

Prilog unaprjeđenju sustava pomorskih VHF komunikacija uvođenjem digitalnih tehnologija

Mrak, Zoran

Doctoral thesis / Disertacija

2012

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:495327>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

Zoran Mrak

**PRILOG UNAPRJEĐENJU
SUSTAVA POMORSKIH VHF KOMUNIKACIJA
UVODENJEM DIGITALNIH TEHNOLOGIJA**

Doktorski rad

Rijeka, 2012.

Doktorski rad pod naslovom

**PRILOG UNAPRJEĐENJU SUSTAVA POMORSKIH VHF
KOMUNIKACIJA UVOĐENJEM DIGITALNIH TEHNOLOGIJA**

obranjen je 6. srpnja 2012. godine na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci
pred povjerenstvom u sastavu:

1. Dr. sc. Josip Sušanj, znanstveni savjetnik Pomorskog fakulteta
Sveučilišta u Rijeci - mentor
2. Dr. sc. Vinko Tomas, izvanredni profesor Pomorskog fakulteta
Sveučilišta u Rijeci
3. Dr. sc. Josip Kasum, izvanredni profesor Pomorskog fakulteta
Sveučilišta u Splitu

Sažetak

U disertaciji je provedeno istraživanje tehničkih i tehnoloških aspekata digitalizacije sustava pomorskih VHF komunikacija. Predloženo rješenje uzima u obzir preporuke ITU-a za istraživanja problematike povećanja broja kanala u pomorskom VHF području, i to: za tehničke karakteristike uređaja, kodiranje govora, karakteristike prijenosnog medija, ocjenjivanje kvalitete signala, raspodjelu frekvencijskih pojaseva. Također su uvaženi i ostali parametri koji ograničavaju raspon mogućih rješenja.

Predložak za analizu prednosti i slabosti digitalnih tehnologija prijenosa signala u disertaciji se izvodi iz iskustava kopnenih radiokomunikacijskih sustava budući da su se kopneni radiokomunikacijski sustavi razvijali iznimno brzo u proteklih dvadeset godina, uglavnom neopterećeni starijim tehnološkim rješenjima i ograničenjima regulatornih agencija kao što je slučaj u pomorstvu.

Istraživanje za potrebe disertacije provedeno je kroz nekoliko sustavno povezanih faza. Utvrđene su najprije karakteristike govornih signala radi odabira prikladnog načina kodiranja. Potom su ispitani i uspoređeni tehnički parametri šest kopnenih komunikacijskih sustava, te se na toj podlozi postavio idejni model digitalnog pomorskog VHF komunikacijskog sustava. Provedena je komparativna analiza kvalitete signala digitalnog sustava, postojećeg analognog sustava i alternativnog analognog sustava s udvostručenim brojem kanala. Izračunom kapaciteta pomoću Erlang C modela potvrđena je temeljna hipoteza da je digitalni sustav sposoban povećati broj raspoloživih komunikacijskih kanala, uz održavanje zadovoljavajuće razine kvalitete informacije. S obzirom na predvidive zahtjeve uspostave predloženog rješenja i probleme koji se mogu očekivati pri planiranju procesa prijelaza, disertacija završava sistematizacijom prednosti i problema implementacije predložene digitalne tehnologije.

Ključne riječi: *pomorske komunikacije, VHF radiotelefonija, kodiranje signala, digitalne VHF komunikacije, performanse sustava*

Contribution to the Improvement of Maritime VHF Communications system by Introducing Digital Technologies

(Doctoral dissertation)

Summary

The dissertation explores the technical and technological aspects of digitalization of maritime VHF communications. The proposed solution takes into account the recommendations of the ITU defining research parameters for increasing the number of channels in the VHF maritime area. These include parameters such as: the technical characteristics of devices, speech coding, the characteristics of transmission media, signal quality assessment, distribution of frequency bands. Other parameters that limit the possibilities of increasing the number of channels in the VHF maritime area are also taken into consideration.

Terrestrial radio communication systems have evolved extremely rapidly in the past twenty years, largely unencumbered by older technologic solutions and limitations of regulatory agencies and as such, they represent a valuable source of insight into possible solutions. Therefore, the framework for analyzing the strengths and weaknesses of digital signal transmission technology in the thesis is derived from the experiences of terrestrial wireless systems.

The research was conducted through several systematically related phases. The first step was to establish the characteristics of the speech signal in order to select a suitable method of coding. The second part of the research examined and compared the technical parameters of six terrestrial communications systems. This comparison and evaluation later served for proposing a new conceptual model of a digital maritime VHF communications system. In the third step, a comparative analysis was carried out in order to compare the voice signal quality for three alternative solutions: the proposed digital system, the existing analogue system and the alternative analog system based on a doubled number of channels. Channel capacity was calculated using the Erlang C model. Calculations confirmed the fundamental hypothesis that the proposed digital

system is capable of increasing the number of available communication channels, while, at the same time, maintaining a satisfactory level of quality of the information carried. Given the expected hardships in adopting the proposed solution and problems that can be expected during the transition process, the dissertation ends with a systematization of the advantages and problems expected in the implementation of the proposed digital technology.

Keywords: *maritime communications, VHF radio telephony, signal coding, digital VHF communications, performances*

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Pregled osnovnih odrednica razvoja komunikacijskih sustava u pomorstvu	7
3. Upotreba VHF komunikacija u pomorstvu.....	12
3.1. Početak upotrebe VHF područja i povijest razvoja	14
3.2. Tehničke karakteristike VHF primopredajnika	19
3.2. Problem preopterećenosti VHF područja	21
4. Komparativna analiza analognih komunikacijskih sustava.....	24
4.1. Opis simulacijskog modela VHF komunikacijskih sustava	26
4.2. Usporedba dvaju sustava s obzirom na kvalitetu signala	27
5. Odabir spektralno učinkovite digitalne tehnologije obrade govornog signala prikladne za pomorski VHF sustav.....	36
5.1. Svojstva govornih signala i njihove implikacije pri korištenju digitalnih tehnologija	36
5.2. Metode kodiranja govornog signala	40
5.3. Modeliranje govornog sustava.....	44
5.4. Kodiranje linearnom predikcijom.....	49
5.4.1. Modeliranje rezonantnih frekvencija govornog trakta	52
5.4.2. Utjecaj reda filtra i veličine uzorka na kvalitetu analize govornog trakta.....	55
5.4.3. Određivanje parametara signala pobude	59
5.6. Kodiranje analizom pomoću sinteze signala	62
5.7. CELP koder.....	63
6. Analiza kopnenih digitalnih komunikacijskih sustava	68
6.1. TETRA sustav.....	68
6.2. APCO <i>Project 25</i> sustav	71
6.3. EDACS sustav	72
6.4. DIMRS sustav	75
6.5. DMR sustav	77
6.6. dPMR sustav	79
7. Prijedlog modela digitalnog VHF sustava i pretpostavke implementacije	83
7.1. Tehničke karakteristike sustava	83
7.1.1. Obrada signala i modulacija	84
7.1.2. Struktura kanala za digitalni sustav	89
7.1.3. Kodiranje govornog signala za digitalne VHF komunikacije	91
7.2. Obalna infrastruktura	97
7.2.1. Komunikacijski sustav obalnih stanica.....	97
7.2.2. Arhitektura obalnih radiostanica u digitalnom komunikacijskom sustavu.....	99

7.2.3. Izračun performansi komunikacijskog sustava upotrebom Erlang C modela	103
7.2.4. Usporedba performansi klasičnog sustava i predloženog digitalnog sustava	105
7.3. Primjenjivost digitalnog sustava za izravne komunikacije među brodovima	110
7.4. Povezivanje digitalnog VHF sustava s GMDSS sustavom	114
7.5. Prijedlog daljnje dogradnje sustava – projekcije budućeg razvoja.....	114
8. Zaključak.....	117
Literatura	123
Popis slika	130
Popis tablica.....	132

1. Uvod

Govorne komunikacije prenošene analognim kanalima, osobito u pomorstvu, mogu razmjerno kvalitetno zadovoljiti potrebe proširenja kapaciteta informacijske infrastrukture. Međutim, razvojem pomorskog prometa u posljednjim desetljećima, značajno se povećao broj korisnika sustava pomorskih komunikacija dovodeći do njegove preopterećenosti. Stoga, u svijetu, već više godina postoji rasprava o potrebama dogradnje, odnosno povećanja kapaciteta VHF područja.

Naime, porast pomorskog prometa potaknut globalizacijom i rastom trgovine roba i broja putnika, nameće traganje za novim tehničkim rješenjima kojima je moguće prilagoditi sustave pomorskih komunikacija stalno rastućem broju korisnika, broju komunikacijskih poruka i u njima sadržanih informacija. Unatoč uvođenju satelitskog komunikacijskog sustava INMARSAT, koji je preuzeo značajan dio komunikacijskih potreba brodova u obavljanju komercijalnih komunikacija, zbog ograničenja INMARSAT-a, i dalje ne prestaje potreba za upotrebom terestričkih komunikacijskih sustava, naročito VHF-a. Zemlje s povećanim pomorskim prometom izašle su sa svojim zahtjevima pred međunarodne organizacije IMO i ITU za povećanjem broja komunikacijskih kanala na VHF području.

Sve to nametnulo je potrebu aktivnog istraživanja novih tehnoloških rješenja problema te potrebu za znanstveno utemeljenim sagledavanjem višestrukih problema prilagodbe na međunarodnoj i nacionalnoj razini.

U okviru ove disertacije, istražene su prednosti primjene digitalnih sustava komunikacija u pomorstvu u usporedbi s analognim sustavima. Svrha rada je dokazati da digitalni sustav komunikacija predstavlja trajno rješenje problema preopterećenosti komunikacijskih kanala VHF područja, unatoč očekivanim poteškoćama pri uvođenju. U radu je potvrđena **temeljna hipoteza da je digitalni sustav sposoban povećati broj raspoloživih komunikacijskih kanala, uz održavanje zadovoljavajuće razine kvalitete informacije** te su elaborirani argumenti koji podržavaju razvoj digitalnih komunikacijskih sustava u pomorskom VHF području uz primjenu FDMA-TMDA TDD tehnologije.

Nadalje, u radu je dan pregled specifičnih potreba za komunikacijama u pomorstvu, opisani su postojeći načini odvijanja komunikacija, da bi se potom objasnio razvoj VHF komunikacija u dijelu vezanom uz standardizaciju širine kanala i tehničkih karakteristika opreme. Naime, upravo tehničke karakteristike postojećeg sustava pomorskih VHF komunikacija ograničavaju njegov kapacitet. Budući da prijelaz na digitalne komunikacije nameće promjenu broja i načina korištenja kanala, to nove tehnologije traže primjenu novih metoda obrade signala, stoga se ove okolnosti također uzimaju u obzir prilikom izrade vlastitog idejnog modela novog komunikacijskog sustava.

Usljed značajnih prednosti u odnosu na analogne sustave digitalni se sustavi posljednjih godina uvode u sva važnija područja unutar kopnenih pokretnih komunikacija. Budući da su ovi sustavi, premda ograničeni u broju korisnika, usluga i dometu, već funkcionalni, oni predstavljaju dobar izvor saznanja koja se mogu koristiti i pri razvoju sustava pomorskih komunikacija. Stoga je u radu posebna cjelina posvećena i analizi relevantnih odrednica kopnenih sustava.

Korištenje digitalnih komunikacija u području pomorstva slabo je istraživana tema. Digitalne komunikacije u pomorstvu prisutne su kod satelitskih sustava, ali ovi funkcioniraju na bitno različitim principima (tehničkim osnovama) u usporedbi s terestričkim komunikacijskim sustavima u pomorstvu. Međunarodna udruga za telekomunikacije ITU koja kroz svoje preporuke određuje i standarde vezane uz pomorske komunikacije, na zahtjev zemalja s povećanim potrebama za brojem kanala u pomorskom VHF području kroz dvije ključne preporuke odredila je smjernice razvoja (ITU-R Recommendation M.1084 i ITU-R Recommendation M.1312).

Organizacija ITU upućuje na traženje rješenja nedostatka broja kanala kroz primjenu spektralno učinkovitih digitalnih komunikacijskih sustava i navodi osnovne smjernice. Kao primjeri uspješnog prijelaza s analognog na digitalni način rada u disertaciji se prikazuju i kopneni komunikacijski sustavi, koji se zbog specifičnosti potreba u pomorstvu ne mogu samo preslikati u pomorske sustave. Postojeća literatura koja pokazuje dosadašnja iskustva u razvoju komunikacijskih tehnologija za kopnene potrebe praktično je jedino i dostupna. Slijedom proučenih izvora bilo je moguće razraditi i prikaz postojećih spoznaja koje se vrlo sažeto navode u nastavku.

Usljed ograničenih resursa frekvencijskog spektra, upotreba digitalnih komunikacijskih sustava zahtijeva spektralnu učinkovitost, odnosno informaciju kodiranu sa što manjim brojem bitova, ali uz istodobno postizanje visoke kvalitete govornih signala. Istraživanja u području kompresije govornih signala motivirana su vojnim potrebama za kvalitetnijim oblicima digitalnih komunikacija. Linearno prediktivno kodiranje (*Linear Predictive Coding* LPC) se pokazalo kao najuspješnija metoda kodiranja govornih signala. LPC metodu razradio je i demonstrirao 1967. godine Bishnu S. Atal na "*IEEE International Conference on Speech Communication*" u Bostonu. B. S. Atal je u svojim istraživanjima primijenio matematičku teoriju predviđanja Norberta Wienera (*prediction*) razvijenu 1940. godine za vojne potrebe. Za razliku od već razrađenih načina kodiranja valnog oblika signala (PCM, DPCM...) koji su za održavanje kvalitete signala zahtijevali velike brzine prijenosa od 64 kbit/s, LPC kodiranje je istu razinu kvalitete signala postizalo uz svega 16 kbit/s.

Daljnja istraživanja dovela su do novih poboljšanja kodiranja primjenom *Multipulse* LPC. Postignuta brzina prijenosa bila je 9,6 kbit/s (1981. godina). Ubrzo, 1983. godine, B. S. Atal razradio je *Code-excited* LPC (CELP) koder kojim je brzina prijenosa pala na manje od 8 kbit/s. Problem ovih kodera je velik broj potrebnih matematičkih operacija, pa je primjena CELP kodera u realnom vremenu započela tek 1993. godine kada je koder prvi puta primijenjen na brzom *Digital Signal Processor* (DSP) integriranom krugu.

Daljnja istraživanja dovela su do primjene spektralno učinkovitih kodera u GSM sustavima, te je u dokumentu "European Telecommunications Standards Institute. GSM Full Rate Speech Transcoding (GSM 06.10). ETSI standards documentation, EN 300 961, 1995" definiran *Regular Pulse Excited* LP Coder (RPE-LPC).

Niz autora nastavlja istraživati daljnje mogućnosti poboljšanja rada kodera razvijajući algoritme čija je svrha bila ubrzati obradu signala, kao i iznalaženja novih učinkovitijih kodera. Među njima ističu se: L. R. Rabiner i R. W. Schafer, M. Kondoz, B. G. Evans, Ari Heikkinen, T J Mouldsley, P. W. Elliott i drugi.

Poseban segment istraživanja kvalitete (pouzdanosti) informacije u govornim komunikacijama čine istraživanja mehanizma govora, odnosno nastajanja zvuka (J.

Skoglund, 1998.), utjecaja nepravilnosti govora na pouzdanost kodiranja (V. Parsa, D.G. Jamieson, 2003.).

Konzultirana je i literatura koja obrađuje fizikalne osnove prostiranja radiovalova, kao i literatura vezana uz tehnologije bežičnih mreža. Naime, poseban izvor mogućih problema u komunikacijskom procesu proizlazi iz utjecaja smetnji na koristan signal u samom postupku prijenosa. Ova problematika dobro je pokrivena u literaturi, radovima autora kao što su: B. Sklar, J. Proakis, J.D. Parsons, Sandeep Chennakeshu, Gary J. Saulnier i drugi.

Pored teorijskih istraživanja, važan izvor saznanja i ideja o unaprjeđenju pomorskih komunikacija, moguće je pronaći i u opisima uvođenja i funkcioniranja kopnenih komunikacijskih sustava za javne i komercijalne namjene. Istraživanja performansi sustava dobro su dokumentirali u svojim radovima Richard Dewey i Yuk Tong Lee (1996); Fernando Gutierrez, Antonio Valdovinos (1997); Armando Annunziato, Davide Sorbara (1997). Istraživanja performansi provode se kontinuirano do današnjih dana s obzirom na mogućnosti stalnih unaprjeđenja sustava (D. I. Axiotis, D. Xenikos, 2007; Min-soo Kang, Myung-Sun Song, Seung-Hyeub Oh, 2007; Zhang Qin, Li Hai, 2007.)

Posebnu skupinu izvora koji se koristi u disertaciji čine preporuke međunarodnih organizacija ITU (*International Telecommunication Union*) i ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), kroz koje se reflektiraju nova istraživanja, ali na način da uvažavaju potrebe prakse, brinući o stabilnosti (standardizaciji i postupnosti uvođenja) i pouzdanosti komunikacijskih usluga, čime automatski sužavaju izbor realno izvedivih alternativa za postojeći VHF sustav.

Istraživanje opisano u sklopu ove disertacije nastavlja se na širok raspon proučenih izvora. Temeljem analize raspoloživih materijala, izdvojene su i u disertaciji detaljnije proučene one komunikacijske tehnologije za koje je autor smatrao da iskazuju određene prednosti koje je moguće primijeniti u projektiranju sustava digitalnih komunikacija za potrebe pomorstva.

U samom postupku analize krenulo se od komparativnog istraživanja obilježja kopnenih i pomorskih komunikacija. Istraživanje je provedeno kroz tri razine. Najprije su analizirani izvori koji ukazuju na probleme zapažene u postojećim pomorskim VHF

komunikacijama, zatim su utvrđeni kriteriji koji se moraju uvažavati prilikom istraživanja mogućnosti razvoja alternativnih pristupa širenju mreže sudionika i raspona usluga za potrebe pomorstva. Na drugoj razini, komparativnom metodom, analizirane su odabrane digitalne tehnologije razvijene za kopnene sustava uz izvođenje zaključaka o prikladnosti (prednostima i slabostima) koje je moguće očekivati u slučaju da se na tim tehnologijama krene graditi infrastruktura za potrebe pomorstva. Temeljem provedene analize odabrana je DMR tehnologija kao najprikladnija za nastavak istraživanja.

Treći, analitički dio rada čini komparativno istraživanje dviju alternativnih digitalnih tehnologija koje bi (polazeći od zaključaka druge razine) imalo smisla primijeniti u pomorstvu. Osnovne metode korištene u ovom dijelu su metode simulacije i komparacije kako bi se usporedila kvaliteta komunikacija dostupnih postojećim analognim sustavom¹ i kvaliteta koja bi se postigla uz primjenu predložene digitalne tehnologije.

Za potrebe prikaza karakteristika govornih signala korišten je matematički računalni program MatLab. Njime je provedena spektralna analiza govora potrebna za prikaz digitalne obrade govornog signala. Potrebne simulacije komunikacijskih sustava izvedene su korištenjem računalnog programa SystemView, a ocjene kvalitete signala računalnim programom PESQ (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*).

Dispozicija rada podređena je dokazivanju postavljene hipoteze. Slijedi opis strukture rada po poglavljima.

U **Uvodu** određuju se predmet, ciljevi i svrha istraživanja te korištena metodologija uz kratak osvrt na stanje postojećih istraživanja.

U drugom poglavlju, **Pregled osnovnih odrednica razvoja komunikacijskih sustava u pomorstvu**, daje se pregled osnovnih elemenata pomorskih komunikacijskih sustava, navode specifičnosti sustava pomorskih komunikacija te ukazuje na probleme koji ograničavaju mogućnosti uvođenja novih rješenja. Osobito s obzirom da oblici i namjena komunikacijskih poruka u pomorskom prometu te različiti načini prijenosa informacija u pomorstvu zahtijevaju i posebno prilagođena tehnološka rješenja pogodna

¹ Analizu kvalitete analognih komunikacija u pomorstvu kandidat je obradio u svom magistarskom radu Prilog povećanju broja komunikacijskih kanala na pomorskom VHF području. Rad je obranjen na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci 2007. godine.

za pokrivanje mobilnih korisnika u globalnim razmjerima. U poglavlju se ističe i da je potreba za pouzdanim i dostupnim komunikacijama uvjetovana specifičnim međunarodnim propisima i preporukama koje bitno određuju pravce daljnjeg razvoja novih tehnologija za pomorstvo.

Treće poglavlje **Upotreba VHF komunikacija u pomorstvu** detaljnije analizira razloge koji nameću potrebu za istraživanjem alternativnih načina korištenja VHF komunikacija. Opisani su načini upotrebe frekvencijskog VHF područja u pomorstvu i prikazan je povijesni pregled dosadašnjeg razvoja VHF sustava s obzirom na promjene u broju i širini komunikacijskih kanala. Povećanjem broja korisnika i njihovih potreba za govornim komunikacijama, postalo je izvjesno da se alternative mogu tražiti u dva smjera: zadržavanje, uz prilagodbu, analogne tehnologije, ili prijelazom na digitalni prijenos kao radikalnu varijantu.

Poglavlje četiri naslovljeno **Komparativna analiza analognih komunikacijskih sustava** analizira prednosti koje se mogu postići manje radikalnom dogradnjom pomorskih VHF komunikacija, preraspodjelom kanala uz prilagodbu tehničkih karakteristika uređaja, ali uz zadržavanje analogne tehnologije prijenosa. Usporedba kvalitete signala postojećeg i alternativnog analognog sustava ujedno dokazuje da digitalni načini prijenosa nadmašuju analogne u pogledu kvalitete signala.

Poglavlje pet, **Odabir spektralno učinkovite digitalne tehnologije obrade govornog signala prikladne za pomorski VHF sustav**, analizira bitne tehničke odrednice prijelaza s analognih na digitalne tehnologije. S obzirom na cilj povećanja kapaciteta pomorskog VHF sustava (broja kanala), utvrđuju se prednosti koje pojedini načini kodiranja postižu u smislu smanjivanja broja bitova potrebnih za prijenos uz zadržavanje svih relevantnih parametara nužnih za kvalitetnu reprodukciju signala na prijemnoj strani.

U šestom poglavlju, **Komparativna analiza kopnenih i pomorskih komunikacijskih sustava**, analizirana su obilježja kopnenih digitalnih komunikacijskih sustava. Naime, digitalni komunikacijski sustavi zasad se ne koriste za govorne komunikacije u pomorstvu (terestričke). Postoje, međutim, razvijene tehnologije te određena iskustva digitalnog prijenosa govora u kopnenim komunikacijskim sustavima koja bi bilo moguće prilagoditi potrebama u pomorstvu. U tu svrhu istražuju se obilježja

odabranih kopnenih komunikacijskih sustava kako bi se ispitala mogućnost prijenosa svake od proučenih tehnologija u budući (još neizgrađen) sustav pomorskih digitalnih tehnologija.

U sedmom poglavlju, temeljem analiza prezentiranih u ranijim poglavljima, razrađen je **Prijedlog modela digitalnog VHF sustava i pretpostavke implementacije** s razradom tehničkih karakteristika sustava. Prijedlog sadrži model metode obrade signala u osnovnom frekvencijskom području (*baseband*) i radiofrekvencijskom području (*passband*). Budući da digitalne tehnologije omogućuju istovremenu primjenu vremenskog i frekvencijskog multipleksiranja, razrađen je i prijedlog nove strukture komunikacijskih kanala u dva modula, jedan za potrebe komunikacija između brodova i obalnih stanica i drugi, za potrebe izravnih komunikacija među brodskim stanicama.

Zaključak rezimira rezultate provedenih analiza i iznosi argumente kojima je potvrđena postavljena znanstvena hipoteza **da je digitalni sustav sposoban povećati broj raspoloživih komunikacijskih kanala, uz održavanje zadovoljavajuće razine kvalitete informacije.**

2. Pregled osnovnih odrednica razvoja komunikacijskih sustava u pomorstvu

Specifičnosti sustava pomorskih komunikacija proizlaze iz činjenice da za razliku od kopnenih sustava pomorski ima globalnu rasprostranjenost. Klasificiranje pomorskog komunikacijskog sustava može se napraviti temeljem raznih parametara.

Promjene u sustavu i uvođenje novih komunikacijskih rješenja znatno je kompliciranije i dugotrajnije nego u kopnenim sustavima čije su granice najčešće unutar pojedinih zemalja. Dodatno, problem tranzicije, odnosno prijelaza na nove komunikacijske tehnologije u pomorstvu otežava brojnost sudionika te složenost pomorskih komunikacijskih sustava o čemu će više biti riječi u nastavku. Poseban faktor koji dodatno opterećuje razvoj sustava za pomorske komunikacije vezan je uz potrebe sigurnosti što uvjetuje potrebe za visokom pouzdanosti i raspoloživosti komunikacijskih kanala kao i kvaliteti signala koja jamči ispravnu interpretaciju poruka.

Sustav pomorskih komunikacija nemoguće je jednoznačno raščlaniti. Stoga se u praksi susreću različiti načini sistematizacije elemenata pomorskih komunikacija, sukladno svrsi radi koje se sistematizacija izvodi.

Komunikacijski sustavi u pomorstvu, sagledavajući potrebe koje pokrivaju određenom vrstom usluga mogu se podijeliti na komunikacije za potrebe sigurnosti plovila i osoba, komunikacije neophodne za obavljanje poslovnih funkcija broda, komunikacije za potrebe održavanja tehničke ispravnosti brodskih sustava i komunikacije za osobne potrebe članova posade broda.

Razlog razdvajanja spomenutih kategorija potreba proizlazi iz različitih zahtjeva po raspoloživosti, kvaliteti i pouzdanosti komunikacijskog kanala, te s obzirom na način obračuna usluge. Dok se o prvom slučaju (komunikacije za potrebe sigurnosti plovila i osoba) radi o porukama od općeg (javnog) interesa, stoga se ove poruke nalaze u središtu interesa međunarodnih pomorskih organizacija, nacionalnih vlasti i regulatornih tijela. Komercijalne komunikacije pak, od interesa su za brodare, trgovačka društva i privatne osobe, a s obzirom da se naplata komercijalne cijene usluga podrazumijeva, velik je interes pružatelja usluga za investiranjem u razvoj ovoga

područja. Tehnološki gledano, ne postoje razlozi za odvojenim sustavima sigurnosnih i komercijalnih komunikacija. Postojeće tehnologije u pogledu zajedničkog korištenja dijelova frekvencijskog spektra nailaze na ograničenja u raspoloživom broju kanala, načinima korištenja uređaja, količini traženih i dostupnih usluga, širini raspona ponuđenih usluga... Osobito je privatni sektor zainteresiran za unaprjeđenje postojećeg stanja. Utoliko je moguće očekivati da će u nadolazećim godinama upravo partnerstvo privatnih kompanija i javnih ustanova ubrzati razvoj novih tehnologija u području pomorskih komunikacija.

S obzirom na princip rada, širinu pokrivenog područja i način uspostave veze, vjerojatno je najkorisnija klasifikacija sustava pomorskih komunikacija na satelitske i terestričke.

U pomorstvu se unutar terestričkih komunikacijskih sustava koriste frekvencijska područja VHF, MF i HF. Za male udaljenosti koje su nešto veće od optičke vidljivosti među stanicama koristi se VHF područje. Srednje udaljenosti koje se kreću do približno 150 nautičkih milja pokrivene su MF područjem, a za velike udaljenosti među stanicama koriste se HF područje. Korištenje terestričkih sustava podrazumijeva da je uspostava veze i upravljanje mrežom pretežno decentralizirano. To korisnicima pruža veliku slobodu u upotrebi frekvencija, ali s druge strane, otežava rad operatorima koji moraju poznavati principe prostiranja elektromagnetskih valova i ograničenja pojedinih frekvencijskih područja. Također je bitno napomenuti da teritorijalna pokrivenost putem terestričkih mreža ovisi o konfiguraciji sustava, to jest o položaju (rasprostranjenosti) obalnih radiostanica.

Područje pokrivanja satelitskih sustava ovisi o satelitskim orbitama, pa sateliti koji se nalaze u geostacionarnoj i geosinhronoj orbiti signalom uspješno pokrivaju površinu Zemlje između 70° N i 70° S. Susreću se također i druge orbite, kao na primjer MEO u kojoj se nalaze i sateliti sustava Iridium. Na frekvencijskom HF području pravilnim razmještajem obalnih radiostanica uspješno se pokriva ukupna površina Zemlje. Satelitski sustavi su centralizirani i upravljani iz kontrolnih centara satelitske mreže pa je korisnicima olakšano korištenje sustava.

Komunikacije za potrebe sigurnosti plovila i osoba propisuje IMO (*International Maritime Organization*) SOLAS konvencijom u poglavlju IV. i nizom

raznih rezolucija. Od 1999. godine u potpunosti se primjenjuje GMDSS sustav u kojem su terestričkim i satelitskim komunikacijskim sustavima povezani kopneni i morski elementi sustava. Četiri područja plovidbe određena su raspoloživim komunikacijskim sustavima, a radiooprema brodova sukladna je prijavljenom području plovidbe. Međunarodno udruženje za telekomunikacije (ITU) u svojim preporukama određuje minimalne tehničke karakteristike uređaja. Za potrebe pozivanja (uzbunjivanja) u području terestričkih komunikacija razvijeni su uređaji nazvani DSC (*Digital Selective Call*). Uređaji omogućuju jednostavno odašiljanje unaprijed formatiranih poziva različitih prioriteta, a u prijemnom načinu rada automatski primaju pozive neovisno o trenutnoj raspoloživosti radiooperatora, čime je značajno unaprjeđeno korištenje frekvencijskih područja MF, HF i VHF. Na istim frekvencijskim područjima kao komunikacijsko sredstvo nakon poziva DSC uređajem predviđena je radiotelefonija i radioteleks. Radi stjecanja potrebne vještine pri rukovanju uređajima u slučaju opasnosti IMO organizacija potiče korištenje GMDSS opreme i za rutinske komunikacije.

Napuštanje starih i intenzivno uvođenje novih komunikacijskih tehnologija na kopnu koje se u današnje vrijeme koriste za potrebe poslovnih subjekata usmjerilo je i korištenje komunikacijskih sustava na brodu prema satelitskim tehnologijama. Satelitske tehnologije znatno su naprednije u odnosu na terestričke komunikacijske sustave koji se vrlo sporo mijenjaju, a ujedno su i satelitski komunikacijski uređaji znatno jednostavniji za upotrebu. Promjene u načinima odvijanja komunikacija na kopnu dovele su i do potrebe za promjenama u GMDSS sustavu. Na sastanku Pododbor² za komunikacije i traganje i spašavanje COMSAR, IMO predlaže zamjenu slabo korištenih i zastarjelih MF/HF radioteleks komunikacija uvođenjem novih tehnologija koje su primjenjivije s obzirom na načine komunikacije koje se koriste na kopnu. Uvođenje novih komunikacijskih tehnologija na kopnu i jednostavnost upotrebe satelitskih uređaja rezultirali su u posljednjem desetljeću prestankom rada velikog broja komercijalnih obalnih radiostanica u području terestričkih komunikacija. Gotovo ukupan radiokomunikacijski promet u pomorstvu za komercijalne potrebe odvija se posredstvom satelitskih komunikacijskih sustava.

² COMSAR 11/WP.2 21 February 2007, Replacements for Use of NBDP (Radio Telex) for Maritime Distress and Safety Communications in Maritime MF/HF Bands

U području satelitskih komunikacija je vrlo velika konkurencija i javlja se veliki broj pružatelja usluga koji novim tehnologijama nastoje privući čim veći broj korisnika. Ipak i satelitske komunikacije imaju ograničene resurse u pogledu raspoloživog broja kanala, te ITU organizacija potiče razvoj integriranih komunikacijskih rješenja kroz korištenje terestričkih i satelitskih komunikacija u cilju efikasnog iskorištavanja frekvencijskog spektra. Predloženi su novi standardi za komunikacijske sustave treće i četvrte generacije IMT-2000 i IMT-Advanced (*International Mobile Telecommunications*).

Daljnji razvoj komunikacijskih sustava na VHF području u pomorstvu potiče i ITU organizacija kroz dvije preporuke koje postavljaju smjernice kojih se moraju pridržavati subjekti koji žele doprinijeti razvoju.

Prva preporuka ITU-R Recommendation M.1084 **"Interim solutions for improved efficiency in the use of the band 156-174 MHz by stations in the maritime mobile service"** iz 1994. godine dozvoljava povećanje broja kanala u VHF području zadržavanjem analognog načina prijenosa signala uz definirane karakteristike modulacije. U preporuci navode i da se ovakav način prevladavanja problema preopterećenosti postojećih kanala ipak smatra samo prijelaznim rješenjem. Naime, povećanje broja kanala uz zadržavanje analogne tehnologije prijenosa nužno umanjuje kvalitetu signala.

U drugoj preporuci, ITU-R Recommendation M.1312 **"A long term solution for improved efficiency in the use of the band 154-174 MHz by stations in the maritime mobile service"** iz 1997. godine, ITU upućuje na traženje rješenja kroz primjenu spektralno učinkovitih digitalnih tehnologija. Premda je preporuka izdana još 1997. godine do danas nisu razvijeni ni uspostavljeni digitalni sustavi u pomorskim komunikacijama koji bi omogućili veći broj kanala i širi spektar usluga. Digitalni sustavi i uređaji koji trenutno postoje u VHF frekvencijskom području su DSC (*Digital Selective Call*) i AIS (*Automatic Identification System*), koji su namijenjeni za automatsko pozivanje (uzbunjivanje) i automatsku identifikaciju.

3. Upotreba VHF komunikacija u pomorstvu

VHF frekvencijsko područje za potrebe pomorstva koristi se za obavljanje pretežno radiotelefonskih komunikacija na malim udaljenostima. Predviđene izlazne snage uređaja osiguravaju relativno kvalitetnu reprodukciju govornih signala, a također se na istom frekvencijskom području pojedini kanali koriste i za potrebe identifikacije brodova (AIS sustav) kao i za automatizirano pozivanje ostalih sudionika pomoću DSC uređaja. Način prostiranja elektromagnetskih valova ovisan je o njihovim frekvencijama te je različit za pojedina frekvencijska područja. S obzirom na način prostiranja elektromagnetskih valova VHF područja uz predviđene izlazne snage uređaja, udaljenost na kojoj je moguće obavljati komunikacije je približno jednaka optičkoj vidljivosti među sudionicima i ovisi jedino o nadmorskoj visini antena. Valna duljina signala VHF područja je mala u usporedbi s veličinama objekata, odnosno preprekama na putu širenja elektromagnetskog vala od predajnika do prijemnika, što ima značajan učinak na prostiranje elektromagnetskih valova. Utjecaji koji su naročito izraženi na VHF frekvencijskom području su:

- gubitak energije elektromagnetskog vala zbog udaljenosti odašiljača i prijemnika,
- refleksija elektromagnetskog vala od "ravnih" ploha, usporedivih s valnom duljinom,
- raspršenje elektromagnetskog vala od nepravilnih površina,
- refrakcija zbog promjena u atmosferi (osobito s visinom),
- difrakcija na čvrstim preprekama,
- apsorpcija na objektima koja umanjuje energiju elektromagnetskog vala.

Navedeni utjecaji također su ovisni i o području nad kojim se elektromagnetski val prostire te su različito izraženi za morska i kopna područja.

Obavezu posjedovanja VHF komunikacijskih uređaja SOLAS konvencija propisuje za sve trgovačke brodove veće od 300 GT te sve putničke brodove. Posjedovanje AIS i DSC uređaja također je propisano SOLAS konvencijom, a skupa s radiotelefonijom funkcionalno čine jednu cjelinu. Osim brodskih radiostanica određena plovna područja pokrivena su obalnim radiostanicama u GMDSS sustavu čime je

osigurana pokrivenost područja A1. Upotreba VHF komunikacija propisana je jedino sa stanovišta sigurnosti navigacije, ali je moguća i upotreba za obavljanje komercijalnih komunikacija posredstvom obalnih radiostanica koje omogućuje pristup brodovima u međunarodnu telefonsku mrežu. U smjeru brod-kopno uspostavljanje veze s krajnjim korisnikom na međunarodnoj telefonskoj mreži ovisi o mogućnostima obalne radiostanice. Stariji način je posredstvom operatora na obalnoj radiostanici, dok opremljenije obalne stanice omogućavaju automatski način upotrebom DSC uređaja. Uspostavljanje telefonske veze kopno-brod u komercijalnoj upotrebi znatno je kompliciranije i uglavnom se svodi na obavještanje brodova u unaprijed određenim vremenskim terminima o naručenim pozivima. Za potrebe sigurnosti navigacije VHF područje koristi se također i za izravne komunikacije među brodovima u područjima pokrivenim obalnim radiostanicama kao i izvan njih. Kao ostali važniji korisnici pomorskog VHF područja mogu se navesti i lučke vlasti, razni kontrolni centri i pilotske stanice.

Broj korisnika VHF područja povećava se i činjenicom da države prema vlastitim potrebama propisuju obavezu posjedovanja VHF radiostanice i plovilima koji ne potpadaju pod SOLAS konvenciju. Najčešće su to plovila registrirana u gospodarske svrhe. U posljednju, ali ne manje značajnu kategoriju korisnika spadaju plovila u rekreativne svrhe koja po vlastitom nahođenju posjeduju registrirane VHF radiostanice.

Za potrebe pomorskih komunikacija međunarodna organizacija ITU odredila je unutar VHF područja raspon frekvencija od 154 do 172 MHz. Unutar navedenog područja određeno je 56 kanala sa širinom od 25 kHz, podijeljenih na simpleks i dupleks kanale. Raspodjela kanala na međunarodnoj razini prema namjeni napravljena je za potrebe komunikacija među brodovima (simpleks kanali), komunikacijama za komercijalne potrebe prema obalnim radiostanicama (dupleks kanali) i potrebe lučke infrastrukture (simpleks i dupleks kanali). Pojedini kanali namijenjeni su za određene vrste uređaja te se ne mogu koristiti za radiotelefonske komunikacije. Upotreba kanala 16 (156,8 MHz) određena je na međunarodnoj razini za potrebe komunikacija s prioritetima pogibelji, hitnosti i sigurnosti te kao kanal za opće pozive radiotelefonijom. Unutar navedene raspodjele, države dodjeljuju radiostanicama kanale za potrebe komunikacija na VHF području.

3.1. Početak upotrebe VHF područja i povijest razvoja

Upotreba VHF komunikacijskog sustava u pomorstvu započela je 1947. godine kada je na međunarodnoj radiokonferenciji održanoj u Atlantic Cityju dogovorena upotreba frekvencijskog područja uokolo frekvencije 156,8 MHz sa širinama kanala od 100 kHz. Predviđeno je 11 kanala i dogovorena dodjela kanala određenim vrstama brodova. Svaka brodska stanica morala je omogućavati rad na najmanje 3 kanala i to 156,8 MHz koji je određen za potrebe sigurnosti navigacije i kao pozivni kanal, jedan kanal za komunikacije između brodova i jedan kanal za komunikacije brod-kopno. Sjedinjene Američke Države 1952. godine standardizirale su u svojim propisima (*FCC Rules and Regulations, 1952.*) numeraciju i raspodjelu kanala koja je za područje Velikih jezera prikazana na slici 3.1.

Napredak u proizvodnji elektroničkih elemenata kao i iskustva iz SAD-a doveli su do daljnjeg poboljšanja VHF komunikacijskog sustava. Europske zemlje na konferenciji održanoj u Hagu 1957. godine predložile su raspodjelu VHF frekvencijskog područja u 28 kanala sa širinom od 50 kHz (Slika 3.2). Prijedlog europskih zemalja usvojen je na globalnoj razini 1959. godine u Ženevi na Svjetskoj radiokonferenciji (*World Radio Conference*).

Frequency Megacycles	1952 Channel Designation	Function	Large Great Lakes Vessels	Tug Dispatch Offices	Harbor Tugs	Coast Guard Vessels	Coast Guard Shore Stations, Inc. 500	Sea Lock Dispatcher	Welland Canal Dispatcher	Long run Ferries	Short run Ferries	Fishing Craft	Marine Con- struction Craft	Yachts, Large set	Yachts, Small set
155.8	1*	Safety Calling, Speaker Monitored	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<u>NAVIGATIONAL CHANNELS</u>															
156.3	2*	General Intership, All Vessels	X		X	X				X	X	X	X	X	X
157.2	3	Coast Guard Working	X			X	X			X				X	
156.6	4	Port Operations	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
157.0	5	Second Intership, Large Vessels	X												
156.7	6	Third Intership, Small Vessels												X	X
<u>OPERATIONAL CHANNELS</u>															
156.9	W	Tug Dispatch		X	X										
156.5	X	Fishing and Construction Craft										X	X		
156.4	Y	Ferries								X	X				
<u>PUBLIC CORRESPONDENCE</u>															
157.3 162.0)	7	Ship Shore, Duplex	X			X				X			X	X	X
157.4 161.9)	8	Ship Shore, Duplex	X			X				X			X	X	X
		Exclusive Coast Guard				X	X								
Minimum number of channels recommended:			7**	3	4	7***	4***	2	2	7	4	4	5	7	4

- * All vessels are required to be equipped for these channels plus any one channel for communicating with shore.
- ** Large Great Lakes vessels are being equipped with 8-channel sets leaving 1 spare.
- ***Coast Guard stations may be equipped with additional channels not shown.

