

# Računalna simulacija PAM, PWM, PPM i MQAM modulacije u Matlabu.

---

**Andjić, Oliver**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:200:075311>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-06**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni prijediplomski studij Računarstvo**

**Računalna simulacija PAM, PWM, PPM i MQAM  
modulacije u Matlabu**

**Završni rad**

**Oliver Andjić**

**Osijek, 2024**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Oliver Andjić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Računarstvo
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	R4601, 30.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0152214966
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Računalna simulacija PAM, PWM, PPM i MQAM modulacije u Matlabu.
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Računalna simulacija PAM, PWM, PPM i MQAM modulacije u Matlabu.
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	27.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	01.10.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	01.10.2024.



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 01.10.2024.

**Ime i prezime Pristupnika:**

Oliver Andjić

**Studij:**

Sveučilišni prijediplomski studij Računarstvo

**Mat. br. Pristupnika, godina upisa:**

R4601, 30.07.2021.

**Turnitin podudaranje [%]:**

15

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Računalna simulacija PAM, PWM, PPM i MQAM modulacije u Matlabu.**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Vanja Mandrić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. MATLAB .....	2
3. MODULACIJA SIGNALA .....	3
4. PULSNA MODULACIJA .....	6
5. PAM MODULACIJA .....	9
5.1 Simulacija PAM u Matlabu .....	9
6. PWM MODULACIJA .....	12
6.1 Simulacija PWM u Matlabu .....	12
7. PPM MODULACIJA .....	15
7.1 Simulacija PPM u Matlabu .....	15
8. MQAM MODULACIJA .....	18
8.1 Simulacija MQAM u Matlabu .....	18
9. ZAKLJUČAK .....	25
LITERATURA .....	26
SAŽETAK .....	27
ABSTRACT .....	28
PRILOG .....	29
Matlab skripte .....	29

# 1. UVOD

Budući da se živi u eri komunikacije, moguće je lako prenijeti bilo koji oblik informacija (video, audio i druge podatke) u obliku električnih signala na bilo koji drugi uređaj ili određeno područje. Na prvu se može činiti da je slanje i primanje signala ili podataka jednostavno, ali ono ustvari uključuje prilično složene postupke unutar komunikacijskih sustava. Dakle, u opsegu komunikacijskih sustava, modulacija ima ključnu odgovornost u komunikacijskom sustavu za digitalno kodiranje informacija u analognom svijetu.

## 1.1. Zadatak završnog rada

U ovom završnom radu je zadatak koristeći Matlab računalno simulirati modulacijske tehnike:

- PAM - Pulse Amplitude Modulation
- PWM - Pulse Width Modulation (PWM)
- PPM - Pulse Position Modulation (PPM)
- MQAM - M-ary Quadrature Amplitude Modulation (MQAM)

## **2. MATLAB**

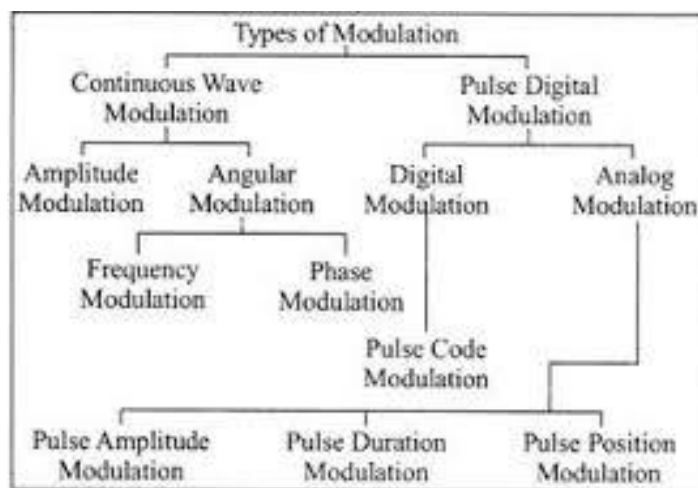
Matlab je numerička i programska računalna platforma koju koriste milijuni znanstvenika i inženjera za razvoj algoritama, analizu podataka i kreiranje modela. [1] [2] Simulacija pomoću Matlaba ključna je za obrazovanje, dizajn, analizu, optimizaciju i implementaciju komunikacijskih sustava. Ona pruža svestranu platformu za istraživanje tehnika modulacije, osigurava robusne i učinkovite dizajne sustava te olakšava prijelaz s teorije na praksu.

