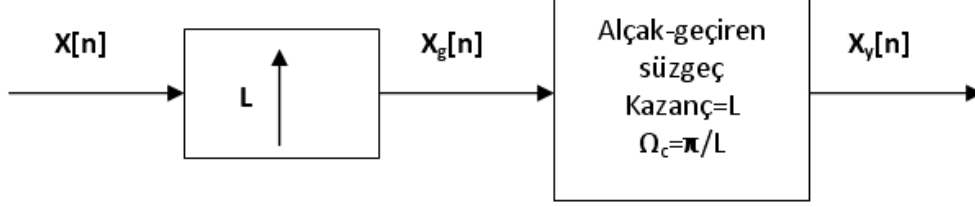
ilişkisi elde edilir. $x[n]$ işaretinin spektrumundan $x_y[n]$ işaretinin spektrumuna geçerken spektrum genliği L kat artmakta, yani L ile çarpılmaktadır. Ayrıca frekans ekseninde spektrum 2π 'ye göre periyodikliği bozulmadan L kat bir daralma meydana gelmektedir. Şekil 4.10'da bir ayrık zamanlı işaret örnekleme oranının ayrık-zamanda arttırılması nedeniyle işaretin frekans spektrumunda meydana gelmesi gereken değişiklik gösterilmektedir [71].



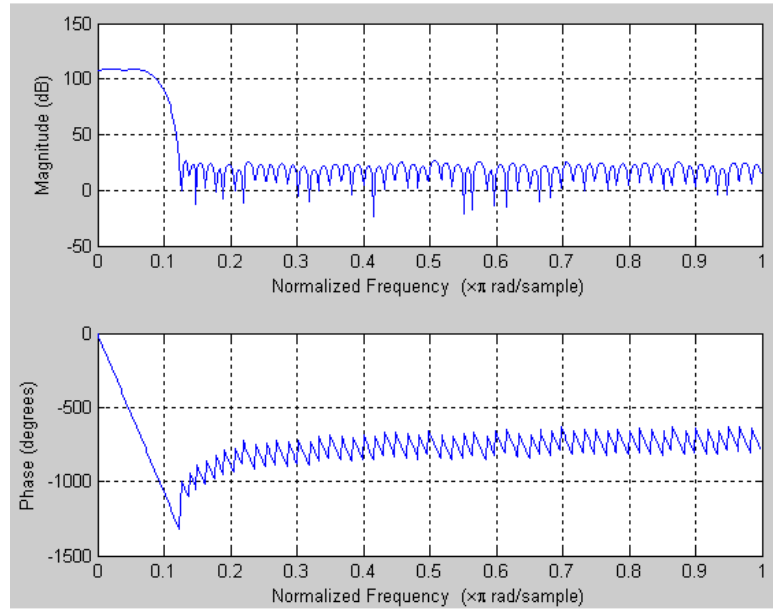
Şekil 4.10: Örnekleme oranının ayrık-zamanda arttırılmasının frekans spektrumuna etkisi[71]

Zaman uzayında genişletilmiş işaretin frekans spektrumu incelendiğinde, zaman uzayında genişletilmiş işaretin, kazancı L olan bir alçak geçiren süzgeçten geçirilmesi sonucunda örnek oranı arttırılmış işaretin elde edilebildiği görülmektedir. Alçak geçiren süzgeç işlevi ara değerlendirme ile işaretin örnekleme oranı arttırılmaktadır. Şekil 4.11'de gösterilen bu sistem ara değerlendirici (interpolator) ve bu şekilde örnek oranının arttırılması işlemi de ara değerlendirme (interpolation) olarak adlandırılmaktadır. Uygulamada 12 kHz örnekleme hızı ile elde edilen işaret 8

kat artırılarak 96 kHz'lik bir işarete dönüştürülüyor. Şekil 4.12'de uygulamamızda kullanılan Matlab ile elde edilen genişletme filtresi gösterilmektedir.



Şekil 4.11: Ara değerlendirici blok diyagramı[71]



Şekil 4.12: Genişletme filtresi frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu

4.4.1.3. Bant geçiren analitik filtre çifti birleşimi

Sayısal filtre, sayısallaştırılmış analog işaretler üzerinde çalışan, giriş işaretini istenen çıkış işaretine dönüştüren yöntem ya da algoritmadır. Uygulama alanları çok geniş olan filtrelerin başlıca tasarım amaçları arasında, karışmış işaretleri birbirinden ayırmak, işarettaki gürültüyü azaltarak işaret kalitesini arttırmak ve bozulmuş işaretin tekrar elde edilmesi sayılabilir [76].

Sayısal filtreler, sayısal giriş işaretini işleyen donanım ve yazılımı yürüten matematiksel bir algoritmadır. Sayısal filtre terimi, filtreleme algoritmasını işleten

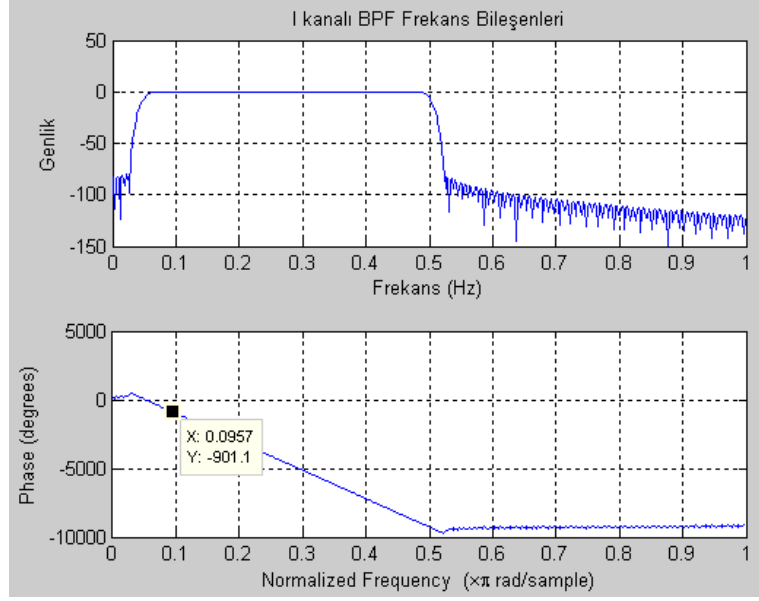
özel donanım ve özel yazılım rutinini belirler [77]. Sayısal filtrede işaretler gerilim ya da akım olarak değil, sayı dizisi olarak ifade edilir. Bunun için analog işaretlerin sayısallaştırılması gerekir. Sayısal filtre donanım yapısında işlemci barındırır. Filtrenin örneklenerek sayısal dizi haline getirilen analog işaretle gerçekleştireceği hesaplamaları yapan bu işlemci, mikrodenetleyici, DSP işlemcisi veya herhangi bir bilgisayarın işlemcisi olabilir. Filtre çalışmasında en önemli iki nokta; filtre için program kodlarının geliştirilmesi ve filtrenin uygulanmasıdır [78]. Uygulamada filtrenin süzeceği işaretin ve gürültünün özellikleri doğrultusunda filtre katsayıları belirlenmiştir. Matematiksel ifadesi bulunan filtre, Matlab programı kullanılarak benzetimi yapılmış ve sonuçlar frekans spektrum analizinde değerlendirilmiştir. Bir analitik filtre çifti üretmedeki avantajlar kullanılmıştır.

İstenen dönüşüm-bant karakteristiğine sahip bir alçak geçiren filtre tasarlayarak bant geçiren analitik filtre işlemine başlanır. $H(w)$ 'nin darbe yanıtını $h(t)$ olmak üzere, darbe yanıtının ω_0 açısal frekansın karmaşık sinüzoidal ile çarpımı iki grup katsayı ile sonuçlanır ve bunlardan bir tanesi gerçek $h_I(t) = h(t)\cos(\omega_0 t)$ ve diğeri sanal $h_Q(t) = h(t)\sin(\omega_0 t)$ kısmıdır. Bir bant geçiren filtre (BPF) merkez frekansı ω_0 olmak üzere Q filtresi, I filtresinden farklı olarak 90 derece farklı faz yanıtına sahiptir. LPF prototipinin L katsayıları dönüşümünü gerçekleştirmek için $0 \leq k \leq L-1$ olmak üzere yeni katsayıları hesaplanır;

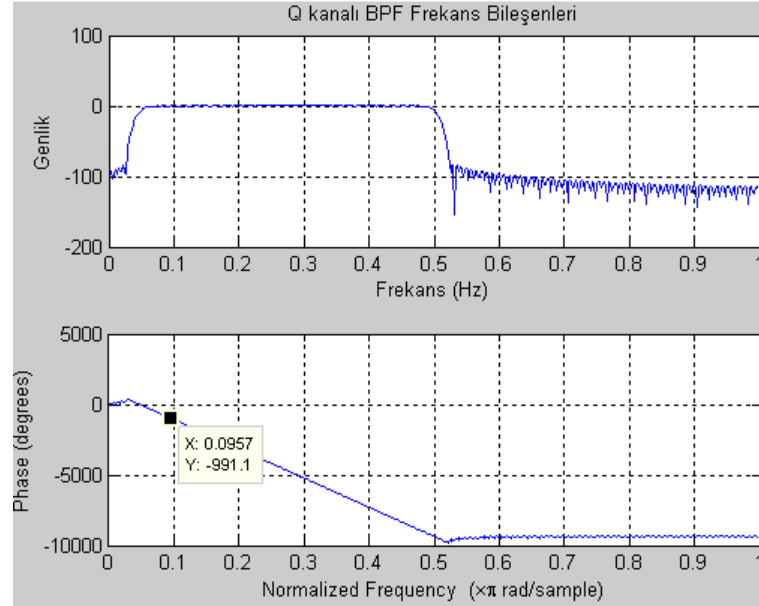
$$h_I(k) = h(k) \cdot \cos \left[\omega_0 \left(k - \frac{L}{2} + \frac{1}{2} \right) t_s \right] \quad (4.11)$$

$$h_Q(k) = h(k) \cdot \sin \left[\omega_0 \left(k - \frac{L}{2} + \frac{1}{2} \right) t_s \right] \quad (4.12)$$

(4.11) ve (4.12) nolu denklemlerdeki t_s örnekleme periyodudur. Alçak geçiren filtre dönüşüm bandının sıfıra yakın frekansı olması SSB için istenen bir durumdur. BPF'nin bant genişliği yaklaşık olarak LPF bant genişliğinin iki katıdır [79]. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de I ve Q kanalı BPF işareti frekans spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 4.13: I kanalı BPF işareti frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu



Şekil 4.14: I kanalı BPF işareti frekans bölgesi genlik ve faz spektrumu

Uygulamada kullanılan bant geçiren süzgeç 300–3000 Hz arasındaki işareti geçirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu filtre frekans aralığı STANAG 1074 standardında belirtilmiş olup, bu filtre katsayıları Matlab ile elde edilmiş ve DSP uygulamasına aktarılmıştır.

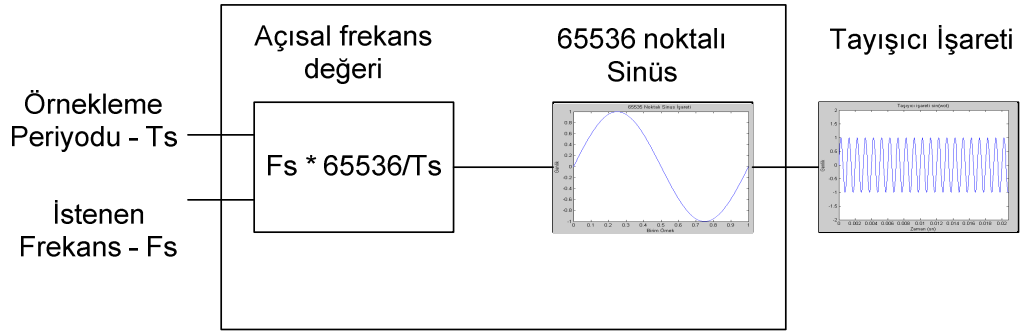
4.4.1.4. Taşıyıcı işareti oluşturma

Bir kaynaktan gelen işaret, taşıyıcı bir dalgayı modüle etmekte kullanılır ve yükseltip yayınlamak için transdüser'e gönderilir. Alıcıdaysa, önce transdüser ile alınan işaret ön yükselteç ile yükseltildikten sonra; seçilen taşıyıcı ile bu işaret demodüle edilir ve hoparlöre gönderilir.

Akustik işaret alınırken istenilen işareti ve öteki işaretleri birbirinden ayıracak herhangi bir düzenleme yoksa alınan işaret çok bozuk olur. Üstelik belli bir alan içinde çok sayıda ve alınmak istenen işaret uzakça bir kaynaktan yayınlanıyorsa, sonuç daha da kötüleşir. Bu sorunun üstesinden gelmek için modülasyon kullanılır. Her verici istasyonun, "taşıyıcı frekans" denilen, kendine özgü bir ton yapısı kazanması sağlanır. Böylece, istenilen akustik işaret yayını seçilir. Alıcı aygıt taşıyıcı dalga frekansına ayarlanır ve uygun bir işaret işleme algoritması yardımıyla taşıyıcı dalga, asıl işaretten ayrılır. Demodülasyondan sonra işaret hoparlöre gönderilir.

Uygulamada bir genlik modülasyon çeşidi olan tek yan bant modülasyonu kullanılmıştır. Genlik modülasyonlu bir verici için ilk koşul taşıyıcı frekansın değişmez tutulmasıdır. Tersine, alıcıdaki ses niteliğinin bozulmasına ve sesin alçalıp yükselmesine neden olur. Frekansın değişmemesi için, DSP ile taşıyıcı frekans oluşturma algoritması kullanılarak oluşturulan taşıyıcı işareti "Sinüs Dalgası" biçimindedir [72].

DSP'de taşıyıcı işareti elde edilmesi Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Önce DSP'de 65536 adet örnekten oluşan bir sinüs dizisi tutulur, örnekleme hızına ve istenen frekansa göre elde edilen katsayı ile bu sinüs dizisinden elde edilen katsayı katları olacak şekilde örnekler alınarak istenilen taşıyıcı frekansı elde edilmiş olur.



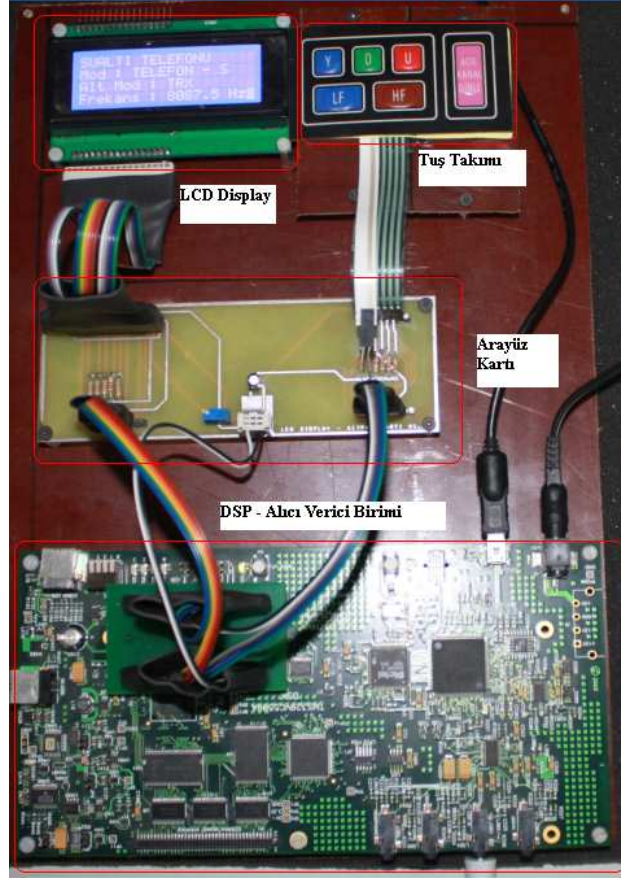
Şekil 4.15: Taşıyıcı işareti elde etme algoritması

4.4.2. DSP tabanlı sualtı haberleşme uygulaması donanım birimleri

DSP tabanlı sualtı haberleşmesi uygulaması donanım birimleri uygulamadaki alıcı ve verici taraftaki tüm donanım birimlerini kapsamaktadır. Bu kapsamda alıcı-verici işareti işleme birimi, verici güç yükselteci, alıcı ön yükselteci ve 8103 hidrofONU anlatılmıştır.

4.4.2.1. Alıcı-Verici işaret işleme birimi

Alıcı-Verici işaret işleme birimi hem alma hem de gönderme işlemlerini gerçekleştirilebilen TMS320C5509A DSK, LCD ekran, tuş takımı ve arayüz kartı alt birimlerinden oluşan bir birimdir. Bu birim uygulamanın en temel birimi olup tüm işaret işleme ve veri aktarım işlemleri bu birim üzerinde gerçekleştirilir. Birimdeki tuş takımı ve LCD ekranı ile DSP ve kullanıcı arasında bir arayüz oluşturulur. Bu sayede kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda hem DSP'yi yönlendirir hem de sistem parametreleri hakkında sürekli bilgi sahibi olur. Bu arayüz ile kullanıcı sistemi ya alıcı ya da verici olarak kullanabilir veya daha önceden bilinen taşıyıcı frekanslarından birini seçerek sistemin taşıyıcı frekansını değiştirebilir. Şekil 4.16'da Alıcı-Verici işaret işleme birimi gösterilmektedir.



Şekil 4.16: Alıcı–Verici işaret işleme birimi

4.4.2.2. Verici yükselteç katı

Yükselteçler girişine uygulanan elektrik işaretini yükselten elektronik devrelerdir. Burada yükseltece uygulanan işaretler, mikrofonun elektrige çevirdiği ses, teyp kafasının elektrige çevirdiği manyetik enerji ve benzeri, yükseltilmesi istenen elektrik işaretleridir.

Bir ses dalgasının, ısının, görüntünün, basınç değişikliğini elektrik işaretine çeviren veya bunların tersini yapan elektronik devre elemanlarına “transdüser” denir. Bu, elektrik işaretlerini yükselteçlerle kullanabilecek duruma getirir. Mikrofonun elektrik işaretine çevirdiği ses dalgasına benzer. Bu işaret bir de yükselteçle değişikliğe uğradığından ses dalgasının aynısını hoparlörden işitmemiz mümkün olmaz. Akustik alıcı ve vericiler, yükselteçler hariç sayısal bölgede analog çarpıcıya ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilebilir [73]. İleri teknoloji sayesinde buna çok yaklaşılmakla birlikte, mutlaka bir farklılık olacaktır. Bu farklılık; mikrofon, yükselteç ve

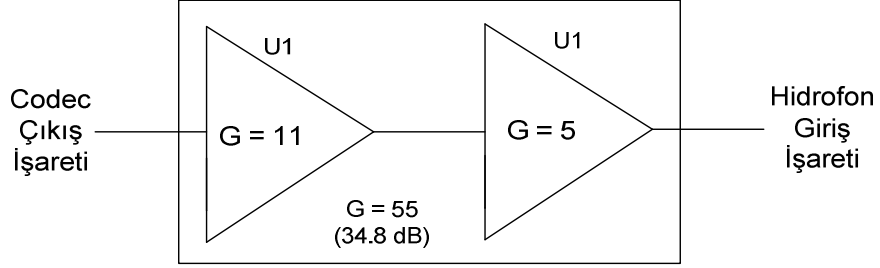
hoparlörün kalitesi ile yakından ilgilidir. Mesela, sesin derinliği yok olur veya basınç (düşük frekanslı) ses işaretlerini mikrofon ile daha düşük elektrik işaretine çevirir, sonuçta hoparlörden bu frekanstaki sesler duyulmaz olurlar.

Verici tarafta kullanılan yükselteç “Güç Yükselteci” olarak adlandırılır. Bu tip yükselteçler, elektrik işaretleri (televizyon ekranı, hoparlör gibi) kumanda edebilecek seviyeye kadar yükseltir. Girişe uygulanan elektrik işareti herhangi bir bozulmaya uğratmadan yükseltirler. Bu tip yükselteçler girişi aynen yükselttiklerinden tercih edilirler. Çünkü sesin herhangi bir bozulmaya uğramaması istenir [74].

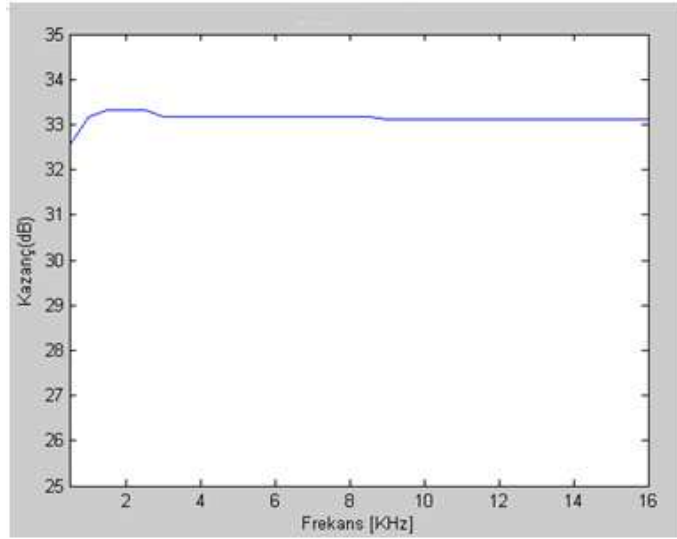
Güç yükselteci çıkış katlarındaki transdüser, hoparlör gibi dönüştürücüleri sürmek için gerekli olan gücü sağlayan yükselteçtir. Güç yükseltecinde fazla güç elde etmek söz konusu olduğu halde uygulamaya bağlı olarak bazen yüksek akım bazen yüksek gerilim gereklidir. Bundan dolayı buradaki işaretler büyük genliklidir. Çıkış katından önce bir veya daha fazla yükselteç katı vardır. Buradaki işaret genlikleri oldukça küçük olduğundan buradaki çalışma küçük işaretli A sınıfı çalışmadır. Bu katlar giriş ve ara yükselteç katları olup bunların görevleri küçük genlikli işaretleri kuvvetlendirerek çıkış katını sürebilmektedir. Daha önce belirttiğimiz gibi güç yükselteci mikrofon gibi transdüserlerden başlayarak devam eden yükselteç zincirinin son katıdır. Yükselteç zincirinin düzenlenmesinde hesaplamaya çıkış katından başlanır. Bu hesaplamayı yaparken çıkış katının süreceği sistemin çekeceği gücü bilmek gerekir. Kullanılacak devre elemanları bu güce uygun olacak şekilde seçilmelidir. Buradaki çıkış gücü transistörün ideal bir eleman olduğu kabulü ile hesaplanmıştır. Gerçekte çok küçük değişimler için dahi giriş ve çıkış işaretleri arasında bir farklılık vardır. Büyük genlikler için bu farklılık daha fazla olmaktadır [75].

Uygulamada güç yükselteci bir işlemsel yükselteç (TL071) ve bir güç işlemsel yükseltecinden (PA04) oluşmaktadır. İki işlemsel yükselteçli verici yükselteç blok diyagramı Şekil 4.17’de gösterilmektedir. İlk olarak işaret bir işlemsel yükselteç ile 11 kat yükseltilerek küçük genlikli işaretlerin belli bir seviyeye yükseltilmesi sağlanır. Daha sonra yükseltilmiş codec işaretinin daha yüksek genlik seviyelerine çıkabilmesi için bir güç işlemsel yükselteci ile 5 kat daha yükseltilerek işaretin 55 (34.8 dB) kat yükseltilmesi sağlanır. Güç işlemsel yükselteci olarak PA04

seçilmesinin nedeni yüksek güç bant genişliği ve yüksek çıkış gerilimi sağlaması ve transdüser uygulamaları için uygun olmasıdır. Uygulamada ek olarak güç yükselteci çıkışına empedans uydurma için bir 1:3'lük bir trafo eklenmiştir. Şekil 4.18'de güç yükselteci devresinin frekansa bağlı gerilim kazancı gösterilmektedir.



