

Dr. sc. Zoran Mrak / Ph. D.
Sanjin Valčić, mag. ing.
Dr. sc. Jasminka Bonato / Ph. D.
Sveučilište u Rijeci / *University of Rijeka*
Pomorski fakultet u Rijeci /
Faculty of Maritime Studies Rijeka
Studentska 2, 51000 Rijeka
Hrvatska / *Croatia*

Izvorni znanstveni rad
Original scientific paper

UDK / *UDC*:
621.396.932
656.61

Primljeno / *Received*:
12. listopada 2012. / *12th October 2012*
Odobreno / *Accepted*:
13. studenoga 2012. / *13th November 2012*

USPOREDBA KVALITETE SIGNALA POSTOJEĆEG I ALTERNATIVNOG POMORSKOG VHF KOMUNIKACIJSKOG SUSTAVA

COMPARISON OF SIGNAL QUALITY OF PRESENT AND ALTERNATIVE MARITIME VHF COMMUNICATION SYSTEMS

SAŽETAK

U radu je provedena analiza postojećeg širokopolasnog i alternativnog uskopojasnog komunikacijskog sustava pomorskih VHF radiotelefonskih komunikacija, zasnovanih na simulacijskom modelu. Alternativni sustav predložen je od strane ITU organizacije kao jedno od mogućih rješenja problema nedostatka komunikacijskih kanala u pomorskom VHF području. Pomoću računalnih simulacijskih modela ispitan je utjecaj promjene modulacijskog postupka u pomorskim VHF radiotelefonskim komunikacijama na kvalitetu prenesene informacije, uvažavajući sve relevantne tehničke karakteristike pomorskih VHF radiotelefonskih uređaja. Postupak ocjenjivanja kvalitete govornih signala proveden je uz pomoć tehnologije objektivnog ocjenjivanja kvalitete upotrebom računalnog programa koji provodi PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality Measurement) algoritam čime je osigurana usporedivost dobivenih rezultata s tradicionalnim subjektivnim načinom ocjenjivanja kvalitete signala. Postupak ocjenjivanja kvalitete proveden je upotrebom četiri standardizirana uzorka govornih signala s različitim utjecajem vanjskih smetnji na komunikacijski kanal. Analiza dobivenih rezultata potvrđuje mogućnost korištenja alternativnog komunikacijskog sustava.

Ključne riječi: *pomorske VHF komunikacije, uskopojasna modulacija, kvaliteta signala, PESQ*

SUMMARY

This paper presents an analysis, based on the simulation model, of the existing broadband and alternative narrowband maritime VHF radiotelephone communication systems. The alternative system proposed by the ITU organization is one of the possible solutions to the lack of communication channels in the maritime VHF bands. The influence of changes in the modulation process on the quality of information in the maritime VHF radiotelephone communications is examined using a computer simulation model taking into account all the relevant technical characteristics of maritime VHF radiotelephone equipment. The process of evaluating the quality of speech signals was carried out by means of an objective quality assessment technology using a computer program that implements PESQ algorithm which ensures the comparability of obtained results with the traditional method of subjective evaluation of signal quality. The process of quality assessment was conducted using four standardized sample voice signals with different influences of external interference on the communication channel. Analysis of the results confirms the possibility of using alternative communication systems.

Key words: *maritime VHF communications, narrowband modulation, signal quality, PESQ*

1. UVOD

Porast pomorskog prometa potaknut globalizacijom i posljedičnim rastom trgovine roba i putnika, nameće traganje za novim tehničkim rješenjima kojima je moguće prilagoditi sustave pomorskih komunikacija stalno rastućem broju korisnika, te porastu broja poruka i u njima sadržanih informacija.

Unatoč uvođenju satelitskog komunikacijskog sustava INMARSAT, koji je na sebe 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 već zahtijevaju od međunarodnih organizacija IMO i ITU povećanje broja komunikacijskih kanala na VHF području.

Dosadašnja istraživanja vezana uz efikasnije iskorištavanje frekventijskog spektra, odnosno uz mogućnosti povećavanja broja komunikacijskih kanala mogu se razdijeliti u dvije skupine. Prva skupina istraživanja odnosi se na smanjenje širine komunikacijskih kanala primjenom novih metoda modulacije [8], dok se druga skupina istraživanja bavi mogućnostima uvođenja digitalnog prijenosa analognih informacija radi povećanja broja komunikacijskih kanala [9].

U radu je analizirana i obrađena moguća primjena analogne uskopojasne fazne modulacije (engl. *Narrow Band Phase Modulation* – NBPM) u frekventijskom području pomorskih VHF komunikacija. Analiza je provedena kroz sljedeće faze: izrada simulacijskog modela, prijenos govornog signala simulacijskim modelom i objektivno ocjenjivanje kvalitete govornih signala uz različite odnose signala i šuma (engl. *Signal to Noise Ratio* – SNR) u komunikacijskom kanalu.

Za potrebe simulacije komunikacijskih sustava, korišten je računalni simulacijski program *SystemView* korporacije ELANIX, koji omogućava simuliranje analognih i digitalnih komunikacijskih uređaja, teoretskih modela kao i kompletnih komunikacijskih sustava. Za potrebe objektivnog ocjenjivanja kvalitete govornih signala korišten je algoritam (računalni program) PESQ (*Perceptual Evaluation of Speech Quality Measurement*), kojeg su za organizaciju ITU izradile kompanije *Psytechnics* i *Opticom* [14].

1 INTRODUCTION

The increase in maritime traffic driven by globalization and the resulting growth in trade of goods and passengers imposes the search for new technical solutions that can be adapted to maritime communications systems having a constant increase in the number of users, and the number of messages and information they contain.

