

Logatomska razumljivost FM demodulisanog signala

Svjetlana Kovačević, Tatjana Pešić-Brđanin, Jovan Galić

Elektrotehnički fakultet

Banja Luka, Republika Srpska, BiH

svjetlana.kovacevic@etfbl.net, tatjanapb@etfbl.net, jgalic@etfbl.net

Sadržaj— U ovom radu prikazani su projektovanje, simulacija i praktična realizacija demodulatora frekvencijski modulisanog signala baziranog na konverziji frekvencijskog u amplitudski modulisan signal. Testiranje demodulatora je izvršeno određivanjem faktora harmonijskih izobličenja (za test ton frekvencije 1 kHz), kao i subjektivnim određivanjem logatomske razumljivosti za 30 slušalaca. Subjektivni testovi su urađeni korišćenjem 125 logatoma za devijacije frekvencije 20 kHz i 5 kHz. Dobijena je prosječna uspješnost prepoznavanja logatoma 94.27% (za 20 kHz) i 93.28% (za 5 kHz). Testirana je hipoteza o saglasnosti logatomske razumljivosti sa normalnom raspodjelom.

Ključne riječi— FM demodulator, logatom, devijacija frekvencije, THD

I. UVOD

Zbog niza prednosti u odnosu na prenos u osnovnom opsegu učestanosti (robustnost na smetnje i šum, mogućnost višestrukog korišćenja prenosnog medijuma na bazi multipleksnog pristupa, dimenzija antena, itd.), za prenos informacija se koristi prenos u transponovanom opsegu učestanosti, što zahtijeva postupak modulacije signala. Frekvencijska modulacija (FM) je vrsta ugaone modulacije, koja u odnosu na konvencionalnu amplitudsku modulaciju (AM) ima prednosti u pogledu energetske efikasnosti kao i osjetljivosti na aditivni šum. I pored toga što je u mnogim državama započeta digitalizacija difuznog audio signala, najveći broj korisnika još uvijek koristi standardne FM radio difuzne prijemnike [1].

Za ispitivanje kvaliteta govornog signala mogu se koristiti objektivni i subjektivni parametri. Objektivni parametri se dobijaju ili određuju mjerenjem i u njih spadaju, na primjer, odnos signal/šum, kašnjenje i faktor harmonijskih izobličenja. Subjektivni parametri se dobijaju testiranjem velikog broja ispitanika, koji daju svoje subjektivne ocjene. Među najpoznatije subjektivne parametre kvaliteta govornog signala spadaju MOS parametar (eng. *Mean Opinion Score*) i razumljivost logatoma, odnosno jednosložnih riječi bez značenja [2]. Jasno je da su za ocjenu kvaliteta govornog signala važniji subjektivni parametri, jer oni odražavaju subjektivni utisak krajnjih korisnika.

U ovom radu biće dat postupak projektovanja, simulacije i praktične realizacije demodulatora frekvencijski modulisanog signala. Biće ispitana razumljivost logatoma tipa konsonant-vokal-konsonant demodulisanog FM signala za 30 slušalaca, kao i faktor harmonijskih izobličenja za dvije vrijednosti devijacije frekvencije.

II. FM DEMODULACIJA

Demodulacija ugaono modulisanih signala, kako frekvencijska modulacija (FM) tako i fazna modulacija (PM), može se izvršiti pomoću detektorskih kola istog tipa. Demodulacija se obavlja u sklopu koji se naziva demodulator (ili često i diskriminator) čiji je zadatak da iz modulisanog signala izdvoji poslatu informaciju [3-5].

Demodulatori se mogu svrstati u nekoliko grupa [6]:

- konvertori frekvencijski modulisanih signala u amplitudski modulisane signale,
- diskriminatori sa faznim mrežama,
- detektori prolaska kroz nulu i
- demodulatori sa povratnom spregom.

Svi sklopovi koji obavljaju funkciju diferenciranja u vremenskom domenu mogu se koristiti kao konvertori frekvencijski modulisanih signala u amplitudski modulisane signale. Iz tako dobijenog AM signala može se izdvojiti modulišući signal uz pomoć detektora anvelope.

