

Ocjena kvalitete govornog signala pri prijenosu mobilnim mrežama

Jurkić, Ena

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:505928>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U
OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**OCJENA KVALITETE GOVORNOG SIGNALA PRI
PRIJENOSU MOBILNIM MREŽAMA**

Završni rad

Ena Jurkić

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

1.....	UVOD	1
1.2. Zadatak završnog rada.....		1
2.....	MOBILNE MREŽE	2
2.1. 1G mreža		3
2.2. 2G mreža		3
2.3. 3G mreža		4
2.4. 4G mreža		4
2.5. 5G mreža		5
3.....	OCJENA KVALITETE GOVORNOG SIGNALA U MOBILNIM MREŽAMA	6
3.1. Metode ocjene kvalitete govornog signala		6
3.2. Subjektivne i objektivne metode.....		6
3.3. Pregled objektivnih metrika za mjerenje kvalitete govornog signala		8
3.3.1. PESQ		9
3.3.2. POLQA.....		12
4.....	MJERENJE KVALITETE GOVORNOG SIGNALA PRI PRIJENOSU MOBILNIM MREŽAMA	17
4.1. TEMS Symphony.....		17
4.2. TEMS Investigation		18
4.3. Postupak mjerenja.....		18
4.4. Rezultati mjerenja		22
5.....	ZAKLJUČAK	35
LITERATURA.....		36
POPIS I OPIS KORIŠTENIH KRATICA		38
SAŽETAK.....		40
ABSTRACT		40

1. UVOD

Brzi napredak tehnologije popraćen je sve češćom upotrebom mobilnih uređaja u svakodnevnom životu i omogućuje korisnicima sve bržu i jednostavniju komunikaciju sve veće kvalitete. Svakim danom se sve više uređaja spaja na mobilnu mrežu pa kako bi se zadovoljili zahtjevi za povećanjem telefonskog prometa, mobilna telefonija se razvija velikom brzinom te je u upotrebi već peta generacija mobilne telefonije (5G). Svaka nova generacija dolazi s poboljšanjima u odnosu na prethodnu generaciju i svaka generacija ima različite napredne značajke i karakteristike dizajnirane u svrhu bolje kvalitete obrade govornog signala, veće brzine prijenosa informacija kroz mrežu i suzbijanja buke pri prijenosu signala mrežom. Prilikom prijenosa govornog signala, može doći do kašnjenja i izobličenja signala uzrokovanih smetnjama što može negativno utjecati na iskustvo krajnjeg korisnika. Iz tog razloga je važno provjeriti kvalitetu prijenosa govornog signala u mobilnim mrežama te su u tu svrhu razvijene razne subjektivne i objektivne metrike kojima se analizira, uspoređuje i poboljšava kvaliteta zvuka u mobilnim tehnologijama.

1.2. Zadatak završnog rada

U radu treba napraviti pregled metrika za efikasno mjerenje govornog signala te izabrane metrike detaljnije opisati. U praktičnom dijelu rada primjenom TEMS Symphony uređaja treba napraviti mjerenja, a primjenom TEMS Investigation programa treba napraviti analizu kvalitete govora pri prijenosu 2G, 3G i 4G mrežama.

2. MOBILNE MREŽE

Mobilna (celularna) mreža je bežični komunikacijski sustav koji omogućuje komunikaciju korisnika u pokretu. Mobilna mreža obuhvaća prostor koji je podijeljen u manje dijelove – ćelije. Svaka ćelija ima barem jedan odašiljač, tzv. baznu postaju, s fiksnom lokacijom koji signalom pokriva prostor ćelije i koristi drugi raspon frekvencija u odnosu na susjedne ćelije kako bi se izbjegla interferencija i osigurala zajamčena širina frekvencijskog pojasa prijenosnog kanala. Kako bi se spriječio prekid komunikacije pri kretanju korisnika s jedne lokacije na drugu, poziv se prebacuje s jedne bazne postaje na drugu. Dakle, osnovna funkcija ovakvog komunikacijskog sustava je spajanje mobilnih uređaja s najbližom baznom postajom te lociranje i praćenje aktivnih i neaktivnih korisnika u pokretu, tzv. mobilnih postaja.

Celularni radio sustav koristi malu snagu za radio komunikaciju između mobilnih stanica i mreže baznih postaja. Kretanje mobilne postaje dovodi do vrlo nestabilnih uvjeta radio veze, stoga je potrebno pažljivo nadgledanje i kontroliranje kako bi kvaliteta radio veze ostala prihvatljiva. Ocjena kvalitete radio veze temelji se na velikom broju kriterija, ali u osnovi je proces statističkog mjerenja koji se temelji na prethodnom znanju o očekivanim karakteristikama radio kanala. Vrijeme potrebno za mjerenje kvalitete radio veze i točnost mjerenja ovisi o lokalnim karakteristikama propagacije radio valova koji se šire u prostoru sukladno trima mehanizmima: refleksiji, difrakciji i raspršenju. [1]

- Refleksije nastaju kada radio valovi upadnu na površinu velikih dimenzija u usporedbi s valnom duljinom; radio val se odbija od površinu s kutom odstupanja jednakim upadnom kutu, dok amplituda i faza reflektiranog vala ovisi o karakteristikama površine.
- Do difrakcije dolazi prema Huygens-Fresnelovom principu kada postoji prepreka između odašiljača i prijammnika, a sekundarni valovi se generiraju iza ometajućeg tijela.
- Do raspršenja dolazi kada radio valovi upadaju na objekt čije su dimenzije veličine valne duljine ili manje, te uzrokuje preusmjerenje energije u mnogim smjerovima.

Metrike za mjerenje kvalitete veze koje zahtjevaju puno vremena će ograničiti sposobnost celularnog sustava da reagira na promjene u kvaliteti i nadoknadi ih tako što će promijeniti skup poslužujućih baznih postaja i raspodijeliti resurse snage i propusnosti bazne i mobilne postaje. U suprotnom, ako se mjerenje kvalitete može brzo obaviti, vrijeme potrebno celularnom sustavu da obradi mjerenje, donese odluku i pošalje željene promjene na mrežne entitete, uključujući i mobilne postaje, poboljšat će prilagodljivost celularnog sustava. Ograničenja brzine mjerenja kvalitete i kontrole mreže bitno određuje ukupnu kvalitetu veze te veličinu i distribuciju ćelija u celularnim sustavima. Veličine ćelija, sposobnost radio veza da podnose smetnje i sposobnost celularnog sustava da reagira na promjene u prometu glavni su čimbenici koji određuju efikasnost spektra celularnog sustava. [1]

Osnovni koncept celularnog radio sustava je ponovna upotreba iste frekvencije (*eng. frequency reuse*) pri čemu korisnici na različitim geografskim lokacijama mogu istovremeno

koristiti isti frekvencijski kanal. Time se povećava efikasnost spektra, međutim, ako sustav nije pravilno dizajniran, može doći do interferencije.

Razvijeno je pet generacija mobilnih mreža:

- Mobilna mreža prve generacije, 1G (*eng. First Generation Mobile Network*)
- Mobilna mreža druge generacije, 2G (*eng. Second Generation Mobile Network*)
- Mobilna mreža treće generacije, 3G (*eng. Third Generation Mobile Network*)
- Mobilna mreža četvrte generacije, 4G (*eng. Fourth Generation Mobile Network*)
- Mobilna mreža pete generacije, 5G (*eng. Fifth Generation Mobile Network*)

2.1. 1G mreža

Prva generacija (1G) mobilne telefonije se zasnivala na FDMA (*eng. frequency division multiple access*) pristupnoj tehnici i analognoj FM tehnologiji. S FDMA tehnikom postoji jedan kanal po radio frekvencijskom nositelju. Kad korisnik pristupi mreži, dva su nositelja (kanala) dodijeljena, jedan za uzlaznu vezu, mobilni uređaj – bazna postaja (*eng. base-to-mobile*) i jedan za silaznu vezu, bazna postaja – mobilni uređaj (*eng. mobile-to-base*). Razdvajanje nosećih frekvencija u uzlaznoj i silaznoj vezi potrebno je kako bi se omogućila implementacija dupleksera i primjena filtara koji izoliraju kanale u silaznoj i uzlaznoj vezi i tako sprječava radio primopredajnik da ometa sam sebe. 1G tehnologija dolazi s puno nedostataka: pokrivenost je loša i kvaliteta zvuka niska, različiti sustavi su radili na različitim frekvencijama pa nije bilo kompatibilnosti među sustavima. 1G sustavi više nisu u upotrebi.

2.2. 2G mreža

Za razliku od analogne 1G mreže koja je omogućavala samo prijenos glasovnog signala, 2G mreža, uz govor, omogućuje i prijenos podataka u obliku SMS i MMS poruka te e-pošte s velikim kapacitetom i pokrivenošću.

GSM (*eng. Global System for Mobile Communications*) koristi TDMA (*eng. time division multiple access*) tehniku te digitalizira i komprimira podatke koje zatim šalje niz kanal s dva druga toka korisničkih podataka, svaki u svom vremenskom slotu. GSM mreža se sastoji od četiri dijela: mobilni uređaj korisnika, podsustav bazne postaje (*eng. the Base Station Subsystem, BSS*), komutacijski podsustav (*eng. Network Switching Subsystem, NSS*) i operacijski podsustav (*eng. Operation and Support Subsystem, OSS*). Mobilni uređaji spajaju se na mrežu putem SIM (*eng. Subscriber Identity Module*) kartice koja pruža mreži identifikacijske podatke o korisniku. BSS upravlja prometom između mobitela i NSS-a. Sastoji se od dvije glavne komponente: bazne primopredajne stanice (*eng. Base Transceiver Station, BTS*) i kontrolera bazne stanice (*eng. Base Station Controller, BSC*). BTS sadrži opremu koja komunicira s mobilnim telefonima, uglavnom radijske odašiljače i antene, dok BSC komunicira s grupom baznih primopredajnih stanica (BTS)

i kontrolira ih, te povezuje s NSS. Mobilni operateri posjeduju NSS, koji se često naziva jezgrena mreža (*eng. core network*), i koji prati lokaciju pozivatelja kako bi se omogućila isporuka mobilnih usluga. [1]

GSM podržava glasovne operacije pune brzine (8 slotova po nositelju) i polovične brzine (16 slotova po nositelju) te pruža razne sinkrone i asinkrone podatkovne usluge pri 2.4, 4.8 i 9.6 kb/s. GSM koristi TDMA tehniku sa širinom frekvencijskog kanala od 200 kHz, zatim koristi osam kanala po nositelju s trajanjem vremenskog slota (intervala) od 0.577 ms i GMSK (*eng. Gaussian minimum shift keying*) modulaciju s brzinom prijenosa od 270.8 kb/s. Razvijene su i varijante GSM-a za rad frekvencijskog pojasa na 900 MHz i 1800 MHz u Europi, te na 850 MHz i 1900 MHz u Sjevernoj Americi. *GSM Release '97* verzija GSM-a pruža brzine prijenosa podataka do 140 kb/s i naziva se *General Packet Radio Service (GPRS)*. Verzija *GSM Release '99* uvodi veću brzinu prijenosa podataka, do 473.6kb/s, korištenjem nekodirane 8-PSK modulacije. Ovo poboljšanje se naziva *Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)*. [1]

2.3. 3G mreža

3G mreža kombinira aspekte 2G mreže s novim tehnologijama i protokolima kako bi isporučila znatno veću brzinu prijenosa podataka te predstavlja sveprisutan sustav koji podržava glasovnu, multimedijску i brzu podatkovnu komunikaciju. 3G mreža koristi UMTS (*eng. Universal Mobile Telecommunications System*) tehnologiju kao svoju osnovnu mrežnu strukturu. Premda, u odnosu na 2G, UMTS zahtjeva korištenje novih baznih postaja i frekvencijskog područja, UMTS je usko povezan s GSM/EDGE jer posuđuje i gradi na GSM konceptima. Stoga, većina UMTS uređaja podržava GSM mrežu, omogućujući time besprijekoran rad u dva načina rada. Nadalje, UMTS uključuje WCDMA (*eng. Wideband Code Division Multiple Access*) tehniku koja koristi uparene kanale širine pojasa od 5 MHz i BPSK i QPSK modulacije te može podržavati vršne brzine prijenosa podataka do 384 kbit/s, uzlazno i silazno, za uređaje *Release '99* verzije GSM-a. Novija inačica UMTS-a iz 2006. godine koristi HSPA (*eng. High Speed Packet Access*) tehniku koja omogućuje vršnu brzinu prijenosa u silaznoj vezi (*eng. downlink*) od 14 Mbit/s, a vršnu brzinu prijenosa u uzlaznoj vezi (*eng. uplink*) od 5.8 Mbit/s. Najnovija inačica iz 2014. godine, *WCDMA Release 11*, teoretski može postići brzine prijenosa do 337 Mbit/s u silaznoj vezi i 34 Mbit/s u uzlaznoj vezi koristeći tehnologije s više ulaza i više izlaza (MIMO, *eng. multiple-input multiple-output*) i modulacijske sheme visokog reda, ali te se razine prijenosa rijetko realiziraju i većina HSPA+ mreža osigurava 168 Mbit/s u silaznoj vezi i 22 Mbit/s u uzlaznoj vezi. [1]

2.4. 4G mreža

4G mreža donosi puno veće brzine prijenosa podataka u odnosu na 3G mrežu, a ključne tehnologije koje 4G koristi su MIMO i OFDM (*eng. Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) te su WiMAX (*eng. Worldwide Interoperability for Microwave Access*) i LTE (*eng. Long Term Evolution*) najvažniji 4G standardi. Ova generacija mobilne mreže omogućuje: nominalnu vršnu brzinu prijenosa podataka od 100 Mbps pri velikoj mobilnosti i 1 Gbps za stacionarna okruženja, brzinu prijenosa podataka od najmanje 100 Mbps između bilo koje dvije točke svijeta, fleksibilnu širinu kanala, između 1.4 i 20 MHz, po izboru do 40 MHz, učinkovitost