(September, 1952)

Slika 3.1. Pomorsko VHF područje iz 1952. godine

Izvor: John J. Renner, VHF Maritime Mobile Communications: A Systems Approach to Serving User Requirements; IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-25, No. 4, august 1977, str. 216.

ANNEX 1

Definitions

Simplex Operation

A method of operation whereby the transmissions in the two directions are made available alternately, for example, by means of a press-to-talk system.

Duplex Operation

A method of operation whereby the transmissions in the two directions are made available simultaneously.

Semi-Duplex Operation

A method of operation which employs simplex at one end of the circuit and duplex at the other.

Note: Duplex and semi-duplex methods of operation necessitate the use of two frequencies; the simplex method of operation may be obtained with either one or two frequencies.

FREQUENCY ALLOCATION TABLE
FOR THE INTERNATIONAL MARITIME MOBILE
RADIOTELEPHONE SERVICE

Channel Designation	Ship Frequencies		Integrity	Port Operations		Public Correspondence
	Transmit Mhz	Receive Mhz		Single Frequency	Two-Frequency	
1	156.05 (*)	160.45			10	8
2	156.10	160.70			9	10
3	156.15 (*)	160.75			11	9
4	156.20	160.80			11	7
5	156.25	160.85			6	12
6	156.30	160.90			7	
7	156.35	160.95	1			11
8	156.40	158.40	2			
9	156.45	158.45	3	5		
10	156.50	158.50	3	1		
11	156.55	158.55	3	3		
12	156.60	158.60	4	4		
13	156.65	158.65		2		
14	156.70	158.70		2		
15	156.75	Guard-band (154.725 - 156.775 Mhz)				
16	156.80	156.80	Calling and safety			
17	156.85	Guard-band (154.825 - 156.875 Mhz)				
18	156.90	161.30			3	
19	156.95	161.35			4	
20	157.00	161.60			1	
21	157.05	156.03**)			3	
22	157.10	161.45			5	see note 9
23	157.15	156.15 **)			2	
24	157.20***)	161.75			2	
25	157.25	161.80				5
26	157.30	161.85				4
27	157.35	161.90				1
28	157.40	162.00				2

*) See note 10. **) See note 8. ***) See note 8 (Group 14).

Note 1: The method of working, that is, single-frequency or two-frequency, indicated for each channel should be adhered to for international services.

Note 2: The figures in the column headed «Inshore» indicate the normal sequence in which channels should be taken into use by a mobile station.

Note 3: The figures in the columns headed «Port Operations» and «Public Correspondence» indicate the normal sequence in which channels should be taken into use by each coast station. However, in some cases it may be necessary to omit channels in order to avoid harmful interference between the services of neighbouring coast stations.

Note 4: In assigning frequencies to their coast stations, Administrations should collaborate in cases where harmful interference could occur.

Note 5: The use of channels for maritime mobile purposes other than those indicated shall not cause harmful interference to services operating in accordance with the Allocation Table, and shall not prejudice the development of these services.

Note 6: During ice seasons, ship stations shall avoid harmful interference to communications between icebreakers and assisted ships on the frequency 156.30 Mc/s.

Note 7: Administrations should, as far as possible, arrange that ship stations, fitted only with the channels corresponding to the figures underlined in the Allocation Table, can obtain a reasonably adequate use of available services.

Note 8: When an Administration finds it necessary to introduce a two-frequency calling channel for public correspondence the channel marked ***) shall be used for this purpose. This channel shall also be used for selective calling if this method of calling is introduced for public correspondence.

Note 9: The ship receive frequencies 156.05 Mc/s and 156.15 Mc/s marked **) apply to the case of the special semi-duplex public correspondence systems using 1 Mc/s spacing between transmit and receive frequencies, used by Belgium and France and which other countries might use in the future.

Note 10: The frequencies marked *) are those used as ship receive frequencies in the special semi-duplex correspondence systems, referred to in note 9 above.

Note 11: Messages on port operation channels must be restricted to those related to the movement and the safety of ships, and, in emergency, to the safety of persons.

Slika 3.2. Raspodjela pomorskog VHF područja na konferenciji u Hagu 1957.

Izvor: John J. Renner, VHF Maritime Mobile Communications: A Systems Approach to Serving User Requirements; IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-25, No. 4, august 1977, str. 217.

Povećana potražnja za brojem komunikacijskih kanala i daljnji napredak tehnike doveo je do sljedećeg povećanja broja kanala koji je dogovoren na međunarodnoj konferenciji održanoj u Ženevi 1967. godine (*International Radio Conference on Maritime Mobile Services, Geneva*). Frekvencijsko područje razdijeljeno je u 56 kanala i uz određene modifikacije u namjeni pojedinih kanala koristi se i danas. U Rezoluciji A.283(VIII) IMO (IMCO) organizacije iz 1973. godine VHF uređaj navodi se kao jedan od načina komunikacija u budućim sustavima namijenjen za potrebe pogibelji u pomorstvu. Frekvencija 156,8 MHz se određuje kao frekvencija za potrebe komunikacija u slučajevima pogibelji, hitnosti, sigurnosti i kao pozivna frekvencija, te se obvezuje sve brodove prema SOLAS konvenciji na posjedovanje VHF komunikacijskog uređaja.

Namjena pojedinih kanala definirana je na konferenciji održanoj 1974. godine (WARC 1974.). Daljnja poboljšanja komunikacija na VHF području uvedena su upotrebom uređaja za digitalno selektivno pozivanje (DSC) za čije potrebe je rezerviran kanal 70, i uvođenje automatskog sustava identifikacije brodova (AIS). Raspodjela kanala VHF frekvencijskog područja koja se danas koristi prikazana je u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Pomorsko VHF područje

Oznaka kanala	Tx frek. (MHz)	Rx frek. (MHz)	Simpleks kanal	Dupleks kanal	Inter Ship	Port operations and ship movement	Public correspondence
60	156.025	160.625		X		X	X
01	156.050	160.650		X		X	X
61	156.075	160.675		X		X	X
02	156.100	160.700		X		X	X
62	156.125	160.725		X		X	X
03	156.150	160.750		X		X	X
63	156.175	160.775		X		X	X
04	156.200	160.800		X		X	X
64	156.225	160.825		X		X	X
05	156.250	160.850		X		X	X
65	156.275	160.875		X		X	X
06	156.300	156.300	X		X		
66	156.325	160.925		X		X	X
07	156.350	160.950		X		X	X
67	156.375	156.375	X		X	X	
08	156.400	156.400	X		X		
68	156.425	156.425	X			X	
09	156.450	156.450	X		X	X	
69	156.475	156.475	X		X	X	
10	156.500	156.500	X		X	X	
70 (DSC)	156.525	156.525	X				
11	156.550	156.550	X			X	
71	156.575	156.575	X			X	
12	156.600	156.600	X			X	
72	156.625	156.625	X		X		
13	156.650	156.650	X		X	X	
73	156.675	156.675	X		X	X	
14	156.700	156.700	X			X	
74	156.725	156.725	X			X	
15	156.750	156.750	X		X	X	
75	156.775	156.775	X			X	
16	156.800	156.800	X				
76	156.825	156.825	X			X	
17	156.850	156.850	X		X		
77	156.875	156.875	X		X		
18	156.900	156.900	X			X	X
78	156.925	161.525		X		X	X
19	156.950	161.550		X		X	X
79	156.975	161.575		X		X	X
20	157.000	161.600		X		X	X
80	157.025	161.625		X		X	X
21	157.050	161.650		X		X	X
81	157.075	161.675		X		X	X
22	157.100	161.700		X		X	X
82	157.125	161.725		X		X	X
23	157.150	161.750		X		X	X
83	157.175	161.775		X		X	X
24	157.200	161.800		X		X	X
84	157.225	161.825		X		X	X
25	157.250	161.850		X		X	X
85	157.275	161.875		X		X	X
26	157.300	161.900		X		X	X
86	157.325	161.925		X		X	X
27	157.350	161.950		X		X	X
87	157.375	157.375	X		X		
28	157.400	162.000		X		X	X
88	157.425	157.425	X		X		
AIS 1	161.975	161.975	X				
AIS 2	162.025	162.025	X				

Izvor: ITU Radio Regulations Ap. 18.

3.2. Tehničke karakteristike VHF primopredajnika

Tehničke karakteristike brodskih VHF uređaja definirane su u preporuci ITU-R M.489³. Dozvoljena izlazna snaga predajnika je najviše 25 W, s obaveznom mogućnošću smanjenja izlazne snage na 1 W za potrebe obavljanja komunikacija na malim udaljenostima.

Karakteristike prijemnika opisane su parametrima osjetljivosti i selektivnosti. Osjetljivost prijemnika, odnosno najslabiji signal kojeg prijemnik može detektirati i obraditi, mora biti jednaka ili manja od 2 μV uz odnos signal-šum od 12 dB (SINAD)⁴ na izlazu prijemnika, što predstavlja granično područje ispod kojeg dolazi do značajnog izobličavanja signala na prijemu.

Selektivnost prijemnika, odnosno potiskivanje signala sa susjednih kanala mora biti najmanje 70 dB.

Postojeće radiotelefonske komunikacije na VHF području koriste frekvencijsku modulaciju s akcentuacijom signala informacije s karakteristikom 6 dB po oktavi, odnosno faznu modulaciju, koja je opisana s maksimalnom devijacijom frekvencije prenosivog signala od 5 kHz i maksimalnom frekvencijom informacije od 3 kHz. Ovim parametrima opisan je indeks modulacije, odnosno maksimalna devijacija faze u radijanima:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_{i\max}} = 1,66667.$$

Potrebna širina komunikacijskog kanala izračunata pomoću Carsonovog pravila iznosi:

$$B_{PM} = 2f_{i\max}(\beta + 1) = 16 \text{ kHz}.$$

Predviđena širina kanala iznosi 25 kHz čime je osiguran potrební zaštitni pojas (*guardband*) od po 4,5 kHz sa svake strane kanala. Na slici 3.3. prikazana su tri

³ ITU-R Recommendation M.489: Technical Characteristics of VHF Radiotelephone Equipment Operating in the Maritime Mobile Service in Channels Spaced by 25 kHz

⁴ Za FM prijemnike se osjetljivost određuje kroz odnos (signal+šum+izobličenje)/(šum+izobličenje) zbog nelinearnosti sklopova koji su osjetljivi na signale malih amplituda.

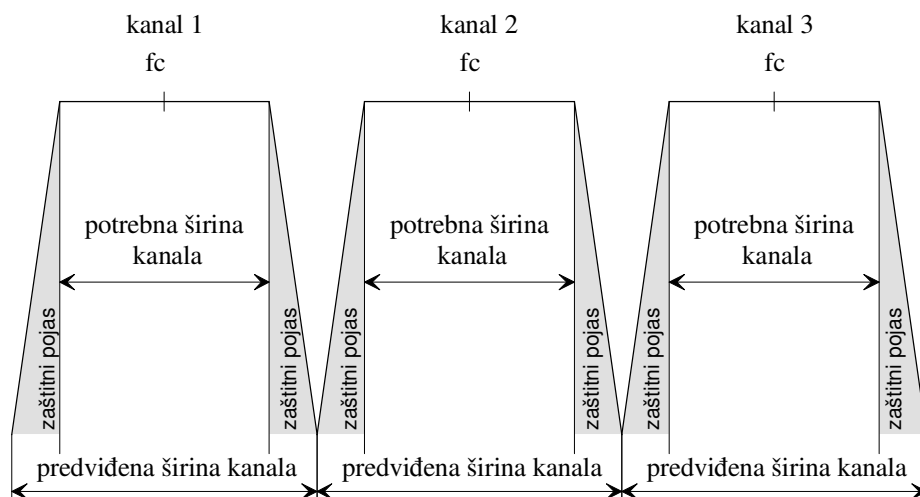
susjedna kanala s označenom prenosivom frekvencijom, zaštitnim pojasevima, predviđenom širinom kanala i potrebnom širinom kanala za prijenos informacije.

Odnos signal-šuma demoduliranog signala na prijemu (SNR_o) i signal-šum u komunikacijskom kanalu (CNR), SNR_o/CNR pokazuje dobitak u kvaliteti koji je ovisan o indeksu modulacije i izračunava se prema izrazu:

$$SNR_o = \frac{3}{2} \beta^2 \cdot CNR ,$$

a za indeks modulacije $\beta = 1,66667$ dobitak (izražen u dB) iznosi 6,2 dB.

Kod radiotelefonskih komunikacija govorni signali na predajnoj strani filtriraju se pojasnopropusnim filtrom s graničnim frekvencijama od 300 Hz i 3000 Hz, što je definirano kao standard pojasnog područja informacije za radiotelefonske komunikacije.

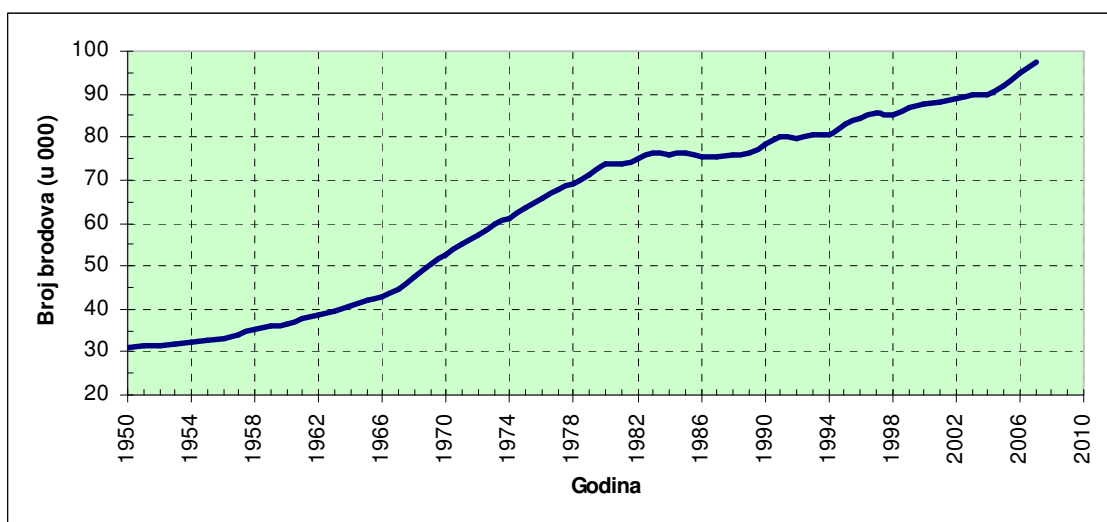


Slika 3.3. Prikaz susjednih kanala na VHF području

Izvor: Izradio autor

3.3. Problem preopterećenosti VHF područja

Na konferenciji 1987. godine (WARC Mob-87) utvrđeno je da postojeće VHF područje za pomorske komunikacije postaje u pojedinim područjima preopterećeno (zagušeno), te da je vjerojatno da će problem zagušenosti u budućnosti postati još veći. Do pravog podatka o veličini svjetske flote ili registriranih VHF radiostanica vrlo je teško doći, ali se kao reprezentativan podatak koristi statistika najvećeg registra *Lloyd's Register of Shipping*. Na slici 3.4 prikazan je broj registriranih brodova većih od 100 GT po godinama u svijetu koji je u odnosu na 1967. godinu, od kada je VHF područje podijeljeno u 56 kanala porastao za više od dva puta.⁵ Stvarni broj korisnika VHF područja je još i veći kada se ubroji i ostale navedene korisnike. U preporuci "RR Recommendation 318" s Konferencije WARC Mob-87 zahtijeva se pronalaženje rješenja za preopterećenost VHF područja. Međunarodna organizacija ITU 1994. godine u preporuci ITU-R M.1084-2⁶ kao prijelazno rješenje predlaže prilagodbu postojećeg komunikacijskog sustava kojom bi se postigao dvostruko veći broj kanala uz zadržavanje analogne tehnologije.



Slika 3.4. Ukupni broj registriranih brodova u svijetu većih od 100 GT

Izvor: World Fleet Statistics, Lloyd's Register of Shipping

⁵ Registrirani broj brodova 1967. godine bio je 44,375, a 2007. godine iznosio je 97,504 broda.

⁶ ITU-R Recommendation M.1084: Interim Solutions for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service

Alternativni komunikacijski sustav koristi uskopojasnu frekvencijsku modulaciju određenu maksimalnom devijacijom frekvencije vala nositelja od 2,5 kHz i maksimalnom frekvencijom informacije od 3 kHz. Indeks modulacije, odnosno maksimalna devijacija faze prenosivog signala u radijanima u ovom slučaju iznosi:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_{i \max}} = 0,83334 .$$

Dobitak u odnosu SNR_o/CNR izračunan prema izrazu:

$$SNR_o = \frac{3}{2} \beta^2 \cdot CNR ,$$

za opisanu modulaciju uz indeks modulacije $\beta = 0,83334$ iznosi svega 0,2 dB. Kako je kod analognih modulacija glavni uzrok degradacije kvalitete komunikacija odnos signal/šum predložena uskopojasna modulacija je slabije kvalitete u odnosu na postojeći komunikacijski sustav s širokopojasnom modulacijom.

Potrebna širina komunikacijskog kanala prema Carsonovom pravilu iznosi:

$$B_{PM} = 2f_{i \max} (\beta + 1) = 11 \text{ kHz} .$$

Predviđena širina kanal za uskopojasnu modulaciju je 12,5 kHz, čime je, kao i kod širokopojasne modulacije s $\beta = 1,66667$, osiguran i potrebni zaštitni pojas. Širina zaštitnog pojasa je 750 Hz sa svake strane komunikacijskog kanala. Uskopojasnom modulacijom udvostručio bi se broj kanala na VHF području te se pružila mogućnost za istovremeno obavljanje većeg broja komunikacija, ali uz određeni pad kvalitete.

Dozvoljena izlazna snaga predajnika je najviše 25 W, s obveznom mogućnošću smanjenja izlazne snage na 1W za potrebe obavljanja komunikacija na malim udaljenostima.

Osjetljivost prijemnika s upotrebom uskopojasne modulacije morala bi biti manja ili jednaka 0,3 μ V za odnos signal/šum na izlazu prijemnika od 12 dB. Selektivnost prijemnika uz predviđenu širinu kanala od 12,5 kHz mora biti bolja od 70 dB.

Na Konferenciji WRC-97 određena je numeracija i raspodjela kanala uz predviđenu širinu od 12,5 kHz i 6,25 kHz, te se omogućuje zemljama koje imaju problema sa preopterećenosti VHF područja primjena prijelaznog rješenja. Istaknuta je važnost efikasne upotrebe frekvencijskog spektra VHF područja ne samo za komunikacije vezane uz sigurnost (*distress and safety*), već i za ostale vrste komunikacija. Također je zaključak Konferencije da trajno rješenje koje bi osim većeg broja kanala pružilo i dodatne prednosti treba potražiti u primjeni digitalne tehnologije. Okvirni prijedlog za istraživanje primjene digitalnih tehnologija na VHF području ITU organizacija izradila je 1997. godine u preporuci ITU-R M.1312.⁷

⁷ ITU-R Recommendation M.1312: A Long Term Solution for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service

4. Komparativna analiza analognih komunikacijskih sustava

Rezultati ocjene kvalitete signala za dvaju analognih komunikacijskih sustava na pomorskom VHF području dobiveni su metodom simulacije korištenjem računalnog programa *SystemView*. Ocjena kvalitete signala informacije obrađenog simuliranim komunikacijskim sustavima dobivena je upotrebom računalnog programa preporučenog od organizacije ITU za objektivno ocjenjivanje kvalitete govornih signala (PESQ).⁸ Kod kutnih modulacija kvaliteta signala na prijemu ovisna je o indeksu modulacije (β) o kojem također ovisi i potrebna širina komunikacijskog kanala. Odnos signal-šum nakon demoduliranja (SNR_o) i u komunikacijskom kanalu (CNR) za linearni dio krivulje opisan je jednadžbom:

$$SNR_o = \beta^2(\beta + 1) \cdot CNR .$$

Postupak fazne modulacije za postojeći radiotelefonski komunikacijski sustav previđen za širine komunikacijskih kanala od 25 kHz definiran je u preporuci ITU R M.489⁹ sljedećim parametrima:

- najviša frekvencija informacije $f_{i_{max}}=3000$ Hz
- maksimalna dozvoljena devijacija frekvencije vala nosioca $\Delta f=5000$ Hz
- indeks modulacije $\beta=1,66$
- potrebna širina kanala $B_{PM}=16$ kHz.

Za alternativni radiotelefonski komunikacijski sustav sa širinama komunikacijskih kanala od 12,5 kHz koji ITU organizacija predlaže kao privremeno

⁸ Mrak, Z., Prilog povećanju broja komunikacijskih kanala na pomorskom VHF području, Magistarski rad, Rijeka, 2007.

⁹ ITU-R Recommendation M.489, Technical Characteristics of VHF Radiotelephone Equipment Operating in the Maritime Mobile Service in Channels Spaced by 25 kHz, 1995.

rješenje nedostatka komunikacijskih kanala na VHF području, u preporuci ITU-R M.1084¹⁰ fazna modulacija definirana je sljedećim parametrima:

- najviša frekvencija informacije $f_{i_{max}}=3000$ Hz
- maksimalna dozvoljena devijacija frekvencije vala nosioca $\Delta f=2500$ Hz
- indeks modulacije $\beta=0,83$
- potrebna širina kanala $B_{PM}=11$ kHz.

Ispitivanje kvalitete govornih signala za postojeći i alternativni komunikacijski sustav provedeno je u četiri koraka:

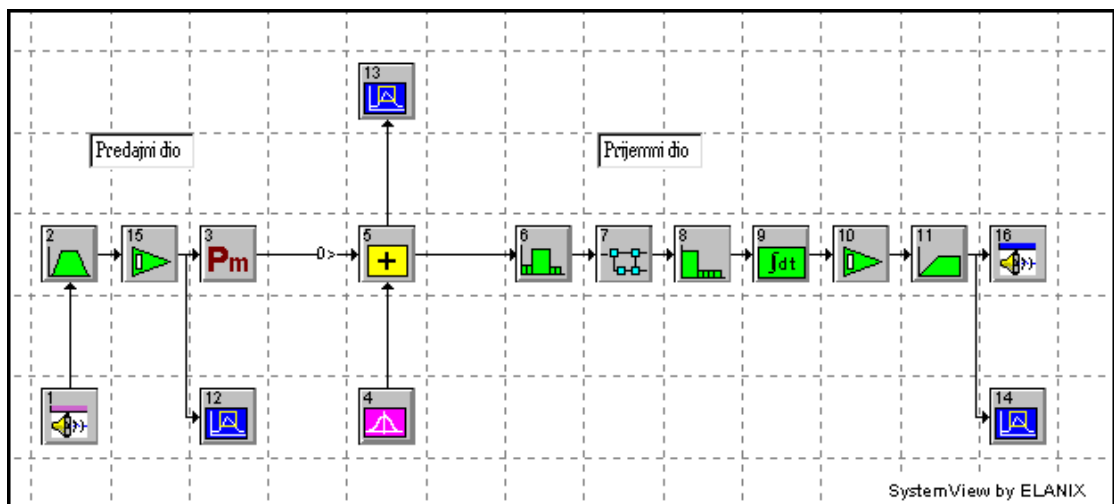
- 1) odabir govornih signala,
- 2) prilagodba simulacijskog modela komunikacijskih sustava,
- 3) generiranje izlaznih signala simulacijskim modelom,
- 4) ocjenjivanje kvalitete signala dobivenih simulacijom.

Govorni signali odabrani su iz raspoloživih uzoraka koji se nalaze u dodatku preporuke "*ITU-T Recommendation P.862 Perceptual evaluation of speech quality (PESQ)*". S obzirom da je engleski jezik službeni jezik u pomorskim komunikacijama, i u ovom su istraživanju odabrani signali s engleskog govornog područja. Govorni signali za potrebe testiranja imaju trajanje od osam sekundi i snimljeni su u nekomprimiranom 16-bitnom WAV formatu s frekvencijom uzimanja uzoraka od 8 kHz. Ulazne signale na kojima su obavljena ispitivanja kvalitete postojećeg i alternativnog komunikacijskog sustava predstavljaju četiri govorna signala (dva ženska i dva muška glasa).

¹⁰ ITU-R Recommendation M.1084, Interim Solutions for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service, 2001.

4.1. Opis simulacijskog modela VHF komunikacijskih sustava

Ispravnost razrađenog simulacijskog modela ispitana je signalima sinusnog valnog oblika, te je nakon ispitivanja ispravnosti model prilagođen za testiranje kvalitete govornih signala. Završni simulacijski model prikazan je na slici 4.1. Umjesto izvora sinusnog signala pomoću kojeg je obavljeno testiranje modela, uvedene su preinake u odnosu na ispitani model, odnosno postavljen je element za učitavanje i prilagodbu audio signala (element 1) i element za spremanje primljenog signala u WAV format (element 16).



Slika 4.1. Simulacijski model prilagođen za ulazni govorni signal

Izvor: Izradio autor

Za ispravnu obradu ukupnog govornog signala određeno je vrijeme odvijanja simulacije u trajanju od 8 sekundi. Odabrana je brzina uzimanja uzoraka (*Sample Rate*) od 192 kHz, što je tri puta više od najviše frekvencije koja se analizira u simulacijskom modelu. Najviša frekvencija koja se koristi u analizi ujedno predstavlja gornju granicu komunikacijskog kanala kod širokopojasne modulacije. Broj uzoraka uz navedene parametre iznosi 1.536.001 uzorak, čime je osigurana kvalitetna simulacija analognog sustava s rezolucijom frekvencije od 0,125 Hz.

Simulacijskim programom određeno je da brzina uzimanja uzoraka mora biti jednaka za sve elemente u simuliranom komunikacijskom sustavu, te je prilikom učitavanja audio signala koji ima frekvenciju uzimanja uzoraka od 8 kHz obavljena potrebna prilagodba kroz povećanje brzine uzimanja uzoraka na 192 kHz. Nadalje, pojačalom je određena maksimalna amplituda za svaki od četiri odabrana govorna signala kako bi svaki modulirani signal ostao unutar granica komunikacijskog kanala, odnosno kako bi se osigurala maksimalna dozvoljena širina frekvencijskog spektra moduliranog signala.

Kada su prilagođeni parametri u skladu sa zahtjevima modela, provedena je simulacija u kojoj je za svaki odabrani uzorak dobiven izlazni govorni signal. Za potrebe ispitivanja kvalitete govornih signala provedeno je šest simulacija na svakom odabranom uzorku, i to posebno za svaku vrstu modulacije. Ukupno je dakle dobiveno 48 izlaznih signala.

Prvi izlazni signal dobiven je simulacijom komunikacijskog sustava u idealnim uvjetima, to jest bez utjecaja signala šuma na modulirani signal. Ostalih pet izlaznih signala generirano je uz utjecaj smetnji u komunikacijskom sustavu. Odabrane su vrijednosti jačine signala smetnje, zadane kroz odnos signal/šum u komunikacijskom kanalu (*CNR*) od 10, 15, 20, 25 i 30 dB.

4.2. Usporedba dvaju sustava s obzirom na kvalitetu signala

Ocjena kvalitete svakog od 48 primljenih signala provedena je pomoću računalnog programa za objektivno ocjenjivanje kvalitete govornih signala (*PESQ*). Obavljena je usporedba odaslanog (originalnog) i primljenog (degradiranog) govornog signala za svaki uzorak i dobiveni su rezultati za *PESQMOS*.

Dobiveni rezultati obrađeni su funkcijom za prilagodbu *PESQMOS* u *SMOS*. kako bi bili usporedivi s ocjenama kvalitete signala u ostalim komunikacijskim sustavima:

$$SMOS = 0,999 + \frac{4,999 - 0,999}{1 + e^{-1,4945 \cdot PESQMOS + 4,6607}} \cdot$$

Rezultati analize kvalitete govornih signala prikazani su u tablicama 4.1. - 4.8. Za svaki pojedini uzorak izrađene su odvojene tablice za postojeću i alternativnu modulaciju na VHF području u pomorskim komunikacijama. Rezultati iz tablica predočeni su grafički na slikama 4.2. - 4.5. iz kojih je vidljiva razlika u kvaliteti signala za postojeću i alternativnu modulaciju.

Tablica 4.1. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 1,6667$, $B_{PM} = 16$ kHz, širina kanala od 25 kHz); uzorak muški glas 1

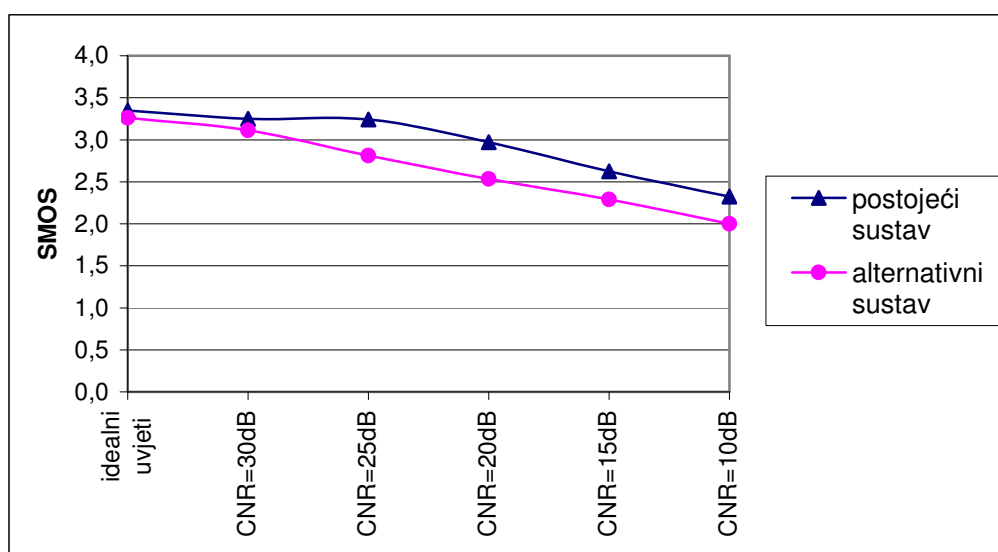
CNR	PESQMOS	SMOS
idealni uvjeti	3,355	3,349
30	3,287	3,249
25	3,282	3,242
20	3,099	2,970
15	2,864	2,623
10	2,647	2,322

Izvor: Izradio autor

Tablica 4.2. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 0,8334$, $B_{PM} = 11$ kHz, širina kanala od 12,5 kHz); uzorak muški glas 1

CNR	PESQMOS	SMOS
idealni uvjeti	3,294	3,260
30	3,194	3,112
25	2,992	2,810
20	2,800	2,532
15	2,623	2,290
10	2,384	2,000

Izvor: Izradio autor



Slika 4.2. Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.1. i 4.2.

Izvor: Izradio autor

Tablica 4.3. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 1,6667$, $B_{PM} = 16$ kHz, širina kanala od 25 kHz); uzorak muški glas 2

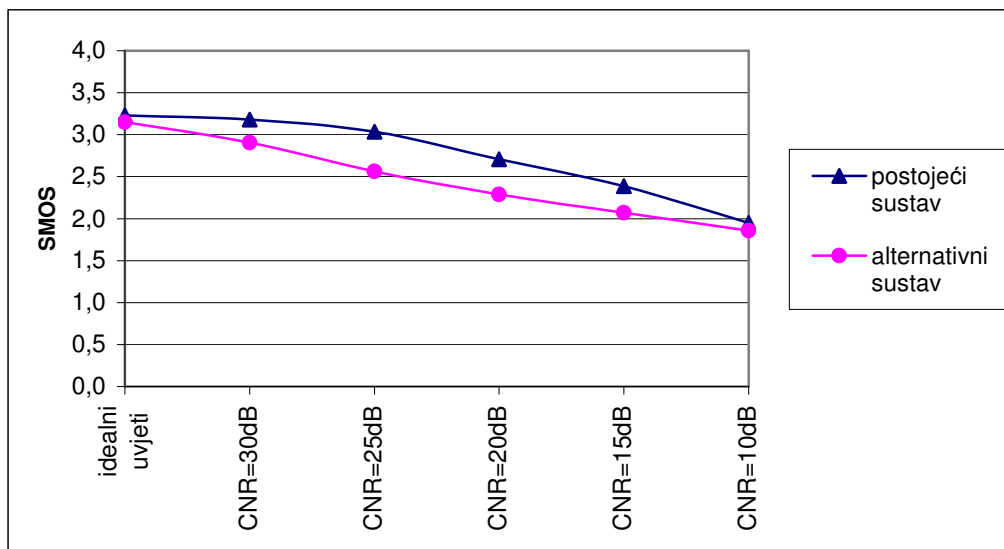
CNR	PESQMOS	SMOS
idealni uvjeti	3,274	3,230
30	3,239	3,179
25	3,144	3,037
20	2,923	2,709
15	2,696	2,388
10	2,339	1,950

Izvor: Izradio autor

Tablica 4.4. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 0,8334$, $B_{PM} = 11$ kHz, širina kanala od 12,5 kHz); uzorak muški glas 2

CNR	PESQMOS	SMOS
idealni uvjeti	3,220	3,150
30	3,057	2,907
25	2,823	2,564
20	2,621	2,288
15	2,446	2,071
10	2,251	1,858

Izvor: Izradio autor



Slika 4.3. Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.3. i 4.4.

Izvor: Izradio autor

Tablica 4.5. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 1,6667$, $B_{PM} = 16$ kHz, širina kanala od 25 kHz); uzorak ženski glas 1

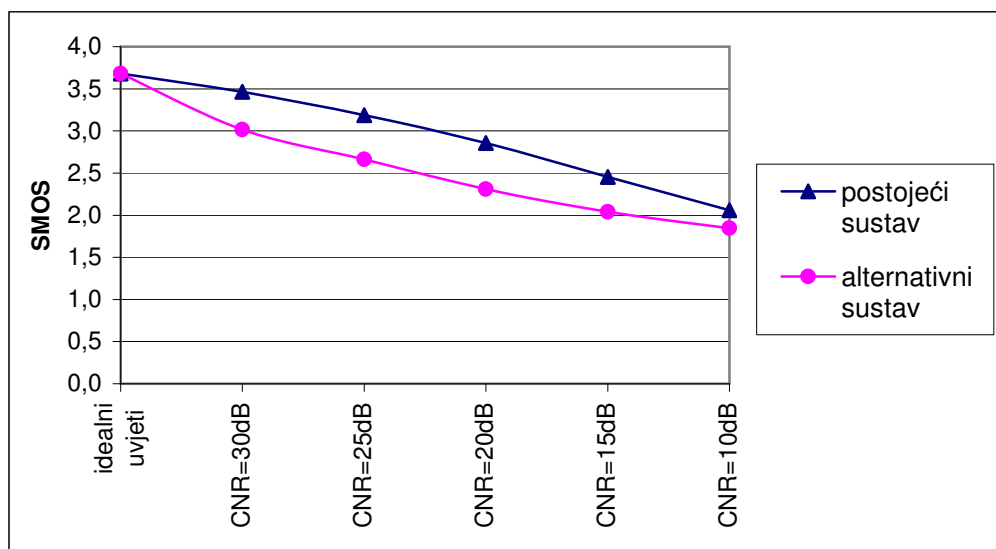
CNR	PESQMOS	SMOS
idealni uvjeti	3,593	3,680
30	3,437	3,466
25	3,246	3,189
20	3,022	2,855
15	2,744	2,453
10	2,435	2,058

Izvor: Izradio autor

Tablica 4.6. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 0,8334$, $B_{PM} = 11$ kHz, širina kanala od 12,5 kHz); uzorak ženski glas 1

CNR	PESQMOS	S-MOS
idealni uvjeti	3,593	3,680
30	3,129	3,015
25	2,892	2,664
20	2,638	2,310
15	2,418	2,038
10	2,240	1,847

Izvor: Izradio autor



Slika 4.4. Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.5. i 4.6.

Izvor: Izradio autor

Tablica 4.7. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 1,6667$, $B_{PM} = 16$ kHz, širina kanala od 25 kHz); uzorak ženski glas 2

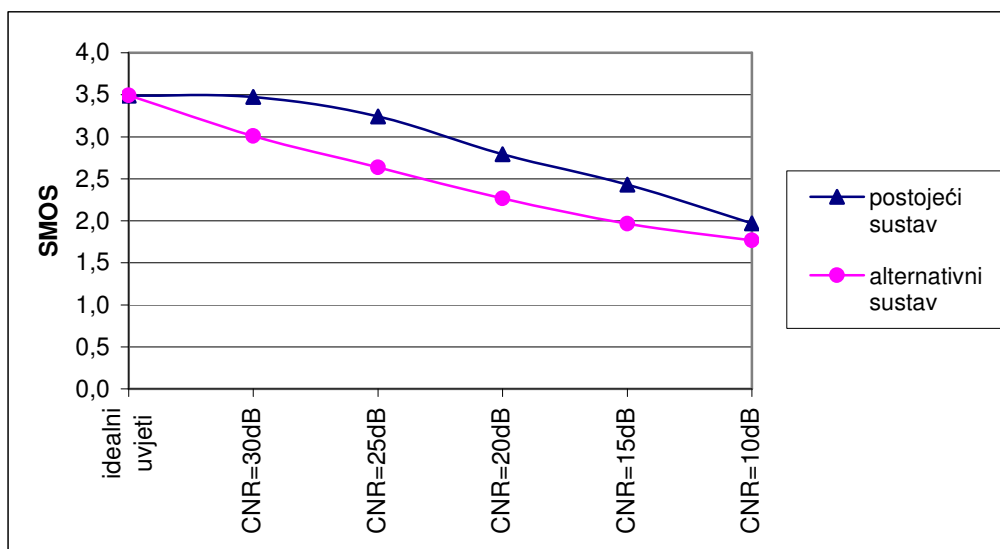
CNR	PESQMOS	S-MOS
idealni uvjeti	3,454	3,490
30	3,442	3,473
25	3,283	3,244
20	2,981	2,794
15	2,727	2,430
10	2,356	1,969

Izvor: Izradio autor

Tablica 4.8. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav (indeks modulacije $\beta = 0,8334$, $B_{PM} = 11$ kHz, širina kanala od 12,5 kHz); uzorak ženski glas 2

CNR	PESQMOS	S-MOS
idealni uvjeti	3,457	3,494
30	3,125	3,009
25	2,874	2,638
20	2,606	2,268
15	2,355	1,967
10	2,157	1,767

Izvor: Izradio autor



Slika 4.5. Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.7. i 4.8.

Izvor: Izradio autor

Iz rezultata dobivenih simulacijom komunikacijskih sustava i metodom objektivnog ocjenjivanja kvalitete govornih signala je vidljivo da je ocjena kvalitete za pojedini uzorak u idealnim uvjetima bez utjecaja smetnji gotovo identična za obje vrste modulacije, a neznatno se razlikuje za pojedini govorni signal.

Ocjena SMOS kreće se za idealne uvjete od 3,2 do 3,7. Razlike u ocjeni nastale su zbog različitih karakteristika glasova pojedinih govornika (visina glasa...), a također i zbog različitog odnosa suglasnika i samoglasnika u uzorcima. Prilikom ocjenjivanja kvalitete govornih signala u idealnim uvjetima u komunikacijskom kanalu na ocjenu utječu elementi za filtriranje signala koji propuštaju samo raspon frekvencija od 300 do 3000 Hz, kao i određeni gubitak signala koji nastaje zbog dozvoljenog izobličenja signala kod određivanja potrebne širine kanala nakon modulacije.

Uvođenjem smetnji u komunikacijski kanal primjećuje se pad ocjene kvalitete govornih signala uz smanjenje odnosa *CNR*, odnosno povećanjem utjecaja smetnji. Za postojeću modulaciju SMOS za pojedine uzorke kreće se u granicama od 2,0 do 3,5 što bi se moglo izraziti kroz osjet kvalitete kao slaba do zadovoljavajuća/dobra kvaliteta.

Tablica 4.9. Rezultati analize za postojeći komunikacijski sustav

Uzorak	SMOS	Osjet kvalitete
muški glas 1	2,3 – 3,2	slaba do zadovoljavajuća/dobra
muški glas 2	2,0 – 3,2	slaba do zadovoljavajuća/dobra
ženski glas 1	2,1 – 3,5	slaba do zadovoljavajuća/dobra
ženski glas 2	2,0 – 3,5	slaba do zadovoljavajuća/dobra

Izvor: Izradio autor

Kod alternativnog komunikacijskog sustava primjećuje se pad kvalitete u odnosu na postojeći komunikacijski sustav, a ocjena SMOS kreće se u granicama od 1,8 do 3,1 što bi se kroz osjet kvalitete moglo ocijeniti kao slaba do zadovoljavajuća kvaliteta.

