

Comparison of various Equalization Techniques for MIMO System under different Fading Channels

VELIC NEJRA

Univerzitet u Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, odsjek za telekomunikacije, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina (e-mail: nvelic3@etf.unsa.ba)

ABSTRACT Ekspanzija mobilnih aplikacija i uređaja dovela je do potrebe za bežičnim komunikacijskim sistemima koji nude veću propusnost, veliko pokrivanje i poboljšanu pouzdanost. Osnovne poteškoće u dizajnu ovakvih sistema su ograničeni resursi te implementacija bežičnih kanala koji su pod uticajem šuma, intersimbolske interferencije i fading efekata. Pod uticajem navedenog efikasnost sistema je smanjena. Navedeni problemi mogu biti kompenzirani upotrebom ekvalizacijskih tehnika, kao i MIMO tehnika. U ovom radu napravljeno je poređenje performansi različitih ekvalizacijskih tehnika, te poređenje rezultata dobivenih u MATLAB programskom okruženju sa rezultatima dobivenim u originalnom radu. Korištene ekvalizacijske tehnike su *Zero forcing (ZF)*, *Maximal Ratio Combining (MRC)*, *Minimum Mean Square Error (MMSE)* i *Maximum Likelihood (ML)* u MIMO 2x2 sistemu. Korištena je BPSK modulacijska tehnika pod uticajem različitih fading kanala, ito Rayleighjev i Riceov kanal.

INDEX TERMS AWGN, BPSK modulacija, MIMO sistemi, ML, MMSE, MRC, *Rayleigh-ev* kanal, *Riceov* kanal, ZF.

I. UVOD

BEŽIČNA komunikacija je ona kod koje između predajnika i prijemnika ne postoji elektronski konduktor. Ovaj tip komunikacije omogućava uslugu poput prenosa signala na velike udaljenosti, što je prije uvođenja bežičnih tehnologija bilo nemoguće ili nepraktično za implementaciju. Pored navedenih olakšanja koja uvodi, ona dolazi sa dosta mana, ito: fading, intersimbolska interferencij (ISI), mal odnos signal-šum itd. Zbog toga efikasnost sistema zavisi od tipa modulacione šeme, detekcije i korištenog kanala. Za svrhu ovog rada koristi se BPSK modulacija za 2x2 MIMO sistem.

Za poređenje performansi koriste se različite ekvalizacijske tehnike u Rayleighjevom i Riceovom kanalu koristeći BER (engl. *Bit Error Rate*) i SNR (engl. *Signal to Noise Ratio*) kao parametre poređenja.

BER performanse bez korištenja ekvalajzera se poboljšavaju sa njihovim dodavanjem. Pri tome su u ovom radu korišteni ZF (engl. *Zero Forcing equalizer*), MMSE (engl. *Minimum Mean Squared Error*), ML (engl. *Maximum Likelihood*) i MRC (engl. *Maximal Ratio Combining*).

Ovaj rad je podijeljen u dva dijela. Prvi dio govori o MIMO sistemima te opisuje različite ekvalizacijske tehnike na prijemniku. Drugi dio poredi rezultate dobivene od strane

originalnih autora ovog rada i rezultate dobivene simulacijom u MATLAB programskom okruženju.

II. MIMO SISTEMI I EKVALIZACIJSKE TEHNIKE

A. MIMO SISTEMI

Zbog problema sa višestrukim putanjama signala koje stižu na prijemnik, što je poznato kao fading sa više putanja (engl. *multipath fading*) u bežičnim komunikacijama, primljeni signal je oslabljen i može izgubiti informacije koje nosi. Zbog toga je potreban sistem koji je sposoban da se bori protiv ovog fenomena. U tu svrhu se koriste MIMO sistemi [1].

MIMO (engl. *Multiple-Input Multiple-Output*) je bežična tehnologija koja koristi višestruke predajnike i prijemnike za prenos mobilnih podataka u isto vrijeme [2]. U ovom radu su korištena 2 predajnika i 2 prijemnika (MIMO 2x2). MIMO povećava snagu prijemnika signala tako što omogućava antenama na prijemu kombinovanje toka podataka koji dolaze po različitim putanjama u različito vrijeme [2].

