

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAZILIM TABANLI ENSTRÜMANTASYON İLE
APCO PROJE-25 TELSİZ PLATFORMU GERÇEKLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elo. ve Hab. Müh. Murat ÇEVEN

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Müh.

Danışman: Prof. Dr. Hasan DİNÇER

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAZILIM TABANLI ENSTRÜMANTASYON İLE
APCO PROJE-25 TELSİZ PLATFORMU GERÇEKLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elo. ve Hab. Müh. Murat ÇEVEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11.06.2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2010

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

(.....)

**Üye
Doç. Dr. Selçuk PAKER**

(.....)

**Üye
Doç. Dr. Adnan KAVAK**

(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında aralarında Türkiye'nin de olduğu birçok ülkede kamu güvenliği ve acil durum haberleşme sistemlerinde kullanılan açık mimarili APCO Proje-25 sayısal telsiz haberleşme sistem mimarisi tanıtılmış ve bu mimaride tanımlanan Genel Hava Arayüzü referans alınarak yazılım tabanlı bir sistem üzerinde telsiz alıcı ve verici yapısı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda kamu güvenliği ve acil durum haberleşme sistemleri hakkında önemli bilgi birikimi edinilmiş, yaygın olarak kullanılan açık mimarili APCO Proje-25 sayısal telsiz sisteminin en önemli arayüzü yazılım tabanlı enstrümanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ihtiyaca göre başta kamu güvenliği haberleşme sistemleri için olmak üzere donanım üzerinde uygulaması yapılacak yeni veya hibrit standartlar için yeniden programlamaya izin veren genel amaçlı altyapı oluşturulmuştur.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü (UEKAE) bünyesinde yürütülmekte olan Yazılım Tabanlı Telsiz projesinin APCO Proje-25 standardına ait dalgaşekli gerçekleştirilmesi adımı yapılmıştır. Proje kapsamında özetle özgün Yazılım Tabanlı Telsiz platformu ve bu platformun üzerinde koşacak APCO Proje-25'inde aralarında olduğu dalgaşekilleri geliştirilmektedir.

Tezin her aşamasında bana desteğini eksik etmeyen tez danışmanım, çok değerli hocam Sn. Prof. Dr. Hasan DİNÇER'e, Yazılım Tabanlı Telsiz projesi yöneticisi Sn. Y.Müh. İbrahim ÖLÇER'e, teorik ve pratik olarak desteklerini esirgemeyen proje gurubu çalışma arkadaşlarım Sn. Y.Müh. Hüseyin Ercüment ZORLU ve Sn. Y.Müh. Serkan SEMİZ'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatım boyunca beni destekleyen aileme sonsuz minnet duygularımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	v
SEMBOLLER.....	vi
ÖZET.....	ix
İNGİLİZCE ÖZET.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. TELSİZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ.....	3
2.1. Telsiz Sistemlerinin Kullanımı ve Gelişimi.....	4
2.2. Konvansiyonel Telsiz Sistemleri.....	5
2.3. Trunk Telsiz Sistemleri.....	5
2.4. Özel Gezgin Telsiz.....	6
2.5. Ortak Kullanımlı Gezgin Telsiz.....	6
2.6. Analog Telsiz Sistemleri.....	7
2.7. Sayısal Telsiz Sistemleri.....	8
2.7.1. TETRA sayısal telsiz standardı.....	8
2.7.2. TETRAPOL sayısal telsiz standardı.....	13
3. APCO PROJE-25 SAYISAL TELSİZ HABERLEŞME STANDARTI.....	16
3.1. APCO Proje-25 Tarihçesi.....	17
3.2. APCO Proje-25 Fazları.....	18
3.2.1. Faz-I.....	18
3.2.2. Faz-II.....	19
3.2.3. Faz-III.....	19
3.3. APCO Proje-25 Sisteminin Genel Çalışma Mantığı.....	20
3.4. APCO Proje-25 Sistem Mimarisi.....	21
3.5. APCO Proje-25 Standartının Arayüzleri.....	25
3.6. APCO Proje-25 Standartının Avantajları.....	28
4. GENEL HAVA ARAYÜZÜ.....	31
4.1. Ses Haberleşmesi Modu.....	31
4.2. Veri Haberleşmesi Modu.....	39
5. YAZILIM TABANLI ENSTRÜMANTASYON.....	41
5.1. Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon Bileşenleri.....	42
5.1.1. Bilgisayar teknolojileri.....	42
5.1.2. Yazılım teknolojileri.....	43
5.1.3. Donanım teknolojileri.....	43
5.1.4. Bağlantı arayüzü teknolojileri.....	43
5.2. Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon Kullanımının Avantajları.....	44
6. APCO PROJE-25 TELSİZ STANDARTININ GERÇEKLENMESİ.....	46
6.1. Gerçeklenen Sistemin Donanım Bileşenleri.....	46
6.2. Yazılım Geliştirme Ortamı ve Dili.....	51
6.3. Telsiz Platformu Verici Bloğu Gerçeklemesi.....	52

6.4. Telsiz Platformu Alıcı Bloğu Gerçeklemesi	56
6.5. Telsiz Platformunun Kullanıcı Arayüzü ve Test Edilmesi	65
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Telsiz haberleşme yöntemleri	3
Şekil 2.2: Konvansiyonel ve Trunk sistemlerin kanal kullanım teknikleri.....	6
Şekil 2.3: TETRA sistemlerinde kullanılan TDMA erişim tekniği.....	10
Şekil 2.4: TETRA standardı çerçeve yapısı.....	11
Şekil 2.5: TETRA standardıyla tanımlanan temel sistem arayüzleri.....	13
Şekil 2.6: TETRAPOL sistemlerinde kullanılan FDMA erişim tekniği.....	14
Şekil 3.1: APCO Proje-25 Sistem Mimarisi	21
Şekil 3.2: C4FM modülatör yapısı	24
Şekil 3.3: CQPSK modülatör yapısı	25
Şekil 3.4: QPSK demodülatör yapısı	25
Şekil 3.5: APCO Proje-25 standardının arayüzleri	26
Şekil 4.1: Genel hava arayüzü için basit verici diyagramı.....	31
Şekil 4.2: Genel hava arayüzünde tanımlı ses mesajı yapısı.....	32
Şekil 4.3: FS, NID ve SS bloklarının veri birimlerinde kullanılması.	33
Şekil 4.4: Header Data Unit yapısı.....	34
Şekil 4.5: Logical Link Data Unit yapısı.	35
Şekil 4.6: Logical Link Data Unit 1 yapısı.	36
Şekil 4.7: Logical Link Data Unit 2 yapısı.	37
Şekil 4.8: Link Control bilgisi taşımayan Terminator Data Unit yapısı.....	38
Şekil 4.9: Link Control bilgisi taşıyan Terminator Data Unit yapısı.....	39
Şekil 4.10: Veri mesajının yapısı.	39
Şekil 4.11: Packet Data Unit yapısı.	40
Şekil 5.1: Geleneksel ve yazılım tabanlı enstrümantasyon bileşenleri	42
Şekil 5.2: Yazılım tabanlı enstrümantasyon mimarisi.	44
Şekil 6.1: APCO Proje-25 telsiz platformu donanım mimarisi.	47
Şekil 6.2: PXIe-1062Q taşıyıcı şase.....	47
Şekil 6.3: PXIe-8106 denetleyici.	48
Şekil 6.4: PXI-5600 frekans düşürücü	49
Şekil 6.5: PXI-5620 sayısallaştırıcı.....	50
Şekil 6.6: PXI-5610 RF frekans yükseltici	50
Şekil 6.7: PXIe-5442 seçmeli dalgaşekli üretici	51
Şekil 6.8: LabWindows/CVI yazılım geliştirme ortamı	52
Şekil 6.9: Telsiz platformu verici bloğu akış diyagramı	53
Şekil 6.10: Golay(23,12,7) ve Hamming(15,11,3) hata düzeltme kod bloğu	54
Şekil 6.11: PXIe-5442 üzerindeki OSP birimin blok diyagramı.	55
Şekil 6.12: PXI-5610 ile IF işaretin RF frekansına yükseltilmesi	56
Şekil 6.13: Telsiz platformu alıcı bloğu akış diyagramı.	57
Şekil 6.14: PXI-5620 üzerindeki Intersil-HS50214B birimin blok diyagramı.	58
Şekil 6.15: Intersil-HS50214B içerisindeki HalfBand filtrenin frekans cevabı.....	60
Şekil 6.16: C4FM ve CQPSK işaretleri için tasarlanan ortak demodülatör yapısı.....	61
Şekil 6.17: Farklı SNR ve örnekleme frekanslarında BER başarımının değişimi	62

Şekil 6.18: FS bilgisine göre çerçeve başı bulunması.....	62
Şekil 6.19: SNR=30 dB için, 100 ppm olan örnekleme saati hatasının düzeltilmesi ve düzeltilmemesi durumlarının EVM üzerindeki etkileri.....	63
Şekil 6.20: USB ses kartına yollanan ses mesajı	64
Şekil 6.21: Frekans seçici sönmlemeli ve sönmlemeli olmayan kanallarda alıcının BER başarımı	65
Şekil 6.22: APCO Proje-25 telsiz platformunun kullanıcı arayüzü	65
Şekil 6.23: Gerçeklenen telsiz platformu ve el telsizinin karşılıklı çalıştırılması.....	67

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1: CQPSK faz değışikliğı ve C4FM sapma için ikili bit sembol eşleme.....	23
Tablo 4.1: Durum Sembolleri (SS) için kullanım bilgisi.	33
Tablo 4.2: Veri Birimi Kimliği (DUID) için kullanım bilgisi	33
Tablo 6.1: Intersil-HS50214B içerisindeki CIC filtrenin karakteristiğı.....	59

SEMBOLLER

BT	: Normalize edilmiş zaman-frekans çarpımı
$dmin$	: Hamming uzaklığı
$D\{f\}$	: Biriktir ve Boşalt Filtre'nin genlik cevabı
f	: Frekans (Hz)
$H\{f\}$	: Nyquist Yükseltilmiş Kosinüs Filtre'nin genlik cevabı
$P\{f\}$	: Şekillendirici Filtre'nin genlik cevabı
t	: Kodun hata düzeltme yeteneği
Π	: Pi sayısı (3,14.....)

Kısaltmalar

ACELP	: Adaptive Code Excited Linear Prediction
AES	: Advanced Encryption Standart
AI	: Air Interface
ANSI	: American National Standards Institute
APCO	: Association of Public Safety Communications Officials International
API	: Application Programming Interface
bit/s	: Bit / saniye
BER	: Bit Error Rate
BTK	: Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
CAI	: Common Air Interface
CQPSK	: Compatible Quadrate Phase Shift Keying
CSSI	: Console Sub-System Interface
CTCSS	: Continuous Tone Controlled Squelch System
CVI	: C for Virtual Instrumentation
C4FM	: Continuous 4-Level Frequency Modulation
DAC	: Digital/Analog Converter
DCS	: Digital Coded Squelch
DDC	: Digital Downconversion
DES	: Data Encrytion Standart
DHNI	: Data Host or Network Interface
DHS-CG	: Department of Homeland Security - Coast Guard
DMO	: Direct Mode Operation
DQPSK	: Differential Quadrature Phase Shift Keying
DPI	: Data Peripheral Interface
DUC	: Digital Upconversion
DUID	: Data Unit Identifier
ES	: Encryption Synchronization Word
ESO	: European Standards Organization
ETSI	: European Telecommunications Standards Institute
EU	: European Union
EVM	: Error Vector Magnitude

FCC	: Federal Communications Commission
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
FM	: Frequency Modulation
FPIC	: Federal Partnership for Interoperable Communications
FS	: Frame Synchronization
FSI	: Fixed Station Interface
FSK	: Frequency Shift Keying
GB/s	: Giga byte / saniye
GMSK	: Gaussian Minimum Shift Keying
GPS	: Global Positioning System
GSM	: Global System for Mobile Communications
HDU	: Header Data Unit
HF	: High Frequency
IF	: Intermediate Frequency
IMBE	: Improved Multi-Band Excitation
ISI	: Inter Symbol Interference
ISI	: Inter System Interface
kbit/s	: Kilo bit / saniye
kHz	: Kilo Hertz
ksemlol/s	: Kilo semlol / saniye
LC	: Link Control Word
LDU	: Logical Link Data Unit
LMR	: Land Mobile Radio
LSD	: Low Speed Data
MB/s	: Mega byte / saniye
MDTRS	: Mobile Digital Trunked Radio System
MESA	: Broadband Mobility for Emergency and Safety Applications
MOU	: Memorandum Of Understanding
ms	: Mili saniye
NAC	: Network Access Code
NASTD	: National Association of State Telecommunications Directors
NCO	: Numerically Controlled Oscillator
NCS	: National Communications System
NI	: National Instruments
NID	: Network Identifier
NIST	: Department of Commerce's National Institute of Standards and Technologies
NMI	: Network Management Interface
NSA	: National Security Agency
NTIA	: National Telecommunications and Information Administration
OKTH	: Ortak Kullanımlı Telsiz Hizmeti
OLES	: Office of Law Enforcement Standards
OSP	: On-Board Signal Processing
OTAR	: Over The-Air Rekeying
PAMR	: Public Access Mobile Radio
PDU	: Packet Data Unit
PMR	: Private Mobile Radio
PSPP	: Public Safety Partnership Project
PSTN	: Public Switched Telephone Network

QPSK	: Quadrate Phase Shift Keying
RF	: Radio Frequency
RFSS	: RF Sub-System
RPCELP	: Regular Pulse Code Excited Linear Predictive
SACCH	: Slow Associated Control Channel
sembol/s	: Sembol / saniye
SNR	: Signal to Noise Ratio
SS	: Status Symbols
TDMA	: Time Division Multiple Access
TDU	: Terminator Data Unit
TEI	: Terminal Equipment Interface
TETRA	: Terrestrial Trunk Radio
TETRAPOL	: Terrestrial Trunked Radio Police
TIA	: Telecommunications Industry Association
TII	: Telephone Interconnect Interface
US DoD	: United States Department of Defense
XOR	: Exclusive OR

YAZILIM TABANLI ENSTRÜMANTASYON İLE APCO PROJE-25 TELSİZ PLATFORMU GERÇEKLEMESİ

Murat ÇEVEN

Anahtar kelimeler: Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon, Sayısal Telsiz Sistemleri, APCO Proje-25, Kamu Güvenliği

Özet: Yazılım tabanlı enstrümantasyon tekniği kullanılarak, esnek olmayan ve değiştirilemeyen işlevlere sahip geleneksel cihazlar yerine kullanıcıya özel ve istenildiğinde yeni işlevler kazandırılabilen yazılım tabanlı cihazlara sahip olunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında aralarında Türkiye'nin de olduğu birçok ülkede kamu güvenliği ve acil durum haberleşme sistemlerinde kullanılan açık mimarili APCO Proje-25 sayısal telsiz standardının Genel Hava Arayüzü ile tanımlanan ses haberleşmesi modu, yazılım tabanlı enstrümantasyon tekniği ile telsiz platformu olarak gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen bu telsiz platformu yine Proje-25 standardına göre ASELSAN firması tarafından üretilmiş ticari ürün olan 4700 serisi el telsizi ile verici/alıcı modunda karşılıklı çalıştırılmıştır.

Bu çalışmada yeniden düzenlemeye izin veren RF, IF, temelband sinyal işleme alt blokları ve bu blokların kolay ama yüksek performansla programlanmasına imkân veren yazılım geliştirme ortamı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda yazılım tabanlı enstrümanlarla gerçekleştirilen standardın yanında ihtiyaçlara göre geliştirilecek benzer veya farklı sistemler için yazılım tabanlı enstrümantasyon bileşenleri kullanılarak teknik altyapı oluşturulmuş ve bu altyapı üzerinde tecrübe kazanılmıştır.

APCO PROJECT–25 RADIO PLATFORM IMPLEMENTATION WITH SOFTWARE DEFINED INSTRUMENTATION

Murat ÇEVEN

Keywords: Software Defined Instrumentation, Digital Radio Systems, APCO Project–25, Public Safety

Abstract: Software defined instrumentation technics provides us with user specific but also easily adaptable and reconfigurable devices instead of unadoptable and non-flexible conventional devices. In this thesis, voice mode of APCO Project–25 Standard, open architecture public safety digital radio standard widely used in the world including Turkey also, has been implemented on a radio platform by using software defined instrumentation technics. The communication between this platform and the commercial hand-held radio 4700, produced by ASELSAN, has been tested.

In this study, RF, IF, and baseband signal processing blocks supporting reconfigurability are used with a software development environment that enables programming of aforementioned blocks easily and efficiently. At the end of this work, in addition to implemented standard, a technical infrastructure involving software defined instrumentation components has been implemented and experience gained on the system in case of a need for similar systems.

1. GİRİŞ

Bu tez çalışması kapsamında aralarında Türkiye'nin de olduğu birçok ülkede kamu güvenliği ve acil durum haberleşme sistemlerinde kullanılan açık mimarili APCO Proje-25 sayısal telsiz haberleşme sistem mimarisi tanıtılmış ve bu mimaride tanımlanan Genel Hava Arayüzü referans alınarak yazılım tabanlı enstrümantasyon ile üzerinde telsiz alıcı ve verici bloklarının bulunduğu APCO Proje-25 telsiz platformu gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde Telsiz Haberleşme Sistemleri genel olarak incelenmiş, Analog ve Sayısal Telsiz Haberleşme Sistemleri kısaca tanıtılmış, aralarında APCO Proje-25 standardının da olduğu Sayısal Telsiz Haberleşme Sistemleri'nden TETRA ve TETRAPOL standartları genel bilgi olarak tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde APCO Proje-25 standardı tarihçesi, mimarisi ve gelişim süreciyle birlikte (Faz-I, Faz-II ve Faz-III) sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca APCO Proje-25 standardı ile tanımlanmış 7 arayüz tanıtılmıştır. Bu arayüzlerden Genel Hava Arayüzü ile iletilen işaretlerin türü ve içeriği tanımlanmaktadır. Dördüncü bölümde Genel Hava Arayüzü ses ve veri modunu kapsayacak şekilde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Beşinci bölümde telsiz platformunun mimarisini oluşturan Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon tekniği bütün bileşenleriyle beraber sağladığı avantajlar ve yenilikler ile sunulmuştur.

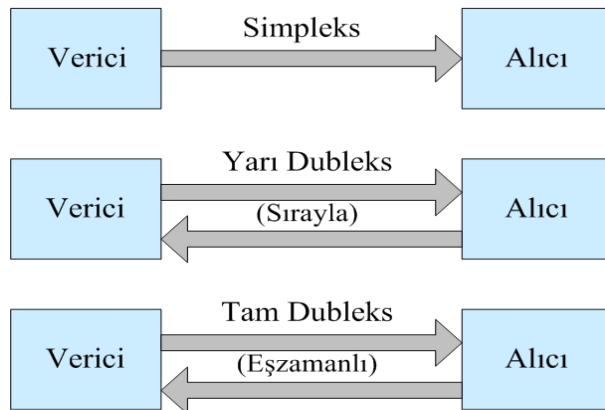
Son bölümde telsiz standardının gerçekleştirilmesi adımları işlenmiştir. Bu bölümde öncelikle gerçekleştirilen sistemin RF, IF ve temelband donanım bileşenleri tanıtılmıştır. Daha sonra kullanılan geliştirme ortamı ve yazılım dili hakkında bilgiler verilmiştir. Bölümün devamında verici ve alıcı bloklarının gerçekleştirilmesi adımları anlatılmıştır. Ayrıca verici ve alıcı bloklarının birlikte kontrol edilmesi amacıyla hazırlanan kullanıcı arayüzü tanıtılmıştır. Bölümün sonunda gerçekleştirilen APCO Proje-25 telsiz platformunun, ASELSAN firması tarafından üretilen 4700 serisi APCO Proje-25 el telsizi ile test amaçlı olarak karşılıklı çalıştırılması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu

testlerin sonucunda gerçeklenen verici ve alıcı temelband blokları ile IF ve RF alt bloklarının farklı çalışma şartlarında başarılı bir şekilde çalıştığı görölmüştür.

Bu tez çalışması ile öncelikle kamu güvenliği ve acil durum haberleşme sistemleri hakkında önemli bilgi birikimi edinilmiştir. Bununla birlikte yaygın olarak kullanılan açık mimarili APCO Proje-25 sayısal telsiz sisteminin en önemli arayüzü yazılım tabanlı enşrömanlar kullanılarak oluşturulan test telsiz platformu üzerinde gerçeklenmiştir. Ayrıca bu alanda ihtiyaca göre oluşturulabilecek yeni veya hibrit standartlar için bu test platformuna yine yazılım ile müdahale edilerek farklı yetenekler kazandırılabilceği görölmüş, hızlı ve ucuz gerçekleme imkânı sunan Yazılım Tabanlı Enşrömantasyon tekniğinin avantajları vurgulanmıştır.

2. TELSİZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Telsiz haberleşmesi, verici ve alıcı olarak iki haberleşme ucu arasındaki bilginin (ses veya veri) fiziksel bağlantı olmadan, taşıyıcı olarak elektromanyetik dalgalar kullanılarak iletilmesi şeklinde gerçekleşen haberleşme tekniğidir [1]. Verici iletilmek üzere bilgiyi belirli parametrelere göre işledikten sonra kanal olarak ifade edilen belirli bir frekanstan anten vasıtasıyla elektromanyetik dalga şeklinde gönderir. Alıcıda aynı kanaldan bu dalgaları yine anten vasıtasıyla alır, vericide yapılan işleme tekniklerinin tersini yaparak bilgiyi yeniden elde eder. Verici ve alıcı uç birimleri arasında arasındaki haberleşme tek yönlü olabileceği gibi iki yönlüde olabilir [2]. Verici ve alıcı arasında 3 çeşit haberleşme yöntemi vardır; Simpleks, Yarı Dupleks ve Tam Dupleks (Şekil 2.1). Verici ve alıcının tek frekans üzerinden haberleşmesi Simpleks Haberleşme olarak adlandırılır. Bu durumda iki uçtan biri bilgiyi gönderirken diğeri sadece alım yapmaktadır. İki uç alım ve gönderim için iki ayrı frekans kullanır ve biri bilgiyi gönderirken diğeri sadece alım yaparsa bu Yarı Dupleks Haberleşme olarak adlandırılır. Her iki uçta iki ayrı frekans kullanılarak alım ve gönderimi aynı anda (eşzamanlı) yapabiliyorsa bu haberleşmeye Tam Dupleks Haberleşme denir.



Şekil 2.1: Telsiz haberleşme yöntemleri.

2.1. Telsiz Sistemlerinin Kullanımı ve Gelişimi

Telsiz haberleşme sistemleri başta itfaiye, polis, acil yardım ve lojistik hizmetleri olmak üzere sosyal ve ticari hayatta yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemler yukarıda bahsedilen idari ve ticari kuruluşların kullanıcılarının yaratacak olduğu haberleşme trafiğini karşılamasının yanında şehir merkezlerinde, köylerde veya kırsalda kamu güvenliği kurumlarının sorumluluk alanına giren bütün bölgeleri tam olarak kaplamaktadır. Bu sistemler afet, yangın, terör olayları ve benzeri durumlarda en az zararla çalışmasını sürdürüp haberleşme ihtiyacını karşılayacak nitelik ve ölçüdedir. 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi, 11 Eylül 2001 NewYork Dünya Ticaret Merkezi'ne yapılan terör saldırısı, 26 Aralık 2004 Güney Asya Tsunami Felaketi ve bunların öncesinde veya sonrasında yaşanan olağanüstü durumlarda benzer olarak telsiz haberleşme sistemlerinin GSM (Global System for Mobile Communications) ve sabit hat olarak bilinen PSTN (Public Switched Telephone Network) gibi diğer haberleşme sistemlerine göre birçok açıdan üstünlüğü görülmüştür. Bu sebeple telsiz haberleşme sistemlerine olan talep sürekli olarak artmıştır. Şüphesiz ki bu artışta telsiz haberleşmesinin gezgin olmasının payı büyüktür. Bu artışa paralel olarak da telsiz haberleşmesince kullanılan frekans spektrumunun doluluk oranı artmakta ve sınırlı olan frekans kaynaklarını daha verimli kullanmayı sağlayacak çözümler beklenmektedir.

Telsiz haberleşme sistemleri, kullanıcılarından gelen kapasite, kapsama alanı ve hizmet kalitesi gibi beklentilerin yanında teknolojik gelişmelerle paralel olarak 1940'lı yılların sonlarındaki ilk kullanımından bugüne kadar önemli mesafe kat etmiştir. Bu gelişim sürecinde telsiz sistemlerinin ilk kullanıldığı zamandan 1980'li yılların sonuna kadar geliştirilen ve analog teknolojiye dayalı sistemlerin kullanıldığı telsizler, Analog (Birinci Nesil) Telsiz Sistemleri olarak adlandırılır [3]. 1990'lı yılların başından günümüze kadar sayısal teknolojiye dayalı sistemlerin kullanıldığı telsizler ise Sayısal (İkinci Nesil) Telsiz Sistemleri'ni oluşturmaktadır. Teknolojiye dayalı gelişimin yanında telsiz sistemleri kanal kullanım tekniklerine göre Konvansiyonel ve Trunk olarak ikiye ve kullanım özelliklerine göre de Özel Gezgin Telsiz (PMR) ve Ortak Kullanımlı Gezgin Telsiz (PAMR) olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.2. Konvansiyonel Telsiz Sistemleri

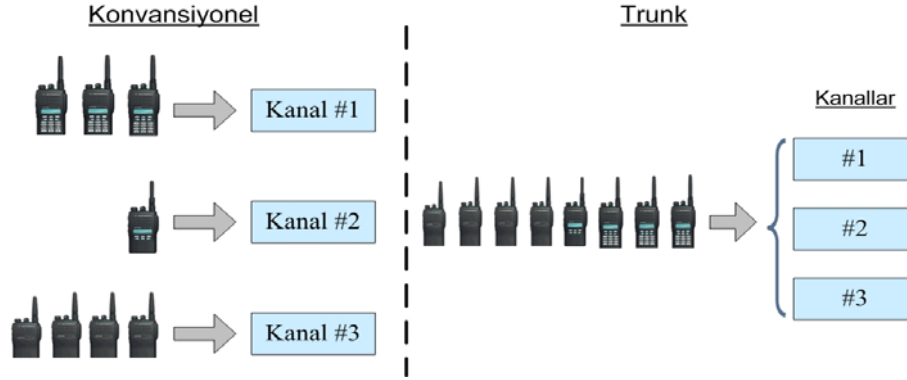
Konvansiyonel sistemlerde telsizler bir kanalda bekler ve bu kanalı kullanarak alım ve gönderim yaparlar [4]. Aynı kanaldan hem kontrol işaretlerinin gönderilimi hem de ses gönderilimi yapılmaktadır. Modem (modülatör/demodülatör) kullanılarak veri gönderilimi de yapılabilmektedir. Kullanılan haberleşme kanalı, bu kanalda bekleyen bütün telsizler tarafından izlenir ve bir telsizin başlattığı görüşme kanalda bekleyen tüm telsizler tarafından dinlenebilmektedir. Bu nedenle Konvansiyonel sistemler aralarında yoğun grup görüşmesi olan kullanıcı grupları için uygun sistemlerdir. Bununla birlikte Konvansiyonel sistemlerde telsizlere farklı ton kodları verilerek grup görüşmesinin yanında telsizler arasında birebir görüşme de yapılabilmektedir.