širine frekvencijskog pojasa do 15 bit/s/Hz u silaznoj vezi i 6.75 bit/s/Hz u uzlaznoj vezi i učinkovitost spektra do 3 bit/s/Hz/ćeliji u silaznoj vezi. [1]

4G LTE je IP (*eng. Internet Protocol*) tehnologija koja koristi OFDMA na silaznoj vezi i SC-FDMA na uzlaznoj vezi. Ima pet glavnih značajki: agregacija nositelja (*eng. carrier aggregation*), povećani MIMO, koordinirani višeodredišni prijenos (*eng. coordinated multipoint transmission*) ili kooperativni MIMO, podrška za heterogene mreže (HetNet) i releji. Agregacija nositelja kombinira do pet kanala od 20 MHz u jedan radi povećanja brzine prijenosa podataka. Moguća je vršna brzina prijenosa u silaznoj vezi od 1Gbit/s uz maksimalnu 8x8 MIMO konfiguraciju, 64QAM i širinu pojasa od 100 MHz. Poboľjšana inačica, LTE-A Pro, može prenositi podatke brzinama do 3 Gbit/s. [1]

2.5. 5G mreža

5G mreže utemeljene su na LTE-A i LTE-A Pro tehnologiji te koriste OFDM tehniku i rade i na visokim frekvencijama, tzv. radio milimetarskim pojasevima u rasponu od 30 do 300 GHz. Omogućuju brzinu prijenosa do 10 Gbps sa submilisekundskim kašnjenjima i vremenom odziva i pružaju vrlo visoku pouzdanost. Koristeći male ćelije, implementacija 5G mreže s nositeljima u području milimetarskih valova može poboljšati ukupnu površinu pokrivanja, a u kombinaciji s oblikovanjem antenskog snopa, male ćelije mogu pružiti iznimno brzo pokrivanje s malom latencijom (kašnjenjem). Upravo je niska latencija jedna od najvažnijih značajki 5G mreža. 5G pruža veću sigurnost u odnosu na 4G i omogućuje masivno povezivanje i ogroman kapacitet. U svrhu povećanja kapaciteta koristi MIMO tehnologiju s prostornim diverzitetom uz korištenje većeg broja prijemnih i odašiljačkih antena. Nadalje, 5G pruža sve veću raznolikost aplikacija niske i visoke brzine prijenosa podataka s različitim QoS (*eng. Quality of Service*) zahtjevima. Radio sućelja mogu istodobno raditi u različitim frekvencijskim pojasevima što omogućava raspodjelu podataka prilikom slanja i primanja kroz dva različita komunikacijska kanala. Veća je energetska učinkovitost čime se produljuje trajanje baterije uređaja koji se spaja na 5G mrežu.

Prema [2]¹, glavne osobine 5G mreže će biti „mogućnost softverske rekonfiguracije koja će omogućiti dinamičko mijenjanje funkcionalnosti uređaja u skladu s različitim standardima te na taj način utjecati na znatno sniženje troškova izgradnje takve opreme. Komunikacijski sustav će puno efikasnije upravljati kapacitivnim preopterećenjima u mreži. Istovremeno će doći do integracije različitih tehnologija kao što su nanotehnologija, komunikacija u oblaku, inteligentni radio („*cognitive radio*“) te sveprisutna paketna IP tehnologija u arhitekturi same mreže.“

¹ B. Burazer, *Budućnost mobilnih komunikacija i izazovi normizacije*

3. OCJENA KVALITETE GOVORNOG SIGNALA U MOBILNIM MREŽAMA

3.1. Metode ocjene kvalitete govornog signala

Budući da kvaliteta govornog signala predstavlja vrlo važnu komponentu kvalitete pružanja usluga operatera mobilnih mreža te utječe na iskustvo korisnika, bitno je pronaći efikasni način mjerenja kvalitete govornog signala pri prijenosu mobilnim mrežama. Kako bi operateri mobilnih mreža mogli garantirati određenu razinu kvalitete isporučenog govornog signala krajenjem korisniku i kako bi se moglo potvrditi da je pružena obećana razina kvalitete, tijekom godina su razvijene različite metode ocjene kvalitete govornog signala.

Najopćenitija podjela metoda za ocjenu kvalitete govornog signala je podjela na subjektivne i objektivne metode. Subjektivne metode koriste ljude, tj. slušatelje, dok objektivne metode koriste računalne algoritme u svrhu ocjene kvalitete govornog signala. Rezultati subjektivnih metoda koriste se kao referenca za ispitivanje performansi objektivnih metrika, a objektivne metode eliminiraju potrebu za ljudskim resursima.

3.2. Subjektivne i objektivne metode

Subjektivne metode ocjene kvalitete govornog signala koriste subjekte – skupinu slušatelja (barem 6 osoba)[3], koji ocjenjuju kvalitetu govornog signala koji je izobličen na odgovarajući način. Kako bi se provela ova metoda ocjene kvalitete govornog signala, subjekte je potrebno smjestiti u neakustičnu ili poluakustičnu prostoriju. Subjekti zatim slušaju pojedinačne uzorke signala koji su izobličeni različitim pozadinskim šumovima i tehnikama kodiranja s niskom brzinom prijenosa. Subjektivne metode se općenito mogu podijeliti u dvije kategorije: apsolutne metode ocjenjivanja (*eng. absolute-based rating methods*) i usporedne metode ocjenjivanja (*eng. comparison-based rating methods*).

Kod apsolutne metode se od ispitanika traži da ocijene kvalitetu govornog signala samo na temelju iskrivljenih uzoraka govornog signala, bez pristupa referentnom uzorku signala. Ocjena kvalitete prati ACR (*eng. Absolute Category Rating*) metodu koja mjeri percipiranu kvalitetu govora umjesto stupnja smetnji koje se pojavljuju u uzorku. Subjekti ocjenjuju kvalitetu uzorka signala tako da daju ocjenu na ljestvici od 1 do 5 (*5 – odlično, 4 – vrlo dobro, 3 – dobro, 2 – loše, 1 – vrlo loše*). Na kraju testa se izračunava prosječna subjektivna ocjena – MOS (*eng. Mean Opinion Score*), koja kvantificira opaženu kvalitetu govora u danim uvjetima.

Jedan od načina provođenja ove metode je da subjekti slušaju uzorak signala tri puta gdje se svaki put trebaju usredotočiti na drugačiji dio uzorka. Za prvu polovicu uzoraka od ispitanika se traži da se usredotoče na kvalitetu govora samo tijekom prve reprodukcije, na pozadinske smetnje tijekom druge reprodukcije i ukupnu kvalitetu uzorka tijekom treće reprodukcije. Za drugu polovicu uzoraka, od ispitanika se traži da prosude pozadinske smetnje tijekom prve

reprodukcije, kvalitetu govora tijekom druge reprodukcije i ukupnu kvalitetu uzorka tijekom treće reprodukcije. Redosljed reprodukcije uzoraka je nasumičan, a subjekti pri svakom od slušanja ocjenjuju uzorak koristeći se metodom srednje subjektivne ocjene – MOS, koja se provodi na način da subjekti daju ocjenu na ljestvici od 1 do 5 (5 – *odlično*, 4 – *vrlo dobro*, 3 – *dobro*, 2 – *loše*, 1 – *vrlo loše*). [4]

Kod usporedne metode subjekti slušaju i referentne i iskrivljene sekvence govora. Postoje dva načina ocjenjivanja kod ove metode: DCR (*eng. Degradation Category Rating*) i CCR (*eng. Comparison Category Rating*).

Kod DCR-a, subjektima se predstavljaju četiri para referentnih govornih signala odmah nakon kojih slijedi iskrivljeni signal. Od subjekata se zatim traži da procijene stupanj iskrivljenosti iskrivljenog signala u odnosu na referentne signale. Rezultat koji se dobije ovim načinom ispitivanja se zove DMOS (*eng. Differential Mean Opinion Score*).

Kod CCR-a, subjektima se proizvoljnim redosljedom predstavljaju četiri para referentnih i iskrivljenih uzoraka govornih signala. Zatim se od subjekata traži da procijene stupanj poboljšanja ili pogoršanja kvalitete govora predstavljenih uzoraka signala. Rezultat dobiven ovim načinom ispitivanja se zove CMOS (*eng. Comparison Mean Opinion Score*). CCR, za razliku od DDR-a, omogućuje kvantifikaciju obrade govornog signala koja poboljšava kvalitetu govora referentnog signala. [3]

Za razliku od subjektivne metode gdje ljudi ocjenjuju kvalitetu govornog signala, objektivna metoda koristi matematičke modele koji algoritamski uspoređuju uzorke čistog i iskrivljenog govornog signala s ciljem da se automatski predvidi kvaliteta govornog signala te ukloni subjektivnost slušatelja i potreba za ljudskim resursima. Rezultati subjektivne metode koriste se kao referenca za ispitivanje performansi objektivnih metrika. Neke od objektivnih metrika koje se koriste za ocjenu kvalitete govornog signala su:

- PSQM
- PESQ
- PESQM
- POLQA
- 3SQM

U usporedbi subjektivne i objektivne metode, subjektivna metoda daje preciznije rezultate, ali zahtjeva i puno više vremena, truda i ljudskih resursa potrebnih za provedbu takve metode. Subjektivna metoda je također zahtjevnija i u pogledu opreme potrebne za uspješnu provedbu ocjene kvalitete govora što u konačnici povećava i cijenu.

3.3. Pregled objektivnih metrika za mjerenje kvalitete govornog signala

Modeli koji se koriste za objektivno mjerenje kvalitete govornog signala se dijele u tri kategorije: modele kojima je osnova signal (*eng. signal-based models*), modele koji se temelje na parametrima signala i sustava (*eng. parametric models*) te hibridne modele. Modeli temeljeni na signalu koriste ulazne glasovne signale izmjerene na električnim ili akustičkim sučeljima prijenosnog kanala, parametarski modeli ovise o parametrima signala i sustava procijenjenima tijekom planiranja mreže ili u vrijeme izvođenja, dok su hibridni modeli kombinacija prethodna dva. Za potrebe ovog rada koristit će se modeli temeljeni na ulaznim signalima.

Modeli koji se temelje na signalima koriste govorne signale koji se prenose ili na drugi način modificiraju sustavima za obradu govora kako bi se procijenila kvaliteta. Postoje dvije kategorije: modeli koji zahtijevaju i referentne i iskrivljene uzorke signala (*eng. full-reference*) i modeli koji zahtijevaju samo iskrivljene uzorke signala za procjenu kvalitete (*eng. reference-free*). *Reference-free* metode ne koriste referentni signal, a ocjena kvalitete se izračunava samo pomoću parametara prenesenog uzorka. Mana takvih metoda u odnosu na *full-reference* metode je što imaju nižu točnost i pouzdanost.

PSQM (*eng. Perceptual Speech Quality Measure*) je *full-reference* metrika koja mjeri izobličenje govornog signala uzimajući u obzir ljudsku percepciju i obradu govora. PSQM koristi algoritam koji određuje koliko primljeni audio uzorak zvuči poput referentnog uzorka uzimajući u obzir karakteristike ljudskog slušnog sustava. Ovu metriku je ITU-T 1996. godine uvrstila u preporuku “*Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codecs. ITU-T Recommendation P.861*“ ,[5].

PESQ (*eng. Perceptual Evaluation of Speech Quality*) je najrasprostranjeniji *full-reference* model koji procjenjuje kvalitetu govornog signala za uskopojasne (NB, *eng. narrow-band*) govorne signale. Premda je ova metrika bazirana na PSQM-u, PESQ dolazi s poboljšanim performansama za mreže s komutiranim paketima korištenjem boljeg algoritma za usklađivanje vremena i drugačijeg, percepcijski ovisnog načina rada. Ovu metriku je ITU-T 2000. godine uvrstila u preporuku “*Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. ITU-T Recommendation P.862*“ ,[5].

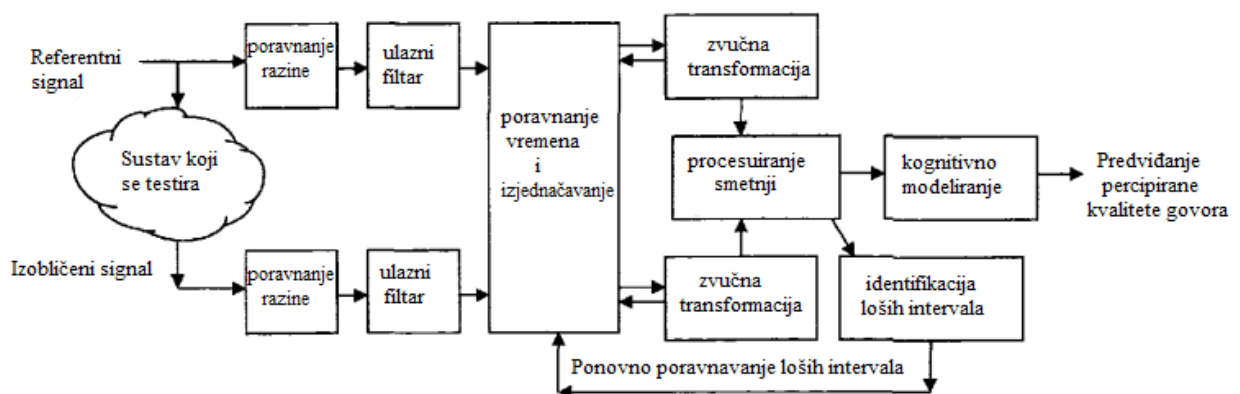
POLQA (*eng. Perceptual Objective Listening Quality Assessment*) je *full-reference* metrika koja, za razliku od PESQ metrike, procjenjuje kvalitetu uskopojasnih (NB) i širokopojasnih (SWB, *eng. superwide-band*) signala i specifična iskrivljenja poput izobličenja frekvencije koje uvodi korisnički terminal i neoptimalne razine slušanja. Ovu metriku je ITU-T 2011. godine uvrstila u preporuku “*Perceptual Objective Listening Quality Assessment. ITU-T Recommendation P.863*“ , [6].

PESQM (*eng. Perceptual Echo and Sidetone Quality Measure*) je metrika bazirana na PESQ metrici. PESQM uzima u obzir utjecaj iskrivljenja signala kao što su jeka govornika i aditivni šum na govornikovu percepciju vlastitog glasa.