Despite the introduction of INMARSAT satellite communications system, which took upon itself a significant part of the communication needs of ships in performing commercial communications, due to its limitations, there is still the need for the use of terrestrial communication systems, particularly VHF. Countries with increased vessel traffic have already requested for an increase in the number of communication channels in the VHF band from international organizations IMO and ITU.

Previous research related to the efficient use of the frequency spectrum, i.e. the possibility of increasing the number of communication channels can be divided into two groups. The first group of studies relates to the reduction of communications channels bandwidth of using new modulation methods [8], while the second group deals with the possibilities of introducing digital transmission of analog information in order to increase the number of communication channels [9].

The paper analyses the possibility of implementing the analog narrowband phase modulation (NBPM) in maritime VHF communications. The analysis included the following: development of the simulation model, transmission of the speech signal through the simulation model and an objective evaluation of the quality of speech signals with different values of the signal-to-noise ratio (SNR) in the communication channel.

The computer simulation software *SystemView* from ELANIX corporation was used for the simulation of communication systems. This chosen software allows the simulation of analog and digital communication devices, theoretical models and complete communication systems. For the purposes of objective quality assessment of speech signals, the authors used the algorithm (computer program) PESQ (*Perceptual Evaluation of Speech Quality Measurement*), developed for the ITU organization by *Psytechnics* and *Opticom* companies [14].

2. RADIOTELEFONSKE KOMUNIKACIJE U POMORSKOM VHF PODRUČJU

Postojeći i alternativni uskopojasni komunikacijski sustavi propisani su tehničkim karakteristikama uređaja u preporukama ITU organizacije [8] i [10].

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

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

Potrebna širina komunikacijskog kanala izračunana pomoću Carssonovog pravila iznosi:

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

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

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_{i \max}} = 0,833334. \quad (3)$$

Potrebna širina komunikacijskog kanala prema Carssonovom pravilu iznosi:

$$B_{PM} = 2f_{i \max}(\beta + 1) = 11 \text{ kHz}. \quad (4)$$

Kod kutnih modulacija dobivaju se određena poboljšanja kod odnosa signal-šum na prijemnoj strani, koja su ovisna o indeksu modulacije β . Poboljšanja su izražena kroz odnos signal-šum nakon demodulacije SNR_o (engl. *Signal to Noise Ratio-Output*) i odnos signal-šum u komunikacijskom kanalu SNR_c (engl. *Signal to Noise Ratio-Channel*).

Odnos signal-šum nakon demodulacije je za frekvencijski modulirane signale određen jednadžbom [1]:

2 RADIOTELEPHONY COMMUNICATIONS IN THE MARITIME VHF BAND

The technical characteristics of the equipment for the existing and alternative narrow-band communication systems are regulated by ITU through recommendations under [8] and [10].

Existing radiotelephone communications in VHF band use phase modulation, i.e. frequency modulation with pre-emphasis of information signal by 6dB per octave. The modulation is described with a maximum deviation of carrier frequency of 5 kHz, and maximum information frequency of 3 kHz. These parameters describe modulation index, i.e. the maximum phase deviation in radians:

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

The required bandwidth of the communication channel is calculated using Carsson's rule:

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

The alternative communication system uses narrow-band phase modulation with a maximum deviation of a carrier frequency of 2.5 kHz and a maximum information frequency of 3 kHz. The modulation index or the maximum deviation of the transmission signal phase, in radians, in this case is:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_{i \max}} = 0,833334. \quad (3)$$

The necessary bandwidth of the communication channel according to Carsson's rule is:

$$B_{PM} = 2f_{i \max}(\beta + 1) = 11 \text{ kHz}. \quad (4)$$

The angle modulation systems offer some improvements in signal-to-noise ratio at the receiver side, depending on the modulation index β . Improvements are expressed as the relation of signal-to-noise ratio after demodulation SNR_o (Signal to Noise Ratio-Output) and the signal-to-noise in the communication channel SNR_c (Signal to Noise Ratio-Channel).

Signal-to-noise ratio after demodulation for frequency-modulated signal is determined by the equation [1]:

$$SNR_O = \frac{3}{2} \cdot \beta^2 \cdot SNR_C \cdot \frac{B_{FM}}{f_{i_{max}}} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{SNR_C} + \frac{2}{SNR_C^2} + \frac{3}{SNR_C^3} \dots} \right] \quad (5)$$

Navedena jednačba opisuje krivulju, koja ima karakterističan nelinearni dio pri malim vrijednostima SNR_C (do približno 10 dB) te linearni dio koji predstavlja prihvatljivi odnos SNR_C .

Temeljem Carsonovog pravila za izračun širine frekvencijskog spektra za kutno modulirane signale i uz zanemarivanje izraza u zagradi iz prethodne jednačbe pri velikim vrijednostima SNR_C , poboljšanje za faznomodulirane signale iznosi:

$$SNR_O = \beta_{PM}^2 \cdot (\beta_{PM} + 1) \cdot SNR_C, \quad (6)$$

tj. odnos SNR_O / SNR_C izražen u decibelima:

$$\frac{SNR_O}{SNR_C} = 10 \cdot \log[\beta_{PM}^2 \cdot (\beta_{PM} + 1)]. \quad (7)$$

$$SNR_O = \frac{3}{2} \cdot \beta^2 \cdot SNR_C \cdot \frac{B_{FM}}{f_{i_{max}}} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{SNR_C} + \frac{2}{SNR_C^2} + \frac{3}{SNR_C^3} \dots} \right] \quad (5)$$