2.3. Trunk Telsiz Sistemleri

Trunk sistemlerde kanallardan bir tanesi kontrol kanalı olarak kullanılır ve merkezi kontrol sistemi ile telsizler arasında işaretleşme için kullanılır [2]. Diğer kanallar trafik kanalı olarak ses veya veri haberleşmesi için kullanılır. Trunk sistemlerde telsiz kullanıcıları görüşmek istedikleri telsiz kullanıcılarını ya da grubu merkezi kontrol sistemine bildirir. Kontrol kanalından gelen istekleri değerlendiren merkezi kontrol sistemi ses veya veri haberleşme isteğine boş olan trafik kanallarından birisini atar. Görüşme bitimine kadar kanal görüşme isteğinde bulunan telsiz ve görüşülmek istenen telsiz veya grup tarafından kullanılır. Kullanılan trafik kanalı görüşme bitimi sonunda boş trafik kanalı listesine dahil edilir ve yeni bir istek için kullanılabilir. Trunk sistemlerde, var olan trafik kanallarının tümü kullanımdayken gelen ses veya veri haberleşme istekleri sıraya konmaktadır. Trafik kanallarından biri boşaldığında, sırada bekleyen isteklerden birisi için kullanılır. Burada “ilk gelen ilk çıkar” mantığı kullanılmaktadır.

Konvansiyonel sistemlerden farklı olarak Trunk sistemleri yoğun grup görüşmeleri yerine birebir ya da az sayıda kullanıcıdan oluşan grup görüşmelerinin olduğu şartlarda daha verimli çalışmaktadır. Konvansiyonel sistemlerde kanallar birbirinden bağımsız kullanıcı grupları tarafından kullanıldığı için bir kanalda aşırı yoğunluk

varken başka bir kanal boş kalabilmektedir. Buna karşın Trunk sistemlerde kanal kullanım kapasitesi kullanıcılar arasında eşit oranda dağıtılarak kanal kullanım oranı ve frekans verimliliği artırılır. Şekil 2.2’de Konvansiyonel ve Trunk sistemlerin kanal kullanım teknikleri birlikte gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Konvansiyonel ve Trunk sistemlerin kanal kullanım teknikleri.

2.4. Özel Gezgin Telsiz

Özel Gezgin Telsiz (PMR) sistemlerinde kanallar farklı kullanıcı gruplarına özel olarak tahsis edilmiştir [2]. Kullanılan kanal dışarıya kapalı olan bu kullanıcı grubu tarafından yönetilmektedir. PMR sistemlerinde, kullanıcı grupları kendi aralarında simpleks, yarı dubleks veya tam dubleks haberleşme yapabilmektedir. PMR telsiz sistemi yönetiminde özel bir operatör kullanılmamaktadır. PMR kullanıcısı kendi kurduğu ve işlettiği telsiz sistemini yine kendi kullanıcı grubu içerisinde kullanır. Birbiriyle bağlantılı kullanıcı gruplarına hizmet veren PMR kullanımları da mevcuttur. PMR kullanıcı gruplarının başında kamu güvenliği kuruluşları ile diğer kamu kuruluşları yer almaktadır. Ülkemizde 146 MHz – 174 MHz, 410 MHz – 430 MHz, 430 MHz – 450 MHz ve 450 MHz – 470 MHz frekans bandları Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) tarafından PMR sistemleri için tanımlanmıştır.

2.5. Ortak Kullanımlı Gezgin Telsiz

Ortak Kullanımlı Gezgin Telsiz (PAMR) sistemlerinde kanallar birden fazla kullanıcı grubu tarafından ortak kullanılır. Sistem, altyapı sorumluluğunu da üstlenen özel bir

operatör tarafından yönetilmektedir. Özel operatörler, Ortak Kullanımlı Telsiz Hizmeti (OKTH) kapsamında BTK’ dan lisans alarak bu hizmeti vermektedir. OKTH ile çok sayıda kullanıcı bulunduğu bölge içerisinde aktarıcı (röle) yardımıyla grup haberleşmesi yapabilmektedir. Merkez kontrol birimi kullanılarak, birden fazla bölgede yer alan aktarıcılar birbirlerine bağlanabilir, bu şekilde kapsama alanı genişletilebilmektedir.

PAMR telsiz sistemleri genel olarak ticari amaçlı sistemlerdir. PAMR sistemlerinde genellikle küçük kullanıcı grupları bir araya gelip sistem kaynaklarını ortaklaşa kullanmaktadırlar. Kullanıcı grupları farklı tipte olabilir ve bu grupların ilişkili olması gerekmemektedir. Genellikle farklı tipteki gruplar arası haberleşme amaçlanmamaktadır. PAMR kullanıcıları, az sayıda telsizleri ve sınırlı ölçüde ihtiyaçları için altyapı maliyetini üstlenmek istemezler. Bu nedenle PAMR sistemlerini tercih ederler. PAMR sistemlerinin kullanımı için 380 MHz – 400 MHz, 410 MHz – 430 MHz, 430 MHz – 450 MHz ve 450 MHz – 470 MHz frekans bandları BTK tarafından tahsis edilmiştir.

2.6. Analog Telsiz Sistemleri

Analog Telsiz Sistemleri, analog sistem ve cihazlar kullanılarak tasarlanmış sistemlerdir [5]. Temel olarak ses iletim hizmeti vermek amacıyla geliştirilmiş ve 1990 yılların sonuna kadar yoğun olarak tercih edilmiştir. Analog sistemlerde mikrofondan alınan ses ile taşıyıcı elektromanyetik dalga sürekli modüle edilerek yollar. Eğer ses yerine veri yollanacak ise öncelikle modem kullanılarak sayısal bilgi (1 ve 0 şeklinde bit dizisi) analog forma çevrilir (1 ve 0 şeklinde analog ton). Alıcı tarafta da alınan analog formda veri tekrar modem kullanılarak sayısal forma çevrilir. Yaygın olarak kullanılmakta olan Analog Telsiz Sistemleri’ne örnek olarak Konvansiyonel Ortak Baz İstasyon (Common Base Station) sistemleri ve Geniş Alan Kaplama (Wide Area Covarege) sistemleri verilebilir. Analog Telsiz Sistemleri 1990’ların sonuna kadar modem gibi teknolojik çözümleri de kullanarak kullanıcılarına çeşitli hizmetler sunmuş olsalar da analog yapılarından dolayı spektrum verimliliği ve veri haberleşmesi konularında yeterli olamamışlardır.

2.7. Sayısal Telsiz Sistemleri

Sayısal Telsiz Sistemleri, telsiz haberleşmesi için kısıtlı kaynak olan frekans spektrumunun etkin kullanımı ve veri haberleşmesi ihtiyaçlarına cevap verebilmek amacıyla sayısal sistem ve teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilmiş sistemlerdir [5]. Sayısal teknolojiyle birlikte vericiden gönderilmeden önce veya alıcıdan alındıktan sonra sayısal forma dönüştürülen bilgi üzerinde sayısal yöntemler uygulanabilmektedir. Örneğin verimli bir ses sıkıştırma yöntemi ile iletilen sesin spektrum kullanım oranı düşürülerek spektrum verimliliği artırılabilir. Sayısal sistemlerde analog sistemlerden farklı olarak iletilen sinyalin üzerinde sürekli olan gürültü, eğer eşik seviyesini aşmıyorsa etkisiz olmaktadır. Ayrıca sayısal teknolojiyle birlikte ses haberleşmesinin yanında modeme ihtiyaç duyulmadan veri haberleşmesi de gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde kullanılmakta olan sayısal telsiz sistemlerine TETRA, TETRAPOL ve APCO Proje-25 örnek verilebilir.

2.7.1. TETRA sayısal telsiz standardı

TETRA (Karasal Trunk Telsiz), ETSI (Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü) tarafından geliştirilmiş açık mimarili sayısal trunk telsiz standardıdır. ETSI tarafından profesyonel telsiz kullanıcıları (PMR ve PAMR telsizler) için geliştirilmiş bir standart olan TETRA yaygın olarak, polis, itfaiye, ambulans ve sivil savunma gibi kamu güvenliğinden sorumlu kurumlar ile ticari olarak lojistik ve güvenlik hizmet veren işletmeler tarafından kullanılmaktadır [6]. TETRA telsiz sistemi bir operatör tarafından yönetilmektedir. Yukarıda belirtilen kullanıcı gruplarının taleplerine göre operatör bu grupları birbirine bağlayabilmekte veya gruplar arasında öncelik sırası belirleyebilmektedir. TETRA sisteminde 380 MHz – 400 MHz arası frekans bandı kamu güvenliği haberleşme sistemleri için (PMR), 410 MHz – 430 MHz (PAMR) arası ve 800 MHz bandı ticari uygulamalar için kullanılmaktadır.

TETRA açık mimarili bir standarttır. Burada belirtilen “açık mimari” ifadesi ile standardın geliştirilmesinde çok sayıda kurum, kuruluş ve firmanın katkı yaptığı belirtilmektedir. Bunun sayesinde tüm üreticiler birbirleriyle uyumlu ürünler

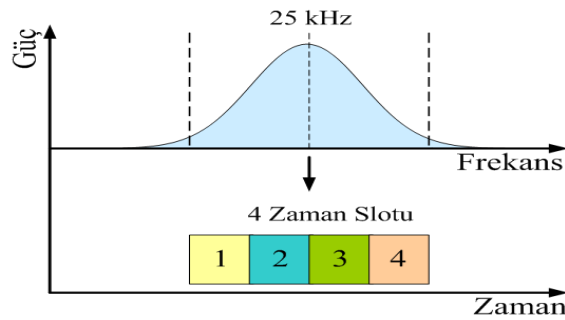
geliştirmekte ve üretilen ürünün kalitesi artmaktadır. Farklı kuruluşların açık standart üzerine geliştirdiği ve pazarladığı ürünler sayesinde kullanıcılar istedikleri ürünü en uygun fiyata alma olanağına sahiptir. Firmalar arasındaki rekabet hem ürünlerin geliştirilmesine hem de ucuzlamasına olanak sağlar. Ayrıca standardın geliştirme aşamasında farklı kullanıcı guruplarının katkı yapması ile telsiz sisteminin kullanımında ortaya çıkabilecek ihtiyaçlar standartla tanımlanabilmektedir. Bunların haricinde açık mimarili standart, sistemde sonradan yapılan geliştirmelerin, güncelleştirmelerin önceden alınan sisteme uygulanmasını sağlamak sureti ile son kullanıcıyı bir kez daha koruyan en etkin araçlardan biridir.

ETSI, bağımsız, kar amacı olmayan ve telekomünikasyon endüstrisi için standardizasyon çalışmaları yürüten bir kuruluştur. TETRA'da cep telefonlarının kullandığı gezgin haberleşmeyi sağlayan GSM standardı gibi ETSI tarafından geliştirilen bir standarttır. ETSI sabit haberleşme sistemleri, gezgin haberleşme sistemleri ve internet teknolojileri başta olmak üzere haberleşme ve bilgi teknolojileri için küresel olarak kabul gören standartlar üretmektedir. Avrupa Birliği (EU) tarafından ETSI, resmi olarak Avrupa Standartlar Organizasyonu (ESO) olarak tanınmaktadır. ETSI'nin aralarında Türkiye'nin de olduğu 62 ülkeden 700'den fazla üyesi bulunmaktadır. ETSI haricinde TETRA standardının geliştirilmesine TETRA sistemi üreticileri, uygulama geliştiricileri ve entegratör firmaların bir araya gelerek oluşturduğu TETRA-MOU (TETRA - Mutabakat Zaptı) kuruluşu çalışmaktadır. TETRA-MOU, düzenli aralıklarla yaptığı toplantılarla TETRA sisteminin kullanıcılardan ve firma temsilcilerinden gelen geri beslemelere göre standart üzerinde düzenlemeler ve iyileştirmeler yapmaktadır.

TETRA standardı ile ilgili ilk çalışmalar ETSI tarafından 1989'da MDTRS (Gezgin Sayısal Trunk Telsiz Sistemi) başlığı altında başlatılmıştır. 1990'ların başında çalışma gurubunun ismi TETRA olarak değiştirilmiştir. 1991 yılında standardın oluşturulmasına katılan üretici firmalar kullanılacak teknolojileri seçerek standardın oluşturulması çalışmalarını başlatmıştır. TETRA sisteminin ilk çekirdek standartları ETSI'de 1995 yılında ulusal oylamaya sunulmuş ve oylama sonucu yine aynı yıl içinde tüm Avrupa'da geçerli "Sayısal Trunk Telsiz Sistem Standardı" olarak

onaylanmıştır. 1997 yılında test dokümanları yayınlanmış ve ilk ürünler piyasaya çıkmaya başlamıştır.

TETRA sistemleri TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) kanal erişim tekniğini kullanmaktadır. TDMA erişim tekniği Trunk sistemine paralel olarak birebir görüşmelerin yoğun olduğu sistemlerde kullanılmaktadır. Sistemde 25 KHz'lik kanal aralığını zaman paylaşımı kullanan 4 bağımsız zaman slotu (kullanıcı kanalı) bulunmaktadır (Şekil 2.3). Her slot 14.167 ms uzunluğundadır. 1. slotu kullanan kullanıcı 14.167 ms iletim yaptıktan sonra durur ve sırayla diğer slotlara atanmış kullanıcılar 14.167 ms iletim yaparlar. 4. slottaki kullanıcı da iletimini tamamladıktan sonra tekrar 1. slottaki kullanıcı iletim yapar. 4 slottaki kullanıcı toplamda 56.668 ms'lik bir çerçeve oluşturur. Kanal yoğunluğunun fazla olduğu sistemlerde bu erişim tekniği ile frekans spektrumu oldukça verimli kullanılmaktadır. Sistemde her 4 slot için sadece 1 tane telsiz birimi kullanılır ve böylelikle sistemin maliyetinde de tasarruf sağlanmış olunur. Buna karşın kanal yoğun olmadığı, örneğin sistemin yalnızca bir slotunda kullanıcı olduğu durumda bile 4 slotluk çerçeve bilgisi gönderilmektedir. Buda sistemin yoğun olmadığı zamanlarda gereksiz güç tüketimine ve kanal kullanımına neden olmaktadır. Ayrıca kanal kullanım yönteminde Trunk mantığıyla çalışan TETRA sistemleri kanal trafiğini yönetmek için en az 1 tane kontrol kanalı kullanılmaktadır. Sistem için 1 kontrol kanalı yeterli gelmediği takdirde birden fazla kontrol kanalı kullanılmaktadır.

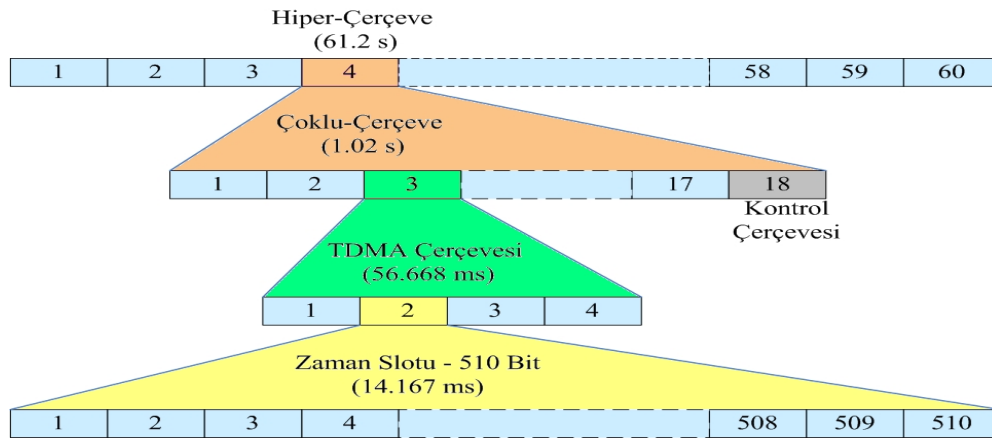


Şekil 2.3: TETRA sistemlerinde kullanılan TDMA erişim tekniği

TETRA sisteminde alma ve gönderme için farklı zaman slotları kullandığında tam dubleks haberleşme yapılabilmektedir. Kullanıcı birim 56.668 milisaniyelik çerçeve oluşturulurken 14.167 milisaniye gönderim yapar ve diğer slotlardaki kullanıcıların

işlemlerinin bitmesini beklerken gönderim slotundan farklı alım slotu kullandığında alıcı olarak çalışabilir. Böylelikle 56.668 milisaniyelik periyotlarla alım ve gönderim yaparak tam dubleks haberleşme yapabilir.

TETRA çerçeve yapısında her TDMA çerçevesi için 4 zaman slotu bulunmaktadır. Her slot 510-bit bilgi taşımaktadır. 18 TDMA çerçevesi bir araya getirilerek Çoklu-Çerçeve (Multi-Frame) yapısını oluşturur. 60 Çoklu-Çerçeve bir araya gelerek Hiper-Çerçeve (Hyper-Frame) yapısını oluşturur (Şekil 2.4). Çoklu-Çerçeve yapısında ses ve veri haberleşmesi yapılan 17 TDMA çerçevesinin trafik kontrol işaretleri 18. TDMA çerçevesinde toplanır ve böylece haberleşme slotlarında kesilme olmadan kontrol işlemleri bu çerçeve üzerinden yürütülür. Bu 18. çerçeve kontrol çerçevesidir ve SACCH'ın (Yavaş Birleşik Kontrol Kanalı) temelini oluşturur. SACCH arkaplanda kontrol kanalı sinyalleşmesini sürekli olarak yürütmektedir.



Şekil 2.4: TETRA standardı çerçeve yapısı

TETRA, iyi ses kalitesinin yanında bit hata oranı düşük veri iletimini amaçlayan tam sayısal standarttır. TETRA sisteminde ses, 8 kbit/s ile örneklenir ve ACELP (Doğrusal Hareketli Cebirsel Kod Tahmini) tekniğini kullanan vocoder (voice encoder / decoder - ses kodlayıcısı / kod çözücüsü) tarafından sıkıştırılarak 4.567 kbit/s'lik veri akışı elde edilir. Elde edilen veri iletim kanalının neden olacağı hatalara karşı iletimden önce kodlanmalıdır. TETRA sistemi farklı iletim oranlarında ve farklı hata koruma seviyelerinde ses iletimini, devre anahtarlama ve paket anahtarlama veri iletimini desteklemektedir.

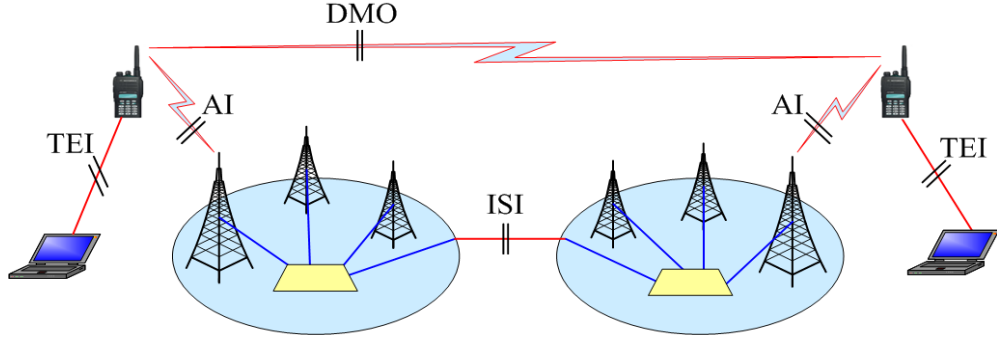
TETRA sisteminde slot başına veri hızı brüt olarak 9 kbit/s, net olarak ise 7.2 kbit/s'dir. 7.2 kbit/s'lik net veri hızı korumasız veridir ve uzak mesafelerle haberleşmek için uygun değildir. Bu nedenle veri iletilmeden önce kanaldaki bozucu etkilere karşı hata kodlaması yapılarak korunmaktadır. Hata kodlaması ile iletilen veriye hata bitleri eklenir ve kanaldaki belirli bir seviyeye kadar olan bozulmalar bu hata kodlaması ile alıcı tarafta düzeltilebilir. TETRA'da normal ve yüksek olmak üzere iki farklı koruma modu vardır. Normal koruma modunda slot başına net 4.8 kbit/s veri aktarılabilirken yüksek koruma modunda slot başına net 2.4 kbit/s veri hızı elde edilebilir.

TETRA sisteminde zaman slotları ses veya veri aktarımı için farklı kullanıcılar tarafından kullanıldığı gibi birleştirilerek tek bir kullanıcı tarafından da kullanılabilir. Böylelikle tek kullanıcı için daha yüksek iletim hızlarına ulaşılmaktadır. Örneğin Çoklu-Çerçeve yapısının kullanıldığı bir sistemde TDMA çerçevelerinin birindeki 1 zaman slotu ortak bir kontrol kanalı olarak kullanılırsa diğer TDMA çerçevelerindeki 4 slot istenildiğinde birleştirilerek kullanılarak her kullanıcı için toplamda $4 \times 7.2 = 28.8$ kbit/s (korumasız), $4 \times 4.8 = 19.2$ kbit/s (normal koruma) veya $4 \times 2.4 = 9.6$ kbit/s (yüksek koruma) veri hızlarına ulaşılabilir.

TETRA sistemi sayısal modülasyon olarak faz kaydırmalı anahtarlama tekniği olan $\pi/4$ DQPSK (Diferansiyel Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama) kullanmaktadır. Sembol hızı (baud) 18 ksembol/s'dir. Her sembol 2-bit bilgi taşıdığı için toplam hız brüt 36 kbit/s olur. $\pi/4$ DQPSK modülasyon tekniğinde filtreleme yapılmadığında modüle edilmiş işaret daha geniş bir frekans spektrumuna yayılmaktadır. TETRA sisteminde 25 kHz kanal genişliği olduğu için komşu kanallar arası bozucu etkiler olabilmektedir. Bu etkilerin iyileştirilmesi amacı ile darbe şekillendirici filtre (pulse shaping filter) kullanılmaktadır. Bu filtreler kullanılıncaya da taşıyıcı işaretin genliği modüle olmakta ve genlik modüleli bu işaretin kayıpsız taşınması için ise doğrusal yükselteç (linear amplifier) kullanılmaktadır. Doğrusal yükselteçlerin ise verimi düşük ve geliştirme maliyeti yüksektir.

TETRA açık mimarili bir standart olduğu için bu standarda göre cihaz üreten farklı üreticilerin cihazlarının birbiri ile uyumlu çalışması gerekmektedir. Bu

gereksinimleri karşılamak üzere TETRA standardı sistem arayüzleri tanımlamıştır. Şekil 2.5'te TETRA standardıyla tanımlanan temel sistem arayüzleri verilmiştir. Bu temel arayüzler aşağıda kısaca tanıtılmıştır;



Şekil 2.5: TETRA standardıyla tanımlanan temel sistem arayüzleri

Hava Arayüzü (AI): Farklı üreticilerin ürettiği terminal ekipmanlarının birlikte çalışabilmesini sağlayan standart arayüzdür.

Terminal Ekipmanları Arayüzü (TEI): Gezgin veri uygulamalarının bağımsız geliştirilmesini kolaylaştıran arayüzdür.

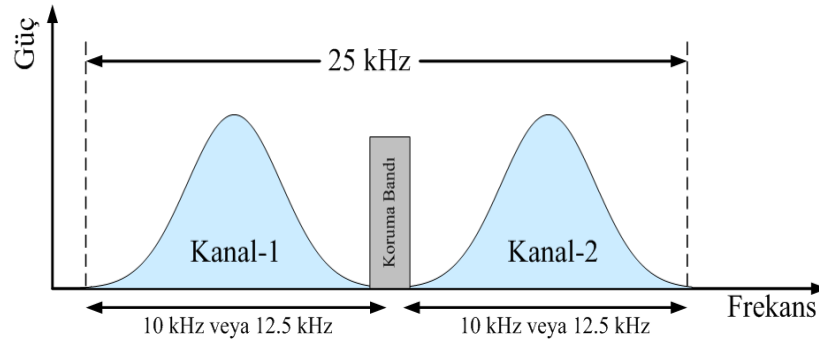
Sistemler Arası Arayüz (ISI): Farklı üreticilere ait TETRA cihazları arasındaki haberleşme için oluşturulmuş arayüzdür.

Direkt Mod Operasyonu (DMO): Kapsama alanı dışındaki terminallerin arasındaki haberleşmeyi tanımlayan arayüzdür.

2.7.2. TETRAPOL sayısal telsiz standardı

TETRAPOL (Karasal Trunk Telsiz Yönetimi), Fransız EADS Telecom firması tarafından (eski adıyla MATRA) PMR telsizler için başta kamu güvenliği ve ulaştırma birimlerince kullanılmak üzere geliştirilmiş sayısal trunk telsiz standardıdır [7]. TETRAPOL standardının ilk kullanıcılarından biri Fransız Ulusal Jandarma (French National Gendarmerie) kurumudur. 1988 yılında bu kurumun sahip olduğu dünyanın en büyük PMR şebekesi olan RUBIS sisteminde TETRAPOL standardı seçilerek operasyonel olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bugün ise dünya genelinde aralarında ulusal şebekelerinde dahil olduğu 90'nın üzerinde TETRAPOL sistemi kullanılmaktadır.

TETRAPOL sistemleri 70 MHz'den 933 MHz'e kadar geniş bir aralıkta tam sayısal ses ve veri iletimi için kullanılabilir. Bu geniş aralıkta kullanılan TETRAPOL sistemleri spektrum verimliliği için FDMA (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) kanal erişim tekniğini kullanmaktadır. FDMA tekniği spektrumu, frekans tanım bölgesinde birbirinden bağımsız frekans bölümlerine ayırır. Bu bölümler haberleşme birimlerden gelecek talebe göre kendilerine atanmaktadır. FDMA tekniği ile her TETRAPOL kanalı 12,5 kHz (İsviçre'de kullanılır) veya 10 kHz'lik iki alt kanala bölünmektedir (Şekil 2.6). Komşu kanallar arası bozucu etkileri önlemek için koruma bandı kullanılır. Böylelikle 25 kHz'lik bir telsiz kanalında iki tane ses kanalı kullanılabilir.