Tablica 4.10. Rezultati analize za alternativni komunikacijski sustav

Uzorak	SMOS	Osjet kvalitete
muški glas 1	2,0 – 3,1	slaba do zadovoljavajuća
muški glas 2	1,9 – 2,9	slaba do zadovoljavajuća
ženski glas 1	1,8 – 3,0	slaba do zadovoljavajuća
ženski glas 2	1,8 – 3,0	slaba do zadovoljavajuća

Izvor: Izradio autor

Provedene analize kvalitete govornih signala i usporedba dobivenih rezultata potvrđuju teoretske pretpostavke da smanjenjem indeksa modulacije kod kutnih modulacija dolazi do gubitka kvalitete govornih signala. No, alternativni komunikacijski sustav kojim bi se omogućilo udvostručavanje broja kanala na pomorskom VHF području ne iskazuje značajan gubitak u usporedbi s postojećim komunikacijskim sustavom.

Smanjivanjem indeksa modulacije i širine komunikacijskog kanala smanjuje se i poboljšanje odnosa signal/šum, određeno u linearnom području krivulja jednadžbom $SNR_o = \beta^2 (\beta + 1) \cdot CNR$. No, uz smanjenu širinu kanala, smanjuje se i utjecaj signala šuma koji je ovisan o širini komunikacijskog kanala. Dakle, pri istim uvjetima u komunikacijskom kanalu i uz istu predajnu snagu uređaja, odnos signal/šum je nešto bolji kod manjih širina komunikacijskih kanala nego pri većim širinama. To znači da je u stvarnim uvjetima, uz identične uvjete u komunikacijskom kanalu, moguće očekivati i nešto bolje performance od onih izmjerenih u ovom istraživanju.

Valja napomenuti da se navedeni zaključci temelje na rezultatima dobivenim simulacijama komunikacijskih sustava, te je za ispravno zaključivanje potrebno provesti i mjerenja kvalitete govornih signala za pojedini komunikacijski sustav u stvarnim uvjetima.

Iako rezultati ukazuju na zadovoljavajuću razinu kvalitete signala u predloženom sustavu koji omogućuje dvostruko veći broj komunikacijskih kanala na pomorskom VHF području, zadržavanjem analognih komunikacija ostaje se na istoj razini pružanja komunikacijskih usluga korisnicima. Iskustva iz digitalnih kopnenih sustava ukazuju na veću učinkovitost u pogledu iskorištavanja raspoloživog

frekvencijskog spektra u odnosu na analogne komunikacijske sustave uz povećanje kvalitete signala na prijemu. Također, mogućnosti digitalnih komunikacijskih sustava u pogledu pružanja različitih vrsta usluge znatno su veće u odnosu na analogne sustave. Moderni digitalni komunikacijski sustavi fleksibilniji su kod potrebnih prilagodbi uzrokovanih novim zahtjevima korisnika i povećanjem broja korisnika.

5. Odabir spektralno učinkovite digitalne tehnologije obrade govornog signala prikladne za pomorski VHF sustav

S obzirom na cilj povećanja kapaciteta pomorskog VHF sustava (broja kanala), potrebno je istražiti prednosti koje pojedini načini kodiranja postižu u smislu smanjivanja broja bitova potrebnih za prijenos uz istovremeno očuvanje svih relevantnih parametara nužnih za kvalitetnu reprodukciju signala na prijemnoj strani.

Budući da je namjena VHF komunikacija prvenstveno prijenos govornih signala koji se prenose u digitalnom obliku, zbog načina kodiranja koji osigurava potrebnu spektralnu učinkovitost, potrebno je razmotriti karakteristike govornih signala značajne za digitalnu obradu signala i kodiranje. U ovom poglavlju prikazani su postojeći načini kodiranja da bi se ukazalo na parametre koji predodređuju najefikasniji sustav prikladan za govorne komunikacije. Bitan parametar po kojem je digitalni komunikacijski sustav usporediv s analognim sustavom je kvaliteta signala na prijemu, te se u radu upravo kvaliteta signala, ali uz postizanje spektralne učinkovitosti, primjenjuje kao osnovni kriterij za odabir načina kodiranja. Linearno prediktivno kodiranje (poglavlje 5.4.) je podloga većine parametarskih i hibridnih načina kodiranja koji su ujedno i spektralno najučinkovitiji pri prijenosu složenih govornih signala, a princip rada konkretnog koda prikazan je primjeru CELP (*Code Excited Linear Prediction Coding*) koda koji se pokazao učinkovit u kopnenim digitalnim komunikacijskim sustavima, a u literaturi je iscrpno objašnjen.

5.1. Svojstva govornih signala i njihove implikacije pri korištenju digitalnih tehnologija

Čovjekov slušni sustav reagira na podražaje zvučnih valova i raspoznaje signale u rasponu frekvencija od 20 Hz do 20 kHz, ali raspon frekvencija na koje reagira ovisi o slušnim sposobnostima pojedinca. Uzevši u obzir da je raspon jačine zvučnih signala na koje sustav reagira jako velik za prikaz jačine signala najpogodnija

je logaritamska skala, te se jačina zvučnih signala na koje slušni sustav reagira mjeri u dB_{SPL} (*Sound Pressure Level*):

$$dB_{\text{SPL}} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_1}{p_0} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right).$$

Referentna vrijednost je pritisak zvučnog vala frekvencije 2 kHz ($p_0 = 20 \mu\text{Pa}$) što predstavlja prag čujnosti, a p_1 je izmjereni pritisak. Gornja granica jačine zvučnih valova iznosi 194,09 dB_{SPL} , nakon čega se valovi tretiraju kao udarni valovi (*shock wave*). U tablici 5.1. navedene su jačine zvučnih signala i njihovo djelovanje na slušni sustav.

Tablica 5.1. Jačina i učinak zvučnih valova

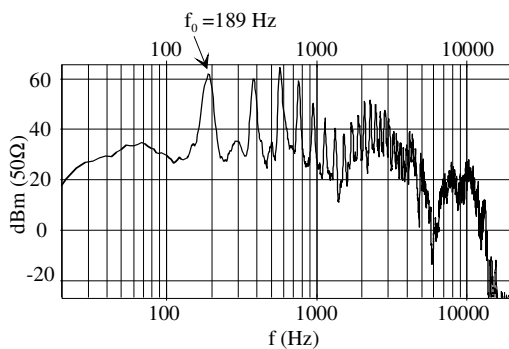
Učinak	Jačina zvučnog vala dB_{SPL}
granica boli	130
oštećenje sluha kod kratke izloženosti	od 120
avion na 100 m udaljenosti	110-140
pneumatski čekić na 1 m udaljenosti; disko klub	cca. 100
oštećenje sluha kod duže izloženosti	ab 90
magistralna cesta na 10 m	80-90
putnički automobil na 10 m	60-80
kućni TV prijemnik na 1 m	cca. 60
normalni razgovor na 1 m	40-60
vrlo tiha soba	20-30
šum lišća, tiho disanje	10
prag čujnosti za frekvenciju 2 kHz	0

Izvor: http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure_level

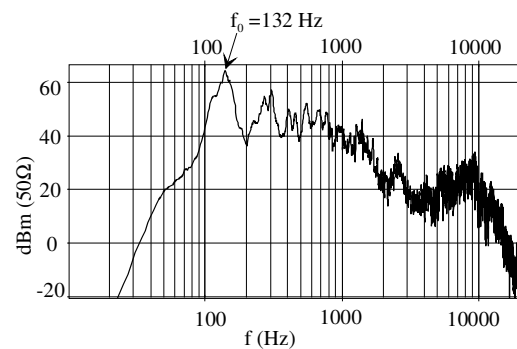
Informacija u radiotelefonskim komunikacijama je analogni govorni signal čije su osnovne karakteristike njegova jačina, osnovna frekvencija te odnos harmonički vezanih komponenti koje određuju boju tona, odnosno boju glasa. Govor nastaje istiskivanjem zraka kroz glasnice koje svojim oscilacijama stvaraju zvučne valove, te se oni dodatno oblikuju u ostalim djelovima vokalnog trakta (usna šupljina, zubi, usnice ...). Iako svaka osoba ima karakterističan glas, postoje zajedničke osnovne karakteristike kojima se opisuju govorni signali.

Visinu glasa određuje osnovna frekvencija koja se kod muškaraca kreće od 85 do 155 Hz, a kod žena od 165 do 255 Hz. Ukupni raspon govornih frekvencija, odnosno harmoničkih frekvencija nalazi se području do 8 kHz.

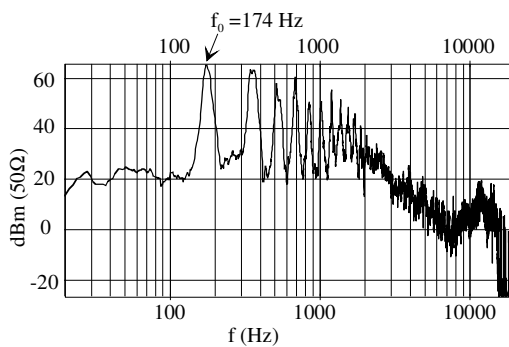
Glavninu snage govornih signala proizvode samoglasnici kod kojih se glavna snaga nalaze u frekvencijskom području od 250 Hz do 500 Hz, no za razumljivost govora značajni su suglasnici koji zauzimaju frekvencijski opseg od 2000 Hz do 4000 Hz.¹¹ Gubitak slušnih sposobnosti kod starijih osoba koji uzrokuje slabije razumijevanje govora nastaje smanjenjem frekvencijskog opsega na koji reagira slušni sustav. Sličan efekt koji se manifestira gubitkom kvalitete javlja se i kod telefonskih komunikacija zbog limitiranja frekvencijskog opsega govornih signala.



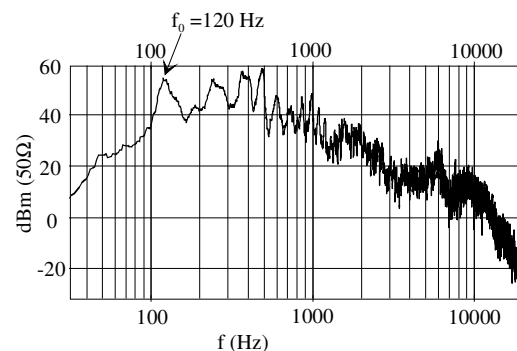
a) Ženski glas 1: $f_0=189$ Hz



c) Muški glas 1: $f_0=132$ Hz



b) Ženski glas 2: $f_0=174$ Hz



d) Muški glas 2: $f_0=120$ Hz

Slika 5.1. Spektar frekvencija govornih signala

Izvor: Izradio autor

¹¹ Mc Squared System Design Group, Inc: Design for Speech Intelligibility, <http://www.mcsquared.com/speech.htm>

Analiziranjem govornih signala utvrđeno je da se veliki dio snage signala (oko 98%) nalazi u frekvencijskom području do 3 kHz. Nakon frekvencije 1 kHz snaga pojedinih komponenti signala opada.¹² Slika 5.1. prikazuje spektralnu analizu govornog signala četiri osobe (dvije ženske i dvije muške osobe). Uzorak na kojem je rađena analiza je kvalitetan snimak emisija radio programa u digitalnom obliku s frekvencijom uzimanja uzorka od 44,1 kHz, što po kvaliteti odgovara audio CD signalu. Snimka je studijske kvalitete s vrlo slabim signalom šuma.

Tablica 5.2. Rezultati mjerenja spektralne analize govornih signala

Raspon frekvencija	Postotak ukupne snage			
	Ženski glas 1	Ženski glas 2	Muški glas 1	Muški glas 2
20 Hz – 8 kHz	99,95%	99,97%	99,15%	99,90%
20 Hz – 4 kHz	99,81%	99,94%	98,50%	99,55%
20 Hz – 3 kHz	99,54%	99,91%	98,44%	99,49%
20 Hz – 1 kHz	96,71%	91,72%	93,79%	96,07%
1 kHz – 3 kHz	2,91%	8,53%	4,73%	3,29%
300 Hz – 3 kHz	62,36%	69,89%	65,13%	75,18%

Izvor: Izradio autor

Sva četiri uzorka pokazuju da se više od 99% ukupnog signala nalazi u frekvencijskom području od 20 Hz do 8 kHz, dok se u frekvencijskom području do 3 kHz nalazi 98-99% ukupne snage signala. Signali na kojima je rađena analiza su u obliku jedne riječi s različitim kombinacijama samoglasnika i suglasnika. Izgovorene riječi su za ženski glas 1 riječ "play", ženski glas 2 "album", muški glas 1 "produkcija" i muški glas 2 "glazbeni". Zbog uštede u frekvencijskom spektru za radiotelefonske komunikacije govorni signali ograničeni su u frekvencijsko područje od 300 do 3000 Hz. Ograničavanje frekvencijskog opsega utječe na razumljivost govora jer nastaje problem kod razlikovanja pojedinih suglasnika. Sužavanje frekvencijskog pojasa na raspon od 300 do 3000 Hz kod telefonskih komunikacija djeluje na smanjivanje razumljivosti govora s obzirom da se ne prenose frekvencije koje su značajne za samoglasnike. Također se potiskuje i osnovna frekvencija, ali se zbog dovoljnog broja harmonika kod slušatelja stvara osjet osnovne frekvencije.

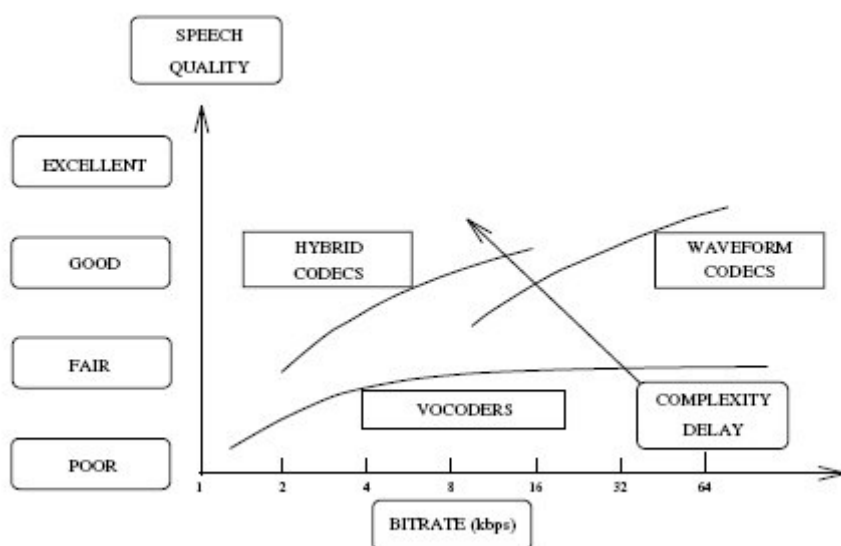
¹² Paul H. Young, Electronic Communication Techniques, str. 77

5.2. Metode kodiranja govornog signala

U digitalnim komunikacijskim sustavima prenosi se kodirani analogni govorni signal koji se kodira na sljedeće načine:¹³

1. kodiranje valnog oblika signala
2. kodiranje izvora signala (parametarsko kodiranje)
3. hibridno kodiranje.

Osnovne razlike u načinima kodiranja prikazane su na slici 5.2., a iskazuju se kroz količinu informacije nakon kodiranja o kojoj ovisi potrebna brzina prijenosa, postignutu kvalitetu signala, složenost postupka kodiranja i kašnjenje signala nastalo zbog primjene kodera.



Slika 5.2. Odnos količine informacija i kvalitete signala za osnovne načine kodiranja govornih signala

Izvor: Lajos Hanzo, F. Clare Somerville, Jason Woodard; Voice and Audio Compression for Wireless Communications, John Wiley & Sons, England, 2007. str. 8.

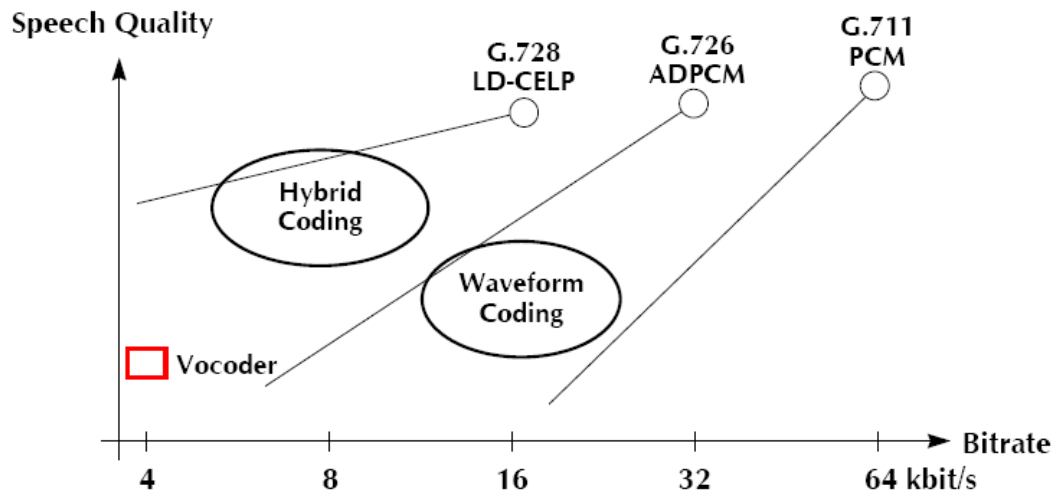
Kodiranje valnog oblika neovisno je o vrsti signala te je stoga primjenjivo za sve signale, a za postizanje visoke kvalitete signala digitalna replika izvornog analognog signala mora biti čim vjernija što zahtijeva velike količine bitova. Dijeli se na

kodiranje u vremenskoj domeni gdje su najpoznatije tehnike PCM (*Pulse Code Modulation*) i ADPCM (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*), i na kodiranje u frekvencijskoj domeni gdje su najpoznatije tehnike SBC (*Sub-Band Coding*) iz kojeg je proizašao MPEG koder i ATC (*Adaptive Transform Coding*), a obje se koriste za kodiranje širokopojasnih audio signala.

Parametarskim kodiranjem signala postiže se vrlo visok stupanj kompresije, ali uz vrlo nisku sintetičku kvalitetu govornog signala na prijemu. Kodiranje se odvija na segmentiranom uzorku govornog signala, a izlaz iz parametarskog kodera nije vjerna replika ulaznog signala već parametri koji opisuju govorni trakt, oblik pobudnog signala (zvučna/bezvučna pobuda) i osnovna frekvencija glasa kod zvučne pobude. Određivanje parametara govornog trakta obavlja se pomoću metode linearne predikcije, a najpoznatiji predstavnik je koder razrađen za potrebe američke vojske LPC-10 s brzinom prijenosa od 2400 bit/s.

Kodiranje valnog oblika signala zbog potrebne velike brzine prijenosa nije pogodno za digitalne komunikacijske sustave koji zahtijevaju malu širinu komunikacijskog kanala, dok je parametarsko kodiranje pogodno, ali ne omogućuje dovoljnu kvalitetu signala. Za takve sustave koriste se hibridni načini kodiranja signala, koji zbog specifičnosti načina kodiranja zahtijevaju znatno manje brzine prijenosa uz istovremeno postizanje visoke kvalitete signala. Metoda hibridnog kodiranja je kombinacija parametarskog kodiranja i kodiranja valnog oblika signala, a postoji veliki broj kodera koji su za različite potrebe razrađeni ovom metodom. Povećanjem stupnja kompresije kod hibridnih kodera kvaliteta signala manje opada u odnosu na kodere valnog oblika signala. Na slici 5.3. prikazan je odnos brzine prijenosa i kvalitete signala za dva kodera valnog oblika (PCM i ADPCM), hibridni koder (LD-CELP) i koder izvora (*Vocoder*). Ulazni signal za sve hibridne kodere je digitalizirani govorni signal PCM načinom kodiranja.

¹³ Lajos Hanzo, F. Clare Somerville, Jason Woodard; *Voice and Audio Compression for Wireless Communications*, John Wiley & Sons, England, 2007.



Slika 5.3. Utjecaj tehnike kodiranja na kvalitetu govornih signala kod digitalnih komunikacijskih sustava

Izvor: **Opticom, Germany 2000: State of the Art Voice Quality Testing**, White paper, str. 4.

Postupak analogno-digitalne pretvorbe signala definiran je kroz tri faze:

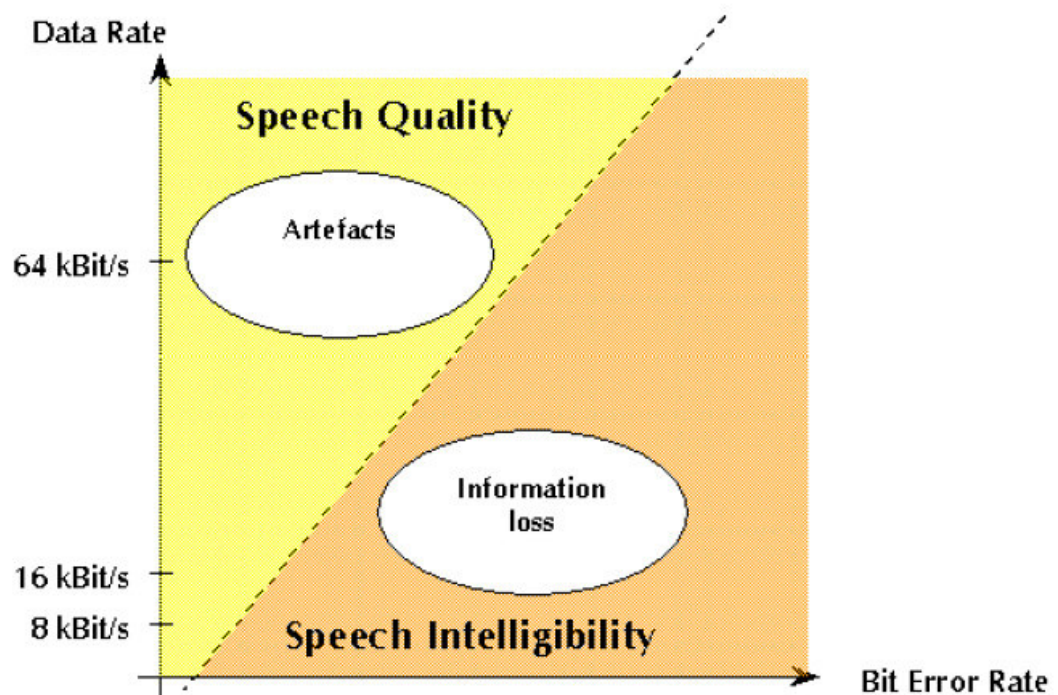
- uzorkovanje: određivanje diskretnih vremenskih intervala uz definiranu frekvenciju uzimanja uzoraka,
- kvantiziranje: određivanje diskretnih vrijednosti amplitude uzorkovanog signala (linearno ili nelinearno),
- kodiranje: pretvaranje diskretnih vrijednosti uzoraka signala u digitalni signal.

Osnovni standard za analogno-digitalnu pretvorbu govornih signala za potrebe telefonskih komunikacija definiran je ITU-T G.711 preporukom.¹⁴ Tehnika A/D pretvorbe je PCM (*Pulse Code Modulation*) i spada u tehnike kodiranja valnog oblika signala. Frekvencija uzorkovanja iznosi 8 kHz čime je osigurano kvalitetno uzorkovanje govornih signala ograničenih na frekvencijski pojas do 3 kHz. Nyquist-Shannonov teorem za uzorkovanje signala definira potrebnu frekvenciju uzorkovanja koja mora biti veća ili jednaka dvostrukoj vrijednosti najviše frekvencije informacije ($f_s \geq 2 \cdot f_{i_{\max}}$).

¹⁴ ITU-T Recommendation G.711, Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies, 1988.

Kvantiziranje uzorkovanih signala je logaritamsko (nelinearno kvantiziranje), a predviđena su dva algoritma " μ -law" koji se primjenjuje u Americi i Japanu i "A-law" koji se koristi u ostalim zemljama. Kvantiziranje se izvodi u 256 razina signala što čini 8 bita po uzorku. Ukupna količina podataka za PCM kodirani govorni signal iznosi 64 kbit/s, a osjetilna kvaliteta PCM signala vrlo je velika i iznosi 4,45 na MOS skali u idealnim uvjetima.

Kod digitalnih komunikacijskih sustava za prijenos govora na kvalitetu signala utječe brzina uzimanja uzoraka (*sample rate* ili *data rate*) kao i način pretvorbe analogne informacije u digitalni oblik (Slika 5.3.), ali također i smetnje u prijenosnom sustavu koje uzrokuju gubitak razumljivosti na prijemu. Kod digitalnih komunikacija utjecaj smetnji u prijenosnom kanalu izražava se kroz broj pogrešno primljenih bitova (*Bit Error Rate*), a sustavi koji koriste način kodiranja s velikom brzinom uzimanja uzoraka otporniji su na utjecaj smetnji (Slika 5.4.).



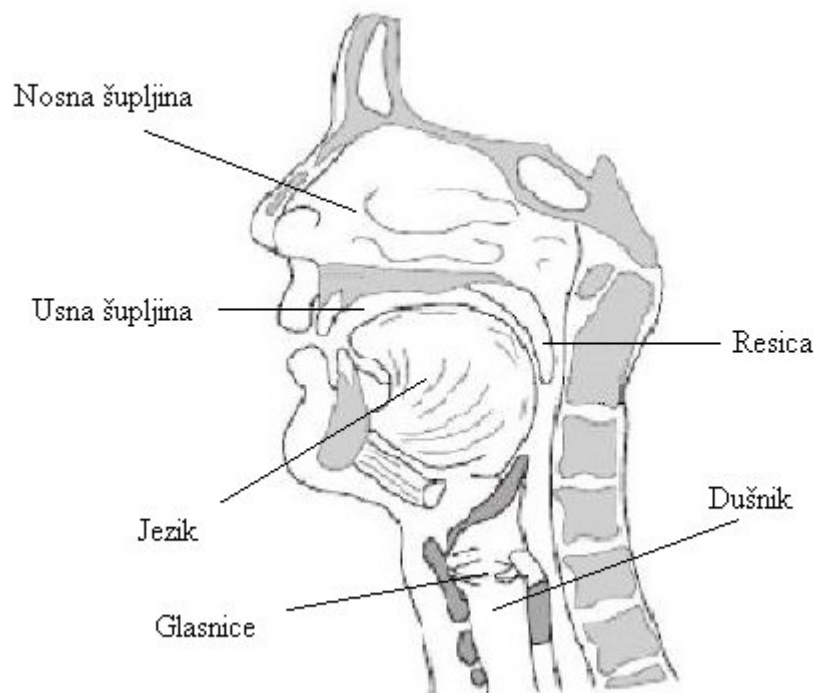
Slika 5.4. Utjecaj brzine uzimanja uzoraka i smetnji na govorne signale

Izvor: **Opticom, Germany 2000: State of the Art Voice Quality Testing**, White paper, str. 9.

5.3. Modeliranje govornog sustava

Kod primjene parametarskih i hibridnih koderata potrebno je poznavanje mehanizma nastajanja govora. Proces nastajanja govora (govornog signala) uključuje lingvističku razinu u kojoj se prema pravilima gramatike pojedinog jezika formiraju riječi/fraze, te se preko živčanog sustava pokreću određeni mišići čime se govor svodi na fiziološku razinu, što u konačnici rezultira nastajanjem zvučnog (akustičnog) govornog signala. Govorni zvučni signal izrazito je složenog valnog oblika i vrlo promjenjiv.

Govor na fiziološkoj razini nastaje pobuđivanjem govornog trakta akustičnim signalom, a različiti glasovi tvore se promjenama oblika govornog trakta i njegovim djelovanjem na signal pobude. Govorni trakt se može usporediti s filtrom koji određuje spektralne karakteristike signala. Na slici 5.5. prikazan je govorni trakt s dijelovima koji utječu na stvaranje govornih signala.



Slika 5.5. Shematski prikaz govornog trakta

Izvor: Prilagođeno prema: Sami Lemmetty, *Review of Speech Synthesis Technology*, Master's Thesis, Helsinki University of Technology, 1999., str. 15.

Pobudni akustični signal nastaje istiskivanjem zraka iz pluća koji se formira prolaskom kroz prostor između glasnica (*glottis*). Za potrebe kodiranja govornih signala najpogodnija je njihova podjela prema vrsti pobudnog signala. Ovisno o vrsti pobudnog signala osnovna podjela glasova je na zvučne (*voiced excitation*) i bezzvučne (*unvoiced excitation*), no kod pojedinih glasova se uočava i mješovita pobuda (*mixed excitation*) koja nastaje kombinacijom zvučne i bezzvučne pobude u pojedinim dijelovima frekvencijskog spektra.

Zvučni glasovi nastaju pobuđivanjem govornog trakta kvaziperiodičnim zvučnim signalom uzrokovanim titranjem glasnica koje moduliraju struju zraka iz pluća. Spektralna karakteristika zvučnih glasova pokazuje da se sastoje od velikog broja harmoničnih komponenti, a osnovna frekvencija odgovara brzini titraja glasnica kojom je definirana visina glasa. Brzina titranja (vibriranja) glasnica iznosi od 60 puta u sekundi kod muških osoba do čak 500 puta u sekundi kod djece. Zvučnim pobudnim signalima tvore se svi samoglasnici ([a] [e] [i] [o] [u]) i lateralni suglasnici ([l] [lj]).

Suglasnici nastaju ili bezzvučnom pobudom ili zvučnom pobudom uz dodatnu kontrolu pobudnog signala u dijelovima govornog trakta. Kod bezzvučne pobude glasnice su potpuno otvorene i ne moduliraju zračnu struju, već se ona oblikuje stvaranjem prepreka u određenim dijelovima govornog trakta.

Nazalni glasovi ([m] [n]) su po vrsti pobude zvučni signali, ali se dio zračne struje pomoću mekog nepca usmjerava prema nosnoj šupljini.

Plozivi (*plosive sounds*) nastaju pobuđivanjem govornog trakta trenutnim otpuštanjem zraka (pritiska), a dijele se na zvučne ([b] [d] [g]) i bezzvučne ([p] [t] [k]).

Frikativi (*fricatives*) su bezzvučni glasovi, a nastaju pobuđivanjem govornog trakta turbulentnom zračnom strujom koja stvara prolazak zraka kroz uski prolaz ([f] [s] [š]).

Zvučni frikativi nastaju turbulencijom zraka i vibriranjem glasnica ([v] [z] [ž]).

Afrikati (*Affricates*) započinju kao plozivi, a prelaze u frikative ([č] [dž]).

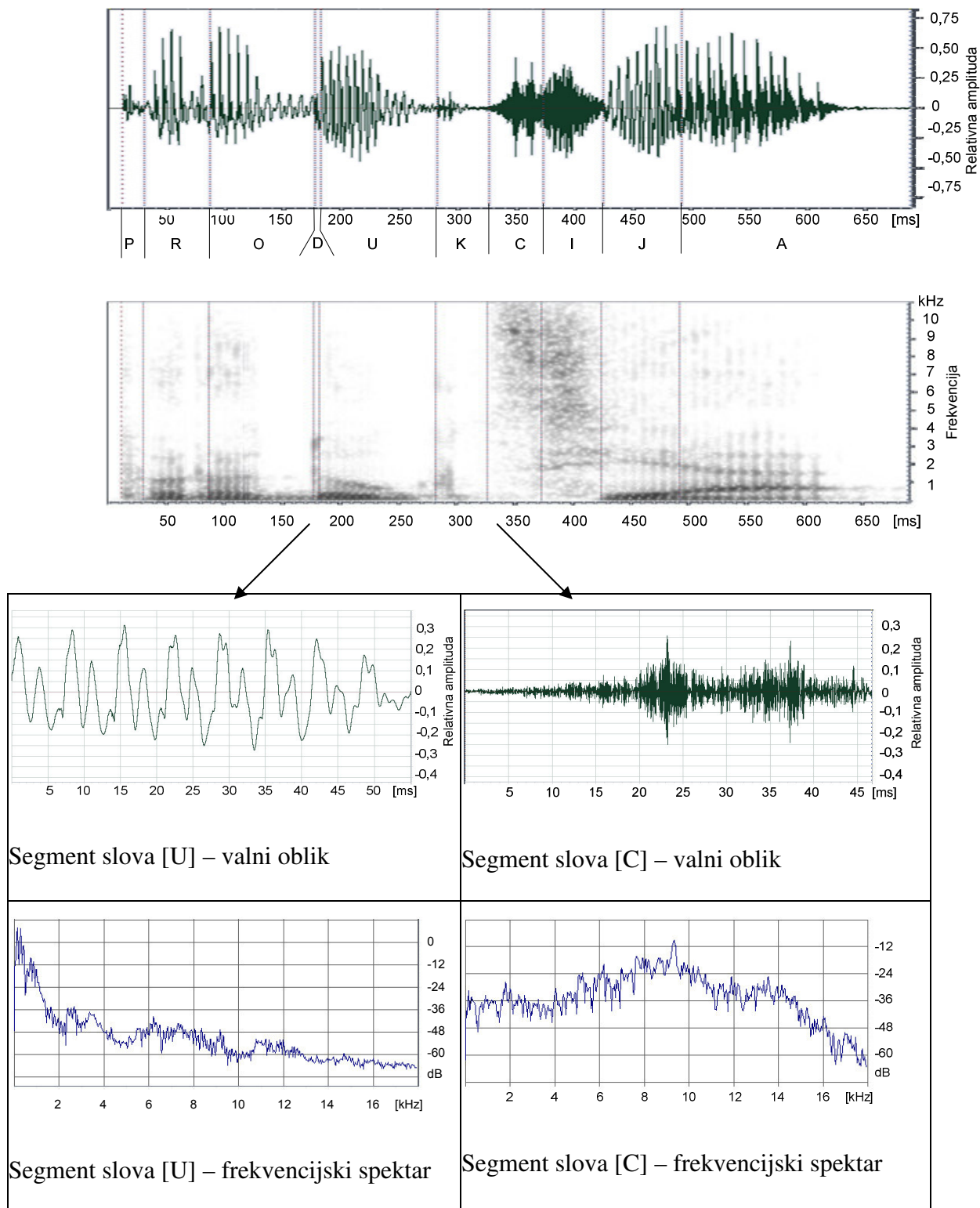
Za analizu govornih signala koriste se prikaz valnog oblika signala odnosno jačine (amplitude) signala u vremenu, spektrogram (*spectrogram*) iz kojeg je vidljiv odnos frekvencije signala u vremenu, te spektar snage signala ovisno o frekvenciji koji je pogodan za analizu kratkih segmenata signala (Slika 5.6.).

Iako je govorni signal promjenjivog karaktera, u kratkim segmentima se uočava određena periodičnost signala. Iz spektrograma je vidljivo da se u određenim područjima frekvencijskog pojasa pojavljuju dijelovi signala s jačom snagom u odnosu na ostala područja. Glavninu snage govornih signala proizvode samoglasnici koji se nalaze u frekvencijskom području od 250 do 500 Hz, no za razumljivost govora značajni su suglasnici koji zauzimaju frekvencijski opseg od 2000 do 4000 Hz.¹⁵ Analiziranjem govornih signala utvrđeno je da se veliki dio snage signala (oko 98%) nalazi u frekvencijskom području do 3 kHz. Razna ispitivanja koja su provedena na području analize govornih signala pokazala su da se, na primjer, kod suglasnika "s" i "f" veliki postotak snage nalazi unutar frekvencija od 4 kHz do 8 kHz. Također je dokazano da se kod suglasnika "p", "b", "k", "t" i "d" veliki dio ukupne snage nalazi u području od 20 do 80 Hz.¹⁶

Za primjenu parametarskih kodera govornih signala osim signala pobude važne su i karakteristike govornog trakta. Frekvencijska područja s jačom snagom na spektrogramu su rezonantna područja (frekvencije) govornog trakta koja se u fonetici nazivaju formanti. Na položaj rezonantnih frekvencija utječe promjenjivi oblik govornog trakta te svaki glas ima karakteristični raspored formanata unutar vremenskog intervala od 5 do 100 ms, a u području frekvencija do 4 kHz nalaze se četiri formanta.

¹⁵ Mc Squared System Design Group, Inc: Design for Speech Intelligibility, <http://www.mcsquared.com/speech.htm>

¹⁶ The Effect of Bandwidth on Speech Intelligibility, Polycom 2003. (White paper)

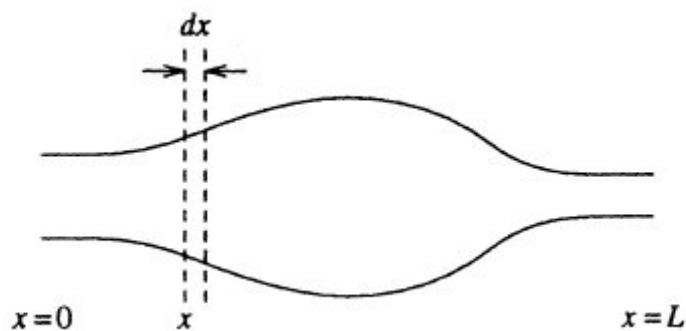


Slika 5.6. Valni oblik, spektrogram i frekvencijski spektar signala

Izvor: Izradio autor

Svi modeli koji se koriste za analizu temelje se na dvodimenzionalnom pojednostavljenju stvarnog govornog trakta prikazanom na slici 5.7. uz sljedeće pretpostavke:¹⁷

- govorni trakt se predstavlja s cijevi promjenjivog presjeka
- podrazumijeva se da je zvučni val koji se širi govornim traktom planarni (sve vrijednosti vala neovisne su o poziciji unutar govornog trakta)
- širenje vala u govornom traktu je linearno.



Slika 5.7. Dvodimenzionalni model govornog trakta

Izvor: M. Mohan Sondhi, Juergen Schroeter, *Speech Production Models and Their Digital Implementations*, Part 44; Section X-Speech Processing; *Digital Signal Processing Handbook*, CRCnetBASE, 1999.

Parametri pojednostavljenog modela govornog trakta su dužina cijevi (L) koja predstavlja ukupnu dužinu govornog trakta od glasnica ($x=0$) do usnica ($x=L$) i površina presjeka cijevi na određenoj udaljenosti od glasnica. (x). Površina presjeka mijenja se u vremenu, ali zbog vrlo sporih promjena u govornom traktu promjene presjeka su znatno sporije od brzine širenja zvuka, te se zbog toga u kratkim vremenskim intervalima model može promatrati kao stacionaran. Razmak među točkama (dx), odnosno broj područja koje se modeliraju utječe na vjernost modela govornog trakta.

¹⁷ M. Mohan Sondhi, Juergen Schroeter: *Speech Production Models and Their Digital Implementations*, Part 44; Section X-Speech Processing; *Digital Signal Processing Handbook*, CRCnetBASE, 1999.

5.4. Kodiranje linearnom predikcijom

Kodiranje linearnom predikcijom (*linear prediction*) je matematička operacija koja omogućuje predviđanje budućih vrijednosti diskretnog signala $s(n)$ linearnim kombinacijama prethodnih p uzoraka diskretnog signala. Optimalne vrijednosti parametara linearnih kombinacija postižu se minimiziranjem razlika između stvarne i predviđene vrijednosti, odnosno minimiziranjem kvadrata pogreške predviđanja (*prediction error*). U izvornom obliku linearno predviđanje oblikuje model signala u vremenskoj domeni, ali se može koristiti i za frekvencijsku domenu signala, odnosno modeliranje frekvencijskog spektra. Rezultat primjene metode linearnog predviđanja je relativno jednostavan model kojim se daje opis složenog signala u vremenskoj ili frekvencijskoj domeni. Matematički model razvijen je početkom 20. stoljeća i ima široko područje primjene, a porastom potražnje za digitalnim komunikacijskim sustavima koristi se kao jedan od načina kodiranja parametara kvantiziranog govornog signala.

Tehniku linearnog predviđanja može se koristiti za determinističke/stacionarne signale te je primjenjiva i na govorne signale koji se mogu promatrati kao stacionarni (kvazi-periodički) unutar određenog vremenskog intervala. Linearno predviđanje n -tog uzorka signala $\hat{s}(n)$ je definirano kao linearne kombinacije p prethodnih uzoraka izlaznog signala $s(n)$, gdje a_k predstavlja koeficijente predviđanja:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-k).$$

Ako se u model uvede i ovisnost o prethodnim ulaznim stanjima u sustav, odnosno q prethodnih uzoraka ulaznog signala $u(n)$, onda jednadžba poprima oblik:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-k) + G \sum_{l=1}^q b_l u(n-l),$$

gdje su b_l koeficijenti predviđanja ulaznog signala, a G pojačanje.