Za ovaj rad je korišten Matlab, ali bitno je napomenuti da Matlab nije jedino oruđe za obradu ovakvog zadatka, postoje alternative kao LTSpice, Julia, GNU Octave, Python i mnogi drugi. U ovom kontekstu je izabran Matlab zbog činjenice da se na FERIT-u u Osijeku studira koristeći ovaj softver te prednosti kao jednostavno rukovanje matematičkim operacijama, velike razine funkcionalnosti te široke dokumentacije.

### 3. MODULACIJA SIGNALA

Modulacija je postupak transformacije električnog signala koji sadrži informaciju radi lakšeg prijenosa. Obratno tome, proces povratne transformacije primljenog signala u osnovni oblik naziva se demodulacija ili detekcija. Postupak modulacije podrazumijeva mijenjanje parametara jednog pomoćnog signala ovisno o signalu koji nosi informaciju. Pomoćni signal se naziva prijenosnim signal dok signal koji nosi informaciju i koji upravlja promjenama parametara prijenosnog signala se naziva modulacijskim signalom. Modulirani signal je signal nastao kao rezultat modulacije, a njegovi parametri su funkcije razine modulacijskog signala. [3]

Modulacija je temeljni koncept u telekomunikacijama, obradi signala i elektronici, a svrha modulacije je omogućiti učinkovit prijenos informacija preko komunikacijskog kanala.

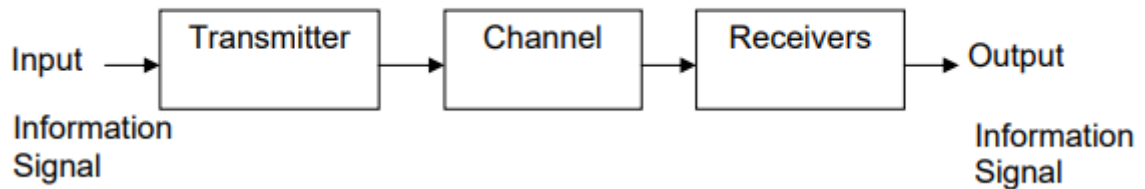


Slika 3.1 Različite vrste modulacije [4]

Komunikacijski sustav koji šalje informacije između dvije lokacije sastoji se od odašiljača, kanala i prijemnika (slika 3.2). Kanal se odnosi na fizički medij koji prenosi informacijski signal (glas, video, podaci itd.) s jedne lokacije na drugu. Fizički medij može biti slobodni prostor ili različiti valni vodovi (žice, optička vlakna itd.) koji usmjerite energiju preko kanala do prijemnika. Odašani signal koji nosi informacije kroz kanal mogu biti elektromagnetski, optičke, akustični ili drugi oblici energetskog zračenja. Mobiteli i bežične mreže šalju informacije putem slobodnog prostora



elektromagnetskim valovima. [5]



Slika 3.2 Blok dijagram komunikacijskog sustava [5]

Za slanje ovih elektromagnetskih valova kroz slobodni prostor frekvencija od emitiranih signal mora biti prilično visoka u usporedbi s frekvencijom informacijskog signala. Na primjer, informacijski signal u mobilnom telefonu je glasovni signal s propusnošću reda veličine 4kHz. [5]

Dizajn i modulatora i demodulatora mora se raditi istovremeno - kao što je uobičajeno za sve digitalne komunikacijske sustave. Digitalne modulacijske sheme su moguće jer par odašiljač-prijemnik ima prethodno znanje o tome kako su podaci kodirani i predstavljeni u komunikacijskom sustavu. U svim digitalnim komunikacijskim sustavima i demodulator na prijamniku i modulator na odašiljaču strukturirani su tako da izvode obratne operacije.

U ovom radu će se za modulacije u matlabu koristiti vrijednosti frekvencija u desetcima herca zbog jasnog prikaza na grafovima, ali bitno je napomenuti da u praksi se signali moduliraju koristeći jako velike frekvencije (kHz, MHz, GHz). Primjerice kod govornog je signala širina frekvencijskog pojasa ograničena na područje od 0.3 do 3.4 kHz. Dakle frekvencija uzoraka drema teoremu uzoraka mora biti barem 6.8 kHz. U praksi se za ovaj slučaj uzimaju uzorci s frekvencijom od 8 kHz.