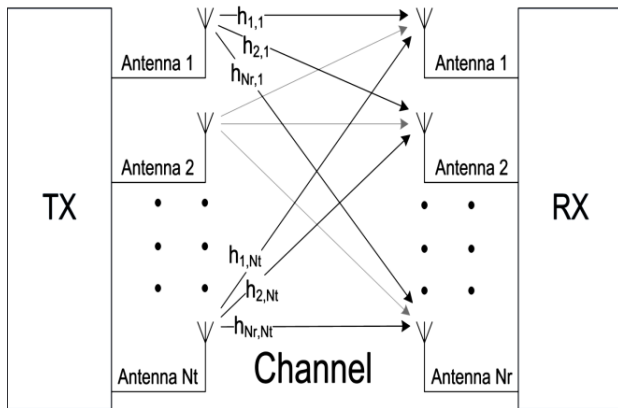


FIGURE 1. MIMO sistem [1]

B. EKVALIZACIJSKE TEHNIKE

Kako je već navedeno, MIMO tehnike su uvedene za borbu protiv *multipath* fadinga. Poznato je da je druga velika smetnja za bežične signale intersimbolska interferencija (ISI). Upravo za borbu protiv ove pojave uvode se ekvalajzeri. Ekvalajzeri mogu biti linearni filteri ili neki kompleksniji algoritmi, a osnovna uloga im je da povrate informaciju koja bi inače bila izgubljena zbog smetnji pri propagaciji kroz kanal odnosno oporavak prenesenih simbola [3]. U ovom radu će biti obrađeni MMSE, ML, ZF i MRC ekvalajzer.

1) MMSE ekvalajzer

MMSE (engl. *Minimum Mean Square Error*) je linearni ekvalajzer koji redukuje intersimbolsku interferenciju tako što smanjuje djelovanje šuma. On posmatra kanale sa izrazito velikim šumom da bi izvršio proces ekvalizacije. Cilj MMSE ekvalajzera je da smanji prosječnu srednjekvadratnu grešku (engl. *Mean Square Error*) (MSE) između poslanih simbola i simbola estimiranih na izlazu iz ekvalajzera. Posmatrano na opsegu SNR-a za ekvalizaciju kanala, MMSE se smatra robusnim algoritmom [1].

Poslani simboli se mogu estimirati formulom:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = [H^H H + N_0 I]^{-1} H^H \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Gdje su:

- x_1, x_2 simboli poslani sa predajnika
- y_1, y_2 simboli estimirani na ekvalajzeru
- N_0 snaga šuma
- I snaga interferencije
- H matrica kanala između prve i druge antene [1]

2) ML ekvalajzer

ML (engl. *Maximum Likelihood*) je metod linearne detekcije koji je jednostavniji od metoda optimalne ili idealne ML detekcije, dok su mu performanse dosta bolje. ML detekcija proračunava Euklidsku udaljenost između vektora primljenog signala i proizvoda svih mogućih poslanih vektora

datih u matrici H . Nakon tog proračuna pronalazi onaj sa minimalnom distancom [1].

ML prijemnik izvodi optimalno dekodiranje vektora, također je optimalan u smislu minimiziranja vjerovatnoće greške. Estimacija se vrši na osnovu funkcije:

$$X_{ML} = \operatorname{argmin} \|y - Hx\|^2 \quad (2)$$

Iako nudi optimalne performanse u smislu popravke grešaka, ML ekvalajzer je jako kompleksan za realizaciju.

3) ZF ekvalajzer

ZF (engl. *Zero Forcing*) je još jedan u nizu linearnih ekvalajzera koji radi na sljedećem principu. Da bi komponenta intersimbolske interferencije na izlazu iz ekvalajzera imala vrijednost 0 on koristi linearni vremenski invarijantni filter sa pogodnom funkcijom filtera. Npr. ako je frekventni odziv kanala $F(f)$, prijemnik sa ZF ekvalajzerom će poslati prenosnu funkciju izlaza na vrijednost $C(f) = \frac{1}{F(f)}$. Ovo će na izlazu dati ravan frekventni odziv kada se ovaj ekvalajzer kobinuje sa kanalom [1].