Şekil 4.17: Verici yükselteç katı blok diyagramı

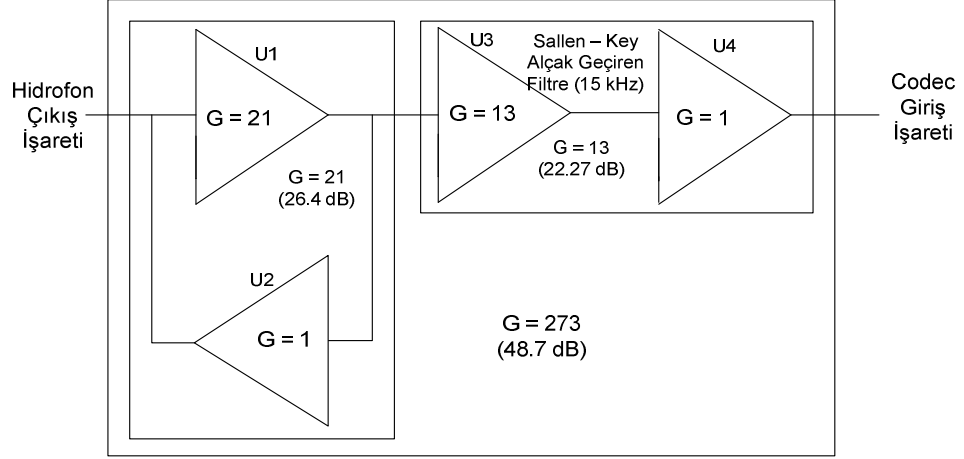


Şekil 4.18: Güç yükselteci devresinin frekansa bağlı gerilim kazancı

4.4.2.3. Alıcı ön yükselteç katı

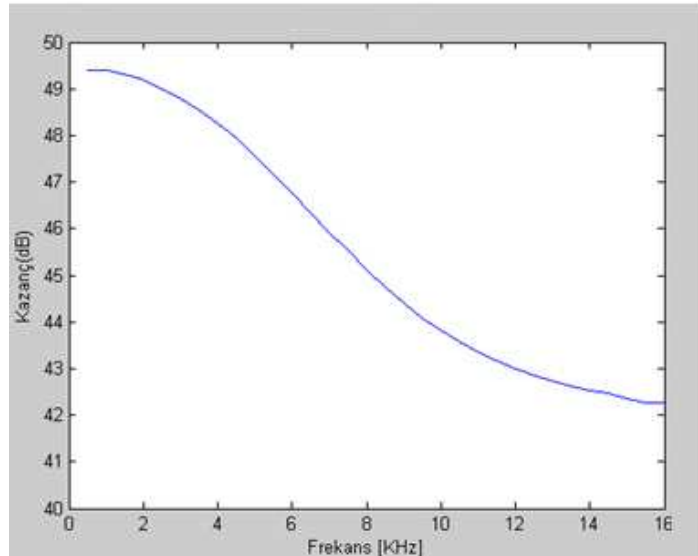
Ölçümler alınmadan önce hidrofon yüksek empedanslı çıkış işareti düzeltmesi (signal conditioning) yapılarak yükseltece yönlendirilir. Alıcı tarafta kullanılan ön yükselteç devre blok diyagramı Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Bu devrede kullanılan işlemsel yükselteç LPC662 iki adet işlemsel yükselteçten oluşmaktadır. U1 ve U2 işlemsel yükselteci ile hidrofon çıkışının empedans uygunlaştırılması, AC kuplajlama ve gelen DC işaretin atılması işlemleri gerçekleştirilir. U3 ve U4 işlemsel

yükselteci ile devrenin yüksek frekanslı işaretleri atması için ardışık Sallen-Key alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Ardışık Sallen-Key alçak geçiren filtre ile 15-16 kHz üstündeki işaretlerin atılması sağlanmaktadır.



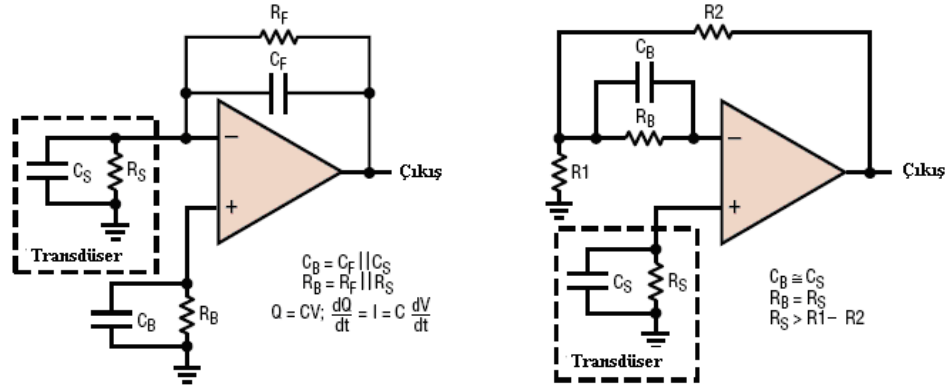
Şekil 4.19: Ön yükselteç devre blok diyagramı

LPC662 düşük gerilim gürültü ve düşük akım gürültüsü sunan, transdüser empedanslarının geniş alanında kullanılan çift yapılı bir işlemsel yükselteçtir. Genellikle, işlemsel yükselteç kullanıcıları transdüser için en düşük gürültüye sahip olabilen işlemsel yükselteç seçimi ile karşılaşır. Bir yükseltecin akım gürültüsü giriş bias akımının bir fonksiyonudur. Şekil 4.20’de ön yükselteç devresinin frekansa bağlı gerilim kazancı gösterilmiştir.



Şekil 4.20: Ön yükselteç devresinin frekansa bağlı gerilim kazancı

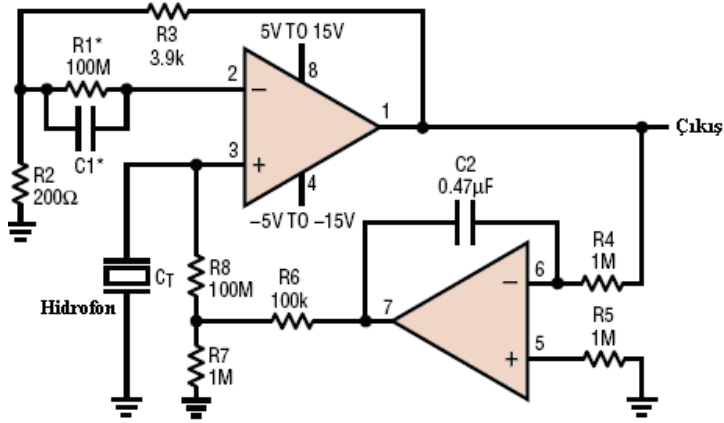
Düşük gerilim ve akım gürültü birleşimi geniş uygulama alanında kullanılan LPC662 özellikle hidrofon gibi yüksek empedans, kapasitans transdüserleri için önerilmiştir. Bazı durumlarda kaynak empedans ve giriş kapasitesinin neden olduğu kutbu engellemek için kaynak direncine paralel bir kapasitör eklenmesi gerekli olabilir.



Şekil 4.21: İşlemsel yükselteç için tersleyen ve terslemeyen kazanç tasarımı[80]

Şekil 4.21’de tersleyen ve terslemeyen işlem modlarında bir işlemsel yükselteç kazanç tasarımı gösterilmiştir. Şarj yükselteç tersleyen mod örneği olarak gösterilmiştir, burada kazanç giriş yükseltecindeki şarj bağlantı prensibine bağlıdır. Şarj transdüser kapasitans üzerinde, C_s , geri besleme kapasitörüne transfer edilir, C_F , gerilimdeki değişim nedeniyle, dV , dQ/C_F ’e eşittir, C_F/C_s ’nin kazancı nedeniyle bileşik kazanç, C_F transdüser kapasitansı artı yükseltecin giriş kapasitesine eşittir ve R_F , R_s ’e eşit olmalıdır. Terslemeyen modda, transdüser akımı transdüser kapasitesi ile gerilimde bir değişime dönüştürülür, bu gerilim daha sonra $1 + R_2/R_1$ kazanç ile yükselteç tarafından tamponlanır. Bir DC yol transdüser direnci ya da harici bir direnç olan R_s tarafından sağlanır. R_s genellikle R_1 ve R_2 ’nin paralel bileşiminin bir kaç kat büyüklüğündedir, R_B terslemeyen giriş bias akımı ve R_s ’nin neden olduğu DC ofseti dengelemek için eklenir. Giriş bias akımları, oda sıcaklığında az olmasına rağmen, özellikle 100M veya daha fazla transdüser dirençlerinde sıcaklığın artması ile önemli derecede hatalar yaratabilir. R_B için optimum değer akım gürültüsünün R_s ile çarpımına ısı gürültü eşitliği ($4kTR_s$) ile karar verilir. Paralel kapasite C_B , işlemsel yükselteç giriş kapasitesi ve R_B ’nin neden olduğu faz kaymasını engellemek için kullanılır [80].

LPC662 işlemsel yükselteç yüksek empedans transdüserleri için uygun bir yükselteçtir. Şekil 4.22’de düşük gürültü hidrofon yükselteci LPC662’li bir uygulama verilmiştir. Hidrofon AC akım çıkışı 100 M giriş direnci (R8) ile bir gerilim çıkışına dönüştürülür. Bu işaret R3/R2 oranında yükseltilir. Hidrofon çıkışındaki DC sızıntı akımı geri besleme servo etkisi ile çıkartılır.



Şekil 4.22: DC ofset uygunlaştırıcılı düşük gürültü hidrofon yükselteci[80]

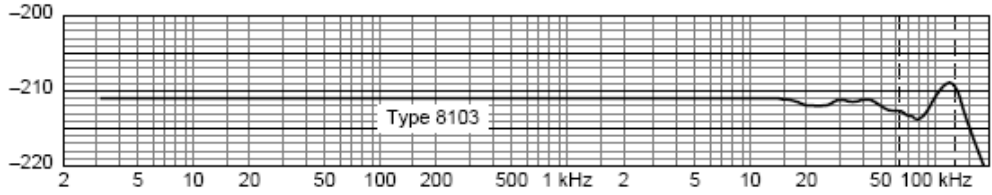
4.4.2.4. Type 8103 hidrofon

Type 8103 yüksek frekanslı laboratuvar, endüstriyel kullanım ve özellikle deniz canlıları ve kavitasyon ölçümleri için uygundur. Küçük boyutlu, -211 dBre1V/μPA alıcı hassasiyetli 0.1 Hz ile 180 kHz frekansları arasında tam doğruluklu ses ölçümleri için yüksek duyarlılıklı hidrofondur. Yüksek duyarlılığa sahip boyut ve çok yönlü karakteristiği Type 8103’ü laboratuvar, endüstriyel ve eğitim kullanımları için uygulanabilir yapar. Şekil 4.23’de Type 8103 gösterilmektedir.



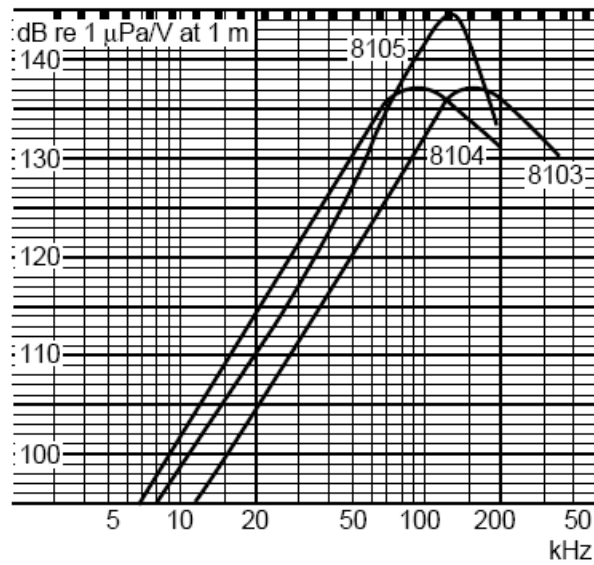
Şekil 4.23: Type 8103 Hidrofon[82]

B&K hidrofönler sensör elemanı olarak piezoelektrik kullanılan transdüserlerdir. Type 8103 Hidrofön dış yapısı desteği 70–30 Bakır-Nikel metal alaşımından oluşur. Dahili desteği mekanik ve elektriksel olarak sentetik kauçuk tarafından birleştirilerek, metal dış kılıfı yalıtımlıdır. Bu algılama elemanının titreşimden yalıtımını sağlar. Şekil 4.24’de Type 8103 için alma frekans karakteristiği gösterilmektedir.



Şekil 4.24: Type 8103 için alma frekans karakteristiği[82]

Algılama elemanının piezoelektrik etkisi, tersinedir yani mekanik uyarılma bir elektriksel çıkışa neden olurken, elektriksel bir alternatif gerilimi mekanik uyarılmaya neden olur. Type 8103 ses iletici olarak (projektör) ölçüm ve karşılıklı kalibrasyon için kullanılabilir. Şekil 4.25’de Type 8103 için sudaki verici frekans yanıtı gösterilmiştir. Şekilde sabit gerilim girişi ile sürülen piezoelektrik için eğim tipik olarak 12 dB/octave’dır. Hidrofön bir projektör olarak kullanıldığında, işaretin bir güç yükseltici ile sürülmesi gerekir [82].



Şekil 4.25: 8103, 8104 ve 8105’in verici frekans yanıtı[82]

4.5. TMS320C5509A DSK İle Sualtı Haberleşme Uygulamaları

TMS320C5509A DSK ile sualtı haberleşme uygulamaları ilk olarak su üstü prototip uygulamalarında gerçekleştirilmiştir. Su üstü prototip uygulamalarının amacı daha esnek olması, mesafe ve iletim ortamından dolayı oluşabilecek zayıflama ve saçılma etkilerin burada gözükmemesidir. Prototip uygulamalarında tuş takımı ve LCD ekranı ile kullanıcı farklı taşıyıcı frekansları (8087 Hz, 39000 Hz) seçebilmekte ve bu seçtiği taşıyıcı frekansları ekranda görebilmektedir. Buna ek olarak rasgele taşıyıcı frekansları kullanılarak gerçekleştirilen sualtı haberleşmesi uygulamasında da aynı prototip kullanılmış olup kullanıcı alıcı ve verici tarafta işaretin hangi taşıyıcı frekansı ile gönderildiği ve alındığı görülebilmektedir.

Sualtı haberleşmesi sualtı test havuzu uygulamalarında su üstü prototip uygulamalarından farklı olarak yükselteç ve transdüser kullanılmıştır. Burada gerçek bir sualtı haberleşme uygulaması gerçekleştirilmiş ve sualtı haberleşme uygulamaları için alternatif olabilecek bir laboratuvar uygulama ortamı sağlanmıştır. Burada kullanılan transdüserler B&K firmasına ait Type 8103 transdüserlerdir. Ticari ve askeri sualtı telefonu gibi sualtı haberleşme sistemlerinde genel olarak sadece rezonans frekanslarında yüksek güçte iletim sağlayan ve alan transdüserler kullanılmaktadır. Bu tür ticari ve askeri uygulamalar için önerilen transdüserler Elac firma ait TSE-7 ve TSE-5 veya Reson firmasına ait TC1035 ve TC1037 transdüserleridir. Sualtı test havuzu uygulamaları tek taraflı (half duplex) olup donanım ve kullanılan transdüser gibi kısıtlamalar nedeniyle sadece 16 kHz'e kadar olan taşıyıcı işareti kullanan uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

4.5.1. TMS320C5509A DSK ile sabit taşıyıcı frekansları kullanılan sualtı haberleşmesi uygulaması

Uygulamalar tek veya iki DSK ile gerçekleştirilmiştir. Tek DSK ile gerçekleştirilen uygulamalar daha çok test amaçlı ve sistem yazılım ve işaret işleme algoritmalarının kontrolünde kullanılan uygulamalardır. İki DSK'lı uygulamalar ise gerçek zamanlı sistem test uygulamalarıdır. Uygulamalarda ilk olarak Codec mikrofon girişinden gelen analog ses ADC ile sayısala dönüştürülerek McBSP seri port arayüzü

sonrasında DMA arayüzü ile DSP'ye gönderilerek işlenir bu işaret işleme adımları verici ve alıcı tarafta birbirini karşılayacak işlemlerdir. Sabit taşıyıcı frekanslı DSP uygulaması temel parametreleri:

Örnekleme Frekansı Fs: 96 kHz

Bit Çözünürlüğü nbit: 16

Tampon Veri Sayısı BUFFSIZE: 512

Taşıyıcı Frekansları CF: 8087 Hz, 39000 Hz

Verici tarafta Codec tarafından alınan analog ses işareti 96 kHz örnekleme frekansı ile sayısal hale dönüştürülür ve McBSP0 seri portu üzerinden DMA arayüzü ile DSP'ye gönderilir. DMA ile DSP'ye gönderilen sağ ve sol kanal ses verisinden sadece tek kanaldan alınan işaret kullanılır ve işlemlerin daha kolay ve hızlı olabilmesi için seyreltme filtresi ile örnekleme sayısı azaltılır. Sayısal hale dönüştürülen işaret seyreltme filtresi kullanılarak saniyedeki örnek sayısı 96000'den 12000'e düşürülür. Böylece bant geçiren filtrelerin ve hilbert dönüşümünün daha düşük frekanslarda gerçekleştirebilmesi sağlanarak hem daha az işlem yapılması hem de daha az gecikme sağlanır. SSB işareti elde etmek için I ve Q kanalı olmak üzere iki kanal kullanılır. Bu iki kanaldaki işaretler bant geçiren filtreden geçirilir. Q kanalındaki işarete I kanalından farklı olarak hilbert dönüşümü de uygulanır. DSP'de kullanılan filtre karakteristikleri Matlab ile elde edilmiştir. DSPLIB kütüphanesi kullanılarak Matlab ile edilen filtre katsayıları işaret işleme fonksiyonlarına (filtreleme, seyreltme, genişletme, hilbert dönüşümü) giriş olarak verilerek işaret işleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bant geçiren filtreden geçirilen ve hilbert dönüşümü uygulanan iki farklı kanal işaretinin taşıyıcı işareti ile çarpılabilmesi ve bant genişliğinin artırılması için genişletme filtresi ile saniyedeki örnek sayısı tekrar 12000'den 96000'e çıkarılır ve elde edilen yüksek örnekleme işareti taşıyıcı işareti ile çarpılarak yüksek frekanslı bir işaret elde edilir. İşaretin genişletme filtresi ile örnekleme frekansının artırılmasının nedeni 48 kHz'lik bir bant genişliğinin kullanılabilmesi böylece daha yüksek frekanslı taşıyıcı frekansı ile işaretin gönderilmesi ve alınabilmesini sağlamaktır. Uygulamada üst yan bant (USB) modülasyonu yapacağımız için Q kanalındaki işaret I kanalındaki işareten çıkarılır. Böylece sadece üst yan bant işareti kalacak ve bant genişliği daha verimli şekilde

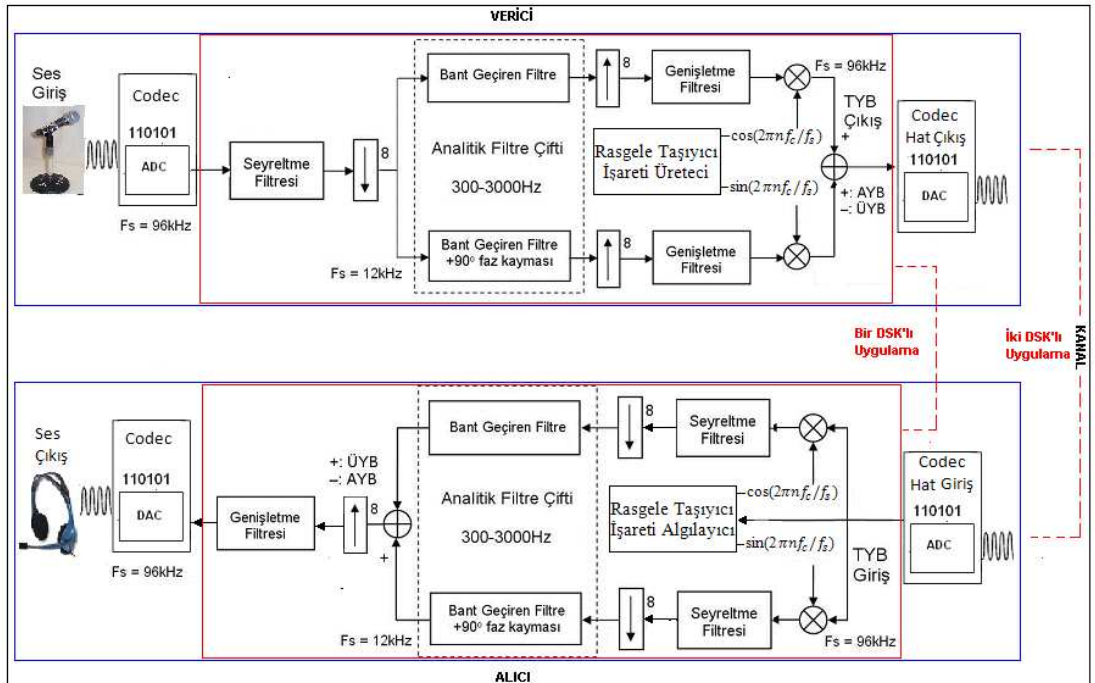
kullanılacaktır. Bu özellik bant genişliği problemi olan uygulamalar için uygundur. Burada elde edilen üst yan bant işareti Codec hat çıkışından bir güç yükselteci ile yaklaşık 55 (34.8 dB) kat güçlendirilir daha sonrasında 1:3'lük trafo ile 3 kat daha yükseltilerek güç yükselteç çıkışına bağlı Type 8103 transdüseri ile gönderilir.

Alıcı tarafta orijinal işaretin tekrar elde edilebilmesi için verici tarafta yapılan işlemlerin tersi yapılacaktır. Sualtındaki işareti almak için göndermede de kullanılan Type 8103 transdüseri kullanılmıştır. Type 8103 transdüseri ile alınan işaret bir ön yükselteç ile yaklaşık 273 (48.7 dB) kat güçlendirilerek Codec hat girişine aktarılır. Codec ile sayısal hale dönüştürülen analog işaret McBSP0 seri portu üzerinden DMA arayüzü ile DSP'ye gönderilir. Tek yan bant demodülasyonu için verici taraftaki modülasyon işleminde olduğu gibi I ve Q kanalı olmak üzere iki kanala ihtiyacımız vardır. DSP'de alınan işaret alıcı tarafta ilk olarak yüksek frekanslı işaretten alçak frekanslı işarete dönüştürülecektir. Bu yüzden alınan işaret 8087 Hz taşıyıcı işareti ile çarpılır. Taşıyıcı işareti ile çarpım işleminden sonraki filtreleme ve dönüşüm işlemlerinin daha hızlı ve gecikmesiz olabilmesi için her iki kanaldaki işaret seyreltme filtresinden geçirilir. Böylece saniyedeki örnek sayımız 96000'den 12000'e düşürülür. Bu seyreltme işleminden sonra her iki kanaldaki işaret bant geçiren filtreden geçirilir. Q kanalındaki işarete I kanalından farklı olarak yine hilbert dönüşümü uygulanır. Her iki kanaldaki işarete gerekli işaret işleme işlemleri uygulandıktan sonra üst bant demodülasyonu gereği her iki kanaldaki işaret toplanarak orijinal işaret elde edilir. Elde edilen işaret son olarak bir genişletme filtresi ile saniyedeki örnek sayısı 96000'e çıkarılır ve sayısal olan işaret tekrar DMA arayüzü ile McBSP0 seri portu üzerinden Codec'e gönderilir ve Codec tarafından alınan sayısal işaret analog işarete dönüştürülerek Codec kulaklık çıkışı üzerinden kullanıcıya dinletilir.