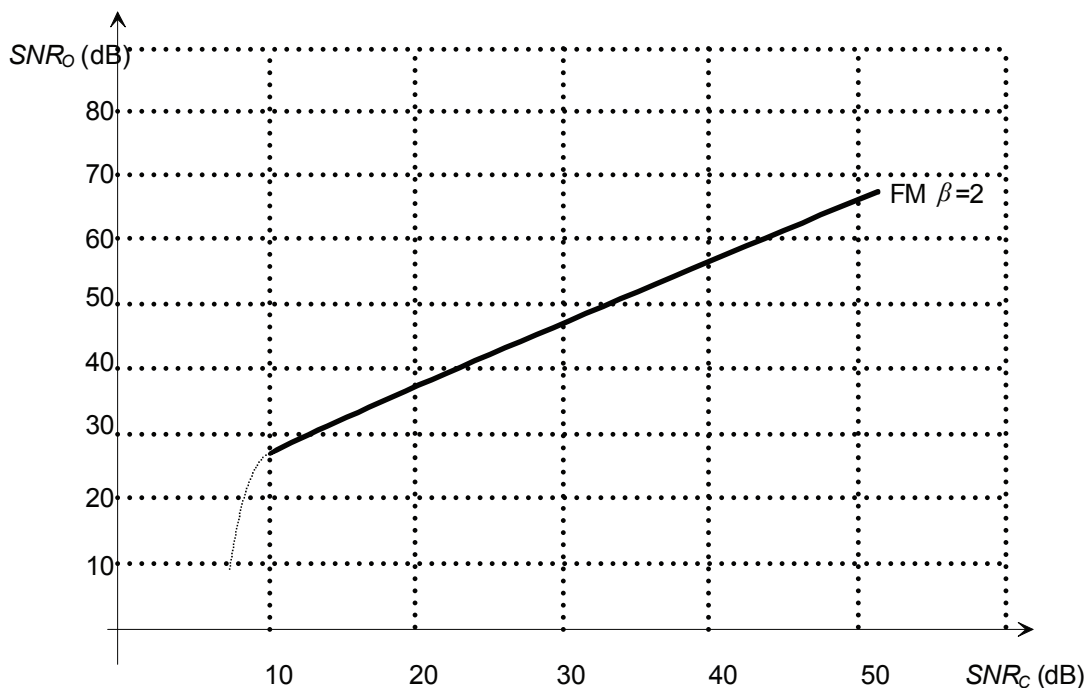
The above equation describes a curve, which has a distinctive non-linear part at low values SNR_C (approximately 10 dB), and the linear part representing an acceptable ratio of SNR_C .

Based on the Carson's rule for calculating the bandwidth of the frequency spectrum of angle-modulated signals and by ignoring the term in brackets in the previous equation at large values of SNR_C , the improvement of phase modulated signals is:

$$SNR_O = \beta_{PM}^2 \cdot (\beta_{PM} + 1) \cdot SNR_C, \quad (6)$$

and the relation SNR_O / SNR_C expressed in decibels:

$$\frac{SNR_O}{SNR_C} = 10 \cdot \log[\beta_{PM}^2 \cdot (\beta_{PM} + 1)]. \quad (7)$$



Slika 1. Ovisnost SNR_O i SNR_C uz $\beta = 2$
 Figure 1 SNR_O i SNR_C dependency with $\beta = 2$

Izvor / Source: Autori / Authors

Kako je poboljšanje u odnosu SNR_o / SNR_c ovisno o indeksu modulacije i izračunava se prema izrazu $SNR_o = \beta^2 \cdot (\beta + 1) \cdot SNR_c$, za postojeći sustav uz $\beta=1,66667$ iznosi 7,4 dB, dok za alternativni sustav uz $\beta=0,833334$ iznosi svega 1,27 dB. Budući da je kod analognih modulacija glavni uzrok degradacije kvalitete komunikacija odnos signal/šum, kod predložene uskopojasne modulacije, kvaliteta signala na prijemu bit će lošija u odnosu na postojeći komunikacijski sustav.

Postojeći radiotelefonski sustav koristi komunikacijske kanale širine 25 kHz, dok bi upotreba alternativnog sustava koji bi koristio komunikacijske kanale širine 12,5 kHz omogućila udvostručenje broja komunikacijskih kanala.

Kvaliteta signala na prijemu ovisi također o selektivnosti prijemnika koja za oba sustava iznosi 70 dB u odnosu na susjedne kanale.

3. METODE ISPITIVANJA KVALITETE GOVORNIH KOMUNIKACIJA

U analognim govornim radiokomunikacijama do gubitka kvalitete govornog signala (*speech quality*) koja se odražava na razumljivost poruke (*speech intelligibility*) dolazi uglavnom utjecajem šumova na elektromagnetske valove u komunikacijskom kanalu kao i u primopredajnim uređajima. Navedene pojave moguće je ublažiti odabirom odgovarajuće vrste modulacije te povećanjem izlazne snage predajnika.

Kvaliteta komunikacija je u posljednjih desetak godina postala ključan faktor kod dizajniranja komunikacijskih sustava, ali i u njihovoj eksploataciji. Za potrebe testiranja kvalitete govornih (telefonskih) komunikacija ITU je razradio dva načina ispitivanja: subjektivno [13] i objektivno testiranje [14].

Subjektivno testiranje provodi se anketiranjem 20 do 50 osoba koje ocjenjuju kvalitetu primljene informacije bez uvida u originalni signal. Postoji niz subjektivnih testova, od kojih je testiranje jednosmjernih ili naizmjenično dvosmjernih veza (engl. *Absolute Category Rating* – ACR) najčešće upotrebljavan test, a provodi se tako da svaka osoba daje svoje mišljenje o kvaliteti signala ocjenom od 1 do 5 (Tablica 1), te se statističkom obradom rezultata generira ukupna srednja ocjena kvalitete MOS (engl.