Prikaz modela u frekvencijskoj domeni dobiva se primjenom z -transformacije, gdje je $S(z)$ i $U(z)$ z -transformacije signala $s(n)$ i $u(n)$

$$H(z) = \frac{S(z)}{U(z)} = G \frac{1 - \sum_{l=1}^q b_l z^{-l}}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}}.$$

Navedenom jednadžbom u frekvencijskoj domeni modeliraju se minimumi i maksimumi vrijednosti frekvencijskog spektra signala, pa se model naziva model polova i nula (*pole-zero model*). Polove, odnosno maksimume funkcije predstavljaju korijeni nazivnika, dok su nule, odnosno minimumi funkcije korijeni brojnika. Izjednačavanjem koeficijenata a_k s nulom dobiva se posebni model kojim se modeliraju samo minimumi frekvencijskog spektra signala (*all-zero model*):

$$H(z) = G \left(1 - \sum_{l=1}^q b_l z^{-l} \right).$$

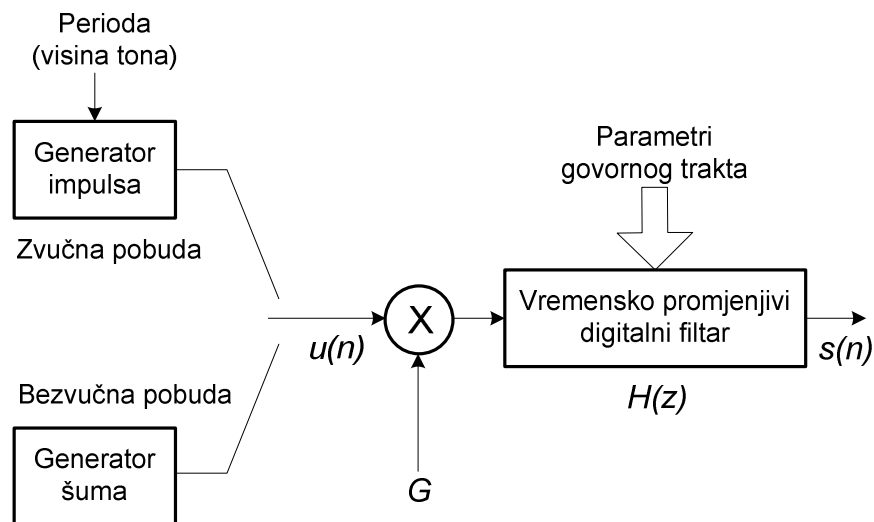
Druga vrsta modela kojim se modeliraju samo maksimumi frekvencijskog spektra signala dobiva se izjednačavanjem koeficijenata b_l s nulom (*all-pole model*):

$$H(z) = \frac{G}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}}.$$

Analiza govornih signala metodom linearnog predviđanja je najzastupljenija tehnika za određivanje parametara koji karakteriziraju govorni signal. Prednost metode linearnog predviđanja je u relativno jednostavnom načinu izračunavanja vrijednosti dok istovremeno osigurava precizan opis sustava. Analiza se temelji na pojednostavljenom digitalnom modelu govornog sustava prema slici 5.8. kod kojeg govorni signal $s(n)$ nastaje pobuđivanjem vremenski sporo promjenjivog digitalnog filtra s prijenosnom karakteristikom $H(z)$ odgovarajućim signalom $Gu(n)$. Pobudni signal je u slučaju zvučnih glasova oblika jediničnih impulsa međusobno razmaknutih za periodu koja definira osnovnu frekvenciju, dok je u slučaju bezvučnih glasova signal šuma bez osnovne frekvencije. U pojednostavljenom modelu prijenosnom funkcijom govornog trakta $H(z)$ modeliraju se rezonantne frekvencije govornog trakta i efekt zračenja zvučnog vala na usnicama STP metodom (*Short Term Prediction*), a spektralni efekt glasnica na signal pobude, odnosno parametri signala pobude LTP metodom (*Long Term Prediction*).

Odgovarajući parametri pojednostavljenog modela su:

1. parametri signala pobude
 - zvučna/bezvučna pobuda
 - perioda (visina tona) kod zvučnih signala
 - pojačanje
2. parametri govornog trakta
 - koeficijenti digitalnog filtra a_k , za $k=1,2,\dots,p$.



Slika 5.8. Pojednostavljeni digitalni model govornog sustava

Izvor: Prema L. R. Rabiner, R. W. Schafer, Theory and Application of Digital Speech Processing, str. 501.

Odnos izlaznog govornog signala $s(n)$ i pobudnog signala $Gu(n)$ moduliranog prolaskom kroz govorni trakt za digitalni model govornog sustava je:

$$s(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-k) + Gu(n).$$

5.4.1. Modeliranje rezonantnih frekvencija govornog trakta

Kod modeliranja frekvencijskog spektra govornih signala osjetilno su važniji maksimumi u frekvencijskom spektru jer se u tim rezonantnim područjima nalazi najveći dio energije. Zbog tog razloga, a također i stoga što je puno jednostavniji kod izračuna vrijednosti koeficijenata, za modeliranje frekvencijskog spektra, odnosno formanta govornog signala koristi se modeliranje maksimuma frekvencijskog spektra signala (*all-pole model*). Prijenosna funkcija modela govornog trakta je:

$$H(z) = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} .$$

Predviđanje vrijednosti govornog signala linearnim metodama $\hat{s}(n)$ podrazumijeva pronalaženje koeficijenata koji definiraju prienosnu funkciju i izračunavaju se pomoću p prethodnih vrijednosti signala $s(n)$:

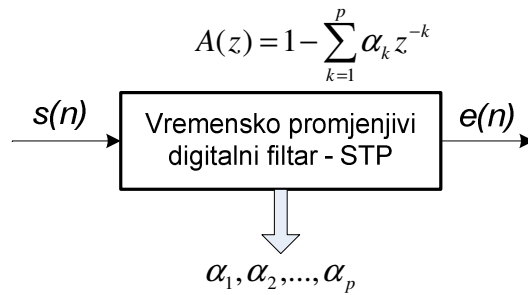
$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k) .$$

Primjenjiv model za analizu govornih signala podrazumijeva određivanje parametara modela, odnosno koeficijenata α_k na način da pogreška predviđanja bude čim manja za svaku vrijednost elementa n . Pogreška predviđanja vrijednosti $e(n)$ je razlika između stvarne vrijednosti signala $s(n)$ i predviđene vrijednosti signala $\hat{s}(n)$:

$$e(n) = s(n) - \hat{s}(n) = s(n) - \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k) .$$

Kada koeficijenti predviđanja α_k u potpunosti prate koeficijente modela a_k [$\alpha_k = a_k$], signal pogreške je jednak pobudnom signalu $Gu(n)$. Signal koji tvore pogreške predviđanja je izlazni signal sustava kojemu je ulaz $s(n)$, a čija prienosna funkcija je dana izrazom iz kojeg je vidljivo da je model za izračun koeficijenata inverzni model govornog trakta $H(z)$:

$$A(z) = \frac{1}{H(z)} = 1 - \sum_{k=1}^p \alpha_k z^{-k} .$$



Slika 5.9. Model analize govornog signala

Izvor: Prema L. R. Rabiner, R. W. Schafer, Theory and Application of Digital Speech Processing"

Vrijednosti koeficijenata α_k koje najbolje opisuju sustav izračunavaju se kada se parcijalna derivacija ukupne kvadrirane pogreške segmenta (E) u odnosu na parcijalnu derivaciju za pojedine koeficijente izjednači s nulom

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} e^2(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(s(n) - \sum_{k=1}^p a_k s(n-k) \right)^2.$$

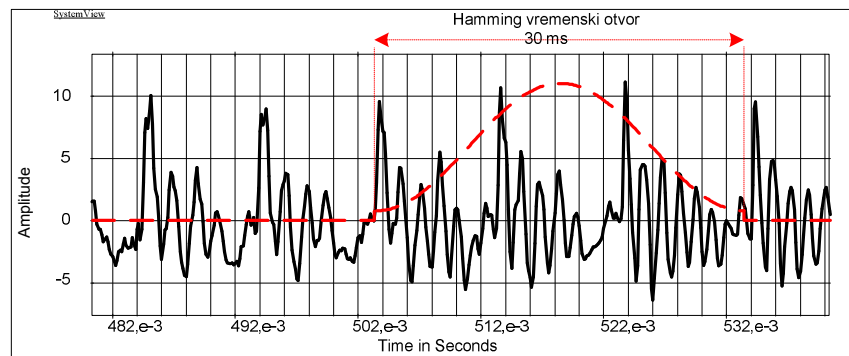
Izjednačenjem parcijalne derivacije ukupne pogreške u odnosu na parcijalnu derivaciju koeficijenata s nulom, $\frac{\partial E}{\partial a_k} = 0$, za $k=1, 2, \dots, p$ dobiva se sustav od p jednadžbi s p nepoznanica. Dobivani sustav od p jednadžbi s p nepoznanica može se izračunati na više načina koji proizlaze iz dva osnovna: metoda kovarijance i metoda autokorelacije. Razlike proizlaze iz toga što je kod metode kovarijance potrebno granice sumiranja proširiti izvan segmenta uzorka signala, dok su kod autokorelacijske metoda granice sumiranja unutar odabranog segmenta. Ostali načini rješavanja istog problema su: mrežasta (*lattice*) metoda, metoda inverznog filtra, metoda predviđanja spektra, metoda najveće vjerojatnosti i metoda unutarnjih produkata.¹⁸

Izračun koeficijenata metodom kovarijance zahtijeva p^3 operacija množenja dok metoda autokorelacije omogućuje primjenu Durbin-Levinsonovog algoritma koji koeficijente izračunava u p^2 operacija. Također je prednost primjene metode

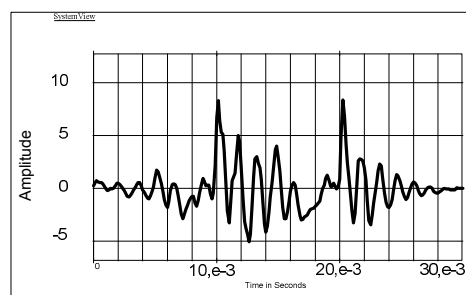
¹⁸ L. R. Rabiner, R. W. Schafer, Theory and Application of Digital Speech Processing

autokorelacije stabilnost filtra (korijeni polova filtra nalaze se unutar jedinične kružnice u z ravnini).¹⁹

Kod metode autokorelacije podrazumijeva se da je signal $s(n)$ izvan odabranog segmenta ($0 \leq n \leq N-1$) jednak nuli. Kako se granice sumiranja pomiču za vrijednost p izvan odabranog segmenta, prvih p uzoraka predviđa se na temelju vrijednosti nula (izvan segmenta), a zadnjih p uzoraka signala koji su vrijednosti nula (izvan segmenta) predviđa se pomoću uzoraka unutar segmenta kojima vrijednost nije nula, relativno velika pogreška javlja se na početku i kraju segmenta. Nagli prijelaz iz vrijednosti nula izvan odabranog odsječka i početnih-završnih vrijednosti unutar odsječka smanjuje se odabirom segmenta Hammingovim vremenskim otvorom (*window* funkcija) na način prikazan na Slici 5.10., čime se smanjuje pogreška predviđanja.



a) govorni signal i vremenski otvor



b) odabrani segment

Slika 5.10. Odabrani segment govornog signala pomoću Hammingovog vremenskog otvora

Izvor: Izradio autor

¹⁹ R. W. Schafer, L. R. Rabiner: Digital Representations of Speech Signals, Proceedings of the IEEE, Vol. 63, No. 4, April 1975.

Nakon izjednačenja parcijalne derivacije ukupne pogreške u odnosu na koeficijente s nulom, jednadžba za autokorelacijsku metodu glasi:

$$\sum_{n=0}^{N-1+p} s(n-i)s(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k \sum_{n=0}^{N-1+p} s(n-i)x(n-k), \text{ za } 1 \leq i \leq p.$$

Dobiveni sustav jednadžbi u matricnom obliku pomoću kojeg se izračunavaju vrijednosti koeficijenata a_k je:

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \cdots & r(p-1) \\ r(1) & r(2) & \cdots & r(p-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(p-1) & r(p-2) & \cdots & r(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(1) \\ r(2) \\ \vdots \\ r(p) \end{bmatrix}.$$

Elementi matrice $r(0) \dots r(p)$ su autokorelacijske funkcije segmenta signala od N uzoraka s kašnjenjem l :

$$r(l) = \sum_{m=0}^{N-1-l} s(m)s(m+l).$$

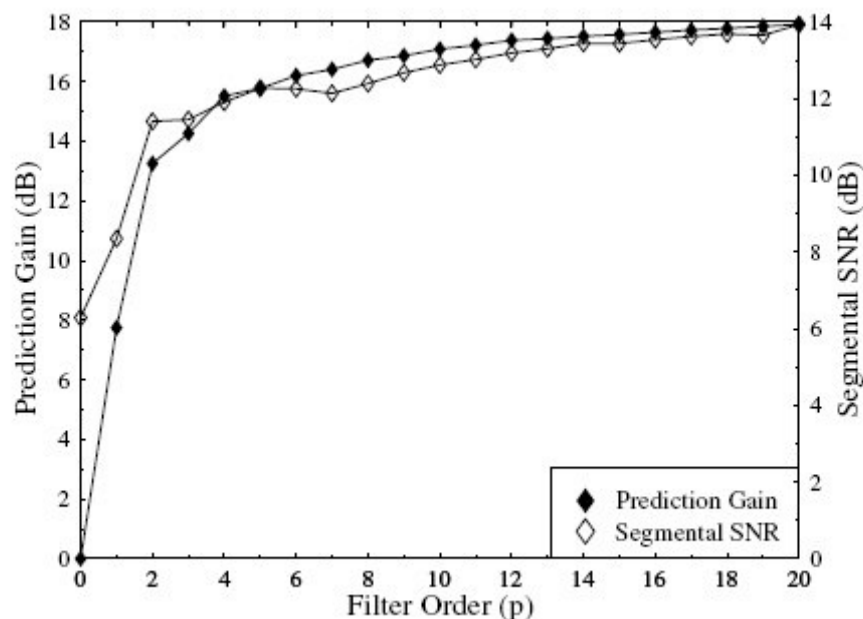
5.4.2. Utjecaj reda filtra i veličine uzorka na kvalitetu analize govornog trakta

Optimalan red filtra i veličina uzorka govornog signala za kvalitetno kodiranje određuje se temeljem odgovarajućih parametara koji uspoređuju kvalitetu nakon kodiranja signala na predajnoj strani i kvalitetu nakon dekodiranja signala na prijemnoj strani. Kvaliteta signala ovisno o redu filtra nakon kodiranja (dobitak predviđanja, *prediction gain*) mjeri se kroz odnos između energija uzorka signala $s(n)$ i energije signala pogreške $e(n)$ te izražava u decibelima. Kod linearnog predviđanja dobivena prijenosna karakteristika modela govornog trakta ovisi o broju koeficijenata, odnosno redu linearnog filtra, te je uz veći broj koeficijenata dobitak predviđanja veći.

Kvaliteta signala na prijemu ovisi o odnosu signal/šum, a izračunava se pomoću segmentiranog odnosa signal/šum koji bolje korelira sa subjektivnom mjerom kvalitete signala te su rezultati usporedivi s MOS skalom za ocjenu kvalitete. Vrijednost klasičnog odnosa signal/šum nema istu težinu za segmente s jačom energijom i slabijom energijom signala, već veliki udio odnosa čine segmenti sa zvučnim glasovima koji imaju jaču energiju. Segmentirani odnos signal/šum uravnotežuje spomenuti udio jer se izračunava kao geometrijska sredina za N uzoraka unutar M segmenata. Segmentirani odnos signal/šum ($SEGSNR$) izračunava se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$SEGSNR = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^N s_{in}^2(n)}{\sum_{n=1}^N [s_{out}(n) - s_{in}(n)]^2}.$$

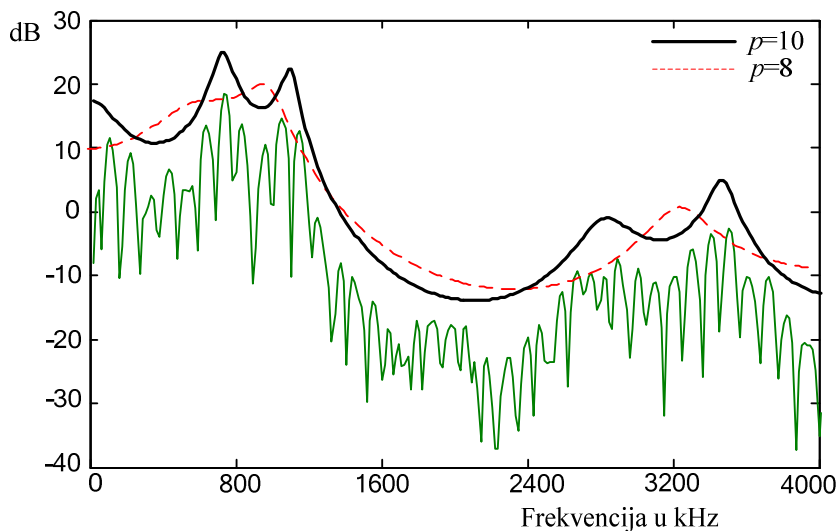
Na slici 5.11. prikazana je srednja vrijednost dobitka predviđanja i kvalitete signala na prijemu ovisno o redu filtra za različite govorne signale u trajanju 11 sekundi s frekvencijom uzorkovanja od 8 kHz, a uz veličinu uzorka od $N=160$ (20 ms signala). Odabirom većeg reda filtra dobiva se i veći dobitak predviđanja te kvalitetniji signal na prijemu, ali uz veći broj bitova koji je potreban za prijenos podataka o koeficijentima predviđanja kao i veći broj matematičkih operacija potrebnih za izračun koeficijenata. Optimalni red filtra s obzirom na kvalitetu i potreban broj bitova za govorni signal uzorkovan frekvencijom od 8 kHz koji se u praksi koristi za kodiranje je $p=10$.



Slika 5.11. Ovisnost dobitka predviđanja i kvalitete signala na prijemu o redu filtra

Izvor: L. Hanzo, F. C. Somerville, J. Woodard, Voice and Audio Compression for Wireless Communications, str. 74.

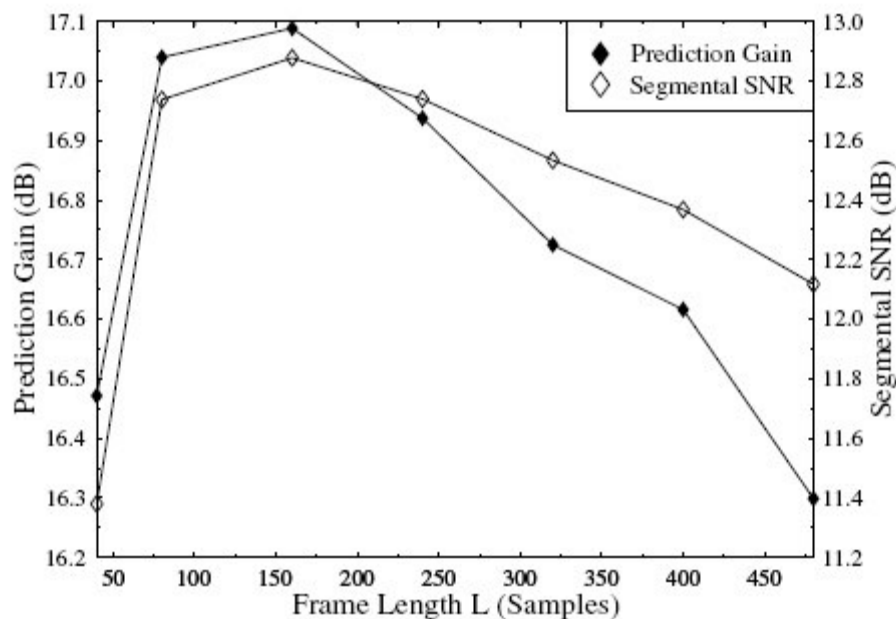
Odabrani red filtra podudara se također s pravilom da je za svaki formant potrebno dva pola filtra, a dodatna dva pola služe za modeliranje područja između formantata. Na slici 5.12. prikazana je ovisnost prijenosne karakteristike filtra i spektra govornog signala za red filtra $p=8$ i red filtra $p=10$. Vidljivo je da krivulja prijenosne karakteristike uz red filtra $p=10$ krivulja vjernije prati frekvencijsku karakteristiku odabranog segmenta govornog signala.



Slika 5.12. Prijenosne karakteristike filtra govornog trakta i spektra govornog signala

Izvor: Izradio autor

Veličina uzorka na kojem se određuju parametri govornog trakta također određuje dobitak predviđanja i kvalitetu signala na prijemu. Pravilan odabir ovisi o načinu izračuna koeficijenata i karakteristika govornog signala. Na slici 5.13. prikazan je utjecaj veličine uzorka govornog signala koji je dobiven s filtrom reda $p=10$ za modeliranje govornog trakta. Najbolje karakteristike iskazane kroz dobitak predviđanja i SEGSNR pokazuje uzorak od veličine $N=160$, odnosno trajanja 20 ms. Kod manjih uzoraka lošije karakteristike javljaju se zbog primjene autokorelacijske metode, dok lošije karakteristike kod većih uzoraka nastaju zbog nestacionarnih karakteristika govornog signala.



Slika 5.13. Ovisnost dobitka predviđanja i kvalitete signala na prijemu o veličini uzorka

Izvor: L. Hanzo, F. C. Somerville, J. Woodard, Voice and Audio Compression for Wireless Communications, str. 75.

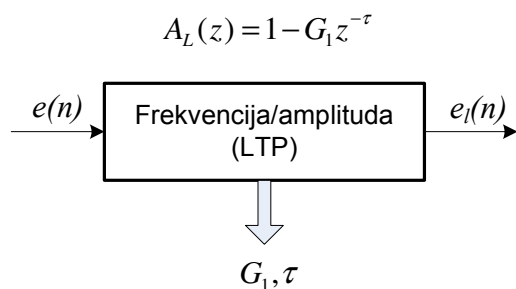
5.4.3. Određivanje parametara signala pobude

Povećanje kvalitete govornog signala kao i povećanje ekonomičnosti kodera koja se mjeri u potrebnom broju bitova za kodiranje postiže se dodatnim filtriranjem signala pogreške nakon modeliranja govornog trakta. Kod zvučnih glasova primjećuje se periodičnost signala koja predstavlja osnovnu frekvenciju govornog signala koju nije moguće detektirati kroz STP filtriranje. Ovim načinom analize određuje se osnovna frekvencija i amplituda signala, odnosno modelira se utjecaj glasnica prema sljedećoj jednadžbi:

$$e_l(n) = e(n) - G_1 e(n - \tau).$$

Novi signal pogreške $e_l(n)$ može se izračunati oduzimanjem umnoška zakašnjelog signala za iznos τ što predstavlja osnovnu frekvenciju s pojačanjem G_1 . Prijenosna funkcija LTP filtra definirana kroz z-transformaciju glasi:

$$A_L(z) = 1 - G_1 z^{-\tau}.$$



Slika 5.14. Model LTP filtra

Izvor: Prema L. R. Rabiner, R. W. Schafer, Theory and Application of Digital Speech Processing

Vrijednost faktora G_1 izračunava se minimiziranjem ukupne pogreške predviđanja E_L za cijeli segment od N uzoraka:

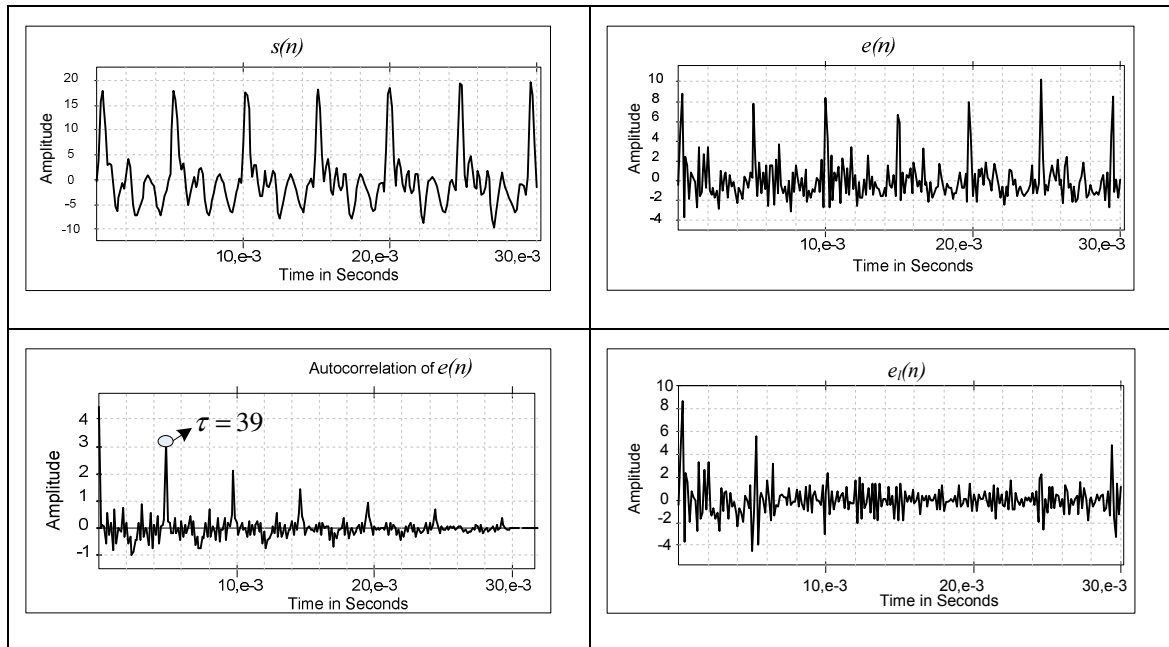
$$E_L = \sum_{n=0}^{N-1} e_l^2(n) = \sum_{n=0}^{N-1} e^2(n) - \sum_{n=0}^{N-1} 2G_1 e(n)e(n-\tau) + \sum_{n=0}^{N-1} G_1^2 e^2(n-\tau).$$

Optimalna vrijednost G_1 izračunava se izjednačavanjem odnosa parcijalnih derivacija ukupne pogreške E_L i faktora G_1 s nulom

$$G_1 = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} e(n)e(n-\tau)}{\sum_{n=0}^{N-1} [e(n-\tau)]^2}.$$

Učinak LTP filtriranja prikazan je na slici 5.15. Napravljena je analiza govornog signala samoglasnika "a" na signalu uzorkovanom frekvencijom 8 kHz u trajanju od 30 ms. Govorni trakt analiziran je STP filtrom s koeficijentima $p=10$, a signal pogreške $e(n)$ još uvijek ima periodičnost koja predstavlja osnovnu frekvenciju. Funkcijom auto-korelacije na signalu pogreške $e(n)$ utvrđena je osnovna frekvencija ($f_0=205,12$ Hz), odnosno potrebno kašnjenje signala $\tau=39$ za LTP metodu, i izračunat je iznos pojačanja $G_1=0,56$. Signal pogreške $e_l(n)$ nakon LTP filtriranja izgubio je

periodičnost koja je vidljiva na signalu pogreške $e(n)$ nakon STP filtriranja te je sličan signalu šuma.



Slika 5.15. Utjecaj LTP filtra na signal pogreške

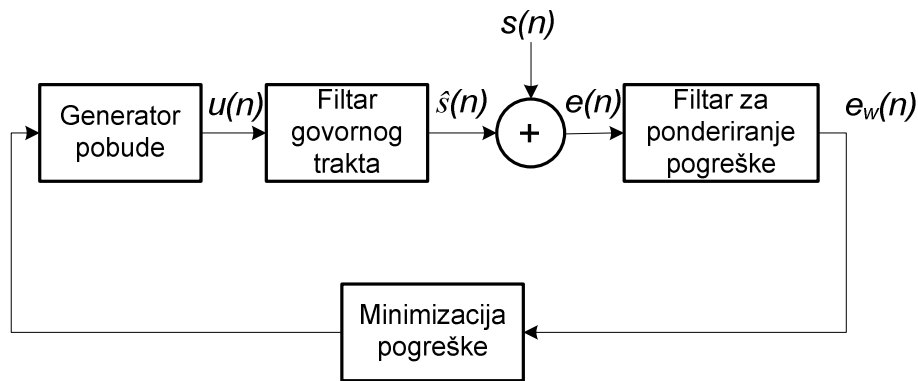
Izvor: Izradio autor

U praktičnoj primjeni LTP filtriranja ne izračunava se kašnjenje signala τ niti iznos pojačanja G_1 , već se parametri određuju pomoću minimalne ukupne pogreške predviđanja $E_{L\min}$ za raspon kašnjenja τ od 20 do 147 uzoraka, što odgovara frekvencijama od 55 Hz do 400 Hz, prema sljedećoj jednažbi:

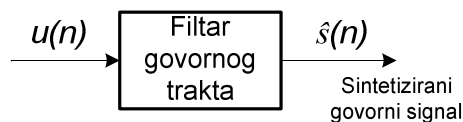
$$E_{L\min} = \sum_{n=0}^{N-1} e_l^2(n) - \frac{\left[\sum_{n=0}^{N-1} e(n)e(n-\tau) \right]^2}{\sum_{n=0}^{N-1} [e(n-\tau)]^2}.$$

5.6. Kodiranje analizom pomoću sinteze signala

Kodiranjem metodom analize pomoću sinteze signala (*analysis-by-synthesis coder*) postiže se veliki napredak u smanjenju potrebnih bitova uz održavanje visoke osjetilne kvalitete signala u komunikacijskom sustavu. Povećanje efikasnosti kodiranja postiže se zatvorenom petljom prikazanoj na slici 5.16. a) u kojoj se sintetički glas $\hat{s}(n)$ uspoređuje s originalnim govornim signalom $s(n)$ i odabiru se parametri koji osjetilno stvaraju najmanju pogrešku (razliku) $e_w(n)$. Parametri koji se odašilju prijemniku su optimalni pobudni signal $u(n)$ i prethodno određeni parametri filtra govornog trakta, te je dekodirani signal $\hat{s}(n)$ identičan sintetičkom signalu stvorenom u koderu. Zbog velikog broja različitih pobudnih signala za koje je potrebno provesti analizu, kod ovog načina kodiranja visoka kvaliteta reproduciranog signala postiže se na račun velike složenosti kodera.



a) koder



b) dekodeer

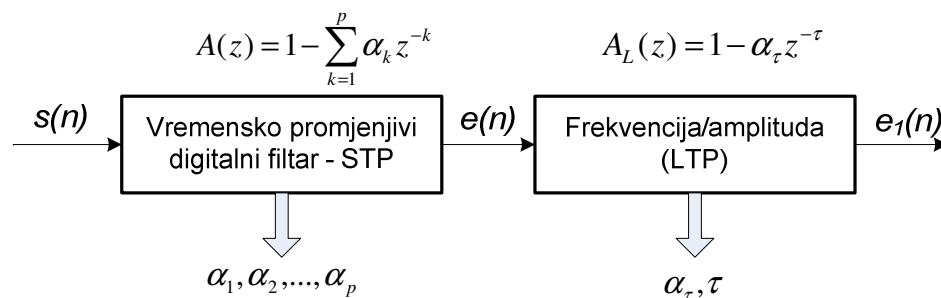
Slika 5.16. Kodiranje analizom pomoću sinteze signala

Izvor: L. Hanzo, F. C. Somerville, J. Woodard, Voice and Audio Compression for Wireless Communications, str. 72.

Postoji niz modela koji se razlikuju u načinu stvaranja pobudnog signala, a zbog svoje visoke efikasnosti trenutno je najrašireniji CELP koder (*Code Excited Linear Prediction*). Različiti oblici pobudnog signala unaprijed su definirani u "knjizi" kodova (*codebook*) i prijemniku se odašilje samo pokazivač na određeni kod. Na ovaj način postignuta je još veća ušteda u broju potrebnih bitova za kodiranje govornog signala.

5.7. CELP koder

Osnovni princip rada CELP koder (*Code Excited Liner Prediction*) temelji se na korištenju signala pobude koji je po svojim karakteristikama sličan signalu pogreške koji nastaje nakon analize govornog signala inverznim modelom govornog trakta $A(z)$ (*short-term prediciton - STP*), uz dodatak filtra (*long-term prediction - LTP*) kojim se modelira utjecaj glasnica τ i amplituda signala pobude α_τ . Amplituda signala pobude je radi jednostavnosti izračuna maknuta iz osnovnog modela govornog trakta, a modeliranjem utjecaja glasnica određuje se osnovna frekvencija glasa. Izlazni signal iz ovakvog modela ima karakteristike signala šuma s Gaussovom raspodjelom amplitude. Izračunati koeficijenti STP filtra ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$) i LTP filtra (α_τ, τ) koriste se za stvaranje sintetičkog govornog signala $\hat{s}(n)$ koji se uspoređuje s izvornim govornim signalom.



Slika 5.17. Model analize govornog signala u CELP koderu

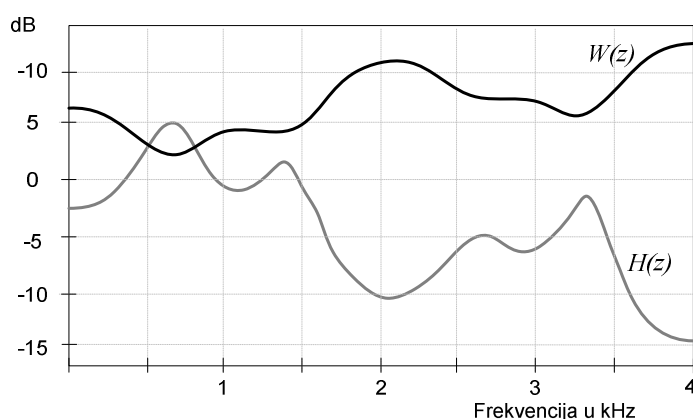
Izvor: Prema L. R. Rabiner, R. W. Schafer, Theory and Application of Digital Speech Processing

U osnovnom modelu CELP koder "knjiga" kodova sastoji se od 1024 različita signala pobude veličine $N=40$ (5 ms) s Gaussovom raspodjelom amplitude. Sintetički govorni signal $\hat{s}(n)$ stvara se filtriranjem signala pobude u LTP filtru i filtru govornog

trakta, osjetilno se ponderira i uspoređuje s osjetilno ponderiranim izvornim govornim signalom za svaki signal pobude. Razlog za uvođenje funkcije za osjetilno ponderiranje koja se izvodi linearnim filtriranjem je različiti utjecaj pogreške predviđanja unutar frekvencijskog pojasa govornog signala. Govorni signali imaju više energija na nižim frekvencijama, a manje energije na višim frekvencijama te se ovakvim postupkom filtriranja dozvoljava jači utjecaj pogreške na nižim frekvencijama koja će biti maskirana jačim govornim signalom. Na višim frekvencijama je utjecaj pogreške jače izražen zbog manje snage govornog signala te je osjetilno i važniji nego utjecaj pogreške na nižim frekvencijama. Također se i smanjuje utjecaj pogreške u područjima rezonantnih frekvencija govornog trakta, a pojačava u područjima između formanata. Utjecaj filtra za osjetilno ponderiranje prikazan je na slici 5.18., a prijenosna funkcija filtra dana je izrazom:

$$W(z) = \frac{A(z)}{A(z/\gamma)} = \frac{1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i z^{-i}}{1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i \gamma^i z^{-i}}$$

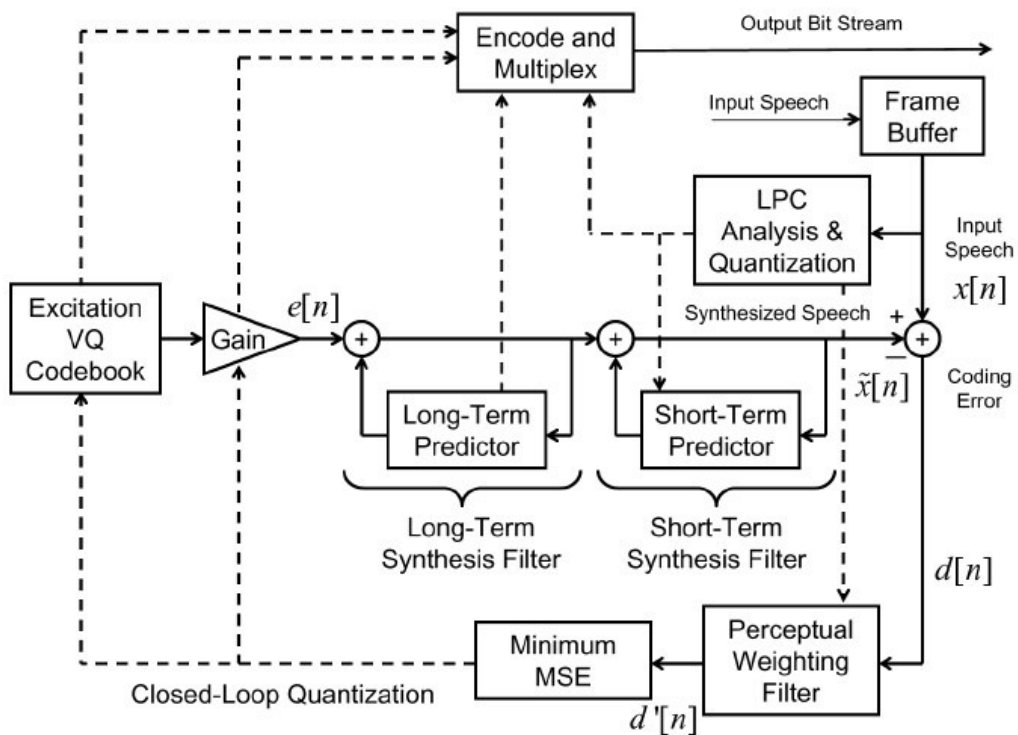
Filtar koristi prethodno određene koeficijente određene analizom govornog trakta (STP), a vrijednost veličine γ koja se naziva i faktor prilagodbe kod CELP kodera iznosi 0,8. Iz Slike 5.18. uočava se da je prijenosna karakteristika $W(z)$ prilagođena inverzna karakteristika govornog trakta $H(z)$.



Slika 5.18. Usporedba prijenosne karakteristike govornog trakta i osjetilno ponderiranog filtra

Izvor: Izradio autor

Minimiziranjem pogreške uspoređivanja određuje se optimalan signal pobude, te se odašilje vektor za odabrani signal pobude i koeficijenti filtra. Osnovni koncept CELP koda prikazan je na slici 5.19. Ekonomičnost koda razlikuje se ovisno o potrebnom broju operacija za pronalaženje optimalnog signala pobude. Na temelju osnovnog koncepta razvijeni su različiti modeli CELP koda koji se razlikuju po vrsti pobudnih signala u "knjizi" kodova i trajanju segmenta na kojem se provodi analiza govornog signala te su prilagođeni za različite brzine prijenosa.

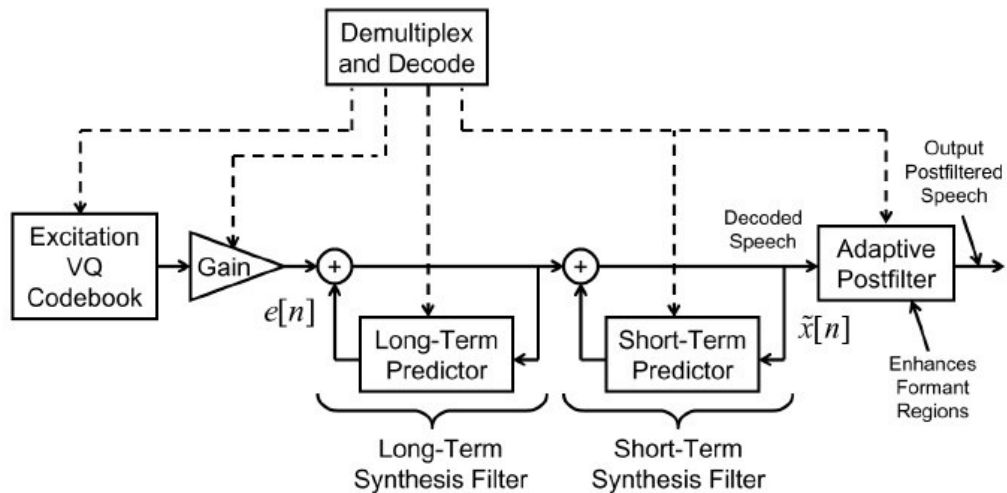


Slika 5.19. Osnovni koncept CELP koda

Izvor: L. R. Rabiner, R. W. Schafer, Theory and Application of Digital Speech Processing, str. 829.

Dekoder na prijemnoj strani sastoji se od identičnih funkcija kao i CELP koder i za signale pobude koristi istu "knjigu" kodova. Dekoder nema složenih matematičkih operacija niti zahtjevno pretraživanje "knjige" kodova te je stoga utjecaj dekodera na

kašnjenje signala zanemariv. Osnovni koncept CELP dekodera prikazan je na slici 5.20., a sintetički govorni signal generira se iz primljenih podataka.