Burada uygulanan bant geçiren filtrenin frekans aralığı 300–3000 Hz'dir. Bunun nedeni uygulamadaki işaretin ses işareti olması sebebiyle 3000 Hz'e kadar işaretlerin yeterli olması ve 300 Hz'lik bir koruma aralığı koyulmasıdır. Bu frekans aralığı STANAG 1074 standardında da belirtilmiştir.

4.5.2. TMS320C5509A DSK ile rasgele taşıyıcı frekansları kullanılan sualtı haberleşmesi uygulaması

Uygulamada alıcı ve verici taraf olmak üzere iki TMS320VC5509A DSK ile taşıyıcısı bastırılmış üst yan bant (SSB - SC) modülasyon tekniği ve rasgele taşıyıcı frekansları kullanılarak sualtı akustik haberleşmesi için bir prototip gerçekleştirilmiştir. DSP uygulaması 2 (iki) adet TMS320VC5509A DSK bordur, 2 (iki) adet LCD ekranı, 2 (iki) adet tuş takımı, 2 (iki) adet kulaklık, 2 (iki) adet mikrofon, 2 (iki) adet transdüser, 2 (iki) adet yükselteç ve 2 (iki) adet işaret aktarım kablosundan oluşmaktadır. Rasgele taşıyıcı frekansları kullanarak sualtı haberleşmesi DSP uygulaması akış diyagramı Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Sualtı haberleşmesi prototip uygulamasında donanım ve transdüser kısıtlamaları nedeniyle rasgele taşıyıcı frekansları olarak 8 kHz ve 16 kHz taşıyıcı frekansları kullanılmıştır. Bu uygulama ile rasgele taşıyıcı frekansı üretme ve algılama algoritması kullanarak sürekli değişen taşıyıcı frekansları ile daha güvenilir bir sualtı akustik haberleşme uygulaması gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.26: Rasgele taşıyıcı frekansları kullanarak sualtı haberleşmesi DSP uygulaması akış diyagramı

Uygulamada verici tarafta “Taşıyıcı Frekansı Üretme” alıcı tarafta “Taşıyıcı Frekansı Algılama” algoritması işlenmektedir. Şekil 4.26’da gösterilen rasgele taşıyıcı frekansları kullanarak sualtı haberleşmesi DSP uygulaması akış diyagramında görüldüğü gibi ilk olarak Codec mikrofon girişinden gelen analog ses işareti Codec ile sayısala dönüştürülerek McBSP seri port arayüzü sonrasında DMA arayüzü ile DSP’ye gönderilerek işlenir. İşaret işleme adımları verici ve alıcı tarafta birbirini karşılayacak işlemlerdir. Rasgele taşıyıcı frekanslı DSP uygulaması temel parametreleri:

Örnekleme Frekansı F_s : 96 kHz

Bit Çözünürlüğü nbit: 16

Tampon Veri Sayısı BUFFSIZE: 512

FFT uzunluğu N: 256

Taşıyıcı Frekans indeksi n: 2

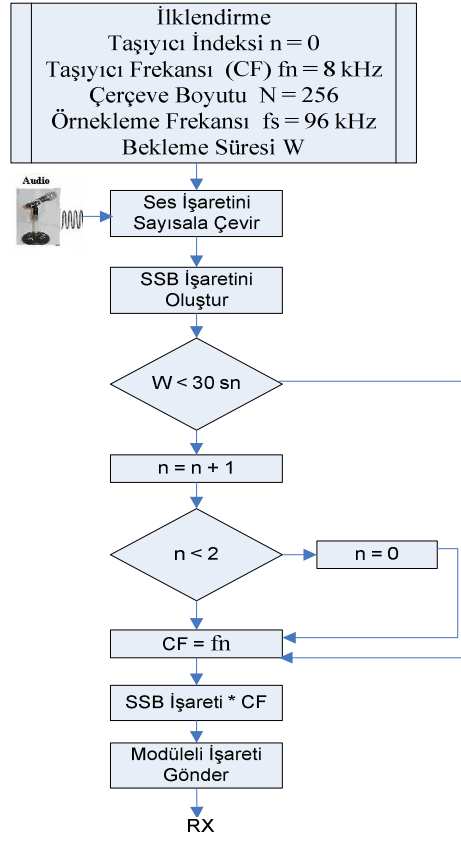
Taşıyıcı Frekansları CF - fn: 8 kHz – 16 kHz

Birim Frekans Aralığı : $F_s/N = 375$ Hz

Rasgele taşıyıcı frekansları ile sualtı haberleşmesi uygulamasında verici ve alıcı tarafta yapılan işlemler TMS320C5509A DSK ile sabit taşıyıcı frekansları kullanılan sualtı telefonu uygulamasındaki ile benzer olup sadece taşıyıcı işareti sabit olmayıp verici tarafta “Rasgele Taşıyıcı Frekansı Üretme” algoritması ile alıcı tarafta “Rasgele Taşıyıcı Frekansı Algılama” algoritması kullanılarak belirlenir.

4.5.2.1. Rasgele taşıyıcı frekansı üretme algoritması

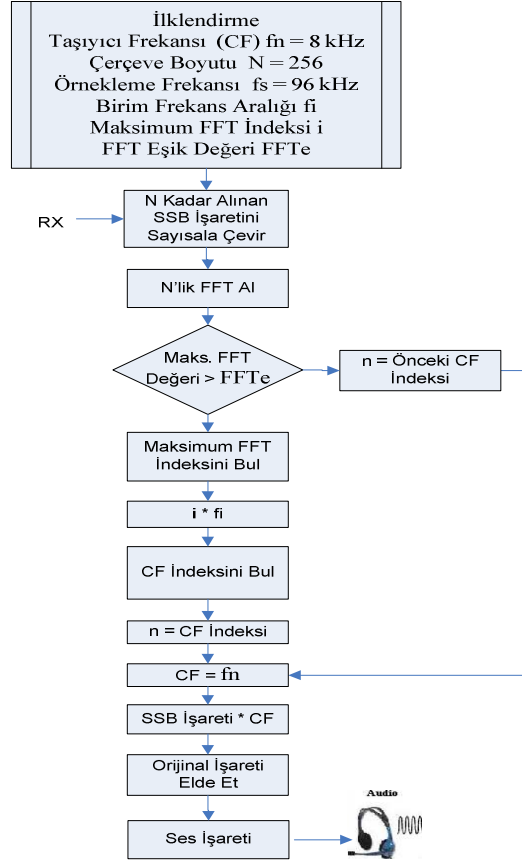
“Rasgele Taşıyıcı Frekansı Üretme” algoritması akış diyagramı Şekil 4.27’de gösterilmektedir. “Taşıyıcı Frekansı Üretme” algoritması verici tarafta işlenmektedir. Bu algoritmada taşıyıcı frekansları olarak 2 (iki) farklı taşıyıcı frekansı belirlenmiştir (8 kHz - 16 kHz). DSP üzerinde koşan kod sürekli olarak gönderilen işaretin çerçeve sayısını kontrol ederek 30 saniyelik zaman diliminin dolup dolmadığını belirler ve her 30 sn’lik zaman dilimden sonra taşıyıcı frekansı indeksi bir artırılarak bir sonraki taşıyıcı frekansı ile işaretin gönderilmesi sağlanır. Taşıyıcı indeksi 2’e ulaştığında indeks tekrar 0 olur ve döngü sürekli olarak kendini tekrar eder.



Şekil 4.27: Verici için “Rasgele Taşıyıcı Frekansı Üretme Algoritması”

4.5.2.2. Rasgele taşıyıcı frekansı algılama algoritması

“Rasgele Taşıyıcı Frekansı Algılama” algoritması akış diyagramı Şekil 4.28’de gösterilmektedir. “Rasgele Taşıyıcı Frekansı Algılama” algoritması alıcı tarafta işlenmektedir. Bu algoritma ile alınan 256 adet örneklenmiş bir çerçevenin FFT’si alınır. Sessizlik durumlarının kontrolü için maksimum FFT değerine bakılır, eğer maksimum FFT değeri eşik seviyenin altında ise taşıyıcı frekansı bir önceki taşıyıcı frekansı kabul edilerek demodülasyon işlemlerine önceki taşıyıcı frekansı ile devam edilir. Eğer maksimum FFT değeri eşik seviyesinin üstünde ise maksimum değer olduğu indeks bulunur. Bu indeks birim frekans aralığı ile çarpılarak tahmini taşıyıcı frekansı bulunur. Bulunan bu taşıyıcı frekansını daha önceden bilinen olması gereken taşıyıcı frekans aralığının hangisinin içinde ise taşıyıcı frekansının o olduğu kabul edilir ve demodülasyon işlemlerine bulunan taşıyıcı frekansı ile devam edilir.



Şekil 4.28: Alıcı için “Rasgele Taşıyıcı Frekansı Algılama Algoritması”

5. UYGULAMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Uygulama sonuçları verilecek sualtı haberleşmesi çalışmasında ilk olarak Matlab yazılımı ile sualtı haberleşme uygulamasının benzetimi yapıldı. Uygun filtreler burada belirlenip uygulamaya aktarıldı. DSP'ye aktarılan yazılım ilk olarak tek TMS320VC5509A DSK ile test edilerek Matlab ile elde edilen filtreler ve DSP yazılımının ön kodları geliştirildi. Bir sonraki adım olarak sistem kayıpsız kabul edilerek sualtı haberleşmesi işaret gereksinimlerinin su üstünde test edilmesi için iki TMS320VC5509A DSK ile uygulamanın bir anlamda su üstü benzetimi yapıldı. Bu uygulama devresinde alıcı ve verici tarafta harici yükselteç veya transdüser kullanılmamış olup TMS320VC5509A DSK'da oluşturulan işaret bir işaret aktarım kablosu ile doğrudan diğer TMS320VC5509A DSK'ya aktarılmıştır. Uygulamanın son adımında ise uygulama bir alıcı ve bir verici olmak üzere iki kısma ayrılarak bir sualtı test havuzunda yükselteç ve transdüserler ile gerçek zamanlı bir sualtı haberleşme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama adımlarının tüm sonuçları bu bölümde verilecek ve değerlendirilecektir.

5.1. Tek DSK İle Yapılan Uygulama Sonuçları

Tek DSK ile yapılan uygulamada 1 (bir) adet TMS320VC5509A DSK bordu, 1 (bir) adet LCD ekran, 1 (bir) adet tuş takımı, 1 (bir) adet kulaklık, 1 (bir) adet mikrofondan oluşan DSP tabanlı sualtı haberleşme uygulamasının temel birimi olan alıcı-verici birim kullanılmıştır. Bu uygulama ile Matlab ile gerçekleştirilebilirliği ortaya koyulan uygulamanın DSP tabanlı ön çalışması gerçekleştirilmiş olup iki DSK ile gerçekleştirilecek gerçek zamanlı uygulamalar için ilk adım atılmıştır. Bununla birlikte Matlab ile elde edilen filtre karakteristikleri, taşıyıcı işaret, hilbert dönüşümü gibi sualtı haberleşmesi işaret işleme gereksinimleri de test edilmiştir. Şekil 5.1'de tek DSK'lı uygulama ortamı gösterilmiştir. Uygulamada ilk olarak STANAG 1074 standardında belirtilen sualtı haberleşmesine ait işaret işleme gereksinimleri gerçekleştirilmiştir.

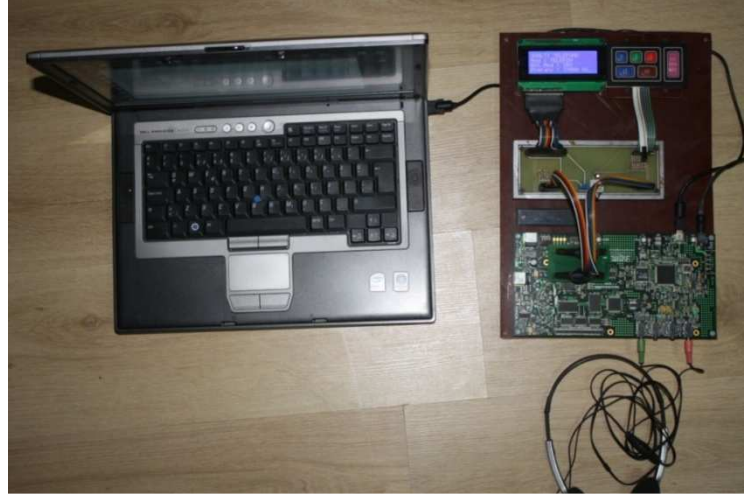
Ses işareti, 300-3000 Hz bant genişliğinde 8087.5 Hz taşıyıcı işareti ile çarpılarak alınıp gönderilmiştir. DSP uygulamasındaki temel parametreler:

Örnekleme Frekansı Fs: 96 kHz

Bit Çözünürlüğü nbit: 16

Tampon Veri Sayısı BUFFSIZE: 512

Taşıyıcı Frekansları CF: 8087 Hz, 39000 Hz

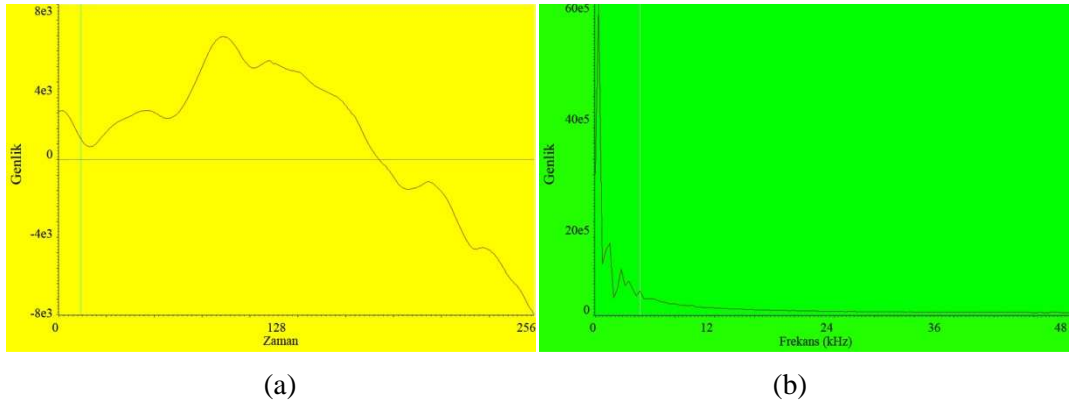


Şekil 5.1: Tek DSK'lı uygulama ortamı

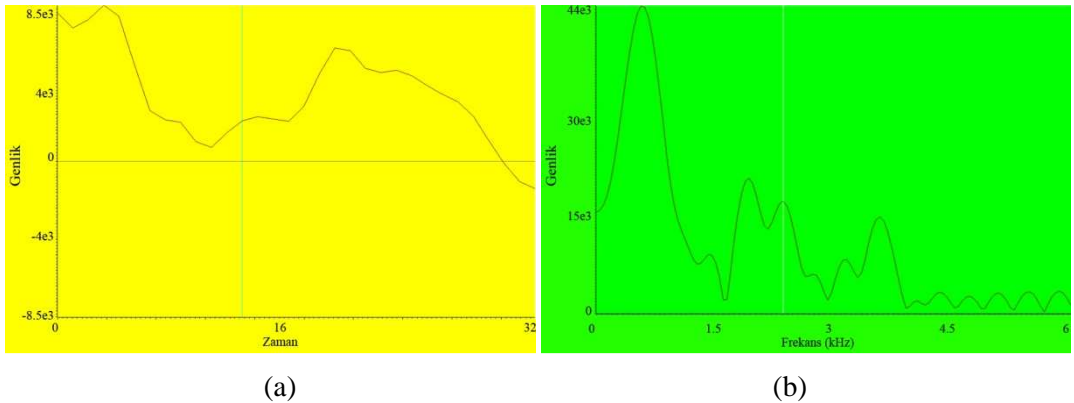
5.1.1. Tek DSK ile 8087.5 Hz taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar

Bu bölümde tek DSK ile STANAG 1074 standardında belirtilen 8087.5 Hz taşıyıcı işareti ve 300-3000 Hz bant geçiren filtre kullanılarak gerçekleştirilen uygulama sonuçları verilmiştir. Uygulamada bilgisayarın ses çıkışından DSK hat girişine ses işareti gönderilerek modülasyon ve demodülasyon işlemleri tek DSK ile gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonuçları beklediğimiz sonuçları vermiş olup hilbert dönüşümü kullanılarak gerçekleştirilen SSB modülasyonunda tek yan bant işareti elde edilmiş ve aynı şekilde daha sonra tek yan bant demodülasyonu kullanılarak orijinal işaret elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara dikkat edilirse özellikle genişletme ve seyreltme filtreleme işlemleri sonucunda giriş ve çıkış işaretlerinin aynı olması beklenirken, filtrelenen işaretin genlik spekturumunda FIR filtreleme işleminin doğası gereği filtre derecesine bağlı bir gecikme meydana geldiği gözlemlenmiştir. FIR filtreleme işlemleri için önceki giriş işaretlerine ihtiyaç

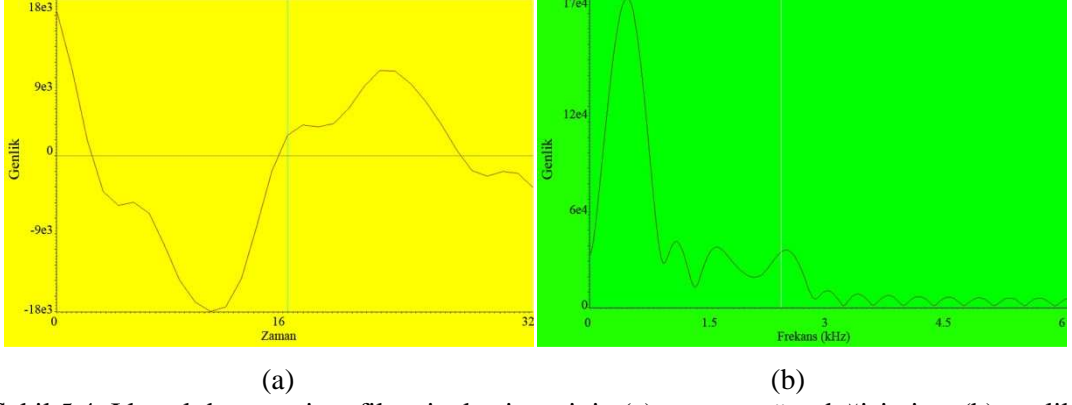
duyulur. DSP yazılımındaki tüm filtreleme fonksiyonları için önceki giriş değerleri DSP tarafından bir çevrimsel tamponda saklanır ki gerçek zamanlı sistemlerin gerçekleştirilmesi daha kolay hale getirilsin. Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de sırası ile Mikrofon sol kanal ses işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Ses işaretinin seyreltme filtresi sonucu (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, I kanalı bant geçiren filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, I kanalı genişletme filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Q kanalı bant geçiren filtre çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu ve Q kanalı genişletme filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu gösterilmiştir. Buraya kadar olan adımlar ile işaret hilbert dönüşümü ve bant geçiren filtre işlemlerinden geçirilerek taşıyıcı işareti ile çarpılacak hale getirilmiştir.