Şekil 2.6: TETRAPOL sistemlerinde kullanılan FDMA erişim tekniği

TETRAPOL sistemi modülasyon tekniğinde GSM standardına benzer olarak GMSK (Gauss Minimum Kaydırmalı Anahtarlama) kullanmaktadır. GMSK, bant genişliğini optimize eden bir ikili (binary) iletişim tekniğidir. TETRAPOL'de kullanılan GMSK modülasyonun normalize edilmiş zaman-frekans çarpımı değeri (BT) 0.3'dür. Burada B , gauss filtresinin bandgenişliğidir. T ise sayısal verinin bit periyodudur. Genel olarak kullanılan BT değerleri 0.5 ve 0.3'dür. BT çarpımı yüksek değerde ise semboller arası girişim (ISI) azdır fakat veri hızı da düşük olur. Eğer İşaret/Gürültü Oranı (SNR) yüksek bir kanal kullanılıyorsa yüksek veri hızları elde etmek için BT değeri düşük seçilebilir.

TETRAPOL ses kodlayıcısında gürültüye karşı dayanıklı RPELP (Doğrusal Hareketli Düzenli Darbe Kod Tahmini) tekniği kullanılmaktadır. Bu tekniğe göre 20 ms'lik ses çerçevesi 6 kbit/s ile kodlanmaktadır. Katlamalı (convolutional) kodlama

veya BCH (Bose Chaudhuri Hocquenghem) kodlama, serpiştirme (interleaving) ve hata düzeltme (error correction) yöntemleri kanalda iletilen bilgiyi korumak için uygulanmaktadır. Mantıksal kanallar kontrol, trafik ve veri kanallarına bölünmüştür. Trafik ihtiyacına göre bu kanallar genişletilebilir. Devre modunda bir kanal korumasız olarak 7.6 kbit/s, korumalı olarak 4.8 kbit/s'lik hızlarında veri taşıyabilir.

TETRAPOL açık arayüzleri, Publicly Available Specifications (Genel Açık Özellikler) dokümanında tanımlanmış ve açıklanmıştır. Bu dokümanı kullanarak üretim yapan üreticilerin ürünleri TETRAPOL şebekeleri ile tam uyumlu olacaktır. Bu doküman TETRAPOL Forum'un teknik komitesi tarafından yönetilmektedir. Dokümanda arayüzler için numaralandırılan 21 referans nokta vardır. Burada Dağıtım Arayüzleri (Dispatch Interfaces), Anahtar Yönetim Merkezi Arayüzü (Key Management Centre Interface), Şebeke Yönetim Merkezi Arayüzü (Network Management Centre Interface) ve diğer arayüzler tanımlanmıştır. Alt sistem modülleri kullanılan şebekenin genişliğine göre değişmektedir. Buna bağlı olarak TETRAPOL'un kaplama alanı bir hücre, bir ilçe, bir bölge ya da bir ülke bile olabilmektedir.

Sistemler Arası Arayüz (Inter System Interface) farklı şebekeler arasında dolaşımı (roaming) sağlamaktadır. Publicly Available Specifications üç farklı mod içermektedir; Şebeke Modu (Network Mode), Direkt Mod (Direct Mode) ve Tekrarlayıcı Mod (Repeater Mode). Şebeke Modu, gezgin terminal altyapının kapsama ve kontrolü altındayken kurulur. Şebeke Modu bir çalışma trunk modu ve açık kanal modu içermektedir. Direkt Mod, gezgin terminal başka bir terminal ile direkt haberleşirken kurulur. Tekrarlayıcı Modu, gezgin terminal başka bir terminal ile tekrarlayıcı aracılığıyla haberleşirken kurulur.

3. APCO PROJE–25 SAYISAL TELSİZ HABERLEŞME STANDARTI

APCO Proje–25, APCO (Uluslararası Kamu Güvenliği Telsiz Operatörleri Birliği) tarafından 1989 yılında başta Kamu Güvenliği olmak üzere iç güvenlik, acil durum yardım/destek ve teknolojik altyapı yönetimindeki ihtiyaçları karşılamak için analog telsizlerin çalışma bandını da kapsayacak ve karşılıklı konuşabilecek şekilde geliştirilmeye başlanan açık mimarili sayısal telsiz haberleşme standardıdır [8].

APCO 1935 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulmuş, dünya genelinde kamu güvenliği haberleşme sistemleri üzerine çalışan 15.000'den fazla üyesi olan ve bu üyelerinden gelen standart geliştirilmesi ile ilgili teklifleri değerlendiren organizasyondur [9]. Proje–25 standardının geliştirme çalışmalarına APCO ile birlikte kullanıcı ihtiyaçlarının belirlenmesi ve standart seçiminde NASTD (Ulusal Devlet Telekomünikasyon Yöneticileri Birliği) ve federal kurumlar, ayrıca standartların geliştirilmesi ve onaylanmasında TIA (Telekomünikasyon Endüstrisi Birliği), yayınlanmasında ANSI (Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü) katkı sunmaktadır.

Proje–25 standardı, yerel, bölgesel veya ulusal kamu güvenliği kurum ve kuruluşların kullandığı sayısal Karasal Gezgin Telsiz (LMR) servislerini de içermektedir [8]. Proje–25, TETRA gibi açık mimarilidir ve kendisiyle uyumlu telsiz sistemlerinin arayüzlerini, çalışmasını ve yeteneklerini tanımlamaktadır. Bu tanımlamalara uyan sistemlerin Proje–25 uyumlu olarak çalışacağını garanti eder. Bunun haricinde Proje–25 uyumlu cihazlar çalışma frekansları ve kanal aralıkları mevcut analog sistemlerin frekanslarını kapsadığı için yeni bir düzenlemeye gerek kalmadan mevcut analog telsizlerle uyumlu çalışabilmektedir. Ayrıca Proje–25, Trunk ve Konvansiyonel telsiz sistemlerinin ikisini de desteklemektedir.

3.1. APCO Proje-25 Tarihçesi

Kamu güvenliğinde kullanılan telsizler geçtiğimiz yirmi yılda analog teknolojiden sayısal teknolojiye geçmişlerdir. Bu geçişin başlıca sebeplerini analog teknolojiden kaynaklanan bazı kısıtlamalar oluşturmaktadır. Ayrıca kablosuz iletişim teknolojisindeki yenilikler de kamu güvenliği haberleşme sistemlerinin kritik uygulamalarına adapte edilmeye başlanmıştır. Bu sebeple 1970’li yılların sonunda, yeni tahsis edilen 800 MHz frekans bandında Kamu Güvenliği telsiz haberleşmesinin fonksiyonel özelliklerinin tanımlandığı Proje-16 (Project-16) standardı APCO tarafından kamu güvenliği trunk sistemleri için hazırlanmıştır [9].

Değişen haberleşme protokolleri ve kamu güvenliği frekansları, Proje-16’nın müşterek çalışma (interoperability) ve kamu güvenliği kuruluşları tarafından yaygın olarak kabul görme gibi üstünlüklerini geriletmiştir. Bununla birlikte geçen yıllarda yaşanan afetler, kamu güvenliği kuruluşlarının önceliklerini ve ihtiyaçlarını gözden geçirmelerini ve yeniden tanımlamalarını sağlamıştır. 1988 yılında FCC (Federal Haberleşme Komisyonu) artan kamu güvenliği sayısal haberleşme sistemleri ihtiyaçlarını karşılamak için bir çalışma başlattı. Bu çalışmayla haberleşme sistemleri kullanıcıları ve üreticilerinin görüşleri ve önerileri toplandı. Bu görüşlere dayanarak Ekim 1989’da APCO Proje-25 çalışması APCO, NASTD, NTIA (Ulusal Telekomünikasyon ve Bilgi Yönetimi), NCS (Ulusal Haberleşme Sistemi), NSA (Ulusal Güvenlik Ajansı) ve US DoD’in (Birleşik Devletler Savunma Bakanlığı) beraberliğinde kamu güvenliği yönetim ihtiyaçlarını karşılamak için başlatıldı. Ayrıca yukarıda verilen kurumların yanı sıra FPIC (Müşterek Haberleşme için Federal Ortaklık), DHS-CG (İç Güvenlik Birimi - Sahil Güvenlik), NIST (Ticaret Bakanlığı Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü) ve OLES (Yasa Uygulama Standartları Dairesi) gibi kurumlarında temsilcilerinin katılımıyla Proje-25’in önceliklerini belirlemek ve teknik geliştirme kapsamına karar vermek için yürütme kurulu oluşturuldu.

Ocak 1993’e gelince APCO Proje-25, sistem mimarisi için önerilen 6 arayüz standardını benimseyerek Amerika Birleşik Devletleri’nde kamu güvenliği pazarındaki sayısal teknolojilerin geleceğini belirledi. Bu arayüzlerden ilki ve kritik

önemli olanı Genel Hava Arayüzü'dür (CAI). CAI, temel telsiz-telsiz sayısal müşterek çalışma ve uyumluluk standartlarını tanımladı. Kasım 1993'de APCO Proje-25 yürütme kurulu TIA'nın önerdiği CAI standart dokümanını kabul etti. Bu dokümanda;

- FDMA Kanal Erişim Yöntemi
- CQPSK Modülasyonu
- 9.6 kbit/s Veri Oranı
- 12.5 kHz Kanal Aralığı ve DVSI (Digital Voice Systems Inc.) Temelli Ses Kodlayıcı

olarak tanımlanmıştır. 90'lı yılların ortasına gelince farklı üreticilerin ürettiği ve müşterek çalışabilen APCO Proje-25 uyumlu gezgin ve taşınabilir ekipmanlar kullanılmaya başlanmıştır.

3.2. APCO Proje-25 Fazları

APCO Proje-25 standardı, geriye uyumluluğu da sağlayarak (analog telsizlerle) ilerlemesini 3 fazla sürdürmüştür [10]. Faz-I, Faz-II ve Faz-III sırasıyla geliştirilen bu fazlara ilişkin temel bilgiler aşağıda verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sistem Faz-I ve Faz-II uyumludur. Bu standartlara ilişkin bilgiler ayrıntılı olarak ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

3.2.1 Faz-I

Faz-I, APCO Proje-25 uyumlu sistemler için gereken servisleri ve hizmetleri tanımlayan, hepsi tamamlanmış 33 standart dokümandan oluşmaktadır [10]. Böylelikle üreticiden bağımsız olacak şekilde kullanıcıların standartla tanımlanan servisleri kullanması sağlamaktadır. Standart, tanımlanan servisleri farklı sistemlerden kullanıcıların erişimine de açmaktadır. Ayrıca farklı üreticilerin RF alt sistemlerinin birbiri ile iletişimini kolaylaştırmak için Faz-I standardı açık arayüz tanımlamaktadır. Faz-I standardında telsizler 12.5 kHz kanal aralığında, C4FM (Sürekli 4-Seviyeli FM) doğrusal olmayan modülasyon tekniği kullanarak analog,

sayısal ya da karışık modda çalışmaktadır. Sayısal modda 4800 sembol/s veri iletim hızı ve her sembol 2-bit olduğu için iletilen kanalda toplam 9600 bit/saniye'lik hıza ulaşılmaktadır.

3.2.2 Faz-II

Faz-I ve Faz-II arasındaki en önemli fark modülasyon planıdır. Faz-II, geriye uyumluluğu da sağlayarak frekans spektrumunun daha verimli kullanılması amacıyla geliştirilme çalışmaları devam eden standarttır [10]. Standart, kanal erişim tekniği FDMA veya TDMA olacak şekilde 2 alternatif içermektedir. FDMA çözümünde, kanal kullanım aralığı CQPSK (Uyumlu Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama) modülasyon tekniği kullanılarak 6.25 kHz'e taşınmıştır. C4FM için tasarlanan alıcılar, CQPSK gibi faz kaydırma tekniğini kullanan tüm vericilerle uyumludur. Bu çözümle Faz-I ve Faz-II arası uyum sorunu olmamaktadır. Fakat günümüzde 6.25 kHz'lik kanal aralığına ulaşmada teknolojik sınırlamalar ve bunun getirdiği yüksek maliyetler mevcuttur. Bunun için alternatif olarak kullanıcı yoğunluğunu fazla olduğu bölgelerdeki spektrum verimliliği de düşünülerek 6.25 kHz kanal yeterliliğini sağlayan TDMA tabanlı çözümler önerilmiştir. Bu çözümlerden 25 KHz kanal aralığında 4 slot ve 12.5 kHz kanal aralığında 2 slot çalışma önerileri APCO Proje–25 yürütme kurulu tarafından 19 Kasım 1999 tarafına kabul edilerek Faz-II standardı geliştirme çalışmalarına dahil edilmiştir.

3.2.3 Faz-III

Faz-III ile ilgili çalışmalar APCO Proje–25 standart kurulu tarafından kamu güvenliği yüksek veri hızı ihtiyacını karşılamak için 1998 yılında Proje–34 başlığı altında başlatılmıştır [10]. Bu çalışmalar kapsamında, ses, video ve yüksek hızlı verinin geniş alanda taşınabileceği, farklı kuruluşların şebekelerinin dahil olduğu yeni bir hava ve karasal kablosuz sayısal genişbandlı kamu güvenliği telsiz standardı tanımlanmaktadır. 1 Haziran 1999 yılında bu standart ile ilgili ihtiyaçların tanımlandığı doküman yayınlanmıştır. 2000 yılı Mayıs ayına gelince ETSI ile TIA arasında PSPP (Kamu Güvenliği Ortaklık Projesi) sözleşmesi imzalanmıştır. Bu

sözleşme sonrasında ETSI ve TIA, Proje-34 ile ilgili çalışmaları Proje MESA (Acil Durum ve Güvenlik için Genişband Gezinlik) başlığı altında birlikte yürütmektedir.

3.3. APCO Proje-25 Sisteminin Genel Çalışma Mantığı

APCO Proje-25 telsizler konvansiyonel analog FM telsizlere benzer şekilde çalışmaktadır [8]. Aslında Proje-25 telsizler konvansiyonel analog modda çalışarak geriye uyumlu olarak mevcut analog sistemlerle karşılıklı çalışabilmektedir. Sayısal modda ise taşıyıcı, 4 farklı ikili bit kombinasyonunu temsil eden 4 özel frekans bileşenine denk düşmektedir. Bu da analog sistemlerde kullanılan 4 seviyeli FSK'nin (Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) değiştirilmiş bir şeklidir. Analog modda Proje-25 telsizler, konvansiyonel analog sistemlerle benzer yeteneklere sahiptir [10]. CTCSS (Alt İşitilebilir Ton Kontrollü Susturma Sistemi), DCS (Sayısal Kodlu Susturma), ön-vurgu (pre-emphasis), ters-vurgu (de-emphasis) genişband, darband ve diğer standart analog özellikler Proje-25 telsizlerde de bulunmaktadır.

Proje-25 verici, sayısal modda iken IMBE (Gelişmiş Çok-Bandlı Uyarma) ses kodlayıcısını kullanarak analog sesin tamamını sayısal bilgi paketlerine çevirir [10]. Alıcıda ise kodlanmış bu bilgi paketleri tekrar analog sese çevrilir. Diğer sayısal bilgiler gibi hata düzeltme kodları da sayısal ses bilgisine eklenir. Analog CTCSS ve DCS özelliklerin yerini Proje-25'de NAC (Şebeke Erişim Kodu) almaktadır. Ayrıca ses bilgisine koruma amaçlı şifreleme bilgisi eklenebilir. Proje-25 standardı, AES (Advanced Encryption Standart) algoritması, DES (Data Encryption Standart) algoritması ve diğer şifreleme algoritmalarını kullanımını tanımlamaktadır. Ayrıca ek bir özellik olarak OTAR (Havadan Tekrar Anahtar Yenileme) ile telsizler şebekeyi kullanarak şifreleme anahtarlarını güncelleyebilmektedir.

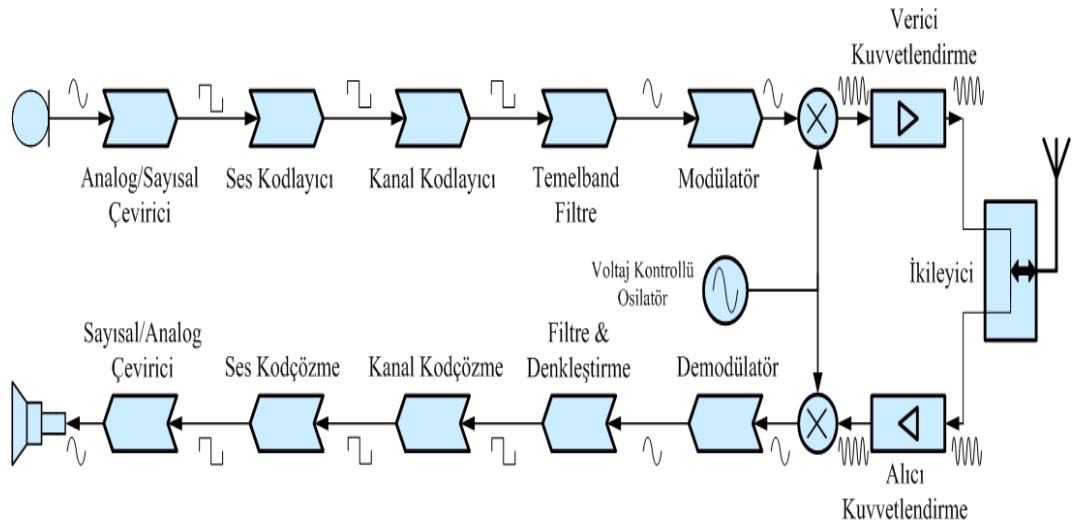
Proje-25 sistemler CAI'yi kullanmaktadır [11]. Bu arayüz standardı Proje-25 uyumlu telsizlerin ilettiği işaretin tipini ve içeriğini tanımlamaktadır. Üreticiden bağımsız olarak bir Proje-25 telsiz CAI'yi kullanarak herhangi bir Proje-25 telsiz ile haberleşebilmektedir. Bugün 12.5 kHz kullanan Faz-I telsizlerle 25 kHz'lik kanalda 2 farklı görüşme yapılabileceği gibi, 6.25 kHz kullanan Faz-II telsizlerle bu sayı 4'e çıkmaktadır. Proje-25 telsizler analog modda 25 kHz veya 12.5 kHz kanal

aralıklarına çalışabilmelidir. Bu geriye uyumluluk Proje-25 kullanıcılarının eski analog sistemlerden sayısal sistemlere geçişini kolaylaştırmaktadır.

Proje-25’de kanallar 9600 bit/saniye hızda çalışarak ses veya veri taşıyabilir. Bu ses veya veri kanallarının önemli kısmını ileri hata düzeltme bitleri kaplamaktadır. İleri hata düzeltme ile alıcı kötü iletim koşullarında çalışmasını sürdürebilmekte ve kullanılabilir aralığı arttırmaktadır. LSD (Düşük Hızlı Veri) kullanılarak veri iletimi ses ile birlikte olabileceği gibi kanalın tamamını kapsayacak şekilde de olabilen birçok farklı modda yapılabilmektedir.

3.4. APCO Proje-25 Sistem Mimarisi

APCO Proje-25 Sistem Mimarisi Şekil 3.1’de verilmiştir. Sayısal işaretleri için alıcı ve verici bloklarının birlikte verildiği bu mimaride sayısal teknolojinin temel elemanları kullanılmıştır. APCO Proje-25 Sistem Mimarisi 3 ana başlıkta tanımlanabilir;



Şekil 3.1: APCO Proje-25 Sistem Mimarisi

Analog / Sayısal, Sayısal / Analog Çevrim ve Ses Kodlama / Kod Çözme:

Proje-25 ses kodlama için özel bir yöntem olan IMBE metodunu kullanmaktadır. DVSI firması tarafından geliştirilen IMBE ses kodlayıcı aldığı işareti eğer ses ile ilgili karakteristik özellikleri taşıyorsa iletmektedir [12]. Alıcı bu temel karakteristik

özellikleri kullanarak giriş sesinin yapay eşdeğerini üretir. IMBE yoğun olarak insan konuşması için optimize edilmiştir. Bu sebeple insan sesi haricindeki seslerin yeniden üretilmesinde çok iyi performans sağlamamaktadır. IMBE ses kodlayıcı mikrofondan girişinden örnekleme ile her 20 milisaniye için 88-bit kodlanmış konuşma bilgisi üretir. Böylelikle üretilen konuşma karakteristiğinin oranı 4400 bit/saniye olmaktadır.

Kanal Kodlama / Kod Çözme:

Kanal Kodlama, sayısal RF sistemlerinde hata düzeltme ve veri koruma amaçlı olarak kullanılan bir metoddur. Bu teknikle verinin (ses veya kontrol) alıcı tarafta doğru şekilde elde edilmesi garanti edilir. Hata düzeltme ve veri koruma, gürültü (noise), bayılma (fading) ve karışım (interference) gibi kanalda olabilecek bozucu etkilerin sistemin performansına olan etkisini azaltmak için tasarlanmıştır. Proje-25’de kanal kodlama, serpiştirme (interleaving) ve doğrusal blok kodlardan (Hamming kodları, Golay kodları, Reed-Solomon kodları, BCH kodları ve Shortened Cyclic kodları) oluşmaktadır [11].

Serpiştirme, bayılma etkisinde oluşacak toplu bit hatalarının sistemin performansını düşürmemesi için kullanılan bir yöntemdir. Serpiştirme ile kod sözcüklerinin bitleri, bit dizisi içinde CAI referansında tanımlanan çizelgeye göre dağıtılır [11]. Ters serpiştirme işleminde de aynı çizelge kullanılarak alıcı tarafta bit dizisi serpiştirme öncesindeki duruma getirilir. Serpiştirme ile haberleşme kanalında olabilecek toplu bit hatalarının bir bölgede yoğunlaşması engellenir. Böylelikle hatalı bit ihtimalleri tüm bölgelere yayılarak sistemin performansı artırılır.

Blok kodlamada, k -bit uzunluktaki veri bloğuna (dataword) r -bit artıklık biti eklenir ve $n = k + r$ bit uzunluğunda kod bloğu (codeword) oluşturulur. Blok kodun hata düzeltme yeteneği ise kodun en küçük mesafesine (Hamming uzaklığı olarak da bilinir) bağlıdır. En küçük mesafe (d_{min}), kod içerisinde iki farklı kod bloğunda aynı sıradaki farklı bit sayısı toplamıdır. Örneğin 0010 ve 1100 kod bloklarının en küçük mesafesi $d_{min} = 3$ ’tür. Kodun hata düzeltme yeteneği (t), kod bloğunda düzeltilmesi garanti edilen en yüksek hata sayısıdır ve değeri, $t = (d_{min} - 1) / 2$ ’dir. Blok kodlamada her veri bloğundan ayrı ayrı kod blokları oluşturulur. Blok kodlar, sabit

uzunluklu vektör olan kod bloklarından oluşmaktadır. Doğrusal birleşimi yine kod bloğu olan iki kod bloğunun oluşturduğu blok kodlara doğrusal blok kodlar denir. Doğrusal blok kodlar genel olarak (n, k, d_{min}) şeklinde 3 parametreyle birlikte ifade edilirler.

Modülasyon / Demodülasyon ve Filtreleme:

Faz-I’de, C4FM modülasyonlu sayısal bilgi iletim için 12.5 kHz’lik bir kanal kullanır. C4FM modülasyon diferansiyel QPSK modülasyonunun bir çeşididir [11]. Bu modülasyonda her sembol bir öncekine göre taşıyıcı işaretin fazında 45° kaydırma yapmaktadır. Taşıyıcı işaretin fazı modüle edilirken genliği sabit tutulur ve sabit zarflı frekans modüleli dalga şekli elde edilir. Faz-II’de CQPSK modülasyonlu sayısal bilgi iletim için 6.25 kHz’lik bir kanal kullanır. CQPSK modülasyonunda taşıyıcının fazı ve genliği eş zamanlı modüle edilerek spektrum yayılma genişliği minimuma çekilir ve genlik modüleli dalga şekli elde edilir. Modülasyonla her sembolün 2-bit bilgi taşıdığı 4800 sembol/s’lik işaret yolların. Sembol ve bitlerin eşleşimi Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: CQPSK faz değişikliği ve C4FM sapma için ikili bit sembol eşleme.

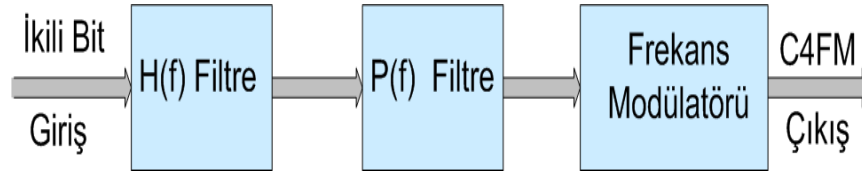
Bilgi Bitleri	Sembol	CQPSK Faz Değişikliği	C4FM Sapma
01	+3	+135 derece	+1.80 kHz
00	+1	+45 derece	+0.60 kHz
10	-1	-45 derece	-0.60 kHz
11	-3	-135 derece	-1.80 kHz

Modülasyon sembolleri Nyquist kriterine göre semboller arası girişimi minimum değere çekmek için Yükseltilmiş Kosinüs Filtresi (Raised Cosine Filter) ile filtrelenirler. Filtrenin girişindeki dürtü (impulse) serisi Tablo 3.1’deki değerlere göre ölçeklenmiş ve zamanda 208.33 milisaniye aralıklara ayrılmıştır (1/4800 saniye). Filtrenin grup gecikmesi $|f| < 2880$ Hz geçirme bandı için yatay seviyedir. Filtre genlik cevabı Eşitlik 3.1’e göre yaklaşık olarak verilir.

f : frekans (Hertz)

$$\begin{aligned}
 |H\{f\}| &= \text{Nyquist Yükseltilmiş Kosinüs Filtre'nin genlik cevabı} \\
 |H\{f\}| &= 1 \quad \{ |f| < 1920 \text{ Hz için} \} \\
 |H\{f\}| &= 0.5 + 0.5 \cos(2\pi f/1920) \quad \{ 1920 \text{ Hz} < |f| < 2880 \text{ Hz için} \} \\
 |H\{f\}| &= 0 \quad \{ |f| > 2880 \text{ Hz için} \}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

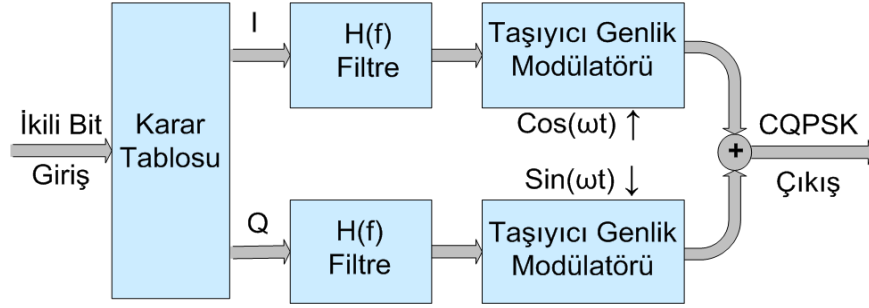
C4FM modülatör (Şekil 3.2), Nyquist Yükseltilmiş Kosinüs Filtresi, Şekillendirici Filtre ve Frekans Modülatörü'nün kaskat bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Şekillendirici Filtre'nin de grup gecikmesi $|f| < 2880$ Hz geçirme bandı için yatay seviyedir. Genlik cevabı ise Eşitlik 3.2'de yaklaşık olarak verilmiştir.