As the improvement in the relation SNR_o / SNR_c depends on the modulation index and it is calculated according to the formula $SNR_o = \beta^2 \cdot (\beta + 1) \cdot SNR_c$. The improvement for the existing system is 7.4 dB, while only 1.27 dB for the alternative system. Since in analog modulation, the major cause of degradation of communication quality is the signal/noise ratio, the signal quality at the reception for the proposed narrowband modulation will be inferior to the existing communication system.

The current system uses a radiotelephone communication channel of 25 kHz bandwidth. On the other hand, the use of an alternative system with a 12.5 kHz bandwidth would double the number of communication channels.

Signal quality at the reception also depends on the selectivity of the receiver, which is 70 dB relative to adjacent channels for both systems.

3 METHODS FOR ASSESSING VOICE COMMUNICATION QUALITY

In the analog voice radio communications a loss of quality of speech signals (*speech quality*), which is reflected on the intelligibility of messages (*speech intelligibility*) are mostly influenced by the noise in the communication channel as well as the transceiver device. This phenomenon can be mitigated by choosing appropriate type of modulation and increasing of the transmitter output power.

The quality of communication in the past decade has become a key factor in the design of communication systems and their exploitation. For the purpose of testing the quality of voice (telephone) communication, the ITU has developed two assessment methods: subjective [13] and objective testing [14].

Subjective testing is conducted by surveying 20 to 50 persons to evaluate the quality of received information without access to the original signal.

There are a number of methods for subjective tests, one of which is ACR (*Absolute Category Rating*), the most commonly used for testing simplex or half-duplex links. The test is carried out so that each person gives their opinion on the quality of the signal in scale from 1 to 5 (Table 1.). The statistical analysis of the results generate the overall mean score of quality

Tablica 1. ITU skala za ocjenu kvalitete govornih signala**Table 1** The ITU speech quality ratings

Osjet kvalitete / <i>Perception of quality</i>	Ocjena / <i>Rating</i>
Izvrсна / <i>Excellent</i>	5
Dobra / <i>Good</i>	4
Zadovoljavajuća / <i>Fair</i>	3
Slaba / <i>Poor</i>	2
Loša / <i>Bad</i>	1

Izvor / *Source*: ITU-T Recommendation P.800 [13]

Mean Opinion Score – MOS). Problemi subjektivnog načina testiranja su u potrebnom velikom broju ispitanika kako bi se postigla pouzdanost ispitivanja, posebnim prostorijama za testiranje, neponovljivosti rezultata testiranja i sporom odzivu na promjene (poboljšanja) u komunikacijskom sustavu.

Objektivno se testiranje može provoditi na dva načina. Jedan način, intruzivno testiranje, podrazumijeva pristup i predajnoj i prijemnoj strani veze kako bi se mogao usporediti odaslani i primljeni signal. Posljedica intruzivnog testiranja je da kanal za vrijeme testiranja nije dostupan korisnicima. Ovakva testiranja, ukoliko se provode u vrijeme najvećih opterećenja mreže, mogu dovesti do pogrešne (lošije) procjene. Intruzivno testiranje koristi se u laboratorijskim uvjetima.

U redovnim uvjetima, za potrebe stalnog nadzora kvalitete, koriste se stoga neintruzivne parametarske i neparametarske metode koje mjere kvalitetu signala u redovnoj upotrebi. Parametarske metode ne mjere kvalitetu preko govornog signala nego nadziru kvalitetu prijenosnog puta, dok metode koje mjere govorni signal “predviđaju” kvalitetu signala na prijemu polazeći od poznate kvalitete odaslano signala. U usporedbi s intruzivnim metodama, ove su metode manje precizne.

U ovome radu proveden je postupak objektivnog intruzivnog testiranja kvalitete govornog signala.

4. PESQ ALGORITAM

Ispitivanje kvalitete govornih signala za potrebe telefonskih komunikacija s limitiranim frekvencijskim opsegom signala informacije do 3,1 kHz kao i za ispitivanje različitih načina kodiranja informacije za digitalne komunikacijske sustave opisano je od organizacije ITU [14].

MOS (Mean Opinion Score). Problems in subjective testing methods are in the required large number of participants in order to achieve reliable results, special facilities for conducting tests, unrepeatable test results and a slow response to changes (improvements) in communication systems.

Objective testing can be conducted in two ways. The first way, intrusive testing, includes access to both the transmitting and the receiving side of the connection to be able to compare the transmitted and received signal. As a consequence of intrusive testing the channel during the testing period is not available to users. Such tests, if performed at the largest network load time, can lead to incorrect (poor) estimates. Intrusive testing is conducted in laboratories.

Therefore, in the working conditions of the communication system, in order to have constant quality supervision, nonintrusive parametric and nonparametric methods which measure the signal quality in regular use are applied. Parametric methods do not measure the quality through speech signal but monitor the quality of the transmission path, while the method which measures the speech signal “predict” the quality of the received signal based on the known quality of the transmitted signal. These methods are less accurate if compared to intrusive methods.

In this work an intrusive objective quality test of voice signal is implemented.

4 PESQ ALGORITHM

The testing of voice signal quality for telephone communication with limited frequency range of information signals up to 3.1 kHz as well as the testing of different ways of encoding information in digital communication systems is described by the ITU [14]. The PESQ algo-

PESQ algoritam (engl. *Perceptual Evaluation of Speech Quality* – PESQ) je objektivna metoda koja se koristi za predviđanje subjektivne kvalitete ispitivanja govornih signala. U provedenim dugogodišnjim istraživanjima ustanovljeno je da ova metoda ispitivanja uspješno mjeri učinke izobličenja signala i utjecaj šuma na informaciju kod jednosmjernih komunikacija (simpleks). Kod istovremeno dvosmjernih komunikacija (dupleks) gdje se javlja utjecaj parametara koji također sudjeluju u formiranju ukupne ocjene kvalitete (gubitak glasnoće, kašnjenje, jeka...) PESQ nije dao zadovoljavajuće rezultate. Rezultati PESQ algoritma koreliraju u vrlo visokoj mjeri s ACR testom koji se provodi subjektivnom metodom.