3SQM (*eng. Single Sided Speech Quality Measure*) je *reference-free* metoda za mjerenje kvalitete govornog signala koja je utemeljena na modelu ljudskog vokalnog trakta i ljudskoj percepciji abnormalnosti u glasovnom signalu. Sastoji se od tri odvojena dijela koji imaju različite metode izračuna ocjene kvalitete. U prvom dijelu se u uzorku signala izračunavaju parametri kao što su omjer signala i šuma (SNR, *eng. Signal-to-Noise Ratio*) i prigušenje. Raspon vrijednosti ovih parametara se zatim koristi za procjenu MOS-a. U drugom dijelu se ponovno računaju dijelovi uzorka koji nedostaju, uzorak se filtrira i dalje regulira. Ovaj pročišćeni uzorak se zatim, zajedno s izvornim uzorkom, koristi kao ulazni signal za pojednostavljeni PESQ (bez vremenskog poravnanja), a njegov je izlaz procjena MOS-a. U trećem dijelu LPC (*eng. Linear Predictive Coding*) model ljudskog vokalnog trakta pokušava izgovoriti iskrivljeni uzorak, a rezultat se uspoređuje s izvornim uzorkom. Sve različito u izvornom uzorku se smatra neprirodnim za ljudske glasnice i smatra se štetom uzrokovanom pri prijenosu uzorka. Zbroj ove dodane smetnje se u konačnici koristi za izračun MOS-a. [7]

3.3.1. PESQ

PESQ (*eng. Perceptual Evaluation of Speech Quality*) je metrika koja računa kako korisnik mobilne mreže doživljava kvalitetu prijenosa govora u mreži, [5]. To radi na način da deformirani govorni signal uspoređuje sa originalnim, nedeformiranim signalom – referentnim signalom, i pri tome daje točna predviđanja subjektivne kvalitete u širokoj lepezi uvjeta, uključujući signale popraćene pozadinskim šumom, analognim filtriranjem i/ili promjenjivim kašnjenjem. PESQ algoritam je tako pogodan za mnoge primjene u procjeni kvalitete govora u telefonskim mrežama. Algoritam radi na način da prvo poravnava razinu oba signala (izobličeni i referentni) na standardnu razinu slušanja (*eng. standard listening level*). Signali se filtriraju pomoću Fourierove transformacije (FFT, *eng. Fast Fourier Transform*) s ulaznim filtrom kako bi se modelirala standardna telefonska slušalica. Signali se zatim vremenski poravnavaju i obrađuju zvučnom transformacijom. Referentni i odgovarajući izobličeni okviri, u koje se izvorna sekvenca govora dijeli, se zatim transformiraju u psihoakustičnu domenu koja uzima u obzir značajke ljudskog slušnog sustava. Zatim se izračunava i snima zvučno izobličenje između referentnog i izobličenih govornih okvira, a prikupljene vrijednosti izobličenja se kombiniraju kako bi se utvrdio konačan rezultat. Struktura algoritma je prikazana na slici 3.1. [5]



Slika 3.1. prikaz rada PESQ modela

Vremensko poravnanje pretpostavlja da je kašnjenje sustava konstantno te se signali poravnavaju putem sljedećih koraka koji daju procjenu kašnjenja za svaki izgovor (*eng. utterance*) koja se koristi za pronalaženje *frame-by-frame* kašnjenja u zvučnoj transformaciji:

1. Uskopojasni filtar primjenjuje se na oba signala kako bi naglasio percepcijski važne dijelove
2. Procjena kašnjenja bazirana na principu omotača (*eng. envelope*)
3. Podjela referentnih signala u izgovore
4. Identifikacija kašnjenja bazirana na histogramu korelacije za svaki izgovor
5. Dijeljenje i preusmjeravanje izgovora kako bi se testirale promjene kašnjenja tijekom govora.

Zvučna transformacija je psihoakustički model koji signale preslikava u prikaz percipirane glasnoće u vremenu i frekvenciji. Uključuje sljedeće faze:

- *Bark spektar* – FFT transformacija s Hammingovim prozorom (*eng. Hamming window*) se koristi za izračunavanje trenutnog spektra snage u svakom okviru što se zatim grupira u 42 frekvencijska spremnika (*eng. frequency bin*) podjednako raspoređena u percepcijskoj frekvenciji na modificiranoj Bark ljestvici.
- Izjednačavanje frekvencija – izračunava se srednji Bark spektar (*eng. mean Bark spectrum*) za aktivne govorne okvire. Odnos referentnog i izobličenog spektra daje procjenu prijenosne funkcije pod pretpostavkom da sustav koji se ispituje ima konstantan frekvencijski odziv. Referentni signal se izjednačava s izobličenim signalom s ograničenjem izjednačavanja u granicama od ± 20 dB.
- Izjednačavanje varijacije dobitka – za utvrđivanje varijacije dobitka se koristi omjer između zvučne snage referentnog i izobličenog signala u svakom okviru što se zatim filtrira niskopropusnim filtrom prvog reda i ograniči te se nakon toga izobličeni signal izjednačava s referentnim.
- Preslikavanje glasnoće – Bark spektar preslikava se na glasnoću (u sonima), uključujući prag i eksponent ovisne o frekvenciji što daje percipiranu glasnoću u svakoj vremensko-frekvencijskoj ćeliji.

Kod obrade poremećaja i kognitivnog modeliranja, apsolutna razlika između izobličenog i referentnog signala daje mjeru zvučne pogreške koja se obrađuje u nekoliko koraka:

- Brisanje ostavlja odjeljak koji se preklapa u degradiranom signalu. Ako je brisanje dulje od pola okvira, preklapajući dijelovi se odbacuju.
- Maskiranje se u svakoj vremensko-frekvencijskoj ćeliji modelira pomoću jednostavnog praga ispod kojeg su smetnje nečujne. Prag se oduzima od apsolutne razlike u glasnoći, a vrijednosti manje od nule postavljaju se u nulu.
- Asimetrija – PESQ izračunava dva različita prosjeka pogrešaka: jedan s faktorom asimetrije i jedan bez. Faktor asimetrije se izračunava iz stabiliziranog omjera spektralne gustoće Bark spektra iskrivljenih prema referentnim signalima u svakoj vremensko-frekvencijskoj ćeliji. Vrijednosti manje od 3,0 postavljene su na nulu te asimetrični

ponderirani poremećaj (*eng. asymmetric weighted disturbance*), dobiven množenjem s ovim faktorom, mjeri samo aditivna izobličenja.

Pri agregaciji izobličenja u frekvencijskoj i vremenskoj domeni, PESQ metrika integrira smetnje u nekoliko vremensko-frekvencijskih ljestvica koristeći metodu dizajniranu da se optimalno uzme u obzir raspodjela pogreške u vremenu i amplitudi. Vrijednosti smetnji se agregiraju pomoću L_p norme koja računa nelinearni prosjek koristeći formulu 3.1 [5]:

$$L_p = \left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \text{poremećaj}[m]^p \right)^{1/p} \quad (3.1.)$$

Izobličenja se prvo zbrajaju po frekvenciji pomoću L_p norme dajući mjeru percepcije izobličenja okvir-po-okvir. Ovo izobličenje okvira množi se s dvije težine. Prva je obrnuto proporcionalna trenutnoj energiji referentnog signala, dajući malo veći naglasak na dijelovima za koje je referenca tiša. Nakon toga, poremećaj okvira se ograniči gornjom granicom od 45 dB. Drugo ponderiranje daje smanjeni naglasak na početku signala ako je ukupna duljina veća od 16 sekundi, modelirajući učinak kratkotrajne memorije pri subjektivnom slušanju. Ovo ponderiranje množi izobličenje okvira na početku signala s faktorom koji se linearno smanjuje s 1.0 (za datoteke kraće od 16 sekundi) na 0.5 (za datoteke dulje od 60 sekundi). Nakon ponderiranja, određuje se prosječno izobličenje okvira u intervalima od 20 okvira koristeći L_p normu. Na kraju se računa prosjek vrijedosti izobličenja u tim intervalima po duljini govornih datoteka koristeći L_p normu. Prema tome, postupak agregacije koristi tri L_p norme – općenito s različitim vrijednostima p – za preslikavanje izobličenja u jedan broj. Vrijednost p se izabire tako da se daje najveća težina lokaliziranim izobličenjima. Kod simetričnih i asimetričnih izobličenja se prosjek računa odvojeno. [5]

Ponovno poravnavanje loših intervala se provodi jer u određenim slučajevima usklađivanja vremena možda se neće uspjeti ispravno prepoznati promjena kašnjenja što rezultira velikim pogreškama za svaki dio s netočnim kašnjenjem. Identificiraju se označavanjem loših okvira i spajanjem loših dijelova u kojima su loši okviri odvojeni za manje od 5 dobrih okvira. Zatim se svaki loši odjeljak ponovno poravnava i ponovno se računa izobličenje. Za pronalaženje nove procjene kašnjenja se koristi unakrsna korelacija (*eng. cross-correlation*). Ponovno se računa zvučna transformacija degradiranog signala i pronalazi se izobličenje. Za svaki okvir, ako ponovno poravnavanje rezultira nižom vrijednosti smetnje, koristi se nova vrijednost. Na kraju, nakon ponovnog poravnavanja, izvodi se agregacija na intervalu trajanja 20 okvira i na cijelom signalu.

Predviđanje MOS-a

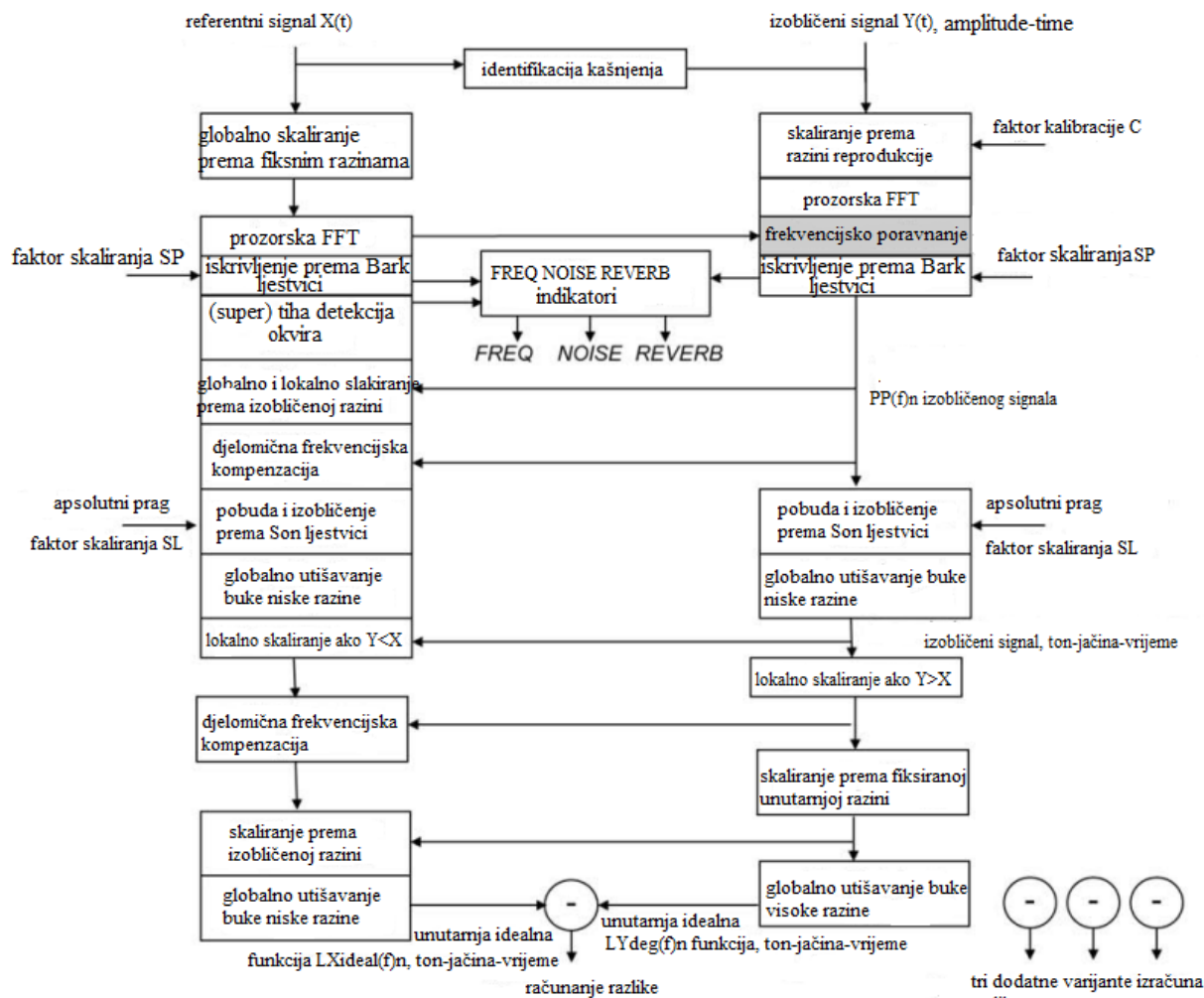
Korištenjem djelomične kompenzacije kod PESQ metrike, izbjegava se potreba za korištenjem velikog broja parametara za predviđanje kvalitete. Kombinacija samo dva parametra – jednog simetričnog izobličenja d_{SYM} , (*eng. symmetric disturbance*) i jednog asimetričnog izobličenja d_{ASYM} , (*eng. asymmetric disturbance*) - daje dobru ravnotežu između točnosti predviđanja i sposobnosti generaliziranja:

$$PESQMOS = 4.5 - 0.1d_{SYM} - 0.0309d_{ASYM} \quad (3.2.)$$

Za normalan materijal za ispitivanje vrijednosti PESQMOS se kreću između 1.0 (loše) i 4.5 (bez izobličenja). U izuzetno velikim izobličenjima PESQMOS može pasti ispod 1.0, ali to se vrlo rijetko događa. [5]