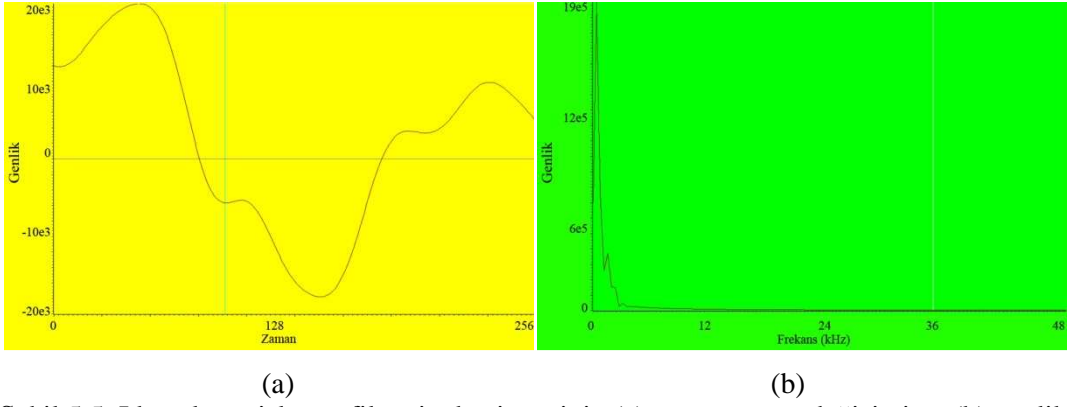
Şekil 5.2: Mikrofon sol kanal ses işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



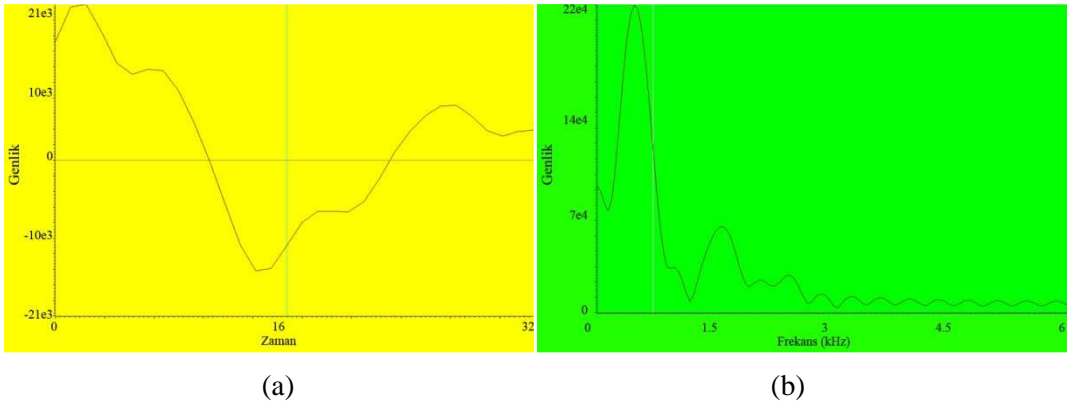
Şekil 5.3: Ses işaretinin seyreltme filtresi sonucu (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



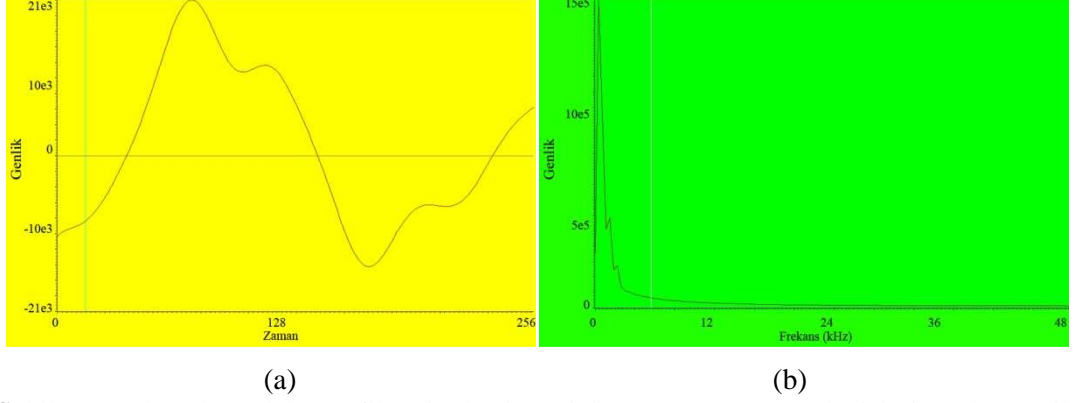
Şekil 5.4: I kanalı bant geçiren filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.5: I kanalı genişletme filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

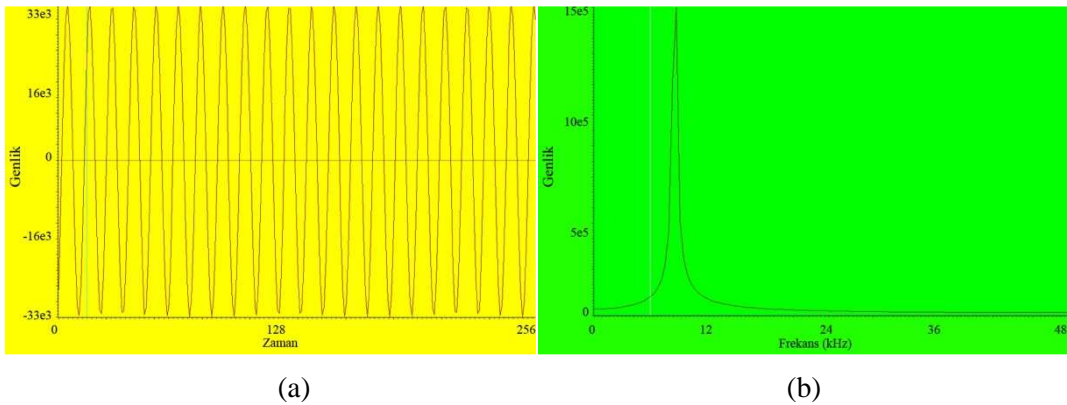


Şekil 5.6: Q kanalı bant geçiren filtre çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

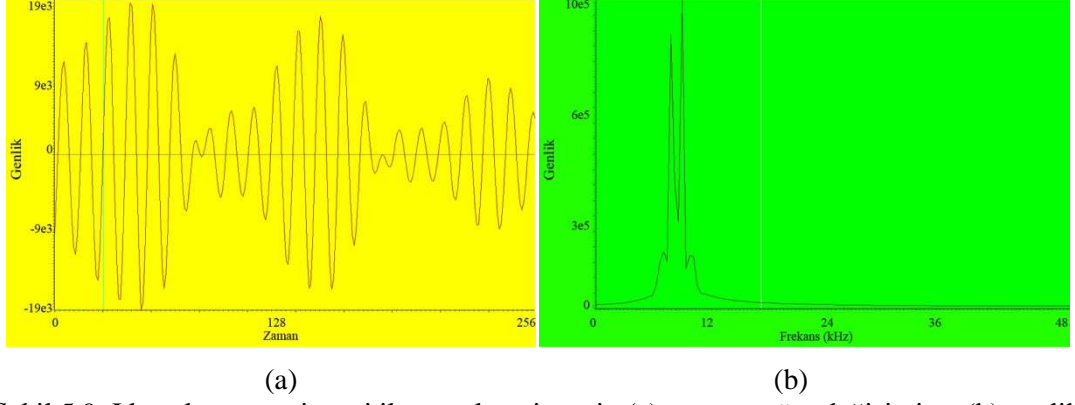


Şekil 5.7: Q kanalı genişletme filtresi çıkış işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

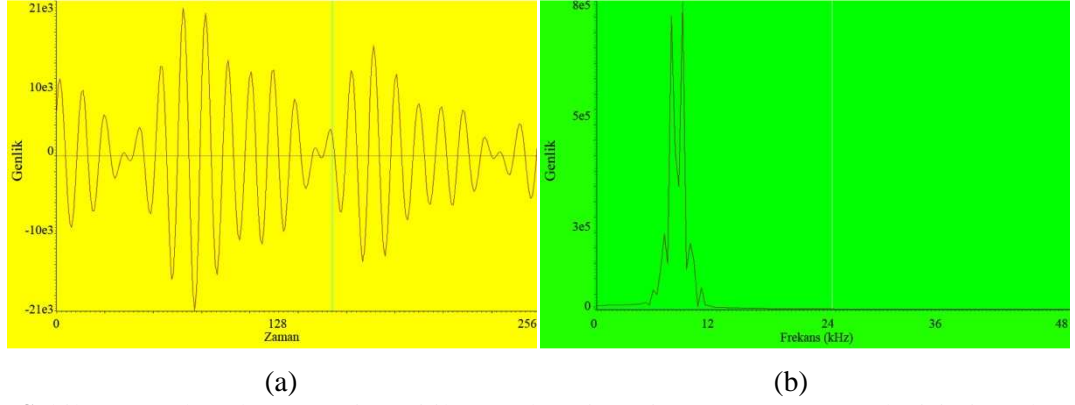
Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de sırası ile Taşıyıcı işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu ve USB modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir. I ve Q kanalındaki işaretin taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin frekans sonuçlarına bakıldığında taşıyıcı işaretin her iki yan bandında işaret olduğu görülmektedir. Bir sonraki adımda USB işareti elde etmek için bu iki işaret birbirinden çıkarıldığında sadece taşıyıcı işaretin üst tarafında işaret kaldığı gözükmemektedir.



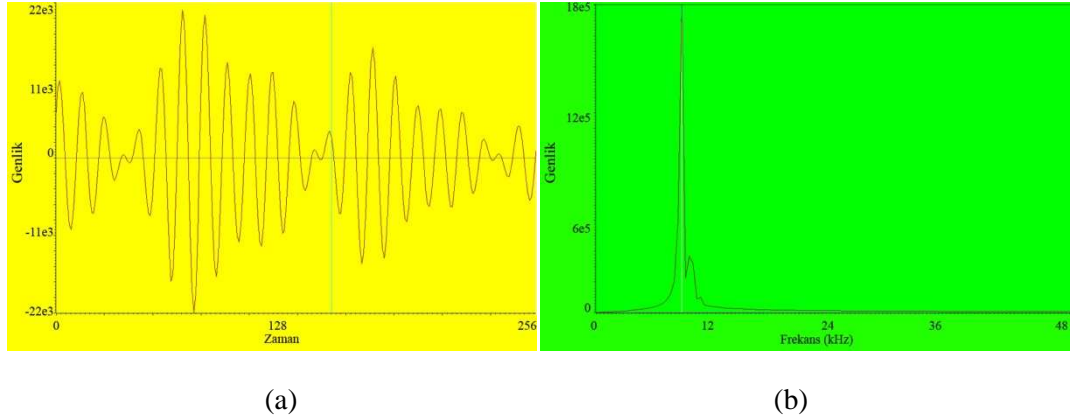
Şekil 5.8: Taşıyıcı işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.9: I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



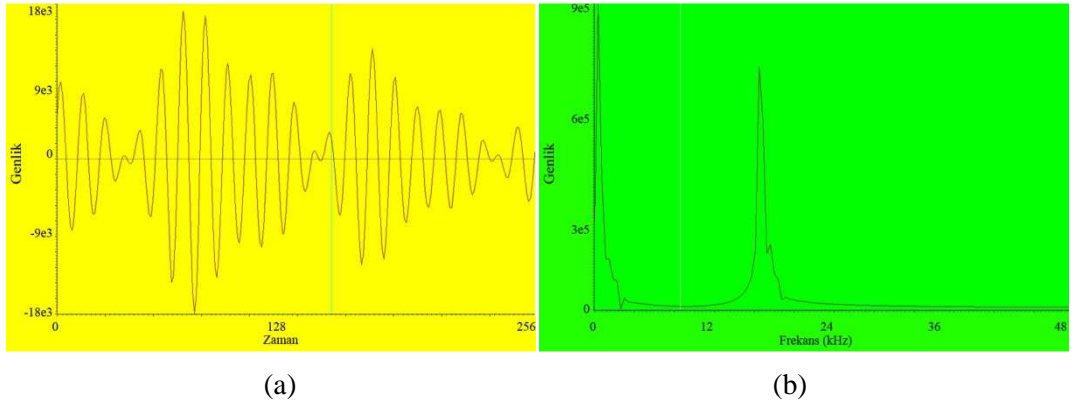
Şekil 5.10: Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



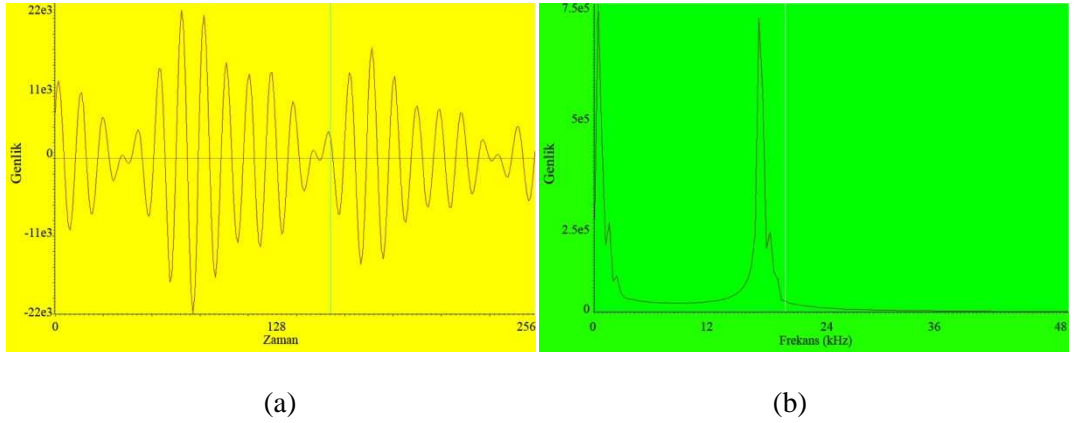
Şekil 5.11: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

Buraya kadar olan işlemler verici tarafı için olan işlemlerdi. Şimdi alıcı tarafta gerçekleştirilen işlemleri inceleyelim. Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de sırası ile Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin

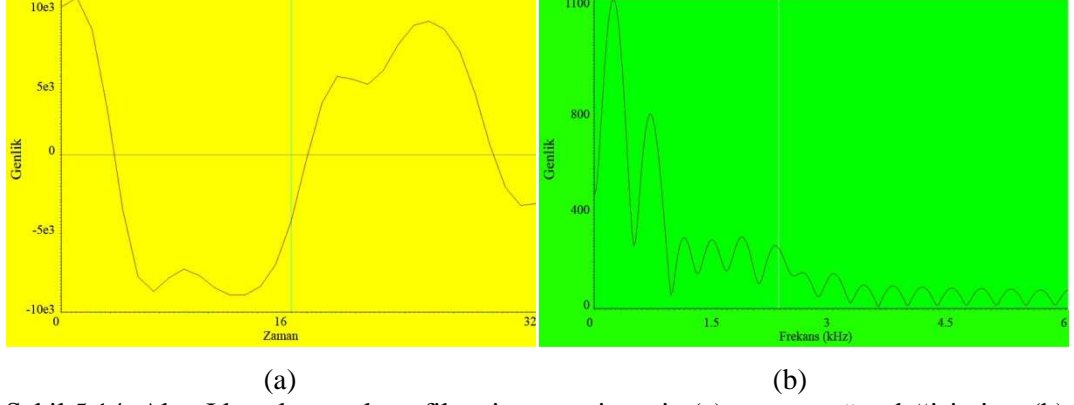
(a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmektedir.



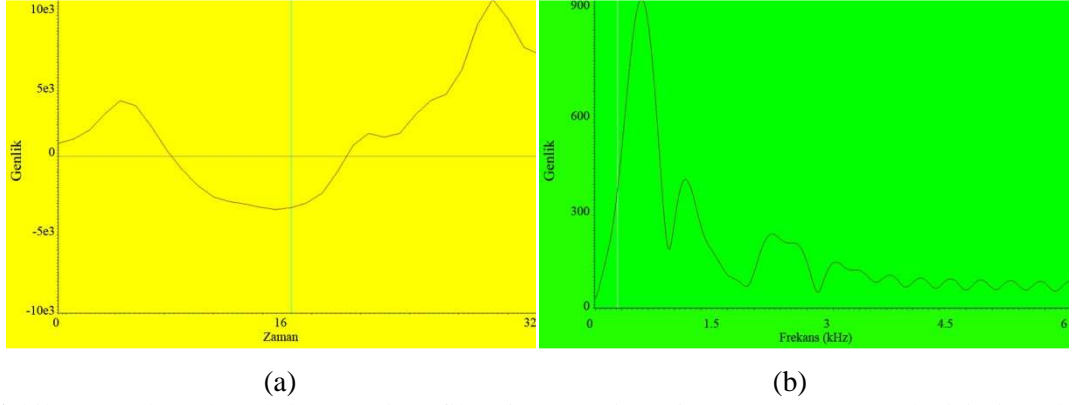
şekil 5.12: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



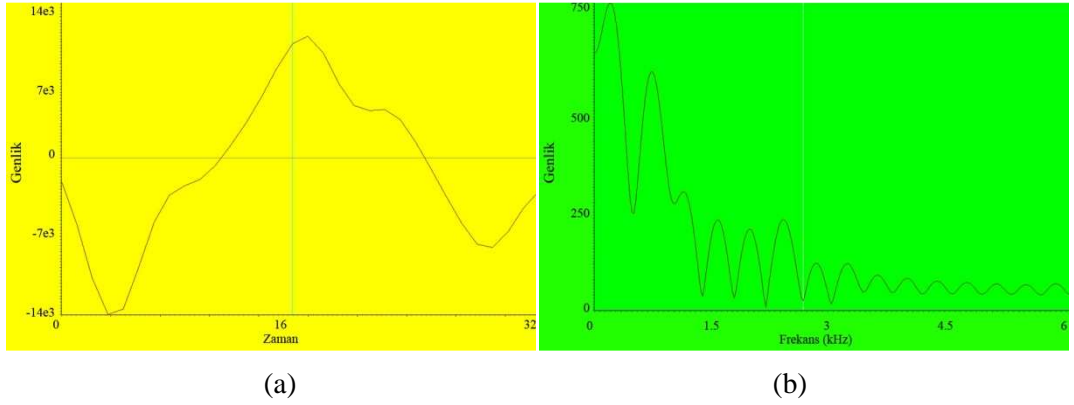
şekil 5.13: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



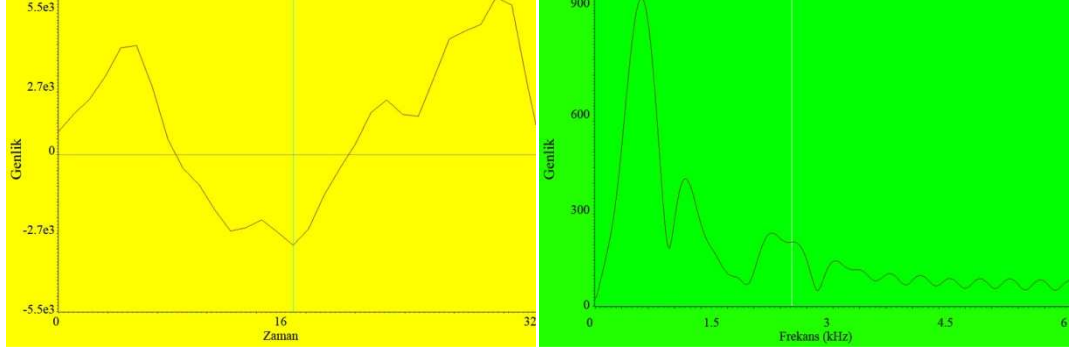
Şekil 5.14: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.15: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

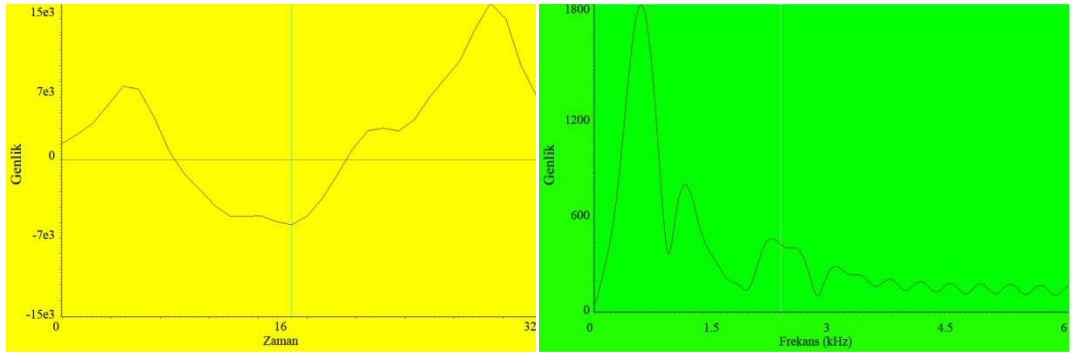


Şekil 5.16: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

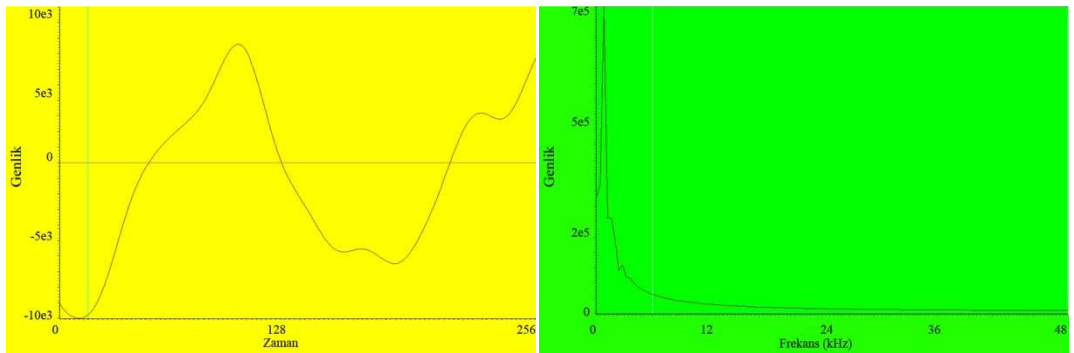


(a) (b)
Şekil 5.17: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

Alıcı taraftaki son adım ise USB modülasyonu gereği I ve Q kanalındaki işaretin toplanması ile orijinal işaretin tekrar elde edilmesidir. Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



(a) (b)
Şekil 5.18: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



(a) (b)
Şekil 5.19: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

5.2. İki DSK İle Yapılan Uygulama Sonuçları

İki DSK ile yapılan DSP tabanlı sualtı haberleşmesi uygulamasında 2 (iki) adet TMS320VC5509A DSK bordu, 2 (iki) adet LCD ekran, 2 (iki) adet tuş takımı, 2 (iki) adet kulaklık, 2 (iki) adet mikrofon, 2 (iki) adet transdüser, 2 (iki) adet yükselteç ve 2 (iki) adet işaret aktarım kablosundan oluşmaktadır. Bu bölümde 2 (iki) adet DSK ile 39000 Hz taşıyıcı işareti ve 300–3000 Hz bant geçiren filtre kullanılarak gerçekleştirilen uygulama sonuçları gösterilmiştir. Uygulamada bilgisayarın ses çıkışından 1 (bir) nolu DSK hat girişine ses işareti gönderilerek modülasyon işlemleri gerçekleştirilen işaret DSK Codec hat çıkışı ile diğer DSK'nın Codec hat girişine gönderilir ve 2 (iki) nolu DSK'da demodülasyon işlemleri gerçekleştirilerek yine 2 (iki) nolu DSK'nın Codec hat çıkışına bağlı kulaklık ile kullanıcıya dinletilir. Bu uygulama ile sualtı haberleşme uygulamasının su üstünde bir benzetimi gerçekleştirilmek amaçlanmış olup gerçek uygulama için en önemli adım atılmıştır. Uygulama sonuçları beklediğimiz sonuçları vermiş olup hilbert dönüşümü kullanılarak gerçekleştirilen SSB modülasyonu ile tek yan bant işareti elde edilmiş ve aynı şekilde bu tek yan bant işareti kullanılarak orijinal işaret elde edilmiştir. Şekil 5.20'de iki DSK'lı uygulama ortamı gösterilmektedir.

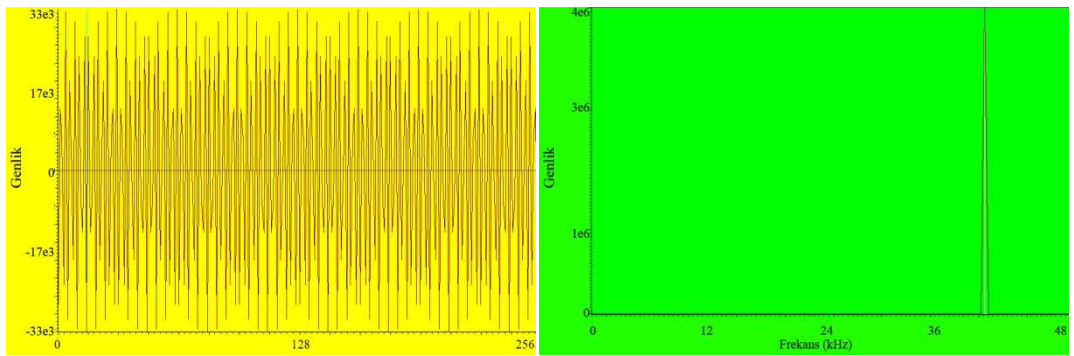


Şekil 5.20: İki DSK'lı uygulama ortamı

5.2.1. İki DSK ile 39000 Hz taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar

Bu bölümde 2 (iki) adet DSK ile 39000 Hz taşıyıcı işareti ve 300-3000 Hz bant geçiren filtre kullanılarak gerçekleştirilen uygulama sonuçları verilmiştir. Verici tarafta elde edilen işaretler tek DSK ile gerçekleştirilen temel bant uygulama sonuçları ile aynı olmasından dolayı uygulama sonuçları olarak sadece alıcı taraftaki sonuçlar verilmiştir.