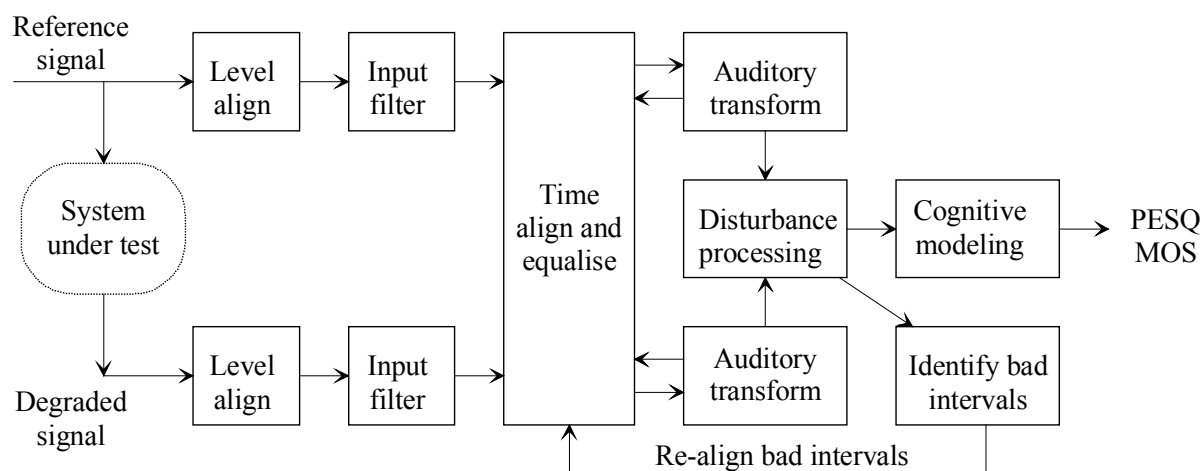
PESQ algoritam uspoređuje originalni signal s degradiranim signalom koji nastaje prolaskom izvornog signala komunikacijskim sustavom. PESQ algoritam neovisan je od komunikacijskog sustava te je stoga pogodan za testiranje različitih vrsta telefonskih komunikacija. Testiranje se provodi s unaprijed pripremljenim referentnim signalom u trajanju od 8 sekundi koji se i koristio za procjenu uspješnosti algoritma. Poruke su na različitim jezicima i izgovaraju ih različiti govornici, a formirane su od rečenica s međusobnim pauzama. Preporuka je da se mjerenje obavlja u više navrata s različitim porukama.

Algoritam koristi modeliranje slušnog sustava čovjeka (perceptualno modeliranje) i modeliranje raspoznavanja kvalitete govornog signala (kognitivno modeliranje) te uspoređuje

algoritam (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*), is an objective method used to predict the subjective quality of voice signals under tests. In previously conducted extensive research it is found that this test method successfully measures the effects of signal distortion and noise impact on the information in simplex communication systems. In duplex communication, where an impact of parameters that also contribute to total quality scores appears (volume loss, delay, echo ...) the PESQ has not given satisfactory results. The results obtained by the PESQ algorithm correlate, to a great extent, with the results of ACR test carried out by subjective method.

The PESQ algorithm compares the original signal with the degraded signal generated by passing the original signal through a communication system. The PESQ algorithm is independent from the communication system and is therefore suitable for testing various types of telephone communication. Testing is conducted with reference signals in duration of 8 seconds prepared in advance, which are also used to estimate the performance of the algorithm. Messages are in different languages with various speakers, and are formed of sentences with pauses between them. It is recommended that the tests are performed repeatedly using different messages.

The algorithm uses the modeling of the human auditory system (perceptual modeling) and the modeling of the recognition of the speech signal quality (cognitive modeling), and then compares the original and degraded sig-



Slika 2. Struktura PESQ algoritma
Figure 2 The PESQ algorithm structure

Izvor / Source: PESQ: An Introduction [16]

izvorni i degradirani signal. Rezultat usporedbe je ocjena kvalitete govornog signala odaslanog komunikacijskim sustavom. Izlazni rezultat algoritma PESQ-MOS je numerička vrijednost u granicama od -0,5 do 4,5. Kako je ITU kod ocjenjivanja kvalitete informacije predvidio granice za MOS od 1 do 5, da bi se moglo uspoređivati rezultate subjektivnog i objektivnog ocjenjivanja, razrađena je i funkcija za prilagodbu PESQ-MOS u MOS-LQO (engl. *Mean Opinion Score – Listening Quality Objective*) [15]:

$$\text{MOS - LQO} = 0,999 + \frac{4,999 - 0,999}{1 + e^{-1,4945 \cdot \text{PESQ-MOS} + 4,6607}} \cdot (8)$$

Prilagođavanje referentnog i degradiranog signala obavlja se podešavanjem amplituda signala (*Level alignment*) i filtriranjem (*Input filter*). Komunikacijski sustavi unose različita kašnjenja signala, a za uspoređivanje potrebno je referentni i degradirani signal vremenski uskladiti (*Time align and equalise*). Također postoji i povratna veza za dodatno usklađivanje vremenskih odsječaka (*Re-align bad intervals*). Perceptualno modeliranje algoritam obavlja kroz dvije razine, i to posebno za referentni, a posebno za degradirani signal. Prva razina predstavlja oponašanje reagiranja slušnog aparata na zvučne signale i transformiranje ulaznih signala iz vremenske u frekvencijsku domenu (*Auditory transform*) te mjerenje jačine pojedinih frekvencijskih komponenata signala. Druga razina modeliranja eliminira signale koji nisu značajni za subjektivni dojam zvučnih signala (*Time align and equalise*).