Estimacija simbola se vrši na osnovu funkcije:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = [H^H H]^{-1} H^H \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4) MRC ekvalajzer

MRC (engl. *Maximal Ratio Combining*) je nelinearni ekvalajzer koji se koristi za povratak originalnog oblika signala. Kod ovog ekvalajzera svi primljeni signali se kombinuju (dodaju se jedan drugom). Nakon prijema, svaki primljeni signal se množi sa težinskim faktorom. Amplituda signala je direktno proporcionalna težinskom faktoru. Težinski faktor se određuje po prijemu signala, posebno za svaki signal na svakoj anteni na osnovu faze i snage u kanalu. To osigurava veće pojačanje slabijih signala a manje pojačanje jačih. Signali sa svih slobodnih antena se spajaju da bi odredile maksimalni odnos između snage signala i šuma [1].

Funkcija za estimaciju kanala je sljedeća:

$$x = \frac{h^H y}{h^H h} = \frac{h^H h_x}{h^H h} + \frac{h^H n}{h^H h} = x + \frac{h^H n}{h^H h} \quad (4)$$

III. TIPOVI KANALA

U ovoj sekciji će samo kratko biti spomenuti tipovi kanala kroz koji se signal propagirao prilikom simuliranja prenosa signala sa navedenim ekvalajzerima.

Korišteni se standardni *Rayleigh*-ev i *Rice*-ov kanal za prenos signala, te je poređenje u performansama vršeno upravo na osnovu ova dva kanala.

Ovdje treba spomenuti da Riceov kanal karakterišu dvije osnovne veličine koje u samom radu nisu navedene, a potrebno je da se jedna od njih koristi pri simulaciji. Prva je parametar K koji predstavlja odnos snaga direktne *Line of sight* komponente i svih ostalih komponenti. Drugi parametar, σ , predstavlja zbir snaga LOS komponente i ostalih

komponenti. Za potrebe simulacije u ovom radu korišten je parametar $K = 4$.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Prilikom razmatranja performansi navedenih ekvalajzera korišteno je programsko okruženje MATLAB. Tražena je vrijednost BER (engl. *Bit Error Rate*) za zadanu vrijednost odnosa snage signala i šuma SNR (engl. *Signal to Noise Ratio*).

U nastavku će biti poređeni dobiveni rezultati i rezultati dobiveni iz originalnog rada, datog u [1].

A. PERFORMANSE MMSE EKVALAJZERA

Najprije je napravljeno poređenje performansi MMSE ekvalajzera u Rayleighjevom i Riceovom kanalu. Na slici 2 prikazani su rezultati dobiveni u radu [1]. Vidimo da su performanse MMSE ekvalajzera bolje u Rayleighjevom kanalu jer za istu vrijednost odnosa $\frac{E_b}{N_0}$ daje manji BER. Tako npr. za $\frac{E_b}{N_0} = 30\text{dB}$ u Rayleighjevom kanalu BER ima vrijednost 10^{-4} , dok u Riceovom kanalu ima vrijednost 10^{-3} .

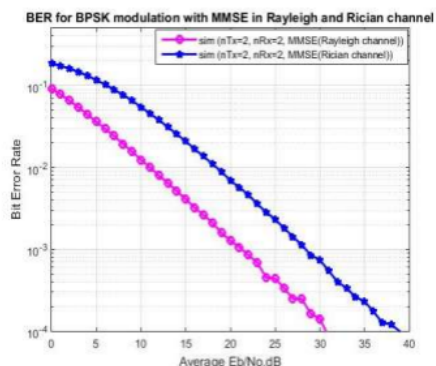


FIGURE 2. BER za MMSE ekvalajzer u Rayleigh-evom i Rice-ovom kanalu iz rada [1]

Ako pogledamo sliku 3 na kojoj su prikazani rezultati dobiveni simulacijom u MATLAB-u, vidimo da su dobiveni rezultati identični kao i oni iz rada, te samim tim možemo izvući iste zaključke. Za parametar $K = 4$ u Riceovom kanalu pri simulaciji u MATLAB-u opet bolje rezultate daje simulacija u Rayleighjevom kanalu, kao što je to i radom demonstrirano. Tako npr. ako pogledamo sliku 3 vidimo da za vrijednost BER od 10^{-3} u Rayleighjevom kanalu je potreban odnos $\frac{E_b}{N_0}$ od 20 dB, dok je za Riceov kanal potrebno 28 dB za istu vjerovatnoću greške.