Dakle bitno je zaključiti da je modulacija od velike važnosti na područje komunikacije,

ali također ima veliku i važnu ulogu u mjernoj tehnici, tehnici reprodukcije signala i tehnici pohranjivanja. [3]

## 4. PULSNA MODULACIJA

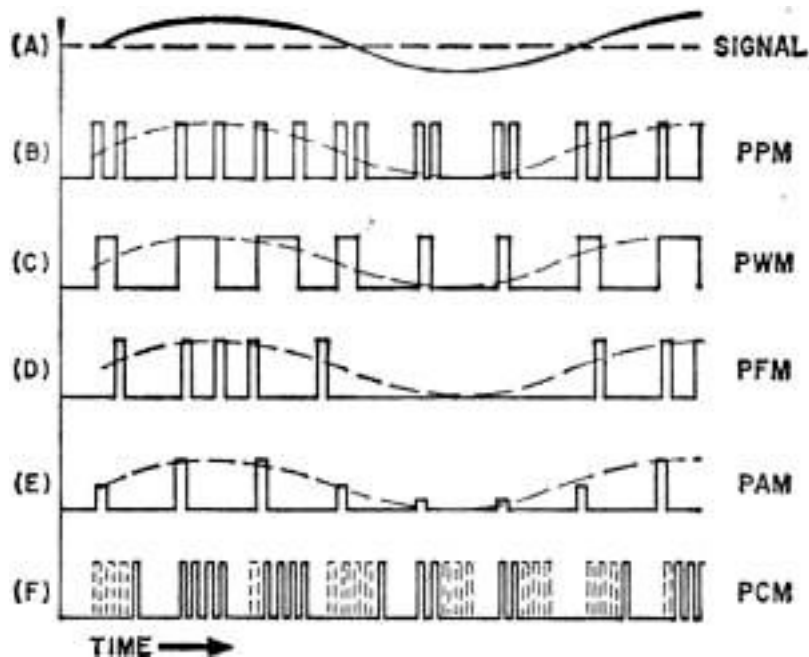
Modulacija impulsa odnosi se na skup tehničkih modulacijskih tehnika u kojima se diskretni impulsi koriste za kodiranje informacija. Ove tehnike široko se koriste u različitim komunikacijskim i kontrolnim sustavima zbog njihove sposobnosti učinkovitog prijenosa i manipulacije signalima. Osnovno načelo pulsne modulacije uključuje kodiranje informacije u diskretne impulse. Karakteristike ovih impulsa (kao što su amplituda, širina i položaj) variraju u skladu s informacijama koje se prenose. Postoje različite vrste:

PAM: Amplituda impulsa mijenja proporcionalno trenutačnoj amplitudi analognog signala koji se prenosi.

PWM: Mijenja širinu (trajanje) impulsa u skladu s amplitudom analognog signala.

PPM: Mijenja položaj impulsa unutar fiksnog vremenskog perioda na temelju amplitude analognog signala. [6]