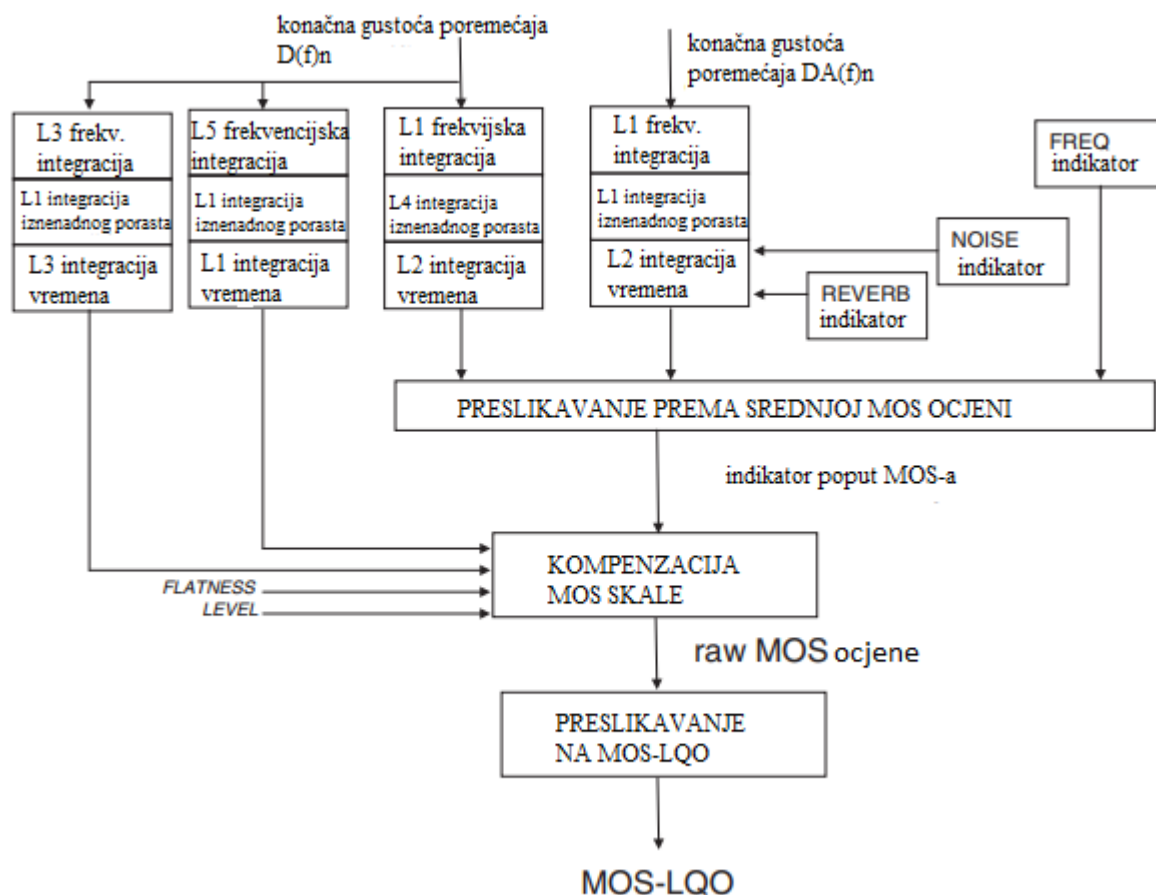
3.3.2. POLQA

POLQA izračunava šest različitih vrijednosti kvalitete koje kombinira u ukupnu procjenu kvalitete govora. Procjena se izračunava u tzv. kognitivnom modelu koji simulira kognitivne procese na visokoj razini. Kognitivni model koristi razliku između dva tzv. unutarnja prikaza idealnog i izobličenog signala za predviđanje percipirane kvalitete govora izobličenog signala. Važna nova ideja implementirana u POLQA-i je pristup idealizaciji koji uklanja nisku razinu šuma u referentnom ulaznom signalu i optimizira ton. Daljnje velike razlike u odnosu na PESQ metriku uključuju modeliranje utjecaja razine reprodukcije na percipiranu kvalitetu signala i veliku podjelu u obradi niske i visoke razine izobličenja. Na slici 3.2. [6] su prikazani referentni ulazni signal $X(t)$ i izobličeni izlazni signal $Y(t)$ koji se skaliraju i računaju se unutarnji prikazi u smislu vremena, tona i jačine, nakon čega se računa funkcija razlike za koju se izračunavaju dvije različite značajke: jedna za ukupni poremećaj koju uvodi testirani sustav i jedna za dodane poremećaje. Nadalje, računavaju se dvije različite značajke funkcije perceptivne razlike (*eng. perceptual difference function*): jedna za sveukupno izobličenje koje uvodi testirani sustav i jedna za dodana izobličenja. Time se modelira asimetrija utjecaja između izobličenja uzrokovanih izostavljanjem vremensko-frekvencijskih komponenti iz referentnog signala i izobličenja uzrokovanih uvođenjem novih vremensko-frekvencijskih komponenti. Obje značajke se izračunavaju putem dva različita pristupa: jedan se fokusira na normalan raspon izobličenja, a drugi na jaka izobličenja što za rezultat daje četiri izračuna funkcija razlike.



Sl.3.2. Proračun unutarnjeg prikaza referentnih i izobličenih signala; izračun četiri funkcija razlike unutarnjih prikaza (predstavljene s četiri kruga sa oznakom -), od kojih je svaka usredotočena na određeni skup izobličenja

Postoje tri pokazatelja kvalitete kod POLQA-e: za izobličenja frekvencijskog odziva (FREQ), aditivni šum (NOISE) i sobnu jeku (REVERB). Sva tri se izračunavaju odvojeno od glavnog pokazatelja smetnji (eng. *main disturbance indicator*) kako bi se omogućila uravnotežena analiza utjecaja na širokom rasponu različitih vrsta izobličenja. Slika 3.3. [6] daje pregled izračuna MOS-LQO (eng. *Mean Opinion Score - Listening Quality Objective*), objektivnog MOS rezultata, iz dvije konačne gustoće smetnji i pokazatelja FREQ, NOISE i REVERB.



Sl. 3.3. Proračun konačne vrijednosti MOS (MOS-LQO) iz konačne gustoće smetnji.

Globalni utjecaj izobličenja frekvencijskog odziva, šuma i sobne jeke se mjeri zasebno za svaki indikator:

- Da bi se procijenio utjecaj izobličenja frekvencijskog odziva neovisno o aditivnom šumu, prosječna spektralna gustoća jakosti izobličenog signala pri tihim okvirima referentnog signala se oduzima od spektralne gustoće jakosti izobličenog signala. Zatim se uzima prosjek rezultirajuće spektralne gustoće jakosti izobličenog signala i spektralne gustoće referentnog signala u svakom Bark pojasu (*eng. bark band*) tijekom svih govorno aktivnih okvira za referentni i izobličeni signal. Tada se razlika između ove dvije spektralne gustoće jakosti signala integrira u visinu tona kako bi se dobio indikator za kvantificiranje utjecaja izobličenja frekvencijskog odziva (FREQ).
- Za utjecaj aditivne buke, pokazatelj se izračunava iz prosječnog spektra degradiranog signala tijekom tihih okvira referentnog signala. Razlika između prosječne spektralne gustoće jakosti degradiranog signala tijekom tihih okvira i nulte referentne spektralne gustoće određuje funkciju spektralne gustoće snage šuma koja kvantificira utjecaj

aditivnog šuma. Tada se funkcija spektralne gustoće snage šuma integrira u visinu tona kako bi se dobio prosječni indikator utjecaja buke (NOISE).

- Za utjecaj sobne jeke, funkcija energije tijekom vremena (ETC, *eng. energy over time function*) se računa iz referentne i izobličene vremenske serije. ETC predstavlja anvelopu impulsnog odziva $h(t)$ sustava $H(f)$ koji je definiran kao: [6]

$$Y_a(f) = H(f) * X(f) \quad (3.3.)$$

gdje je Y_a spektar poravnatog prikaza izobličenog signala, a $X(f)$ spektar referentnog signala. Poravnanje razine provodi se kako bi se suzbile globalne i lokalne razlike pojačanja između referentnog i degradiranog signala. Impulzni odziv $h(t)$ računa se iz $H(f)$ pomoću inverzne diskretne Fourierove transformacije. ETC se računa iz apsolutnih vrijednosti $h(t)$ kroz normalizaciju i odrezivanje (*eng. clipping*) te se na temelju ETC-a pretražuju do tri refleksije. U prvom se koraku izračunava najjači odraz određivanjem maksimalne vrijednosti ETC krivulje nakon izravnog zvuka. Kod POLQA-e se izravni zvuk definira kao svaki zvuk koji stiže unutar 60 milisekundi. Dalje se određuje druga najjača refleksija u intervalu bez izravnog zvuka i ne uzimaju se u obzir refleksije koje stižu unutar 100 milisekundi od najjače refleksije. Zatim se određuje treća najjača refleksija u intervalu bez izravnog zvuka i bez uzimanja u obzir refleksija koje stižu unutar 100 milisekundi od najjače i druge najjače refleksije. Energije i kašnjenja tri najjačih refleksija se na kraju kombiniraju u jedan indikator jeke (REVERB).

Konačna gustoća smetnji $D(f)_n$ i dodanih smetnji $DA(f)_n$ se integriraju po okviru preko tonske osi što rezultira s dvije različite smetnje po okviru: jedna izvedna iz smetnje i jedna izvedna iz dodane smetnje koristeći L_1 integraciju [6]:

$$D_n = \sum_{f=1, \dots, \text{broj Bark pojasa}} |D(f)_n| W_f, \quad (3.4.)$$

s W_f serijom konstanti proporcionalnih sa širinom Bark spremnika (*eng. bin*). Zatim se za ove dvije smetnje po okviru određuje prosjek po šest uzastopnih govornih okvira spojenih u lanac, s L_4 i L_1 integracijom za smetnju, odnosno za dodanu smetnju. [6]

$$DS_n = \sqrt[4]{\frac{1}{6} \sum_{m=n, \dots, n+6} D_m^4} \quad (3.5.)$$

$$DAS_n = \frac{1}{6} \sum_{m=n, \dots, n+6} D_m \quad (3.6.)$$

Na kraju se smetnja i dodana smetnja računaju po datoteci iz L_2 prosjeka tijekom vremena [6]:

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1, \dots, \text{brojokvira}} DS_n^2} \quad (3.7.)$$

$$DA = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1, \dots, \text{brojokvira}} DAS_n^2} \quad (3.8.)$$

$N =$ broj okvira

Pomoću indikatora REVERB i NOISE se kompenzira dodana smetnja za jake refleksije i jak aditivan šum. Dvije smetnje se zatim kombiniraju s indikatorom frekvencije (FREQ) kako bi se dobio unutarnji pokazatelj koji je lineariziran s regresijskim polinomom trećeg reda kako bi se dobio pokazatelj poput MOS-a.

POLQA ocjena izvedena iz MOS-a se dobiva korištenjem četiri različitih kompenzacija: dvije komenzacije za specifične vremensko-frekvencijske karakteristike poremećaja pri čemu se jedna računa pomoću L_5 integracije po frekvenciji i vremenu, a druga pomoću L_3 integracije po frekvenciji i vremenu, zatim, kompenzacija za vrlo niske prezentacijske razine pomoću LEVEL indikatora te kompenzacija za velika izobličenja tona pomoću FLATNESS indikatora u frekvencijskoj domeni. Na kraju se ocjene POLQA MOS-a preslikavaju prema MOS-LQO ocjenama. U uskopojasnom načinu rada maksimalna POLQA MOS-LQO ocjena je 4.5, dok u širokopojasnom načinu rada iznosi 4,75. Važna posljedica procesa idealizacije je da u nekim okolnostima, kada referentni signal sadrži šum ili kada je ton jako izobličen, transparentni lanac neće dati maksimalnu MOS ocjenu u uskopojasnom i širokopojasnom načinu rada. [6]

4. MJERENJE KVALITETE GOVORNOG SIGNALA PRI PRIJENOSU MOBILNIM MREŽAMA

Parametri signala, kao i kvaliteta prijenosa govornog signala u 2G, 3G i 4G mobilnim mrežama može se izmjeriti TEMS Symphony uređajem, a TEMS Investigation programom se može napraviti analiza izmjerenih podataka.

4.1. TEMS Symphony

TEMS Symphony je uređaj koji omogućuje mjerenje performansi u mobilnim mrežama i izravnu usporedbu više mreža tijekom jednog testa. Koristi skripte koje se šalju na više uređaja (mobiteli, modemi, skeneri) koji rade paralelno čime se oponašaju aktivnosti korisnika. Nadalje, TEMS Symphony snima kvalitetu i radio parametre sa stvarnih pretplatničkih uređaja i procjenjuje cijelu mrežu, s kraja na kraj, tako što koristi uređaje i usluge koje koriste korisnici mobilnih usluga kako bi se prikazala prava perspektiva korisničkog iskustva.

Glavne značajke TEMS Symphony uređaja su:

- Raznolikost podržanih uređaja kako bi se moglo uskladiti s ponašanjima pretplatnika.
- Raznolikost usluga i aplikacija koje se mogu testirati.
- Koristi standardizirane algoritme poput PESQ i POLQA metrika za testiranje kvalitete govora te VoIP i VQmon za testiranje streaming usluga.
- Fleksibilno skriptiranje rukuje svakim uređajem posebno i omogućuje dodjeljivanje paralelnih zadataka.
- Odvojivo grafičko korisničko sučelje (*eng. graphical user interface, GUI*) omogućuje korisnicima pregled i analizu podataka na daljinu.
- U sebi ima brze višejezgrene procesore te veliki kapacitet memorije što omogućuje testiranje brzine prijenosa podataka i u 4G LTE tehnologiji.

TEMS Symphony se može kombinirati s drugim TEMS alatima za prikupljanje podataka kao što su: TEMS Pocket, TEMS Automatic, TEMS Investigation.