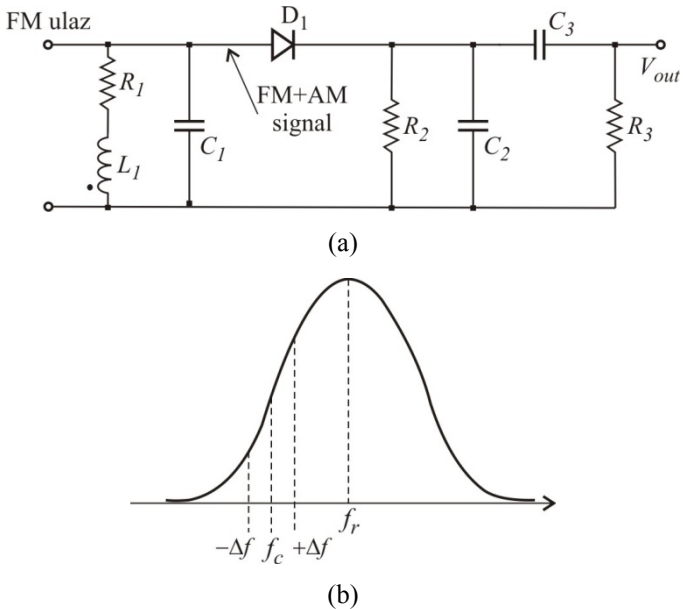
Princip rada diskriminatora sa faznim mrežama zasniva se na aproksimaciji diferenciranja u vremenskom domenu. Takođe, moguće je demodulaciju FM signala izvršiti i brojanjem prolazaka kroz nulu modulisanog signala. Postoje i sklopovi bazirani na PLL (petlja sa faznim zaključavanjem) koji predstavljaju sistem sa povratnom spregom, koji se može koristiti kao demodulator FM signala.

Na Sl. 1 prikazan je jednostruki balansni diskriminator (a), kao i njegova frekvencijska karakteristika (b) [6].

Sklop predstavlja jednostruko podešeno kolo koje karakteriše nelinearna frekvencijska karakteristika. Oscilatorno kolo (koje čine kalem induktivnosti i kondenzator kapacitivnosti) na svom izlazu daje napon proporcionalan frekvenciji ulaznog signala. Na rezonantnoj frekvenciji javlja se maksimum izlaznog napona. Frekvencija nosioca se bira tako da bude na najlinearnijem dijelu frekvencijske karakteristike. Dakle, frekvencija nosioca treba da leži na sredini linearnog dijela karakteristike, a zatim se, u zavisnosti od toga koliki opseg učestanosti zauzima linearni dio karakteristike, određuje i maksimalna devijacija frekvencije.

Sa promjenom frekvencije modulisanog signala, mijenja se napon na izlazu ovog kola, što znači da se varijacije frekvencije preslikavaju u varijacije amplitude, čime je u stvari izvršena konverzija FM signala u amplitudsko

modulisani FM signal. Dioda D_1 , kondenzator kapacitivnosti C_1 i otpornik otpornosti R_1 čine detektor anvelope koji varijacije amplitude FM signala pretvara u izlazni signal proporcionalan modulišućem signalu. Na izlazu detektora anvelope dobija se modulišući signal, koji sadrži i jednosmjernu komponentu, pa je potrebno na izlaz dodati i jedan visokopropusni filter. Visokopropusni filter eliminiše jednosmjernu komponentu iz demodulisanog signala.