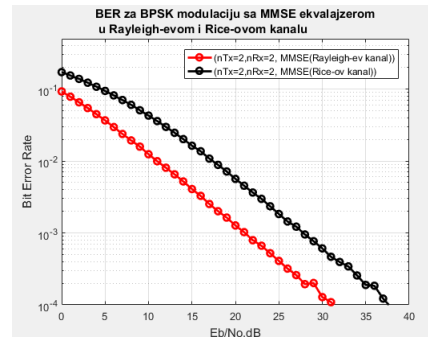


FIGURE 3. BER za MMSE ekvalajzer u Rayleigh-evom i Rice-ovom kanalu dobiven u MATLAB-u

B. PERFORMANSE ML EKVALAJZERA

Dalje je napravljeno poređenje performansi ML ekvalajzera u Rayleigh-evom i Rice-ovom kanalu. Na slici 4 prikazani su rezultati dobiveni u radu [1]. Kao što je to bio slučaj za MMSE ekvalajzer i kod ML ekvalajzera vidimo da su performanse bolje u Rayleighjevom kanalu jer za istu vrijednost odnosa $\frac{E_b}{N_0}$ daje manji BER. Tako npr. za $\frac{E_b}{N_0} = 16\text{dB}$ u Rayleighjevom kanalu BER ima vrijednost 10^{-4} , dok u Riceovom kanalu ima vrijednost nešto veću od 10^{-3} .

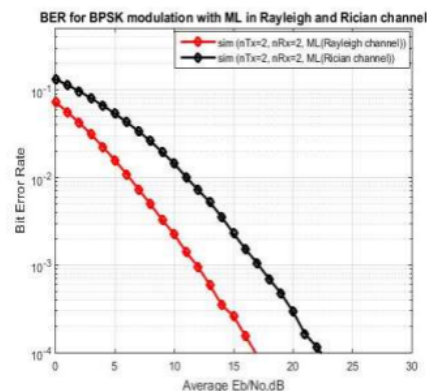


FIGURE 4. BER za ML ekvalajzer u Rayleigh-evom i Rice-ovom kanalu iz rada [1]

Ako pogledamo sliku 5 na kojoj su prikazani rezultati dobiveni simulacijom u MATLAB-u, vidimo da nema razlike u rezultatima. Možemo izvući iste zaključke kada su u pitanju performanse u različitim kanalima. Opet bolje rezultate daje simulacija u Rayleighjevom kanalu u odnosu na Riceov. Opet možemo posmatrati vjerovatnoću greške od 10^{-3} i vidimo da je pri korištenju ML tehnike potreban $\frac{E_b}{N_0}$ od 12 dB za Rayleighjev kanal i 18 dB za Riceov kanal.

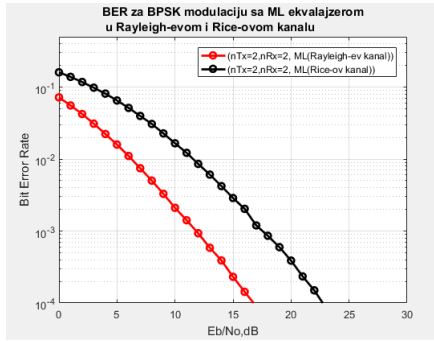


FIGURE 5. BER za ML ekvalajzer u Rayleigh-evom i Rice-ovom kanalu dobiven u MATLAB-u

C. PERFORMANSE U RAYLEIGHJEVOM KANALU

U nastavku će biti poređene performanse svih gore navedenih ekvalajzera u Rayleighjevom kanalu. Poređeni su MMSE, ML, MRC i ZF ekvalajzeri. Na slici 6 prikazani su rezultati dobiveni u radu [1]. Kako je MRC jedini nelinearni ekvalajzer od razmatrana četiri, on daje i najbolje rezultate. Slijede ga linearni ML zatim MMSE te ZF. Sa slike se također vidi da za BER od 10^{-4} , potreban je SNR od 16 dB za MRC, 17 dB, 31 dB i 34 dB za MMSE, ML i ZF respektivno.