Slika 5.20. Osnovni koncept CELP dekodera

Izvor: L. R. Rabiner, R. W. Schafer, Theory and Application of Digital Speech Processing, str. 829.

Na temelju osnovnog koncepta razvijeni su različiti modeli CELP koda koji se razlikuju po vrsti pobudnih signala u "knjizi" kodova i trajanju segmenta na kojem se provodi analiza govornog signala te su prilagođeni za različite brzine prijenosa. Na temelju CELP koda razvijen je i "**ETSI GSM Adaptive Multi-Rate Algebraic CELP**" koder s promjenjivim stupnjem kodiranja u rasponu od 4,75 do 12,2 kbit/s. Koder je razvijen za potrebe GSM mreža kako bi se dobra kvaliteta signala na prijemu mogla postići u različitim uvjetima komunikacijskog kanala kojima se koder automatski prilagođava. Za kanale s manje izraženim utjecajem smetnji koriste se veće brzine prijenosa, dok kod porasta smetnji u kanalu brzina prijenosa pada, ali raste broj zaštitnih bitova. Analiza govornog signala obavlja se na segmentu trajanja 20 ms koji je dodatno razdijeljen na četiri podsegmenta za koje se posebno određuju i odašilju karakteristike signala pobude kako bi se čim više povećala kvaliteta signala na prijemu.

U tablici 5.3. prikazana je količina bitova koji se odašilju kod ovog koderu ovisno o načinu kodiranja. Za usporedbu, za odašiljanje PCM govornog signala s brzinom prijenosa 64 kbit/s za isti segment signala od 20 ms potrebno je 1280 bitova.

Tablica 5.3. Ukupna količina i raspodjela bitova po segmentu za GSM AMR ACELP koder

Mode	LPC	Pitch Lag	Fixed Codebook	Gains	Total
10.2 kbit/s	26	8, 5, 8, 5	31, 31, 31, 31	7, 7, 7, 7	204
7.95 kbit/s	27	8, 6, 8, 6	17, 17, 17, 17	9, 9, 9, 9	159
7.40 kbit/s	26	8, 5, 8, 5	17, 17, 17, 17	7, 7, 7, 7	148
6.70 kbit/s	26	8, 4, 8, 4	14, 14, 14, 14	7, 7, 7, 7	134
5.90 kbit/s	26	8, 4, 8, 4	11, 11, 11, 11	6, 6, 6, 6	118
5.15 kbit/s	23	8, 4, 4, 4	9, 9, 9, 9	6, 6, 6, 6	103
4.75 kbit/s	23	8, 4, 4, 4	9, 9, 9, 9	8, 0, 8, 0	95

Izvor: Goldberg, Randy G., "A Practical Handbook of Speech Coders", CRC Press, 2000.

6. Analiza kopnenih digitalnih komunikacijskih sustava

Radi utvrđivanja mogućnosti i ograničenja prenošenja iskustava iz već postojećih (i standardiziranih) kopnenih komunikacijskih sustava, u ovom poglavlju daje se pregled obilježja kopnenih sustava koja su u disertaciji poslužila za modeliranje prijedloga digitalnih komunikacija u pomorstvu. Naime, digitalni komunikacijski sustavi zasad se ne koriste za govorne komunikacije u pomorstvu, odnosno, koriste se za govorne satelitske komunikacije, ali ne i za terestričke. Potrebno je stoga, iskustva vezana uz kopnene komunikacije znanstveno procijeniti te dati smjernice za potrebne prilagodbe specifičnostima pomorskih komunikacija.

Poznati komunikacijski sustavi na kopnu u pravilu su razvijani da služe potrebama specifičnih korisnika kao što su vojska, policija, vatrogastvo... što ih je učinilo relativno zatvorenima te relativno ograničenima u području primjene. To se odrazilo na samu tehnologiju, tj. na opremu i na organizaciju komunikacijske mreže. Posredovanje dispečerskih centara kao i vezanost za nacionalne regulatorne okvire predstavljaju ograničavajuće okolnosti za prijenos dobrih iskustava na područje pomorstva.

U nastavku je dan kratak prikaz najrasprostranjenijih kopnenih digitalnih komunikacijskih sustava: TETRA, APCO *Project 25*, EDACS, DIMRS, DMR i dPMR.

6.1. TETRA sustav

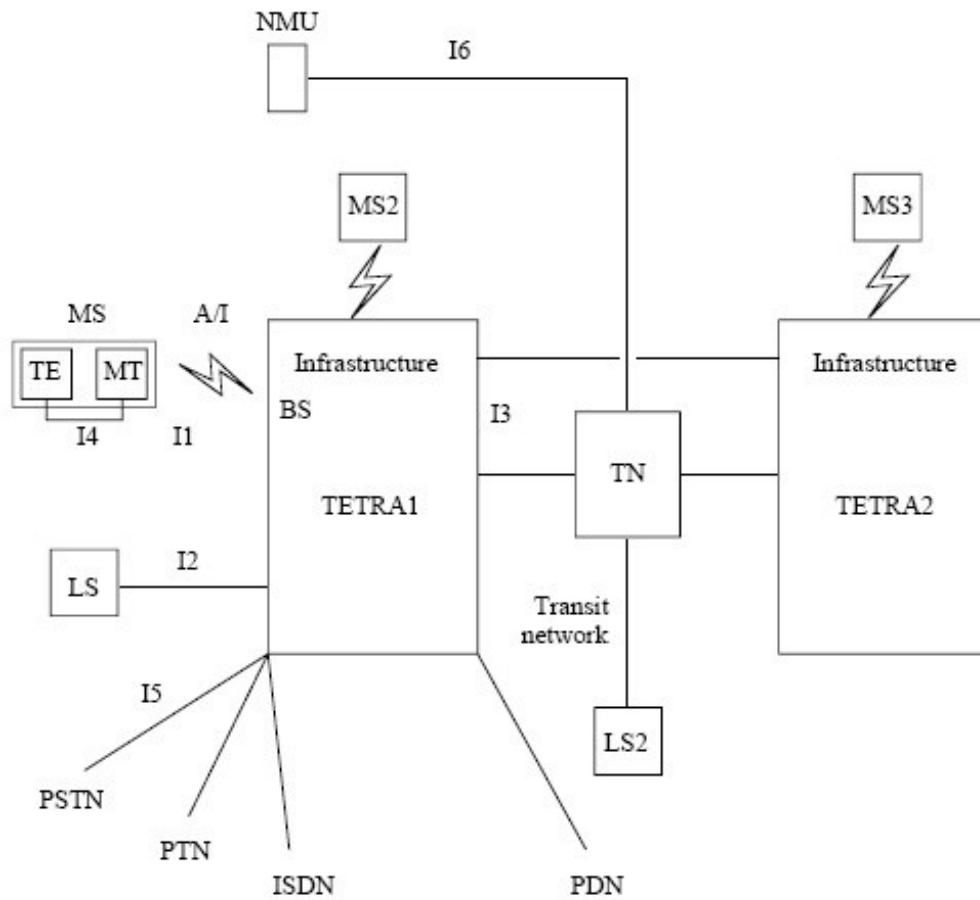
Jedan od prvih digitalnih komunikacijskih sustava TETRA (početni naziv *Trans European Trunked Radio*, kasnije *TErrestrial Trunked Radio*) razvijen je od organizacije ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) za potrebe hitnih službi i kopnenih prometnih sustava. U TETRA komunikacijskom sustavu korisnici nemaju fiksno dodijeljene kanale, već se putem baznih stanica upravlja korištenjem kanala. Ovakva tehnologija ima visoku iskoristivost raspoloživog frekvencijskog spektra. Sustav podržava tri načina komunikacija:

1. Govorne komunikacije i prijenos podataka nazvan V+D (*Voice+Data*) gdje preko baznih stanica korisnici imaju mogućnost istovremenog odašiljanja govora i podataka u simpleks i dupleks modu;
2. Direktne komunikacije DMO (*Direct Mode Operation*) gdje pokretne stanice mogu izravno stupiti u vezu bez posredovanja baznih stanica;
3. Paketni prijenos podatka PDO (*Packet Data Optimized*) koji je pogodan za korisnike koji imaju potrebe samo za povremenim odašiljanjem podataka.

TETRA sustav projektiran je za rad na UHF području uz širinu kanala od 25 kHz, a udaljenost među stanicama mogu iznositi do 17,5 km. Osnovne tehničke karakteristike sustava su:

– širina fizičkog kanala:	25 kHz
– multipleksiranje kanala:	TDMA, 4 logička kanala po okviru
– modulacija:	$\pi/4$ -DQPSK
– brzina prijenosa:	7,2 kbit/s po logičkom kanalu
– kodiranje govora:	ACELP koder (Algebraic Code-Excited Linear Predictive) 4,8 kbit/s
– broj kanala u odnosu na kanal širine 25 kHz:	4 kanala

Izravna primjena TETRA tehnologije nije moguća u pomorstvu. Naime, sustav je razrađen samo za UHF područje te po svojim tehničkim karakteristikama, odnosno zbog strukture kanala ne odgovara primjeni na VHF području. Nadalje, sam način modulacije zahtijeva upotrebu izlaznih pojačala s linearnom karakteristikom, dok postojeći brodski uređaji s obzirom na karakteristike signala koji se odašilje koriste nelinearna pojačala koja imaju visok stupanj iskoristivosti. Eventualno uvođenje TETRA tehnologije zahtijevalo bi potpun jednokratni prijelaz svih korisnika, što je nerealno dok bi istovremena primjena dva sustava, TETRA i analognog pomorskog VHF na susjednim kanalima stvarala smetnje onemogućavajući komunikaciju.



- BS: base station
- ISDN: integrated services digital network
- LS: line station
- MS : mobile station
- MT: mobile terminal
- NMU: network management unit
- PDN: public data network
- PSTN: public switched telephone network
- PTN: public telephone network
- TE: terminal equipment

Rap 2014-01

Slika 6.1. Funkcijska struktura TETRA V+D sustava

Izvor: Report ITU-R M.2014, Spectrum Efficient Digital Land Mobile Systems for Dispatch Traffic, 1998, str.11.

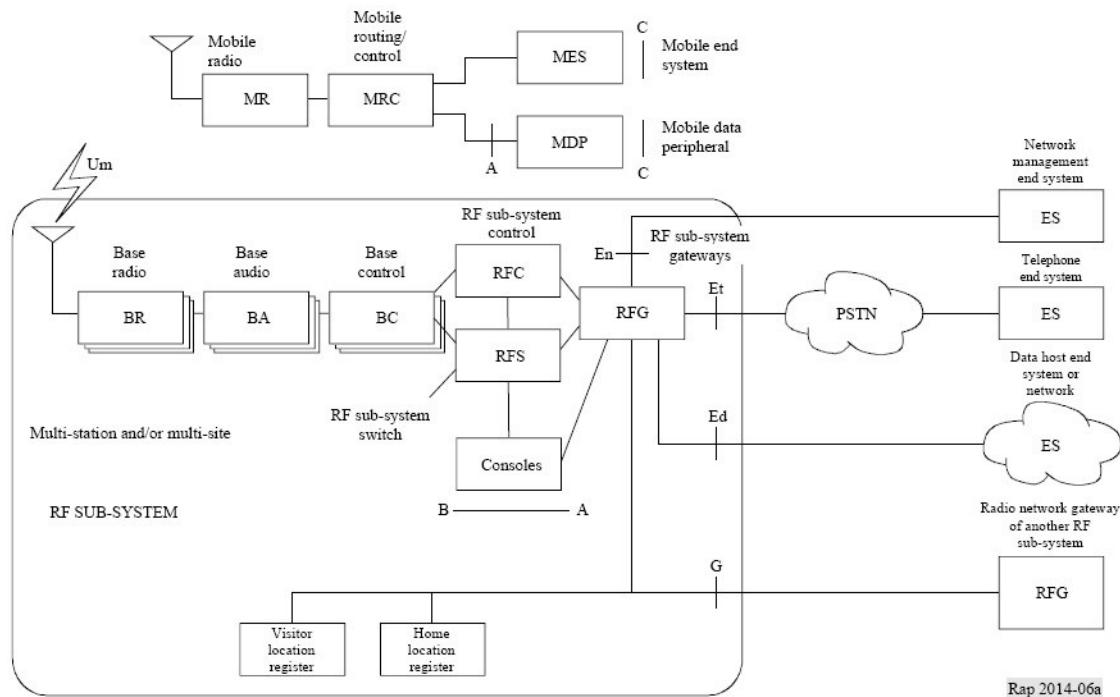
6.2. APCO Project 25 sustav

Digitalni komunikacijski sustav standardiziran u USA od organizacije TIA (*Telecommunications Industry Association*) za potrebe službi opće sigurnosti (policija, hitna pomoć vatrogasci...) kao i za državne službe. Sustav podržava tri načina komunikacija kao i TETRA sustav, a raspodjela kanala je također na zahtjev prema "Trunking" protokolu. Predviđene su dvije faze uvođenja "Project 25" sustava, a razlikuju se po načinu modulacije i predviđenim širinama komunikacijskih kanala. Prva faza koristi C4FM (*Constant-Envelope 4-level Frequency Modulation*) modulaciju uz širine kanala od 12,5 kHz, dok je u drugoj fazi za širine kanala 6,25 kHz predviđena CQPSK (*Coherent Quaternary Phase Shift Keying*) modulacija. Multipleksiranje kanala je frekvencijsko i logički kanal je ujedno i fizički. Frekvencijska područja na kojima sustav može raditi su VHF i UHF, a udaljenost na kojoj se može obaviti komunikacija je do 35 km.

Osnovne tehničke karakteristike *Project 25* sustava su:

– širina fizičkog kanala:	12,5 kHz (1. faza) 6,25 kHz (2. faza)
– multipleksiranja kanala:	FDMA
- modulacija:	C4FM (1. faza) CQPSK (2. faza)
– brzina prijenosa:	9,6 kbit/s
– kodiranje govora:	IMBE koder (Improved Multi-band Excitation) 4,4 kbit/s
– broj kanala u odnosu na kanal širine 25 kHz:	2 kanala (1. faza) 4 kanala (2. faza)

Osnovni problem *Project 25* sustava je relativno mali domet iako je za prvu fazu sustava vrsta modulacije prihvatljiva s obzirom da signal ima konstantnu amplitudu. U drugoj fazi postiže se visoka spektralna učinkovitost, ali karakteristika moduliranog signala zahtijeva upotrebu linearnih pojačala. Dodatni je problem taj što FDMA tehnologija zahtijeva dupleksnu izvedbu uređaja što otežava primjenu ove tehnologije u pomorstvu.



Slika 6.2. Opća konfiguracija *Project 25* sustava

Izvor: Report ITU-R M.2014, Spectrum Efficient Digital Land Mobile Systems for Dispatch Traffic, 1998., str.25.

6.3. EDACS sustav

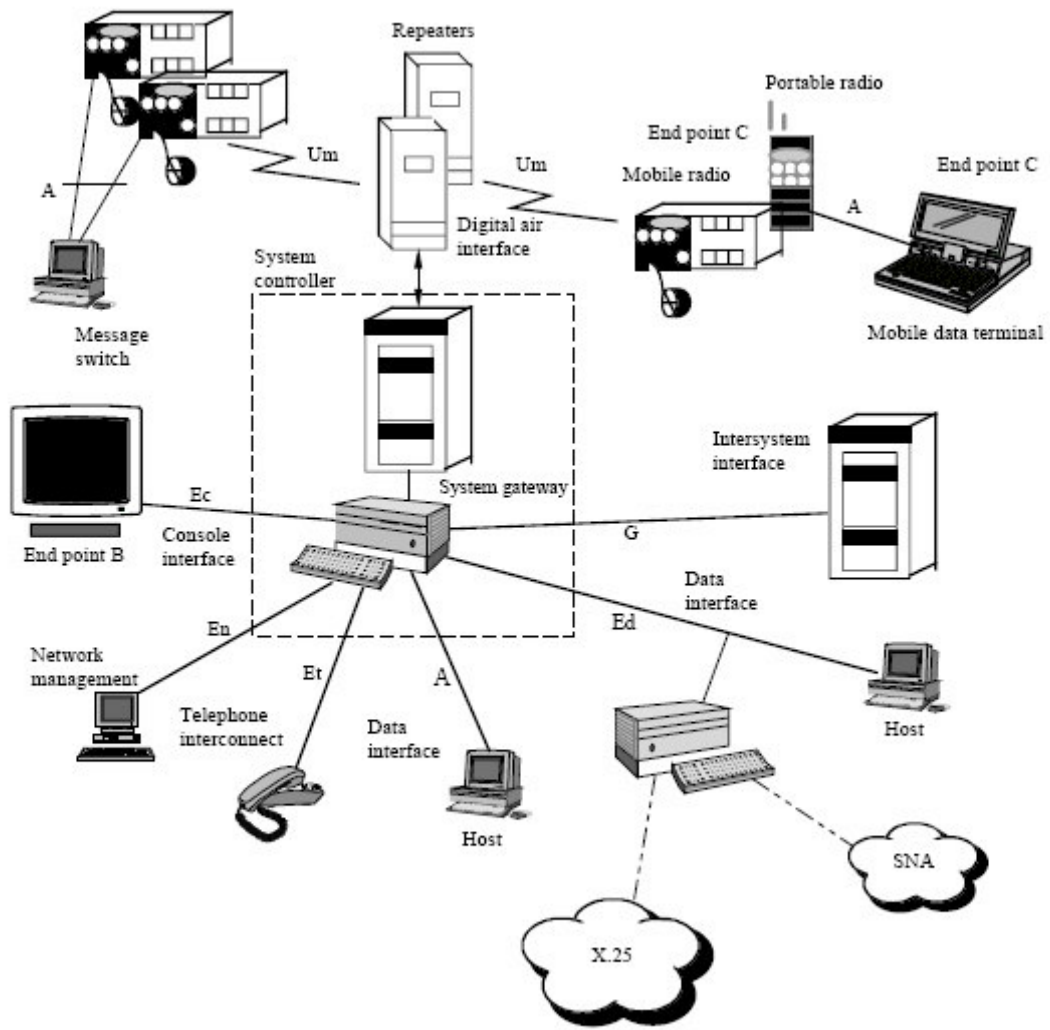
Komunikacijski sustav EDACS (*Enhanced Digital Access Communication System*) razradila je tvrtka *Ericsson*, a omogućuje izravan prijelaz s analognih na digitalne komunikacije. Sustav je primjenjiv za kanale 12,5 kHz i 25 kHz na VHF i UHF frekvencijskim područjima. Koristi GFSK modulaciju (*Gaussian Frequency Shift Keying*) uz brzinu prijenosa od 9600 bit/s i frekvencijsku raspodjelu kanala (FDMA). Sustav omogućuje istovremenu mogućnost korištenja analognih komunikacija na kanalima širine 25 kHz, i digitalnih komunikacija na kanalima širine 25 kHz i 12,5 kHz uz upotrebu istih uređaja, te je stoga pogodan za postepeni prijelaz s analognih na digitalne komunikacije. Nedostatak sustava je slaba spektralna učinkovitost. Sustav omogućuje komunikacije posredstvom baznih stanica i izravne komunikacije između

pokretnih stanica, a pruža mogućnost govornih komunikacija i prijenos podatka. Podržan je rad s konvencionalnim načinom korištenja kanala i u načinu korištenja kanala na zahtjev, odnosno "trunking" protokol. Kodiranje govora obavlja se pomoću AMBE (*Advanced Multi-Band Excitation*) ili IMBE (*Improved Multi-Band Excitation*) koderom sa 6,5 kbit/s i osigurava visoku kvalitetu govora. Udaljenosti na kojima se može obavljati komunikacija ovise o frekvencijskom području.

Osnovne tehničke karakteristike EDACS sustava su:

- širina fizičkog kanala: 25 kHz i 12,5 kHz
- multipleksiranja kanala: FDMA
- modulacija: GFSK
- brzina prijenosa: 9,6 kbit/s
- kodiranje govora: IMBE ili AMBE koder 6,5 kbit/s
- broj kanala u odnosu na kanal širine 25 kHz: 1 ili 2 kanala

Glavni nedostatak ovog sustava je njegova niska spektralna učinkovitost čime se ne bi moglo povećati broj raspoloživih komunikacijskih kanala što je osnovni razlog istraživanja alternative za postojeće komunikacije na pomorskom VHF području.



SNA: short number addressing

Rap 2014-20

Slika 6.3. Osnovni model EDACS sustava

Izvor: Report ITU-R M.2014, Spectrum Efficient Digital Land Mobile Systems for Dispatch Traffic, 1998., str. 53.

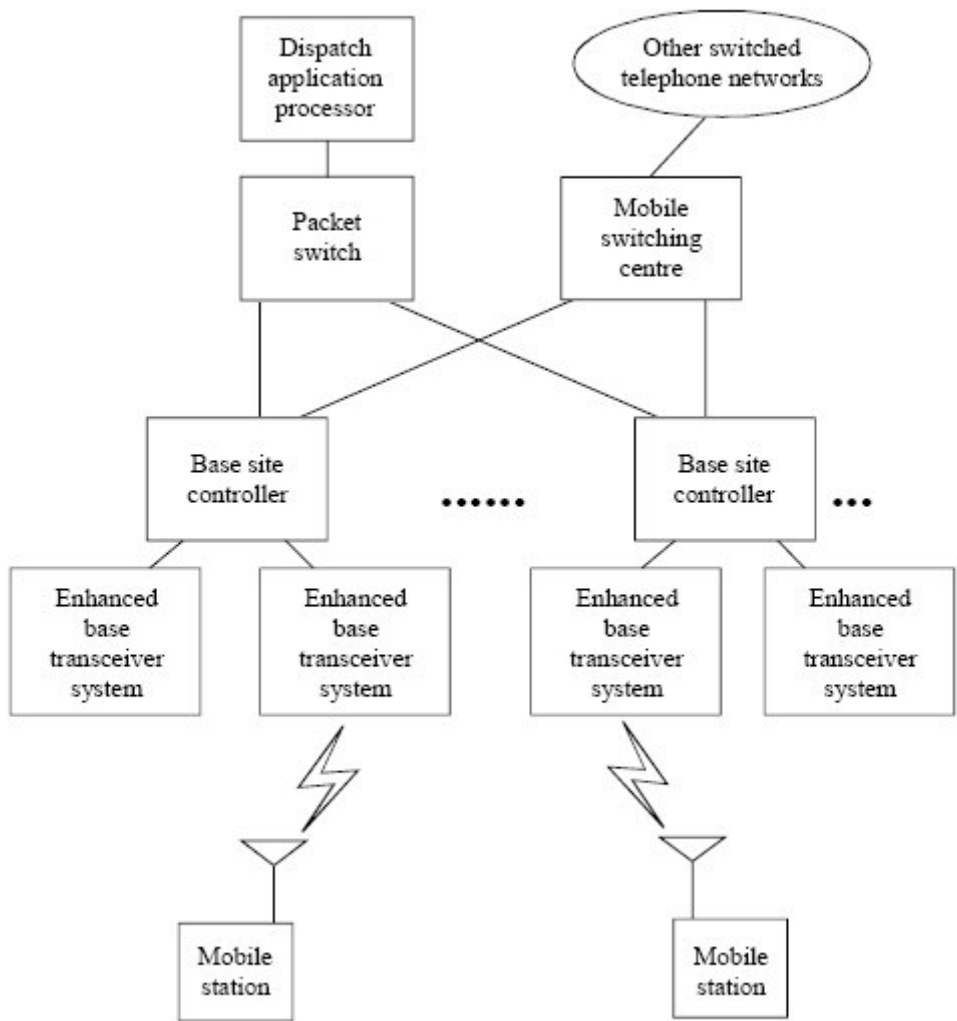
6.4. DIMRS sustav

Sustav DIMRS (*Digital Integrated Mobile Radio System*) razvijen je u Kanadi kao jedinstven sustav u kojem su integrirane usluge mobilne telefonije, "paging" sustav, dispečerski sustav i prijenos podataka. Komunikacijski kanali širine su 25 kHz uz primjenu TDMA tehnologije, a svaki fizički kanal koristi vremenski okvir trajanja 90 ms koji je razdijeljen u 6 logičkih kanala svaki u trajanju od 15 ms. Struktura komunikacijskih kanala i brzine prijenosa u DIMRS sustavu različiti su u ovisnosti o vrsti usluge. Za kodiranje govora koristi se VSELP (*Vector Sum Excited Linear Prediction*) koder. Upotrebom 16QAM modulacije postignuta je ukupna brzina prijenosa unutar kanala širine 25 kHz od 64 kbit/s. Sustav je predviđen za rad samo na UHF području, a karakteristike moduliranog signala zahtijevaju upotrebu izlaznog pojačala s linearnom karakteristikom. Također, sustav ne omogućuje izravne komunikacije među pokretnim stanicama, a područje pokrivanja koje ovisi o dizajnu sustava i vrstama uređaja iznosi do 40 km.

Osnovne tehničke karakteristike DIMRS sustava su:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| – širina fizičkog kanala: | 25 kHz |
| – multipleksiranja kanala: | TDMA, 6 logičkih kanala po okviru |
| – modulacija: | 16QAM |
| – brzina prijenosa: | 64 kbit/s |
| – kodiranje govora: | VSELP koder |
| – broj kanala u odnosu na kanal širine 25 kHz: | 6 kanala |

Osnovna prednost DIMRS tehnologije je vrlo visoka spektralna učinkovitost. Nedostatak predstavlja način modulacije koji traži izrazito linearna izlazna pojačala, kao i kod TETRA tehnologije. Utoliko niti ova tehnologija, kao ni vrlo slična TETRA, ne dozvoljava izravnu primjenu u pomorstvu.



Rap 2014-12

Slika 6.4. Glavne komponente DIMRS sustava

Izvor: Report ITU-R M.2014, Spectrum Efficient Digital Land Mobile Systems for Dispatch Traffic, 1998., str. 37.

6.5. DMR sustav

Sustav DMR (*Digital Mobile Radio*) je "otvoreni" komunikacijski sustav razrađen i standardiziran od organizacije ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*)²⁰. Sustav je predviđen za upotrebu u tri razine: nelicencirani korisnici (*Tier I*), licencirani korisnici u konvencionalnoj mreži (*Tier II*) i licencirani korisnici u "trunking" mreži (*Tier III*). Sustav je predviđen za frekvencijska područja VHF i UHF uz korištenje komunikacijskih kanala širine 12,5 kHz. Multipleksiranje kanala je izvedeno primjenom TDMA tehnologije, a svaki fizički kanal koristi vremenski okvir trajanja 60 ms koji je razdijeljen u 2 logička kanala svaki u trajanju od 30 ms. Struktura komunikacijskih kanala teoretski omogućuje komunikacije do udaljenosti od 150 km, no u stvarnim uvjetima je zbog neusklađenosti sinkronizacije u prijemnicima udaljenost manja.

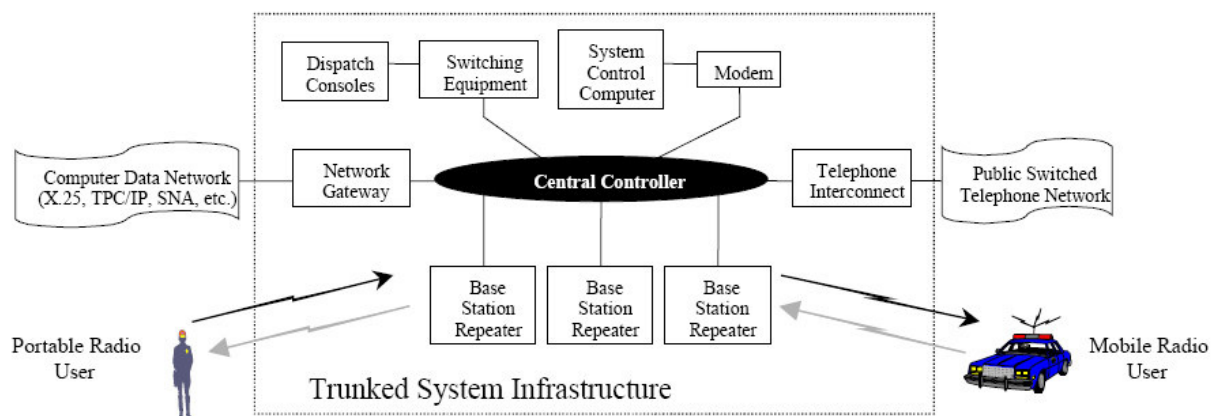
Sustavom su podržana tri načina komunikacija posredstvom baznih stanica, ali i izravnim vezama između pokretnih stanica: govorne komunikacije, kratke tekstualne poruke (SMS) i paketni prijenos podataka prema IPv4 i IPv6 protokolima. Bazne stanice omogućuju izravan pristup mobilnim korisnicima u različite komunikacijske sustave (PSTN, internet...), kao i izravne pozive prema mobilnim korisnicima. Signal moduliran 4FSK (*4-level Frequency Shift Keying*) modulacijom omogućuje brzinu prijenosa od 9600 bit/s, ima konstantnu amplitudu i kompatibilan je s analognim kutno moduliranim signalima.

Osnovne tehničke karakteristike DMR sustava su:

- širina fizičkog kanala: 12,5 kHz
- multipleksiranje kanala: TDMA, 2 logičkih kanala po okviru
- modulacija: 4FSK
- brzina prijenosa: 9600 bit/s
- kodiranje govora: nije definirano – struktura kanala podržava kodiranje govora sa brzinom 3600 bit/s
- broj kanala u odnosu na kanal širine 25 kHz: 4 kanala

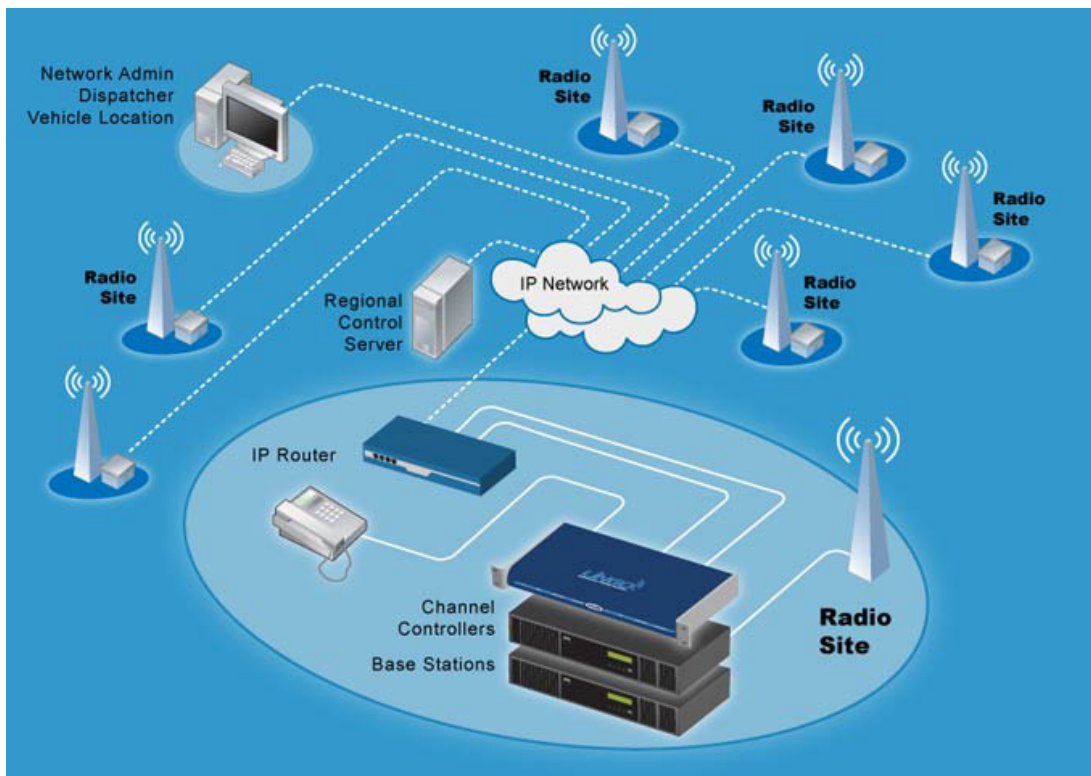
²⁰ TS 102 361-1: The DMR air interface protocol
TS 102 361-2: The DMR voice and generic services and facilities
TS 102 361-3: The DMR data protocol
TS 102 361-4: The DMR Trunking protocol
TS 102 398: DMR General System Design

Sustav osigurava visoku spektralnu učinkovitost i omogućuje duplex komunikacije s vremenskom podjelom (TDD). Nedostatak sustava je da se u simpleks načinu rada koji je potreban za odašiljanje poruke prema više korisnika istovremeno može koristiti samo jedan vremenski okvir čime se gubi na spektralnoj učinkovitosti. Dvije važne prednosti DMR sustava proizlaze iz činjenice da se lako može uklopiti u postojeću strukturu komunikacijskih kanala na pomorskom VHF području i omogućuje istovremeno postojanje analognih i digitalnih komunikacija na susjednim kanalima. Za DMR tehnologiju još ne postoji razrađena infrastruktura. Strukture sustava (osobito za treću razinu) postoje samo na idejnoj razini, kao što je prikazano na slikama 6.5. i 6.6.



Slika 6.5. Osnovna konfiguracija centraliziranog komunikacijskog sustava s dodjelom kanala na zahtjev (*Trunking Network*)

Izvor: Comparisons of Conventional and Trunked Systems, Report for SAFECOM (Emergency Communications Program of the Department of Homeland Security's USA), May 1999., str. 10.



Slika 6.6. Idejna struktura DMR mreže

Izvor: <http://www.fyldemicro.com/Migration-to-digital-DMR-dPMR-MPT1327.htm>

6.6. dPMR sustav

Komunikacijski sustav dPMR (*Digital Private Mobile Radio*) je po svojim karakteristikama vrlo sličan DMR sustavu i također standardiziran od organizacije ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Razlika u odnosu na DMR je u FDMA načinu korištenja kanala. Modulacija 4FSK za dPMR prilagođena je za širine komunikacijskih kanala od 6,25 kHz, a brzina prijenosa iznosi 4800 bit/s. Sustav je predviđen za frekvencijska područja VHF i UHF.

Sustav je zbog FDMA tehnologije jednostavniji za primjenu (manji problemi oko sinkronizacije uređaja) i razrađen je za dva načina upotrebe. Prvi način prikazan na slici 6.7. predviđen je za izravne simpleks komunikacije među mobilnim uređajima (*Mode 1*). Drugi način rada predviđen je kao centralizirani sustav upravljani preko bazne stanice koji omogućuje duplex komunikacije. Za duplex komunikacije potrebno je

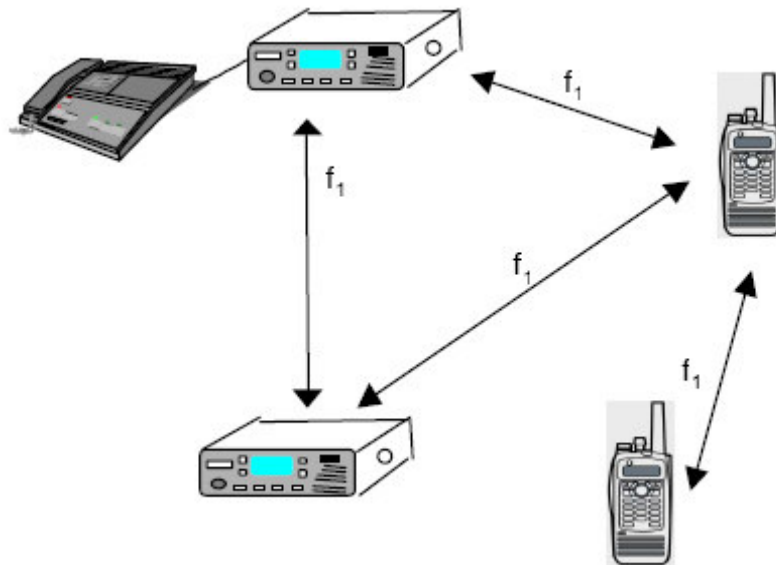
koristiti dva kanala čime spektralna učinkovitost postaje ista kao i u DMR sustavu. Iako slični po karakteristikama, sustavi dPMR i DMR nisu međusobno kompatibilni.

Osnovne tehničke karakteristike dPMR sustava su:

- širina fizičkog kanala: 6,25 kHz
- multipleksiranja kanala: FDMA
- modulacija: 4FSK
- brzina prijenosa: 4800 bit/s
- kodiranje govora: nije definirano – struktura kanala
podržava kodiranje govora sa
brzinom 3600 bit/s
- broj kanala u odnosu na kanal širine 25 kHz: 4 kanala

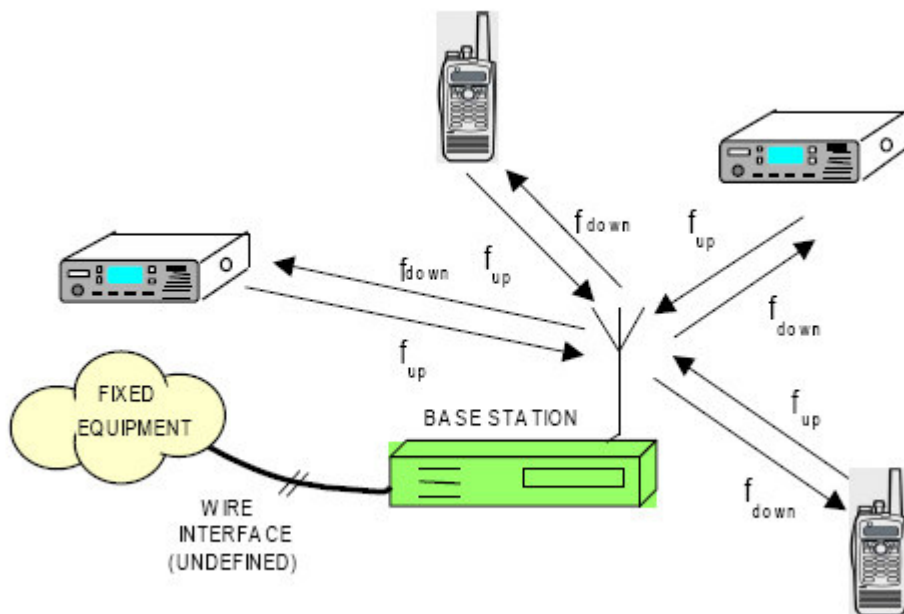
Također kao i DMR, dPMR sustav se lako može uklopiti u postojeću strukturu komunikacijskih kanala na pomorskom VHF području i omogućuje istovremeno postojanje analognih i digitalnih komunikacija na susjednim kanalima.

Na slikama 6.7. i 6.8. prikazani su mogući načini korištenja dPMR sustava za izravne komunikacije među mobilnim stanicama te centralizirani model komunikacija uz posredovanje i kontrolu bazne stanice (centralizirani sustav).



Slika 6.7. Prikaz dPMR sustava za izravne komunikacije

Izvor: ETSI TS 102 658 V2.1.1, Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Private Mobile Radio (dPMR) Using FDMA with a Channel Spacing of 6,25 kHz, 2010, str.20.



Slika 6.8. Osnovni prikaz centraliziranog dPMR sustava

Izvor: ETSI TS 102 658 V2.1.1, Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Private Mobile Radio (dPMR) Using FDMA with a Channel Spacing of 6,25 kHz, 2010, str.20.

Nove komunikacijske tehnologije standardizirane od strane ETSI organizacije, DMR i dPMR, prepoznate su od velikog broja proizvođača komunikacijske opreme, projektanata komunikacijskih sustava, regulatornih tijela te korisnika. Glavni razlozi za iskazani interes proizlaze iz:

- relativno velikih mogućnosti daljnjeg širenja uz obuhvat velikog broj novih korisnika
- mogućnost postupnog prijelaza iz postojećih sustava odnosno migracije s analognih na digitalne tehnologije
- multifunkcionalnost, odnosno mogućnost pružanja novih usluga kao što su lociranje, logistički menadžment, itd.

Budući da je DMR tehnologija namijenjena za profesionalne svrhe, 2005. godine potpisan je memorandum o suradnji temeljem kojeg je osnovana DMR asocijacija (*DMR Association*) u čijem članstvu sudjeluju vodeće tehnološke grupacije kao što su ICOM, Motorola, Fylde Micro, Avtec, EMC, i drugi. Osnovni cilj je suradnja u testiranju i certificiranju DMR sustava, te suradnja s regulatornim agencijama što čini DMR tehnologiju jednom od najperspektivnijih.