Slika 1. Jednostavni frekvencijski diskriminator (eng. *Slope Detector*) (a) i frekvencijska karakteristika selektivnog kola na ulazu (b)

III. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

A. Proračun elemenata FM demodulatora

Rezonantna frekvencija selektivnog kola na ulazu demodulatora proračunava se na osnovu sljedećeg izraza:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

Za realizaciju ovog selektivnog kola upotrijebljen je kalem standardne vrijednosti induktivnosti $1 \mu\text{H}$ i faktora dobrote (Q faktora) koji je jednak 24, a kondenzator je izabran tako da rezonantna frekvencija, a takođe i frekvencija FM signala, budu u megahercnom području. Za kondenzator kapacitivnosti $C_1 = 12\text{nF}$ prema izrazu (1) dobija se rezonantna frekvencija $f_r \cong 1.454\text{MHz}$.

Na osnovu vrijednosti Q faktora prigušnice, dobija se vrijednost serijske otpornosti gubitaka prigušnice L_1 :

$$Q = \frac{\omega_r L_1}{R_1} \rightarrow R_1 = \frac{\omega_r L_1}{Q} \quad (2)$$

Dobijena je vrijednost $R_1 = 0.38\Omega$.

Za realizaciju sklopa demodulatora, neophodno je još proračunati elemente detektora anvelope. Ako se pretpostavi da je modulišući signal govorni signal telefonskog kvaliteta koji zauzima opseg frekvencija od $f_{\min} = 300\text{Hz}$ do $f_{\max} = 3400\text{Hz}$ i da je stepen modulacije $m_0 = 0.6$ (FM modulator korišćen za praktičnu realizaciju sklopa ima mogućnost podešavanja indeksa modulacije do maksimalno 60%), na osnovu sljedećeg izraza može se izvršiti proračun elemenata [7]:

$$R_2 C_2 < \frac{1}{m_0 \omega_{\max}} \sqrt{1 - m_0^2} \quad (3)$$

Za navedene vrijednosti, na osnovu (3), dobija se $R_2 C_2 < 6.24 \cdot 10^{-5}$. Izabran je otpornik čija je vrijednost otpornosti $R_2 = 1\text{k}\Omega$. Razlog ovog izbora leži u činjenici da je ova vrijednost otpornika standardna. Da bi bio zadovoljen uslov (3) bira se, takođe, standardna vrijednost kapacitivnosti kondenzatora $C_2 = 47\text{nF}$, čime je završen proračun elemenata detektora anvelope. Za eliminisanje jednosmjerne komponente na izlazu detektora anvelope, dodaje se visokopropusni RC filter, čija je trodecibelska granična frekvencija određena sa:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3} \quad (4)$$

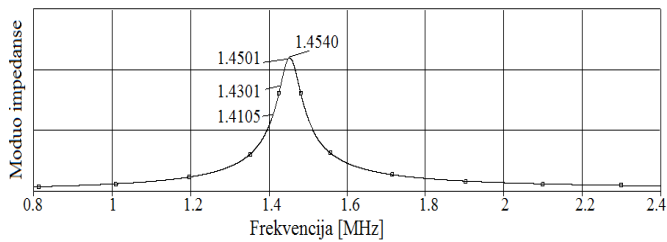
Proračun elemenata filtra se vrši na osnovu formule $R_3 C_3 \geq (3 \div 5) / \omega_{\min}$. Ovaj uslov je odabran tako da sve značajne komponente u spektru govornog signala ne budu izobličene u visokopropusnom filteru. Kako će demodulisani signal biti poslat na slušalice male ulazne otpornosti (8Ω) ili zvučnike ($2 \text{k}\Omega$), potrebno je izabrati kondenzator veoma velike vrijednosti kapacitivnosti. Kapacitivnost kondenzatora C_3 iznosi $470 \mu\text{F}$, što je takođe standardna vrijednost kapacitivnosti kondenzatora.

Za sklop sa elementima čije su vrijednosti proračunate u prethodnoj analizi, izvršena je simulacija pomoću programskog paketa PSpice [8]. Rezultati dobijeni simulacijom u skladu su sa teorijskim očekivanjima, te je izvršena i praktična realizacija i testiranje projektovanog demodulatora.