Sljedeća funkcija koju algoritam izvodi je usporedba izlaznih rezultata modeliranja slušnog aparata za referentni i degradirani signal, u kojoj se mjere razlike između amplituda referentnog signala i degradiranog signala na podacima iz algoritma za perceptualno modeliranje. Razlike između dvaju signala izražavaju se kao srednja vrijednost smetnje i srednja asimetrična vrijednost smetnje. Linearnim kombinacijama koje su optimizirane na velikom broju subjektivnih eksperimenata (*Cognitive modeling*), iz ovih dvaju podataka se izračunava izlazna vrijednost algoritma koja daje predviđanje subjektivne kvalitete govornog signala PESQ-MOS.

Računalni program razvijen od strane kompanija Psytechnics i Opticom, koji provodi PESQ algoritam, pokazao je vrlo visoku korelaciju s paralelno izvedenim subjektivnim ocjenji-

nal. The result of the comparison is the evaluation of the quality of the speech signal transmitted through a communication system. An output of the algorithm PESQ-MOS is a numerical value ranging from -0.5 to 4.5. In order to be able to compare the results of subjective and objective assessment of voice quality, the ITU has developed a function for adjusting the PESQ-MOS results to fit the MOS LQO (*Mean Opinion Score – Listening Quality Objective*) values [15]:

$$\text{MOS - LQO} = 0,999 + \frac{4,999 - 0,999}{1 + e^{-1,4945 \cdot \text{PESQ-MOS} + 4,6607}} \cdot (8)$$

Alignment of reference and degraded signals is done by adjusting the amplitude of signals (*Level alignment*) and filtering (*Input filter*). Due to different signal delay in communications systems, it is necessary to align the reference and degraded signal in time in order to compare them. (*Time align and equalise*). There is also a feedback for further adjustment in time intervals (*Re-align bad intervals*). The algorithm performs perceptual modeling at two levels separately, one for the reference signal and the other for the degraded signal. The first level consists of the emulation of the hearing system response to sound signals and the transform of input signals from the time domain to the frequency domain (*Auditory Transform*), as well as the measurement of the strength of the individual frequency components of the signal. The second level of modeling eliminates signals that are not relevant to the subjective impression of sound signals (*Time align and equalise*).

The next function that the algorithm performs is a comparison of output results of the modeling of the hearing system for reference and degraded signals, which measures the difference between the amplitude of the respective signals on the data from the perceptual modeling algorithm. The differences between the two signals are expressed as the mean signal value and the mean value of the asymmetric disturbances. By using linear combinations optimized on a large number of subjective experiments (*Cognitive Modeling*), the algorithm output value giving the prediction of the subjective quality of speech signals PESQ-MOS is calculated from these two data.

A computer program developed by the companies Psytechnics and Opticom, which conduct the PESQ algorithm, showed a very high correlation with subjective assessments done in parallel. The source code of this computer pro-

vanjima. Izvorni kôd navedenog računalnog programa nalazi se u dodatku preporuke ITU organizacije [14].

5. SIMULACIJSKI MODEL I ANALIZA REZULTATA

Uvažavajući tehničke karakteristike uređaja izrađen je simulacijski model komunikacijskog sustava koji se razlikuje za širokopolasnu (za postojeći sustav) i uskopolasnu (za alternativni sustav) modulaciju po karakteristikama modulatora i širini frekvencijskog spektra kod određivanja selektivnosti prijemnika. U svim ostalim karakteristikama simulacijski model je identičan za obje vrste modulacije.

Na postavljenom simulacijskom modelu je najprije obavljeno testiranje sa sinusnim izvorom signala, a potom je uveden govorni signal za potrebe testiranja kvalitete komunikacija. U simulacijski model nije uključena potrebna osjetljivost prijemnika, jer je zanemaren gubitak signala u prijenosnom putu. Kod ispitivanja kvalitete govornih komunikacija uzet je ukupan utjecaj smetnji koje se pojavljuju u komunikacijskom sustavu, a smetnja je uvedena u modulirani signal s različitim amplitudama signala šuma.

Govorni signali kojima je izvedena simulacija i ispitivanje kvalitete signala na prijemu, odabrani su iz raspoloživih uzoraka koji se nalaze u dodatku preporuke ITU organizacije [14]. Odabrana

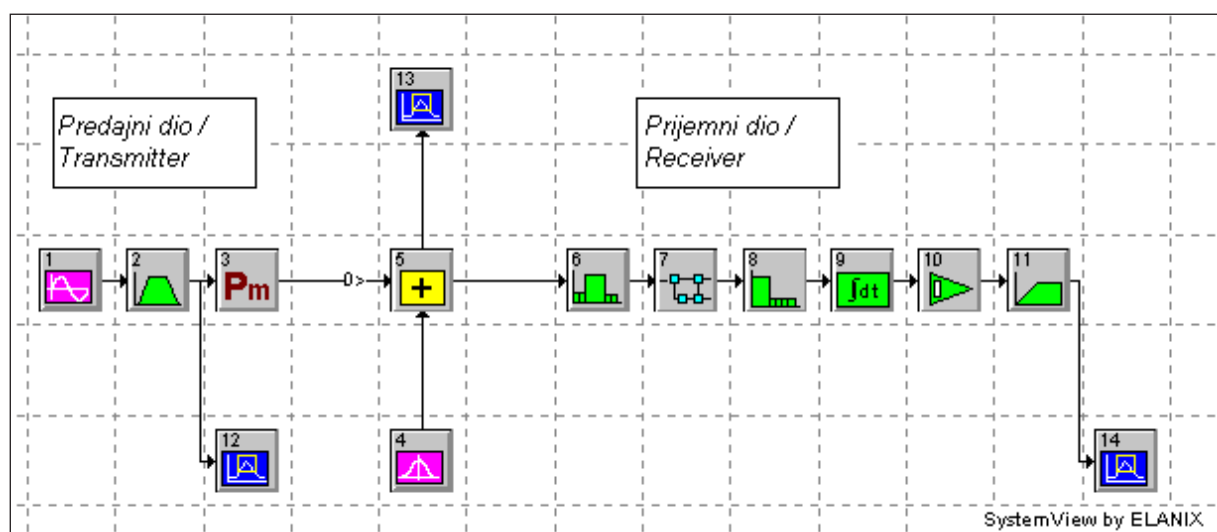
gram is in the Annex of the ITU recommendation [14].