Şekil 3.2: C4FM modülatör yapısı.

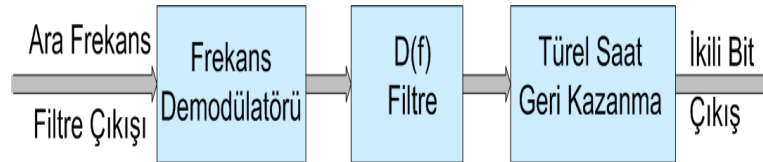
$$\begin{aligned}
 |P\{f\}| &= \text{Şekillendirici Filtre'nin genlik cevabı} \\
 |P\{f\}| &= (\pi f / 4800) / \sin(\pi f / 4800) \quad \{ |f| < 2880 \text{ Hz için} \}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

CQPSK, iki taşıyıcının faz ve dik faz (I ve Q) genlik modülatörleriyle modüle edildiği modülatör yapısıdır (Şekil 3.3). I ve Q modülatörler bilgi bitlerinden üretilmiş 5-seviyeli işaret karar tablosunun filtrelenmiş çıkışı ile sürülmektedir. Karar tablosu, taşıyıcının şimdiki fazını gösteren ve 0'dan (0°) 7'ye (315°) kadar değerler alan bir durum değişkeni kullanır. Bilgi bitleri karar tablosuna göre işlenir ve sonrasında 5-seviyeli I ile 5-seviyeli Q işaretleri elde edilir. I ve Q işaretleri daha sonra Nyquist Yükseltilmiş Kosinüs Filtresi ile filtrelenir. Filtre çıkışında I işareti taşıyıcı ile çarpılır, Q işareti ise taşıyıcının 90° gecikmiş haliyle çarpılır. Son olarak modüle edilmiş I ve Q taşıyıcılar modülatör çıkışında toplanarak CQPSK modüleli çıkış elde edilir.



Şekil 3.3. CQPSK modülatör yapısı.

QPSK Demodülatör, Frekans Modülasyonu Detektörü, Biriktir ve Boşalt Filtre (Integrate and Dump Filter) ve Türel Saat Geri Kazanma alt bloklarının kaskat bağlanması ile elde edilir ve ayrıca C4FM ile CQPSK modülasyonlu işaretleri çözebilmektedir (Şekil 3.4). Frekans Modülasyonu Detektörü ile Faz-I'den Faz-II'ye geçişte sadece verici blok değişecektir. Alıcıda çoklu demodülatör yapısı kullanılarak analog ve sayısal işaretlerin aynı şekilde iyi alınması sağlanmaktadır. Biriktir ve Boşalt Filtre'nin grup gecikmesi $|f| < 2880$ Hz geçirme bandı için yatay seviyedir. Genlik cevabı ise Eşitlik 3.3'de yaklaşık olarak verilmiştir. Türel Saat Geri Kazanma bloğu isminden de anlaşılacağı üzere Biriktir ve Boşalt Filtre'nin çıkışındaki işaretten saat işaretini farklı yöntemler kullanarak yeniden elde eder ve çıkışında İkili Bit dizisini verir.



Şekil 3.4: QPSK demodülatör yapısı.

f : frekans (Hertz)

$$|D\{f\}| = \text{Biriktir ve Boşalt Filtre'nin genlik cevabı} \quad (3.3)$$

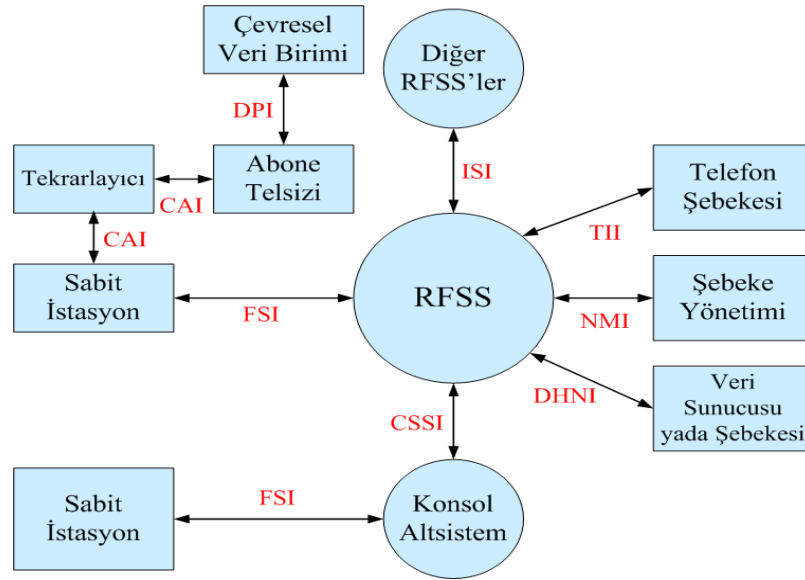
$$|D\{f\}| = \sin(\pi f / 4800) / (\pi f / 4800)$$

3.5. APCO Proje-25 Standardının Arayüzleri

APCO Proje-25, RFSS (RF Alt Sistem) için 6 arayüz, 1 çevresel arayüz ve 1 tane de hava arayüz tanımlamaktadır (Şekil 3.5) [9];

RFSS:

RFSS, Proje-25 arayüzleri tarafından çevrilmiş bir altyapıdır. RFSS tek bir telsiz istasyonu da olabilir birden fazla istasyonda olabilir. Burada belirleyici olan kullanılan cihazların CAI desteği olmasıdır. RF Alt Sistemler geniş alan sistem inşası için kullanılan yapı bloklarıdır ve diğer cihaz konfigürasyonları ya da RF Alt Sistemler ile bağlantı kurmaktadır.



Şekil 3.5: APCO Proje-25 standardının arayüzleri.

CAI:

CAI (Genel Hava Arayüzü), aynı veya farklı üreticilerin ürettiği Proje-25 telsizlerin karşılıklı haberleşmesini sağlayan arayüzdür. Bu arayüzün geliştirilme çalışmaları tamamlanmıştır. Fakat Proje-25 sistemleri üretimi yapan ve bu pazara yeni giren bazı üreticilerin bu standart içerisinde yorumlamada sıkıntı yaşadıkları bölümlerin daha ayrıntılı yazılması süreci devam etmektedir. CAI Proje-25 sistem mimarisi içindeki en önemli arayüzdür. Bu arayüzle ilgili daha ayrıntılı bilgi ilerleyen bölümlerde verilecektir.

ISI:

ISI (Sistemler Arası Arayüz), geniş alan sistem inşası için kullanılan RFSS'lerin birbiriyle olan bağlantıları tanımlayan arayüzdür. Bu arayüz sistem tasarım yapanlara herhangi bir sayıda ve herhangi bir genişlikteki RFSS'leri birleştirmek için esneklik

getirmektedir. ISI ayrıca farklı üreticilerin farklı teknolojileri kullanan (TDMA veya FDMA gibi) ve farklı RF bandlarındaki haberleşme sistemlerinin birlikte çalışmasını tanımlamaktadır. ISI arayüzü trunk servisler için tamamlanmış ve yayınlanmıştır. Konvansiyonel servisleri de kapsayacak şekilde genişletme çalışmaları sürmektedir.

TII:

Proje-25 telefon şebekeleri için açık arayüze ihtiyaç duymaktadır. TII (Telefon Bağlantı Arayüzü), telefon şebekeleri ile olan arayüzü tanımlamaktadır. Bu arayüz hem analog hem de sayısal telefon arayüzlerini destekler. Arayüz sadece ses servisleri için tanımlanmıştır. Çünkü devre bağlantılı veri servislerinin telefon şebekesine modem vasıtasıyla bağlandığı ve telsiz sisteminin bir veri portundan bağlantı kurduğu varsayılmaktadır.

NMI:

NMI'in (Şebeke Yönetim Arayüzü) geliştirilme çalışmaları sürmektedir. Bu arayüz RFSS'nin tüm şebeke elemanlarının yönetilmesi için tek bir şebeke yönetim planı tanımlar. Arayüz kullanılarak herhangi bir RFSS'de şebekenin yönetimine ait temel özellikler (konfigürasyon yönetimi, hata denetimi, güvenlik yönetimi, performans yönetimi ve ücretlendirme yönetimi) tek bir şebeke yönetim planıyla yönetilebilmektedir.

DHNI:

DHNI (Veri Sunucusu veya Şebeke Arayüzü) için geliştirilme çalışmaları sürmektedir. Bu arayüz, veri şebekeleri ile olan 4 farklı bağlantıyı tanımlamaktadır. Bunlardan ilki, sunucu bilgisayarlar bağlanmak için olan açık arayüzdür. Diğerleri ise var olan bilgisayar şebeke arayüz tiplerinden farklı olan bağlantılardır (TCP/IP, SNA ve X.25).

DPI:

DPI (Veri Çevrebirimi Arayüzü) için de geliştirilme çalışmaları sürmektedir. Bu arayüzde tanımlanan protokoller ile telsiz üzerindeki bir portu kullanarak diz üstü bilgisayar, veri terminali veya çevre birimiyle bağlantı kurabilir. Burada tanımlanan

protokollerin, sabit cihaz tarafında başka bir açık ara yüzde, X.25, SNA veya TCP/IP bilgisayar şebekelerine şeffaf geçişi sağlaması beklenmektedir.

FSI:

FSI (Sabit İstasyon Arayüzü) için geliştirilme çalışmaları tamamlanmıştır. Bu arayüz ile sabit istasyon ile RFSS veya Console Sub-System (Konsol Altsistem) arası haberleşme sağlanmaktadır. Arayüz sayısal ses, veri, şifreleme ve telefon bağlantısını da destekleyecek şekilde zorunlu mesaj setini tanımlar.

CSSI:

CSSI (Konsol Altsistem Arayüzü) için geliştirilme çalışmaları sürmektedir. Bu arayüz müşterek çalışma fonksiyonlarına sahip standart protokolleri destekleyen bir çok-kanallı sayısal arayüz tanımlamaktadır. Bu arayüzün RFSS içine entegre edilmesi planlanmaktadır.

3.6. APCO Proje-25 Standardının Avantajları

APCO Proje-25 standardı, performans, verimlilik, yeteneklilik ve kalite gibi kriterlere göre birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajların öne çıkanları aşağıda sırayla açıklanmıştır;

Müşterek Çalışabilir:

Proje-25 standardı ile uyumlu telsiz ekipmanlarının kullanıcıları, ister aynı isterse farklı kuruluştan ya da bölgeden olsun fark etmez, birbirleriyle direk haberleşebilmektedir. Buda gerektiği zaman (acil durum, yasal zorunluluk, vs.) bu kuruluşların yerel ya da bölgesel olarak birbirleriyle daha etkili konuşabilmesini sağlamaktadır.

Üreticiden Bağımsız:

Proje-25 açık mimarili bir standarttır. Bunun için standarda göre üretim yapan birden fazla üretici ve bunların satıcısı vardır. Buda Proje-25 ürünlerini kullananlara ihtiyaçlarını birden fazla kaynaktan temin edebilme şansı vermektedir. Böylelikle

fiyatlar rekabet ortamında aşağıya çekilmekte, patent gibi ekstra ücretler olmamaktadır.

Geriye Uyumlu:

Proje-25 uyumlu sayısal telsiz ekipmanının en temel gereksinimi analog FM telsizlerle geriye uyumlu olarak çalışmasıdır. Bu geriye uyumluluk, teknolojisi eskiyen analog sistemlerden sayısala geçişi düzenlemekte ve geçiş süresince ara çözüm olarak çalışabilen analog-sayısal karışık sistemlerin kullanılabilmesini sağlamaktadır. Bu çözüm ile mevcut analog altyapıyı kullanan kuruluşlar sistemlerini sayısala taşıması daha kolay olacak ve maliyetler düşünüldüğünde belirli bir zamana yayılarak yapılabilecektir.

Şifreleme Yeteneği:

Proje-25 standardı sayısal haberleşmenin (ses ve veri) korunması için şifreleme yeteneği tanımlamaktadır. Standarda göre şifreleme seçimli olarak kullanılmakta ve kullanıcılara şifreli veya şifresiz sayısal haberleşme yöntemleri sunmaktadır. Yine seçimli olarak şifreleme anahtarları sayısal veri kullanılarak RF link üzerinden güncellenebilir (OTAR). Bu yetenek ile telsiz sistemleri yöneticisi, kullanıcıların şifreleme anahtarlarını uzaktan değiştirebilir.

Spektrum Verimliliği:

Proje-25 standardı ile spektrumun verimliliği darbandlar kullanılarak artmaktadır. RF spektrum sınırlı bir kaynaktır ve bu kaynak içinde telsiz sistemlerinin kullanımı için daha fazla kanal oluşturulması ile spektrum verimliliği artırılmaktadır.

Gelişmiş Ses Kalitesi:

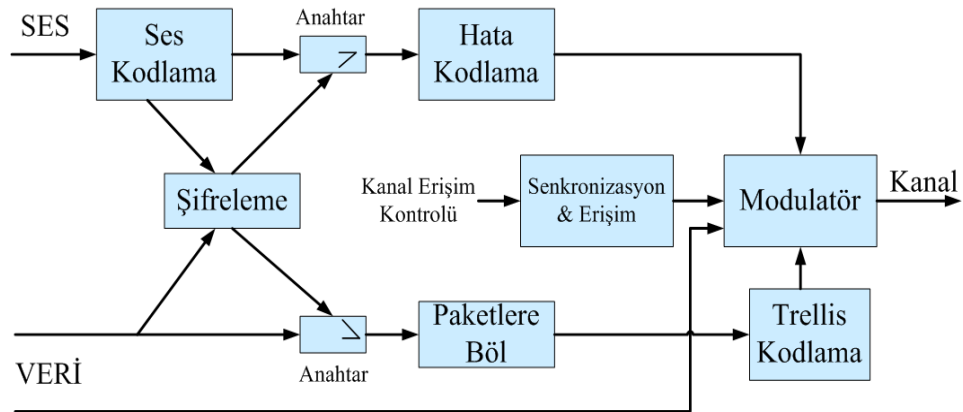
Proje-25 standardında kanal kapasitesinin (9600 bit/s) bir çeyreğinden fazlası hata düzeltme için kullanılmaktadır (2800 bit/s). Böylelikle ses kalitesi, özellikle düşük veya gürültülü RF taşıyıcı seviyelerinde analog işaretlere göre daha iyi olmaktadır. IMBE ses kodlayıcı ses bilgisini sayısal veriye çevirir ve sonra bu veri hata düzeltme kodlarıyla korunmaktadır. Hata düzeltme, alınan işarettaki küçük hataları düzeltmektedir. Alınan ses işareti sayısal olarak kodlanmıştır ve analog sistemlerdeki arkaplan gürültüsü çıkarılmıştır.

Çoklu Fonksiyonellik:

Proje-25 standardı 2400 bit/s işaretleşme yeteneğine sahiptir. Buda Proje-25'in çok geniş fonksiyonlar ve özellikler tanımlamasını sağlamaktadır. Bu yeteneklerden bazıları; Seçmeli arama (Kaynak/Hedef Kimliği), konuşma gurupları, şebeke erişim kodları ve acil durum bayrakları olarak verilebilir. Proje-25 işaretleşme ayrıca üretici kimliği bilgisi içerir. Bu yetenekle farklı üreticiler telsiz yeteneklerini müşterilerinin isteklerine göre düzenleyebilir. Proje-25 standardı ile bunlar gibi birçok standart işaretleşme formatları kullanılabilir.

4. GENEL HAVA ARAYÜZÜ

Genel Hava Arayüzü (CAI), farklı üreticilere ait telsiz sistemlerinin (taşınabilir, gezgin ve baz istasyonu) birlikte çalışmasını tanımlamaktadır [11]. Bu arayüz birçok alt bölümden oluşmaktadır. Ses ve veri haberleşmesi için bu alt bölümlerin bazıları Şekil 4.1'deki basit verici diyagramında gösterilmiştir. Bu alt bölümlerin ilkinde mikrofonla alınan ses kodlanır, isteğe göre şifrelenir, hata düzeltme bitleri eklenir, adresleme ve gömülü işaretleşme bilgileri eklendikten sonra modülatörden geçirilip kanala verilir. Veri ise iki farklı yoldan iletilir. Basit olan yolda veri direkt modüle edilerek kanala verilir. İkinci şekilde ise veri öncelikle isteğe göre şifrelenir, büyük veri mesajları daha küçük parçalara bölünür ve hata düzeltme bitleri eklendikten sonra kanala verilmektedir. Ses ya da veri mesajları, verici mesajı gönderene hazır olana kadar vericide saklanmaktadır. Verici hazır olunca, mesaj telsiz modülatörüne CAI üzerinden iletim için gönderilir. Ses ve veri modu için CAI'in temel yapıları ilerleyen bölümlerde incelenmiştir.

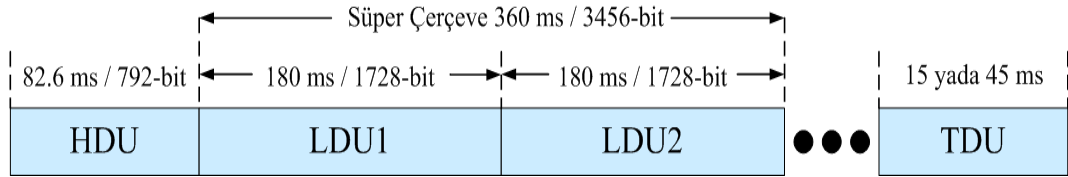


Şekil 4.1: Genel hava arayüzü için basit verici diyagramı.

4.1. Ses Haberleşmesi Modu

Ses haberleşmesi CAI üzerinden kodlanmış konuşmanın iletimi ve alınması ile yapılmaktadır [10]. Ses mesajı yapısı Şekil 4.2'de verilmiştir. Proje-25 standardı

konuşmayı kodlayıp sayısal bit akışı elde etmek için IMBE ses kodlayıcı kullanılmaktadır. IMBE, sayısal bit akışını, her biri 88-bit uzunluğunda olan (20 ms konuşma) ses çerçevelerine (voice frames) parçalamaktadır. Ses çerçevelerini korumak için hata düzeltme kodları kullanılır ve bunun sonunda 56-bit parite (artıklık) kontrol bilgisi eklenerek ses çerçevesinin boyutu 144-bit olur. Ses çerçeveleri, her biri 9 tane ses çerçevesinden oluşan 2 farklı Mantıksal Bağlantı Veri Birimi (LDU) ile gruplandırılır (LDU1 ve LDU2). Her bir LDU 180 ms uzunluğundadır ve ikisi bir araya gelerek 360 ms'lik Superframe (Süper Çerçeve) oluşturur. Ses mesajı bir Başlık Veri Birimi (HDU) ile başlar. Bu birimde mesajın şifrelenmesi ve bağlantı kontrolleri için ilklendirme işlemleri yapılmaktadır. HDU'den sonra LDU'lerin oluşturduğu süper çerçeveler mesajın sonuna kadar yollanmaktadır. Mesajın sonunda Sonlandırıcı Veri Birimi (TDU) gönderilmektedir. Ses haberleşmesinin alt bileşenleri aşağıda sırasıyla ayrıntılı olarak verilmiştir.

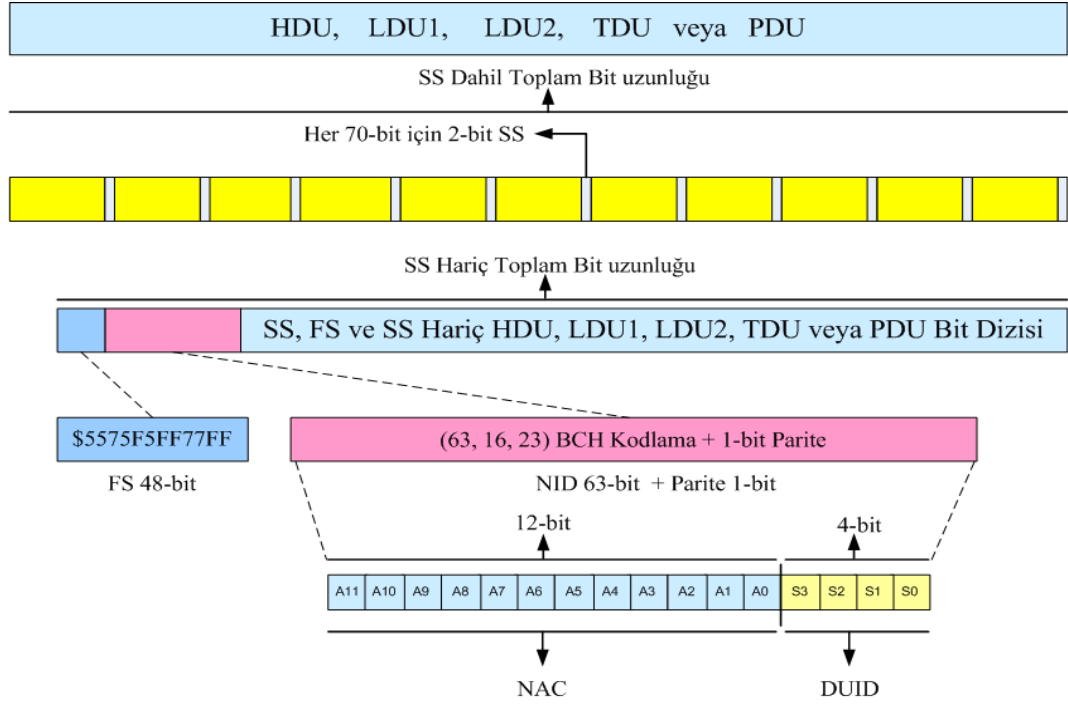


Şekil 4.2: Genel hava arayüzünde tanımlı ses mesajı yapısı.

FS, NID ve SS:

FS (Çerçeve Senkronizasyon) ve NID (Şebeke Kimliği), her veri biriminin başında bulunmaktadır (HDU, LDU1, LDU2, TDU ve PDU) [11]. SS (Durum Sembolleri) 2-bit uzunluğundadır ve tüm veri birimlerinde 70-bit arayla bir tane durum sembolü kullanılır. FS, NID ve SS her veri biriminin oluşturulmasında aynı şekilde kullanılmaktadır (Şekil 4.3). FS bloğu, alıcının bilgi taşıyan ilk biti bulması için işaretleme amacıyla kullanılır. NID bloğunda NAC (Şebeke Erişim Kodu) ve DUID (Veri Birimi Kimliği) bilgileri tutulur. NAC (12-bit) kanal erişim kontrolü için kullanılır. DUID (4-bit) alanında ise birimin kimlik bilgisi tutulur. 16-bit uzunluğundaki bu iki alan BCH(63,16,23) hata kodlaması ile kodlanır ve sonuna 1-bit parite eklenerek 64-bit uzunluğunda NID bloğu oluşturulur. Tablo 4.1'de SS için kullanım bilgisi verilmiştir. Bu tabloda ilk sütun SS'in her kullanım amacı için aldığı değeri ikili değerde göstermektedir. İkinci sütunda her SS değerine karşı düşen

anlamlar verilmiştir. Son sütunda ise kullanıldığı yer belirtilmiştir. Tablo 4.2’de DUID için kullanım bilgisi verilmiştir. Bu tabloda ilk sütun DUID’in her veri birimi için aldığı değeri ikili değerde göstermektedir. İkinci sütunda yine her veri birimi için NID bloğuna eklenen parite değeri gösterilmektedir. Son sütunda ise hangi veri birimini ifade ettiği belirtilmiştir.



Şekil 4.3: FS, NID ve SS bloklarının veri birimlerinde kullanılması.

Tablo 4.1: Durum Sembolleri (SS) için kullanım bilgisi.

SS	Anlamı	Kullanım Yeri
01	Gelen Kanal Meşgul	Tekrarlayıcı
00	Konuşma Kullanımı	Abone
10	Gelen/Çıkan Kullanımı	Tekrarlayıcı ya da Abone
11	Gelen Kanal Boşta	Tekrarlayıcı

Tablo 4.2: Veri Birimi Kimliği (DUID) için kullanım bilgisi.

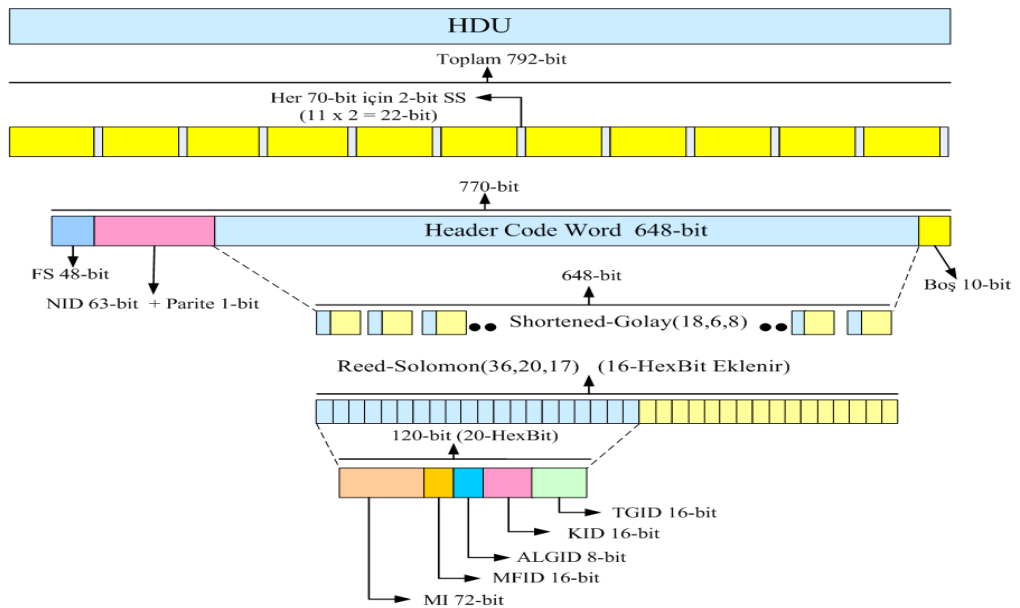
DUID	Parite	Veri Birimi
0000	0	HDU
0011	0	TDU (LC yok)
0101	1	LDU1
1010	1	LDU2
1100	0	PDU
1111	0	TDU (LC var)

HDU:

HDU, 3 ayrı bloktan oluşmaktadır; FS (48-bit), NID (64-bit) ve Header Code Word (Başlık Kod Sözcüğü / 648-bit). Bunlar haricinde her 70-bit bloğu için 2-bit SS eklenmekte ve blok uzunluğunu 70'in katına taşıyıp sonuna SS ekleyebilmek için 10 tane boş bit (null bit) eklenmektedir. Böylece oluşan HDU'nun uzunluğu 792-bit olmaktadır (Şekil 4.4). Yalnızca HDU'e özgü olan Header Code Word 648-bit uzunluğundadır ve aşağıda verilen bilgileri tutar;

1. Message Indicator (MI): Şifrelemeyi iklendirmek için kullanılır (72-bit).
2. Manufacturer's ID (MFID): Telsiz üreticisini tanımlar (8-bit).
3. Algorithm ID (ALGID): Şifreleme algoritmasını tanımlar (8-bit).
4. Key ID (KID): Şifreleme anahtarını tanımlar (16-bit).
5. Talk-group ID (TGID): Telsiz mesajının iletildiği konuşma grubunu tanımlar (16-bit).