Na Sl. 2 prikazana je frekvencijska karakteristika demodulatora dobijena pomoću programskog paketa PSpice. Može se uočiti da rezonantna frekvencija odgovara proračunatoj i iznosi 1.454MHz . Takođe, određen je i dio karakteristike koji se smatra najlinearnijim, a koji obuhvata opseg frekvencija od 1.4105MHz do 1.4501MHz . Frekvencija nosioca postavljena je na sredini tog intervala, odnosno iznosi 1.4301MHz .

Kako je opseg linearnosti relativno uzak, treba voditi računa o maksimalnoj devijaciji frekvencije, kako bi se frekvencija modulisanog signala uvijek nalazila na linearnom dijelu karakteristike i tako spriječila dodatna izobličenja signala. Standardna vrijednost devijacije frekvencije FM

signala kod FM radio difuzije iznosi ± 75 kHz. Za potrebe govornog signala koji je korišćen kao modulišući signal dovoljna je devijacija frekvencije od 20 kHz, što znači da će frekvencijski modulirani signal zadovoljiti prethodni uslov.



Slika 2. Zavisnost modula impedanse oscilatornog kola dobijena simulacijom pomoću programskog paketa PSpice

Frekvencija nosioca koja je određena simulacijom iznosi 1.4301MHz (na sredini linearnog dijela frekvencijske karakteristike), dok je u laboratoriji na osnovu snimljene frekvencijske karakteristike pomoću analizatora impedanse, prikazane na Sl. 3, za istu dobijena vrijednost 1.37 MHz. Dakle, odstupanje frekvencije nosioca određene u laboratoriji od one koja je proračunata iznosi:

$$\frac{1.4301 - 1.37}{1.4301} \cdot 100\% = 4.2\%$$



Slika 3. Frekvencijska karakteristika snimljena pomoću analizatora impedanse (4194A)

B. Opis eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu izvršena je objektivna i subjektivna procjena kvaliteta demodulisanog signala. Objektivna ocjena kvaliteta demodulisanog signala predstavljena je kroz faktor harmonijskih izobličenja - THD faktor (eng. *Total Harmonic Distortion*). THD predstavlja mjeru bliskosti stvarnog talasnog oblika signala i njegovog osnovnog harmonika, a računa se na osnovu sljedeće formule:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \cdot 100[\%], \quad (5)$$

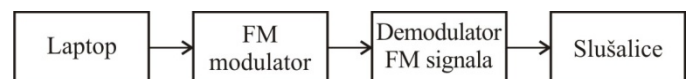
gdje je V_n efektivna vrijednost napona n -tog harmonika. Za osnovni harmonik je $n=1$.

U cilju određivanja logatomske razumljivosti, kao subjektivne ocjene kvaliteta demodulisanog signala, izveden je eksperiment. Za potrebe eksperimenta, prvo je kreirana govorna baza koju čine izgovori logatoma. Logatomi su tipa konsonant-vokal-konsonant i raspoređeni su u dvije tabele, od kojih svaka sadrži po 125 logatoma. Radi se o balansiranim logatomima u obje tabele, tj. logatomi su formirani tako da se svaki od 25 konsonanata pojavljuje po 5 puta u inicijalnom i po 5 puta u finalnom položaju, a svaki od 5 vokala se pojavljuje po 25 puta u medijalnom položaju [9].

Govorna baza logatoma je snimljena uz pomoć softverskog paketa PRAAT [10], po jedan snimak za svaku tabelu, a izgovarala ih je muška osoba praveći pauzu od 4 do 5 s između dva izgovorena logatoma. Snimanje se odvijalo u tihoj prostoriji, gdje je izmjereno nivo buke 29 dB(A). Snimci su u monokanalnoj tehnici, sa frekvencijom odmjerenja 44.1 kHz.

Takođe, ispitivanje logatomske razumljivosti je izvedeno pri istim uslovima, tj. u tihoj prostoriji. U eksperimentu je dobrovoljno učestvovalo 30 slušalaca - osoba starosti između 20 i 35 god. sa korektnim sluhom, koji su imali zadatak da sve logatome koje su čuli zapišu u dobijene formulare, u kontinuitetu tokom slušanja.