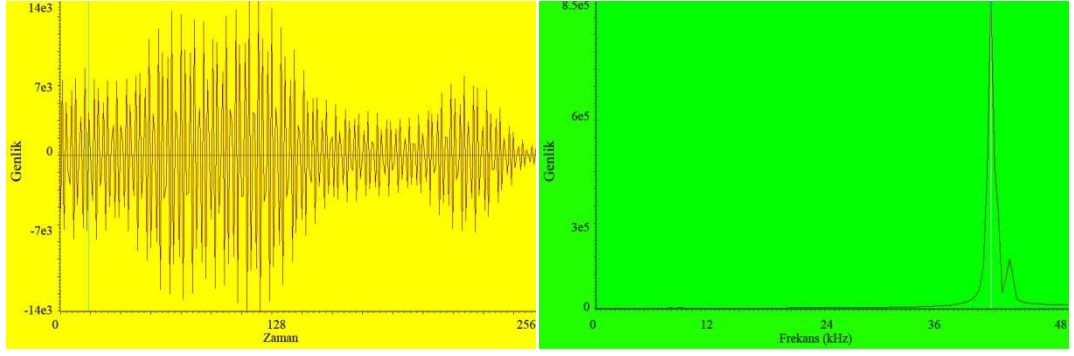
Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de sırası ile 39000 Hz taşıyıcı işareti kullanılan uygulama için Taşıyıcı işareti (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



(a)

(b)

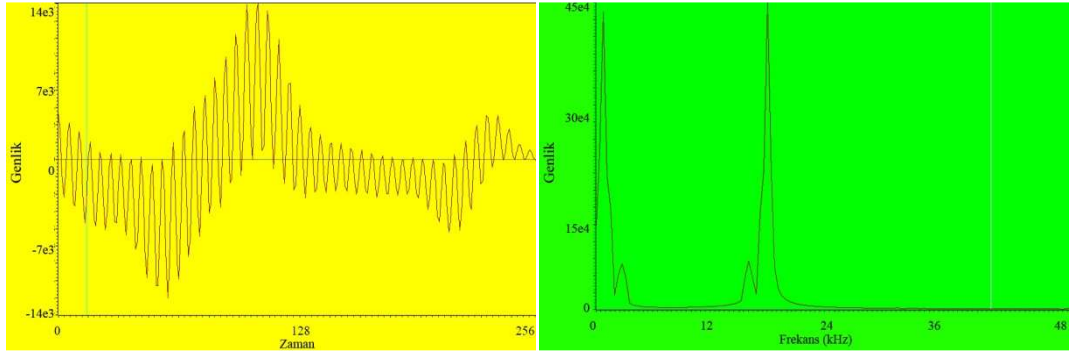
Şekil 5.21: Taşıyıcı işareti (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



(a)

(b)

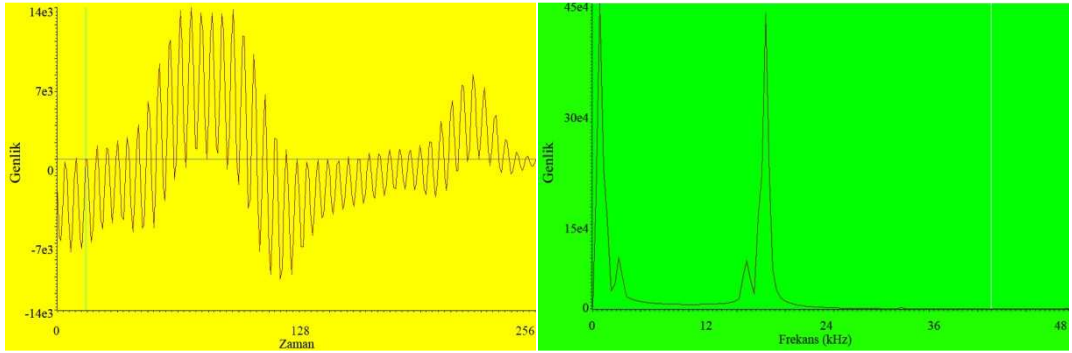
Şekil 5.22: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



(a)

(b)

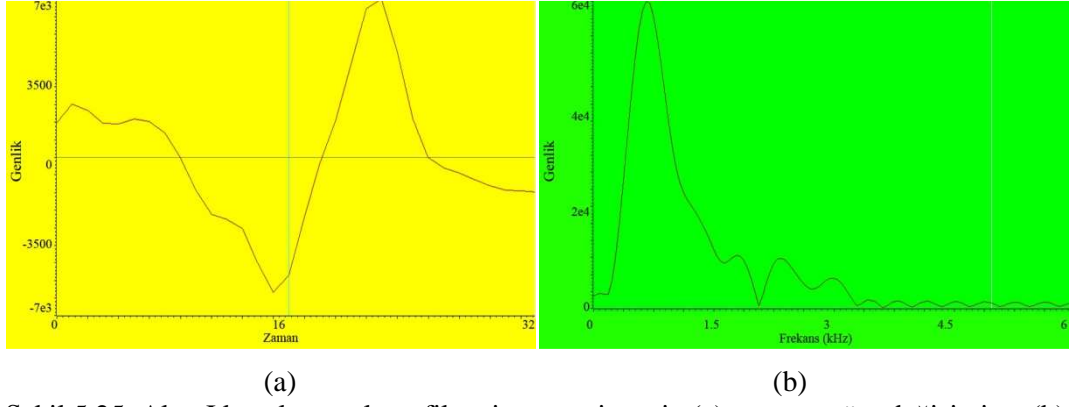
Şekil 5.23: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



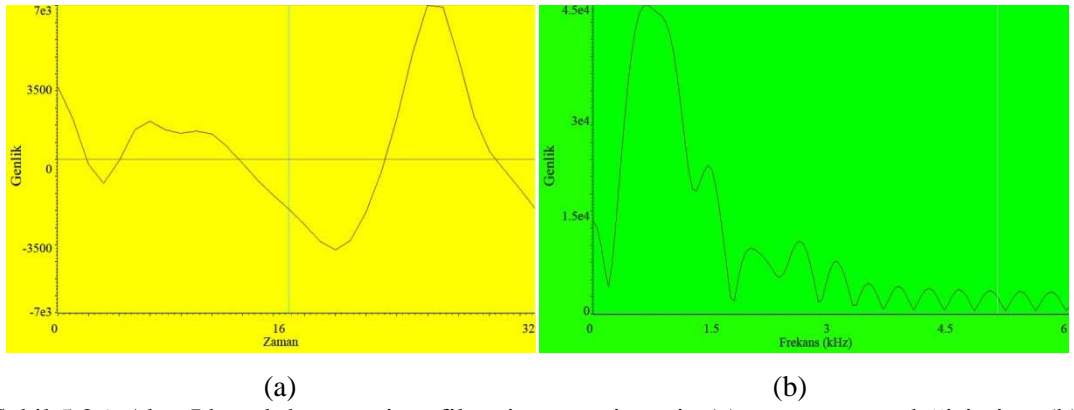
(a)

(b)

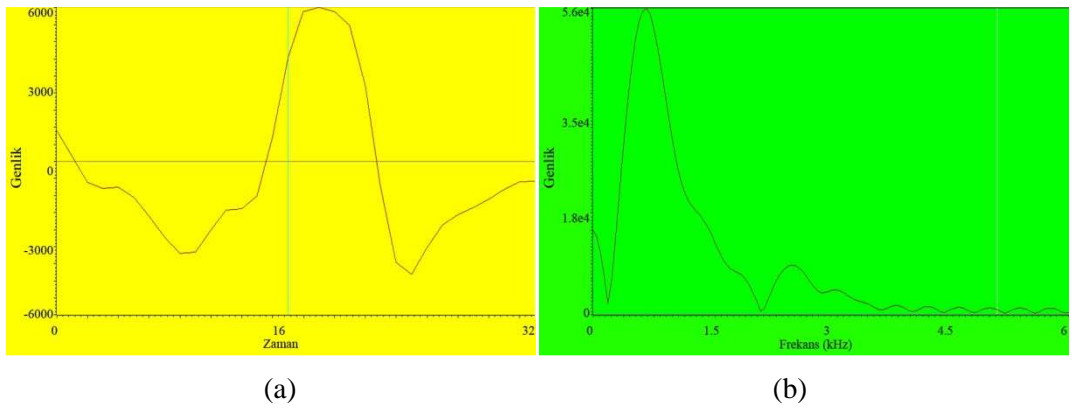
Şekil 5.24: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



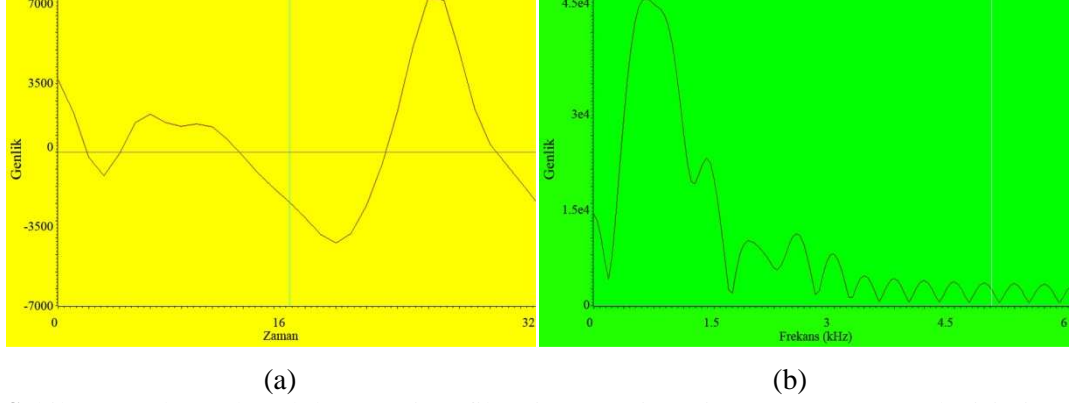
Şekil 5.25: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.26: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

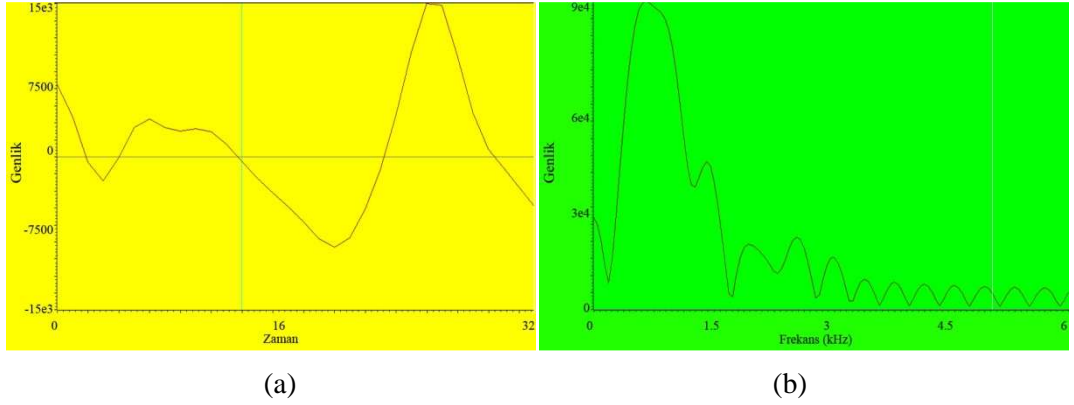


Şekil 5.27: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

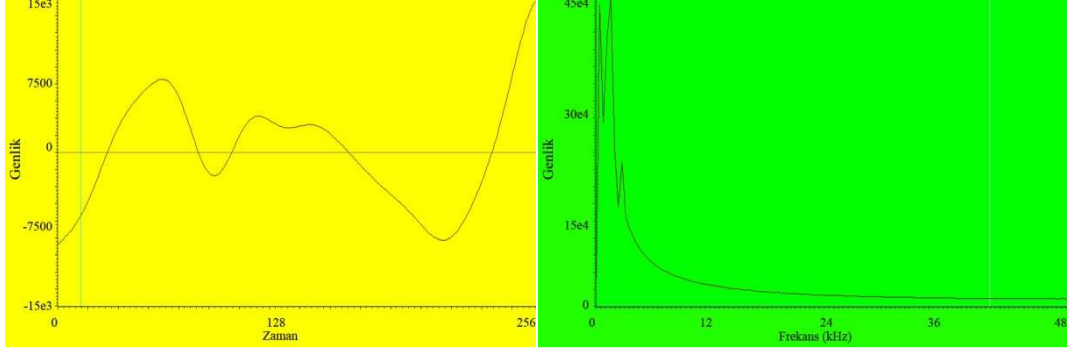


Şekil 5.28: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

Alıcı taraftaki son adım ise USB modülasyonu gereği I ve Q kanalındaki işaretin toplanması ile orijinal işaretin tekrar elde edilmesidir. Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



Şekil 5.29: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



(a) (b)
Şekil 5.30: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

5.3. Sualtı Test Havuzunda Yapılan Uygulama Sonuçları

5.3.1. Hidrofon kalibrasyonu

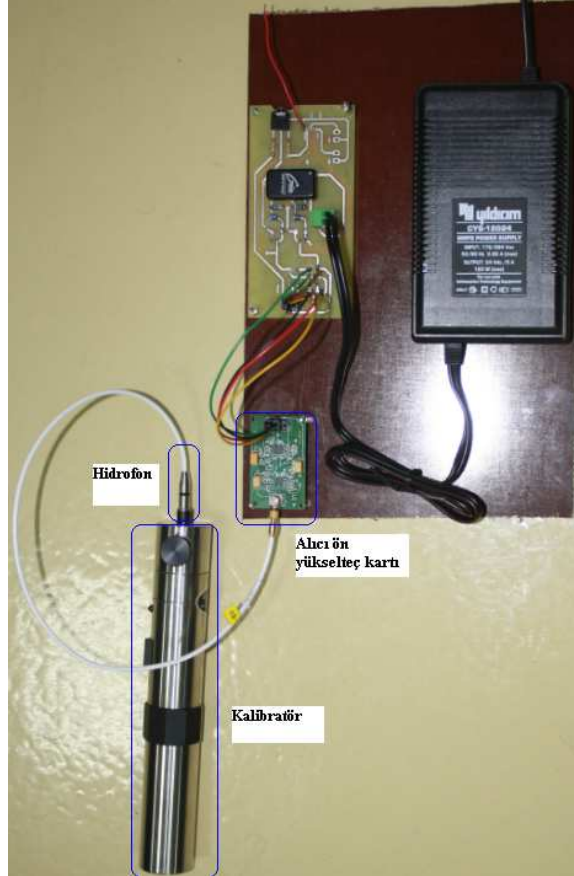
Kalibrasyon işlemi, alıcı taraftaki devrenin kazanç değerinin tam olarak bilinmesi için kalibratör cihazının hidrofon üzerinde oluşturacağı etkinin hesaplanmasını sağlar. Her bir hidrofon çeşidinin kalibratör etkisi farklı olabilir. Uygulamada kullanılan hidrofon B&K firmasına ait Type 8103 olup Type 4229 hidrofon kalibratörü ile havada kalibrasyonu gerçekleştirilebilir. Type 4229 kalibratör 251.2 Hz’de çalışır ve B&K hidrofonlar ile uyumludur. Havada kalibrasyon Type 4229 ile oldukça geçerlidir, çünkü duyarlılık eğiminin düz olduğu bölgeler için hidrofon duyarlılığı havada ve suda aynıdır. Çeşitli B&K hidrofonlar için Tablo 5.1’de ses basınç seviyeleri listelenmiştir.

Tablo 5.1: Type 4229 kalibratör ile B&K hidrofon ses basınç seviyeleri

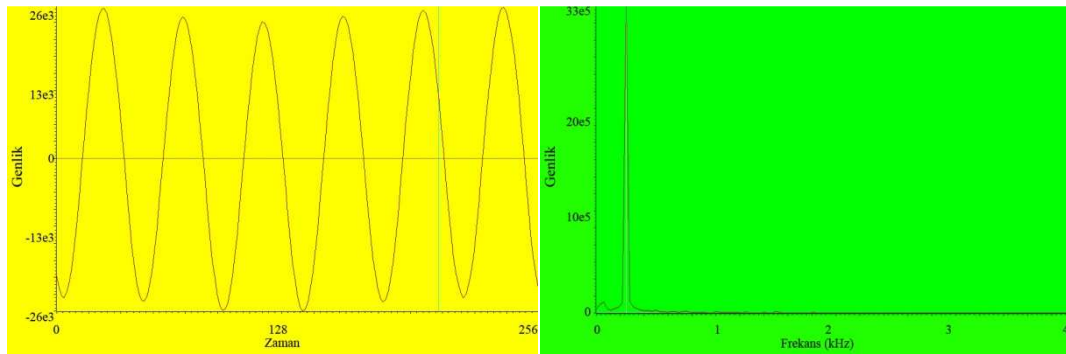
Hidrofon Tipi	SPL (dBre1 μ Pa)
8103	166
8104	162
8105	151.5
8106	152

Şekil 5.31’de Type 4229 kalibratör, Type 8103 hidrofon ve alıcı ön yükselteç kartından oluşan alıcı katının tam olarak ne kadar kazanç sağladığını öğrenmemizi sağlayan ölçüm sistemi gösterilmiştir. Bu sistem ile kalibratör çalıştırılarak hidrofon üzerinde bir elektriksel işaret oluşturması sağlanır. Bu oluşturulan işaret ön yükselteç

kartı ile yükseltilecek okunan değere göre ön yükselteç kartının tam olarak ne kadar gerilim kazancı sağladığı hesaplanacak ve yükselteç devresinin ve hidrofونun doğruluğu gösterilecektir. Şekil 5.32’de Kalibrasyon ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



Şekil 5.31: Hidrofонun alıcı hassasiyetin doğrulanması için kalibrasyon ölçüm sistemi



(a)

(b)

Şekil 5.32: Kalibrasyon ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

Ölçüm sonuçlarının doğrulanması işlemleri için ilk olarak mevcut değerleri belirlememiz gerekir. Burada belirlememiz gereken ön yükseltecin gerilim kazancıdır. Çünkü diğer değerler bilinen ya da ölçülen değerlerdir. DSK'da yapılan ölçümlerde maksimum Codec analog giriş değeri ($\pm 1V$) sayısal olarak ± 32767 'dir.

Hidrofon Alma Yanıtı $RR = -210.4 \text{ dBre}1V/\mu\text{Pa}$

Kalibratör Kaynak Seviyesi $SPL = 166 \text{ dBre}1\mu\text{Pa}$

Codec Okunan Değer $V_{\text{codec}} = 0.56 V_{\text{rms}} (0.793 V_{\text{max}} - 26000/32767)$

Codec Okunan Değer $V_{\text{cdB}} = -5.03 \text{ dB}$

Codec Kazancı $G_{\text{codec}} = 0.33 (-9.54 \text{ dB})$

Ön Yükselteç Kazancı $G_{\text{pamp}} = ?$

$$V_{\text{cdB}} = G_{\text{pamp}} + G_{\text{codec}} + SPL + RR \quad (5.1)$$

$$G_{\text{pamp}} = V_{\text{cdB}} - G_{\text{codec}} - SPL - RR$$

$$G_{\text{pamp}} = -5.03 + 9.54 - 166 + 210.4$$

$$G_{\text{pamp}} = 48.91 \text{ dB}$$

(5.1) nolu denklemdeki hesaplama ile ön yükselteç devresi ve kalibrasyon ölçümü doğrulanmıştır. Beklenen değer ve ölçülen değerler yaklaşık olarak birbirine yakın değerler olup bundan sonra sualtı test havuzunda farklı frekanslarda referans mesafesine göre ölçümler yapılacaktır.

5.3.2. Farklı frekanslarda sualtı test havuzu ölçüm sonuçları

Sualtı test havuzunda farklı frekanslarda ölçümler ve ölçüm sonuçlarının matematiksel doğrulaması yapılacaktır. Bu ölçümlerden önce bazı değerlerin bilmesi gerekir. Bunların başında kullanılan transdüserin verici ve alıcı yanıtına göre kullanılacak frekanslardaki alıcı hassasiyeti ve 1V referans değerinde yayın seviyesi gelir. Bunun yanında verici ve alıcı taraftaki yükselteçlerin gerilim kazançlarının da bilinmesi gerekir. Son olarak ölçüm yapılan uzaklık ve transdüserlerin girişine ve çıkışına uygulanan gerilim seviyeleri de hesaplamalarda kullanılacaktır. Tablo 5.2, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de sırası ile Hidrofon hassasiyeti listesi, Güç yükselteç

devresinin frekansa bağılı gerilim kazanç listesi ve Ön yükselteç devresinin frekansa bağılı gerilim kazanç listesi verilmiştir.

Tablo 5.2: Hidrofon alma yanıtı listesi

Frekans (kHz)	Alma Yanıtı - dBre1V/μPa - RR	Frekans (kHz)	Alma Yanıtı - dBre1V/μPa - RR
8	-210.4	14	-211.2
10	-210.6	15	-211.3
12	-210.7	16	-211.3

Tablo 5.3: Güç yükselteç devresinin frekansa bağılı gerilim kazanç listesi

Frekans (kHz)	İletim frekans yanıtı - dBreμPa/V@1m - TVR	Frekans (kHz)	İletim frekans yanıtı - dBreμPa/V@1m - TVR
8	89	14	98
10	92	15	99
12	97	16	101

Tablo 5.4: Ön yükselteç devresinin frekansa bağılı gerilim kazanç listesi

Frekans (kHz)	Kazanç - G_{pamp} (dB)	Frekans (kHz)	Kazanç - G_{pamp} (dB)
8	189 (45.52)	14	135 (42.60)
10	160 (44.08)	15	133 (42.47)
12	144 (43.16)	16	130 (42.27)

Tablolarda verilen değerler hesaplamalarda kullanılacak bilinen değerlerdir. Şimdi ölçüm sonuçları değerlendirilecektir. Bu değerler verici yükselteci çıkışındaki transdüser uygulanan gerilim ile doğrudan ilişkilidir. Temel parametreler:

İletim Gerilim Yanıtı TVR,

Transdüser Giriş Gerilimi V_{rms} ,

Hidrofon Alma Yanıtı RR,

Ön Yükselteç Kazancı G_{pamp} ,

Hidrofon Çıkış Gerilim Değeri OCV,

Codec Kazancı G_{codec} ,

Güç verimliliği P_n ,

Kaynak seviyesi (SL) olmak üzere r metre uzaklıktaki hidrofona yoğunluğu (IL)

$$SL = TVR + 20 \log(V_{rms}) + P_n \quad (5.2)$$

$$IL = SL - TL = SL - 20 \log(r) \quad (5.3)$$

şeklinde hesaplanır. (5.2) ve (5.3) nolu denklemlerde verici tarafı için SL bilinen, IL tahmin edilen değerlerdir. Benzer şekilde alıcı tarafta ölçülen hidrofona yoğunluk seviyesi (IL) ve belli bir noktadan yayılan tahmini kaynak seviyesi (SL)

$$IL = 20 \log(OCV) - RR \quad (5.4)$$

$$SL = 20 \log(OCV) - RR + 20 \log(r) \quad (5.5)$$

şeklinde hesaplanır. (5.4) ve (5.5) nolu denklemlerde ise alıcı tarafı için IL bilinen, SL tahmin edilen değerlerdir. Bu değerler sistemdeki kazanç seviyeleri dikkate alınmadan hesaplanan değerlerdir. Ön Yükselteç Kazancı G_{pamp} , Codec Kazancı G_{codec} değerlerinin de hesaba katılması gerekmektedir.

$$IL = 20 \log(OCV) - RR - G_{pamp} - G_{codec} \quad (5.6)$$

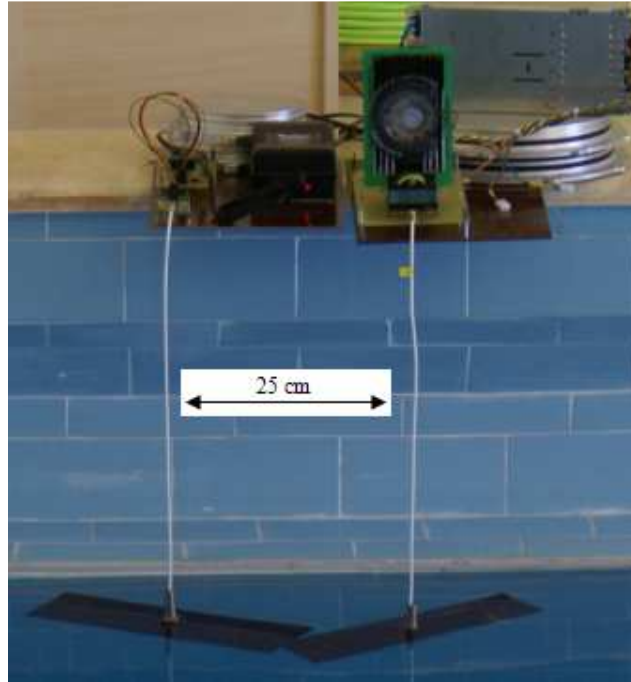
$$SL = 20 \log(OCV) - RR - G_{pamp} - G_{codec} + 20 \log(r) \quad (5.7)$$

Alınan ölçüm sonuçlarına göre verici ve alıcı taraftaki işaret seviyeleri hesaplanır. RIL, verici taraf için r mesafedeki hidrofona yoğunluğu, TSL alıcı taraf için kaynak seviyesini ifade etmektedir.

$$RIL = TVR + 20 \log(V_{rms}) - 20 \log(r) + P_n \quad (5.8)$$

$$TSL = 20 \log(OCV) - RR - G_{pamp} - G_{codec} + 20 \log(r) \quad (5.9)$$

Hesaplamalarda kullanılacak bazı değerler her frekans için aynı olup değişmeyecektir. Hesaplamalarda değişmeyecek değerler G_{pamp} ve r değerleridir. G_{codec} değeri 0 dB olduğu için formülden çıkarılacak, r değeri ise 25 cm olarak hesaplamalarda sabit değer olarak kullanılacaktır. Frekanslara göre değişen TVR, RR, G_{pamp} ve P_n değerleri her bir ölçüm referans değerine göre hesaplamalarda kullanılacaktır. Şimdi sabit değerlerimizi yazıp formülleri tekrar belirtelim. P_n değeri hidrofona giriş empedansı ve güç yükselteci çıkış empedansına göre değişse de giriş empedansı çok yüksek olduğu için güç yükseltecimiz çıkış empedansına göre yaklaşık 34 dB kabul edilecektir. Burada yapılan ölçümler havuzda yapılmış olup bir işaret üretici ile ölçüm yapılmak istenen frekansta işaret üretilir, güç yükselteci ile yükseltilerek hidrofona girişine uygulanır ve sualtından akustik olarak gönderilir. Alıcı tarafta bu işaret yine hidrofona ile alınarak DSP'den okunur. Şekil 5.33'de sualtı test havuzu ölçüm sistemi gösterilmektedir.