4.2. TEMS Investigation

TEMS Investigation je alat za rješavanje problema u bežičnoj mreži te provjeru, optimiziranje i održavanje bežičnih mreža. TEMS Investigation omogućuje prikupljanje podataka, analizu u stvarnom vremenu i naknadnu obradu čime predstavlja cjelovito rješenje za sve svakodnevne zadatke koje operator mreže ima pri optimizaciji mreže. Povezuje se s velikim rasponom korisničkih terminala, skenera i opreme za pozicioniranje i prikuplja podatke s tih uređaja te ih snima u log datoteke.

TEMS Investigation podržava sljedeće tehnologije:

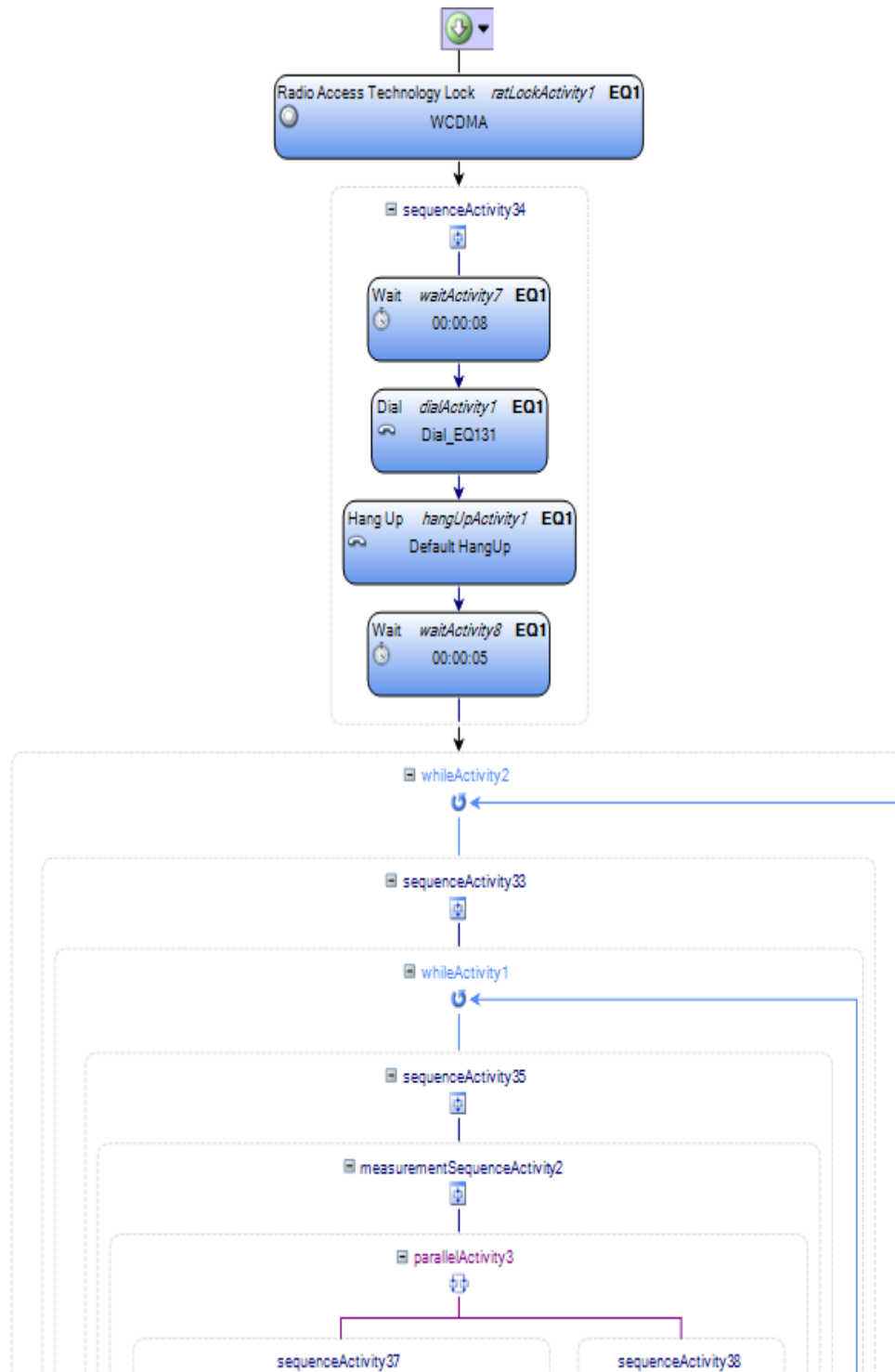
- LTE (FDD i TDD)
- WCDMA/HSPA/HSPA+
- GSM/GPRS/EGPRS
- TD-SCDMA (uključujući interakciju s LTE i GSM)
- EV-DO Rev.B/EV-DO Rev.A/EV-DO Rel. 0/cdma2000/cdmaOne
- Wi-Fi
- WiMAX

4.3. Postupak mjerenja

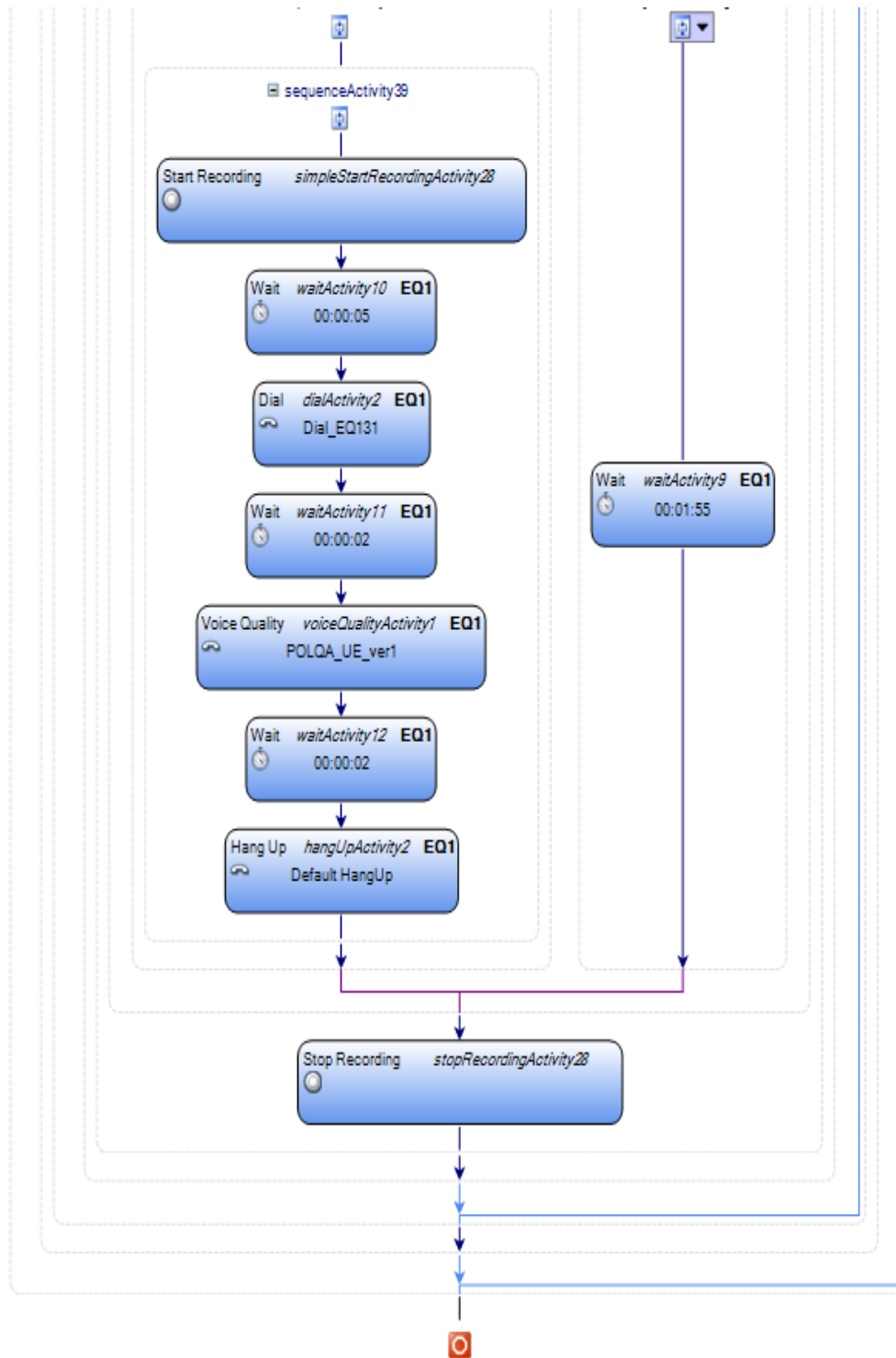
U okviru ovog završnog rada provedeno je mjerenje kvalitete audio signala primjenom TEMS Symphony uređaja. Mjerenje je provedeno s 2 mobilna uređaja, spojena na TEMS Symphony, pri čemu je svaki spojen na vanjsku antenu i ima svoju SIM karticu. Putem Service Control Script Designer programa pripremljene su dvije skripte, koje su tijekom mjerenja poslane na uređaje. Jedna skripta obavlja funkciju poziva, a druga obavlja funkciju odgovora na poziv te je POLQA metrikom izračunata kvaliteta samog poziva na pozivateljskoj i na odgovaralačkoj strani.

Skripta koja se šalje na uređaj koji obavlja poziv – *EQ121*, prikazana je na slikama 4.1. i 4.2. Ona prvo poziva drugi uređaj – *EQ131*, kako bi se uspostavila veza. Nakon toga se odmah prekida poziv i čeka 5 sekundi nakon čega započinje uzastopno zvanje unutar perioda trajanja od 2 sata. Unutar petlje koja traje 2 sata, započinje zapisivanje podataka s uređaja. Nakon uspostave poziva, skriptom se šalju podaci u obliku glasovnih zapisa svake dvije sekunde tri puta za redom i prenose se na uređaj EQ131, te se POLQA metrikom mjeri kvaliteta prijenosa. Mjeri se ocjena

kvalitete za svaki od poslanih glasovnih zapisa posebno, te se na kraju računa prosjek sva tri poslana zapisa. Nakon što je izmjerena kvaliteta, poziv se prekida te je vrijeme čekanja do idućeg poziva jedna minuta i 55 sekundi. Pozivi će se uzastopno izvršavati u periodu trajanja 2 sata nakon čega automatski prestaje zapisivanje podataka.



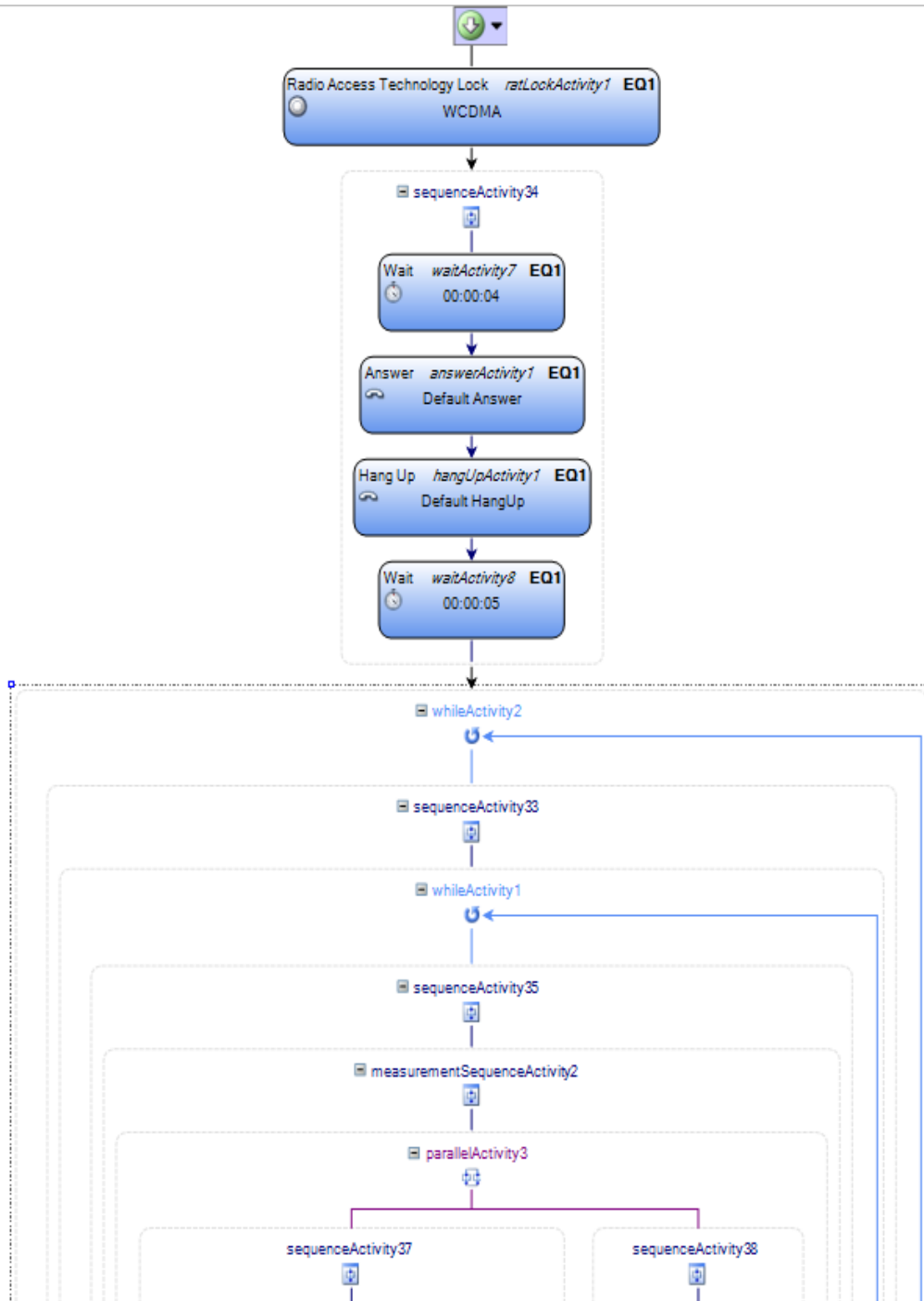
Slika 4.1. Skripta koja se šalje na uređaj koji obavlja poziv: 1. dio