Toplam uzunluğu 120-bit olan bu 5 alan, öncelikle her biri 6-bit bilgi taşıyan (HexBits) 20 sembole bölünür. Bu 20 HexBits öncelikle Reed-Solomon(36,20,17) hata kodlaması ile kodlanarak 36-HexBit elde edilir ve daha sonra 36-HexBits Shortened-Golay(18,6,8) hata kodlaması ile kodlanarak 648-bit uzunluğunda Header Code Word elde edilir [11].

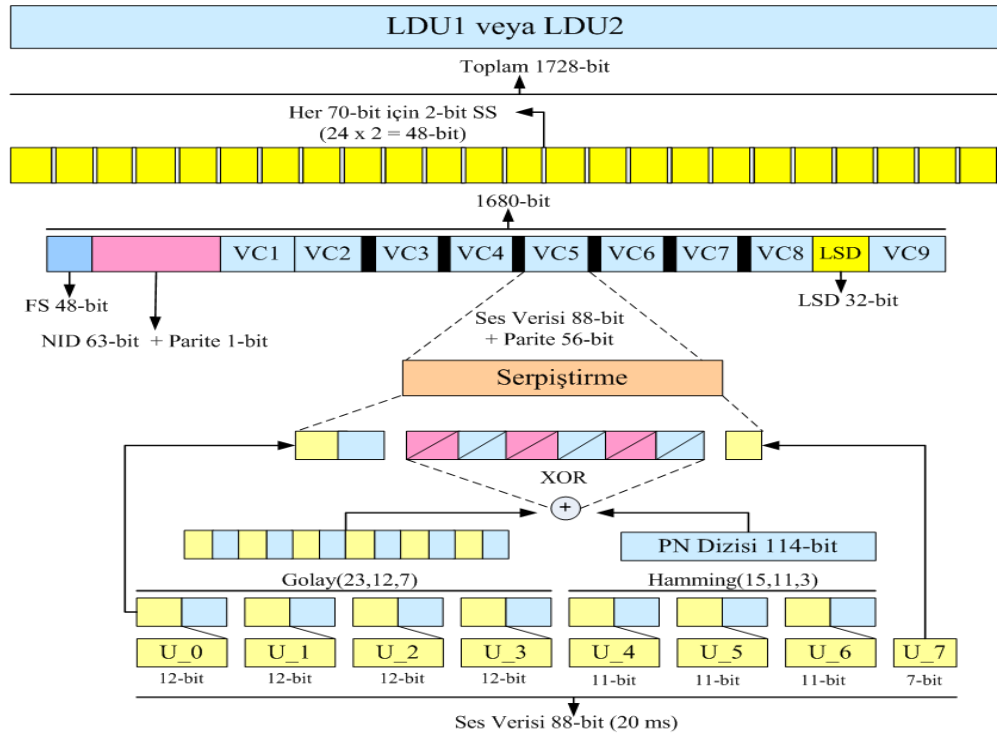


Şekil 4.4: Header Data Unit yapısı.

LDU1:

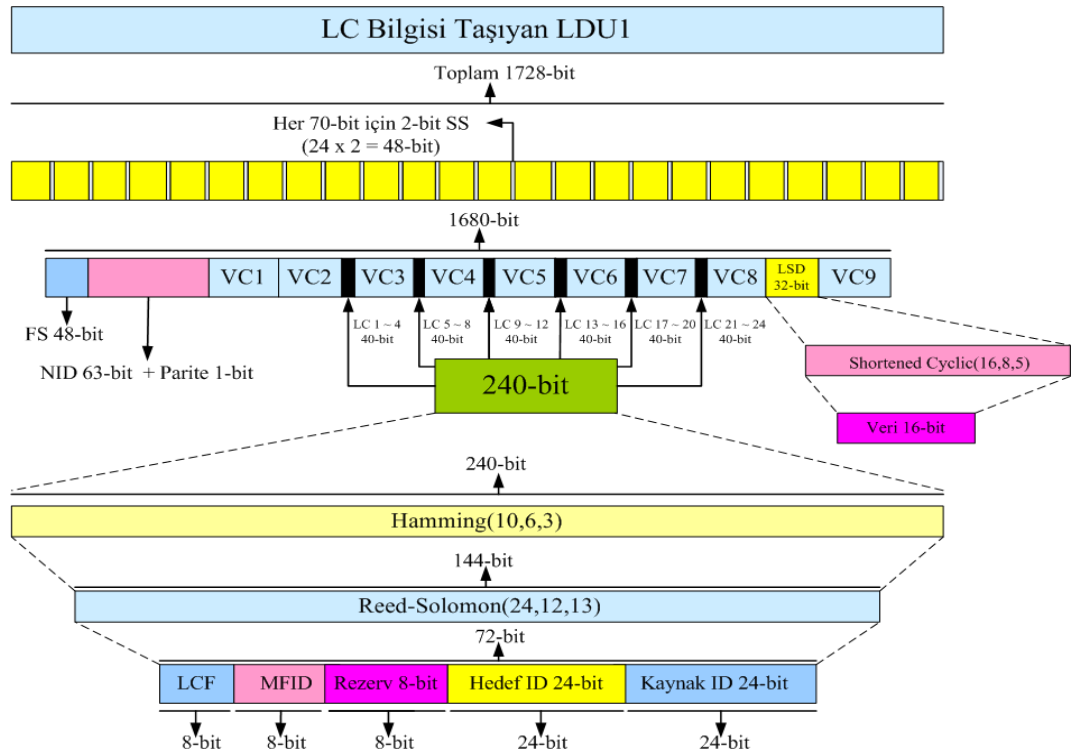
LDU1 birimi HDU gibi 48-bit FS ve 64-bit NID blokları ile başlar. Benzer şekilde birim oluşturulurken her 70-bit için 2-bit SS kullanılır. HDU'den farklı olarak ise 9 tane Voice Code Words (VC1....VC9 / 1296-bit), Link Control Word (Bağlantı Kontrol Sözcüğü / 240-bit) ve LSD (32-bit) bloklarına sahiptir. 48-bit SS ile birlikte LDU1 1728-bit uzunluğundadır [11].

Voice Code Words (Ses Kod Sözcükleri - VCs), ses çerçeveleri kodlanarak elde edilir. IMBE ses kodlayıcı konuşmayı, 88 bit uzunluğundaki ses çerçevelerinden oluşan sayısal bit akışına çevirmektedir. Bu ortalama 4.4 kbit/s ses kodlama oranına denk düşmektedir. Ses çerçeveleri 8 bilgi vektöründen oluşmaktadır ($U_0, U_1, \dots, U_7$). Ses çerçevelerindeki bitler ses kalitesindeki etkilerine göre gruplanarak iki farklı hata düzeltme kodlamasından geçirilirler. En önemli 48-bit Golay(23,12,7) hata düzeltme kodlaması ile sonraki 33-bit Hamming(15,11,3) hata düzeltme kodlaması ile kodlanır. Son 7-bit ise kodlanmaz. Elde edilen kodlanmış bloklar önce XOR (Özel Veya) işlemiyle toplanır ve başına ilk kodlanmış bloğu, sonuna da kodlanmamış bloğu alarak serpiştirme işleminden geçirilir. Böylelikle 144-bit uzunluğundaki Voice Code Words'ler oluşturulur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Logical Link Data Unit yapısı.

Link Control Word (LC) bloğu farklı Link Control (bağlantı kontrol) bilgilerine göre oluşturulur. Bu alan TGID, Source ID (kaynak adresini tanımlar), Destination ID (hedef adresini tanımlar), MFID gibi farklı tanımlama alanlarını içerebilir. Tez çalışması kapsamında, bu birimde 24-bit Destination ID ve 24-bit Source ID'nin bulunduğu Link Control örneği seçilmiş ve tanıtılmıştır. Tanımlamaların bulunduğu 72-bit uzunluğundaki bu alan öncelikle Reed-Solomon(24,12,13) hata düzeltme kodlaması ile kodlanır ve 24-HexBit (144-bit) elde edilir. Daha sonra bu HexBit'ler Hamming(10,6,3) hata düzeltme kodlaması ile kodlanarak 240-bit uzunluğunda LC elde edilmektedir. Elde edilen bu LC Şekil 4.6'da görüldüğü üzere LDU1 oluşturulurken 5 parça halinde Voice Code Words'lerin arasına serpiştirilir.

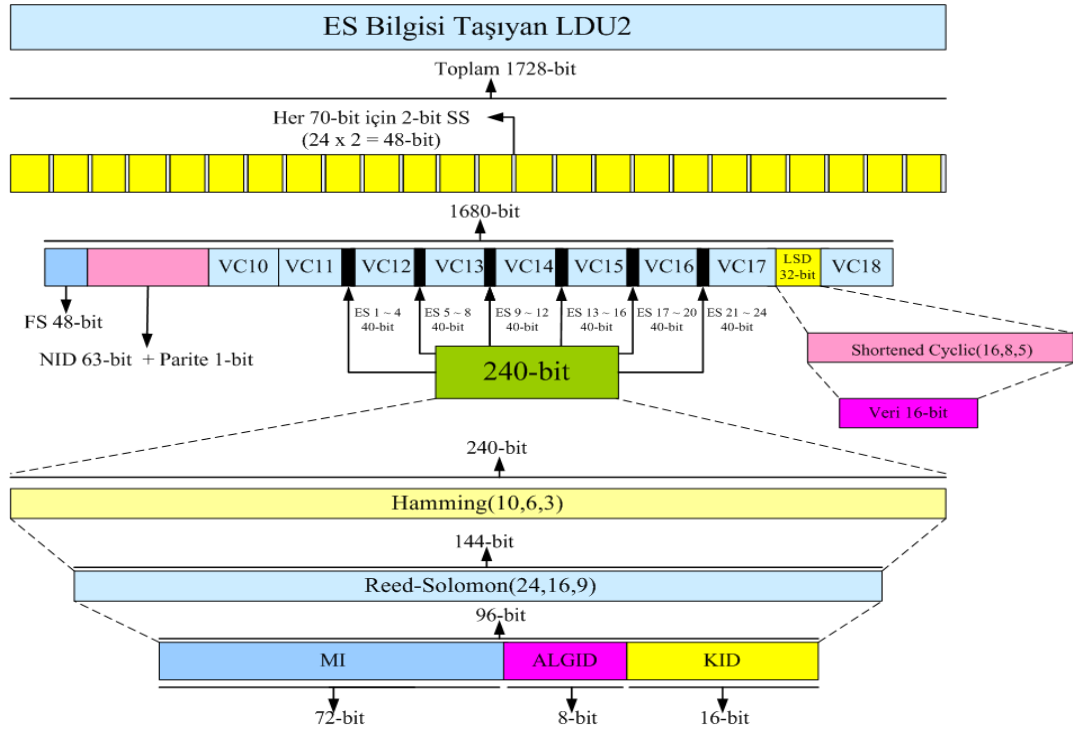


Şekil 4.6: Logical Link Data Unit 1 yapısı.

LSD bloğu kullanıcı uygulamaları için oluşturulmuştur. 32-bit veri taşır. GPS (Küresel Konum Belirleme Sistemi) uygulamalarında kullanılabilir. Bloğun 16-bit alanı Shortened Cyclic(16,8,5) hata düzeltme kodlamasından geçirilerek LDU1 içerisinde, geri kalan 16-bit alan da aynı şekilde Shortened Cyclic(16,8,5) hata düzeltme kodlamasından geçirilerek LDU2 içerisinde kullanılır.

LDU2:

LDU2 birimi LDU1'e benzer şekilde 48-bit FS ve 64-bit NID blokları ile başlar. Benzer şekilde birim oluşturulurken her 70-bit için 2-bit SS kullanılır. LDU2'de 9 tane Voice Code Words (VC1....VC9 / 1296-bit) ve 32-bit LSD bilgisi taşır [10]. LDU1'den farklı olarak Link Control Word yerine Encryption Synchronization Word (Şifreleme Senkronizasyon Sözcüğü / 240-bit) bloğuna sahiptir. 48-bit SS ile birlikte LDU2 1728-bit uzunluğundadır (Şekil 4.7).

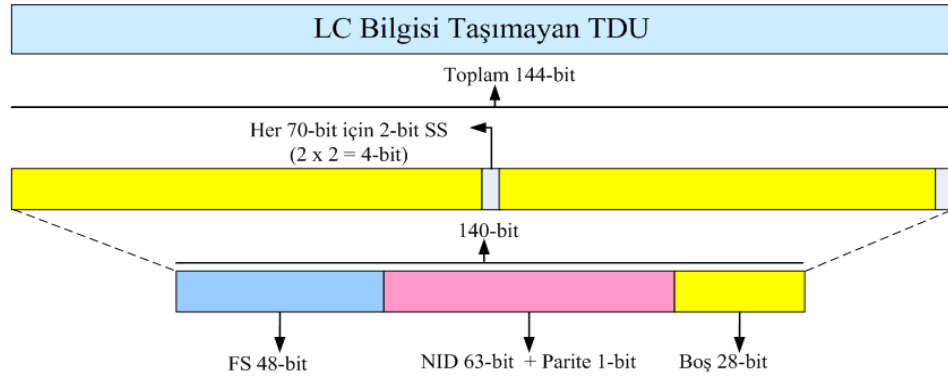


Şekil 4.7: Logical Link Data Unit 2 yapısı.

Encryption Synchronization Word (ES) bloğu Message Indicator (MI), Algorithm ID (ALGID) ve Key ID (KID) bilgilerini içerir. Bu bilgi çoklu-anahtar şifreleme sistemlerini desteklemek için kullanılır. Ayrıca tek anahtar ve temiz mesaj özellikleri içinde kullanılabilir. MI, ALGID ve Key ID'den oluşan 96-bit uzunluğundaki blok öncelikle Reed-Solomon(24,16,9) hata düzeltme kodlaması ile kodlanır. Elde edilen 24-HexBit bilgi Hamming(10,6,3) hata kodlaması ile kodlanarak 240-bit uzunluğunda ES elde edilir. Elde edilen ES Şekil 4.7'de görüldüğü üzere LDU2 oluşturulurken 5 parça halinde Voice Code Words'lerin arasına serpiştirilir.

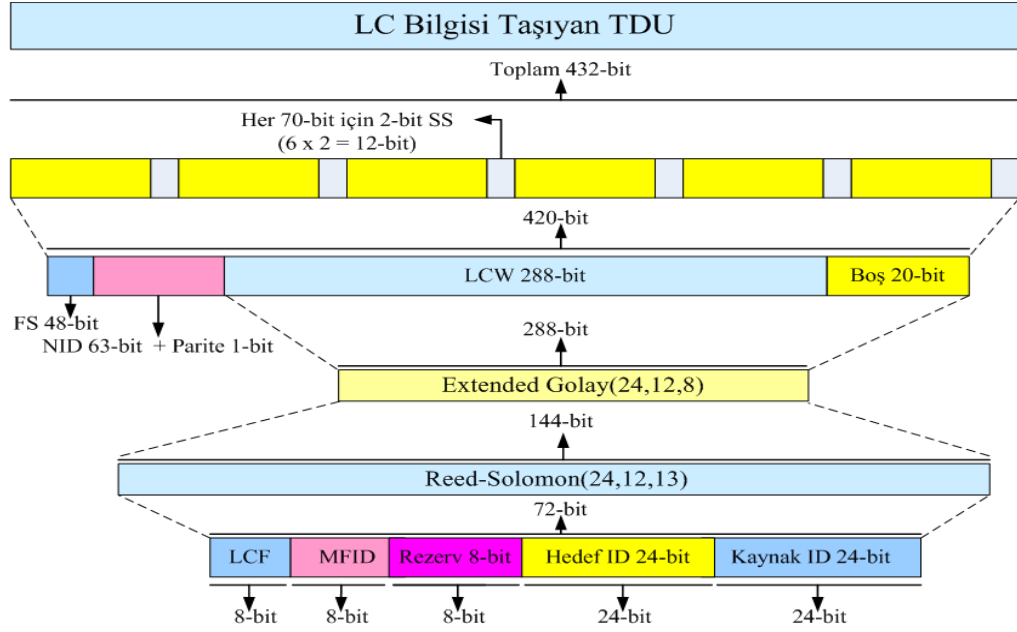
TDU:

LDU birimlerinin iletimi tamamlandığında verici iletilen mesajın sonunu belirtmek için TDU birimi yollar. TDU, LDU1 ya da LDU2'den sonra gelebilir. Ses mesajları iki farklı TDU birimi kullanmaktadır [11]. Bunlardan ilki ve basit olanı Link Control bloğu içermeyen TDU birimidir (TDU without Link Control). Bu birim FS (48-bit), NID (64-bit) ve 28 boş bit uzunluğundan oluşmaktadır (Şekil 4.8). Ayrıca bu blokların arasında 4-bit SS bilgisi bulunur.



Şekil 4.8: Link Control bilgisi taşımayan Terminator Data Unit yapısı.

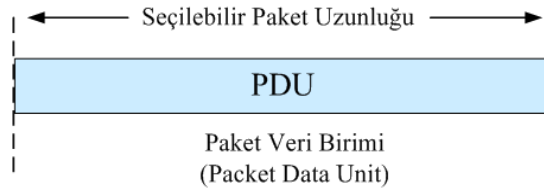
İkinci TDU birimi Link Control bilgisi içermektedir (Terminator Unit with Link Control). Bu birim 3 ayrı bloktan oluşmaktadır (Şekil 4.9); FS (48 bit), NID (64 bit) ve Link Control Word (288-bit). Benzer şekilde her 70-bit için 2-bit SS kullanılmakta (toplam 12-bit) ve ayrıca birimin sonuna 20 boş bit ilave edilmektedir. Ses mesajları iki farklı TDU'den birini kullanabilir. Link Control Word taşıyan TDU (with Link Control) LDU1'dekine benzer şekilde içerisinde Link Control bilgisi taşır. Yine burada da uygun Link Control formatı kullanıcı tarafından seçilebilir. LDU1'de olduğu gibi gerçekleştirilen bu tez çalışmasında 24-bit Destination ID ve 24-bit Source ID'nin bulunduğu Link Control örneği seçilmiştir. Tanımlamaların bulunduğu 72-bit bu alan öncelikle Reed-Solomon(24,12,13) hata düzeltme kodlaması ile kodlanır ve 24-HexBit (144-bit) elde edilir. Daha sonra bu HexBit'ler LDU1'den farklı olarak Extended Golay(24,12,8) hata düzeltme kodlaması ile kodlanarak 288-bit uzunluğunda Link Control Word elde edilir.



Şekil 4.9: Link Control bilgisi taşıyan Terminator Data Unit yapısı.

4.2. Veri Haberleşmesi Modu

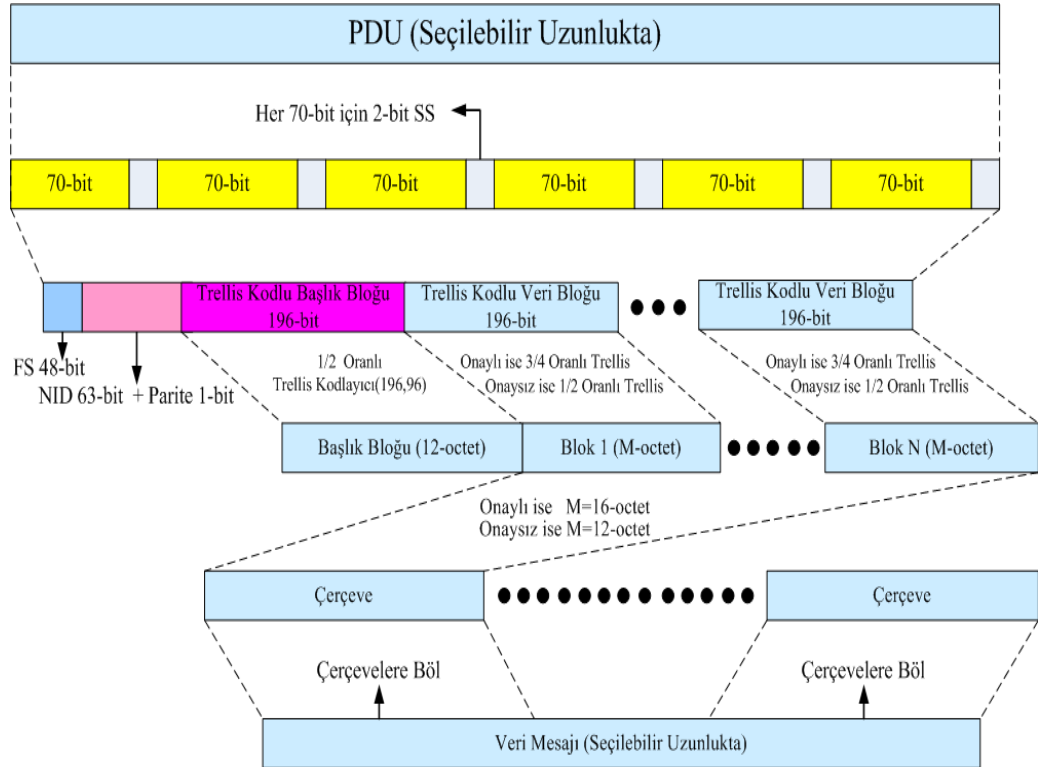
Veri haberleşmesi CAI üzerinden veri paketlerinin iletimi ve alınması ile yapılmaktadır [11]. Veri mesajları CAI üzerinden paket tekniği ile taşınırlar. Veri mesajının yapısı Şekil 4.10'da verilmiştir. Veri haberleşmesi modu veri iletimi için güvenli bir bağlantı protokolüdür. Bu sebeple sınırlı bandgenişlikli bağlantı kaynaklarında IP bağlantısının kullanımını arttıracak fırsatlar araştırılmakta ve IP haberleşmesinin band genişliğini iyileştirmek için alternatif çözümler geliştirilmektedir [14]. Veri mesajları öncelikle bir paket içerisinde bilgi içeren parçalara bölünür. Daha sonra mesaj parçaları paketlere dönüştürülür ve bu paketlerde bilgi blok dizilerini oluşturur. Her bir blok Trellis kod ile korunur ve blok dizisi CAI üzerinden tek bir paket, PDU (Paket Veri Birimi), olarak taşınır. PDU değişken uzunlukta olabilir ve veri mesajının uzunluk bilgisini tutan bir başlık bloğu (header block) içermektedir.



Şekil 4.10: Veri mesajının yapısı.

PDU:

PDU'nin yapısı Şekil 4.11'de verilmiştir. Veri, farklı uzunluktaki paketlerle yollar. Veri paketinin uzunluğu başlık bloğunda tanımlanmıştır. Veri paketi sonlanınca bir sonraki durum sembolüne kadar boş bitler eklenmektedir. Veri paketleri, farklı iletim yapısına sahip 2 çeşit veri tipi kullanılmaktadır. Onaylı (confirmed) ya da onaysız (unconfirmed) olarak 2 farklı iletim kullanılabilir [13]. Onaylı iletimde her paket 3/4 oranlı Trellis kodu ile korunur ve her bir paket alınırken karşı taraftan onaylama paketi yollar. Onaysız iletimde her paket 1/2 oranlı Trellis kodu ile korunur ve onay paketi yoktur. 3/4 Trellis kodlanmış ve onay geri dönüş paketi de içeren onaylı iletim, daha yüksek veri iletim güvenliği oluşturmaktadır. Buna karşın daha düşük veri iletim kapasitesi kullanılmaktadır. 1/2 Trellis kodlamayla korunmuş olan onaysız iletim, daha iyi veri iletim performansına sahip olmasına rağmen, herhangi bir paket kaybı olduğunda, gönderici taraf bu kayıptan habersiz olmaktadır. Onaylı veya onaysız dağıtım başlık bloğunda tanımlanmıştır.

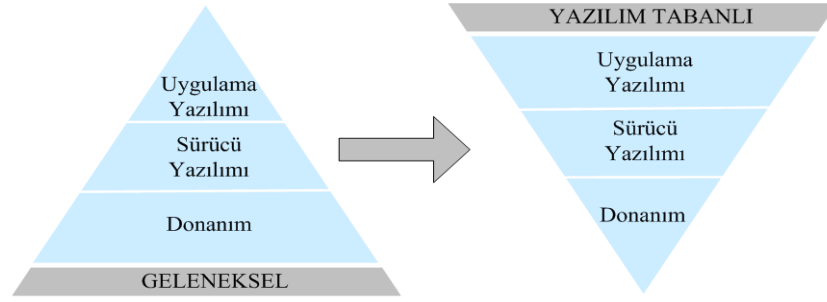


Şekil 4.11: Packet Data Unit yapısı.

5. YAZILIM TABANLI ENSTRÜMANTASYON

Yazılım tabanlı enstrümantasyon (software defined instrumentation), bilinen diğer adıyla sanal enstrümantasyon (virtual instrumentation), gerçekleştirildiği sistem için oldukça yüksek seviyede yeniden düzenlenebilme (reconfigurability) imkanı veren modüler mimariyi tanımlamaktadır [15]. Yazılım tabanlı enstrümanlar, işlevlerini kullanıcıların tanımladığı ve bir işlemci üzerinde koşan yazılımla kontrol edilen modüler donanım bileşenlerinden oluşan sistemlerdir. Yazılım tabanlı enstrümantasyon ile kullanıcılar, esnek olmayan ve değiştirilemeyen işlevlere sahip geleneksel cihazlar yerine kullanıcıya özel ve istenildiğinde yeni işlevler kazandırılabilen yazılım tabanlı cihazlara sahip olmaktadır.