Slijedi da MRC daje najbolje rezultate od svih ekvalajzera u Rayleighjevom kanalu za dati sistem sa BPSK modulacijom. Sa povećanjem SNR-a imamo vidno smanjenje BER-a, što je i logično i moglo se pretpostaviti prije izvedene simulacije.

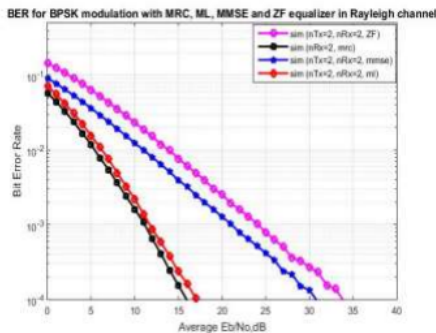


FIGURE 6. BER za ML, MMSE, MRC i ZF ekvalajzer u Rayleigh-evom i kanalu iz rada [1]

Slika 7 pokazuje kako se mijenja BER za dati SNR za navedene ekvalajzere u Rayleighjevom kanalu prilikom simulacije u MATLAB-u. Dobiveni rezultati su gotovo identični kao oni dobiveni u radu [1]. Kada su u pitanju performanse koje daju MRC i ZF ekvalajzer MRC ima najbolje a ZF najlošije performanse. Kao i prethodno, ML ima bolje performanse od MMSE ekvalajzera. Jedina razlika u odnosu na originalni radi je ZF ekvalajzer koji, iako najlošiji, daje još lošije rezultate u odnosu na originalnu verziju. Tako npr. ako posmatramo BER od 10^{-2} tada je za MRC, ML, MMSE i ZF potrebna vrijednost $\frac{E_b}{N_0}$ od 6 dB, 7 dB, 11 dB i 30 dB, respektivno. Vidimo da je razlika u posljednjem rezultatu,

gdje je za isti BER u radu [1] za ZF u ovom slučaju potrebno 15 dB.

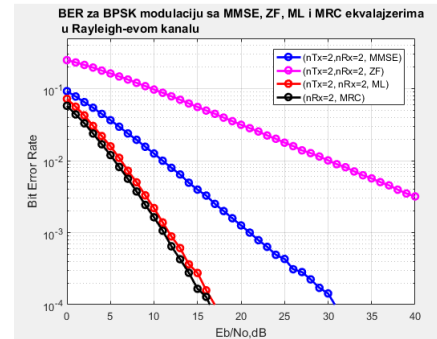


FIGURE 7. BER za ML, MMSE, MRC, ZF ekvalajzer u Rayleigh-evom kanalu dobiven u MATLAB-u

Kada je u pitanju Rayleighjev kanal mogu se izvući zaključci zašto su se baš ovakvi rezultati dobili, a koji nisu navedeni u samom radu.

Prije svega, na obje prethodne slike najbolje performanse ima MRC ekvalajzer iz razloga što je on jedini nelinearni ekvalajzer. Generalno u sistemima u kojima je degradacija kanala prevelika koriste se nelinearni ekvalajzeri. Razlog za ovo je taj što linearni ekvalajzeri ne mogu da se bore sa dugim impulsnim odzivom i velikim šumom koji se procesira zajedno sa signalom.

Poredeći performanse preostala tri ekvalajzera zaključeno je da ML daje najbolje rezultate. Ako pogledamo sa teorijske strane ova tvrdnja ima smisla jer je ML optimalan u smislu smanjenja vjerovatnoće greške, mada jako kompleksan za realizaciju sa druge strane. To je razlog što daje bolje performanse poredeći ga sa MMSE i ZF ekvalajzerima.