Blok šema korišćena za izvođenje ovog eksperimenta data je na Sl. 4. Pored demodulatora FM signala korišćen je laptop, FM modulator (FM stereo/FM-AM signal generator 1100) i slušalice. Za generisanje govornog modulišućeg signala, koji je prethodno snimljen, korišćen je laptop. FM modulator je uređaj koji vrši modulaciju, koristeći signal sa izlaza zvučne kartice laptopa kao modulišući signal. Izlaz FM modulatora generiše FM signal i direktno je povezan sa projektovanim demodulatorom. Na FM modulatoru podešena je frekvencija nosioca 1.37 MHz, dok je nivo FM signala podešen na 13 dBm (20 mW). Eksperimenti su urađeni za dvije vrijednosti devijacije frekvencije: 20 kHz i 5 kHz, pri čemu je u logatomskim testovima postojala pauza od nekoliko dana kod svakog pojedinačnog slušaoca. Jedna tabela je korišćena za devijaciju frekvencije 20 kHz, a druga za devijaciju od 5 kHz.



Slika 4. Blok šema korišćena za izvođenje eksperimenta

IV. REZULTATI EKSPERIMENTA I DISKUSIJA

U Tabeli 1 prikazani su dobijeni rezultati logatomske razumljivosti za svakog pojedinačnog slušaoca i za dvije vrijednosti devijacije frekvencije: 20 kHz i 5 kHz.

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 1, dobija se srednja vrijednost logatomske razumljivosti 94.27% (za devijaciju frekvencije 20 kHz) i 93.28% (za devijaciju frekvencije 5 kHz). Dobijene vrijednosti su dobre uzimajući u obzir da logatomskoj razumljivosti od 80% odgovara rečenička razumljivost preko 95% [2].

TABELA I. LOGATOMSKA RAZUMLJIVOST ODREĐENA ZA POJEDINAČNOG SLUŠAOCA ZA DEVIJACIJE FREKVENCIJE 20 KHZ I 5 KHZ

Redni broj	20 kHz	5 kHz	Redni broj	20 kHz	5 kHz
1	94.4%	97.6%	16	96.0%	97.6%
2	92.8%	93.6%	17	96.8%	94.4%
3	96.0%	92.8%	18	94.4%	85.6%
4	89.6%	97.6%	19	93.6%	93.6%
5	96.0%	97.6%	20	92.8%	85.6%
6	96.0%	95.2%	21	93.6%	92.8%
7	95.2%	91.2%	22	94.4%	93.6%
8	98.4%	96.8%	23	92.8%	89.6%
9	94.4%	92.8%	24	94.4%	90.4%
10	84.8%	89.6%	25	96.0%	94.4%
11	96.8%	92.0%	26	99.2%	99.2%
12	94.4%	91.2%	27	93.6%	90.4%
13	92.8%	95.2%	28	96.0%	97.6%
14	90.4%	93.6%	29	92.0%	88.8%
15	94.4%	94.4%	30	96.0%	93.6%

U Tabeli 2 prikazani su rezultati za THD faktor u zavisnosti od devijacije frekvencije, korišćenjem audio analizatora, za test ton frekvencije 1 kHz i THD faktora 0.001%. U skladu sa očekivanjima, THD faktor se poboljšava sa smanjenjem devijacije frekvencije, jer se tada frekvencija FM signala nalazi na linearnijem dijelu karakteristike.