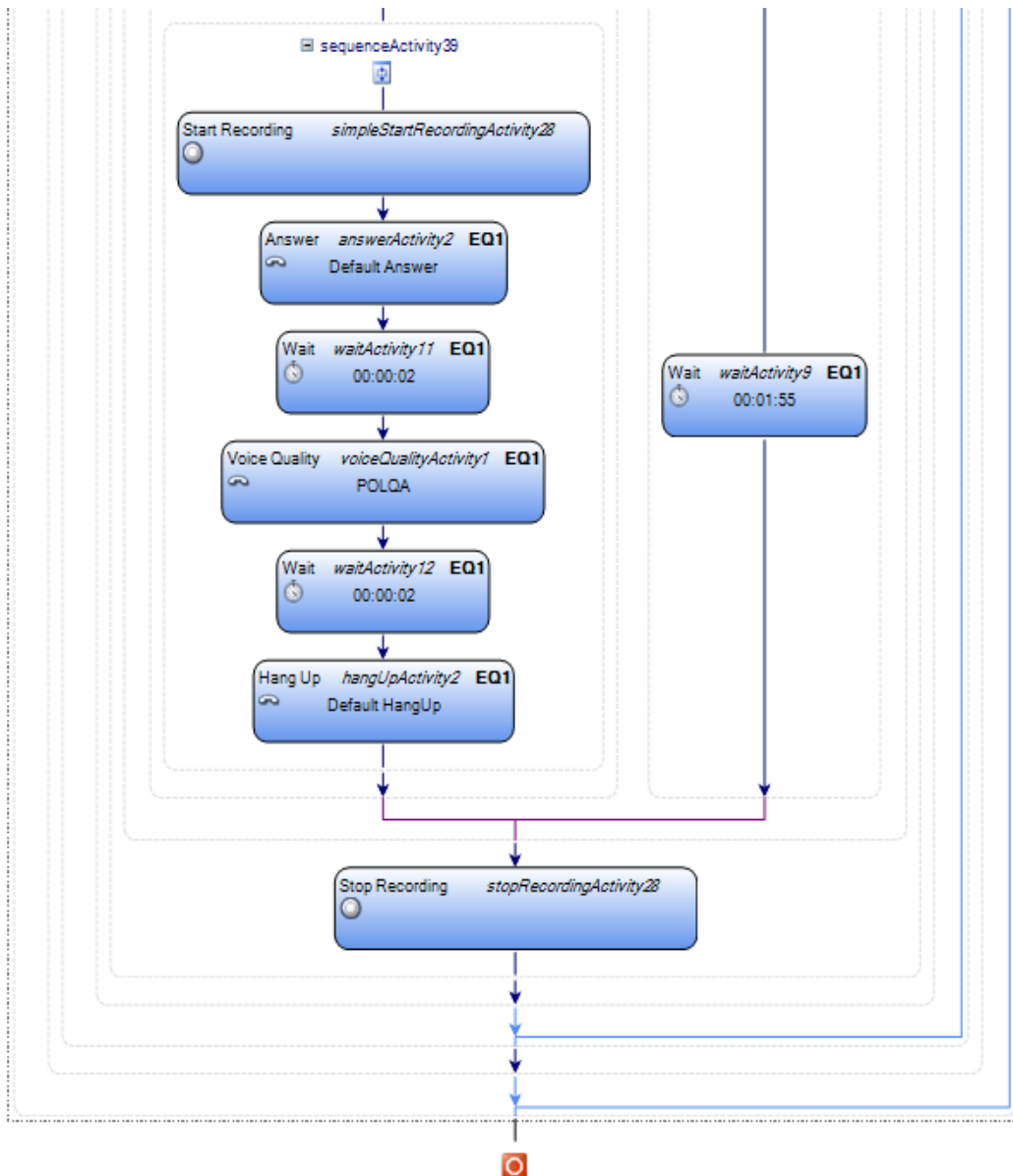
Slika 4.2. Skripta koja se šalje na uređaj koji obavlja poziv: 2. dio

Skripta koja se šalje na uređaj koji odgovara na poziv – *EQ131*, prikazana je na slikama 4.3. i 4.4. Ona prvo prima poziv kako bi se potvrdila uspostava veze nakon čega se odmah prekida poziv i čeka 5 sekundi. Nakon isteka 5 sekundi, započinje petlja u trajanju od 2 sata unutar koje se odvija neprestano odgovaranje na pozive koje uređaj prima sa uređaja pozivatelja

(EQ121). Pri ulasku u petlju, započinje zapisivanje podataka s uređaja. Nakon što se primi poziv, računa se ocjena kvalitete POLQA metrikom za prvi i zadnji primljeni glasovni zapis i na kraju se računa prosijek ocjena oba primljena podatka. Nakon što je ocjena kvalitete izmjerena, poziv se prekida. Ovaj proces se ponavlja svakih 1 minutu i 55 sekundi, te snimanje podataka prestaje nakon 2 puna sata.



Slika 4.3. Skripta koja se šalje na uređaj koji prima poziv: 1. dio



Slika 4.4. Skripta koja se šalje na uređaj koji prima poziv: 2. dio

4.4. Rezultati mjerenja

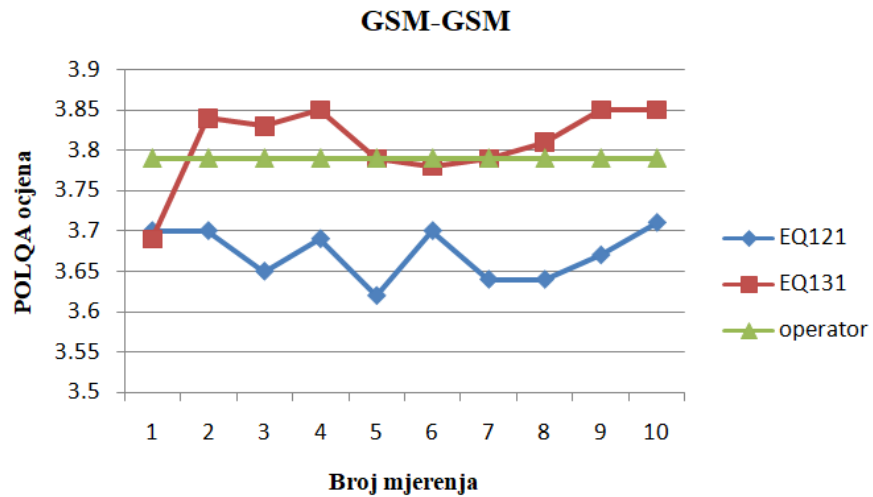
Mjerenja su provedena na 2 uređaja koja su međusobno komunicirala. Prvo je provedeno mjerenje ocjene kvalitete POLQA metrikom pri prijenosu govora s uređaja na uređaj istih tehnologija (GSM-GSM, WCDMA-WCDMA). Nakon toga je provedeno mjerenje tako da je jedan uređaj bio postavljen na jednu tehnologiju, a drugi na drugu. Ocjene kvalitete dobivene kao rezultat mjerenja su prikazane u tablicama od 4.1. do 4.4. Odnos srednjih vrijednosti ocjena

uređaja s kojeg se poziva, uređaja koji prima poziv te ocjene kod operatora prikazan je na slikama 4.5., 4.8., 4.11. i 4.14. Raspršenje rezultata oko srednje ocjene za uređaj koji poziva (EQ121) je prikazano na slikama 4.6., 4.9., 4.12 i 4.15., a raspršenje rezultata oko srednje ocjene za uređaj koji prima poziv (EQ131) je prikazano na slikama 4.7., 4.10., 4.13 i 4.16.

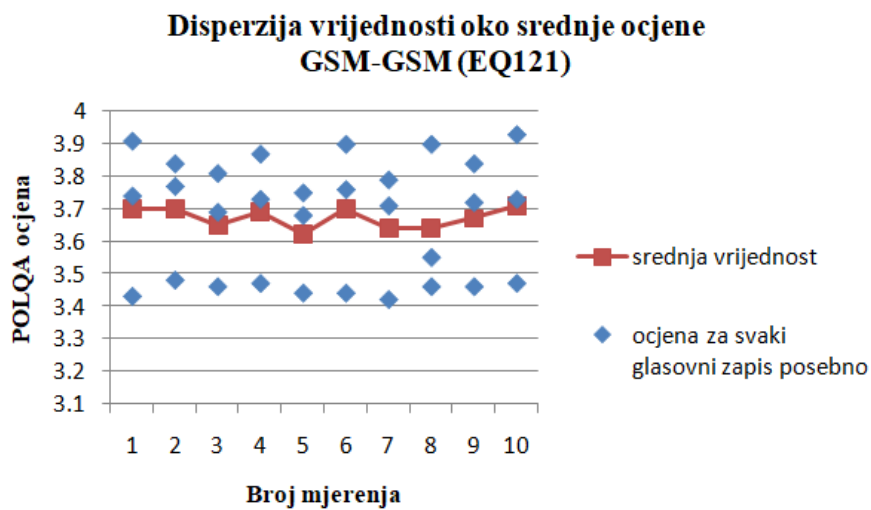
Ocjena kvalitete pri pozivu sa uređaja zaključanog na GSM tehnologiju prema uređaju zaključanom na GSM tehnologiju dana je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Prikaz rezultata dobivenih u GSM-GSM vezi

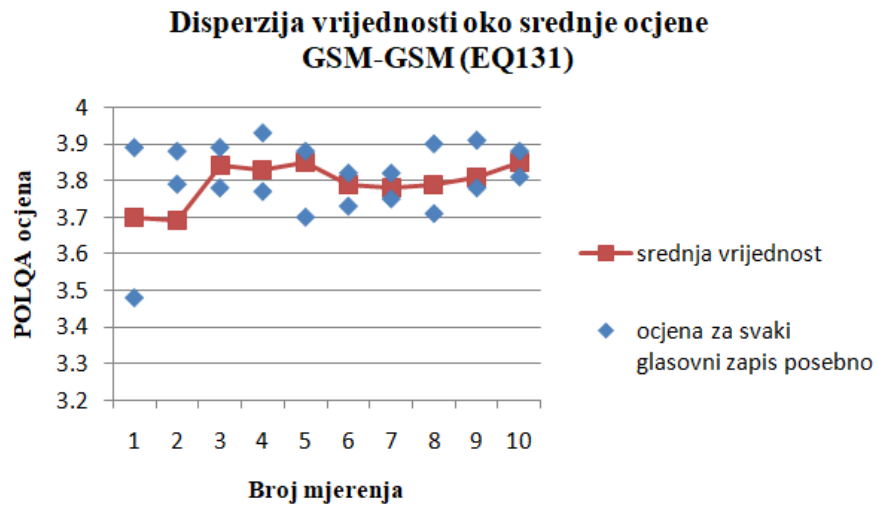
Br. mjerenja	Snaga signala (dBm)	POLQA (EQ121)	POLQA (EQ131)	POLQA – srednja vrijednost (EQ121)	POLQA – srednja vrijednost (EQ131)	POLQA (operator)
1	-81 – -85	3.74, 3.91, 3.43	3.48, 3.89	3.70	3.69	3.79
2	-80 – -85	3.77, 3.84, 3.48	3.79, 3.88	3.70	3.84	3.79
3	-79 – -84	3.69, 3.81, 3.46	3.78, 3.89	3.65	3.83	3.79
4	-82 – -83	3.73, 3.87, 3.47	3.77, 3.93	3.69	3.85	3.79
5	-78 – -82	3.75, 3.68, 3.44	3.70, 3.88	3.62	3.79	3.79
6	-78 – -82	3.76, 3.90, 3.44	3.73, 3.82	3.70	3.78	3.79
7	-80 – -82	3.79, 3.71, 3.42	3.75, 3.82	3.64	3.79	3.79
8	-80 – -84	3.55, 3.90, 3.46	3.71, 3.90	3.64	3.81	3.79
9	-82	3.72, 3.84, 3.46	3.78, 3.91	3.67	3.85	3.79
10	-82 – -83	3.73, 3.93, 3.47	3.81, 3.88	3.71	3.85	3.79



Slika 4.5. Grafički prikaz srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod GSM-GSM veze



Slika 4.6. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod GSM-GSM veze pozivnog uređaja

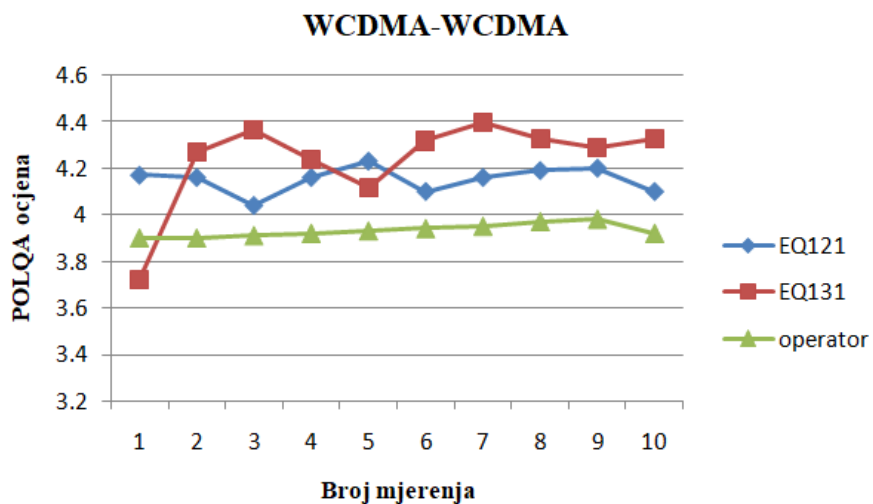


Slika 4.7. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod GSM-GSM veze prijemnog uređaja