Konačno, ZF ima lošije performanse u odnosu na MMSE zbog toga što je MMSE tačniji i pogodan za širok opseg kanala koji je izražen preko odnosa snage signala i šuma. ZF metoda je pogodnija za visoke odnose signala i šuma gdje se može smatrati da je šum zanemariv u odnosu na snagu signala. To je razlog što ZF ima najlošije performanse u Rayleighjevom kanalu.

D. PERFORMANSE U RICEOVOM KANALU

U nastavku će biti poređene performanse svih gore navedenih ekvalajzera u Riceovom kanalu. Poređeni su MMSE, ML, MRC i ZF ekvalajzeri, slično kao i za Rayleighja. Na slici 8 prikazani su rezultati dobiveni u radu [1]. Kao i prethodno za Rayleighjev kanal i ovdje je MRC jedini nelinearni ekvalajzer od razmatrana četiri, on daje i najbolje rezultate. Slijede ga linearni ML zatim MMSE te ZF. Sa slike se također vidi da za BER od 10^{-4} , potreban je SNR od 7 dB za MRC, 22 dB, 39 dB i 41 dB za MMSE, ML i ZF respektivno.

Slijedi da MRC daje najbolje rezultate od svih ekvalajzera u Riceovom kanalu za dati sistem sa BPSK modulacijom. Pored toga vidi se da ako poredimo rezultate MRC ekvalajzer daje bolje rezultate u Riceovom u odnosu na Rayleighjev kanal, što za druge ekvalajzere nije slučaj.

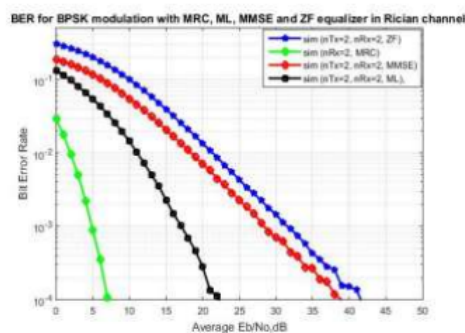


FIGURE 8. BER za ML, MMSE, MRC, ZF ekvalajzer u Rice-ovom kanalu iz rada [1]

Slika 9 pokazuje kako se mijenja BER za dati SNR za navedene ekvalajzere u Riceovom kanalu prilikom simulacije u MATLAB-u. Pri simulaciji za sve ekvalajzere korišten je parametar $K = 4$. Dobiveni rezultati su gotovo identični kao oni dobiveni u radu [1], te možemo izvući iste zaključke. Slično kao i za Rayleighjev kanal, opet najbolje performanse ima MRC ekvalajzer, dok je najlošiji ZF. Također, ML ima bolje performanse u odnosu na MMSE. Mala razlika u rezultatima je opet ako pogledamo ZF ekvalajzer, koji ima lošije rezultate poredeći da sa onim u radu. Sa slike 8 se vidi da za BER od 10^{-4} , potreban je SNR od 10 dB za MRC, 22 dB, 39 dB za MMSE i ML respektivno, dok je za ZF potreban dosta veći SNR u poređenju sa onim u radu.

Za oba tipa kanala su dobiveni isti zaključci u smislu performansi navedenih metoda. Jedina je razlika u tome što neki od njih imaju bolje performanse u Rayleighjevom, neki u Riceovom kanalu.