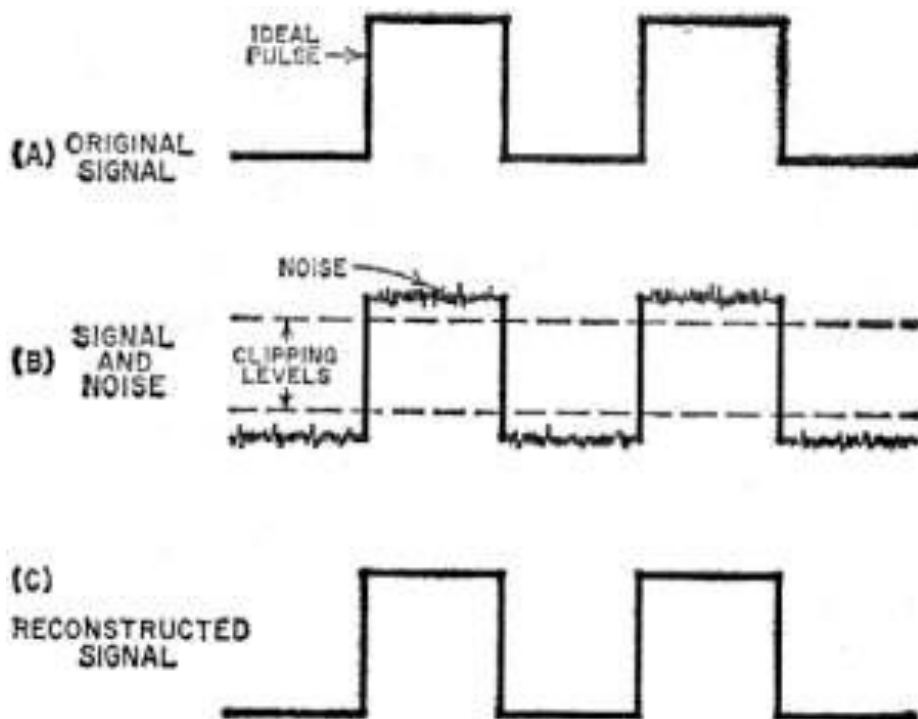
PCM: Uzorkuje amplitudu signala u redovitim intervalima te kvantizira svaki uzorak u binarni broj.



Slika 4.1 Pulsna modulacija [7]

Također postoje različite primjene pulsne modulacije, temeljno se koriste u digitalnim komunikacijskim sustavima jer omogućuju učinkovit prijenos digitalnih podataka preko različitih medija, PCM je koristan za pretvaranje analognih signala u digitalni oblik radi obrade i prijenosa, dok primjerice PWM je široko korišten za kontrolu snage poput reguliranja brzine motora.

Pulsna modulacija ima određene prednosti, kao prvo, pulsna modulacija nudi prijenos i prijem praktički bez šuma (prikaz na slici 4.2), također je bitno napomenuti da je PPM inherentno otporan na šumove jer se oslanja na vremensku domenu za detekciju signala. Još jedna izvanredna prednost je učinkovita korist energije odašiljača zbog jednostavne "on-off" prirode impulsa što dovodi do većeg dometa od AM odašiljača iste snage. Finalno pulsna modulacije je svestrana jer se može prilagoditi različitim medijima prijenosa i pogodna je za obradu digitalnih i analognih signala.



Slika 4.2 Otpornost na šumove u pulsnoj modulaciji [7]

Ukratko, pulsna modulacija je ključni aspekt modernih komunikacijskih i kontrolnih sustava koji nudi svestranost, učinkovitost i robusnost u prijenosu signala preko različitih medija. Njene primjene obuhvaćaju telekomunikacije, prijenos podataka, kontrolu snage i obradu signala, čineći je temeljnom tehnikom u inženjerstvu i tehnologiji.

## 5. PAM MODULACIJA

U PAM modulaciji se amplituda svakog impulsa mijenja proporcionalno amplitudi analognog signala u tom trenutku.

Karakteristike PAM modulacije su konstantna širina i položaj impulse, te promjenjiva amplituda. Također je bitno napomenuti jednostavnost implementacije ove modulacije.

Glavne prednosti PAM modulacije su jednostavnost generiranja i demodulacije, te je upravo zbog toga osnova za druge tehnike modulacije poput PCM dok potencijalne mane bi bile smetnje na šum jer šum izravno utječe na amplitudu te neučinkovitost u pogledu propusne učinkovitosti.

### 5.1 Simulacija PAM u Matlabu

Ulazne karakteristike:

*>> PAM\_mod*

*Frekvencija modulacijskog signala:2*

*Frekvencija prijenosnog signala:20*

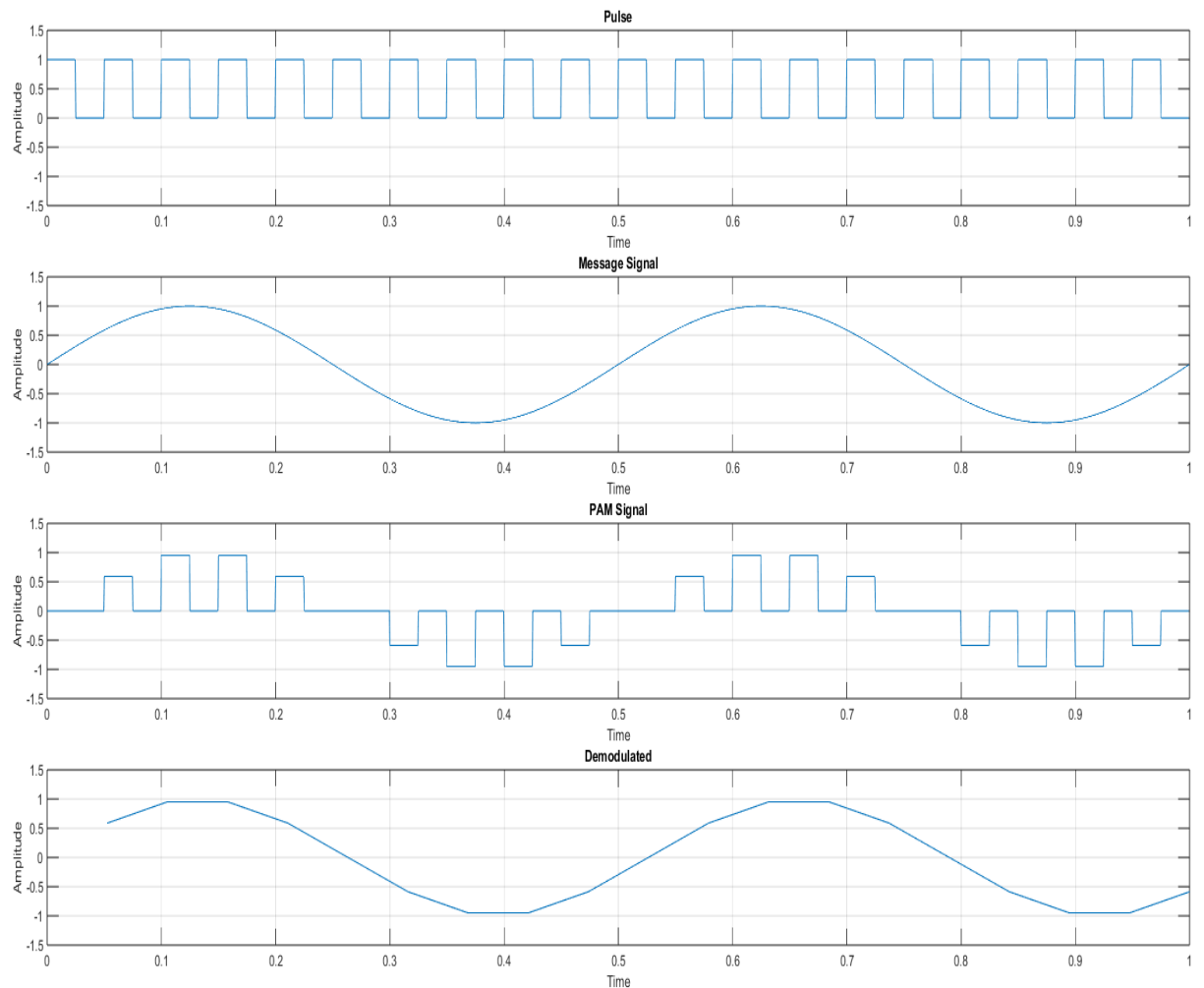
*Amplituda:1*

*Duty Cycle:50*

Pri simulaciji PAM modulacije prvo se stvara prijenosni signal pravokutnog oblika i modulacijski signal. Zatim da se postigne modulirani PAM signal (slika 5.1), prijenosni signal se uspoređuje sa modulacijskim signalom te se postavlja amplituda moduliranog signala na amplitudu modulacijskog signala u trenucima kad je prijenosni signal aktivan. Dakle iz moduliranog PAM signala se vide očekivane karakteristike, a u ovom slučaju su to konstantna širina i položaj impulsa, ali promjenjiva amplituda (ovisna o amplitudi informacije).