7. Prijedlog modela digitalnog VHF sustava i pretpostavke implementacije

Upotreba digitalnih komunikacijskih sustava zbog ograničenih resursa frekvencijskog spektra zahtijeva spektralnu učinkovitost, odnosno informaciju kodiranu s čim manjim brojem bitova, ali uz istodobno postizanje visoke kvalitete govornih signala. Međunarodnim propisima postavljeni su zahtjevi za postizanjem spektralne učinkovitosti od 6,25 kHz. Specifičnosti pomorskih VHF komunikacija, kao što su upotreba frekvencijskog područja za potrebe sigurnosti i globalna rasprostranjenost uvjetuju način prijelaza na digitalne komunikacijske sustave. Kopneni komunikacijski sustavi funkcioniraju unutar manjih geografskih područja pa je njihov model prijelaza zasnovan na revoluciji, gdje se u jednom trenutku tehnologije u potpunosti zamjenjuju. Pomorski VHF sustav zahtijeva evolucijski model u kojem nova tehnologija može koegzistirati s postojećom tehnologijom. Kod uvođenja novog digitalnog komunikacijskog sustava na VHF području u pomorskim komunikacijama posebnu pažnju potrebno je usmjeriti prema komunikacijama za potrebe sigurnosti.

7.1. Tehničke karakteristike sustava

Radi potrebe istovremenog postojanja analognih i digitalnih komunikacijskih sustava unutar pomorskog VHF područja, analizirane su važnije tehnologije koje se koriste u kopnenim komunikacijama. Dvije tehnologije standardizirane od organizacije ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) primjenjive su za potrebe pomorskih VHF komunikacija, a obje omogućuju koegzistenciju analognih i digitalnih kanala. S obzirom na unaprjeđenja koja se postižu, prednost je dana tehnologiji DMR (*Digital Mobile Radio*) koja koristi komunikacijske kanale širine 12,5 kHz uz vremensku raspodjelu kanala i omogućuje duplex komunikacije s jednostavnijim uređajima. Druga tehnologija je dPMR (*Digital Private Mobile Radio*) koja je razrađena za komunikacijske kanale širine 6,25 kHz i podržava samo frekvencijsku raspodjelu kanala.

7.1.1. Obrada signala i modulacija

Sustav DMR primjenjiv je na kanale širine 12,5 kHz te ne zahtijeva dodatnu preraspodjelu komunikacijskih kanala s obzirom da je ITU predvidio komunikacijske kanale na pomorskom VHF području širine 12,5 kHz.²¹ Spektralna učinkovitost od 6,25 kHz proizlazi iz korištenja vremenske raspodjele kanala čime se jedan fizički kanal širine 12,5 kHz dijeli na dva korisnička (logička) kanala. Sustav se temelji na četverorazinskoj FSK modulaciji (4FSK) s konstantnom amplitudom moduliranog signala. Ova modulacija uz prethodnu obradu digitalnog signala informacije (filtriranje) omogućava brzine prijenosa od 4800 simbola u sekundi, odnosno 9600 bita u sekundi. Odabrana vrsta modulacije ne uzrokuje smetnje na susjednim kanalima te je pogodna za paralelan rad analognih i digitalnih komunikacijskih sustava.

Parametri modulacije:

Potrebna širina kanala za 4FSK modulaciju ovisi o karakteristikama signala informacije i o indeksu modulacije. Za višerazinsku FSK modulaciju indeks modulacije h izračunava se pomoću izraza:

$$h = \frac{\beta}{M - 1},$$

gdje je indeks modulacije za analogne komunikacijske sustave $\beta=0,8334$, a broj simbola $M=4$. Odabran je nešto niži indeks modulacije od izračuna, a iznosi $h=0,27$. Maksimalna devijacija frekvencije i potrebni razmak između frekvencija koje predstavljaju pojedine simbole izračunava se iz izraza:

$$h = \frac{2\Delta f}{M - 1} \cdot T_s$$

$$h = f_{spacing} \cdot T_s.$$

Maksimalna devijacija frekvencije iznosi $\Delta f=1944$ Hz a razmak između frekvencija koje predstavljaju pojedine simbole iznosi $f_{spacing}=1296$ Hz.

²¹ ITU-R M.1084, Interim Solutions for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service

Mapiranje simbola i iznosi devijacija frekvencija od frekvencije vala nositelja za 4FSK modulaciju za pojedini simbol prikazani su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Mapiranje simbola i iznosi devijacije frekvencije

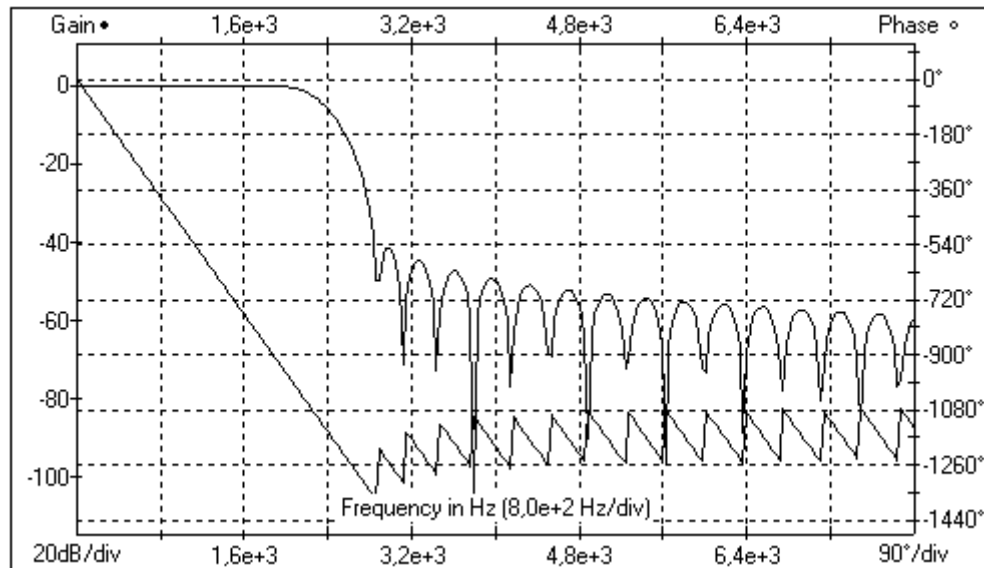
Bitovi informacije		Simbol	4FSK devijacija frekvencije
Bit 1	Bit 0		
0	1	+3	+1944 Hz
0	0	+1	+648 Hz
1	0	-1	-648 Hz
1	1	-3	-1944 Hz

Izvor: ETSI TS 102 361-1 V1.4.5 (2007-12) Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol

Kako izvorni digitalni signali zauzimaju velike širine kanala, radi smanjenja širine komunikacijskog kanala, a također i postizanja nulte interferenciju između simbola (*Intersymbol Interference - ISI*) digitalni signal se u komunikacijskom sustavu obrađuje s filtrom čija je prijenosna karakteristika podignuta kosinus funkcija (*Raised Cosine Filter*). Prijenosna karakteristika filtra u frekvencijskoj domeni opisana je sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned}
 |F(f)| &= 1 && \text{za } |f| \leq 1920\text{Hz} \\
 |F(f)| &= \left| \cos\left(\frac{\pi f}{1920}\right) \right| && \text{za } 1920\text{Hz} < |f| \leq 2880\text{Hz} . \\
 |F(f)| &= 0 && \text{za } |f| > 2880\text{Hz}
 \end{aligned}$$

Frekvencije u navedenim izrazima prilagođene su impulsima trajanja 0,2083 ms za brzinu prijenosa 4800 simbola u sekundi iz čega slijedi da je faktor strmine filtra kojim je određena širina prijelaznog područja $\alpha=0,2$. Frekvencijski odziv prikazan na slici 7.1. sastoji se od jediničnog pojačanja na nižim frekvencijama (do 1920 Hz), podignute kosinus funkcije u prijelaznom području (od 1920 Hz do 2880 Hz) te potpunog gušenja na višim frekvencijama (iznad 2880 Hz). Također je važno da filter u području frekvencija do 2880 Hz ne stvara promjene u fazi signala.



Slika 7.1. Prijenosna karakteristika "raised cosine" filtra

Izvor: Izradio autor

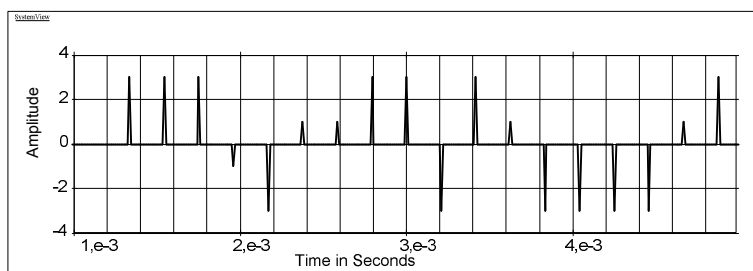
Filtar s prijenosnom karakteristikom podignute kosinus funkcije postiže se upotrebom metode usklađenog filtriranja u predajniku i prijemniku sa spektralnom karakteristikom korijena podignute kosinus funkcije (*Root Raised Cosine Filter*). U predajniku filter djeluje na smanjenje potrebne širine kanala, dok filter u prijemniku poništava utjecaj smetnji u komunikacijskom kanalu i postiže se nulta interferencija između simbola. Filtrirani digitalni signal u vremenskoj domeni postaje sličan analognom signalu.

Upotrebom ovoga filtra smanjuje se potrebna širina kanala u osnovnom frekvencijskom području (B) za brzinu prijenosa 4800 simbola u sekundi i iznosi:

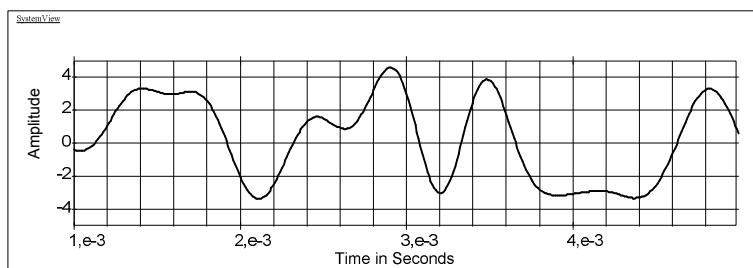
$$B = \frac{1 + \alpha}{2T_s} = \frac{R_s}{2}(1 + \alpha) = 2880 \text{ Hz} .$$

Također je postignut i Nyquistov kriterij za nultu interferenciju između simbola jer je $B > \frac{1}{2T_s}$.

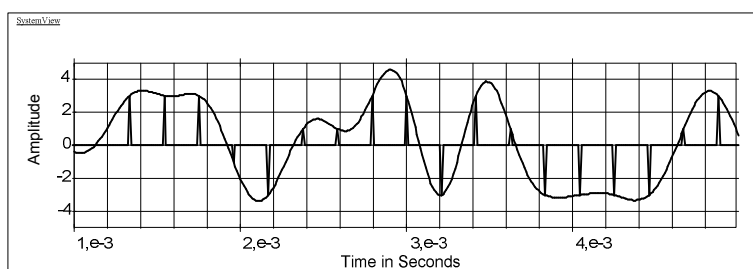
Utjecaj filtra na mapirane simbole prikazan je na slici 7.2.



a) digitalni signal - simboli



b) filtrirani signal



c) istovremeni prikaz ulaznog i izlaznog signala

Slika 7.2. Utjecaj filtra na signal

Izvor: Izradio autor

Za odašiljanje signala filtriranog karakteristikom podignute kosinus funkcije koristi se isti modulator kao i za analogne signale, što omogućuje korištenje istog uređaja kao i za analogne komunikacije. FSK signal moduliran s naizmjeničnim simbolima u obliku +3+3-3-3+3+3-3-3... mora biti identičan kao analogni FM signal s devijacijom frekvencije 2749 Hz uz sinusni signal informacije frekvencije 1200 Hz.²²

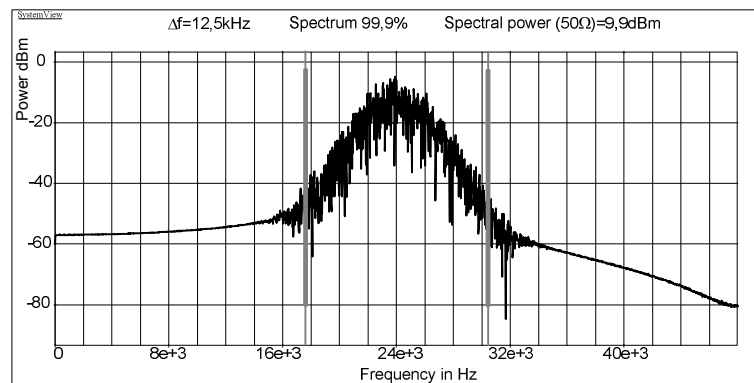
²² ETSI TS 102 361-1 V1.4.5 (2007-12) Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) Protocol

Ovakva modulacija također omogućuje koegzistenciju digitalnog i analognog prijenosa na susjednim komunikacijskim kanalima bez međusobnog ometanja.

Na širinu frekventijskog spektra kojeg zauzima višerazinska FSK modulacija utječu indeks modulacije, broj simbola koji se prenose, brzina prijenosa i karakteristika filtra za filtriranje simbola. Teoretski se širina frekventijskog spektra unutar kojeg se nalazi 99% ukupne snage signala može izračunati pomoću pojednostavljenog izraza²³

$$B_{M-FSK} = \frac{R_s}{2} \cdot M \cdot (1 + \alpha).$$

Širina frekventijskog spektra (99% ukupne snage signala) uz opisane parametre modulacije iznosi $B_{4FSK}=11520$ Hz, što se u potpunosti uklapa u širinu kanala od 12,5 kHz. Spektralna analiza obavljena na simuliranom modelu 4FSK modulacije pomoću programa *SystemView* potvrđuje izračun, a također i zahtjeve koje postavlja ETSI organizacija da signal izvan širine kanala 12,5 kHz mora biti slabiji za 60 dB u odnosu na snagu nemoduliranog vala nositelja.²⁴ Rezultati spektralne analize na 4-FSK moduliranom signalu prikazani su na slici 7.3., a u području kanala širine 12,5 kHz nalazi se 99,9% ukupne snage signala.



Slika 7.3. Spektralna analiza 4FSK moduliranog signala

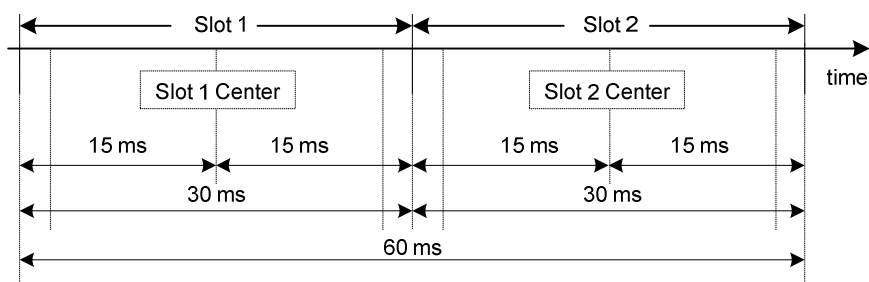
Izvor: Izradio autor

²³ Thomas W. Rondeau, Charles W. Bostian; *Artificial Intelligence in Wireless Communications*, Artech House, 2009.

²⁴ Prema ETSI EN 300 113-1 *Electromagnetic Compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Land Mobile Service; Radio Equipment Intended for the Transmission of Data (and/or Speech) Using Constant or Non-constant Envelope Modulation and Having an Antenna Connector; Part 1: Technical Characteristics and Methods of Measurement*

7.1.2. Struktura kanala za digitalni sustav

Struktura digitalnih kanala s vremenskom raspodjelom (TDMA) prikazana je na slici 7.4. Svaki fizikalni (fizički) kanal širine 12,5 kHz u sustavu s vremenskom raspodjelom kanala dijeli se na dva jednaka vremenska odsječka trajanja 30 ms (*Slot1* i *Slot2*) unutar vremenskog okvira trajanja 60 ms. Ovakav sustav izrazito je povoljan za obavljanje dupleks komunikacija s vremenskom raspodjelom TDD (*Time Division Duplex*), gdje jedna stanica emitira u prvom vremenskom odsječku (logičkom kanalu), a druga stanica u drugom. No postoji također i niz dugih načina iskorištavanja TDMA tehnologije, kao na primjer istovremeno korištenje jednog logičkog kanala za prijenos govora, a drugog za prijenos podataka.



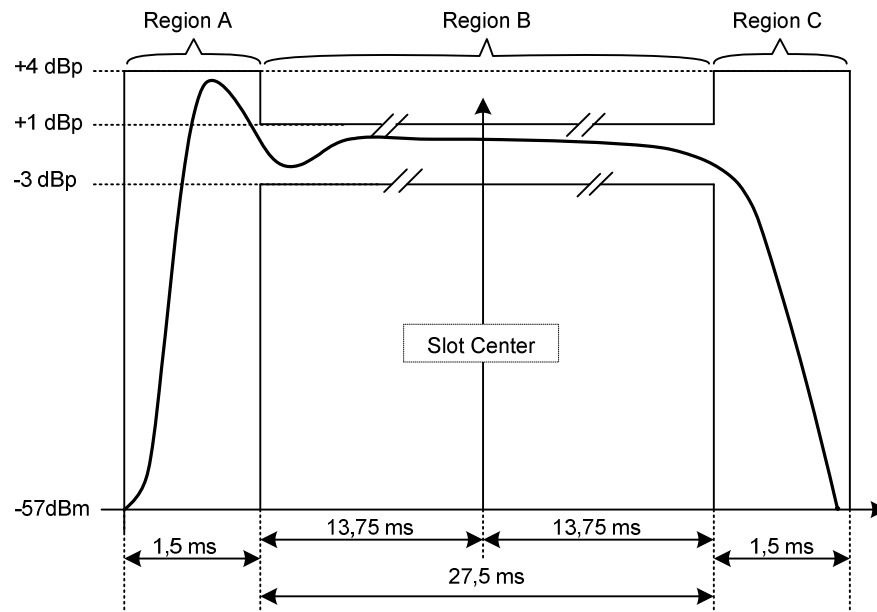
Slika 7.4. TDMA okvir s dva logička kanala

Izvor: ETSI TS 102 361-1 V1.4.5 (2007-12) Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) Protocol

Svaka stanica odašilje u jednom vremenskom odsječku u trajanju od 30 ms, dok je za vrijeme trajanja drugog vremenskog odsječka u prijemnom modu. Neophodni zaštitni vremenski pojas zbog kašnjenja signala uslijed prostiranja elektromagnetskih valova određen je razmakom između pojedinih vremenskih odsječaka u trajanju 2,5 ms, a efektivno vrijeme odašiljanja time je smanjeno na 27,5 ms. Navedeni zaštitni vremenski pojas i struktura logičkog kanala omogućuju obavljanje komunikacije na udaljenosti do 150 km, što je s obzirom na način prostiranja elektromagnetskih valova pogodno za korištenje u VHF području.²⁵ Zaštitni vremenski pojas utječe na smanjenje

²⁵ ETSI TS 102 361-1 V1.4.5 (2007-12) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol

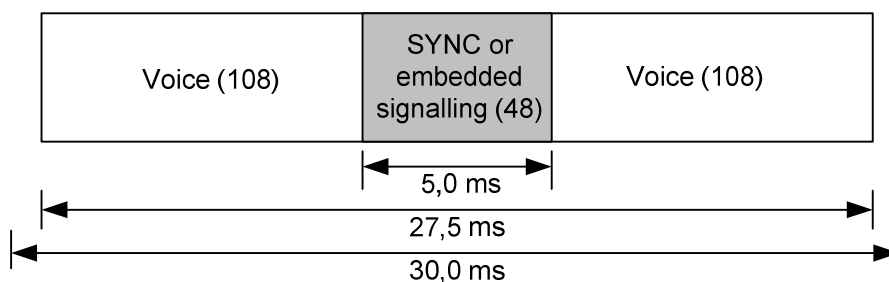
efektivne brzine prijenosa koja iznosi 4,4 kbit/s po jednom logičkom kanalu. Kako zbog impulsnog načina odašiljanja odaslani signal ne bi uzrokovao ometanje na susjednim kanalima, izlazna snaga predajnika mora biti usklađena s maskom prikazom na slici 7.5.



Slika 7.5. Maska izlazne snage predajnika za odašiljanje vremenskog okvira

Izvor: ETSI TS 102 361-1 V1.4.5 (2007-12) Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) Protocol

Predviđena struktura pojedinog logičkog kanala (*Slot*) prikazana na slici 7.6., sastoji se od dva polja s kapacitetom 108 bita (54 simbola) između kojih je smješteno polje kapaciteta 48 bita (24 simbola) koje može služiti za sinkronizaciju ili kao signalno polje. Kapacitet kanala od 216 bita dovoljan je za prijenos 60 ms komprimiranog govora s potrebnim zaštitnim bitovima (FEC protocol).



Slika 7.6. Struktura logičkog kanala

Izvor: ETSI TS 102 361-1 V1.4.5 (2007-12) Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) Protocol

7.1.3. Kodiranje govornog signala za digitalne VHF komunikacije

Parametri temeljem kojih se odabire način kodiranja govornog signala koji je podesan za određeni komunikacijski sustav svrstani su u četiri kategorije²⁶:

- brzina prijenosa (*bit rate*)
- kvaliteta signala
- kompleksnost kodiranja
- kašnjenje signala uslijed primjene koder.

Trajanje vremenskog okvira od 60 ms i moguća efektivna brzina prijenosa određuju odgovarajući način kodiranja govornih signala. Kako bi se postigla visoka kvaliteta komunikacija usporediva s kopnenim komunikacijskim sustavima, u pomorskom digitalnom VHF sustavu neophodno je koristiti koder s visokim stupnjem kompresije uz minimalno kašnjenje signala. Uz kapacitet od 216 bitova po jednom kanalu za prijenos govornog signala unutar vremenskog okvira 60 ms, potrebna brzina prijenosa za koder iznosi 3600 bit/s. Trenutno najbolje rezultate pokazuju tehnologije koje se temelje na MBE kodiranju govornih signala (*Multiband Excitation Vocoder*). Kao primjer jedne od primjenjivih tehnika kodiranja govornih signala odabrana je

²⁶ Digital Signal Processing Handbook, Edited by Vijay K.Madisetti and Douglas B.Williams; Chapman & Hall/CRCnetBase 1999.

AMBE tehnologija (*Advanced Multiband Excitation*) koja se koristi u velikom broju digitalnih komunikacijskih sustava s malim širinama komunikacijskih kanala.²⁷

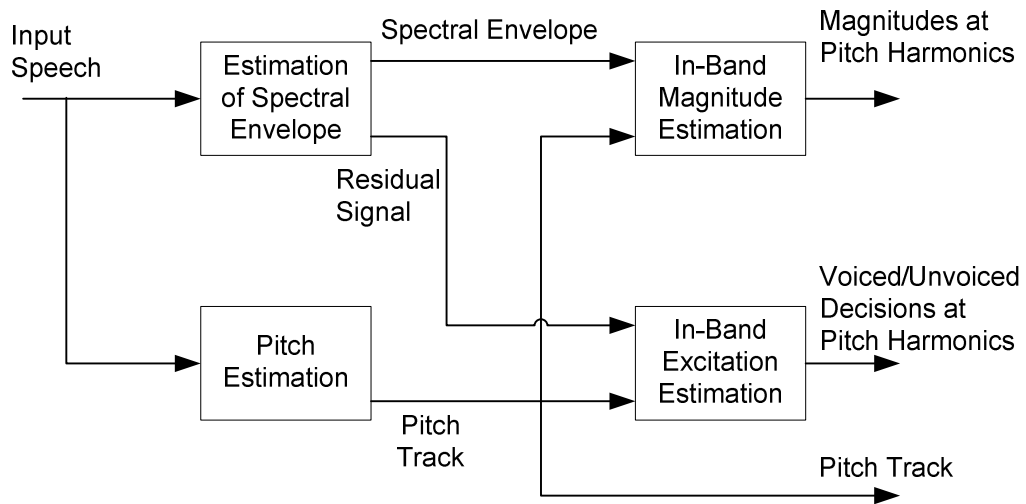
Istraživanje robusnog načina kodiranja govornih signala koji bi i u lošim uvjetima (uz veliku razinu buke) osiguravao visoku kvalitetu signala uz veliki stupanj kompresije započeto je 1980. godine u Massachusetts Institute of Technology. Postojeći načini kodiranja omogućavali su dobru kvalitetu, ali pri većim brzinama prijenosa i uz veću složenost algoritma. Istraživanje je rezultiralo razvojem *Multi-band excitation vocoder* (MBE) modela.

Kao i u ostalim hibridnim načinima kodiranja govornih signala i MBE koder obrađuje segment govornog signala u trajanju od 10 do 40 ms, a kodiranje se odvija u frekvencijskoj domeni. Fourierova transformacija odabranog segmenta modelira se umnoškom spektralne ovojnice kojom su modelirane rezonantne frekvencije govornog trakta (formanti) i spektra signala pobude.²⁸ Razlika u odnosu na ostale načine kodiranja govornih signala je u modeliranju spektra signala pobude koji se modelira osnovnom frekvencijom glasa i frekvencijski ovisnom funkcijom s kojom se osnovna frekvencija kombinira. Frekvencijski ovisna funkcija nastaje analiziranjem frekvencijskog spektra odabranog uzorka govornog signala, a detektira ima li određeni dio spektra odabranog uzorka govornog signala zvučnu ili bezzvučnu pobudu (*voiced/unvoiced*). Zbog uštede u broju potrebnih bitova, spektar govornog signala dijeli se na više frekvencijskih pojaseva (od 12 do 20), te se svaki zasebno analizira. Pobudni signal sastoji se od detektirane osnovne frekvencije glasa i njenih harmonika za zvučne dijelove spektra, te signala bijelog šuma za bezzvučne dijelove spektra. Za kvalitetnu sintezu kod ovoga koda bitan parametar je i faza pojedinih harmonika osnovne frekvencije kod signala zvučne pobude.

Parametri kojima se kodira pojedini segment govornog signala su spektralna ovojnica, osnovna frekvencija signala, informacija o karakteristikama signala pobude za pojedini frekvencijski pojas (zvučna/bezzvučna pobuda) i faza harmonika osnovne frekvencije unutar pojaseva sa zvučnom pobudom. Na slici 7.7. prikazan je blok dijagram principa rada MBE koda.

²⁷ INMARSAT, NDX, NTIA Project25...

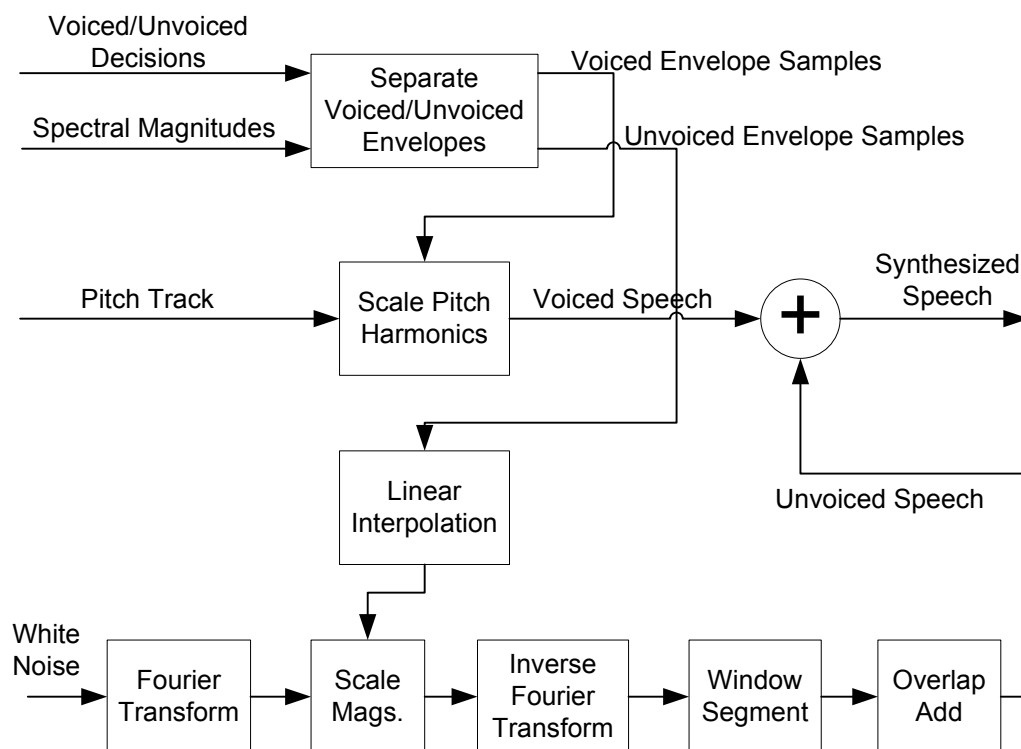
²⁸ Daniel W. Griffin, *Multi-Band Excitation Vocoder*, RLE Technical Report No. 524, March 1987, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.



Slika 7.7. Način rada MBE kodera

Izvor: A Practical Handbook of Speech Coders, Ed. Randy Goldberg, CRC Press LLC, 2000.

Dekoder iz primljenih podataka koji opisuju spektralnu ovojniciu, temeljem podataka o zvučnoj i bezvučnoj pobudi dijeli ukupni spektar na segmente. Dijelovi spektra sa zvučnom pobudom generiraju se u vremenskoj domeni sa signalom koji se sastoji od osnovne frekvencije i njenih harmonika, a njihova amplituda i faza usklađeni su sa spektralnom ovojnicom. Signal pobude s karakteristikom bijelog šuma za bezvučne dijelove spektra generira se u lokalnom oscilatoru, a amplituda signala se usklađuje sa spektralnom ovojnicom za bezvučne dijelove spektra. Sintetizirani govor nastaje dodavanjem zvučnih i bezvučnih segmenata u vremenskoj domeni. Način rada MBE dekodera prikaza je na slici 7.8.



Slika 7.8. Način rada MBE dekodera

Izvor: A Practical Handbook of Speech Coders, Ed. Randy Goldberg, CRC Press LLC, 2000.

Iz MBE modela kodiranja govornih signala razvijena su dva algoritma koja imaju visok stupanj kompresije uz zadržavanje visoke kvalitete signala. Modeli su intelektualno vlasništvo kompanije *Digital Voice Systems, Inc.* (DVSI). Prvi je razvijen algoritam IMBE (*Improved Multi-Band Excitation*) koji omogućuje brzine prijenosa od 6,4 kbit/s. Poboljšanjima IMBE algoritma stvoren je AMBE (*Advanced Multi-Band Excitation*) algoritam kojim je postignuta još bolja kvaliteta signala. Osnovna verzija prilagođena je za potrebne brzine prijenosa od ukupno 4,8 kbit/s, a daljnjim unaprjeđenjima je postignuta i fleksibilnost u pogledu stupnja kompresije. Usporedba dvaju algoritama prikazana je u tablici 7.2.

Tablica 7.2. Usporedba IMBE i osnovnog AMBE algoritma

	Speech (kbit/s)	Error correction (kbit/s)	Total (kbit/s)	MOS
IMBE	4.15	2.25	6.40	3.4
AMBE	3.60	1.20	4.80	3.7

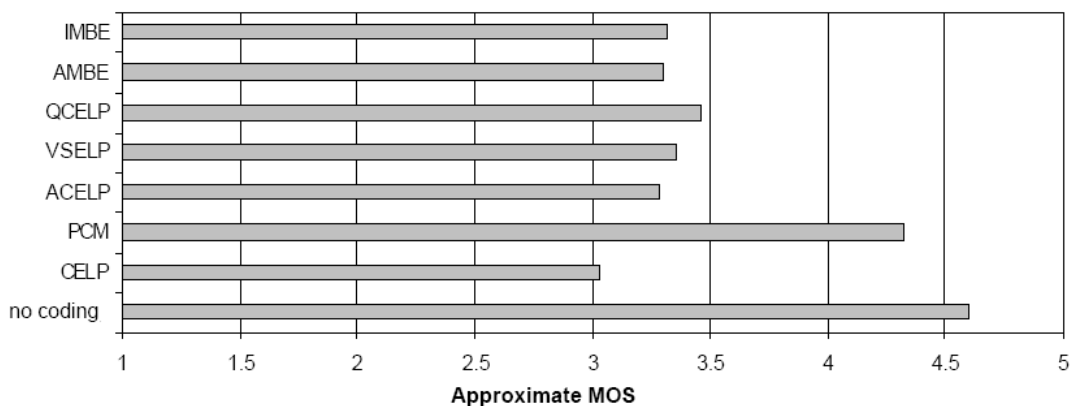
Izvor: A Practical Handbook of Speech Coders, Ed. Randy Goldberg, CRC Press LLC, 2000.

Sadašnja tehnologija omogućava brzine prijenosa od 9,6 do 2,4 kbit/s (bez zaštitnih bitova) uz vrlo mali gubitak u kvaliteti signala. Zbog svojih prednosti AMBE algoritam kodiranja govornih signala koristi se u velikom broju komunikacijskih sustava (INMARSAT, IRIDIUM, APCO Project 25, NXDN, itd.). Razna provedena ispitivanja AMBE kodera pokazuju prednosti pred ostalim načinima kodiranja, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 7.3. i slikama 7.9. i 7.10.

Tablica 7.3. Usporedba kodera

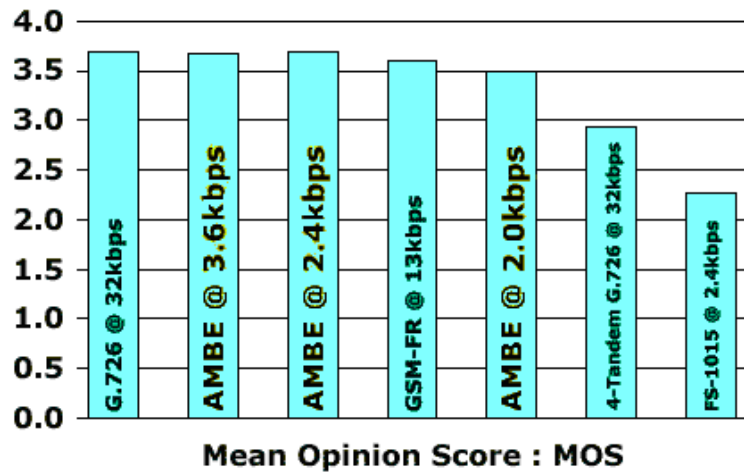
Vocoder	System	Implementation	Bit Rate (kbps)
IMBE	Project 25	DSP-based board	7.2
AMBE	Satellite	DSP-based board	4.8
QCELP	CDMA	Computer expansion board	9.6
VSELP	TDMA	DSP-based board	8.0
ACELP	TETRA	Software	7.2
CELP	Military	DSP-based board	4.8

Izvor: NTIA Report 01-386, Voice Quality Assessment of Vocoders in Tandem Configuration, U.S. Department of Commerce, April 2001., str. 4.



Slika 7.9. Ocjena kvalitete signala kodera

Izvor: NTIA Report 01-386, Voice Quality Assessment of Vocoders in Tandem Configuration, U.S. Department of Commerce, April 2001., str. 16.



Slika 7.10. Ocjena kvalitete signala kodera

Izvor: http://www.dvsinc.com/papers/eval_results.htm

Razlike u ocjeni AMBE kodera vidljive iz slika 7.9. i 7.10. (MOS 3,3 do MOS 3,6) proizlaze iz uvjeta u kojima je izvedeno ispitivanje. Na slici 7.10. prikazani su rezultati ispitivanja kvalitete signala nakon kodiranja, dok je na slici 7.9. rezultat ispitivanja dobiven u realnim uvjetima korištenjem komunikacijskih sustava. U usporedbi s ocjenama kvalitete u analognim sustavima gdje su dobiveni rezultati od MOS 2-3,5 za VHF komunikacijski sustav sa širinom kanala 25 kHz i MOS 1,8-3,1 za VHF komunikacijski sustav sa širinom kanala 12,5 kHz, upotreba AMBE kodera osiguravala bi visoku kvalitetu informacije.

7.2. Obalna infrastruktura

Obalne radiostanice na VHF frekvencijskom području, s obzirom na vrste usluga koje pružaju, mogu se podijeliti na komercijalne radiostanice i obalne radiostanice za potrebe sigurnosti plovidbe. Komercijalne obalne radiostanice omogućuju brodovima pristup u međunarodnu kopnenu telefonsku mrežu. Komercijalnim radiostanicama upotrebom digitalnih komunikacijskih tehnologija pružio bi se niz novih mogućnosti pružanja usluga mobilnim korisnicima (brodovima). Način izvođenja komunikacija značajno se pojednostavljuje i ubrzavaju se do sada dugotrajna uspostavljanja veze uz značajno povećane kapacitete. Također bi brodovi postali dostupni pozivima s kopna, čime se povećava konkurentnost obalnih radiostanica. Novi način korištenja kanala povećao bi kapacitete u usporedbi s raspodjelom kanala širine 25 kHz četiri puta. Način korištenja kanala bio bi vrlo sličan kopnenim digitalnim komunikacijskim mrežama, a prijedlog novog sustava za potrebe komercijalnih obalnih stanica bazira se na mrežnim kontroliranim komunikacijama (*trunking protocol*).

7.2.1. Komunikacijski sustav obalnih stanica

Komunikacijski kanali obalnih radiostanica za komercijalne komunikacije u predloženom modelu sastojali bi se od jednog kontrolnog kanala za potrebe signalizacije, te radnih kanala koje prema potrebi obalna radiostanica dodjeljuje putem kontrolnog kanala brodskim stanicama. Svaki od navedenih kanala je fizički kanal koji sadrži dva logička kanala koji se mogu koristiti za govorne komunikacije i prijenos podataka.

Moguća su dva načina korištenja kontrolnog kanala:

- a) kontrolni kanal koji se koristi isključivo za potrebe signalizacije,
- b) kontrolni kanal za signalizaciju koji se po potrebi može koristiti i kao radni kanal.

Prvi slučaj trajnog kontrolnog kanala koristi se u mrežama s većim brojem radnih kanala, a prednosti ove tehnologije su:

- kontrolni kanal je uvijek raspoloživ stanicama koje se prijavljuju u mrežu,
- kontrolni kanal je uvijek raspoloživ stanicama za procesiranje sekundarnih informacija (registracija stanica, lociranje, kratke poruke...),
- obalna stanica je uvijek u mogućnosti prihvatiti pozive upućene od strane brodskih stanica,
- obalna stanica u bilo kojem trenutku može pozvati slobodnu brodsku stanicu prijavljenu u mrežu (za potrebe izravnih poziva s javne telefonske mreže).

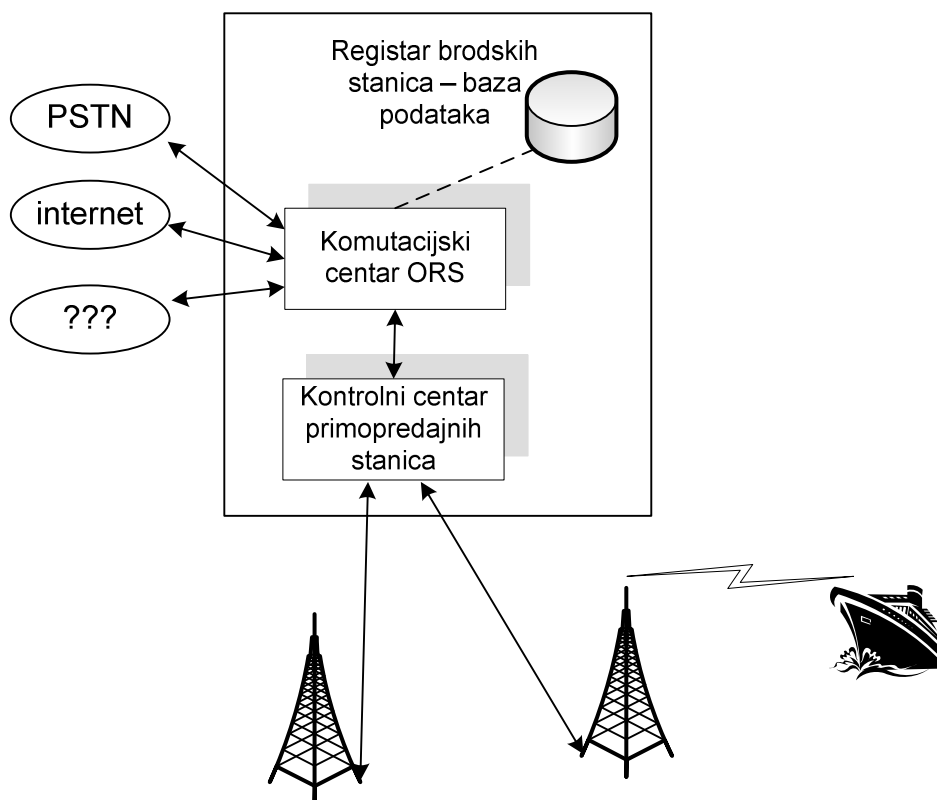
Nedostatak ove metode je gubitak jednog radnog kanala.