TABELA II. THD FAKTOR U ZAVISNOSTI OD DEVIJACIJE FREKVENCIJE

Devijacija frekvencije	THD faktor [%]
20 kHz	0.229
5 kHz	0.154

Od strane mnogih istraživača, test *Shapiro-Wilk* je preporučan kao najbolji za ispitivanje saglasnosti podataka sa normalnom raspodjelom, pogotovo za uzorak obima manjeg od 50 [11-13]. U ovom radu je ispitana saglasnost rezultata logatomske razumljivosti sa normalnom raspodjelom *Shapiro-Wilk*-ovim testom korišćenjem programskog paketa MATLAB [14], sa nivoom značajnosti 0.05. Nakon eliminisanja ekstremnih vrijednosti, testovi su pokazali da se hipoteza o saglasnosti sa normalnom raspodjelom ne može odbaciti, za obje vrijednosti devijacije frekvencije. Za devijaciju frekvencije 5 kHz dobijena p-vrijednost iznosi 0.11, dok za devijaciju frekvencije 20 kHz iznosi 0.15.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršeno ispitivanje kvaliteta demodulisanog govornog signala, testiranjem logatomske razumljivosti za dvije frekvencije devijacije. Određen je faktor izobličenja signala u slučaju obje frekvencije devijacije. Izvršeno ispitivanje saglasnosti rezultata logatomske razumljivosti sa normalnom raspodjelom dokazuje hipotezu o saglasnosti.

Buduće istraživanje uključuje poređenje logatomske razumljivosti realizovanog demodulatora sa demodulisanim AM signalom za istu listu logatoma, ukoliko se kao parametar koristi nivo emitovane snage. Takođe, biće proširena lista slušalaca u subjektivnim testovima.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju studentima i zaposlenim na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Banjoj Luci koji su učestvovali u eksperimentu.

LITERATURA

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Countries_using_DAB/DMB, posjećeno u januaru 2016.
- [2] S. T. Jovičić, "Govorna komunikacija: fiziologija, psihoakustika i percepcija", str. 422, Nauka, Beograd, 1999.
- [3] M. Dukić, "Principi telekomunikacija", Akademska misao, Beograd, 2008.
- [4] M. Šunjevarić, "Osnovi radio komunikacije sa radio tehnikom", Studio Line, Beograd, 2004.
- [5] W. Tomasi, "Electronic communications systems, Fundamentals Through Advanced", Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [6] S. Kovačević, "Realizacija demodulatora frekvencijski modulisanog signala", diplomski rad, novembar 2015.
- [7] H. Hsu, "Analog and Digital Communications", 2nd ed., Schaums outlines, McGraw-Hill, 2003.
- [8] OrCAD PSpice Reference Manual, <http://www.cadence.com/>, posjećeno u januaru 2016. godine.
- [9] S.T. Jovičić, M.M. Đorđević, "Percepcija fonema u šapatu: identifikacija i konfuzija", poglavlje u knjizi S.T. Jovičić, M.Sovilj (ed.): Govor i jezik: interdisciplinarna istraživanja, II; Centar za unapređenje životnih aktivnosti i Institut za eksperimentalnu fonetiku i patologiju govora, 2008.
- [10] P. Boersma, D. Weenink, *Praat: Doing phonetics by computer*, <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>, posjećeno u decembru 2015. godine.
- [11] H. Thode, "Testing for normality", New York: Marcel Dekker, 2002.
- [12] A. Elliott, W. Woodward, "Statistical analysis quick reference guidebook with SPSS examples", 1st ed. London, Sage Publications, 2007.
- [13] S. Shapiro, M. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," Journal of Biometrika, vol. 52, no. 3-4, p. 591, 1965, Oxford University Press.
- [14] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13964-shapiro-wilk-and-shapiro-francia-normality-tests/content/swtest.m>, posjećeno u januaru 2016. godine.

ABSTRACT

This paper presents designing, simulation and practical realization of the FM demodulator based on the FM-AM conversion. The demodulator was tested by determining THD (Total Harmonic Distortion) factor (for the 1 kHz test tone), as well as the logatome intelligibility for 30 listeners. The subjective tests had been done using 125 logatomes for two values of the frequency deviation: 20 kHz and 5 kHz. The average logatome recognition rate is 94.27% (for 20 kHz) and 93.28% (for 5 kHz). Goodness of fit test for normal distribution was done.

A LOGATOME INTELLIGIBILITY OF THE FM DEMODULATED SIGNAL

Svjetlana Kovačević, Tatjana Pešić-Brđanin, Jovan Galić