Yazılım tabanlı ve geleneksel enstrümanların kullanılma amaçları aynıdır. İki çeşit enstrümanla da test, ölçüm veya analiz yapılabilir. İkisinin arasındaki temel fark yeniden düzenlenebilmedir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi geleneksel yapıda temel unsur donanımdır. Üretici tarafından sadece belirli görevler için programlanmış bu donanım uygulama seviyesinde sadece belirli işlevleri yerine getirebilmektedir. Yazılım tabanlı yapıda ise temel unsur kullanıcı tarafından oluşturulan uygulama yazılımıdır [16]. Bu yazılımla ile kullanılan donanım bileşenleri kontrol edilerek uygulamalara özel farklı işlevler yerine getirilebilir. Geleneksel enstrümanlar bu imkanı kullanıcıya sunmamaktadır. Kullanıcı, üreticiden aldığı, sadece tanımlanmış belirli işlevleri yerine getiren ve yeni ihtiyaçlara göre gerekebilecek yeniden düzenlenmeye imkan vermeyen bu cihazları, teknolojisini tamamen eskiyene kadar kullanmak zorundadır. Yazılım tabanlı enstrümanların işlevleri ise kullanıcı tarafından tanımlanır. Kullanıcı gerekli donanım ve yazılım bileşenlerini bir araya getirerek istediği uygulama için gerekli düzenlemeleri yapabilmektedir. Farklı bir uygulama gerçekleştirirken aynı donanım ve yazılım bileşenlerini yeniden düzenleyerek kullanabilir. Tanımlanan işlevler bilgisayar tabanlı bir sistem üzerinde koştuğu için bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak gelişme göstermekte ve performansı sürekli artmaktadır.



Şekil 5.1: Geleneksel ve yazılım tabanlı enstrümantasyon bileşenleri.

5.1. Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon Bileşenleri

Yazılım tabanlı enstrümantasyon sistemleri, belirli görevleri yerine getirmek üzere bir araya getirilmiş alt bileşenlerden oluşan tipik bir bilgisayar sistemidir [17]. Bu sistem 4 ana bileşenden oluşmaktadır; bilgisayar, yazılım, donanım ve bağlantı arayüzü. Şekil 5.2’de yazılım tabanlı enstrümantasyon mimarisi alt bileşen örnekleriyle birlikte verilmiştir.

5.1.1. Bilgisayar teknolojileri

Bilgisayar, yazılım tabanlı enstrümantasyonun çekirdeğini oluşturmaktadır. Bu sistemler kişisel bilgisayar veya iş istasyonu (workstation) temellidir. Bu sebeple enstrümantasyon yazılım paketleriyle tanımlanan gereksinimleri karşılamak için öncelikle bunların üzerinde koşacağı uygun bilgisayar belirlenmelidir. Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler paralel olarak yazılım tabanlı enstrümantasyonu da geliştirmektedir. İşlemcilerin çekirdeğini oluşturan mikroişlemciler, 70’li yılların başında özel uygulamalarda kullanılmak üzere ve sadece 4-bit veri uzunluğuna sahipken bugün 64-bit veri uzunluğuna sahip mikroişlemcilerin oluşturduğu kişisel bilgisayarlar yaygın kullanıma sahiptir. Tek çekirdekli işlemcilerin yerini de bugün 4 çekirdekli işlemciler almıştır. İşlemci teknolojisi yanında 80’li yılların başında DOS işletim sisteminden Windows işletim sistemine geçiş bilgisayar kullanıcılarına grafik kullanıcı arayüzü kullanma imkânı vermiştir. Bilgisayar teknolojisindeki bu ve benzeri ilerlemeler yazılım tabanlı enstrümantasyonun performansını ve gücünü arttırmaktadır.

5.1.2. Yazılım teknolojileri

Yazılım tabanlı enstrümantasyon için yazılım kritik bileşendir [18]. Çünkü yazılım tabanlı enstrümantasyonu geleneksel enstrümantasyondan ayıran temel unsur kullanıcı düzenlemesine imkân veren yazılım bileşenleridir. Kullanıcılar bu bileşenleri kullanarak uygulamaya özgü gerçeklemeler yapabilirler. Kullanılan yazılım bileşenleri farklı seviyelerde gerçekleştirilmektedir. Kayıtedici (register) seviyesi yazılım, kullanıcı ara yüzünden aldığı komutları donanımlara girmek için kullanılır ve bunun içinde donanımın kayıtedici yapısı bilinmelidir. Bu seviyedeki yazılım donanıma oldukça bağlı olduğu için en zor programlanan bileşendir. Sürücü seviyesi yazılım, sistem üzerindeki bileşenler ile haberleşme ve kontrol için kullanılır. Bu seviyedeki yazılım ara seviye ve kolay kullanım programlama modeli sunar. Ayrıca enstrümanın karmaşık ölçüm yeteneklerine tam erişim sağlamaktadır. Yüksek seviye yazılım, programlama için çok tercih edilen yöntemdir. Kolay kullanım imkanı veren tümleşik geliştirme araçları ile tasarım ve doğrulamada oldukça kullanışlıdır.

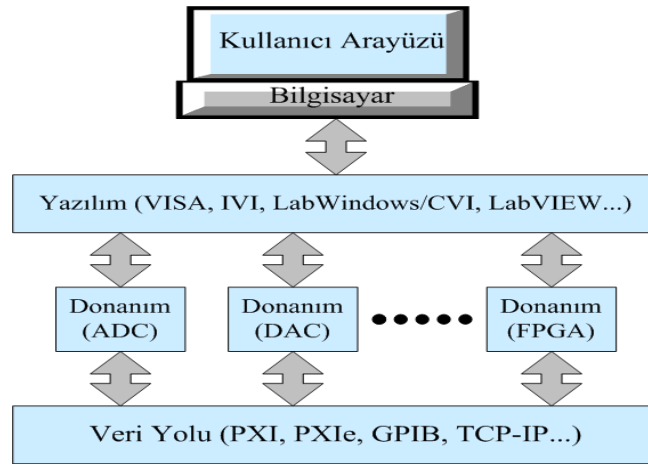
5.1.3. Donanım teknolojileri

Yazılım tabanlı enstrümantasyonun donanım bileşenlerini modüler giriş/çıkış (input/output) ve işaret işleme enstrümanları oluşturmaktadır. Kullanılan donanım bileşenleri yüksek performans, çözünürlük ve hız gereksinimlerini sağlamalıdır. İleri modüler enstrüman donanımları en son giriş/çıkış ve işaret işleme teknolojilerini kullanır. Bunlar arasında Analog-Sayısal Dönüştürücüler (Analog-Digital Converters), Sayısal-Analog Dönüştürücüler (Digital-Analog Converters) ve Alan Programlamalı Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Arrays - FPGA) sayılabilir. Donanım bileşenleri, hızlı bağlantı arayüzleri ve güçlü yazılım bileşenleri ile birlikte kullanılarak kullanıcı tanımlı ölçüm ve karmaşık analiz programları gerçekleştirilebilmektedir.

5.1.4. Bağlantı arayüzü teknolojileri

Yazılım tabanlı enstrümantasyonda enstrümanlar arası haberleşme bağlantı arayüzü bileşeni üzerinden olmaktadır. Yüksek hızlı bilgisayar arayüz teknolojisi, yüksek

bandgenişliği ihtiyaı olan yüksek performanslı yazılım tabanlı enstrümantasyon uygulamaları için avantajdır. Bağlantı arayüzü teknolojisindeki ilerlemeler, yazılım tabanlı enstrümantasyon sistemlerinin de kapasitesini arttırmaktadır. Yazılım tabanlı enstrümantasyon uygulamalarında tercih edilen bağlantı arayüzü teknolojilerine örnek olarak PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) ve PXIe (PXI Express) verilebilir. PXI açık bir standart olup, 132 MB/s tümleşik bir tetikleme veri yolu ve referans saati ile enstrümanlar arası senkronizasyon ve zamanlamayı yüksek doğrulukla sağlamaktadır. PXIe standardı, PXI standardının ileri sürümü olup, PXI modüllerle uyumlu olacak şekilde veri yolunu yaklaşık 45 kat arttırarak 6 GB/s bandgenişliği sunmaktadır.



şekil 5.2: Yazılım tabanlı enstrümantasyon mimarisi.

5.2. Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon Kullanımının Avantajları

Yazılım tabanlı enstrümantasyon, geleneksel enstrümanlar kullanımına göre oldukça avantajlıdır. Bu avantajların ne çıkanları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

Kolaylık:

Yazılım tabanlı enstrümantasyon, başta test ve lme amaçlı olmak üzere birçok uygulamada kolaylık getirmektedir. Örneğin geleneksel yöntemle yapılan ölçümlerde birden fazla enstrüman kullanılmakta (işaret üretici, osiloskop ve gerekli elemanlar) ve kullanıcının tüm bu enstrümanları farklı kullanıcı arayüzlerinden kullanması gerekmektedir. Buna karşın bilgisayar kontrollü olan yazılım tabanlı enstrümanlarla

yapılan ölçümde kullanıcı, bilgisayar üzerinde koşan bir kullanıcı arayüzünü kullanarak bütün enstrümanları istediği gibi kullanabilmekte ve yapılan işlemler kolaylaşmaktadır.

Taşınabilirlik:

Yazılım tabanlı enstrümantasyon uygulama yazılımları farklı platformlara kolaylıkla taşınabilir. Farklı uygulamalarda tüm donanım bileşenlerinin yerinin değiştirilmesi yerine sadece uygulama yazılımı platformlar arası taşınarak (örneğin masaüstü yerine dizüstü bilgisayar) farklı fiziksel şartlar için farklı çözümler üretilebilir.

İsteğe Göre Düzenleme:

Geleneksel enstrümanlarda isteğe göre düzenleme olanağı oldukça sınırlıdır. Örneğin geleneksel yöntemle kullanıcının bir işaret üreticine müdahalesi üretici tarafından tanımlanmış kullanıcı arayüzü ile sınırlıdır. Yazılım tabanlı enstrümantasyonla kullanıcı yazılım bileşenlerini kullanarak donanım bileşenlerini ihtiyaçlarına göre düzenleyebilir. Böylelikle ihtiyaca özel uygulamalar geliştirilebilir.

Bilgisayar Tabanlı:

Yazılım tabanlı enstrümantasyon bilgisayar tabanlı bir teknolojidir. Bu sebeple artan işlemci hızları, kolay donanım arayüz seçenekleri, artan hafıza kapasiteleri ve benzer teknolojik ilerlemeler yazılım tabanlı enstrümantasyon yönteminin de gücünü her geçen gün arttırmaktadır. Paralel olarak ta geliştirilen uygulamaların performansı ve artmaktadır.

Maliyet Avantajı:

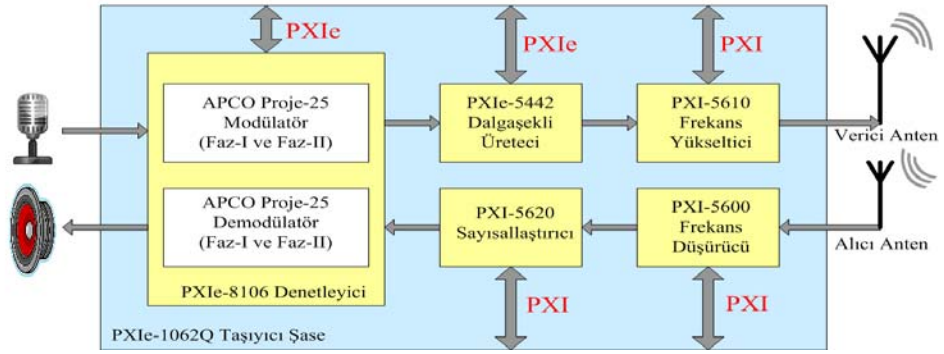
Yazılım tabanlı enstrümantasyonla geliştirilen uygulamalar isteğe göre kolaylıkla düzenlenebilir ve farklı platformlara taşınabilir. Böylelikle geliştirilen uygulamada kullanılan donanımlar isteğe göre değiştirilebilir ve maliyet kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Geleneksel yöntemde isteğe göre düzenleme olmadığı için maliyet yüksek olmaktadır.

6. APCO PROJE–25 TELSİZ STANDARTININ GERÇEKLENMESİ

Tez çalışması kapsamında APCO Proje–25 sayısal telsiz standardının Genel Hava Arayüzü ile tanımlanan ses haberleşmesi modu, yazılım tabanlı enstrümantasyon tekniği kullanılarak test telsiz platformu üzerinde gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen bu telsiz platformu yine Proje–25 standardına göre ASELSAN firması tarafından üretilmiş ticari ürün olan 4700 serisi el telsizi ile verici/alıcı modunda karşılıklı çalıştırılmıştır.

6.1. Gerçeklenen Sistemin Donanım Bileşenleri

Telsiz platformunun temel bileşenlerini National Instruments (NI) firmasının donanım ve yazılım ürünleri oluşturmaktadır. NI, 1979 yılında kurulmuş bir Amerika Birleşik Devletleri firmasıdır. Ürün yelpazesinin büyük bölümünü yazılım tabanlı enstrümantasyon çözümleri oluşturmaktadır. Bir önceki bölümde ayrıntıları verilen yazılım tabanlı enstrümantasyon ile kullanıcılar, esnek olmayan ve değiştirilemeyen işlevlere sahip cihazlar yerine kullanıcıya özel ve istenildiğinde yeni işlevler kazandırılabilen cihazlara sahip olmaktadır. Bu sebeple tez çalışmasında NI firmasının yazılım tabanlı enstrümantasyon çözümleri kullanılmıştır. NI çözümlerinin kullanılmasının diğer bir nedeni de çok fonksiyonlu, kolay kullanımlı ve pek çok yazılım geliştirme ortamıyla uyumlu bir API (Uygulama Programlama Arayüzü) bulunmasıdır. Bu API ile sistem üzerindeki program değiştirilmeden farklı donanımlar kullanılabilir. Proje–25 uyumlu olarak gerçekleştirilen telsiz platformu NI firmasının 6 temel donanım bileşeni, Creative SB X-Fi harici ses kartı, mikrofon ve hoparlörden oluşmaktadır (Şekil 6.1). Temel donanım bileşenleri aşağıda ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır.



Şekil 6.1: APCO Proje-25 telsiz platformu donanım mimarisi.

PXIe-1062Q Taşıyıcı Şase:

Telsiz platformunun taşıyıcı birimi olan PXIe-1062Q 8-yuvalı şase, geniş aralıklı test ve ölçüm uygulamaları için üretilmiştir (Şekil 6.2). Taşıyıcı şase telsiz platformunun bileşenleri arasında bağlantı arayüzünü sağlamaktadır [19]. Donanım bileşenleri ve bilgisayar üzerinde koştan yazılımlar bu arayüzü kullanarak birbirleriyle haberleşmektedir. Bu şase ile birlikte NI'nın tümleşik LCD monitör ve klavye aparatı kullanılmaktadır. PXIe-1062Q, 3U'luk PXI ve PXI Express modülleri ile çalışabilir. Yüksek bandgenişliğine sahip arkayüz veriyolu ile yüksek performans ihtiyacını karşılamaktadır. PXIe-1062Q şase PXI tanımlamalarının son versiyonundaki gereksinimlerin tamamını karşılamaktadır. Bunlar arasında; 10 MHz yerleşik referans saat işareti ile PXI ve PXI Express modüllerini kabul etme, PXI Tetikleme Yolu (PXI Trigger Bus), PXI modülleri için PXI Yıldız Tetikleme (PXI Star Trigger) ve 100 MHz yerleşik referans saat işareti, SYNC 100 ile modüllerin kendi 10 MHz referans saat işaretini üretebilmesi ve ayrıca PXI Express modülleri için PXI Diferansiyel Yıldız Tetikleme (PXI Differential Star Trigger) sayılabilir.



Şekil 6.2: PXIe-1062Q taşıyıcı şase.

PXIe-8106 Denetleyici:

PXIe-8106, PXI Express ve CompactPCI Express sistemlerinde kullanılan yüksek performanslı Intel Core 2 Duo (çift-çekirdekli işlemci) T7400 tabanlı gömülü denetleyicidir (Şekil 6.3). 2.16 GHz çift-çekirdekli işlemcisi ve çift-kanallı 667 MHz DDR2 hafızası ile yazılım tabanlı enstrümantasyon ve veri elde etme uygulamaları için uygun çözüm olan PXIe-8106 gerçekleştirilen telsiz platformunun bilgisayar bileşenini oluşturmaktadır. PXIe-8106 denetleyici Intel Core 2 Duo T7400 çift-çekirdekli işlemciye sahiptir [20]. Çift-çekirdekli işlemcilerin tek fiziksel paket içerisine yerleştirilmiş iki adet çekirdeği ya da hesaplama makinesi vardır. Çift-çekirdekli işlemciler eşzamanlı olarak iki hesaplama görevini yerine getirebilir. Bu yetenek çoklu görevli (multitasking) ortamlarda PXIe-8106 için avantaj sağlamaktadır. Örneğin Windows XP işletim sistemi, çoklu uygulamaların eşzamanlı olarak çalıştığı bir ortamdır. İki uygulama aynı anda iki ayrı işlemciye erişebilir ve buda toplam performansı önemli oranda arttırmaktadır.



Şekil 6.3: PXIe-8106 denetleyici.

PXI-5600 RF Frekans Düşürücü:

PXI-5600, 9 KHz - 2700 MHz frekans bandındaki telsiz işaretlerinin 20 MHz genişliğinde 15 MHz'lik ara frekans (IF) katına indirmek amacı ile kullanılmaktadır. Şekil 6.4'te görülen PXI-5600 frekans düşürücünün göze çarpan en önemli özellikleri; geniş gerçek-zamanlı bandgenişliği, yüksek kararlıklı zamanlama tabanı ve RF (radyo frekansı) analiz uygulamaları için PXI sayısallaştırıcılarla uyum içerisinde çalışmasıdır [21]. PXI-5600 frekans düşürücü +30 dBm'den -130 dBm'e kadar güçteki geniş sinyal aralığını 50 dBm'lik giriş zayıflatması ve 10 dB'lik ölçeklenebilir adımlarla elde edebilir. -140 dBm/Hz civarında alışı hassasiyeti ve 80 dB'den yüksek dinamik ölçüm aralığına sahiptir. 10 kHz dengeleyicide faz gürültüsü -94 dBc/Hz'den küçüktür. PXI-5600 frekans düşürücü ayrıca yüksek kararlıklı

zamanlama tabanı sağlar. Frekans kararlılığı ± 20 ppb (milyarda birlik değerler, 0.0000001%) ve frekans doğruluğu ± 50 ppb'dır. Bu özelliklerde PXI-5600 frekans düşürücüyü yüksek doğruluk gerektiren haberleşme sistemleri uygulamaları için ideal çözüm yapmaktadır. PXI-5600 frekans düşürücü RFSA yazılımını içerir. RFSA, PXI-5600 için sürücü seviyesinde bir arayüz sağlar. Bu yazılım LabWindows/CVI gibi yüksek seviyeli programlama araçlarını PXI-5600 frekans düşürücüyle bütünleştirmek için kullanılır.



Şekil 6.4: PXI-5600 frekans düşürücü.

PXI-5620 IF Sayısallaştırıcı:

PXI-5620, IF katına indirilmiş işaretlerin sayısal ortama aktarılması amacı ile kullanılmaktadır (Şekil 6.5). PXI-5620 tümleşik işaret işleme özelliğine ve 64 MS/s (milyon örnek/saniye) hıza kadar çalışabilen 14-bit'lik genlik çözünürlüğüne sahip bir sayısallaştırıcıdır. Dinamik aralığı ve çözünürlüğü PXI-5620 sayısallaştırıcıyı haberleşme uygulamaları için uygun bir çözüm yapmaktadır [22]. PXI-5620'nin frekans aralığı IF ve HF (yüksek frekans) frekanslarını da kaplamaktadır (10 kHz - 36 MHz arası). Böylelikle bu bantlarda kullanılan ticari veya askeri telsiz uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca 32 veya 64 MB yüksek hızlı tümleşik hafızası ile 32 milyona kadar reel 16-bit örnek yada 16 milyona kadar kompleks 16-bit'lik örnek alabilir. Gelişmiş hafıza yönetimiyle de aldığı bu örnekleri geleneksel donanım arayüzlerine çok daha hızlı iletebilmektedir. PXI-5620 sayısallaştırıcı SCOPE ve Spectral Measurements Toolkit (SMT) yazılımlarını içerir. SCOPE, PXI-5620 için sürücü seviyesinde bir arayüz sağlar. Bu yazılım LabWindows/CVI gibi yüksek seviyeli programlama araçlarını PXI-5620 sayısallaştırıcı ile bütünleştirmek için kullanılır. SMT ise yüksek seviyeli ölçüm yeteneklerinin (Analog

Demodülasyonlar, Yakın FFT, Genlik Kalibrasyonu, vs.) LabWindows/CVI gibi programlama araçları içerisinde kullanımı sağlanmaktadır.



Şekil 6.5: PXI-5620 sayısallaştırıcı.

PXI-5610 RF Frekans Yükseltici:

PXI-5610, 15 MHz – 35 MHz arasında istenilen IF giriş işaretlerini 250 kHz - 2700 MHz arası RF işaretine çeviren süperheteroid frekans yükselticidir (Şekil 6.6). PXI-5610, 20 MHz anlık band genişliği ve ± 50 ppm (%0.0001) kararlılık, düşük faz gürültülü 10 MHz referans saat işaretine sahiptir [23]. PXI-5610, 2-yuva ve 3U'luk bir karttır ve haberleşme sistemleri uygulamalarında modüler fonksiyon üreticileri ile uyumlu olarak çalışabilmektedir. PXI-5610 frekans yükseltici RFSG yazılımını içerir. RFSG, PXI-5610 için sürücü seviyesinde bir arayüz sağlar. Bu yazılım LabWindows/CVI gibi yüksek seviyeli programlama araçlarını PXI-5610 frekans yükselticiyle bütünleştirmek için kullanılır.



Şekil 6.6: PXI-5610 RF frekans yükseltici.

PXIe-5442 Seçmeli Dalgaşekli Üretici:

PXIe-5442, tümleşik işaret işleme yeteneği ile 100 MS/s hıza kadar çalışabilen 16 bit'lik seçmeli dalga şekli üreticidir (Şekil 6.7). Tümleşik işaret işleme yeteneği ile darbe şekillendirici, interpolasyon filtreler, kazanç ve ofset kontrol, sayısal kontrollü osilatör gibi fonksiyonlar gerçekleştirilebilir [24]. 16-bit çözünürlük ve 512 MB tümleşik hafızasıyla temelband I/Q ve IF işaret üretimi için haberleşme sistemlerinde

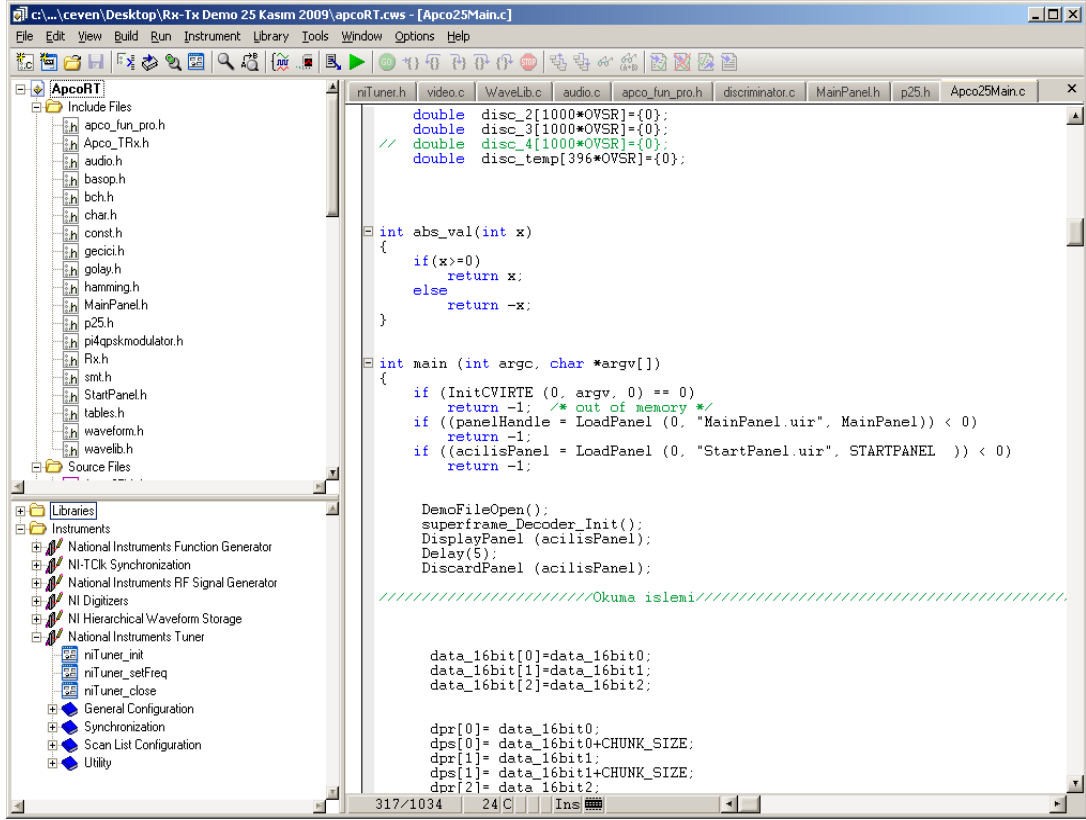
uygun çözüm olarak kullanılır. FGEN, PXIe-5442 için sürücü seviyesinde bir arayüz sağlar. Bu yazılım LabWindows/CVI gibi yüksek seviyeli programlama araçlarını PXIe-5442 seçmeli dalga şekli üretici ile bütünleştirmek için kullanılır.



Şekil 6.7: PXIe-5442 seçmeli dalgaşekli üretici.