Drugi način upotrebe kontrolnog kanala koji se po potrebi može koristiti i kao radni kanal pogodan je za stanice s manjim brojem radnih kanala. U slučaju porasta prometa, obalna stanica prekida sa signaliziranjem na kontrolnom kanalu i koristi ga kao radni kanal. Prednosti ove metode su u većem broju radnih kanala u odnosu na prethodni način, a nedostaci se manifestiraju kroz nemogućnost korištenja funkcija kontrolnog kanala za vrijeme trajanja razgovora.

S obzirom na nedostatke koji proizlaze iz drugog načina upotrebe kontrolnog kanala, predlaže se način rada mrežno kontroliranih komunikacija putem obalnih radiostanica za potrebe pomorskih VHF komunikacija upotrebom kontrolnih kanala isključivo za potrebe signalizacije. Gubitak jednog radnog kanala za predviđeni sustav ne utječe značajno na performanse sustava. Obalna stanica može konstantno emitirati signale na kontrolnom kanalu, a također je moguće ostvariti i princip kontrolnog kanala koji postaje aktivan na zahtjev brodske stanice. Kod upotrebe trajno aktivnog kontrolnog kanala ubrzava se postupak pozivanja. Ovisno o broju brodova prijavljenih u mrežu, kod povećanog prometa obalna stanica bi trajno emitirala signale na kontrolnom kanalu. U slučaju manjeg broja brodova i prometa, obalna stanica bi automatski prešla u način korištenja kontrolnog kanala na zahtjev, odnosno po potrebi.

7.2.2. Arhitektura obalnih radiostanica u digitalnom komunikacijskom sustavu

Idejni prijedlog sustava digitalne VHF obalne radiostanice prikazan na slici 7.11. razrađen je na principima rada kopnenih komunikacijskih sustava kao što su GSM i TETRA. Sustav se sastoji od jedne ili više primopredajnih stanica koje koriste dodijeljene komunikacijske kanale i glavnog kontrolnog centra kojim se upravlja cijelim sustavom. Važniji elementi glavnog kontrolnog centra su registar brodskih stanica prijavljenih u sustav, komutacijski centar i kontrolni centar primopredajnih stanica. Ovakva koncepcija sustava podrazumijeva da se sustavu mogu prijaviti isključivo odobrene radiostanice s dodijeljenom identifikacijom. Svakoj broskoj i obalnoj radiostanici se od strane nadležnih tijela dodjeljuju potrebne identifikacije, a digitalni uređaji mogli bi kao pozivni i identifikacijski broj koristiti postojeći MMSI broj (*Maritime Mobile Service Identity*). Korisnicima prijavljenim u registar brodskih stanica bio bi omogućen automatski pristup u kopnene komunikacijske sustave koje obalna stanica podržava (javna telefonska mreža, internet, ...). Komutacijski centar povezan je sa registrom brodskih stanica i osim prilagodbe i preusmjeravanja signala ima podatke o trenutnom položaju pojedine brodske stanice i njenoj raspoloživosti za obavljanje komunikacija. Kod poziva upućenih prema brodskim stanicama, u ovakvom sustavu mogu se uvesti i dodatne usluge kao što su indikator zauzetosti stanice ili informacija o neprisustvu stanice u komunikacijskom sustavu. Kontrolni centar primopredajnih stanica upravlja primopredajnim stanicama preko kojih se brodske radiostanice preko dodijeljenih komunikacijskih kanala uključuju u sustav. Način obračuna i naplate troškova komunikacija u ovakvom automatiziranom sustavu je vrlo fleksibilan, te bi kao i u kopnenim mobilnim komunikacijskim sustavima, bili omogućeni razni oblici naplate (bonovi, pretplata ...).



Slika 7.11. Prijedlog idejnog koncepta digitalnog komunikacijskog sustava obalnih radiostanica

Izvor: Izradio autor

Kao primjer nove strukture kanala uzet je kanal 01 pomorskog VHF područja, razdijeljen na uže kanale od 12,5 kHz.²⁹ U tablici 7.4. prikazan je dio kanala pomorskog VHF područja iz kojeg su vidljive frekvencije i numeracija kanala. Postojeći dupleks kanal 01 širine 25 kHz razdijeljen je na dva dupleks kanala (01 i 201) sa širinama 12,5 kHz. Kako u novom digitalnom modelu svi kanali postaju simpleksni, radi jednostavnosti analize za novi digitalni model kanali su označeni na sljedeći način:

- kanal *01A* (frekvencija 156,050 MHz) – kontrolni kanal
- kanal *01B* (frekvencija 156,0625 MHz) – 1. radni kanal
- kanal *01C* (frekvencija 160,650 MHz) – 2. radni kanal
- kanal *01D* (frekvencija 160,6625 MHz) – 3. radni kanal

²⁹ ITU-R M.1084, Interim Solutions for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service

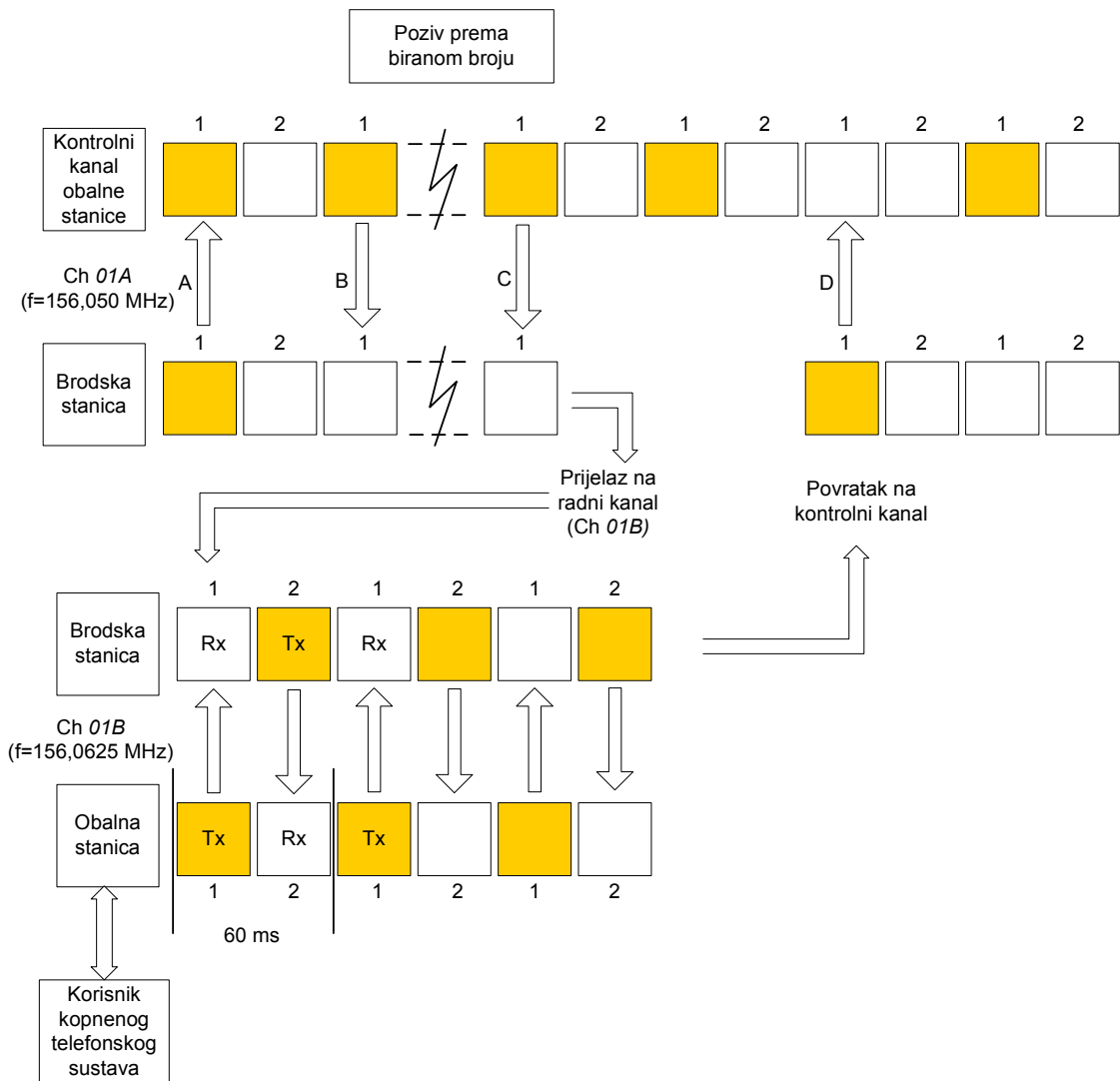
Tablica 7.4. Izvod iz tablice numeracije kanala sa širinom 12,5kHz

First 25 kHz Channel	Interleaved 12.5 kHz Channel	Second 25 kHz Channel	SHIP	SHIP & COAST	COAST
01			156.050		160.650
	201		156.0625		160.6625

Izvor: Izvod iz ITU-R M.1084, Interim Solutions for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service, ANNEX 4

Trenutni način korištenja VHF kanala temelji se na FDD tehnologiji (*Frequency Division Duplex*). Obavljanje dupleks komunikacija s korisnikom u kopnenom telefonskom sustavu moguće je posredstvom obalne radiostanice na dupleks kanalima, a brodovi moraju biti opremljeni dupleksnim uređajima koji su zbog svoje visoke cijene malo u upotrebi. Prijedlog digitalnog komunikacijskog sustava baziran je na korištenju TDD tehnologije (*Time Division Duplex*) uz upotrebu fizičkog simpleks kanala, te svi fizički kanali postaju dvosmjerni. Ovakva tehnologija korištenja kanala s raspodjelom po frekvenciji i vremenu (FDMA-TDMA) uz dupleks komunikacija s vremenskom raspodjelom (TDD) uspješno se koristi u velikom broju kopnenih i satelitskih digitalnih komunikacijskih sustava (GSM, TETRA, IRIDIUM, itd.).

Na slici 7.12. grafički je obrađen primjer uspostave telefonske komunikacije s pretplatnikom u kopnenoj telefonskoj mreži posredstvom obalne radiostanice u predloženom komunikacijskom sustavu. Brodska stanica registrirana u bazi podataka obalne stanice na kontrolnom kanalu (kanal *OIA*) obavlja zahtjev za uspostavom poziva. U trenutku **A** brodska stanica odašilje broj pretplatnika u kopnenoj telefonskoj mreži s kojim želi uspostaviti vezu, obalna stanica potvrđuje brodu mogućnost uspostave veze (trenutak **B**) i preko komutacijskog centra poziva traženi pretplatnički broj. Nadalje, obalna stanica daje instrukciju brodskoj obalnoj stanici za prijelaz na radni kanal *OIB* (trenutak **C**). Razgovor s biranim brojem obavlja se u potpunosti na određenom radnom kanalu, a nakon prekida veze brodska stanica oslobađa radni kanal i vraća se na kontrolni kanal obalne radiostanice (**D**).



Slika 7.12. Primjer telefonske komunikacije brod-kopno u predloženom digitalnom komunikacijskom sustavu

Izvor: Izradio autor

Uvođenje posebnog pristupnog koda u međunarodni kopneni telefonski sustav omogućilo bi i automatsko pozivanje brodskih stanica u sustavu digitalnih komunikacija što također predstavlja značajan napredak.

7.2.3. Izračun performansi komunikacijskog sustava upotrebom Erlang C modela

Performanse sustava za komunikacijske sustave s dodjelom kanala prema potrebi (*trunking network*) izračunavaju se pomoću Erlang C modela³⁰ ako sustav zadovoljava sljedeće pretpostavke:

- sustav je centraliziran (jedan kanal je samo kontrolni kanal)
- sustav ima neograničeni broj korisnika
- intervali između poziva su slučajni
- vrijeme trajanja poziva je slučajno
- vrijeme uspostave veze se može zanemariti (uspostava veze obavlja se preko kontrolnog kanala)
- red čekanja na slobodni kanal je po FIFO protokolu (*First In First Out*), odnosno svi pozivi imaju jednaki prioritet.

Sustav se projektira prema željenoj razini usluge (GOS, *Grade Of Service*) koja se izražava u postotcima. Razina usluge u telekomunikacijskim sustavima je definirana kroz vjerojatnost da će poziv biti blokiran, odnosno da će poziv u sustavima s redom čekanja biti stavljen na čekanje. Za sustave s dodjelom kanala prema potrebi razina usluge je funkcija vjerojatnosti da će odaslani poziv biti stavljen na čekanje, i vjerojatnosti da će vrijeme čekanja za takav poziv prijeći referentnu vrijednost.

Ulazni podaci za Erlang C model su:

- vrijeme čekanja na uspostavu veze za vrijeme najvećeg prometa W
- vjerojatnost prekoračenja kroz tri razine usluge:
 1. ciljana razina 5%
 2. prihvatljiva razina 10%
 3. neprihvatljiva razina 30%
- srednje vrijeme trajanja zauzeća kanala po stanici u jednom satu H

³⁰ Trunked Systems in the Land Mobile Radio Service, Radiocommunications Agency-Mobile Services Section, London, 1994.
NTIA Report 08-451, Assessment of Alternative Future Land Mobile Radio Systems, technical report, U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, December 2007.

- broj poziva po jednoj stanici λ .

Vjerojatnost kašnjenja poziva za određeni broj kanala (C) uz ukupnu zauzetost kanala (A) zadanu u jedinici Erlang je:

$$P_D = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \cdot \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}}.$$

Vjerojatnost da će zakašnjeli poziv čekati više od navedenog vremena t :

$$P_1(W > t) = e^{-(C-A)\frac{t}{H}}.$$

Odnosno vjerojatnost da će bilo koji poziv imati kašnjenje veće od t sekundi

$$P(W > t) = P_D \cdot P_1(W > t) = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \cdot \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}} \cdot e^{-(C-A)\frac{t}{H}}.$$

Prema navedenom modelu izračunava se broj stanica koje određeni sustav može podržati uz definiranu razinu usluge:

$$N = \frac{3600 \cdot A}{\lambda \cdot H}.$$

Srednje vrijeme kašnjenja za pozive na čekanju je $W_D = \frac{H}{C-A}$, a srednje vrijeme čekanja za sve pozive iznosi:

$$W_A = P_D \cdot W_D.$$

7.2.4. Usporedba performansi klasičnog sustava i predloženog digitalnog sustava

Za usporedbu performansi odabran je klasični (postojeći) sustav obalne radiostanice koja podržava pozivanje za potrebe uspostave telefonskog razgovora upotrebom DSC uređaja i koja koristi jedan dupleks radni kanal.

Predloženi digitalni sustav temeljio bi se na raspodjeli radnih kanala u centraliziranom sustavu te bi jedan dupleks kanal širine 25 kHz primjenom predložene digitalne TDD tehnologije omogućavao četiri dupleks kanala. Centralizirani sustav podrazumijeva upotrebu jednog kanala isključivo za potrebe signalizacije i tri radna kanala. Obalna stanica koja u dosadašnjem sustavu koristi dva radna kanala, u novom sustavu na raspolaganju bi imala 7 radnih kanala. Zbog mogućeg povećanja potreba obrađen je i slučaj s jednim kontrolnim i 11 radnih kanala.

Primjena Erlang C modela na predloženi digitalni pomorski VHF komunikacijski sustav daje korisne informacije o potrebnom broju komunikacijskih kanala ovisno o broju brodova ili razgovora koji se obavljaju preko obalne radiostanice. Razrađena su tri slučaja s kapacitetom od 3, 7 i 11 radnih kanala. Odabrano je vrijeme čekanja na uspostavu poziva od 20 s što predstavlja blažu varijantu, i nešto zahtjevnija varijanta od 10 s. Kod vrlo zahtjevnih sustava gdje je potrebna brza uspostava veze vrijeme čekanja iznosi 1 s.³¹

Ulazni parametri prema kojima je izračunato opterećenje za zadani broj kanala uz pretpostavljenu razinu usluge od 5%, 10% i 30% su sljedeći:

- predviđeno srednje trajanje razgovora $H=60$ s
- predviđeni broj poziva unutar jednog sata po stanici $\lambda=1$
- vrijeme čekanja na uspostavu poziva $t=10$ s i $t=20$ s

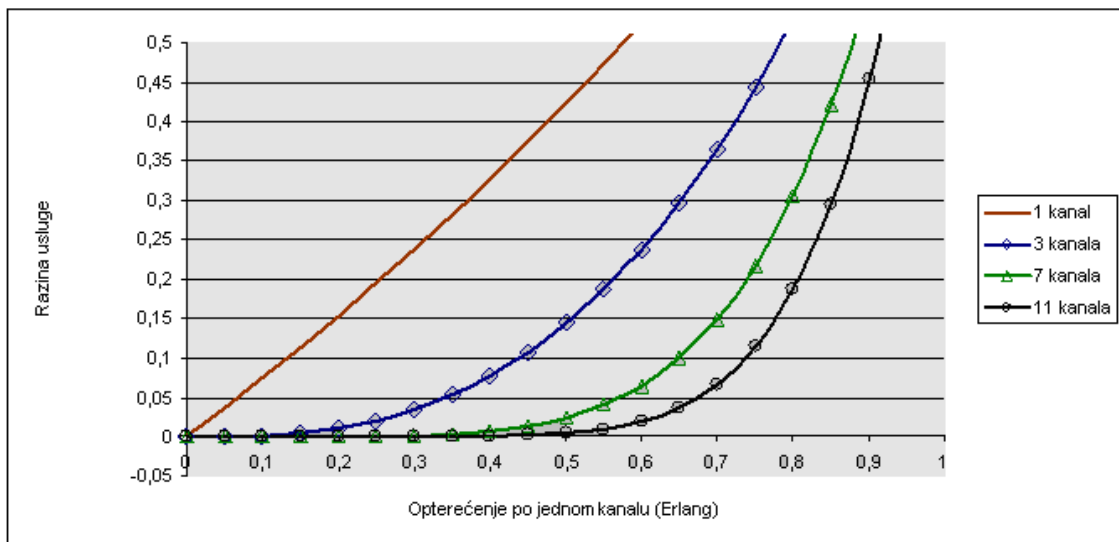
Na slikama 7.13. i 7.14. je prikaz ovisnosti razine usluge o opterećenju po jednom kanalu (a) uz kašnjenje $t=10$ s i $t=20$ s za komunikacijske sustave sa 1, 3, 7 i 11 kanala prema izrazu:

³¹ Prema: NTIA Report 08-451, "Assessment of Alternative Future Land Mobile Radio Systems"- technical report, U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, December 2007.

$$P(W > t) = \frac{A^C}{A^C + C!(1-a) \cdot \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}} \cdot e^{(-C(1-a)\frac{t}{H}}$$

$$a = \frac{A}{C}$$

Pomoću dobivenih vrijednosti količine prometa ($A=Ca$) izračunat je broj stanica i srednje vrijeme čekanja za sve slučajeve. Rezultati izračuna prikazani su u tablicama 7.5. i 7.6.



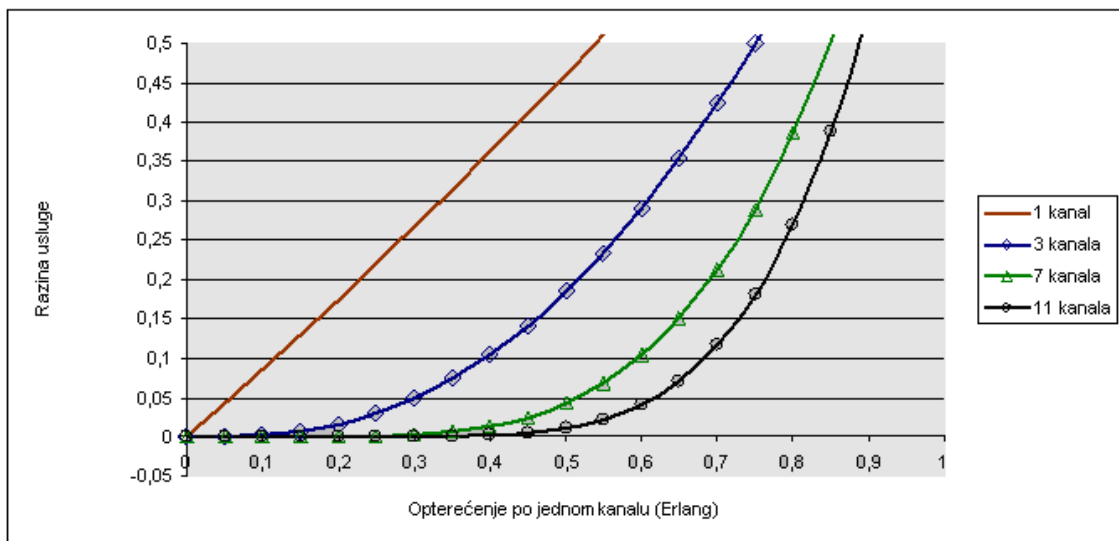
Slika 7.13. Ovisnosti razine usluge o opterećenju po jednom kanalu (a) uz parametre $t=20$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s

Izvor: Izradio autor

Tablica 7.5. Rezultati izračuna Erlang C modela uz parametre $t=20$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s

Broj kanala	GOS(%)	Promet Erlang		Broj stanica			Srednje vrijeme čekanja za $W>20$ s	Srednje vrijeme čekanja – svi pozivi
		Po jednom kanalu a	Ukupno A	Po jednom kanalu	Ukupno za sve kanale	Za $W>20$ s		
1	5	0,069	0,069	4	4	0	-	4,447
	10	0,135	0,135	8	8	1	69,36	9,364
	30	0,375	0,375	23	23	7	96,00	36,000
3	5	0,342	1,026	21	62	3	30,40	2,950
	10	0,440	1,320	26	79	8	35,71	6,320
	30	0,653	1,959	39	118	35	57,64	24,500
7	5	0,572	4,004	34	240	12	20,03	2,720
	10	0,650	4,550	39	273	27	24,49	5,560
	30	0,798	5,586	48	335	101	42,43	20,450
11	5	0,674	7,414	40	445	22	16,73	2,760
	10	0,738	8,118	44	487	49	20,82	5,500
	30	0,852	9,372	51	562	169	36,86	19,020

Izvor: Izradio autor



Slika 7.14. Ovisnosti razine usluge o opterećenju po jednom kanalu (a) uz parametre $t=10$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s

Izvor: Izradio autor

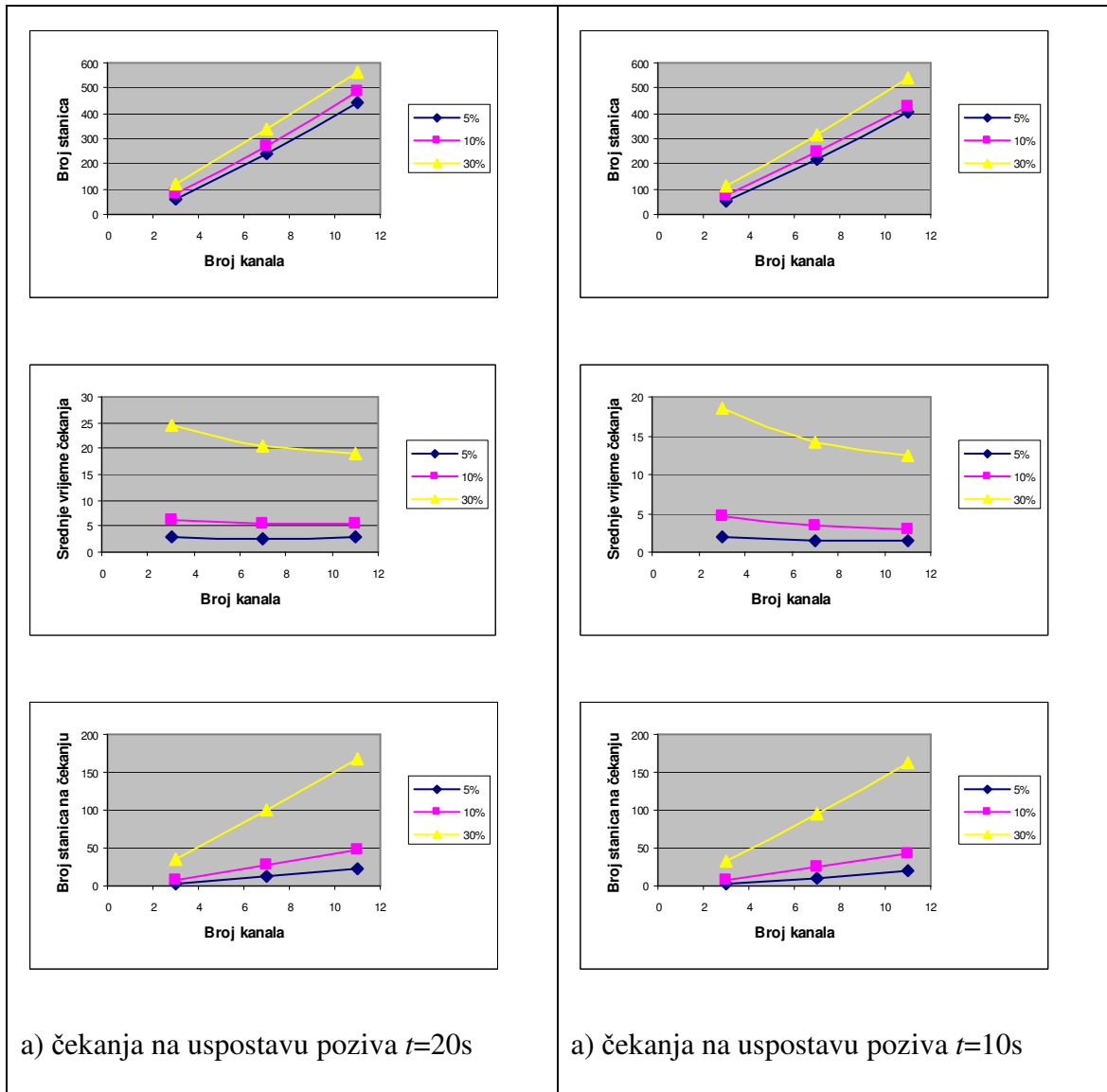
Tablica 7.6. Rezultati izračuna Erlang C modela uz parametre $t=10$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s

Broj kanala	GOS(%)	Promet Erlang		Broj stanica			Srednje vrijeme čekanja za $W>10s$	Srednje vrijeme čekanja – svi pozivi
		Po jednom kanalu (a)	Ukupno (A)	Po jednom kanalu	Ukupno za sve kanale	Za $W>10s$		
1	5	0,059	0,059	4	4	0	-	3,76
	10	0,117	0,117	7	7	1	67,95	7,95
	30	0,336	0,336	20	20	6	90,36	30,36
3	5	0,301	0,904	18	54	3	28,63	2,03
	10	0,400	1,200	24	72	7	33,33	4,70
	30	0,608	1,824	36	109	33	51,02	18,62
7	5	0,516	3,615	31	217	11	17,73	2,03
	10	0,596	4,172	36	250	25	21,22	4,70
	30	0,757	5,299	45	318	95	35,27	18,62
11	5	0,616	6,778	37	407	20	14,21	1,44
	10	0,653	7,183	39	431	43	15,72	3,00
	30	0,814	8,959	49	538	161	29,40	12,41

Izvor: Izradio autor

Dobiveni rezultati izračuna kapaciteta komunikacijskog sustava pomoću *Erlang C* modela za vrijeme čekanja na uspostavu poziva $t=20$ s prikazani u Tablici 7.5. ukazuju na značajno povećanje kapaciteta primjenom predložene digitalne tehnologije u usporedbi s analognom tehnologijom. Analogna komunikacija na dupleks kanalu širine 25 kHz omogućuje 4 poziva uz ciljanu razinu usluge od 5% i 8 poziva uz razinu usluge 10%. Digitalna tehnologija koja koristi tri radna kanala i jedan kontrolni kanal na istoj širini frekvencijskog spektra ima kapacitet od 62, odnosno 79 poziva ovisno o razini usluge, što je za 15, odnosno 10 puta veći kapacitet u istoj širini frekvencijskog spektra kao i analogni sustav. Upotreba 7 radnih kanala povećava kapacitet na 240 (razina usluge 5%), odnosno 273 poziva (razina usluge 10%). Kapacitet sustava s 11 radnih kanala iznosi 445 poziva uz razinu usluge 5% i 487 poziva uz razinu usluge 10%.

Uz veće zahtjeve u pogledu kvalitete kada je vrijeme čekanja na uspostavu poziva $t=10s$ (Tablica 7.6.), sustav može podržati nešto manji broj poziva, ali je i tada vidljivo značajno povećanje kapaciteta. Usporedba performansi sustava uz vrijeme čekanja na uspostavu poziva $t=20$ s i $t=10$ s prikazana je na slici 7.15.



Slika 7.14. Usporedba performansi sustava s različitim vremenom čekanja na uspostavu poziva

Izvor: Izradio autor

7.3. Primjenjivost digitalnog sustava za izravne komunikacije među brodovima

U postojećem analognom VHF komunikacijskom sustavu za potrebe izravnih komunikacija među brodovima predviđeni su simpleks kanali, no način upotrebe simpleks kanala određuju nadležne ustanove pojedinih zemalja u skladu s njihovim potrebama. Pojedini simpleks kanali dodjeljuju se za potrebe komunikacija vezanih uz sigurnost navigacije za lučke vlasti, kontrolne centre itd., što smanjuje broj kanala koji se smiju koristiti za izravne komunikacije među brodovima. Predviđena podjela VHF područja na kanale širine 12,5 kHz uz analognu tehnologiju prijenosa udvostručuje broj simpleks kanala namijenjenih za izravne komunikacije brod-brod. Zahtjevna spektralna učinkovitost od 6,25 kHz može se postići dodatnim dijeljenjem frekvencijskog spektra što je također predviđeno od ITU organizacije u preporuci ITU-R M.1312.³² No, zadržavanje analogne tehnologije prijenosa signala uz sužavanje komunikacijskih kanala dovodi do snižavanja kvalitete signala, ali ne dovodi do poboljšanja sustava s gledišta uspostave veze i načina odvijanja komunikacija.

Uvođenje digitalne tehnologije za izravne komunikacije moguće je na sličan način kao i u dijelu sustava namijenjenom za komunikacije brod-kopno. Tehničke karakteristike (modulacija, struktura kanala, kodiranje...) bile bi identične, a s obzirom na nepostojanje kontrolne stanice u izravnim komunikacijama potrebno je uvođenje pozivnog kanala koji bi se koristio za izravne pozive između brodskih stanica. Uvođenje ovoga kanala zahtijeva uređaje koji imaju mogućnost istovremenog praćenja kontrolnog kanala obalnih radiostanica. Također, bilo bi potrebno predvidjeti određeni broj raspoloživih fizičkih kanala koji bi se koristili za obavljanje komunikacija. Zadržavanje TDMA strukture kanala omogućavalo bi dupleks komunikacije sa vremenskom raspodjelom (TDD) i za potrebe komunikacija brod-brod. S obzirom da dosadašnja analogna tehnologija omogućuje samo naizmjenične simpleks komunikacije između brodova (*semi-duplex*), uvođenje digitalne tehnologije s TDMA raspodjelom kanala predstavlja značajan napredak. Također, napredak je izražen i kroz tajnost komunikacija, jer druge stanice ne bi mogle preslušavati zauzeti kanal. Uzevši u obzir da se jedan fizički kanal širine 12,5 kHz koristi za dvosmjernu komunikaciju, ovim

³² Recommendation ITU-R M.1312, A Long Term Solution for Improved Efficiency in the Use of the Band 154-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service

načinom postiže se spektralna učinkovitost od 6,25 kHz, ali samo u slučaju komunikacija između dviju stanica. Kod smjera komunikacija jedna prema više stanica TDMA tehnologija ne osigurava zahtijevanu spektralnu učinkovitost jer jedan logički kanal ostaje neiskorišten. Prednost upotrebe digitalne tehnologije proizlazi i iz mogućeg korištenja kanala i za druge načine komunikacija, npr. prijenos podataka, a ne samo telefonske komunikacije.

Digitalni komunikacijski sustav s gledišta uspostave veze između brodskih stanica mogao bi se koristiti na dva načina. Prvi način mogao bi biti u kombinaciji s postojećim DSC uređajem koji se na VHF području smije upotrebljavati za rutinske pozive brod-brod. Drugi način upotrebe proizlazi iz novih mogućnosti koje pružaju digitalni komunikacijski sustavi i značajno olakšava postupak pozivanja i uspostave veze te je i odabran kao kvalitetnije rješenje i idejno razrađen na sljedećem primjeru.

Za primjer mogućeg korištenja dijela frekvencijskog spektra za predložene izravne komunikacije između brodova upotrebom digitalne tehnologije na VHF području odabrane su frekvencije simpleks kanala prema novoj raspodjeli sa širinama kanala od 12,5 kHz. Izvod odabranih kanala prikazan je u tablici 7.7. Od postojećeg kanala 10 u novom sustavu može se koristiti samo frekvencija 156.500 MHz, dok zbog blizine kanala 70 (DSC) frekvencija 156.5125 MHz (kanal 210) nije predviđena za upotrebu već kao zaštitni pojas. Kanal 10 proizvoljno je odabran za pozivni kanal koji bi se koristio za izravne pozive između brodskih stanica. Sve brodske stanice kada su u dometu obalne radiostanice pratile bi ovaj kanal kao i kontrolni kanal obalne radiostanice, a poželjno je da komunikacije kopno-brod imaju viši prioritet. Ostali kanali (npr. 8, 208, 68, 268, 9, 209, 69 i 269) koristili bi se kao fizički radni kanali. U slučaju direktne uspostave veze brod-brod, brodski uređaji bi se automatski odjavili iz komunikacijskog sustava obalne radiostanice, te bi se nakon završenog razgovora ponovo prijavili u sustav. Korištenja ovako definiranog protokola omogućuje obalnoj stanici efikasnu upotrebu resursa i dodatnu signalizaciju prema korisnicima sustava koji upućuju pozive trenutno zauzetim brodskim stanicama. Van dometa obalnih radiostanica digitalni VHF sustav koristio bi se samo za izravne komunikacije među brodovima.

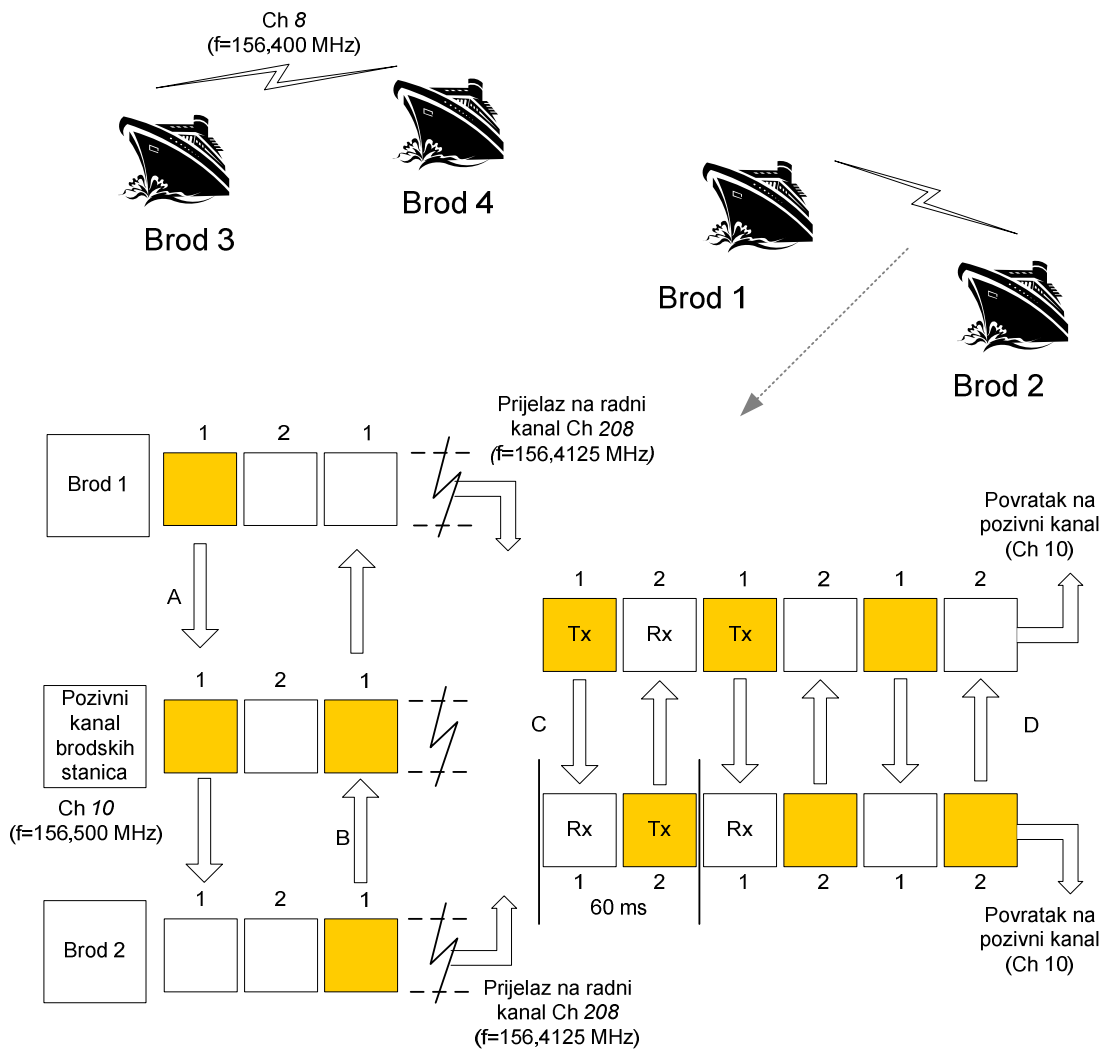
Tablica 7.7. Izvod simpleks kanala iz tablice numeracije kanala sa širinom 12,5 kHz

	CHANNEL NUMBER		SHIP	SHIP & COAST	COAST
First 25 kHz Channel	Interleaved 12.5 kHz Channel	Second 25 kHz Channel			
08				156.400	
	208			156.4125	
		68		156.425	
	268			156.4375	
09				156.450	
	209			156.4625	
		69		156.475	
	269			156.4875	
10				156.500	
	210			156.5125	DSC Guardband
		70		156.525	DSC Calling, distress & safety
	270			156.5375	DSC Guardband
11				156.550	
	211			156.5625	

Izvor: Izvod iz ITU-R M.1084, Interim Solutions for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service, ANNEX 4

Proračun potrebnog broja kanala moguće je također napraviti primjenom Erlang C modela, a za osam kanala i predviđeno vrijeme čekanja na uspostavu poziva $t=20$ s i iste pretpostavke kao i kod proračuna za potrebe obalnih radiostanica ($\lambda=1$ i $H=60$ s), sustav bi mogao podržati 290 stanica (poziva) uz razinu usluge 5%, 326 uz razinu usluge 10%, i 391 poziv uz razinu usluge 30%. Na slici 7.15. prikazan je primjer korištenja sustava za izravne komunikacije među brodovima, a radi jednostavnosti obrađen je slučaj kada se brodovi ne nalaze u području pokrivanja obalne radiostanice. U primjeru su navedena i dvije stanice 'Brod 3' i 'Brod 4' koje trenutno koriste jedan radni kanal (*Ch 8*). Praćenjem predviđenih radnih kanala stanica 'Brod 1' detektira postojanje slobodnog radnog kanala (*Ch 208*) i kada je i pozivni kanal slobodan (trenutak **A**) odašilje poziv prema stanici 'Brod 2' na pozivnom kanalu (*Ch 10*). Stanica 'Brod 2' potvrđuje poziv (trenutak **B**), nakon čega se uređaji obje stanice podešavaju na

dogovoreni radni kanal i oslobađaju pozivni kanal (trenutak C). Razgovor između dviju stanica obavlja se u potpunosti na radnom kanalu, a nakon prekida veze obje stanice oslobađaju radni kanal i prelaze na praćenje pozivnog kanal brodskih radiostanica (D).



Slika 7.15. Primjer telefonske komunikacije brod-brod u predloženom digitalnom komunikacijskom sustavu

Izvor: Izradio autor

7.4. Povezivanje digitalnog VHF sustava s GMDSS sustavom

Analiza mogućnosti upotrebe predloženog digitalnog komunikacijskog sustava na pomorskom VHF području temeljena je na pretpostavci istovremenog postojanja analognih i digitalnih komunikacija unutar istog frekvencijskog područja. Mogućnost uvođenja novih sustava u pomorstvu za potrebe sigurnosti broda i osoba zbog globalne rasprostranjenosti vrlo je zahtjevna. Primjena navedene tehnologije omogućuje istovremeno postojanje digitalnih i analognih komunikacija i ne zahtijeva redizajniranje komunikacijskih kanala. Za potrebe GMDSS sustava na VHF području koristi se DSC (*Digital Selective Call*) uređaj kojim je omogućeno brzo i automatizirano pozivanje (uzbunjivanje) na kanalu 70 (156,525 MHz), a za potrebe naknadnih komunikacija predviđena je upotreba kanala 16. Također je predviđena i upotreba kanala 6 i 13 za potrebe komunikacija između stanica koje sudjeluju u akcijama traganja i spašavanja. Na svim kanalima koji su važni za učinkovitost GMDSS sustava i dalje bi se morao zadržati postojeći način rada zbog ograničenja koja se javljaju primjenom digitalnih komunikacijskih sustava.