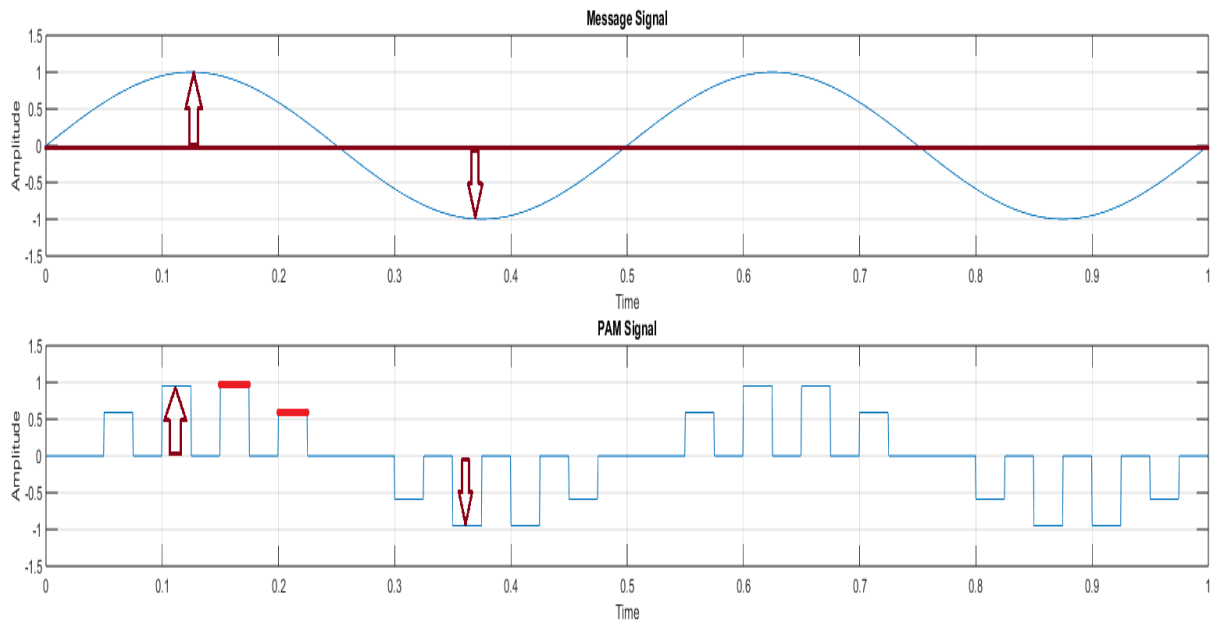
Uz dobre ulazne karakteristike iz moduliranog signala, postupkom demodulacije

dobiva se demoduliran signal koji bi trebao biti sličan ulaznom modulacijskom signalu (prikazan na dnu slike 5.1).



Slika 5.1 Simulacija PAM u Matlabu, postignuta sa skriptom PAM\_mod

U ovoj simulaciji se dobiva bipolarni PAM signal dobiven regularnim uzorkovanjem. Bipolarnost PAM signala nalaže promjenu polariteta koja odgovara promjeni polariteta modulacijskog signala, regularno uzorkovanje opisuje oblik impulsa, u ovom slučaju to znači pravokutni oblik sa konstantnom razinom impulsa, bitno je također uočiti iznos amplitude moduliranog PAM signala, koji je proporcionalan amplitudi modulacijskog signala, ove karakteristike su prikazane i označene na slici 5.2



Slika 5.2 Modulirani PAM signal



## 6. PWM MODULACIJA

U PWM modulaciji se širina (trajanje) svakog impulsa mijenja proporcionalno amplitudi analognog signala u tom trenutku.

Karakteristike PWM modulacije su konstantna amplituda i položaj impulsa, te promjenjiva širina impulsa. Dakle PWM prenosi informacije analognog signala putem trajanja impulsa.

PWM se koristi u aplikacijama za kontrolu snage poput upravljanja motorima i prugašivanja LE diode te u audio sintezi i komunikacijskim sustavima. Konkretno primjene PWM modulacije bi bile uključivanje zupalice s različitim razinama glasnoće, kontroliranje brzine motora, omogućavanje analognog izlaza, stvaranje audio signala i kodiranje poruka u telekomunikacijama.

Glavne prednosti PWM modulacije bi bile otpornost na šum jer se informacije prenose u vremenskoj domeni te učinkovita kontrola isporuke snage dok potencijalne mane bi bile složenije generiranje i demodulacija i potencijalne elektromagnetske smetnje zbog prekidačke prirode impulsa.