Şekil 5.33: Sualtı test havuzu ölçüm sistemi

$$RIL = TVR + 20 \log(V_{rms}) - 34 + 12 \quad (5.10)$$

$$TSL = 20 \log(OCV) - RR - G_{pamp} - 12 \quad (5.11)$$

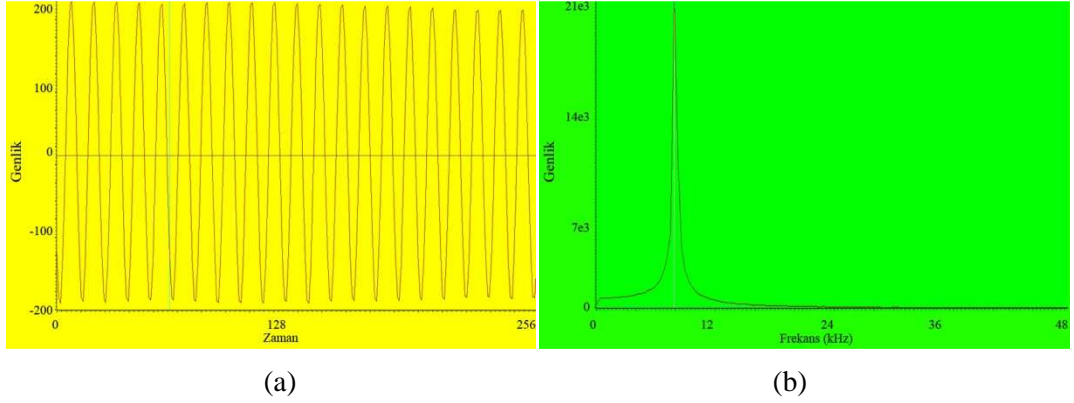
Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36’da sırası ile 8 kHz, 12 kHz ve 16 kHz için sualtı test havuzu ölçüm sonuçlarının zaman ve frekans genlik spektrumları verilmiştir.

$$RIL = 89 + 35.6 - 22 = 102.6 \text{ dB}$$

8 kHz işaret için $TVR=89 \text{ dBre}\mu\text{Pa/V@1m}$, $V_{rms}=60.6 \text{ V}$, $RR=-210.4 \text{ dBre1V}/\mu\text{Pa}$, $OCV=4.3 \text{ mV}_{rms}$ (6.1 mV_{max}), $G_{pamp}=45.52 \text{ dB}$ olmak üzere bu değerlere göre:

$$RIL = 89 + 35.6 - 22 = 102.6 \text{ dB}$$

$$TSL = -47.3 + 210.4 - 45.52 - 12 = 105.58 \text{ dB}$$

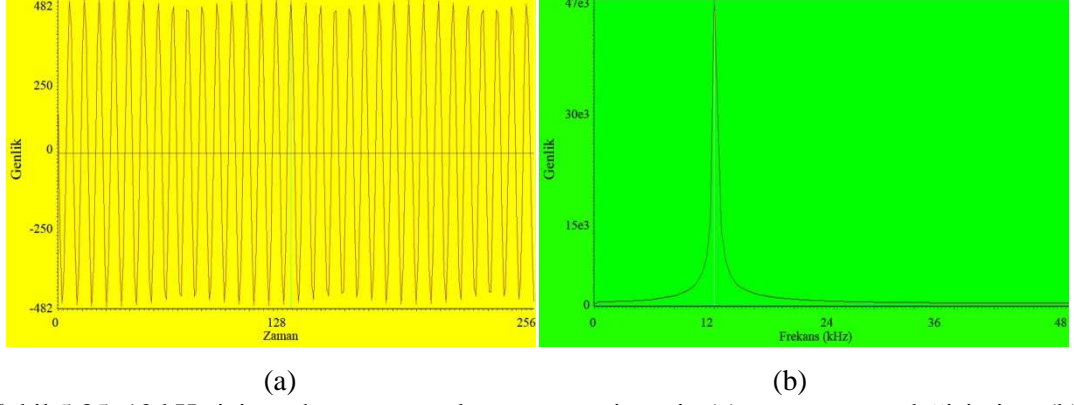


Şekil 5.34: 8 kHz için su havuzu test ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

12 kHz işaret için $TVR=97 \text{ dBre}\mu\text{Pa/V@1m}$, $V_{rms}=60.6 \text{ V}$, $RR=-210.7 \text{ dBre1V}/\mu\text{Pa}$, $OCV=9.61 \text{ mV}_{rms}$ (13.73 mV_{max}), $G_{pamp}=43.16 \text{ dB}$ olmak üzere bu değerlere göre:

$$RIL = 97 + 35.64 - 22 = 110.64 \text{ dB}$$

$$TSL = -40.34 + 210.7 - 43.16 - 12 = 115.2 \text{ dB}$$

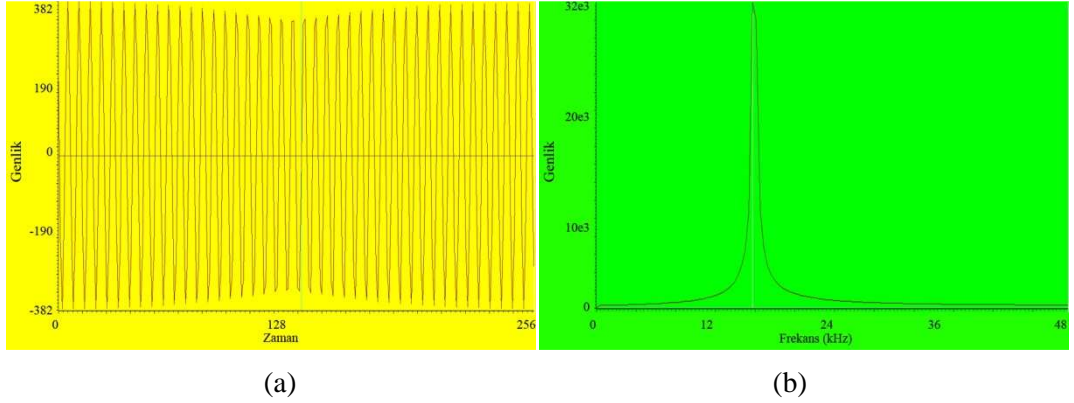


Şekil 5.35: 12 kHz için su havuzu test ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

16 kHz işaret için $TVR=101$ dBre μ Pa/V@1m, $V_{rms}=59.4$ V, $RR=-211.3$ dBre1V/ μ Pa, $OCV=8.24$ mV $_{rms}$ (11.77 mV $_{max}$), $G_{pamp}=42.27$ dB olmak üzere bu değerlere göre:

$$RIL = 101 + 35.47 - 22 = 114.47 \text{ dB}$$

$$TSL = -41.68 + 211.3 - 42.27 - 12 = 115.35 \text{ dB}$$

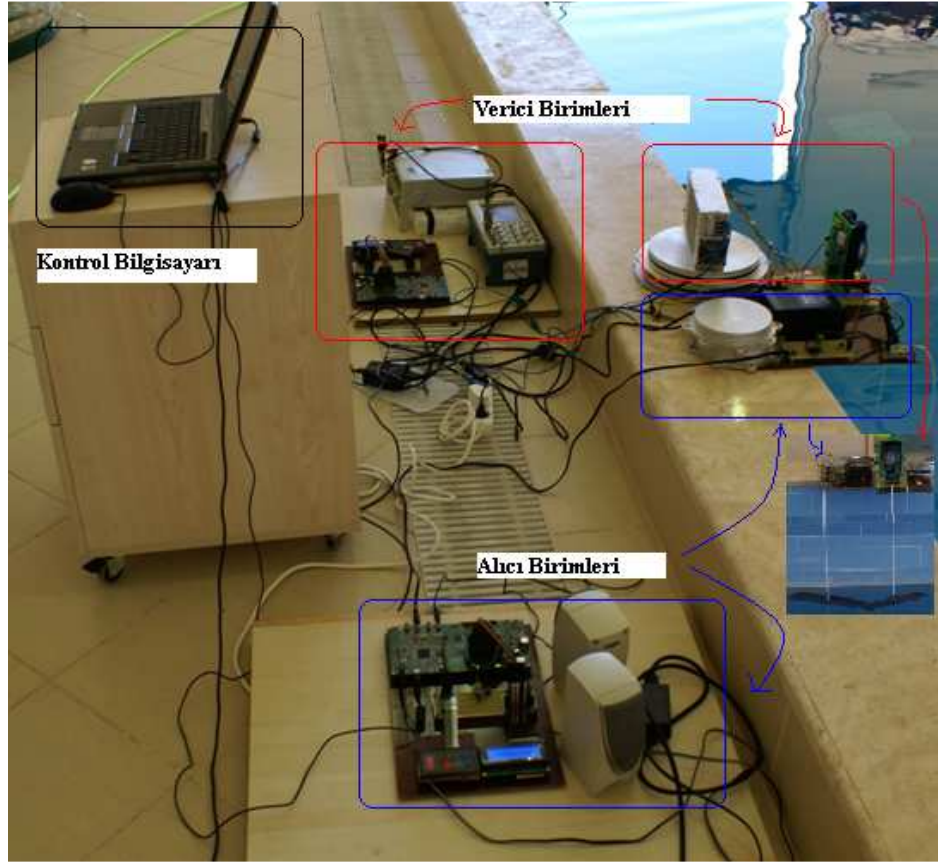


Şekil 5.36: 16 kHz için su havuzu test ölçüm sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

Elde edilen hesaplama sonuçlarına göre verici tarafından oluşturulan hidrofon yoğunluk seviyesi ve alıcı tarafından algılanan kaynak seviyesi değerleri birbiri ile uyumlu olup değerler arasındaki farklılıklar üretici firma tarafından sağlanan hidrofon yoğunluk seviyesi, yükselteç gerilim kazançları, güç verimliliği ve ortam şartları gibi toleranslardan kaynaklanmaktadır.

5.3.3. Sualtı test havuzunda iki DSK ile 8087.5 Hz taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar

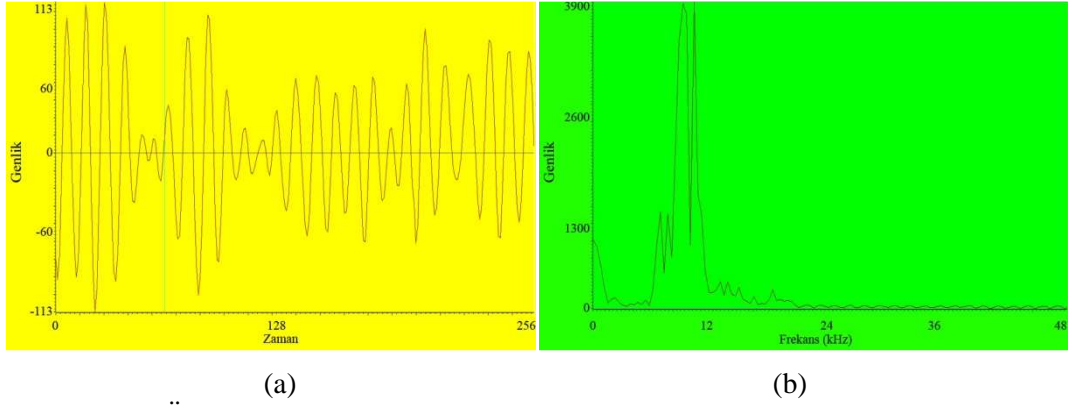
Bu bölümde sualtı test havuzunda 2 (iki) DSK ile 8087.5 Hz taşıyıcı işareti ve 300-3000 Hz bant geçiren filtre kullanılarak gerçekleştirilen uygulama sonuçları verilmiştir. Verici tarafta elde edilen işaretler tek DSK ile gerçekleştirilen uygulama sonuçları ile aynı olmasından dolayı uygulama sonuçları olarak sadece alıcı taraftaki sonuçlar verilmiştir. Şekil 5.37’de sualtı test havuzu uygulama ortamı gösterilmektedir.



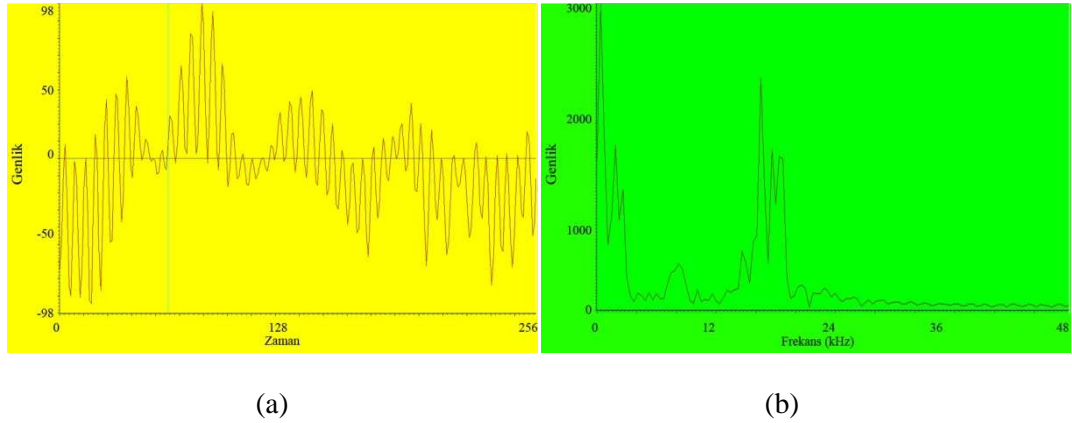
Şekil 5.37: Sualtı test havuzu uygulama ortamı

Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41, Şekil 5.42, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44’de sırası ile 8087.5 Hz taşıyıcı işareti kullanılan uygulama için Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu

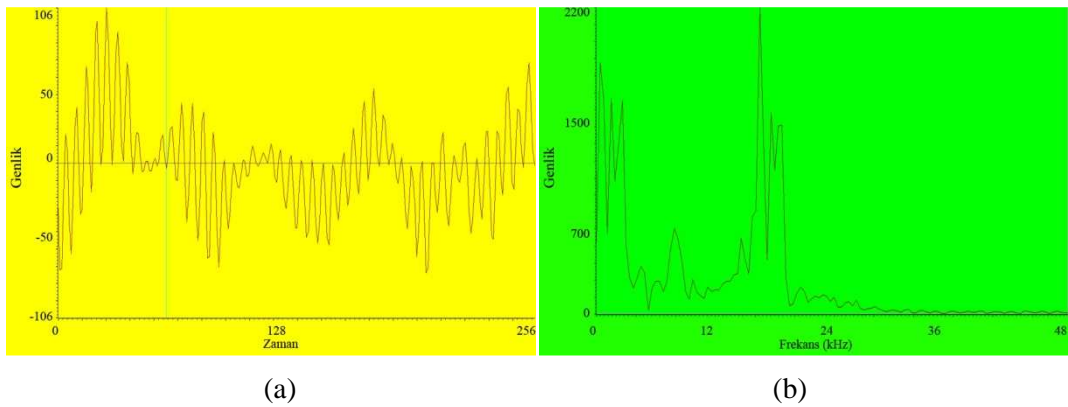
işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



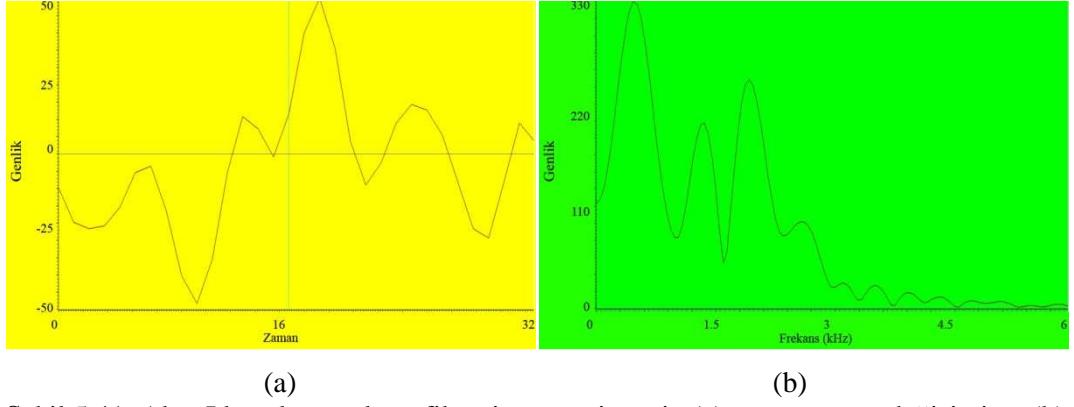
Şekil 5.38: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



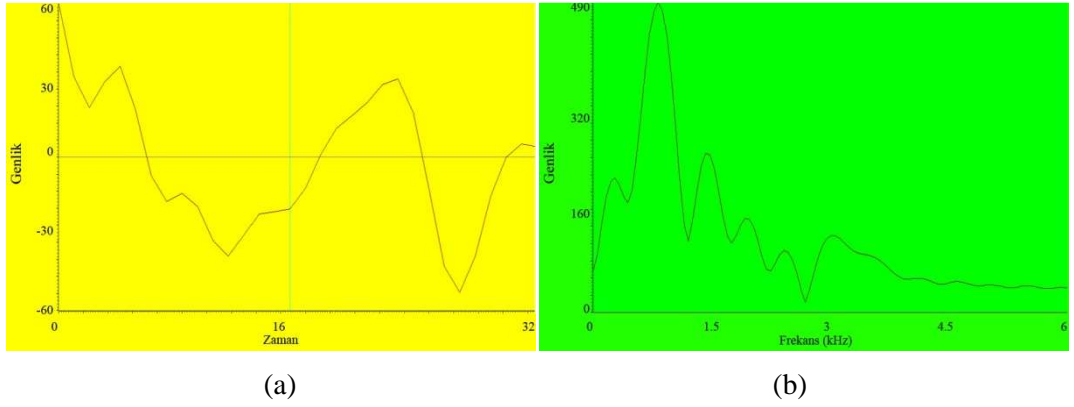
Şekil 5.39: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



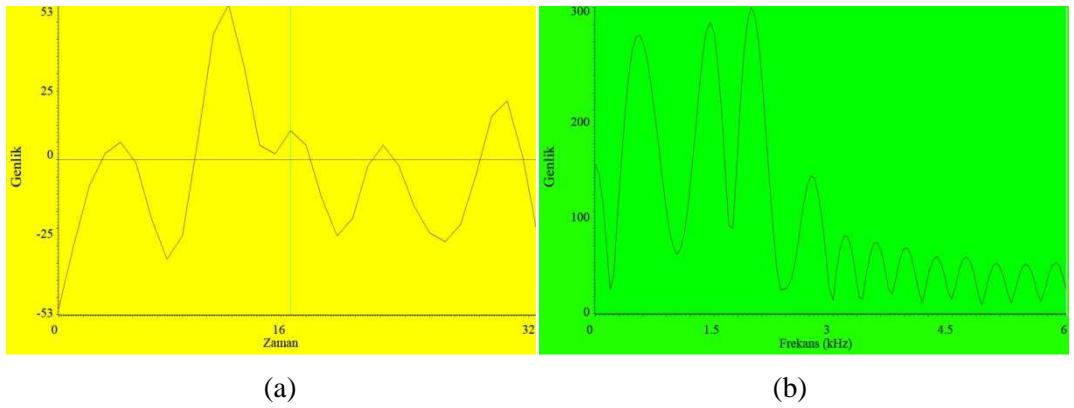
Şekil 5.40: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



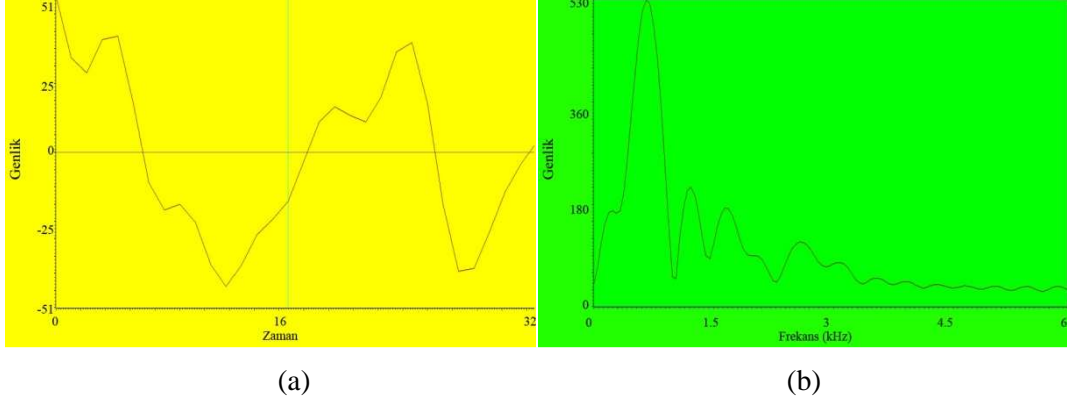
Şekil 5.41: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.42: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