6.2. Yazılım Geliştirme Ortamı ve Dili

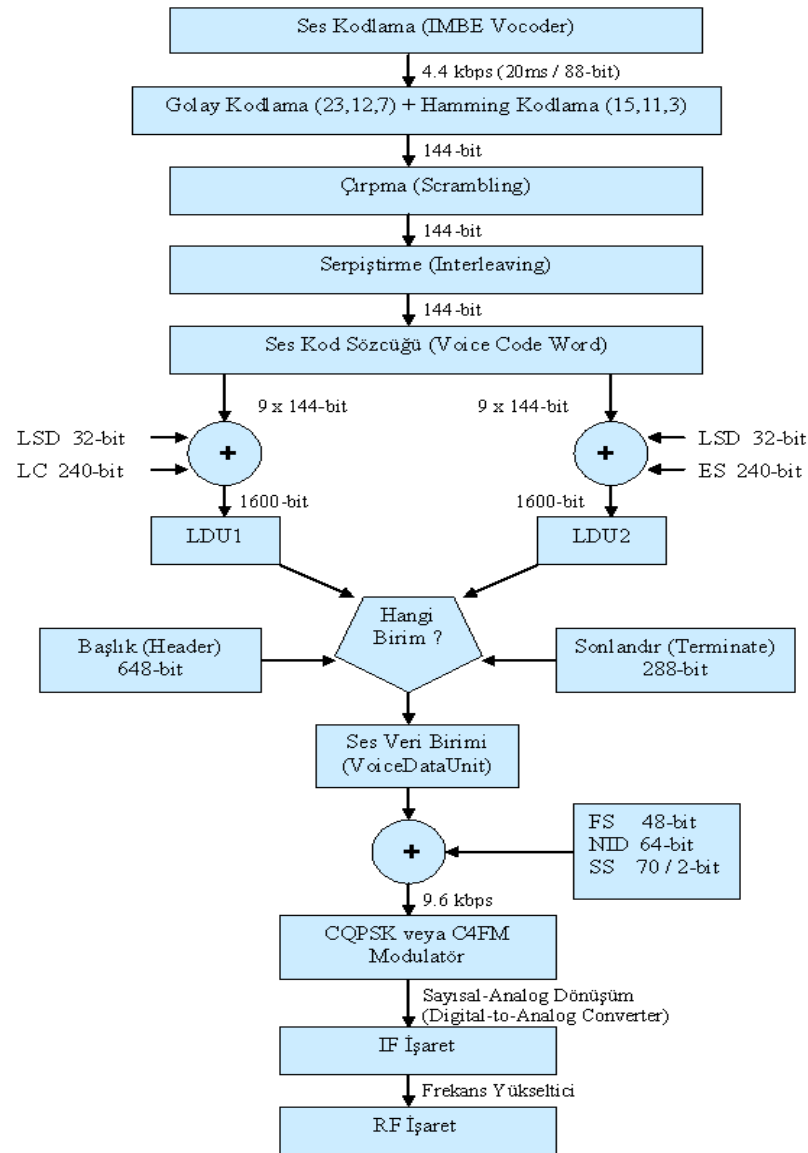
Telsiz platformu geliştirilirken NI firmasının olay-temelli (event-driven) ve ANSI C programlama ortamı olan LabWindows/CVI (kısaca CVI) programı (8.0 sürümü) yazılım geliştirme ortamı olarak kullanılmıştır (Şekil 6.8). Geliştirme ortamı ile uyumlu olarak da yazılım dili C seçilmiştir. Olay-temelli programlama, sistemin kullanıcıların işlemlerine göre programın yanıt vermesi temelli bir programlama yöntemidir. Bu yöntemde kullanıcının programın koştığı sistem üzerinde yaptığı her işlem (klavyeden bilgi girilmesi veya görsel bir nesnenin seçilmesi gibi) program tarafından birer olay olarak algılanır ve programın akışı bu olaya göre yönlendirilir. CVI (Sanal Enstrümantasyon için C) programının ilk sürümü DOS işletim sistemi için 1987 yılında yayınlanmış ve kısa süre sonrada Microsoft Windows platformuna göre yeniden uyarlanmış [25]. CVI programı, entegre I/O kütüphaneleri, analiz rutinleri, kullanıcı arayüzü araçları ve NI firmasının donanım ailesinin sürücü kütüphaneleriyle uyumlu çalışması nedeniyle bu tez çalışmasının yazılım bileşenlerinin gerçekleştirilmesinde oldukça verimli olmuştur.



Şekil 6.8: LabWindows/CVI yazılım geliştirme ortamı.

6.3. Telsiz Platformu Verici Bloğu Gerçeklemesi

Verici bloğu, APCO Proje-25 Faz-I ve Faz-II işaretlerini üretir. Bu blokta özetle, analog ses mikrofondan alınarak örneklenir, kodlanır, modüle edilir ve anten vasıtasıyla yollar. Mikrofon gelen sesi toplar ve bu ses USB ses kartı üzerinde örneklenip işlenir ve PXIe-8106 denetleyiciye verilir. IF frekans yükseltme amacıyla, denetleyici temelband modüleli örnekleri PXIe-5442 dalgaşekli üreticisine yollar. RF frekans yükseltme aşamasında, PXIe-5442'nin IF çıkışı PXI-5610'nun girişine bağlanır ve verici antende PXI-5610'nun çıkışına bağlanarak iletim gerçekleştirilir. Verici bloğunda gerçekleştirilen adımların akış diyagramı Şekil 6.9'da verilmiştir. Verilen bu akış diyagramına göre ilgili adımlar ayrıntılı olarak diyagram sonrasında maddeler halinde verilmiştir.



Şekil 6.9: Telsiz platformu verici bloğu akış diyagramı.

- Analog ses işareti mikrofon ile alınarak USB ses kartı tarafından 8 kHz’de örneklenir ve sonra veri oranını 4.4 kbit/s’ye düşürmek için IMBE vocoder ile APCO Proje–25 CAI’ de tanımlandığı şekilde kodlanır. Vocoder çıkışı 88-bit (20 ms) uzunluğunda bloklara bölünür.
- 88-bit uzunluğundaki bloklarda bulunan bitler önem derecesine göre Golay(23,12,7) veya Hamming(15,11,3) hata düzeltme kodlamalarından geçirilir (Şekil 6.10).

```

/* 12-bit vektör Golay(23,12,7) ile kodlanır ve
23-bit kodlanmış vektör elde edilir */
long int Golay_23_12_7_encode(int data_in)
{
    int codeword = 0;
    int temp;
    int i;

    for (i = 0; i < 12; i++)
    {
        temp = data_in & code_word_mask[i];
        if (temp >= 1)
            codeword ^= matrix[i];
    }

    return codeword;
}

/* 11-bit vektör Hamming(15,11,3) ile kodlanır ve
15-bit kodlanmış vektör elde edilir */
long int Hamming_15_11_3_encode(int data_in)
{
    int codeword = 0;
    int temp;
    int i;

    for (i = 0; i < 11; i++)
    {
        temp = data_in & code_word_mask_15[i];
        if (temp >= 1)
            codeword ^= matrix_15[i];
    }

    return codeword;
}

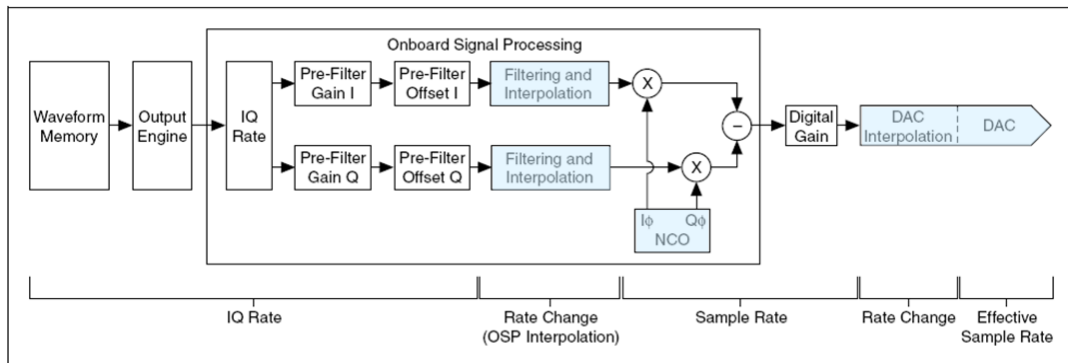
```

Şekil 6.10: Golay(23,12,7) ve Hamming(15,11,3) hata düzeltme kod bloğu.

- Kodlama çıkışındaki blok 114-bit PN dizisi ile çarpma işleminden geçirilir.
- Çarpma çıkışındaki blok serpiştirme işleminden geçirilir ve 144-bit uzunluğunda Voice Code Word (VC) elde edilir.
- 144-bit 9 tane VC, 240-bit LC ve 32-bit LSD CAI 'de tanımlandığı şekilde birleştirilerek LDU1 birimi oluşturulur. Benzer şekilde 144-bit 9 tane VC, 240-bit ES ve 32-bit LSD birleştirilerek LDU2 birimi oluşturulur.
- Verici bloğu ilk çalışmaya başladığında öncelikle 648-bit HDU birimi oluşturur ve yollar. HDU sonrasında haberleşme sonlandırılana kadar sırayla LDU1 ve LDU2 birimleri tekrarlı şekilde yollanır. Sonlandırma işareti gelince LDU1 veya LDU2'nin peşinden TDU birimi yollanır. CAI' de belirtildiği üzere 2 farklı TDU birimi vardır ve bu çalışmada LC bilgisi taşıyan TDU birimi (288-bit) gerçekleştirilmiştir.
- Her birim için CAI' de tanımlanan FS (48-bit), NID (64-bit) ve SS (her 70-bit için 2-bit) bitleri eklenir.
- Kullanıcı arayüzü kullanılarak Faz-I iletişim seçilmişse her birim C4FM modülatörden geçirilir. Faz-II iletişim seçilmişse CQPSK modülatörden geçirilir.
- Modülatör çıkışındaki 4800 sembol/s veri hızı (her sembol 2-bit, 9600 bit/s) 125 ile üstörnekleme (upsample) yapılır ve ardından 6 ile örnek seyreltme (decimate) yapılarak 100 kHz temelband örnekleme hızına ulaşılır.

Bu bölüme kadar yapılan işlemler denetleyici birimi üzerinde gerçekleştirilen temelband işlemlerdir. PXIe-5442'nin örnekleme frekansı ile uyumlu olması için modüleli temelband işaret örnekleme oranı 100 kHz olarak belirlenmiştir. Temelband kompleks örnekler PXIe-8106 denetleyicide üretilip belirli bir IF frekansına yükseltmek amacıyla PXIe-5442 seçmeli dalgaşekli üreticine yollanır. IF frekansı 15.1 MHz olarak belirlenmiştir. IF işaret sayısal olarak PXIe-5442'nin OSP birimi (Tümleşik Sinyal İşleme) üzerinde oluşturulur ve PXIe-5442'nin çıkışında analog işarete çevrilir. OSP programlanarak yapılan DUC (Sayısal Frekans Yükseltme) operasyonunda öncelikle filtreleme yapılır. Filtreleme sonrası interpolasyon ile örnekleme oranı yükseltmekte ve sonrasında NCO'dan (Sayısal Kontrollü Osilatör) gelen taşıyıcı modüle edilerek girişteki 100 kHz'lik temelband kompleks işaretten 15.1 MHz'de reel IF işareti üretilir. DUC işleminde, PXIe-5442'nin örnekleme oranı, OSP üzerindeki uygun interpolasyon oranı ve filtreler giriş temelband kompleks işaretin örnekleme oranına uygun şekilde ayarlanmıştır. OSP'nin blok diyagramı Şekil 6.11'de verilmiştir.

- PXIe-5442 üzerindeki OSP kullanılarak, 100 kHz örnekleme hızına sahip temelband işaret interpolasyon ile 100 MHz örnekleme frekansına çıkarılır. İnterpolasyon işlemi ile örneklenmiş sinyalin örnekleri arasına interpolasyon oranına göre ek sıfırlar koyulur ve sonra bu sıfırların değeri örneklenen sinyalin o noktadaki olası değerine çekilmektedir. PXIe- 5442 sadece 1–16384 aralığındaki tam sayı değerlerini kullanarak interpolasyon yapabilmektedir. 100 kHz'de gelen temelband örnekler, burada 1000 ile interpolasyondan geçirilerek 100 MHz örnekleme hızına ulaşılır.



Şekil 6.11: PXIe-5442 üzerindeki OSP birimin blok diyagramı.

- İnterpolasyon ile 100 MHz örnekleme hızına ulaşan kompleks temelband işaret, NCO'dan gelen 15.1 MHz'lik taşıyıcıyı modüle ederek, 15.1 MHz merkez frekansında 100 MHz ile örneklenmiş reel IF işaretinin üretilmesini sağlar. Sayısal bu işaret daha sonra OSP üzerindeki DAC'den (Sayısal/Analog Çevirici) geçirilerek analog IF işaretine çevrilip, PXI-5610'nun IF girişine verilir.
- IF işaretin RF frekansına yükseltilmesi PXI-5610 içerisinde gerçekleşir (Şekil 6.12). PXI-5610'nun frekans parametresi 160.1 MHz'e ayarlanır. Böylelikle RF işaret PXI-5610'nun çıkışına bağlanan anten üzerinden ayarlanan frekansta iletilir.

```

/*15.1 MHz IF işaret 160.1 RF işarete çıkarılı*/
void IF_to_RF_conversion(void)
{
    int i;

    niRFSG_Options (PXI5610, VI_TRUE, VI_TRUE, , &vi_5610);

    niRFSG_SetAttribute (vi_5610, "", UPCONVERTER_CENTER_FREQUENCY, 160.1e6);
    niRFSG_SetAttribute (vi_5610, "", CARRIER_FREQUENCY, 15.1e6);
    niRFSG_SetAttribute (vi_5610, "", UPCONVERTER_GAIN, -20);
    niRFSG_SetAttribute (vi_5610, "", SIGNAL_BANDWIDTH, 1e6);

    niRFSG_Commit (vi_5610);

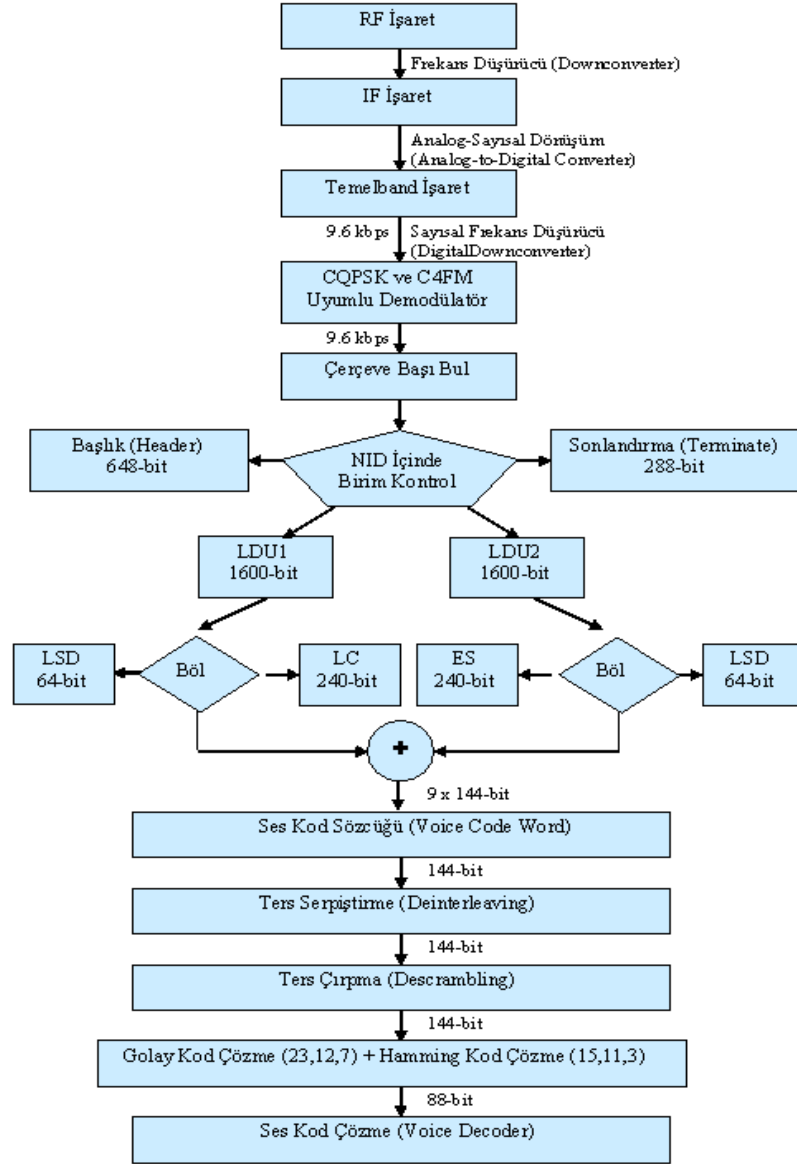
    for ( i=0;i<32000;i++)
    {
        sin_waveform[i].real = 20000;
        sin_waveform[i].imaginary = 0;
    }
}

```

Şekil 6.12: PXI-5610 ile IF işaretin RF frekansına yükseltilmesi.

6.4. Telsiz Platformu Alıcı Bloğu Gerçeklemesi

Alıcı modülü APCO Proje-25 Faz-I ve Faz-II işaretleri otomatik olarak algılar ve demodüle edebilir. Alıcı anten vasıtasıyla alınan RF işaretler öncelikle frekans düşürücüden geçirilir, demodüle edilir ve kod çözme işlemi yapılır. Elde edilen işaret hoparlöre yollanarak oradan dinlenilir. Alıcı anten PXI-5600 frekans düşürücünün girişine bağlıdır. PXI-5600'ün çıkışındaki IF işareti PXI-5620'nin girişine bağlıdır. PXI-5620 frekansı düşürülmüş ve filtrelenmiş temelband örnekleri PXIe-8106 denetleyiciye iletir. Denetleyici temelband işlemleri yapar ve çözülmüş ses işaretini USB ses kartı üzerinden hoparlöre yollar. Alıcı bloğunda gerçekleşen adımların akış diyagramı Şekil 6.13'de verilmiştir. Verilen bu akış diyagramına göre ilgili adımlar ayrıntılı olarak diyagram sonrasında maddeler halinde verilmiştir.

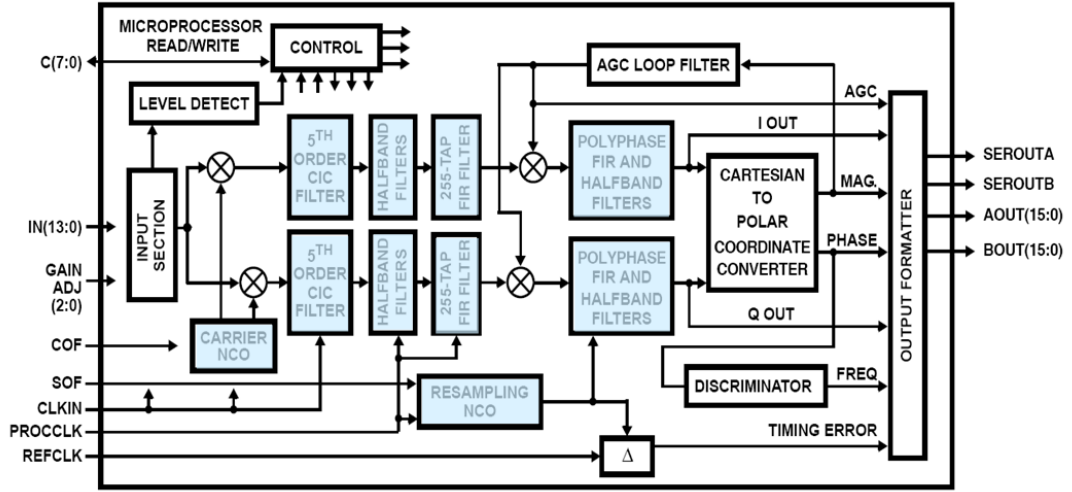


Şekil 6.13: Telsiz platformu alıcı bloğu akış diyagramı.

- PXI-5600'ün merkez frekansı gelen işaretin frekansına yani 160.1 MHz'e ayarlanır. Alıcı anten kullanılarak 160.1 MHz'de alınan RF işaret PXI-5600'ün IF çıkışında 15.1 MHz olarak PXI-5620'ya verilir.
- PXI-5620'ün 15.1 MHz'de aldığı IF işaret 64 MHz'de örneklenip sayısal forma çevrilir ve IF'den temelbanda düşürmek amacıyla PXI-5620 tarafından işlenir.

PXI-5620, PXIe-5442'ye benzer şekilde kullanıcı tarafından programlanmaya izin veren frekans düşürücü birimine sahiptir (Intersil-HS50214B). PXI-5620 üzerindeki Intersil-HS50214B programlanarak sayısal IF işareti temelbanda düşürülmektedir

[26]. Intersil-HS50214B'nin blok diyagramı Şekil 6.14'de verilmiştir. Intersil-HS50214B kullanılarak uygun DDC (Sayısal Frekans Düşürme) filtre konfigürasyonu ve uygun NCO taşıyıcı frekans değerleri ile alınan IF işaretten kompleks temelband işaret elde edilir. DDC, merkezi IF'de bulunan bir reel işareti temelband karmaşık bir işarete çevirir [27]. Frekans düşürmenin yanında çoğunlukla örnek seyreltme de gerçekleştirilir. Bu sayede daha düşük frekansta ve daha az kaynak kullanarak işaret işleme tekniklerinin uygulanması mümkün olur. Temelband işaretin demodülatörde beklenen örnekleme oranı ile PXI-5620 üzerindeki örnekleme oranının uyumlu olması için Polyphase-Resampler kullanılır.



Şekil 6.14: PXI-5620 üzerindeki Intersil-HS50214B birimin blok diyagramı.

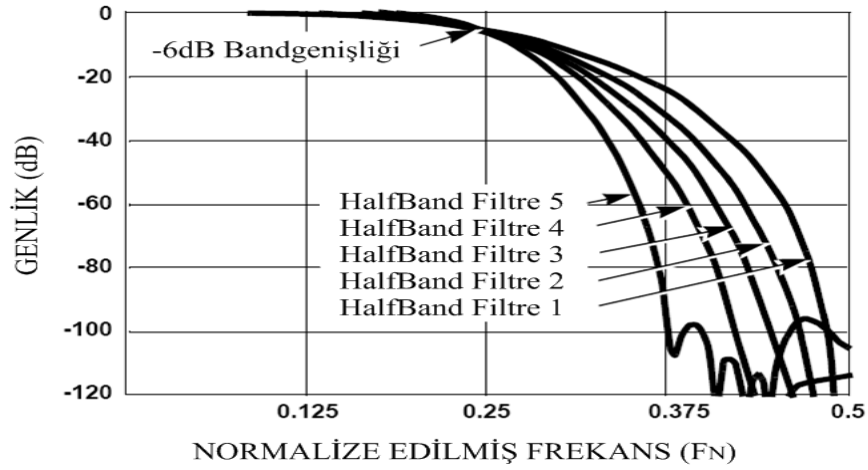
- IF frekansını 15.1 MHz olarak ayarlamak için NCO kayıttedicisine 32-bit uzunluğunda 16'lık sayı sisteminde (Hexadecimal) 3C666666 değeri girilir.
- PXI-5620 üzerinde açılabilen minimum bandgenişliği (60 kHz) açılır. APCO Proje-25 standardında bandgenişliği, Faz-I için 12,5 kHz, Faz-II için 6,25 kHz olduğundan, alıcıda da en az 12,5 kHz'lik bandgenişliği olması gerekmektedir. Intersil-HS50214B ile açılacak minimum bandgenişliği 60 kHz olduğu için APCO Proje-25 alıcısının gerçekleştirilebilmesi için uygundur.
- Örnek seyreltme (decimation) oranı 512 (32x16) ve örnekleme frekansı 125 kHz (64 MHz / örnek seyreltme oranı) olması gerekmektedir. Örnek seyreltme işlemi örneklemiş sinyalin bazı örneklerinin atılması ile veri boyutunun küçültmesi işlemidir. Yalnızca örnek seyreltme oranının katlarındaki örnekler alınır, diğer

örnekler atılır. Böylelikle örneklenen işaretin bandgenişliği düşürülmektedir. Bu amaçla öncelikle Intersil-HS50214B üzerindeki 5. derece CIC filtresi aktif hale getirilir ve çıkışındaki örnek seyreltme oranı 32 olarak ayarlanır. Böylece çıkıştaki örnekleme frekans 2 MHz'e ($64 \text{ MHz} / 32$) indirilir. CIC filtresi $f_{cic_out}/8$ frekansında 85 dB örtüşme zayıflaması (alias attenuation) sağlanmaktadır (Tablo 6.1). Böylece örtüşmesiz olarak $2*f_{cic_out}/8$ kadar bandgenişliği açabilmektedir. Dolayısıyla CIC çıkışında örnekleme frekansı 2 MHz iken açılan bant genişliği, $f_{cic_out}/4$, 500 kHz olmaktadır.

Tablo 6.1: Intersil-HS50214B içerisindeki CIC filtrenin karakteristiği.

Frekans ($f_{cic_out} /$)	Geçirme Bandı Zayıflaması (dB)	Örtüşme Zayıflaması (dB)
/4	4.6	52
/5	2.9	63
/6	2.0	72
/8	1.1	85
/10	0.72	96
/12	0.50	105

- Daha sonra HalfBand (HB) filtreler, sırasıyla HB1, HB2, HB3, HB4 filtreleri, aktif hale getirilir. Bu filtreler alçak geçiren filtre karakteristiğine sahiptir. Her birinin kesim frekansı giriş frekanslarının $1/4$ 'ü olup çıkışlarında 2 ile örnek seyreltme yapılmaktadır. Filtrelerin geçiş bölgesinin keskinliği giderek artarken, kontrollü girişime izin verilerek APCO Proje-25'in bandgenişliği korunmaktadır (Şekil 6.15). Böylece örnekleme hızı giderek düşürülürken, HB4 çıkışında, örnekleme frekansı 125 kHz ($2 \text{ MHz} / 16$) etkin bir filtreleme sağlanmış olur. HB4 çıkışında $f_{out} / 4$ ($125 \text{ kHz} / 4$), 31.25 kHz frekansında 105 dB örtüşme zayıflaması sağlanır ve dolayısıyla yaklaşık 60 kHz'lik bir bant genişliği açılır. Son olarak programlanabilir FIR filtresi ile kesim frekansı giriş frekanslarının $1/4$ 'ü, keskin bir filtreleme yapılarak 60 kHz'lik bant genişliği, 125 kHz'lik örnekleme frekansı elde edilir.