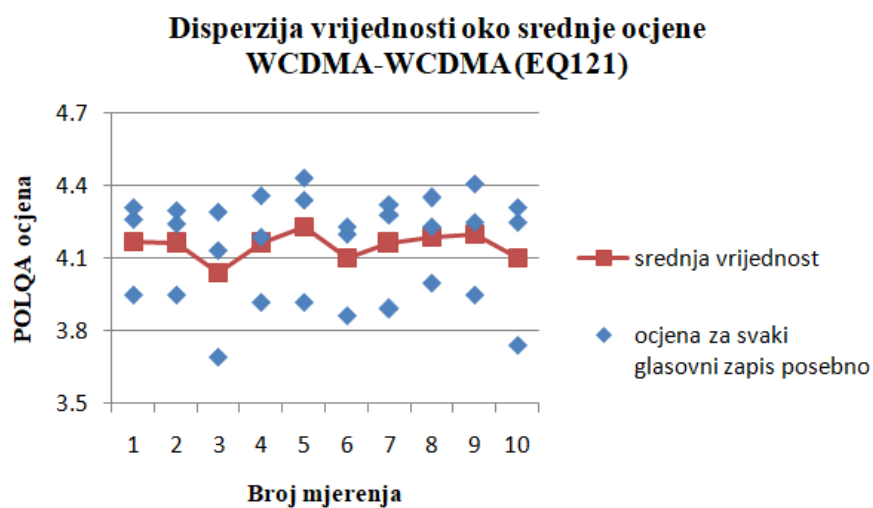
Ocjena kvalitete pri pozivu sa uređaja zaključanog na WCDMA tehnologiju prema uređaju zaključanom na WCDMA tehnologiju dana je u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Prikaz rezultata dobivenih u WCDMA-WCDMA vezi

Br. mjerenja	Ec/No (dB)	POLQA (EQ121)	POLQA (EQ131)	POLQA – srednja vrijednost (EQ121)	POLQA – srednja vrijednost (EQ131)	POLQA (operator)
1	-6.48	4.26, 4.31, 3.95	4.32, 3.11	4.17	3.72	3.90
2	-7.48 – - 10.48	4.24, 4.30, 3.95	4.32, 4.21	4.16	4.27	3.90
3	-6.48 – - 7.48	4.13, 4.29, 3.69	4.38, 4.36	4.04	4.37	3.91
4	-6.98 – - 7.48	4.19, 4.36, 3.92	4.36, 4.12	4.16	4.24	3.92
5	-6.98 – - 7.98	4.34, 4.43, 3.92	4.20, 4.03	4.23	4.12	3.93
6	-7.98 – - 8.48	4.20, 4.23, 3.86	4.25, 4.38	4.10	4.32	3.94
7	-6.98 – - 7.48	4.28, 4.32, 3.89	4.41, 4.39	4.16	4.40	3.95
8	-7.98 – - 12.46	4.23, 4.35, 4.00	4.32, 4.33	4.19	4.33	3.97
9	-6.98 – - 7.98	4.25, 4.41, 3.95	4.36, 4.22	4.20	4.29	3.98
10	-6.98 – - 7.98	4.25, 4.31, 3.74	4.24, 4.30	4.10	4.27	3.92

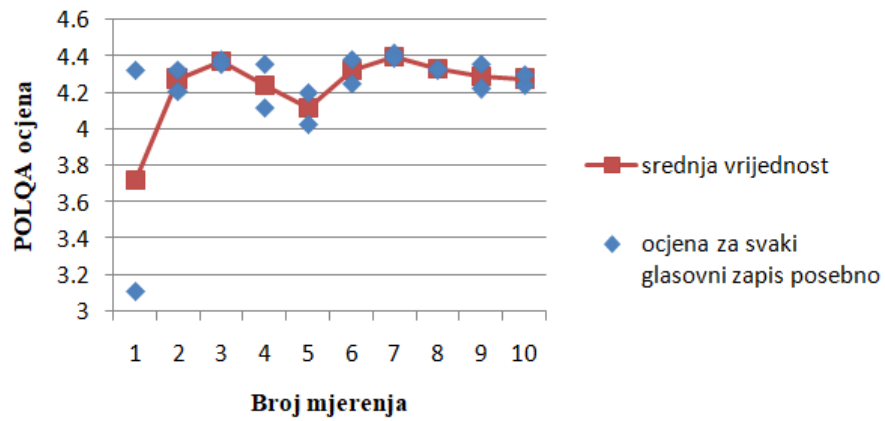


Slika 4.8. Grafički prikaz srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod WCDMA-WCDMA veze



Slika 4.9. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod WCDMA-WCDMA veze pozivnog uređaja

Disperzija vrijednosti oko srednje ocjene WCDMA-WCDMA(EQ131)

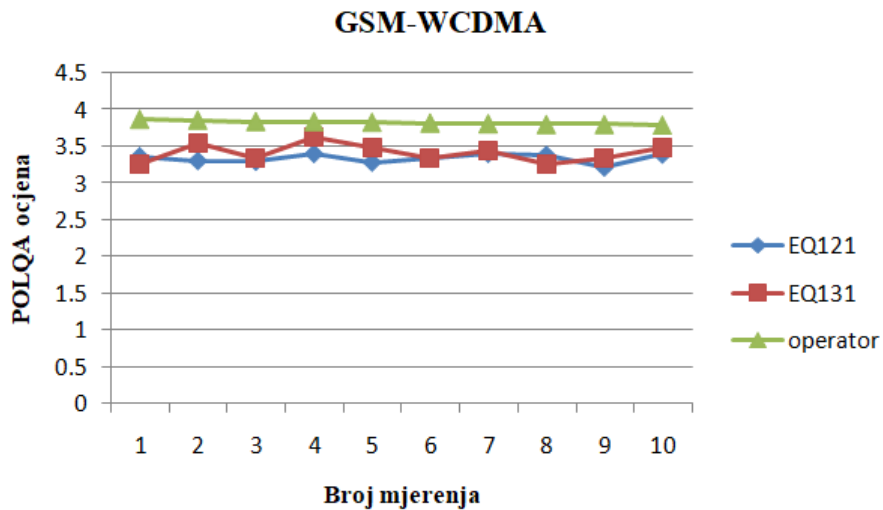


Slika 4.10. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod WCDMA-WCDMA veze prijemnog uređaja

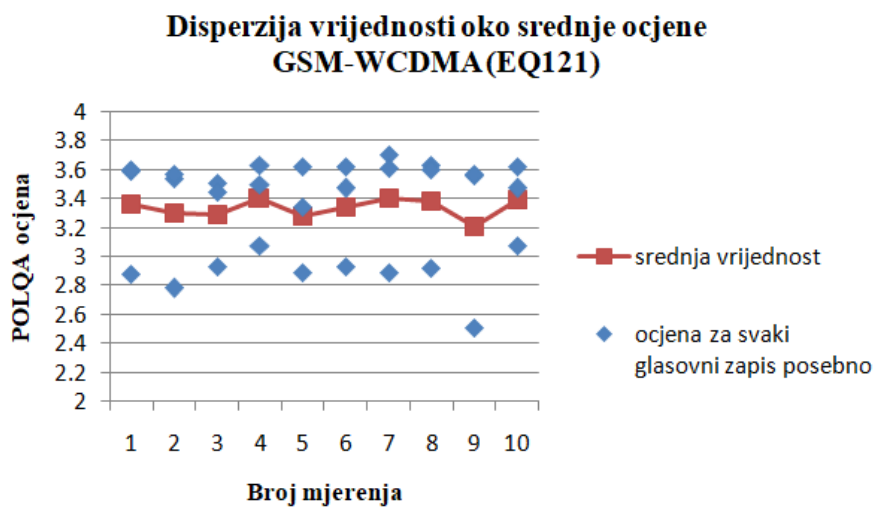
Ocjena kvalitete pri pozivu sa uređaja zaključanog na GSM tehnologiju (EQ121) prema uređaju zaključanom na WCDMA tehnologiju (EQ131) dana je u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Prikaz rezultata dobivenih u GSM-WCDMA vezi

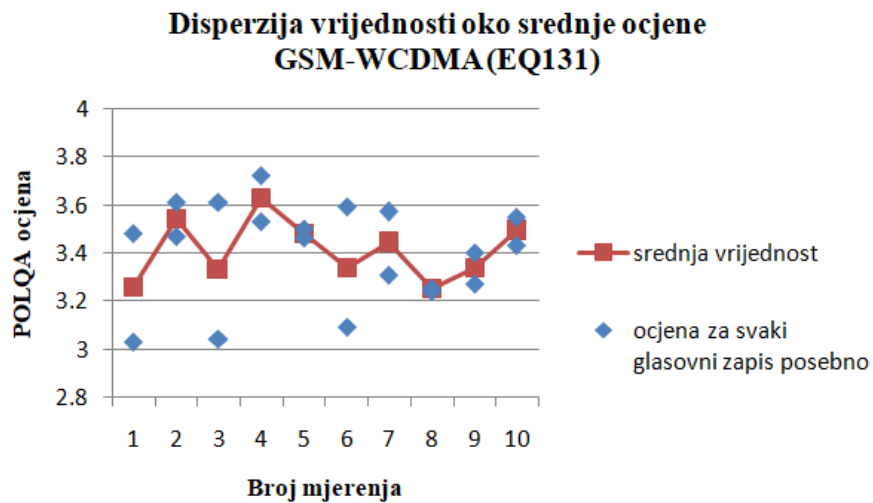
Br. mjerjenja	Ec/No (dB)	POLQA (EQ121)	POLQA (EQ131)	POLQA – srednja vrijednost (EQ121)	POLQA – srednja vrijednost (EQ131)	POLQA (operator)
1	-7.98	3.59, 3.60, 2.88	3.03, 3.48	3.36	3.26	3.86
2	-8.89 – - 9.48	3.54, 3.57, 2.78	3.47, 3.61	3.30	3.54	3.85
3	-9.97 – - 6.48	3.51, 3.44, 2.93	3.04, 3.61	3.29	3.33	3.83
4	-7.48 – - 7.98	3.50, 3.63, 3.07	3.53, 3.72	3.40	3.63	3.83
5	-9.97 – - 12.46	3.34, 3.62, 2.89	3.46, 3.50	3.28	3.48	3.82
6	-5.99 – - 7.48	3.47, 3.62, 2.93	3.09, 3.59	3.34	3.34	3.81
7	-5.99 – - 8.98	3.70, 3.61, 2.89	3.31, 3.57	3.40	3.44	3.80
8	-6.98 – - 10.47	3.63, 3.60, 2.92	3.25, 3.24	3.38	3.25	3.79
9	-9.48 – - 13.11	3.56, 3.57, 2.51	3.27, 3.40	3.21	3.34	3.79
10	-8.98 – - 12.95	3.47, 3.62, 3.07	3.43, 3.55	3.39	3.49	3.78



Slika 4.11. Grafički prikaz srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod GSM-WCDMA veze



Slika 4.12. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod GSM-WCDMA veze pozivnog uređaja



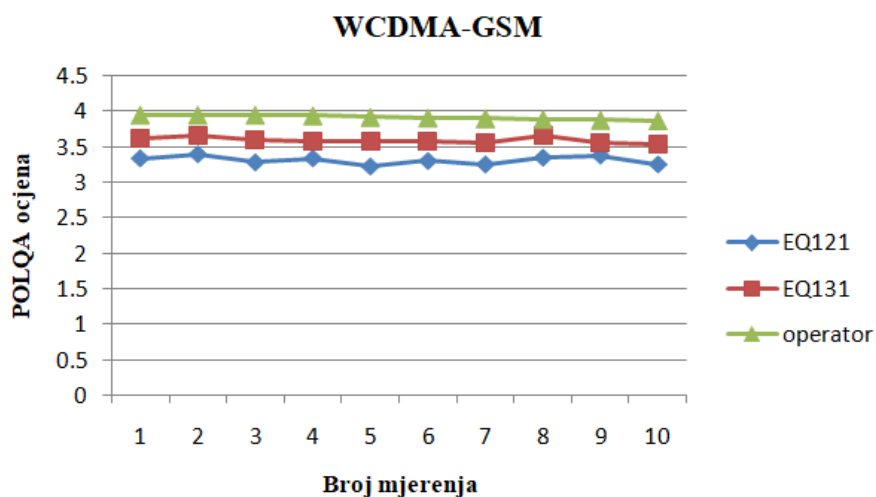
Slika 4.13. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod GSM-WCDMA veze prijemnog uređaja

Ocjena kvalitete pri pozivu sa uređaja zaključanog na WCDMA tehnologiju (EQ121) prema uređaju zaključanom na GSM tehnologiju (EQ131) dana je u tablici 4.4.