7.5. Prijedlog daljnje dogradnje sustava – projekcije budućeg razvoja

Glavna prednost uvođenja predloženog digitalnog komunikacijskog sustava u pomorsko VHF područje proizlazi iz kompatibilnosti postojeće i nove modulacijske tehnike, čime je ostavljena mogućnost upotrebe postojećih kanala, odnosno koegzistencija analognog i digitalnog komunikacijskog sustava na susjednim kanalima. Time se omogućava postupnost prijelaza na novi model, što je bitan faktor u pridobivanju podrške svih korisnika.

Ukratko, upotreba postojećih kanala ubrzala bi uvođenje novog sustava uz prenamjenu postojećih kanala. S obzirom na globalnu rasprostranjenost sustava potrebno je na međunarodnoj razini (ITU) definirati određeni broj kanala za potrebe komunikacija brod-kopno i brod-brod, te odrediti kontrolne kanale za obalne radiostanice i pozivni kanal za izravne komunikacije između brodskih stanica. Iz izračuna kapaciteta sustava provedenog u disertaciji vidljivo je značajno povećanje kapaciteta u usporedbi s postojećim komunikacijskim sustavom.

Dodatna je prednost predloženog modela što dozvoljava postupnu nadogradnju u više faza. U prvoj fazi bio bi dovoljan i manji broj kanala, a porastom prometa i oblika komunikacija, broj kanala za potrebe digitalnih komunikacija moguće je povećavati. Tome treba pridodati i prednosti novog sustava koje proizlaze iz izražene fleksibilnost u načinu upotrebe komunikacijskih kanala. Odnosno, u daljnjoj razradi sustava, komunikacijski kanali mogli bi se podijeliti s obzirom na količine podataka u prometu, razdijelivši ih na kanale koji služe za govorne komunikacije i prijenos podataka uz manje brzine te na kanale koji bi se omogućavali velike brzine prijenosa potrebne za prijenos veće količine podataka (internet promet).

Iskustva iz kopnenih digitalnih komunikacijskih sustava pokazuju da je njihova fleksibilnost u pogledu uvođenja novih vrsta usluga velika te je njihovo uvođenje pretežno određeno razvojem tržišta i zahtjevima korisnika.

U radu obrađena idejna rješenja digitalnih pomorskih VHF komunikacija ne pokrivaju potrebe svih vrsta stanica koje se u pomorstvu susreću. Daljnja razrada sustava pokrila bi i ostale vrste komunikacija i stanica poput komunikacija u sustavu nadzora plovidbe što bi otvorilo put prema novim primjenama sustava VHF komunikacija prilagođenih potrebama pomorstva. Jedan od mogućih načina primjene rezultirao bi i poboljšanjem sustava odašiljanja sigurnosnih informacija (vremenska prognoza, navigacijske obavijesti i upozorenja) u pismenom obliku, a također i preuzimanje podataka od strane brodskih stanica na zahtjev za lokalne vremenske prognoze koje su značajne za rekreacijska plovila.

S obzirom da je u GMDSS sustavu veliki broj zemalja implementirao pokrivanje područja plovidbe A1 upotrebom frekvencijskog VHF područja, već postoji infrastruktura koja bi se mogla nadograditi za potrebe novog digitalnog VHF komunikacijskog sustava. Time se značajno umanjuju troškovi uvođenja novog sustava. Nadalje, u usporedbi s GSM telefonskim sustavom, digitalni VHF komunikacijski sustav osigurao bi bolju pokrivenost područja uz manji broj baznih (obalnih) stanica. Kvaliteta komunikacija, jednostavnost upotrebe i vrste usluga prilagođene potrebama pomorstva čine digitalni VHF komunikacijski sustav boljim rješenjem u odnosu na ostale raspoložive komunikacijske tehnologije.

U konačnici, moguća je integracija brodskih VHF komunikacijskih uređaja s INMARSAT sustavom koja bi rezultirala izradom "inteligentnog" brodskog komunikacijskog sustava. Takva bi konfiguracija omogućavala automatski odabir adekvatnog komunikacijskog sustava u skladu s trenutnim položajem broda i pokrivenošću mrežom (s obzirom na domet frekvencijskog područja) u svrhu što efikasnijeg iskorištavanja frekvencijskog spektra čime se dodatno povećava iskorištenost kapaciteta.

8. Zaključak

Problem nedostatka komunikacijskih kanala na pomorskom VHF području intenzivirao je istraživanja za pronalaženje rješenja problema. Ova disertacija predstavlja doprinos istraživanju tehničkih i tehnoloških aspekata digitalizacije sustava pomorskih VHF komunikacija uvažujući pritom specifične potrebe sudionika u pomorskom prometu.

Povećanje broja komunikacijskih kanala u pomorskom VHF području moguće je načelno provesti na dva načina:

1. zadržavanjem analognih komunikacija mijenjanjem parametara modulacije,
2. uvođenjem spektralno učinkovitih digitalnih komunikacija.

Prva od navedenih metoda povećanja komunikacijskih kanala omogućava podjelu postojećeg frekvencijskog pojasa na veći broj kanala. No, u slučaju udvostručenja broja kanala, nije moguće postići poboljšanja u razinama pružanja usluge i načinu obavljanja komunikacija. Štoviše, promjene parametara modulacije, kojima se postiže smanjenje širine komunikacijskog kanala na 12,5 kHz, uzrokuju gubitak kvalitete govornog signala na prijemu. Utjecaj promjene parametara modulacije na kvalitetu signala potvrđen je metodom simulacije na modelu analognog komunikacijskog sustava. Daljnje povećanje broja kanala kojim bi se postigla propisana spektralna učinkovitost od 6,25 kHz uzrokovala bi dodatno opadanje kvalitete čime se povećava rizik gubitka informacije. Naime, kriteriji međunarodnih organizacija zahtijevaju postizanje visoke spektralne učinkovitosti, odnosno širine komunikacijskih kanala od 6,25 kHz neophodne za efikasno iskorištavanje frekvencijskog spektra.

S druge strane, postoje i prednosti zadržavanja analogne tehnologije. Na prvi pogled, prednosti su vidljive u povećanju kapaciteta komunikacijskog sustava bez značajnijih dodatnih ulaganja u opremu. No, čak uvažavajući argument jednostavnije, brže i jeftinije prilagodbe, ostaje problem da se udvostručenjem broja kanala problem nedostatnih kapaciteta rješava tek privremeno, što je istaknuto u trećem poglavlju kroz prikaz razvoja VHF komunikacija. Zaključak kojeg je moguće izvesti praćenjem povijesnog razvoja VHF komunikacija u pomorstvu je da su dosegnute granice rasta

sustava analognih pomorskih komunikacija te da je potrebno istražiti mogućnosti primjene alternativnih, digitalnih rješenja.

Predložak za analizu prednosti i slabosti digitalnih tehnologija prijenosa signala u disertaciji se izvodi iz iskustava kopnenih radiokomunikacijskih sustava budući da su se kopneni radiokomunikacijski sustavi razvijali iznimno brzo u proteklih dvadeset godina, uglavnom neopterećeni starijim tehnološkim rješenjima i ograničenjima regulatornih agencija kao što je slučaj u pomorstvu. Odnosno, u kopnenim radio komunikacijskim sustavima promjene su vidljive kako u pogledu brzog rasta kapaciteta (broja korisnika) tako i u porastu broja, odnosno vrsta usluga (prijenos podataka, dokumenata...). Dodatna zanimljivost kopnenih sustava očitava se i u njihovom komercijalnom karakteru. Dapače, upravo je eksponencijalni rast prometa za potrebe privatnih korisnika, odnosno komercijalizacija korištenja komunikacijskih mreža, generirao pojačan interes za ulaganja u istraživanje i razvoj.

Istraživanje za potrebe disertacije provedeno je kroz nekoliko sustavno povezanih faza (cjelina). Utvrđene su najprije karakteristike govornih signala radi odabira prikladnog načina kodiranja. Potom su ispitani i uspoređeni tehnički parametri šest kopnenih komunikacijskih sustava, te se na toj podlozi postavio idejni model digitalnog pomorskog VHF komunikacijskog sustava. Provedena je komparativna analiza kvalitete signala digitalnog sustava, postojećeg analognog sustava i alternativnog analognog sustava s udvostručenim brojem kanala. Izračunom kapaciteta potvrđena je temeljna hipoteza. S obzirom na predvidive zahtjeve uspostave predloženog rješenja i probleme koji se mogu očekivati pri planiranju procesa prijelaza, disertacija završava sistematizacijom prednosti i problema implementacije predloženog digitalne tehnologije.

Slijedeći preporuke ITU-a za istraživanja problematike povećanja broja kanala u pomorskom VHF području, u disertaciji su uvažavane preporuke za tehničke karakteristike uređaja, kodiranje govora, karakteristike prijenosnog medija, ocjenjivanje kvalitete signala, raspodjela frekvencijskih pojaseva te ostali parametri koji ograničavaju raspon mogućih rješenja problema preopterećenosti komunikacijskog sustava. Analize izložene u disertaciji fokusirane su na istraživanje ključnih odrednica

odvijanja komunikacijskog procesa koje bi trebale uslijediti u slučaju prihvaćanja digitalne tehnologije prijenosa informacija.

Saznanja o svojstvima govornih signala bitna su za odabir učinkovitog načina kodiranja govornih signala. Time se omogućuje sažimanje broja potrebnih bitova za prijenos digitaliziranog govornog signala uz postizanje visoke kvalitete reproduciranog signala na prijemu, koje je neophodno za postizanje visoke spektralne učinkovitosti od 6,25 kHz. Opisi svojstava govornih signala i načina kodiranja preuzeti su iz stručne tehničke literature koja pokriva problematiku digitalne obrade signala, a dostupna je prvenstveno putem specijaliziranih stručnih časopisa i izvornih istraživanja objavljenih putem interneta. Izvršena je usporedba karakteristika koder promatrajući relevantne parametre za ocjenu koder. Kao najpogodniji način kodiranja govornih signala za u disertaciji predloženi digitalni sustav pomorskih VHF komunikacija odabran je AMBE koder koji omogućuje visoku kvalitetu signala na prijemu uz istovremeno visoki stupanj kompresije i malo kašnjenje uzrokovano algoritmom kodiranja.

Nakon provedene analize odabranih digitalnih komunikacijskih sustava razvijenih za potrebe kopnenih službi, istražene su mogućnosti implementacije u sličnim sustavima u pomorstvu. Analiza postojećih načina upotrebe VHF komunikacija u pomorstvu provedena u drugom poglavlju ukazala je na probleme uvođenja novih komunikacijskih rješenja. Osnovni problem proizlazi iz globalne rasprostranjenosti pomorskog VHF sustava, ali i iz činjenice da se VHF područje koristi za komunikacije vezane uz situacije pogibelji, hitnosti i sigurnosti. Temeljem rezultata analize dobivenih u istraživanju, zaključeno je da je postupni model prijelaza na digitalni komunikacijski sustav najbolja opcija za projektiranje novog sustava, čime bi se omogućavalo istovremeno postojanje analognih komunikacija (trenutno u upotrebi) i novih digitalnih komunikacija na susjednim kanalima. Važan parametar kod izrade prijedloga novog digitalnog sustava također je i mogućnost korištenja postojećih komunikacijskih kanala čime se, s obzirom da nije potrebno novo dizajniranje kanala, pojednostavljuje postupak uvođenja.

Detaljnije, u disertaciji su uočena dva tehnološka rješenja iz kopnenih digitalnih komunikacijskih sustava koja bi svojim karakteristikama odgovarala ovdje zamišljenom modelu VHF digitalnih komunikacija u pomorstvu. Obje komunikacijske tehnologije, DMR (*Digital Mobile Radio*) i dPMR (*Digital Private Mobile Radio*), standardizirane su od ETSI organizacije, a omogućuju komunikacije posredstvom

baznih stanica i izravne veze između pokretnih stanica. Tehnologije su prepoznate od velikog broja proizvođača komunikacijske opreme, projekatana komunikacijskih sustava, regulatornih tijela te korisnika kao perspektivne tehnologije prilagođene postepenim prijelazima s analognih na digitalne komunikacijske sustave. Tehnologije, također, pružaju i relativno velike mogućnosti daljnjeg širenja sustava uz obuhvat velikog broja novih korisnika i mogućnost pružanja novih vrsta usluga. Obje imaju zahtijevanu spektralnu učinkovitost od 6,25 kHz, dPMR tehnologija izravno, a DMR tehnologija koristi fizičke kanale širine 12,5 kHz koji su TDM načinom razdijeljeni na dva logička kanala. Način korištenja kanala DMR tehnologije čini je pogodnom za dupleks komunikacije s vremenskom raspodjelom (TDD). Postojeći način dupleks komunikacija u VHF području s frekvencijskom raspodjelom (FDD) ograničen je samo na komunikacije brod-kopno i rjeđe je u upotrebi zbog značajno skupljih uređaja. Utoliko bi upotreba TDD tehnike u predloženom digitalnom komunikacijskom sustavu omogućila dupleks komunikacije i u smjeru brod-brod uz korištenje jednostavnijih uređaja što bi značilo veliki iskorak u povećanju kvalitete sustava.

Radi svih navedenih razloga prijedlog novog digitalnog VHF komunikacijskog sustava za potrebe pomorstva koji je odabran i razrađen u ovoj disertaciji temelji se na DMR tehnologiji.

Primjena predloženog digitalnog VHF komunikacijskog sustava u disertaciji ograničena je na dijelove komunikacijskog sustava za pokrivanje smjera brod-kopno i upotrebu za izravne komunikacije među brodskim stanicama.

U sklopu istraživanja razrađeni su scenariji komunikacija koji su poslužili kao podloga za razradu elemenata i procedura (tijeka procesa) predloženog modela. Prijedlog sustava za komunikacije posredstvom obalnih radiostanica temelji se na centraliziranom komunikacijskom sustavu s dodjelom kanala prema zahtjevu (*trunking protocol*) koji ima vrlo visoku efikasnost korištenja raspoloživih komunikacijskih kanala. Također, prijedlog sustava razrađen je prema teoriji redova čekanja upotrebom Erlang C modela u kojem sve stanice uz definiranu razinu usluge bivaju opslužene.

U disertaciji je ponuđeno i obrađeno idejno rješenje komunikacijskog sustava obalnih radiostanica za komercijalne potrebe u kojem bi brodskim stanicama bio omogućen automatski pristup u kopnene telekomunikacijske sustave. Predloženi digitalni sustav razrađen je na raspodjeli radnih kanala u centraliziranom sustavu, gdje bi jedan postojeći dupleks kanal širine 25 kHz primjenom predložene digitalne TDD

tehnologije omogućavao četiri dupleks kanala, od kojih jedan kontrolni i tri radna kanala. Među prednostima ponuđenog rješenja u odnosu na trenutni način obavljanja komunikacija posredstvom obalnih radiostanica, mogu se istaknuti usporedivost s kopnenim GSM mrežama, jednostavnost upotrebe sustava, mogućnost pozivanja brodova s kopna bez posredovanja operatora na obalnoj radiostanici, a svakako i rasterećenje DSC kanala 70 namijenjenog za pozive u GMDSS sustavu.

Također je na idejnoj razini analizirana mogućnost primjene predloženog digitalnog komunikacijskog sustava za izravne komunikacije među brodovima i razrađen je odgovarajući model. Rješenje se temelji na zadržavanju TDMA strukture kanala čime bi se omogućile dupleks komunikacije s vremenskom raspodjelom (TDD) za potrebe komunikacija brod-brod. S obzirom da dosadašnja analogna tehnologija omogućuje samo naizmjenične simpleks komunikacije između brodova (*semi-duplex*), uvođenje digitalne tehnologije s TDMA raspodjelom kanala predstavljalo bi značajan napredak. Idejno rješenje predviđa upotrebu jednog pozivnog kanala i određenog broja radnih kanala unutar kojih bi se automatski koristio prvi slobodni kanal. Predloženim rješenjem također se kao i u dijelu komunikacijskog sustava za potrebe obalnih stanica oslobađa DSC kanal 70. Za radne kanale u disertaciji su proizvoljno odabrana četiri postojeća simpleks kanala, što bi u novom digitalnom sustavu činilo raspoloživi resurs od osam dupleksnih radnih kanala.

Usporedba performansi klasičnog analognog i predloženog digitalnog komunikacijskog sustava izrađena je na podacima izračunatim prema Erlang C modelu koji se koristi za izračun kapaciteta komunikacijskih sustava dizajniranih prema *trunking* protokolu. Dobiveni rezultati potvrđuju **temeljnu hipotezu da je digitalni sustav sposoban povećati broj raspoloživih komunikacijskih kanala, uz održavanje zadovoljavajuće razine kvalitete informacije.**

Usporedba rezultata izračuna kapaciteta sustava pokazuje da bi se primjenom predloženog rješenja u istom frekvencijskom području koje zauzima jedan kanal kapacitet sustava povećao 15 odnosno 10 puta (ovisno o razini usluge) u odnosu na postojeći analogni sustav. Važno je napomenuti da se za razliku od analognog sustava u predloženom rješenju ne koristi DSC kanal 70. Iako na prvi pogled za izravne komunikacije među brodovima sustav pokazuje samo udvostručenje kapaciteta, proračun prema Erlang C modelu za koncepciju zamišljenog rješenja koja bi se mogla nazvati 'samoorganizirajući sustav' uz jedan pozivni i osam radnih kanala daje kapacitet

sustava od 290 stanica (poziva) uz razinu usluge 5% odnosno 326 uz razinu usluge 10%.

U disertaciji je, kako je u samom početku rada i navedeno, zbog sigurnosnih razloga predviđeno zadržavanje postojećeg načina obavljanja komunikacija za potrebe GMDSS sustava. Odabir prikladne digitalne tehnologije za izradu idejnog rješenja novog komunikacijskog sustava na pomorskom VHF području temelji se na pretpostavkama da je potrebno korištenje postojeće analogne i nove digitalne komunikacijske tehnologije.

Konačno, potrebno je naglasiti da bi za uspješna istraživanja i implementaciju digitalnih komunikacija u pomorskom VHF području, ITU organizacija morala osloboditi određeni broj postojećih kanala. Mogućnosti rasta broja usluga, kvalitete komunikacija i kapaciteta komunikacijskog sustava korištenjem digitalnih tehnologija vrlo su veliki, te bi prihvaćanje digitalne komunikacijske tehnologije u terestričkom dijelu sustava predstavljalo značajan iskorak u području pomorskih komunikacija.

Literatura

Knjige:

1. L. R. Rabiner, R. W. Schafer: Theory and Application of Digital Speech Processing; Prentice-Hall Inc., 2007.
2. L. R. Rabiner, R. W. Schafer: Introduction to Digital Speech Processing, Foundations and Trends in Signal Processing; Vol. 1, Nos. 1–2 (2007)
3. B. P. Lathi: Modern Digital and Analog Communications Systems; Oxford University Press, 1998.
4. L. Hanzo, F. C. Somerville, J. Woodard: Voice and Audio Compression for Wireless Communications, 2nd edition; John Wiley & Sons, 2007.
5. Ian Glover, Peter Grant: Digital Communications; Prentice Hall 2000.
6. John G. Proakis: Digital Communications, 4th Edition, McGraw-Hill 2001.
7. Vijay K. Madisetti, Douglas B. Williams (editors): Digital Signal Processing Handbook; CRCnetBASE, CRC Press LLC, 1999.
8. J. D. Parsons: The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd Edition; John Wiley & Sons Ltd, 2000.
9. Andreas Spanias, Ted Painter, Venkatraman Atti: Audio Signal Processing and Coding; John Wiley & Sons 2007.
10. Paul H. Young: Electronic Communication Techniques; Charles E. Merrill Publishing Co., A Bell & Howell Company, 1985.
11. P. P. Vaidyanathan: The Theory of Linear Prediction; Morgan & Claypool 2008.
12. Seigmund M. Redl, Matthias K. Weber, Malcolm W. Oliphant: GSM and Personal Communications Handbook; Artech House, 1998.
13. William Webb: The Complete Wireless Communications Professional: A Guide for Engineers and Managers; Artech House, 1999.
14. Randy Goldberg, Lance Riek: A Practical Handbook of Speech Coders; CRC Press, 2000.
15. Richard C. Dorf (editor): The Electrical Engineering Handbook; CRC Press LLC, 2000.
16. Anttalainen Tarmo: Introduction to Telecommunications Network Engineering, 2nd Edition; Artech House, 2003.
17. Wai C. Chu: Speech Coding Algorithms – Foundation and Evolution of Standardized Coders; John Wiley & Sons 2003.
18. Mike Golio (Editor): Microwave And RF Product applications; CRC Press 2003.

19. Hector Perez-Meana: *Advances in Audio and Speech Signal Processing: Technologies and Applications*; Idea Group Publishing, 2007.
20. Walter Fischer: *Digital Video and Audio Broadcasting Technology, A Practical Engineering Guide*, 2nd Edition; Springer-Verlag, 2008.
21. Stephen G. Wilson: *Digital Modulation and Coding*; Prentice Hall 1996.
22. Antti V. Räsänen & Arto Lehto: *Radio Engineering for Wireless Communication and Sensor Applications*; Artech House, INC. 2003.
23. Bernard Sklar: *Digital Communications Fundamentals and Applications*, 2nd Edition; Prentice Hall, 2001.
24. Devendra K. Misra: *Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits*; John Wiley & Sons Inc, 2001.
25. Ramjee Prasad & Marina Ruggieri: *Technology Trends in Wireless Communications*; Artech House, INC. 2003.
26. Simon R. Saunders, Alejandro Aragon-Zavala: *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, 2nd Edition; JohnWiley & Sons, 2007.
27. Thomas W. Rondeau, Charles W. Bostian: *Artificial Intelligence in Wireless Communications*; Artech House , 2009.
28. M. Mohan Sondhi, Juergen Schroeter: *Speech Production Models and Their Digital Implementations*, Part 44; Section X-Speech Processing; *Digital Signal Processing Handbook*, CRCnetBASE, 1999.

Članci:

1. Jan Skoglund: *Analysis and Quantization of Glottal Pulse Shapes*; *Speech Communication* 24 (1998.), 133-152.
2. V. Parsa , D. G. Jamieson: *Interactions Between Speech Coders and Disordered Speech*; *Speech Communication* 40 (2003.), 365–385.
3. L. A. Ekman, W. B. Kleijn and M. N. Murthi: *Regularized Linear Prediction of Speech*; *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, Vol. 16, No. 1, January 2008.
4. N. Awasthy, J. P. Saini and D. S. Chauhan: *Spectral Analysis of Speech: A New Technique*; *International Journal of Signal Processing*, Vol. 2, No. 1, 2005.
5. Sung-Wan Yoon , Hong-Goo Kang, Young-Cheol Park, Dae-Hee Youn: *An Efficient Transcoding Algorithm for G.723.1 and G.729A Speech Coders: Interoperability Between Mobile and IP Network*; *Speech Communication* 43, (2004.) 17–31.
6. Ari Heikkinen: *Development of a 4 kbit/s Hybrid Sinusoidal/CELP Speech Coder*; *Speech Communication* 42, (2004.), 353–371

7. Venkatraman Atti and Andreas Spanias: A Simulation Tool for Introducing Algebraic CELP (ACELP) Coding Concepts in a DSP Course; Frontiers in Education Conference, Boston, Massachusetts, 2002.
8. Tom Bäckström, Member, IEEE, and Paavo Alku: All-Pole Modeling Technique Based on Weighted Sum of LSP Polynomials; IEEE Signal Processing Letters, Vol. 10, No. 6, June 2003.
9. Dror Halahmi, Meir Feder: Quality versus Delay in Speech Coding
10. Edward Painter, Andreas Spanias: A MATLAB Software Tool for the Introduction of Speech Coding Fundamentals in a DSP Course; Proceedings of the Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE 1996.
11. Rong-San Lin, Jar-Ferr Yang and David Ho: Successive Bit-Vector Search Algorithm for CELP Vocoders; Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 26, No. 3, pp. 261-270 (2003.)
12. K. Krishna, V.L.N. Murty, K.R. Ramakrishnan: Vector Quantization of Excitation Gains in Speech Coding; Signal Processing 81, (2001.), 203-209.
13. Anil Ubale and Allen Gersho: A Multi-band CELP Wideband Speech Coder; IEEE 1997.
14. Bishnu S. Atal: The History of Linear Prediction; IEEE Signal Processing Magazine, March 2006.
15. C. Feijido, J. Ramos, F. Perez: A System for Fleet Management using Differential GPS and VHF Data Transmission Mobile Networks; IEEE - IEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference, Ottawa - VNIS '93.
16. Zhang Qin, Li Hai: An Efficient Timing and Frequency Synchronization Scheme for OFDM based TETRA Systems; IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications
17. M. Kondo, B. G. Evans: CELP Base-Band Coder for High Quality Speech Coding at 9,6 to 2,4 kbps; IEEE 1988.
18. Richard Dewey, Remi Sfez, Eric Pequet, Pierre Makowski, and Serge Raes: Design of the TETRA Mobile Radio Air Interface Protocol; Mobile and Personal Communications, 13 - 15 December 1993. Conference Publication No. 387, @ IEE 1993.
19. Min-soo Kang, Myung-Sun Song, Seung-Hyeub Oh: Design of Transceiver for TETRA in UHF Band; International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications, IEEE 2007.
20. Sandeep Chennakeshu and Gary J. Saulnier: Differential Detection of $\pi/4$ -Shifted-DQPSK for Digital Cellular Radio; IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 1, February 1993.
21. M.R. Suddle, A.M. Kondo, B.G. Evans: DSP Implementation of Low Bit-rate CELP Based Speech Coders; Digital Processing of Signals in Communications, IEEE 1991.
22. T J Moulisley and P W Elliott: Fast VQ-CELP - A Speech Coder for Mobile Radio; Mobile Radio and Personal Communications, IEEE 1991.

23. Ian Marwood: Global Deployment of TETRA and Market Developments; IEE PGE8 Event, IEE 2000.
24. N.E. Rittas, A.G. Asimakopoulos, P. Constantinou, P. I. Polydoros, D.G. Xenikos: Path Loss Model for TETRA Networks in Metropolitan Areas; Computers and Communications, IEEE 2004. Proceedings. ISCC 2004.
25. Fernando Gutierrez, Antonio Valdovinos: Performance Of Channel Coding Techniques For The Digital Mobile Radio System Tetra; Vehicular Technology Conference, IEEE 1997.
26. Richard Dewey and Yuk Tong Lee: Performance Studies of the TETRA Mobile Radio System; Vehicular Technology Conference, 1996. 'Mobile Technology for the Human Race', IEEE
27. D. I. Axiotis, D. Xenikos: On the Effects of Short Data Service-Transport Layer Message Length in QoS Metrics of TETRA Networks; The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07), IEEE 2007.
28. Armando Annunziato, Davide Sorbara: Radio Performance of Logical Channels Defined In Tetra Standard; Vehicular Technology Conference, IEEE 1997.
29. R. W. Schafer, L. R. Rabiner: Digital Representations of Speech Signals; Proceedings of the IEEE, Vol. 63, No. 4, April 1975.
30. John R. Renner: VHF Maritime Mobile Communications: A Systems Approach to Serving User Requirements; IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-25, No. 4, August 1977.
31. M. Jelinek and J. P. Adoul: Frequency-domain Spectral Envelope Estimation for Low Rate Coding of Speech; Proceedings of the Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE 1999.

Preporuke međunarodnih organizacija:

1. ITU-R Recommendation M.489: Technical Characteristics of VHF Radiotelephone Equipment Operating in the Maritime Mobile Service in Channels Spaced by 25 kHz, 1995.
2. ITU-R Recommendation M.626: Evaluation of the Quality of Digital Channels in the Maritime Mobile Service, 1986.
3. ITU-R Recommendation M.1084: Interim Solutions for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service, 2001.

4. ITU-R Recommendation M.1312: A Long Term Solution for Improved Efficiency in the Use of the Band 156-174 MHz by Stations in the Maritime Mobile Service, 1997.
5. ITU-R Recommendation P.370: VHF and UHF Propagation Curves for the Frequency Range from 30 MHz to 1 000 MHz, 1995.
6. ITU-R Recommendation P.1143: Guide to the Application of the Propagation Methods of Radio Communication Study Group 3, 2001.
7. ITU-T Recommendation G.711: Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies, 1988.
8. ITU-T Recommendation G.712: Transmission Performance Characteristics of Pulse Code Modulation Channels, 1996.
9. ITU-T Recommendation G.728: Coding of Speech at 16 kbit/s Using Low-delay Code Excited Linear Prediction, 1992.
10. Appendix II to ITU-T Recommendation G.728: Speech Performance, 1995.
11. ITU-T Recommendation G.729: Coding of Speech at 8 kbit/s Using Conjugate-structure Algebraic Code Excited Linear Prediction, 1996.
12. Report ITU-R M.2014: Spectrum Efficient Digital Land Mobile Systems for Dispatch Traffic, 1998.
13. ETSI TS 101 329-5 V1.1.1 (2000-11) -*Technical Specification: TIPHON Release 3; Technology Compliance Specification; Part 5: Quality of Service (QoS) Measurement Methodologies*; European Telecommunications Standards Institute 2000.
14. ETSI Technical Report ETR 300-1: Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Designers' guide; Part 1: Overview, technical description and radio aspects; European Telecommunications Standards Institute 1997.
15. ETSI Technical Report ETR 300-2: Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Designers' guide; Part 2: Radio channels, network protocols and service performance; European Telecommunications Standards Institute 1997.
16. ETSI Technical Report ETR 300-3: Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Designers' guide Part 3: Direct Mode Operation (DMO); European Telecommunications Standards Institute 2000.
17. ETSI Technical Report ETR 300-4: Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V + D); Designers' guide; Part 4: Network management; European Telecommunications Standards Institute 1997.
18. ETSI Technical Report ETR 300-5: Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Designers' guide; Part 5: Dialling and addressing; European Telecommunications Standards Institute 1998.
19. ETSI EN 300 113-1 Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Land mobile service; Radio equipment intended for the transmission of data (and/or speech) using constant or non-constant envelope modulation and having an antenna connector; Part 1: Technical characteristics and methods of measurement; European Telecommunications Standards Institute 2006.

20. ETSI TS 102 361-1: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol; European Telecommunications Standards Institute 2007.
21. ETSI TS 102 361-2: Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 2: DMR voice and generic services and facilities, European Telecommunications Standards Institute 2007.
22. ETSI TS 102 361-3: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 3: DMR data protocol; European Telecommunications Standards Institute 2007.
23. ETSI TS 102 361-4: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 2: DMR data protocol; European Telecommunications Standards Institute 2007.
24. TS 102 361-4: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 4: DMR trunking protocol; European Telecommunications Standards Institute 2007.
25. TS 102 398: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) General System Design; European Telecommunications Standards Institute 2008.
26. ETSI TS 102 658 V2.1.1 Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Private Mobile Radio (dPMR) using FDMA with a channel spacing of 6,25 kHz; European Telecommunications Standards Institute 2010.
27. ETSI EN 300 392-2 European Standard (Telecommunications series): Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI)"; European Telecommunications Standards Institute 2007.
28. ETSI EN 300 395-1 European Standard (Telecommunications series): Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Speech codec for full-rate traffic channel; Part 1: General description of speech functions; European Telecommunications Standards Institute 2005.
29. ETSI EN 300 395-2 European Standard (Telecommunications series): Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Speech codec for full-rate traffic channel; Part 2: TETRA codec; European Telecommunications Standards Institute 2005.
30. ETS 300 396-1: Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Technical requirements for Direct Mode Operation (DMO); Part 1: General network design; European Telecommunications Standards Institute 1998.
31. ETSI EN 300 396-3 European Standard (Telecommunications series): Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Technical requirements for Direct Mode Operation (DMO); Part 3: Mobile Station to Mobile Station (MS-MS) Air Interface (AI) protocol; European Telecommunications Standards Institute 2006.
32. COMSAR 11/WP.2: Replacements for use of NBDP (Radio Telex) for maritime distress and safety communications in maritime MF/HF bands, 21 February 2007.

Ostalo:

1. C. C. Chu, P. Kabal: Codebook Excited Linear Prediction of Speech: Performance in the Presence of Channel Errors; Rapport technique de l'INRS Telecommunications-Canada, March 1988.
2. P. Kabal: Code Excited Linear Prediction Coding of Speech at 4.8 kb/s; Rapport technique de l'INRS-Telecommunications no. 87-36, 1987.
3. Peter Kabal: Time Windows for Linear Prediction of Speech; Telecommunications and Signal Processing Laboratory – Technical report, Canada, 2005.
4. Daniel W. Griffin: Multi-Band Excitation Vocoder; RLE Technical Report No. 524, March 1987, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA
5. NTIA Report 08-451: Assessment of Alternative Future Land Mobile Radio Systems; technical report, U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, December 2007.
6. NTIA Report 01-386: Voice Quality Assessment of Vocoders in Tandem Configuration; U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, April 2001.
7. MPT 1318 Engineering Memorandum: Trunked Systems in the Land Mobile Radio Service; Radiocommunications Agency-Mobile Services Section, London, 1994.
8. István Z. Kovács: Radio Channel Characterisation for Private Mobile Radio Systems; Ph.D. Thesis, Center For Person Kommunikation, Aalborg University, 2002.
9. Z. Mrak: Prilog povećanju broja komunikacijskih kanala na pomorskom VHF području; Magistarski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2007.
10. Lloyd's Register of Shipping, Statistical Tables: World fleet statistics; 2008.
11. State of the Art Voice Quality Testing; White Paper by OPTICOM GmbH, Germany, 2000.
12. Sami Lemmetty: Review of Speech Synthesis Technology; Master's Thesis, Helsinki University of Technology, 1999.
13. Comparisons of Conventional and Trunked Systems; Report for SAFECOM (Emergency Communications Program of the Department of Homeland Security's USA), May 1999.
14. The Effect of Bandwidth on Speech Intelligibility, POLYCOM 2003. (White paper)
15. "Mc Squared System Design Group, Inc: Design for Speech Intelligibility", <http://www.mcsquared.com/speech.htm>
16. Digital Voice Systems, Inc. (DVSI): <http://www.dvsinc.com/>
17. Fylde Micro Ltd: <http://www.fyldemicro.com/>

Popis slika

Slika 3.1.	Pomorsko VHF područje iz 1952. godine.	15
Slika 3.2.	Raspodjela pomorskog VHF područja na konferenciji u Hagu 1957.	16
Slika 3.3.	Prikaz susjednih kanala na VHF području.....	20
Slika 3.4.	Ukupni broj registriranih brodova u svijetu većih od 100 GT.....	21
Slika 4.1.	Simulacijski model prilagođen za ulazni govorni signal	26
Slika 4.2.	Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.1. i 4.2.	29
Slika 4.3.	Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.3. i 4.4.	30
Slika 4.4.	Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.5. i 4.6.	31
Slika 4.5.	Usporedni prikaz rezultata iz tablica 4.7. i 4.8.	32
Slika 5.1.	Spektar frekvencija govornih signala	38
Slika 5.2.	Odnos količine informacija i kvalitete signala za osnovne načine kodiranja govornih signala.....	40
Slika 5.3.	Utjecaj tehnike kodiranja na kvalitetu govornih signala kod digitalnih komunikacijskih sustava.....	42
Slika 5.4.	Utjecaj brzine uzimanja uzoraka i smetnji na govorne signale	43
Slika 5.5.	Shematski prikaz govornog trakta	44
Slika 5.6.	Valni oblik, spektrogram i frekvencijski spektar signala	47
Slika 5.7.	Dvodimenzionalni model govornog trakta	48
Slika 5.8.	Pojednostavljeni digitalni model govornog sustava	51
Slika 5.9.	Model analize govornog signala	53
Slika 5.10.	Odabrani segment govornog signala pomoću Hamming-ovog vremenskog otvora	54
Slika 5.11.	Ovisnost dobitka predviđanja i kvalitete signala na prijemu o redu filtera	57
Slika 5.12.	Prijenosne karakteristike filtra govornog trakta i spektra govornog signala.....	58
Slika 5.13.	Ovisnost dobitka predviđanja i kvalitete signala na prijemu o veličini uzorka.....	59
Slika 5.14.	Model LTP filtra	60
Slika 5.15.	Utjecaj LTP filtra na signal pogreške	61
Slika 5.16.	Kodiranje analizom pomoću sinteze signala	62
Slika 5.17.	Model analize govornog signala u CELP koderu	63
Slika 5.19.	Usporedba prijenosne karakteristike govornog trakta i osjetilno ponderiranog filtra.....	64

Slika 5.18.	Osnovni koncept CELP koderana.....	65
Slika 5.19.	Osnovni koncept CELP dekodeera.....	66
Slika 6.1.	Funkcijska struktura TETRA V+D sustava.....	70
Slika 6.2.	Opća konfiguracija 'Project 25' sustava.....	72
Slika 6.3.	Osnovni model EDACS sustava.....	74
Slika 6.4.	Glavne komponente DIMRS sustava.....	76
Slika 6.5.	Osnovna konfiguracija centraliziranog komunikacijskog sustava sa dodjelom kanala na zahtjev (<i>Trunking Network</i>)	78
Slika 6.6.	Idejna struktura DMR mreže	79
Slika 6.7.	Prikaz dPMR sustava za izravne komunikacije.....	81
Slika 6.8.	Osnovni prikaz centraliziranog dPMR sustava.....	81
Slika 7.1.	Prijenosna karakteristika "raised cosine" filtra.....	86
Slika 7.2.	Utjecaj filtra na signal.....	87
Slika 7.3.	Spektralna analiza 4FSK moduliranog signala.....	88
Slika 7.4.	TDMA okvir s dva logička kanala.....	89
Slika 7.5.	Maska izlazne snage predajnika za odašiljanje vremenskog okvira.....	90
Slika 7.6.	Struktura logičkog kanala	91
Slika 7.7.	Način rada MBE koderana	93
Slika 7.8.	Način rada MBE dekodeera.....	94
Slika 7.9.	Ocjena kvalitete signala koderana	95
Slika 7.10.	Ocjena kvalitete signala koderana	96
Slika 7.11.	Prijedlog idejnog koncepta digitalnog komunikacijskog sustava obalnih radiostanica	100
Slika 7.12.	Primjer telefonske komunikacije brod-kopno u predloženom digitalnom komunikacijskom sustavu	102
Slika 7.13.	Ovisnosti razine usluge o opterećenju po jednom kanalu (<i>a</i>) uz parametre $t=20$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s	106
Slika 7.14.	Ovisnosti razine usluge o opterećenju po jednom kanalu (<i>a</i>) uz parametre $t=10$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s	107
Slika 7.14.	Usporedba performansi sustava sa različitim vremenom čekanja na uspostavu poziva	109
Slika 7.15.	Primjer telefonske komunikacije brod-brod u predloženom digitalnom komunikacijskom sustavu	113

Popis tablica

Tablica 3.1. Pomorsko VHF područje	18
Tablica 4.1. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav; uzorak muški glas 1	29
Tablica 4.2. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav; uzorak muški glas 1	29
Tablica 4.3. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav; uzorak muški glas 2	30
Tablica 4.4. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav; uzorak muški glas 2.....	30
Tablica 4.5. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav; uzorak ženski glas 1	31
Tablica 4.6. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav; uzorak ženski glas 1	31
Tablica 4.7. Rezultati ocjene kvalitete za postojeći komunikacijski sustav; uzorak ženski glas 2.....	32
Tablica 4.8. Rezultati ocjene kvalitete za alternativni komunikacijski sustav; uzorak ženski glas 2.....	32
Tablica 4.9. Rezultati analize za postojeći komunikacijski sustav	33
Tablica 4.10. Rezultati analize za alternativni komunikacijski sustav	34
Tablica 5.1. Jačina i učinak zvučnih valova	37
Tablica 5.2. Rezultati mjerenja spektralne analize govornih signala	39
Tablica 5.3. Ukupna količina i raspodjela bitova po segmentu za GSM AMR ACELP koder	67
Tablica 7.1. Mapiranje simbola i iznosi devijacije frekvencije	85
Tablica 7.2. Usporedba IMBE i osnovnog AMBE algoritma.....	95
Tablica 7.3. Usporedba kodera	95
Tablica 7.4. Izvod iz tablice numeracije kanala sa širinom 12,5 kHz	101
Tablica 7.5. Rezultati izračuna Erlang C modela uz parametre $t=20$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s.....	107
Tablica 7.6. Rezultati izračuna Erlang C modela uz parametre $t=10$ s, $\lambda=1$ i $H=60$ s.....	108
Tablica 7.7. Izvod simpleks kanala iz tablice numeracije kanala sa širinom 12,5 kHz.....	112