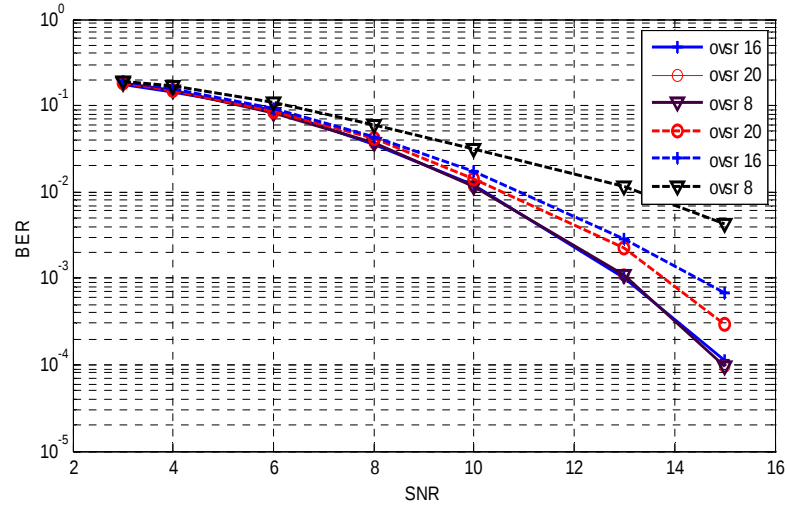


şekil 6.15: Intersil-HS50214B içerisindeki HalfBand filtrenin frekans cevabı.

Temelband demodölatör için gerekli örnekleme frekansı 96 kHz (20xSembol oranı) olmalıdır. Bu sebeple Intersil-HS50214B üzerindeki Polyphase-Resampler ile oransal örnek seyreltme yapılmalı ve örnekleme frekansı 125 kHz'den 96 KHz'e çekilmelidir

- Intersil-HS50214B üzerindeki Polyphase-Resampler kullanılarak 1.302 (125 / 96) oranında oransal örnek seyreltme yapılır. Intersil-HS50214B üzerindeki Polyphase- Resampler, 1 - 4 arasında oransal örnek seyreltme yapabilmektedir.
- PXI-5620 çıkışında 96 kHz'de elde edilen temelband örnekler PXIe-8106 denetleyiciye yollar ve burada temelband işlemler yapılır.

Gerçeklenen APCO Proje-25 alıcı, Faz-I ve Faz-II tip işaretleri otomatik olarak algılar ve demodölasyon yapar. CAI'de tanımlanan çeręeve ayrıştırma işlemleri yapıldıktan sonra, ses blokları IMBE vocoder ile çözölerek yollanan ses elde edilir. şekil 6.16'da C4FM ve CQPSK işaretlerinin her ikisini birden demodöle edebilmek için tasarlanan demodölatör yapısı gösterilmiştir [28]. Bu yapıya göre girişteki temelband işaret frekans ayırıcıdan geçirilmekte ve çeręeve eş zamanlamasının sağlanması beklenmektedir. Çeręeve eş zamanlaması sağlandıktan sonra, işaret biriktir ve boşalt filtresinden geçirilmektedir. Bu sırada çeręeve eş zamanlaması sürekli korunurken, örnekleme fazında oluşabilecek hatalar da düzeltilmektedir.



Şekil 6.17: Farklı SNR ve örnekleme frekanslarında BER başarımının değişimi.

- PXI-5620'den alınan temelband örnekler, PXIe-8106 üzerinde CQPSK ve C4FM uyumlu demodülatör bloğundan geçirilir ve çıkışta bit dizisi elde edilir.
- Alınan bit dizisinde öncelikle FS bilgisine göre çerçeve başı bulunur (Şekil 6.18).

```

/* Bit dizisinden FS bilgisine göre çerçeve başı bulunması */
int FS_sync(int* discriminatorOut0, int* discriminatorOut1, int* packet_start_index)
{
    int D, n, k=0, coarse_sym_index, sym_idx_off;
    int j=0, maxL=0, maxH=0;
    double *temp, autoCorrL=0, autoCorrH=0;

    for (n=0; n<(blok_uzunlugu*OVSF); n++)
        MUL1[n]=discriminatorOut0[n]*discriminatorOut1[n];

    autoCorrL=autoCorrL-MUL1[n-1]+MUL1[n-1+24*OVSF];

    if(autoCorrL>maxL)
    {
        maxL =autoCorrL;
    }

    fs_detected= FS_find( discriminatorOut0, discriminatorOut1, coarse_sym_index);
    if(fs_detected)
    {
        *packet_start_index=(coarse_sym_index+sym_idx_off);
        return 1;
    }

    fs_detected= FS_find( discriminatorOut0, discriminatorOut1, coarse_sym_index);
    if(fs_detected)
    {
        *packet_start_index=(coarse_sym_index+sym_idx_off);
        return 2;
    }

    return 0;
}

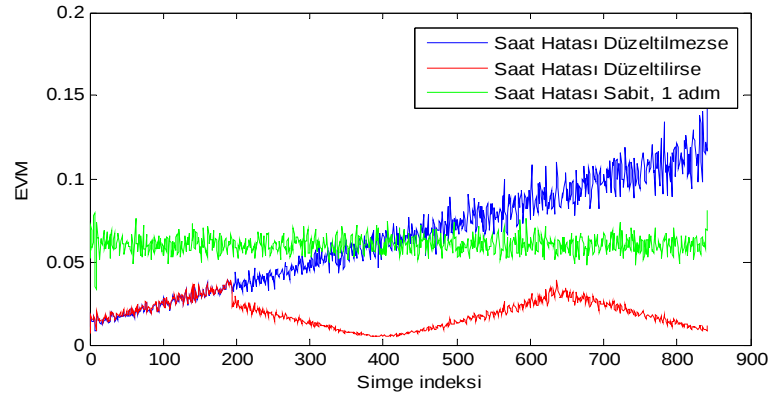
```

Şekil 6.18: FS bilgisine göre çerçeve başı bulunması.

- Çerçevedeki NID'nin çözülmesiyle elde edilen DUID değerlerine göre alınan bit dizinin hangi birime ait olduğu belirlenir (HDU, TDU, LDU1 veya LDU2)
- HDU ve TDU için CAI referans alınarak çerçeve parçalama işlemleri yapılır.

- LDU1 ve LDU2 birimleri ayrı ayrı parçalama işlemine tabi tutularak taşıdıkları LC, ES, LSD ve VC bit dizileri elde edilir.

Örnekleme saatinde zamanla kaymalar olabileceğinden, temelband demodülatör yapısında bu kaymayı hesap eden ve düzeltten birimler bulunmaktadır. Bu amaçla demodülatörde, standartta tanımlı herhangi bir birim için simge kararları verilmeden önce, birimin başındaki ve sonundaki FS dizisi bulunup örnekleme fazının birim boyunca nasıl değiştiği belirlenmektedir. Bu yöntemin bir başka avantajıda örnekleme frekansının, sembol hızının tam katı olma zorunluluğunun ortadan kalkması ve yaklaşık değerinin yeterli olmasıdır [29]. Şekil 6.19’da, LDU1 veri birimi için, örnekleme saatinde 100 ppm’lik (parts per million – milyonda birlik) bir hata olması halinde, birim boyunca ortalama Hata Vektör Büyüklüğü (EVM) değişimi örnekleme fazının düzeltilmesi ve düzeltilmemesi durumlarında gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, örnekleme saatindeki hatanın giderilmemesi halinde, EVM değeri giderek büyümektedir. Artan EVM değeri yanlış sembollere karar verilmesine neden olabileceği gibi, örnekleme saatindeki hatanın giderilmemesi çerçeve eşzamanlılığının da bozulmasına yol açacaktır.



Şekil 6.19: SNR=30 dB için, 100 ppm olan örnekleme saati hatasının düzeltilmesi ve düzeltilmemesi durumlarının EVM üzerindeki etkileri.

- Elde edilen her 9 tane VC iki boyutlu bit dizisinde (VC[9][72]) bir araya getirilir.
- İki boyutlu bu bit dizisi CAI referansına göre ters serpiştirme işleminden geçirilir.
- Ters serpiştirme sonrası elde edilen 144-bit dizi, ters çırpma işleminden geçirilir.
- Elde edilen 144-bit daha sonra Golay(23,12,7) veya Hamming(15,11,3) hata kod çözme işlemlerinden geçilir.
- Kod çözme işleminden sonra elde edilen bit dizisi IMBE vocoder ile çözülerek

verici tarafından yollanan ses bilgisi elde edilir. Şekil 6.20’de verilen kod bloğu ile çözülen ses bilgisi PXIe-8106 denetleyiciye USB üzerinde bağlı olan harici ses kartına yollanır ve ses kartına bağlı hoparlör üzerinden bu ses mesajı dinlenir.

```
/*Vocoder ile çözülen ses mesajı usb ses kartına yollanır */
void AudioBufferStreaming(PWAVELIB pWaveLib, UINT Index)
{
    static int indexCounter = 0;

    UINT uiBytesNotUsed = SAMPLE_SIZE_RX;

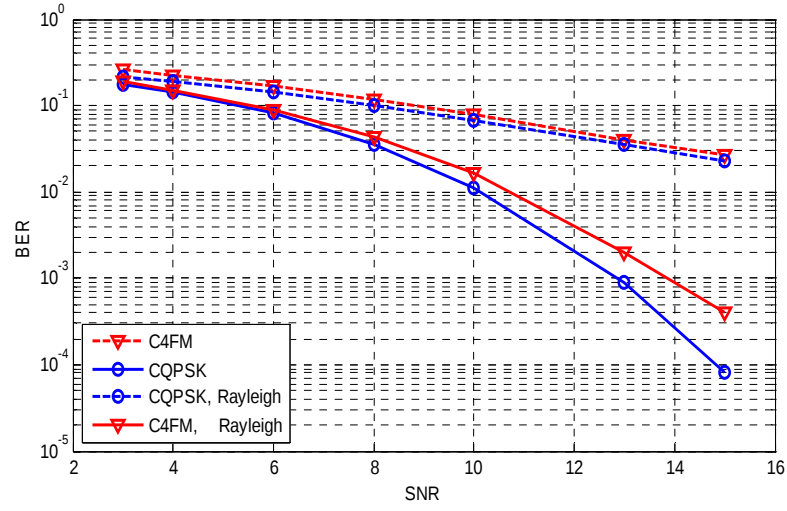
    pWaveLib->WaveHdr[Index].dwFlags &= ~WHDR_DONE;

    if(pWaveLib->WaveSample.Size - pWaveLib->WaveSample.Index < uiBytesNotUsed)
    {
        memcpy(pWaveLib->AudioBuffer[Index], pWaveLib->WaveSample.pSampleData +
            pWaveLib->WaveSample.Index, pWaveLib->WaveSample.Size - pWaveLib->WaveSample.Index);
        uiBytesNotUsed -= (pWaveLib->WaveSample.Size - pWaveLib->WaveSample.Index);
        memcpy(pWaveLib->AudioBuffer[Index], pWaveLib->WaveSample.pSampleData, uiBytesNotUsed);
    }
    else
    {
        memcpy(pWaveLib->AudioBuffer[Index], pWaveLib->WaveSample.pSampleData +
            pWaveLib->WaveSample.Index, uiBytesNotUsed);
        pWaveLib->WaveSample.Index = (pWaveLib->WaveSample.Index + 2048) % (8192);
        currentReadPosition = pWaveLib->WaveSample.Index;
    }

    pWaveLib->WaveHdr[Index].lpData = pWaveLib->AudioBuffer[Index];
    pWaveLib->WaveHdr[Index].dwBufferLength = SAMPLE_SIZE_RX - uiBytesNotUsed;
}
```

Şekil 6.20: USB ses kartına yollanan ses mesajı.

Alıcı bloğunun çok-yollu Rayleigh sönümlmeli bir kanaldaki başarımını incelemek amacıyla; 4 katsayılı ve uzunluğu 4 olan, katsayıların düzgün dağılımlı ve bir çerçeve boyunca sabit olduğu bir kanal oluşturulmuştur. Ayrıca işaret üzerinde 100 ppm’lik örnekleme saati hatası ve 200 Hz frekans kayması olduğu düşünülmüştür. Böyle bir senaryoda, C4FM ve CQPSK işaretleri için alıcının BER başarımının değişimi Şekil 6.21’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi CQPSK alıcısının başarımı, sönümlmeli olmayan kanalda C4FM’den biraz daha iyiye, sönümlmeli kanalda benzer olmaktadır.



Şekil 6.21: Frekans seçici sönmlemeli ve sönmlemeli olmayan kanallarda alıcının BER başarıımı.

6.5. Telsiz Platformunun Kullanıcı Arayüzü ve Test Edilmesi

Gerçeklenen APCO Proje-25 telsiz platformunun kullanıcı arayüzü Şekil 6.22’de verilmiştir. PXIe-8106 denetleyici üzerinde koşan bu arayüz kullanılarak donanım bileşenleri kontrol edilmekte ve telsiz platformu kullanılmaktadır.



Şekil 6.22: APCO Proje-25 telsiz platformunun kullanıcı arayüzü.

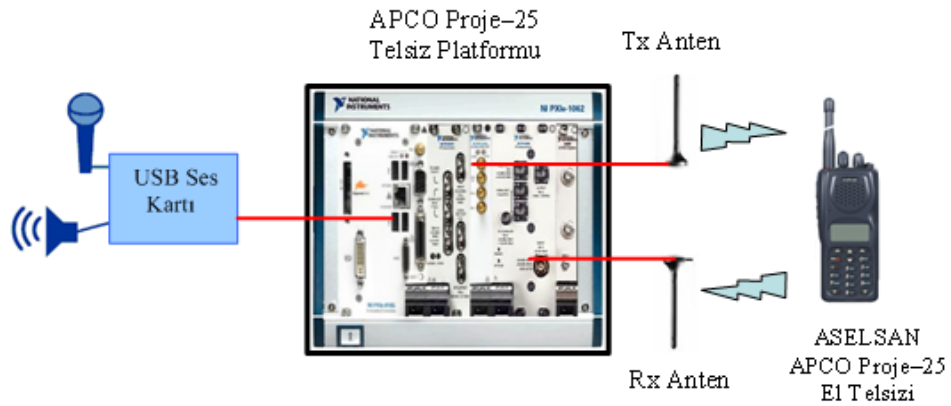
Arayüzün sol üst ve sağ üst tarafında alıcı (Rx Kuvvetlendir) ve verici (Tx Kuvvetlendir) kuvvetlendirme panelleri bulunmaktadır. Bu paneller kullanılarak alıcı ve vericinin hassasiyeti ayarlanmaktadır. Hassasiyet ayarı Maks, Orta ve Min olmak üzere 3 adımlıdır. Bu ayar ile işaret alımındaki ve iletimindeki hassasiyet her adımda yaklaşık 10 dBuV kadar arttırılabilmekte yada azaltılabilmektedir. Yani Min (minimum) ile Maks (maksimum) seviyeleri arasında, alınan veya yollanan işaretin hassasiyeti yaklaşık 20 dBuV kadar değişmektedir. Yazılım PXI-5600 frekans düşürücünün ve PXI-5610 frekans yükseltici üzerindeki bazı parametreleri değiştirerek (öntanımlı zayıflatıcı birimlerini iptal ederek) hassasiyeti arttırmaktadır. Hassasiyet ayarı alıcı ve verici için ön tanımlı olarak Min değerine ayarlanmıştır. Hassasiyeti değiştirmek için hassasiyet kontrol çubuğu fare ile tıklanarak yukarıda bahsedilen 3 değerden uygun olanına getirilir.

Arayüzün orta alt tarafında hoparlörden verilen sesin kuvvetinin ayarlandığı yuvarlak buton bulunmaktadır. Ses butonun üzerinde çalışma anında telsiz haberleşmesine ait mesaj bilgilerinin gösterildiği Mesaj Gösterim çerçevesi bulunur. Bu çerçevenin üzerinde telsiz verici bloğunun fazlarının seçildiği FAZ-I ve FAZ-II butonları bulunmaktadır. FAZ-I seçildiğinde telsiz vericisi Faz-I uyumlu çalışmaktadır (12.5 kHz bandgenişliği ve C4FM modülasyonu). FAZ-II seçildiğinde telsiz vericisi Faz-II uyumlu çalışmaktadır (6.25 kHz bandgenişliği ve CQPSK modülasyonu). Alıcı bloğu için Faz-I veya Faz-II seçimine gerek yoktur, çünkü alıcıda her iki fazı da çözen ortak demodülatör yapısı kullanılmıştır. Faz seçim butonlarının üzerinde kullanılan RF işaretin merkez frekansı gösterilmektedir. Gerçeklenen test telsiz platformunda sadece 160.1 MHz merkez frekansı kullanıldığı için bu uygulamaya özel olarak RF merkez frekans değeri sabit olarak girilmiştir.

Arayüzün sol orta ve sağ orta tarafında alıcı ve verici için ilk çalıştırmada donanım bileşenlerinin ayarlandığı Rx Ayarla ve Tx Ayarla butonları bulunmaktadır. Rx Ayarla tıklanarak, PXI-5600 frekans düşürücünün hassasiyeti arayüzde seçilen değere göre ve merkez frekansı da 160.1 MHz'e ayarlanır. Tx Ayarla tıklanarak, PXI-5610 yükselticinin hassasiyeti arayüzde seçilen değere göre, merkez frekansı 160.1 MHz'e ve PXIe-8106 denetleyici üzerinde üretilen temelband işaretin çeşidi seçilen faza göre ayarlanır.

Arayüzün sağ alt ve sol al taraflarında alıcı ve verici için haberleşmenin başlatılıp durdurulduğu butonlar bulunmaktadır. Gerçeklenen telsiz platformunda alıcı bloğu çalışırken verici pasif konumda olmakta ve verici çalışırken de alıcı pasif duruma geçmektedir. RX BAŞLAT tıklanınca alıcı bloğu aktif olur ve telsiz platformu alıcı modunda çalışmaya başlar. RX DURDUR tıklanınca alıcı bloğunun çalışması durdurulur. TX BAŞLAT tıklanınca verici bloğu aktif olur ve telsiz platformu verici modunda çalışmaya başlar. TX DURDUR tıklanınca verici bloğunun çalışması durdurulur.

Gerçeklenen telsiz platformu ASELSAN firması tarafından üretilen 4700 serisi APCO Proje-25 el telsizi ile karşılıklı çalıştırılarak test edilmiştir (Şekil 6.23). Uygun bantda anten kullanılarak RF üzerinden farklı mesafelerde ve farklı hassasiyet seviyelerinde yapılan testlerde gerçekleştirilen telsiz platformunun, 4700 serisi el telsizi ile alıcı ve verici modunda haberleşmesi sorunsuz olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.23: Gerçeklenen telsiz platformu ve el telsizinin karşılıklı çalıştırılması.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon tekniği kullanarak APCO Proje-25 telsiz platformu gerçekleştirilmiştir. Yazılım Tabanlı Enstrümantasyon ile yapılan çözümlerin geleneksel donanım tabanlı çözümlerden temel farkı kullanıcının yeniden düzenlemesine imkan vermesidir. Bu çalışmayla da yeniden düzenlemeye imkân veren yazılım tabanlı enstrümanlar kullanılarak kamu güvenliği ve acil durum haberleşme sistemlerinde kullanılan açık mimarili APCO Proje-25 sayısal telsiz haberleşme sisteminin Genel Hava Arayüzü gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen telsiz platformu ASELSAN firmasının ticari ürünü olan 4700 serisi APCO Proje-25 el telsizi ile test amaçlı olarak başarılı bir şekilde karşılıklı çalıştırılmış ve farklı hassasiyet seviyeleri için performansı gözlemlenmiştir.

Gerçeklenen sistemin alıcı yapısında eşzamanlı olmayan, işaretin frekans değişimlerine dayalı bir alıcı yapısı geliştirilmiştir. CQPSK için eşzamanlı alıcı kullanılması durumunda BER başarımı +2 dB'ye kadar artacaktır [30]. Ayrıca eşzamanlı alıcı kullanılması alıcı bloğunda denkleştirici kullanma fırsatı da vereceğinden, çok yollu sönümlemeli kanaldaki BER başarımında da önemli bir iyileştirme sağlanacaktır. Fakat CQPSK için eş zamanlı bir alıcı kullanmadan önce, alıcıda gelen işaretin türüne, C4FM ya da CQPSK olduğuna (Faz-I veya Faz-II) karar verebilmemiz gerekmektedir. Böyle olması halinde alıcıda gelen işaretin türüne göre uygun demodülatörün seçilmesi ve BER başarımında artış sağlanabilir.

Tez çalışması kapsamında telsiz haberleşme sistemleri gelişim süreciyle birlikte incelenmiş ve bugün kullanımı giderek yaygınlaşan sayısal telsiz haberleşme sistemleri tanıtılmıştır. Böylelikle başta kamu güvenliği ve acil durum haberleşmesinde kullanılan sayısal telsiz haberleşme sistemleri hakkında önemli bilgi birikimi edinilmiştir. Bu birikimlerin ışığında yine başta kamu güvenliği ve acil durum haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere gerçekleştirilecek güncel haberleşme

standartları veya özgün ihtiyaçlara göre oluşturulabilecek yeni standartlar için oldukça faydalı olacak teknik yeterlilik elde edilmiştir.

Telsiz sistemi gerçeklenirken yeniden düzenlemeye izin veren RF, IF, temelband sinyal işleme alt blokları ve bu blokların kolay ama yüksek performansla programlanmasına imkân veren yazılım geliştirme ortamı kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda gerçeklenen standardın yanında ihtiyaçlara göre geliştirilecek benzer veya farklı sistemler için yazılım tabanlı enstrümantasyon bileşenleri kullanarak teknik altyapı oluşturulmuş ve bu altyapı üzerinde tecrübe kazanılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Macario, R. C. V., “ Personal and Mobile Radio Systems”, **Peter Peregrinus**, London, England, 14-33, (1991).
- [2] Ketterling, H-P. A., “Introduction to Digital Professional Mobile Radio”, **Artech House, Inc.**, 1-25, (2004).
- [3] Wikipedia, 2010, Two-way radio [online], Wikipedia-The Free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Two-way_radio (**Ziyaret tarihi: 07 Nisan 2010**).
- [4] Gardiner, J., West, B., “Personal Communication Systems and Technologies”, **Artech House, Inc.**, 1-25, (1995).
- [5] Lathi, B. P., “Modern Digital and Analog Communication Systems”, **Oxford University Press.**, 5-18, (1998).
- [6] TETRA-MOU, 1996-2010, TETRA Association [online], www.tetramou.com, <http://www.tetramou.com/tetramou.aspx?id=44> (**Ziyaret tarihi: 03 Nisan 2010**).
- [7] TETRAPOL Forum, 2009, TETRAPOL Features and Functionality [online], www.tetrapol.com, http://www.tetrapol.com/technology/publicly_available_specifications.html (**Ziyaret tarihi: 13 Nisan 2010**).
- [8] *Telecommunications Industry Association. APCO Project 25 System and Standarts Definition*, Arlington: Telecommunications Industry Association, 1995. TIA/EIA- 102.A
- [9] APCO International, 2010, About APCO [online], www.apcointl.org, <http://www.apcointl.org/new/about/>, (**Ziyaret tarihi: 17 Nisan 2010**).
- [10] Lunness, P., “P25 Radio Systems: Training Guide”, **Daniels Electronics Ltd.**, 1-58, (2007).
- [11] *Telecommunications Industry Association. Project 25 FDMA Common Air Interface New Technology Standards Project Digital Radio Technical Standards*, Arlington: Telecommunications Industry Association, 1998. TIA/EIA-102.BAAA.
- [12] *Telecommunications Industry Association. Project 25 Vocoder Description*, Arlington : Telecommunications Industry Association, 2003., ANSI/TIA-102.BABA

[13] *Telecommunications Industry Association. Project 25 Packet Data Specifications – New Technology Standards Project – Digital Radio Technical Standards*, Arlington : Telecommunications Industry Association, 2005., ANSI/TIA-102.BAEB-A-2005.

[14] Çeven, M., Sayıntı, A. B., Dinçer, H., “APCO Proje-25 Veri Bağlantıları için IP Başlık İndirgeme”, **IEEE 17. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU)**, Nisan 9-11, 2009.

[15] National Instruments Corporation, 2005, About Virtual Instrumentation [online], [www.ni.com, http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2964](http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2964) (**Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2010**).

[16] Reed, J. H., “Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering”, **Prentice Hall PTR.**, 10-23, (2002).

[17] National Instruments in Academia., “A Directory of Coursework and Research Using Computer-Based Instrumentation”, **Austin, TX: National Instruments, Inc.**, 1996, Life Sciences, Bölüm 3, sayfa. 17.

[18] Des-Jardin, L., “*Virtual Instruments and the Role of Software. Electronic Instrument Handbook*”. **McGraw-Hill**, 44.1 – 44.14, (1995).

[19] NI PXIe-1062Q Kullanım kılavuzu, National Instruments Corporation, **Part Number: 779633-01**.

[20] NI PXIe-8106 Kullanım kılavuzu, National Instruments Corporation, **Part Number: 779921-01**.

[21] NI PXI-5600 Kullanım kılavuzu, National Instruments Corporation, **Part Number: 778283-01**.

[22] NI PXI-5620 Kullanım kılavuzu, National Instruments Corporation, **Part Number: 778282-01**.

[23] NI PXI-5610 Kullanım kılavuzu, National Instruments Corporation, **Part Number: 778737-01**.

[24] NI PXIe-5442 Kullanım kılavuzu, National Instruments Corporation, **Part Number: 780109-02**.

[25] NI LabWindows/CVI Kullanım kılavuzu, National Instruments Corporation, **Part Number: 373552F-01**.

[26] HSP50214B Veri yaprağı, Intersil, FN4450.4, Mayıs 2007.

[27] Matthews, S., “Flexible Architectures for Wideband SDR Channelisation”, **Software Defined Radio Technical Conference and Product Exposition**, November 14-18, 2005.

[28] Zorlu, H. E., Çeven, M., Arslan, H., “APCO Proje-25 Standardında C4FM ve CQPSK İşaretlerinin Algılanması”, **IEEE 17. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU)**, Nisan 9-11, 2009.

[29] Chennakeshu, S. and Saulnier, G. J., “*Differential* detection of $\Pi/4$ -DQPSK for digital cellular radio”, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Vol.42 No.1 February 1993.

[30] Liu, C-L., and Feher, K., “Noncoherent detection of $\Pi/4$ -QPSK systems in a CCI-AWGN combined interference environment”, **IEEE 39th Vehicular Technology Conference**, San Francisco, 1989.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2000 yılında girdiği ÖSS sınavı sonucunda İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 1 yıl ingilizce hazırlık eğitimi aldıktan sonra başladığı bölümünden 2005 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun oldu. Yaklaşık 1.5 yıl özel sektörde çalıştıktan sonra 2006 yılı sonunda çalışmaya başladığı TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü’nde halen Araştırmacı olarak görev yapmaktadır.