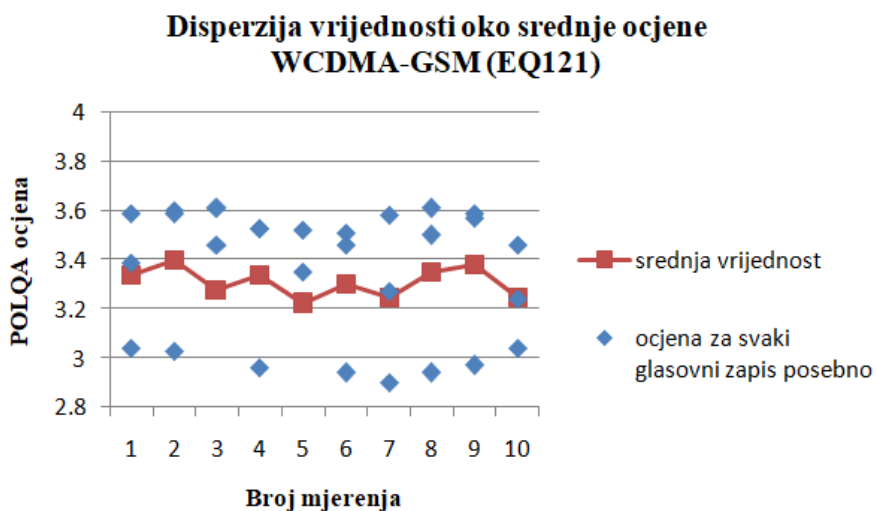
Tablica 4.4. Prikaz rezultata dobivenih u WCDMA-GSM vezi

Br. mjerjenja	Ec/No (dB)	Snaga signala (dBm)	POLQA (EQ121)	POLQA (EQ131)	POLQA – srednja vrijednost (EQ121)	POLQA – srednja vrijednost (EQ131)	POLQA (operator)
1	-6.98	-78	3.39, 3.59, 3.04	3.58, 3.66	3.34	3.62	3.95
2	-7.48 – - 11.43	-74	3.60, 3.59, 3.03	3.56, 3.71	3.40	3.65	3.95
3	-6.98 – - 11.49	-79	3.46, 3.61, 2.78	3.51, 3.69	3.28	3.60	3.95
4	-5.99	-78	3.53, 3.53, 2.96	3.55, 3.61	3.34	3.58	3.94
5	-7.48	-78	3.35, 3.52, 2.78	3.47, 3.68	3.22	3.58	3.92
6	-6.98 – - 9.97	-79	3.51, 3.46, 2.94	3.57, 3.58	3.30	3.58	3.91
7	-8.98	-77	3.27, 3.58, 2.90	3.52, 3.60	3.25	3.56	3.90
8	-9.48 – - 13.45	-78	3.50, 3.61, 2.94	3.57, 3.73	3.35	3.65	3.89

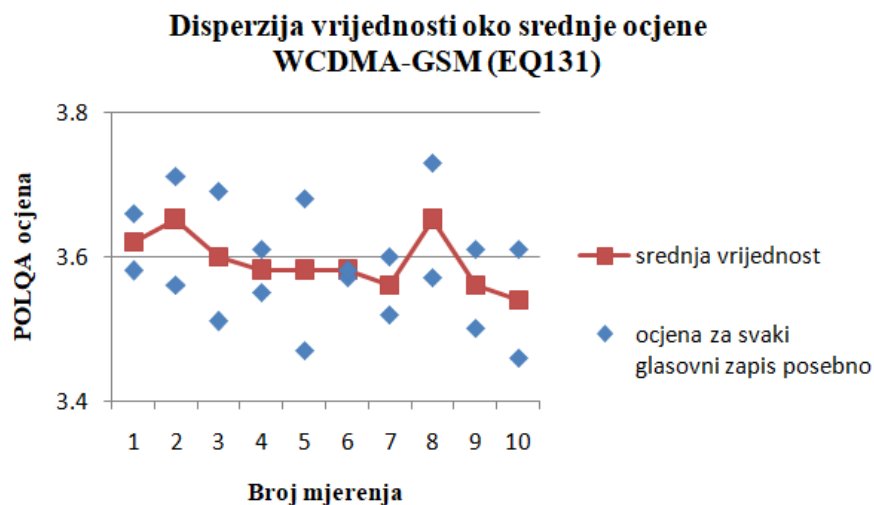
9	-6.98 -- 11.97	-77	3.57, 3.59, 2.97	3.50, 3.61	3.38	3.56	3.88
10	-6.98 -- 9.48	-79	3.24, 3.46, 3.04	3.46, 3.61	3.25	3.54	3.87



Slika 4.14. Grafički prikaz srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod WCDMA-GSM veze



Slika 4.15. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod WCDMA-GSM veze pozivnog uređaja



Slika 4.16. Grafički prikaz disperzije rezultata oko srednjih vrijednosti ocjene kvalitete kod WCDMA-GSM veze prijemnog uređaja

Iz rezultata mjerenja može se vidjeti da kada su oba uređaja postavljena na GSM (2G) tehnologiju, kvaliteta se kreće između 3.64 i 3.85 od maksimalno mogućih 4.50. Već pri prijelazu na sljedeću generaciju, 3G, upotrebom WCDMA tehnologije na oba uređaja, kvaliteta se znatno poboljšava, ocjena kvalitete znatno raste i nalazi se u intervalu između 4.04 i 4.40. Kada se generacije kombiniraju te se pozivni uređaj postavi na GSM, a prijemni na WCDMA, vrijednosti se kreću između 3.21 i 3.63. U obrnutom slučaju, kada se pozivni uređaj postavi na WCDMA i zove prema uređaju koji je zaključan na GSM tehnologiju, ocjena kvalitete se kreće između 3.22 i 3.65. Uspoređujući ova dva slučaja, kvaliteta se bitno ne razlikuje pa je svedjedno hoće li pozivni uređaj koristiti stariju ili noviju tehnologiju. Međutim, kada se generacije kombiniraju, kvaliteta prijenosa govornog signala je puno slabija nego kada se komunikacija odvija između uređaja koji koriste istu tehnologiju. Ipak, najbolja je kvaliteta što je generacija novija iz čega se da zaključiti da novije generacije dolaze s poboljšanjima u odnosu na prethodnu generaciju i svaka generacija ima napredne značajke i karakteristike dizajnirane u svrhu bolje kvalitete obrade govornog signala, veće brzine prijenosa informacija kroz mrežu i suzbijanja buke pri prijenosu signala mrežom što u konačnici rezultira boljom ocjenom kvalitete i boljim korisničkim iskustvom.

5. ZAKLJUČAK

Budući da se tehnologija razvija velikom brzinom i sve je veća potreba za povećanjem telefonskog prometa čime opterećenje na mrežu postaje sve veće, jako je bitno provjeravati kvalitetu prijenosa podataka. Time se onda može osigurati najbolja kvaliteta prijenosa kroz mobilnu mrežu što u konačnici rezultira pozitivnim korisničkim iskustvom, a operater može što bolje upravljati mrežom i donositi odluke vezane za razvoj i kontrolu mreža.

U okviru završnog rada provedena su mjerenja ocjene kvalitete prijenosa govornog signala u 2G i 3G mrežama. Rezultati su pokazali da je svakako bolje koristiti novije tehnologije jer je kvaliteteta značajno bolja u odnosu na starije generacije čime je dokazano da novija generacija dolazi s poboljšanjima u odnosu na generaciju prethodnika dizajniranim u svrhu bolje kvalitete obrade govornog signala, veće brzine prijenosa informacija kroz mrežu i suzbijanja buke pri prijenosu signala mrežom što na kraju uvelike povećava zadovoljstvo i poboljšava iskustvo krajnjeg korisnika.

LITERATURA

- [1] Gordon L. Stüber, *Principles of Mobile Communication*, 4. izdanje, 2017. [30.08.2021.]
- [2] B. Burazer, *Budućnost mobilnih komunikacija i izazovi normizacije*, Hrvatski zavod za norme. Dostupno na: <https://www.hzn.hr/UserDocsImages/pdf/EIS-Budu%C4%87nost%20mobilnih%20komunikacija%20i%20izazovi%20normizacije.pdf> [30.08.2021.]
- [3] Jelassi S., Rubino G., Melvin H., Youssef H., Pujolle G. (2012) *Quality of Experience of VoIP Service: A Survey of Assessment Approaches and Open Issues*. IEEE Communications Surveys&Tutorials, 14(2), 491-513. Dostupno na: 10.1109/SURV.2011.120811.00063 [23.06.2021.]
- [4] Avetisyan H., Holub J. (2018) Subjective speech quality measurement with and without parallel task: Laboratory test results comparison. *PLoS ONE [online]*, 13(7): e0199787. Dostupno na: [10.1371/journal.pone.0199787](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199787) [07.06.2021.]
- [5] Rix A. W., Beerends J. G., Hollier M. P., Hekstra A. P. (2001) Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) – A New Method for Speech Quality Assessment of Telephone Networks and Codecs. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221) [online]*, vol. 2, pp. 749-752. Dostupno na: 10.1109/ICASSP.2001.941023 [17.06.2021.]
- [6] Beerends J. G. (2013) Perceptual Objective Listening Quality Assessment (POLQA), The Third Generation ITU-T Standard for End-to-End Speech Quality Measurement Part II – Perceptual Model. *Journal of the Audio Engineering Society [online]*, 61(6): 366-384. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/279901248> [20.06.2021.]
- [7] Möller S., Chan W., Côté N., Falk T. H., Raake A., Wältermann M. (2011) *Speech Quality Estimation [models and trends]*, IEEE Signal Processing Magazine, 28(6): 18-28. Dostupno na: 10.1109/MSP.2011.942469 [21.06.2021.]
- [8] Reinhardt Haverans (2021), *From 1G to 5G: A Brief History of the Evolution of Mobile Standards*. Dostupno na: <https://www.brainbridge.be/en/blog/1g-5g-brief-history-evolution-mobile-standards> [30.08.2021.]
- [9] M. Benisha, R. Thandaiah Prabu, Thulasi Bai (2019) Evolution of Mobile Generation Technology, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, ISSN: 2277-3878, Volume-7, str:449-454
- [10] Solomon Ndungu, *GSM (Global System for Mobile communication)*. Dostupno na: <https://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/GSM> [30.08.2021.]

- [11] Slavata O., Holub J. (2013) Evaluation of objective speech transmission quality measurements in packet-based network. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2014), 626–630. Dostupno na: <https://core.ac.uk/reader/47182190>
- [12] N. Pourmand (2013) Objective and Subjective Evaluation of Wideband Speech Quality. Dostupno na: <https://core.ac.uk/download/pdf/61637166.pdf>
- [13] C. A. B. Mello and R. Q. Albuquerque, "Reference-Free Speech Quality Assessment for Mobile Phones Based on Audio Perception," 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2015, pp. 2413-2417, doi: [10.1109/SMC.2015.422](https://doi.org/10.1109/SMC.2015.422)
- [14] Opticom (2005) *3SQM– Single Sided Speech Quality Measure*. Erlangen: OPTICOM GmbH. Dostupno na: https://opticom.de/download/SpecSheet_3SQM_Sep05.pdf
- [15] <https://www.opticom.de/technology/3sqm.php>
- [16] Pomy J. (2011) *POLQA: The Next-Generation Mobile Voice Quality Testing Standard*. Moskva: OPTICOM GmbH. Dostupno na: https://www.itu.int/ITU-D/tech/events/2011/Moscow_ZNIIS_April11/Presentations/09-Pomy-POLQA.pdf [21.06.2021.]
- [17] *POLQA: The Next-Generation Mobile Voice Quality Testing Standard*. Dostupno na: <http://www.polqa.info/>
- [18] *POLQA Vs PESQ: Objective quality scoring explained: The differences between ITU objective quality scoring standards and why you should care*. Dostupno na: <https://operata.com/blog/polqa-vs-pesq>
- [19] Rohde&Schwarz (2012) *Next-Generation (3G/4G) Voice Quality Testing with POLQA [online]*. Munchen: Rohde& Schwarz GmbH& Co. KG. Dostupno na: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma202/1MA202_1e_3G4G_voice_quality_testing_POLQA.pdf
- [20] InfoVista (2017) *AQM in TEMS Products (Including PESQ and POLQA)*. Sweden: InfoVista
- [21] Ascom (2011) *TEMS Symphony: Powerful, Scalable, Flexible – the Only Benchmarking Solution You'll Ever Need*. Reston: Ascom Network Testing Inc.
- [22] Ascom (2014) *TEMS Symphony 7.4. Product Presentation [online]*. Dostupno na: <https://manualzz.com/doc/24663138/tems-symphony---global> [03.09.2021.]
- [23] Ascom (2014) *TEMS Symphony 7.5. Product Presentation [online]*. Dostupno na: <http://docshare01.docshare.tips/files/28290/282908930.pdf> [03.09.2021.]

[24] Ascom (2014) *TEMS Investigation 16.3. Help; User's Manual [online]*. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/398579097/TEMS-Investigation-User-s-Manual-pdf> [03.09.2021.]

POPIS I OPIS KORIŠTENIH KRATICA

1G – First Generation Mobile Network

2G – Second Generation Mobile Network

3G – Third Generation Mobile Network

4G – Fourth Generation Mobile Network

5G – Fifth Generation Mobile Network

3SQM – Single Sided Speech Quality Measure

ACR – Absolute Category Rating

CCR – Comparison Category Rating

CMOS – Comparison Mean Opinion Score

DCR – Degradation Category Rating

DMOS – Differential Mean Opinion Score

EDGE – Enhanced Data Rates for GSM Evolution

FDMA – Frequency Division Multiple Access

FFT – Fast Fourier Transform

GMSK – Gaussian minimum shiftkeying

GPRS – General Packet Radio Service

GSM – Global System for Mobile Communications

GUI – Graphical User Interface

HSPA – HighSpeedPacket Access

IP – Internet Protocol

LPC – LinearPredictiveCoding

LTE – LongTermEvolution

MIMO – Multiple-Input Multiple-Output

MOS – MeanOpinionScore

MOS-LQO – MeanOpinionScore-ListeningQualityObjective

NB – narrow-band

OFDM – OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing

PESQ – PerceptualEvaluationofSpeechQuality

POLQA – PerceptualObjectiveListeningQualityAnalysis

PSQM – PerceptualSpeechQualityMeasure

SNR – Signal-to-NoiseRatio

SWB – superwide-band

TDMA – Time DivisionMultiple Access

UMTS –Universal Mobile Telecommunications System

WCDMA – Wideband CodeDivisionMultiple Access

WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access

SAŽETAK

Rad opisuje najvažnije značajke mobilnih komunikacijskih sustava i opisuje različite generacije mobilne telefonije: od 1G do 5G. Nadalje, daje pregled subjektivnih i objektivnih metrika za ocjenu kvalitete prijenosa govora u mobilnim mrežama s naglaskom na PESQ i POLQA metrike. U praktičnom dijelu rada primjenom TEMS Symphony uređaja provedena su mjerenja ocjene kvalitete prijenosa govornog signala u 2G i 3G mrežama.

Ključne riječi: mobilne mreže, ocjena kvalitete govora, objektivne metrike, POLQA, TEMS Symphony

Quality evaluation of speech transmitted by mobile networks

ABSTRACT

This paper describes the most important features of mobile communication systems and different generations of mobile networks: from 1G to 5G. Furthermore, an overview of subjective and objective metrics for speech quality assessment in mobile networks is given, with an emphasis on PESQ and POLQA metrics. In the practical part of the paper, by using the TEMS Symphony device the measuring of evaluation of speech quality in 2G and 3G networks was carried.

Key words: mobile networks, speech quality assessment, objective metrics, POLQA, TEMS Symphony