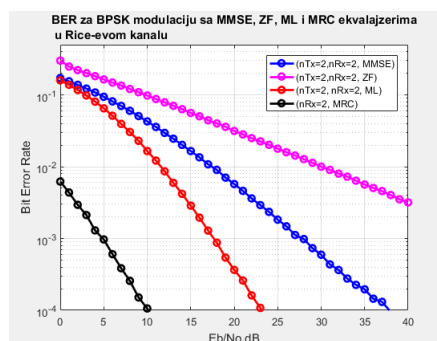


FIGURE 9. BER za ML, MMSE, MRC, ZF ekvalajzer u Rice-ovom kanalu dobiven u MATLAB-u

V. ZAKLJUČAK

Današnji bežični komunikacijski sistemi ne bi mogli funkcionisati na način na koji danas funkcionišu bez MIMO tehnika i ekvalizacijskih metoda. Ne bi zadovoljavali potrebe krajnjeg korisnika u smislu pružene usluge, ali i samog kvaliteta te usluge, bez gore opisanih tehnika. MIMO sistemi se bore sa *multipath* fadingom, dok su ekvalajzeri tu za porbu protiv intersimbolske interferencije.

U ovom radu prikazane su performanse četiri ekvalajzera u smislu BER-a za ponuđeni SNR, sa BPSK modulacijskom šemom. BPSK modulacija je izabrana jer se pokazalo da daje najbolje rezultate u ovakvim sistemima. Posmatrani su rezultati kako u Riceovom tako i u Rayleighjevom kanalu, te sve što smo zaključili može se sumirati kako slijedi.

MRC daje najbolje rezultate za oba tipa kanala, jer je nelinearan ekvalajzer i bolje performanse će davati u odnosu na linearne ekvalajzere bez obzira na korišteni kanal. Zbog toga što je kreiran da se bori protiv veće degradacije u odnosu na ostale kanale. Njegove performanse su ipak, za razliku od ostalih bolje u Riceovom u odnosu na Rayleighjev kanal.

Od linearnih ekvalajzera najbolje performanse daje ML ekvalajzer jer je optimalan kada je u pitanju minimiziranje šuma. Ukoliko ga poredimo u različitim kanalima, bolje performanse će ipak imati za Rayleighjev kanal. Iako najkompleksniji algoritam, daje najbolje performanse u smislu BER-a.

MMSE metoda daje bolje rezultate od ZF ekvalajzera za oba kanala. Razlog za ovo je taj da ZF može raditi dobro samo kada imamo veliku razliku između snage signala i snage šuma. S toga u oba kanala daje najlošije rezultate, mada je njegova prednost ta što je najjednostavniji za realizaciju u odnosu na ostale.

Sve gore zaključeno je pokazano kako u samom radu [1] tako i simulacijom u MATLAB-u. Jedina razlika u rezultatima je lošija izvedba ZF ekvalajzera prilikom simulacije u odnosu na rezultate koje su dobili originalni autori rada. Međutim, opet su izvučeni zaključci jednaki.

U zavisnosti od toga kakav sistem se realizira moguće je preporučiti koji od ovih ekvalajzera bi bio najbolji za korištenje. Ukoliko je potrebno imati najbolje performanse u kanalima sa izrazito velikom degradacijom signala svakako se preporučuje korištenje nelinearnih tehnika, samim tim i MRC metode. Ukoliko je ipak moguće koristiti linearne ekvalajzere tada je najbolje koristiti MMSE, ukoliko ne želimo preskup sistem. Sa druge strane ukoliko to nije pitanje, tada ML daje najbolje rezultate.

Dalji rad na ovoj temi bi podrazumijevao dalji rad na simuliranju performansi ovih metoda, uvođenje nekih novih ekvalajzera koji bi davali eventualno bolje rezultate. Svakako moguće je vršiti dodatna proširenja i poboljšanja na ovoj temi.

REFERENCES

- [1] Aishwary Jain, Pankaj Shukla, Lokesh Tharani, "Comparison of various Equalization Techniques for MIMO System under different Fading Channels," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-11, no. 1, pp. 34–39, Oct. 2017, 10.1109/CESYS.2017.8321216.
- [2] Intel (2020. October), Learn about Multiple-Input Multiple-Output. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005714/wireless.html>
- [3] OurBlog Education (2021. January), Equalizer types, common usage, functions and techniques Available: <https://blog.oureducation.in/equalizer/:text=The%20equalizer%20is%20a%20device, recovery%20of%20the%20transmit%20symbols.text=Linear%20Equalizer%3A%20It%20processes%20the%20incoming%20signal%20with%20a%20linear%20filter.>

...