5 SIMULATION MODEL AND ANALYSIS OF RESULTS

Taking into account the technical characteristics of the equipment the authors developed simulation model of the communication system, with different characteristics of modulator and channel bandwidth for the selectivity of the receiver for wide-band (the existing system) and narrow-band (for an alternative system) modulation. In all other characteristics the simulation model is identical for both types of modulation.

The function of the simulation model was first tested with sine signal and then the quality of communication system was tested with the voice signal. The simulation model does not include the required receiver sensitivity, because the signal loss in the transmission path is ignored. When testing the quality of voice communications, the total impact of interference occurring in the communication system is taken, while the interference is introduced into the modulated signals with different amplitudes of the noise signal.

Speech signals for the simulation and testing of the signal quality at the reception were selected from the available samples provided by the Annex of ITU recommendation [14]. Four samples were chosen, two male and two female



Slika 3. Simulacijski model VHF komunikacijskog sustava
Figure 3 Simulation model of the VHF communication system

Izvor / Source: Autori / Authors

su četiri uzorka koji predstavljaju dva muška i dva ženska glasa na engleskom jeziku. 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, tj. 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 SNR_c od 10, 15, 20, 25 i 30 dB.

Ocjena kvalitete svakog od 48 primljenih signala provedena je pomoću računalnog programa za objektivno ocjenjivanje kvalitete govornih signala. Obavljena je usporedba odaslanog (originalnog) i primljenog (degradiranog) govornog signala za svaki uzorak i dobiveni su rezultati za PESQ-MOS, koji su pretvoreni u MOS-LQO.

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

Ocjena MOS-LQO 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 SNR_c odnosno povećanjem utjecaja smetnji. Postojeća modulacija MOS-LQO 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.

voices in the English language. A simulation was conducted in which, for each selected sample, an output voice signal is obtained. For the purposes of testing the quality of speech signals, six simulations on each of the selected sample was carried out, separately for each type of modulation. A total of 48 output signals were obtained.

The first output signal is obtained by the simulation of communication systems in ideal conditions, that is, without the influence of noise on the modulated signal. The other five output signals are generated with the impact of interference on the communication system. The selected values of interference signals are given by signal/noise ratio in the communication channel SNR_c of 10, 15, 20, 25 and 30 dB.

The rating of the quality for each of the 48 received signals was performed using a computer program for an objective evaluation of the quality of voice signal. The comparison of the transmitted (original) and received (degraded) speech signal is performed for each sample and the obtained results for the PESQ-MOS are converted to MOS-LQO.

From the results obtained by the simulation of communication systems and by using objective methods to assess quality of speech signals, it is evident that the result for each sample in ideal conditions is almost identical for both types of modulation and slightly different for each individual voice signal.

In ideal conditions the MOS-LQO score ranges from 3.2 to 3.7. Differences in the assessment arise from the different characteristics of the speaker (pitch ...), and due to different relationships of consonants and vowels in the samples. In evaluating the quality of speech signals in ideal conditions in the communication channel, the assessment is affected by the elements for filtering signals which attenuate frequencies outside the 300-3000 Hz range, as well as the signal loss that occurs due to signal degradation allowed in determining the required bandwidth of the channel after modulation.

With the introduction of noise in the communication channel, a decline in the quality assessment of speech signals is observed when reducing SNR_c i.e. increasing interference. In the existing modulation, the MOS-LQO for individual samples ranges from 2.0 to 3.5 which could be expressed as a sense of quality, from poor to satisfactory/good quality.

Tablica 2. Rezultati analize za postojeći komunikacijski sustav**Table 2** Analysis results for the existing communication system

Uzorak / Sample	MOS-LQO	Osjet kvalitete / Perception of quality
muški glas 1 / male voice 1	2,3 – 3,2	slaba do zadovoljavajuća/dobra / poor to fair/good
muški glas 2 / male voice 2	2,0 – 3,2	slaba do zadovoljavajuća/dobra / poor to fair/good
ženski glas 1 / female voice 1	2,1 – 3,5	slaba do zadovoljavajuća/dobra / poor to fair/good
ženski glas 2 / female voice 2	2,0 – 3,5	slaba do zadovoljavajuća/dobra / poor to fair/good

Izvor / Source: Autori / Authors

Tablica 3. Rezultati analize za alternativni komunikacijski sustav**Table 3** Analysis results for the alternative communication system

Uzorak / Sample	MOS-LQO	Osjet kvalitete / Perception of quality
muški glas 1 / male voice 1	2,0 – 3,1	slaba do zadovoljavajuća / poor to fair
muški glas 2 / male voice 2	1,9 – 2,9	slaba do zadovoljavajuća / poor to fair
ženski glas 1 / female voice 1	1,8 – 3,0	slaba do zadovoljavajuća / poor to fair
ženski glas 2 / female voice 2	1,8 – 3,0	slaba do zadovoljavajuća / poor to fair

Izvor / Source: Autori / Authors

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

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.