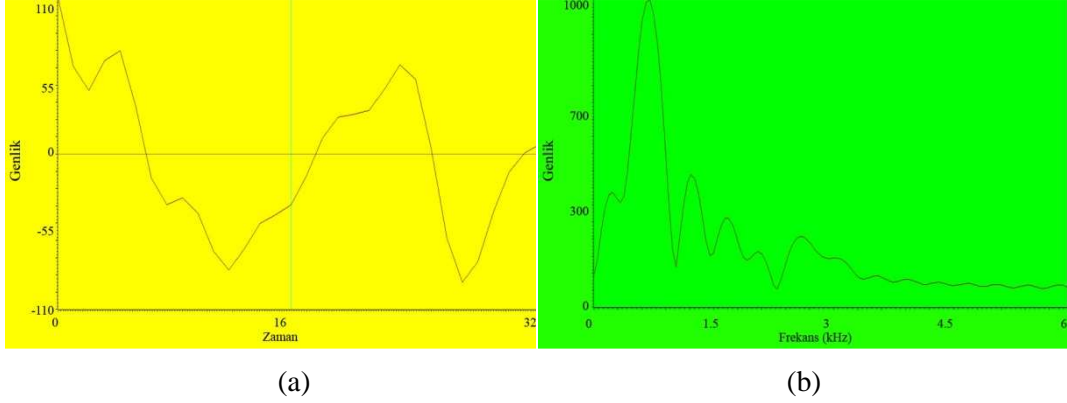


Şekil 5.43: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

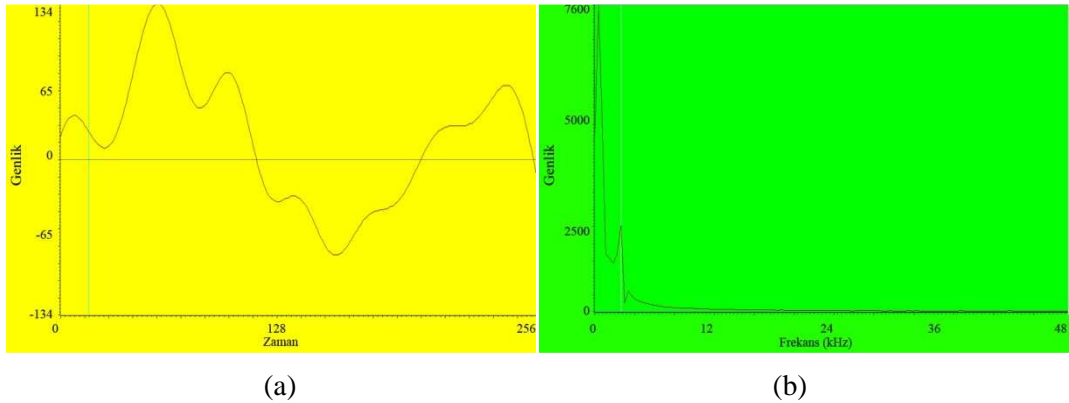


Şekil 5.44: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

Alıcı taraftaki son adım USB modülasyonu gereği I ve Q kanalındaki işaretin toplanması ile orijinal işaretin tekrar elde edilmesidir. Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



Şekil 5.45: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.46: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

5.3.4. Sualtı test havuzunda iki DSK ile 16000 Hz rasgele taşıyıcı işareti kullanılarak elde edilen sonuçlar

Bu bölümde sualtı test havuzunda 2 (iki) adet DSK ile 16000 Hz Rasgele taşıyıcı işareti ve 300–3000 Hz bant geçiren filtre kullanılarak gerçekleştirilen uygulama sonuçları verilmiştir. Verici tarafta “Taşıyıcı Frekansı Üretme” alıcı tarafta “Taşıyıcı Frekansı Algılama” algoritması işlenmektedir. Verici tarafta elde edilen işaretler tek DSK ile gerçekleştirilen uygulama sonuçları ile aynı olmasından dolayı uygulama sonuçları olarak sadece alıcı taraftaki sonuçlar verilmiştir. DSP uygulamasındaki temel parametreler:

Örnekleme Frekansı F_s : 96 kHz

Bit Çözünürlüğü nbit: 16

Tampon Veri Sayısı BUFFSIZE: 512

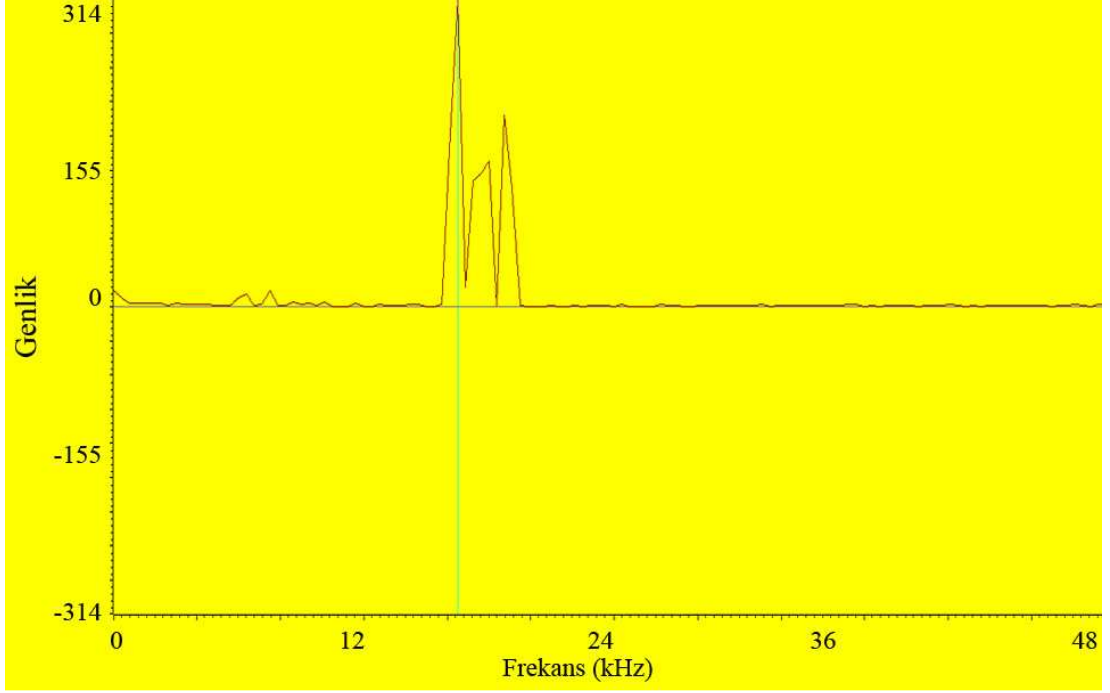
FFT uzunluğu N: 256

Taşıyıcı Frekans indeksi n: 2

Taşıyıcı Frekansları $CF - f_n$: 8 kHz – 16 kHz

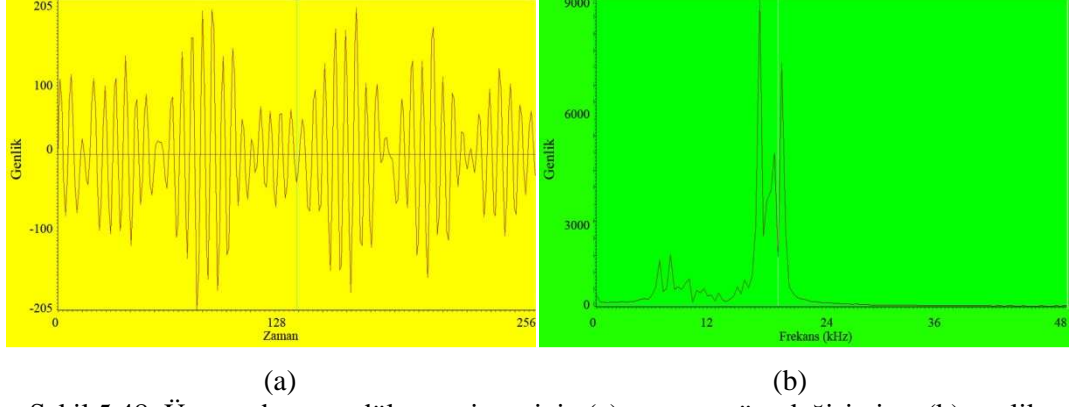
Birim Frekans Aralığı : $F_s/N = 375$ Hz

Rasgele taşıyıcı frekansları kullanılarak gerçekleştirilen uygulamada alıcı, taşıyıcı frekansını doğrudan bilmez bunun yerine alınan işaretin maksimum frekans genlik değerine bakarak taşıyıcı frekansını tahmin eder. FFT’si alınarak işaretin tüm frekans genlik değerleri hesaplanır ve frekans genlik değerlerinin maksimum değerine göre taşıyıcı işareti bulunur. Şekil 5.47’de Rasgele taşıyıcı işareti algılama algoritması kullanılarak elde edilen işaretin frekans genlik spektrumu verilmiştir.

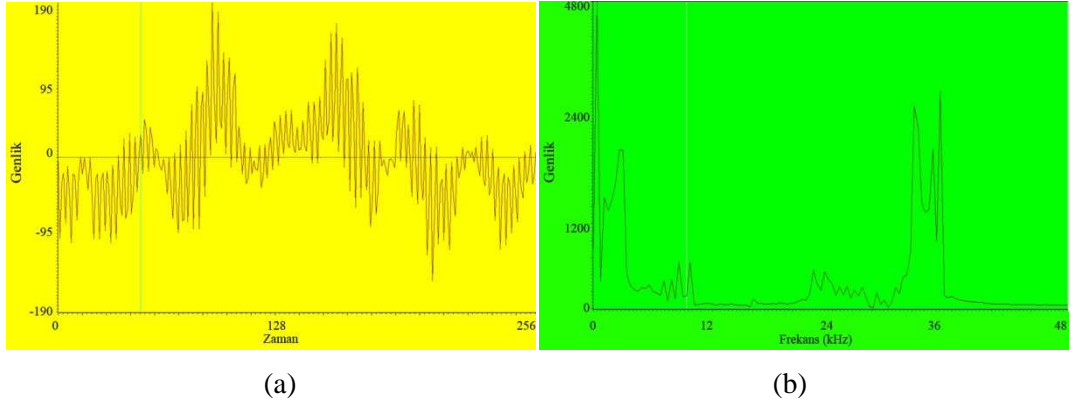


Şekil 5.47: Rasgele taşıyıcı işareti algılama algoritması kullanılarak elde edilen işaretin frekans bölgesi genlik spektrumu

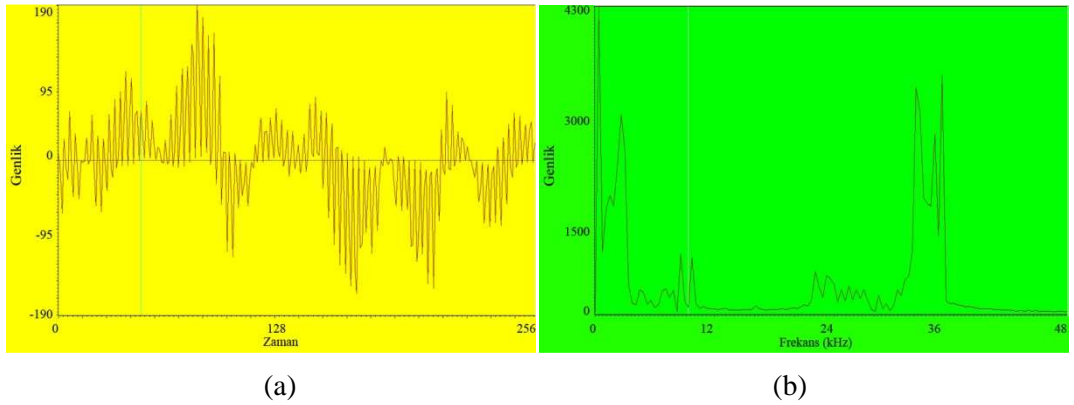
Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50, Şekil 5.51, Şekil 5.52, Şekil 5.53 ve Şekil 5.54'de sırası ile 16000 Hz Rasgele taşıyıcı işareti kullanılan uygulama için Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



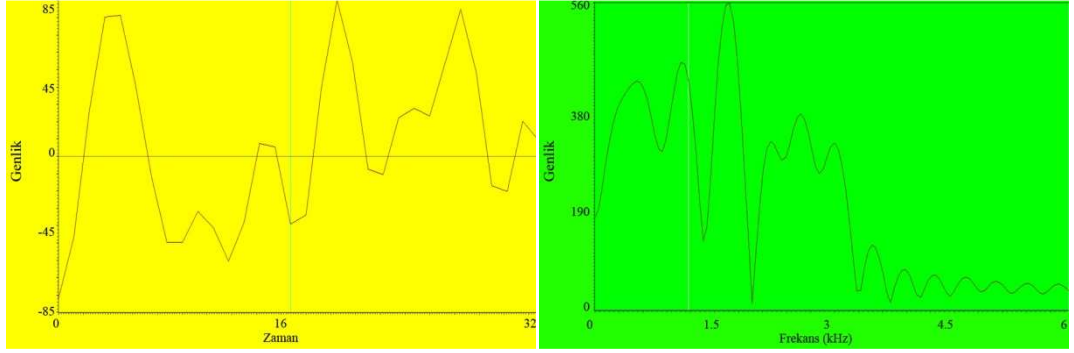
Şekil 5.48: Üst yan bant modülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.49: Alıcı I kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



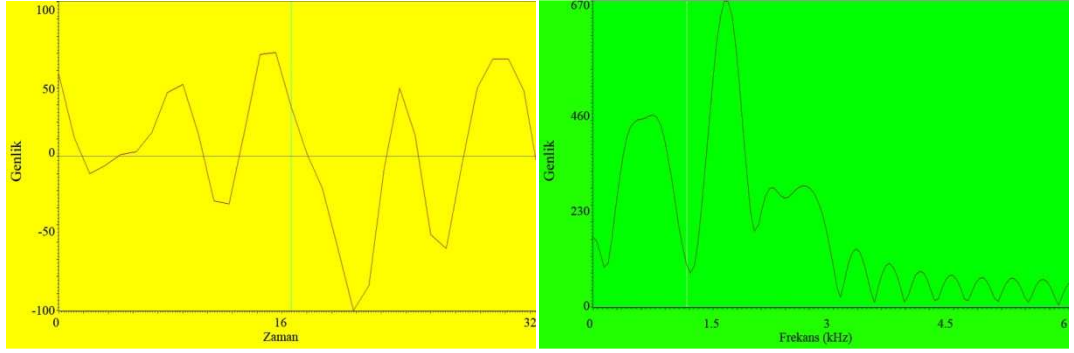
Şekil 5.50: Alıcı Q kanalı taşıyıcı işareti ile çarpılmış işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



(a)

(b)

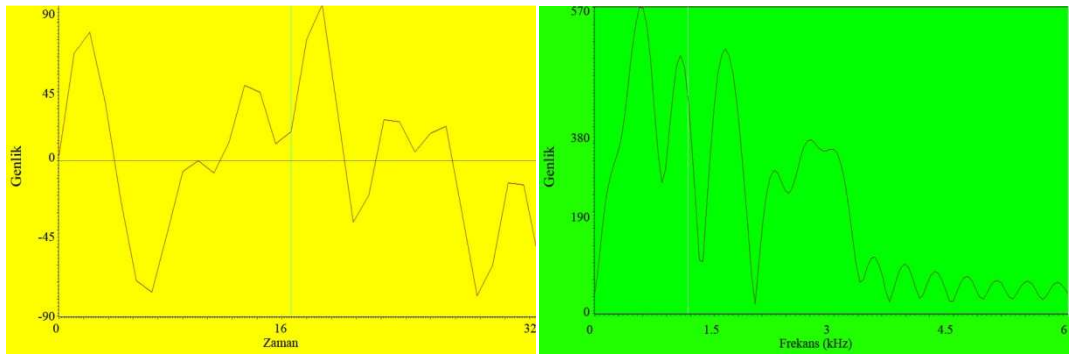
Şekil 5.51: Alıcı I kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



(a)

(b)

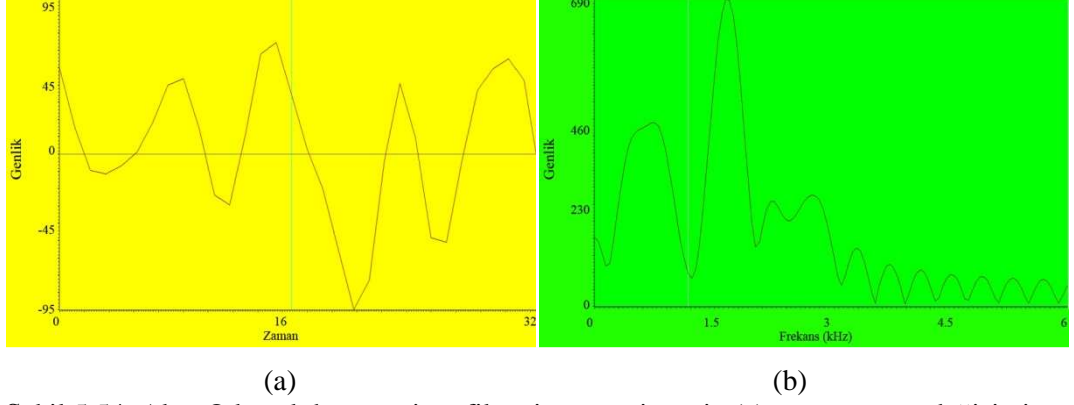
Şekil 5.52: Alıcı I kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



(a)

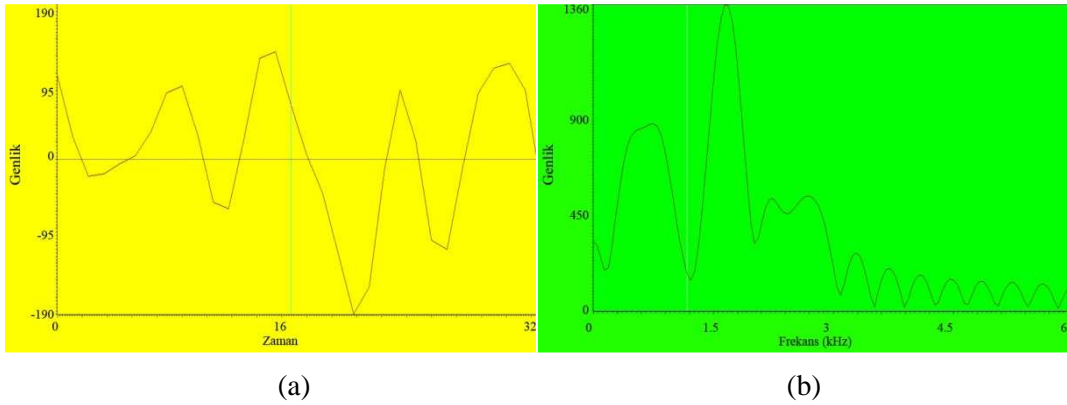
(b)

Şekil 5.53: Alıcı Q kanalı seyreltme filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

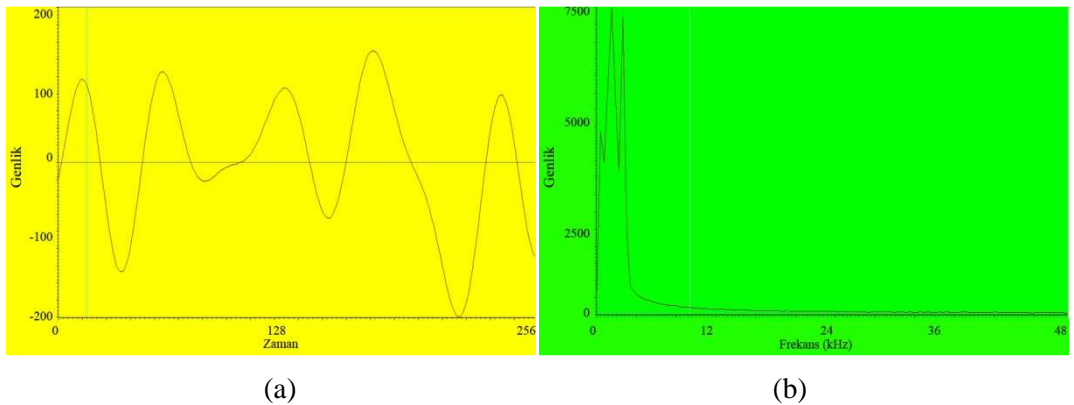


Şekil 5.54: Alıcı Q kanalı bant geçiren filtresi sonucu işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

Alıcı taraftaki son adım USB modülasyonu gereği I ve Q kanalındaki işaretin toplanması ile orijinal işaretin tekrar elde edilmesidir. Şekil 5.55 ve Şekil 5.56'da Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu, Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu verilmiştir.



Şekil 5.55: Alıcı üst yan bant demodülasyon işaretinin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu



Şekil 5.56: Alıcıda elde edilmiş orijinal işaretin (a) zamana göre değişimi ve (b) genlik frekans spektrumu

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Sualtı akustik iletişimi son yıllarda daha fazla önem taşımaya başlamış, özellikle askeri amaçlı haberleşme sistemleri için denizaltı-gemi, denizaltı-denizaltı ve gemi-denizaltı iletişimi için bu yönde çalışmalara hız verilmiştir.

Bu çalışmada, sualtı haberleşmesinde daha esnek, anlaşılır ve uygulanabilir bir sayısal sualtı haberleşmesi geliştirilecek yöntemlere geniş bir bakış getirilmeye çalışılmıştır. STANAG 1074 standardında belirtilen işaret işleme gereksinimlerine paralel bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında rasgele taşıyıcı frekansı üretme ve algılama algoritması kullanılarak sürekli değişen taşıyıcı frekansları ile daha güvenilir bir sualtı haberleşmesi prototipi gerçekleştirilerek farklı çözümler sunulmuştur. Çalışmada farklı taşıyıcı frekansları kullanılarak elde edilen su üstü ve sualtı prototip çalışma sonuçları verilmiştir. Su üstü çalışmalarında çift yönlü olarak 2 (iki) adet TMS320VC5509A DSK üzerinde tek yan bant modülasyonu ile 8,0875 kHz - 39 kHz taşıyıcı frekansları kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda su üstü haberleşme sistemlerinin DSP ile verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir olduğu görülmüştür. Yine su üstü çalışmalarında tek yan bant modülasyonu ile rasgele taşıyıcı frekansları kullanılarak rasgele taşıyıcı frekansı üretme ve algılama algoritmasının DSP ile gerçekleştirilebilirliği gözlenmiştir.

Sualtı çalışmalarında ise tek yönlü olarak 2 (iki) adet TMS320VC5509A DSK kullanılarak tek yan bant modülasyonu ile 8,0875 kHz taşıyıcı frekansı ve rasgele taşıyıcı frekansları (8 Khz, 16 kHz) kullanılmış ve çıkan sonuçlar DSP ile sualtı ses haberleşmesinin verimli şekilde gerçekleştirilebilir olduğunu göstermiştir. Sualtı çalışmalarında taşıyıcı frekanslarını kısıtlayan nedenler donanım ve kullanılan transdüserdir. Sualtı çalışmaları sualtı test havuzunda yapılmıştır. Güncel ticari ve askeri sualtı telefonu uygulamalarında, daha yüksek güçte yayın yapabilecek transdüser kullanılmaktadır. Bu uygulama bir prototip olduğu için daha düşük güçte yayın yapan ve daha ekonomik bir transdüser seçilmiştir.