6. ZAKLJUČAK

U ovome radu provedeno je istraživanje implikacija eventualnog sužavanja komunikacijskih kanala s obzirom na učinak koji bi takva mjera imala na kvalitetu govornih komunikacija.

Ispitivanja kvalitete signala provode se prema strogim standardiziranim postupcima ITU-a kako bi se dobili relevantni rezultati koje je moguće međusobno uspoređivati. U ovom radu odabrana je PESQ tehnologija, koja predstavlja objektivnu računalnu tehnologiju najnovije generacije. Uz pomoć računalnog programa za objektivno ocjenjivanje kvalitete govornih signala utvrđeno je da prosječni gubitak kvalitete primljenog signala alternativnog sustava iznosi

In an alternative communication system a decrease in quality compared to the existing communication system was observed, and the MOS-LQO score ranges from 1.8 to 3.1 which could be expressed as a sense of quality, from poor to satisfactory quality.

The conducted analysis of voice signal quality and comparison of obtained results confirm the theoretical assumption that reducing the modulation index for angular modulation leads to a loss in voice signal quality. However, an alternative communication system that would allow doubling the number of channels in the maritime VHF band does not show a significant loss in comparison to the existing communication system.

6 CONCLUSION

This paper analyses the implications of a possible narrowing of communication channels with regard to the impact that such a step would have on the quality of voice communications.

Signal quality tests are conducted under strict standardized ITU procedures, in order to obtain relevant comparable results. In this research, the latest generation of computing technology for objective evaluation of speech signals quality, the PESQ technology was selected. By this computer program for the objective evaluation of the quality of speech signals, it had been established that the average loss of the receiving signal quality for the alternative system is about 0.5 MOS-LQO, which repre-

oko 0,5 MOS-LQO, što predstavlja relativno mali gubitak kvalitete u usporedbi s razinom kvalitete postojećeg sustava. Razlika u ocjenama između modela postojećeg sustava i u radu predloženog alternativnog modela u normalnim uvjetima prostiranja, uz najniži ispitani iznos odnosa signal/šum u komunikacijskom kanalu ($SNR_C = 10$ dB), varira kod modela postojećeg stanja između 2,0 i 2,3, dok se za istu razinu smetnji kod ispitivanja alternativnog modela dobivaju vrijednosti od 1,8 do 2,0. U najpovoljnijim uvjetima, s najvišim ispitanim iznosom signal/šum, koji je blizak najčešćim stvarnim uvjetima ($SNR_C = 30$ dB), vrijednosti za model postojećeg stanja kreću se između 3,2 do 3,5, dok se za alternativni model kreću između 2,9 do 3,1. Izraženo kroz osjet kvalitete to je unutar granica zadovoljavajuće kvalitete.

Iako je ispitivanjem utvrđeno da kvaliteta signala na prijemu opada, ona još uvijek ostaje na zadovoljavajućoj razini, te se stoga uskopojasna fazna modulacija može podržati kao prihvatljiv način ublažavanja problema nedostatka komunikacijskih kanala na VHF području.

sents a relatively small loss in quality if compared to the quality of the existing system. The difference in scores between the existing system model and the proposed alternative model under normal conditions of propagation, with the lowest tested amount of signal/noise ratio in the communication channel ($SNR_C = 10$ dB), varies for the existing system model between 2.0 and 2.3, while the scores for the same level of noise in the testing of alternative models are between 1.8 and 2.0. In the most favorable conditions, with the highest tested amount of signal/noise ratio, which is close to the most common real-world conditions ($SNR_C = 30$ dB), the values for the model of the existing system is between 3.2 and 3.5, while for the alternative model, between 2.9 and 3.1. If these values are expressed by means of the sense of quality, they are ranked as satisfactory quality.

Although the analysis revealed that the quality of the received signal decreases, it still remains at a satisfactory level, and therefore, the narrowband phase modulation can be supported as an acceptable way to mitigate problems of the lack of communication channels in the VHF band.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Duncan, J., *FM Demodulator Threshold Reduction*, Final Report N65-19880 Prepared for NASA, 1964.
- [2] ITU-R Recommendation BS.1116-1, *Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems Including Multichannel Sound Systems*, 1997.
- [3] ITU-R Recommendation BS.1283, *Subjective Assessment of Sound Quality, a Guide to Existing Recommendations*, 1997.
- [4] ITU-R Recommendation BS.1284, *Methods for the Subjective Assessment of Sound Quality, General Requirements*, 1997.
- [5] ITU-R Recommendation BS.1285, *Pre-selection Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems*, 1997.
- [6] ITU-R Recommendation BS.562-3, *Subjective Assessment of Sound Quality*, 1990.
- [7] ITU-R Recommendation BS.644-1, *Audio Quality Parameters for the Performance of a High-quality Sound-programme Transmission Chain*, 1990.
- [8] 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.
- [9] 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*, 1997.
- [10] ITU-R Recommendation M.489, *Technical Characteristics of VHF Radiotelephone Equipment Operating in the Maritime Mobile Service in Channels Spaced by 25 kHz*, 1995.
- [11] ITU-R Recommendation P.341, *The Concept of Transmission Loss for Radio Links*, 1999.
- [12] ITU-R Recommendation SM 332, *Selectivity of Receivers*, 1978.
- [13] ITU-T Recommendation P.800, *Methods for Subjective Determination of Transmission Quality*, 1996.
- [14] ITU-T Recommendation P.862, *Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ), an Objective Method for End-to-end Speech Quality Assessment of Narrow-band Telephone Networks and Speech codecs*, 2001.
- [15] ITU-T Recommendation P.862.1, *Mapping Function for Transforming P.862 Raw Result Scores to MOS-LQO*, 2003.
- [16] PESQ: An Introduction, http://www.sageinst.com/downloads/960B/wp_pesq_introduction.pdf, 3.10.2012.