Yapılan çalışmada mevcut sualtı haberleşme sistemlerinden biri olan “Sualtı Telefonu” uygulaması sayısal ortamda DSP ile gerçekleştirilmiş ve sualtı haberleşmesi için alternatif çözümler sunulmuştur. Önerilen sayısal çözümler, eski analog teknolojilere göre daha üstün bir performans sağlamaktadır. DSP’lerdeki gelişmeler ve dönüştürme teknolojileri, sayısal çözümleri daha ekonomik hale getirmiştir. Sonuç olarak sunulan sayısal sistemlerin boyut ve maliyetlerinin düşürüldüğü, performansı, kalite ve güvenilirliği artırıcı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Sualtı haberleşmesi uygulaması gerçekleştirilirken sistemden beklenen yetenekleri karşılayacak özellikte bir DSP seçilmiştir. Seçilen sayısal uygulama geliştirme ortamı, TI C55XX DSP serisi, kullanıcılara değerlendirme ve geliştirme uygulamaları sağlayan ucuz maliyetli, bağımsız bir geliştirme platformu olan TMS320VC5509A Deneme Kitidir.

Şu anda kullanılan kablosuz sualtı haberleşme sistemlerinde genellikle analog teknikler kullanılmaktadır. Sayısal sistemler analog sistemlere nazaran pek çok üstün özelliklere sahiptir. DSP tabanlı sistemlerin bir avantajı da, gerekli olduğu durumlarda donanımda herhangi bir değişiklik yapmadan sadece uygulama yazılımının değiştirilerek istenilen işaret işleme gereksinimlerinin kolayca gerçekleştirilmesine olanak sağlamasıdır. Sualtı haberleşmesi için genel olarak önerilen ve kullanılan modülasyon tekniği tek yan modülasyonu (SSB)’dur. SSB modülasyon tekniği Faz, Weaver ya da Filtre yöntemlerinden herhangi biri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu metodların her biri DSP ile kolayca uygulanabilmektedir. Tez çalışmasında “Faz Yöntemi” kullanılarak SSB modülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma sırasında DSP teknolojisinin avantajları belirgin şekilde hissedilmiş, herhangi bir donanım değişimine gereksinim duymaksızın sadece yazılım değişikliği ile istenen filtre veya herhangi bir sayısal metodun gerçekleştirilebilirliği görülmüştür. Özellikle rasgele taşıyıcı frekansları kullanılarak yapılan uygulamada alıcı tarafta sürekli değişen frekansın algılanması gerekliliği başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı frekansının doğru elde edilmesi analog sistemlerde ciddi bir sorunken DSP uygulamalarında taşıyıcı frekansı yüksek doğrulukta ve istenen frekansta kolayca elde edilmiştir. Benzer şekilde SSB modülasyon, SSB

demodülasyon, filtreleme işlemleri analog sistemlerde büyük bir sorun iken DSP uygulamalarında bu tür işlemlerin kolay bir şekilde başarılı olarak gerçek zamanlı gerçekleştirildiği görülmüştür.

Sualtı haberleşmesi hala sürekli büyüyen ve gelişen bir araştırma alanıdır. Bu konudaki yeni uygulamalar daha çok sayısal modülasyon teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Özellikle QAM, QPSK ve OFDM gibi sayısal modülasyon teknikleri kullanılarak farklı DSP'ler ile sayısal akustik modem uygulamaları ve çalışmaları devam etmektedir [53,84-87]. Sualtı haberleşmesinde sayısal modülasyon teknikleri kullanılarak haberleşebilmek için hala bir standart belirlenmemiştir. Bazı organizasyonlar bu konu ile çalışmalarına devam etmekte ve bazı uygulamalar gerçekleştirmektedir [83]. Sualtı akustik haberleşmesinin dezavantajlarından biri de haberleşme kanalının çok değişken olması ve çevresel şartlardan çabuk etkilenmesidir. Bu nedenle yapılan çalışmalar uygulamaya dönüştürülse bile her yerde kullanılamamakta ve yapılan çalışmalar uygulama çözümlerden daha çok araştırma konuları olmaktadır. Bir sonraki çalışmada hibrit DSP – FPGA tabanlı ya da birden çok DSP'nin kullanıldığı gerçek zamanlı ses ve veri haberleşmesi içeren bir sualtı akustik uygulaması gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Brekhovskikh L., Lysanov Y., "Fundamentals of Oceans Acoustics", *New York – Springer*, (1982).
- [2] Quazi A., Konrad W., "Underwater Acoustic Communications", *IEEE Comm. Magazine*, 24-29, (1982).
- [3] Catipovic J., "Performance limitations in underwater acoustic telemetry", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 15, 205-216, (1990).
- [4] Baggeroer A., "Acoustic telemetry – an overview", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 9, 229-235, (1984).
- [5] Stojanovic M., "Recent advances in high speed underwater acoustic communications", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 125-136, (1996).
- [6] Zielinski, A. "Communications Underwater", Inv. P, *Journal of Hydroacoustics*, 7, 235-252, Gdynia, (2004).
- [7] *Underwater Acoustic Communications* [online], National University of Singapore (NUS), <http://www.arl.nus.edu.sg/web/research/acomms> (**Ziyaret Tarihi: 10 Eylül 2009**).
- [8] Kaya A., Yauchi T., "An acoustic communication system for subsea robot" *OCEANS'89*, 765-770, (1989).
- [9] Suzuki M., Sasaki T., "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible" *OCEANS'92*, 567-570, (1992).
- [10] Stojanovic M., Catipovic J. A., Proakis J. G., "Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications", *Journal of the Acoustical Society of America*, 3, 1621-1631, (1994).
- [11] Woodward B., 1990, *Underwater Telephone: Past, Present And Future* [online], Electronic and Electrical Engineering Department Loughborough University of Technology <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/23/04/34/PDF/ajp-jphyscol199051C2139.pdf> (**Ziyaret Tarihi: 05 Ocak 2008**).
- [12] Clark A., "Diver communications - The case for single sideband", *Underwater Syst. Design*, 16-18, (1989).
- [13] *Underwater Telephone* [online], Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_telephone (**Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2009**).

- [14] Istepanian R.S.H, Stojanovic M., “Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems”, *Kluwer Academic Publishers*, (2002).
- [15] Lawrence R., Gold B., “Theory and Application of Digital Signal Processing”, *Prentice-Hall*, (1992).
- [16] Benthos, Inc., 2009, *Fast and reliable access to undersea data* [online], [http://www.benthos.com /pdf/Modems/ModemBrochure.pdf](http://www.benthos.com/pdf/Modems/ModemBrochure.pdf). (**Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2008**).
- [17] LinkQuest, Inc., 2009, *Underwater acoustic modems* [online], http://www.linkquest.com/html/uwm_hr.pdf (**Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2008**).
- [18] DSPCOMM, 2009, *Underwater wireless modem* [online], <http://www.dspcomm.com>. (**Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2008**).
- [19] Kennedy G., Davis B., “Electronic Communication Systems”, *Dördüncü Baskı, Tata McGraw- Hill*, (1999).
- [20] Saraç, I., 2008, *Ses Nedir?* [online], http://bsba.facebook.com/note.php?note_id=41906219911 (**Ziyaret Tarihi: 01 Kasım 2008**).
- [21] Brandt J.F., Hollien H., “Underwater hearing threshold in man as a function of water depth”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 46, 893-894, (1969).
- [22] Brandt J.F., Hollien H., “Underwater hearing threshold in man”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 42, 966-971, (1967).
- [23] İzpayı V., “Sualtı Hedeflerini Tespit Ve Sınıflandırma Maksatlı, Düşük Maliyetli, Süratle Atılabilen Mikro-Duyarga Nodu Prototipinin Geliştirilmesi Ve Akustik Açından İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Deniz Harp Okulu Deniz Bilimleri Ve Mühendisliği Enstitüsü*, İstanbul, (2005).
- [24] Aksoy S., 2009, *Ses Hızı & Ses Hızı Profili* [online], Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, http://www.gyte.edu.tr/gytenet/Dosya/102/~saksoy/Dersler/AKUSTIK&SONAR_Web/AKUSTİK%20YAYILIM%20&%20TEMELLERİ/Ses%20Hızı%20&%20Ses%20Hızı%20Profili.mhte (**Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2009**).
- [25] Nasri N., Kachouri A., Andrieux L., Samet M., ”Design Considerations For Underwater Communication Transceiver”, *International Conference on Signals, Circuits and Systems*, (2008).
- [26] *Acoustic Tutorial* [online], Oregon State University <http://www.pmel.noaa.gov/vents/acoustics/tutorial/tutorial.html> (**Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2009**).
- [27] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia, Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges, *Ad-Hoc Networks* 3, 257–279, (2005).

- [28] Fundamentals For Underwater Sound, *International Association of Oil & Gas Producers, Report No: 406*, 7- 8, (2008).
- [29] Basic Acoustics, Catalogue Standard Transducers And Hydrophones, *Reson Inc.*, 125 -129, (2009).
- [30] Kuntsal E.,Bunker W., Guidelines For Specifying Underwater Electroacoustic Transducers, *Undersea Defence Technology Conference*, (1992).
- [31] *Analog İletişim* [online], İstanbul Üniversitesi, [http://ee.istanbul.edu.tr/labs/iletisim/2008/ANALOG %20% DDLET%DD%DE % DDM.pdf](http://ee.istanbul.edu.tr/labs/iletisim/2008/ANALOG%20%DDLET%DD%DE%DDM.pdf) (**Ziyaret Tarihi: 10 Subat 2008**).
- [32] *Tek Yan Band İle Muhabere Tekniği* [online], Elektrik Mühendisleri Odası, [http://www.emo.org.tr/ekler/593c562359c3c2e_ek .pdf? dergi=318](http://www.emo.org.tr/ekler/593c562359c3c2e_ek.pdf?dergi=318) (**Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2008**).
- [33] *DSP and Software Radio Design* [online], [http://yb1zdx.arc.itb.ac.id /data/OWP/arri-books/arri-handbook-2005/16.pdf](http://yb1zdx.arc.itb.ac.id/data/OWP/arri-books/arri-handbook-2005/16.pdf) (**Ziyaret Tarihi: 2 Nisan 2007**).
- [34] *Tek Yan Bant- Single Side Band* [online], Wikipedia, <http://tr.wikipedia.org/wiki/SSB> (**Ziyaret Tarihi: 2 Ekim 2009**).
- [35] Kayran A. H., “Analog Haberleşme”, *Birsen Yayınevi*, (2002).
- [36] Panayırıcı E., “Modülasyon Teorisi”, *İTÜ Yayınları*, (1993).
- [37] Haykin S., “An Introduction to Analog and Digital Communications”, *John Wiley*, (1989).
- [38] Kabaoğlu N., Çam G., 2008, *Tek Yan Bant Modülasyonu* [online], Maltepe Üniversitesi,http://akademik.maltepe.edu.tr/~nihatk/websayfam/ELK307/Deney_3_TYBM.pdf (**Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2009**).
- [39] *Single Side Modulation* [online], The University Wisconsin <http://ecow.engr.wisc.edu/cgi-bin/get/ece/601/vanveen/labmanual/ssb.pdf> (**Ziyaret Tarihi: 05 Ekim 2007**).
- [40] Küliğ Ş. 2004, *Temel Haberleşme* [online], http://antrak.org.tr/index.php?id=360&option=com_content&task=view (**Ziyaret Tarihi: 15 Ekim 2009**).
- [41] Microtelecom, *A 9 MHz Digital SSB Modulator* [online], <http://www.microtelecom.it/ssbdex/ssbdex-e.htm> (**Ziyaret Tarihi: 15 Ekim 2009**).
- [42] The MathWorks, Inc., *Single Sideband Modulation via the Hilbert Transform* [online], <http://www.mathworks.com/products/signal/demos.html?file=/products/demos/shipping/signal/hilberttransformdemo.html> (**Ziyaret Tarihi: 15 Ekim 2009**).

- [43] Kabaoğlu N., Çam G., *Tek Yan Bant Modülasyonlu Sinyallerin Demodülasyonu* [online], Maltepe Üniversitesi, http://akademik.maltepe.edu.tr/~nihatk/yedek/websayfam/ELK307/Deney6_Tek_Yanbant_Demod%FClasyonu.pdf (**Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2009**).
- [44] Baume D., Godden D., Hipwell J., "Improving diver communication", *Underwater System Design*, 21-23, (1980).
- [45] Mcintosh W., "Underwater Communications: An oil company viewpoint", *J. Soc. Underwater Technology*, 11, 14-26, (1985).
- [46] Hick R. J., Virr L. E., "Underwater Communications – a review", *Int. Conf. Divetech 81: The Way Ahead in Diving Technology*, Society for Underwater Technology, London, (1981).
- [47] Bud A.M.G., Holmes J., White I., Datham R.J., Kramer J., "Improvements in diver communications", *Report OTI 87 500*, Dept. Energy, (1986).
- [48] Anderson V.C., "Acoustic communication is better than none", *IEEE Spectrum*, 63-68, (1970).
- [49] Berkday H.O., Gazey B., Teer C.A., "Underwater Communication past, present and future", *J. Sound Vib*, 7, 62-70, (1968).
- [50] Hollien H., Coleman R.F., Rothman H.B., "Evaluation of diver communication system by a diver to diver technique", *IEEE Trans. Communication Tech.*, COM-19, 4, 403-409, (1971).
- [51] Webb H.J., Webb J.R., "An underwater audio communicator", *IEEE Trans. Audio Electroacoustics*, AU-143, 403-409, (1968).
- [52] Yagnamurthy N.K., Jelinek H.J., "A DSP Based Underwater Communication Solution", *OCEANS 2003. Proceedings*, 1, 120-123, ABD, (2003).
- [53] Aydınlik M., Ozdemir A.T., Stojanovic M., "A Physical Layer Implementation on Reconfigurable Underwater Acoustic Modem", *OCEANS 2008*, 1, 1-4, ABD, (2008).
- [54] Jones C. J., Meglio A., Aid N., Sanchez A., Wang L.S., "The Use of Digital Signal Processors in Underwater Communication Systems", *IEE Colloquium on DSP Chips in Real Time Instrumentation and Display Systems*, 9, 1-5. London (1997).
- [55] Woodward B., Sarı H., "Digital Underwater Acoustic Voice Communication", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21, 2. (1996).
- [56] Wong W.T.K., Mack R.M., Cheetham B.M.G., Sun X.Q., "Low rate speech coding for telecommunications", *BT Technol. J.*, 14, 28-43, (1996).

- [57] Barret P.A., Voelcker R.M., Lewis A.V., "Speech transmission over mobile radio channels", *BT Technol. J.*, 14, 45-55, (1996).
- [58] Geller B., Capellana V., Brossier J.M., Essebbar A., Jourdian G., "Equalizer for video rate transmission in multipath underwater communications", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 21, 2, (1996).
- [59] Proakis J.G., "Adaptive equalization techniques for acoustic telemetry channels" "Speech transmission over mobile radio channels", *IEEE J. Oceanic Eng.*, OE-16, 1, 21-31, (1991).
- [60] Tarbit P.S.D., Howe G.S., Hinton O.R., Adams A.E., Sharif B.S., "Development of a real-time adaptive equalizer for a high-rate underwater acoustic data communication link", *OCEANS'94*, 307-312, (1994).
- [61] Bessios A.G., Caimi F.M., "Multipath compensation for underwater acoustic communication", *OCEANS'94*, 317-322, (1994).
- [62] Galvin R., Coates R.F.W., "Analysis of the performance of an underwater communications system and comparison with a stochastic channel", *OCEANS'94*, 478-482, (1994).
- [63] "TMS320VC5509A DSK Technical Reference", *Spectrum Digital, Inc.*, (2005).
- [64] "TLV320AIC23 Stereo Audio Codec Data Manual", *Texas Instrument Inc.*, (2002).
- [65] "TMS320C55x DSP Peripherals Overview Reference Guide", *Texas Instrument Inc.*, (2006).
- [66] "TMS320C55x DSP Library Programmer's Reference", *Texas Instrument Inc.*, (2006).
- [67] Yılmaz, A., Çekli, E., Kuzlu, M., Uysal, E., "Akustik Sualtı İletişimi DSP Uygulaması", *Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2008)*, Bursa, 26-30 Kasım (2008).
- [68] Coates R., "Underwater Acoustic Systems", *New York: Wiley*, (1989).
- [69] Stojanovic M., "On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Channel," *First ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNeT'06)*, Los Angeles, (2006).
- [70] Ertürk, S., "Sayısal Haberleşme", *Birsen Yayınevi*, 48, (2005).
- [71] Ertürk, S., "Sayısal İşaret İşleme", *İkinci Baskı, Birsen Yayınevi*, 189-197, (2005).

- [72] *Radyo* [online], ForumTurka, <http://www.forumturka.net/forum/archive/index.php/t-22917.html> (**Ziyaret Tarihi: 05 Eylül 2009**).
- [73] Choi Y., Kim S., Park J., Lim Y., Ko H., “A Digital Acoustic Transceiver for Underwater Communication without PLL and DLL “, *OCEANS 2003 Proceedings*, 4, 1781- 1785, ABD, (2003).
- [74] *Amplifikatörler (Yükselteçler)* [online], <http://www.diyadinnet.com/YararliBilgiler-1552&Bilgi=amplifikat%C3%B6rler-y%C3%BCkselte%C3%A7ler> (**Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2009**).
- [75] *Amplifikatörler* [online], <http://www.uslanmam.com/elektronik/279456-amplifikatorler.html> (**Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2009**).
- [76] Smith S. W., *The Scientist and Engineer’s Guide To Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, San Diego, (1999).
- [77] Aydın H., *Sayısal Filtrelerin Tasarımı ve Mikrobilgisayar ile Gerçekleştirilmesi Dijital İşaret İşleme ve FIR filtre Tasarım Algoritmaları*, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, (1999).
- [78] Çakır A., Çalış H., Kara A., “DSP Tabanlı Sayısal Filtre Tasarımı Ve Uygulaması”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük, 13-15 Mayıs, (2009).
- [79] Smith D., “The ARRL Handbook for Radio Communications”, *Amer Radio Relay League*, 16.11-16.12, (2009).
- [80] Strong, A., 1999, *JFET Op Amps Equal Low Noise Bipolars and Have Picoamp Current Noise* [online], http://cds.linear.com/docs/LT%20Magazine/LT1792_0999_Mag.pdf, Linear Technology Magazine (**Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2009**).
- [81] *Product Data - Hydrophones Types 8103, 8104, 8105 and 8106* [online], Brüel & Kjær Inc., <http://www.bksv.com/doc/bp0317.pdf> (**Ziyaret Tarihi: 18 Kasım 2008**).
- [82] “Calibration Chart for Hydrophones Types 8103 – D – 005”, *Brüel & Kjær Inc.*, (2009).
- [83] McCoy K., Tomasi B., Zappa G., “JANUS: the genesis, propagation and use of an underwater standard”, *European Underwater Acoustics Conference (ECUA 2010 Istanbul)*, İstanbul, (2010).
- [84] Dahnoun N., Clewer D. R., “The Implementation Of A Modem Based On Quadrature Amplitude Modulation Using The TMS320C6201 DSP.”, *DSP Chips in Real-Time Instrumentation and Display Systems*, 5, 1- 6, (1997).

- [85] Yan H., Zhou S., Shi Z. J., Li B., “A DSP Implementation of OFDM Acoustic Modem”, *Proceedings Of The Second Workshop On Underwater Networks*, 89-92, (2007).
- [86] Kibangou Y. A., Siclet C., Ros L., “ZF OFDM Receiver for Underwater Communications”, *Int. Symp. on Communications, Control, and Signal Processing (ISCCSP 2010)*, Kibris, (2010).
- [87] Lei K., Yan Z., Han J., Huang J., “Design and Implementation of Underwater OFDM Acoustic Communication Transmitter”, *Audio, Language and Image Processing (ICALIP 2008)*, 609 - 613, (2008).

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

A. SCI Kapsamlı Yayın Bilgileri:

- [1] Kuzlu M., Dinçer H., Öztürk S., “DSP implementation of underwater communication using SSB modulation with random carrier frequencies“, *SRE - Scientific Research and Essays*, Vol. 5 (10), pp. 1084-1099, (Mayıs 2010)

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

- [2] Kuzlu M., Dinçer H., “Implementation Of Underwater Communication With TMS320VC5509A DSK”, *ELECO 2009, 6th International Conference On Electrical And Electronics Engineering*, Bursa, (5-8 Kasım 2009)
- [3] Uysal E., Yılmaz S., Kuzlu M., “Digital Underwater Communication System Design With DSP”, *European Underwater Acoustics Conference (ECUA 2010 Istanbul)*, İstanbul, (5-9 Temmuz 2010)
- [4] Kuzlu M., Şengül M., Yağlıdere İ., Kılınç A., Yarman S., Dinçer H., “Design Of Impedance Matching Network For B&K 8104 Hydrophone Via Direct Computational Technique For Underwater Communication”, *10th Mediterranean Microwave Symposium MMS'2010*, Kıbrıs, (25-27 Ağustos 2010)

C. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

- [5] Yılmaz A., Çekli E., Kuzlu M., Uysal E., “Akustik Sualtı İletişimi DSP Uygulaması”, *ELECO 2008, Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, (26-30 Kasım 2008)
- [6] Izgi Y., Çekli E., Kuzlu M., Uysal E., “Kangal Akım Optimizasyon Yönetimi İle Geminin Manyetik İzinin Azaltılması”, *ELECO 2008, Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, (26-30 Kasım 2008)
- [7] Kuzlu M., Dinçer H., Öztürk S., Vural E., “Rasgele Taşıyıcı Frekansları Kullanarak Sualtı Haberleşmesi DSP Uygulaması”, *III. Haberleşme Teknolojileri Ve Uygulamaları Sempozyumu (Habtekus'09)*, İstanbul, (9-11 Aralık 2009)

- [8] Vural E., Diñer H., Öztürk S., Kuzlu M., “WiMAX ve OFDM’in İlkeleri ve Uygulaması”, **III. Haberleşme Teknolojileri Ve Uygulamaları Sempozyumu (Habtekus'09)**, İstanbul, (9-11 Aralık 2009)
- [9] Kuzlu M., Diñer H., Öztürk S., “Sualtı Haberleşmesi Alıcı Ön Yükselteç Tasarımı”, **18. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU2010)**, Diyarbakır , (22-24 Nisan 2010)
- [10] Kuzlu M., Diñer H., Öztürk S., Kadiođlu T., “Gerçek Zamanlı Sayısal Bant Geçiren Analitik Filtre Çifti Uygulaması”, **ELECO 2010, Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu**, Bursa, (2-5 Aralık 2010)
- [11] Kadiođlu T., Diñer H., Kuzlu M., “Kablosuz Duyarga Ağlarında Konum Belirleme”, **ELECO 2010, Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu**, Bursa, (2-5 Aralık 2010)

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Zonguldak'ın Devrek ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Devrek'te lise öğrenimini Zonguldak Anadolu Öğretmen Lise'sinde tamamladı. 1997 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2001 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 2001 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde Prof. Dr. Hasan DİNÇER'in danışmanlığında başladığı yüksek lisans eğitimini 2004 yılında Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi ünvanını alarak başarıyla tamamladı. Yüksek lisans eğitiminde WCDMA'de başarıml ve paket erişimi konusunda çalıştı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde başladığı doktora eğitimine halen devam etmektedir ve tez aşamasındadır.

2001 yılından beri Telekom Sektöründe farklı Ar-Ge Firmalarında çalışmakta olup 2006 yılından beri TÜBİTAK-MAM Enerji Enstitüsü'nde Araştırmacı olarak görev yapmaktadır.