### 6.1 Simulacija PWM u Matlabu

Ulazne karakteristike:

```
>> PWM_mod
```

*Frekvencija modulacijskog signala:2*

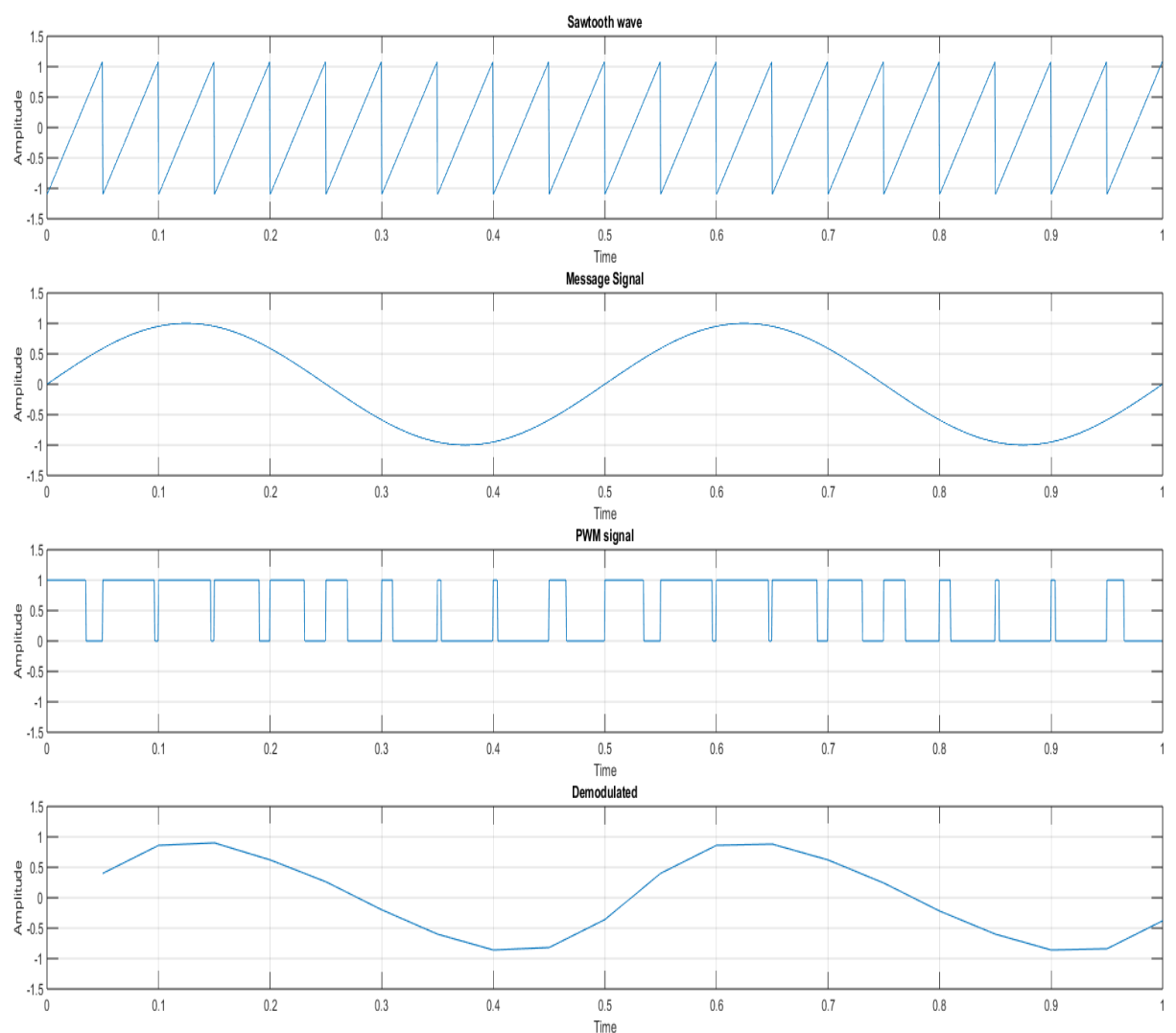
*Frekvencija prijenosnog signala:20*

*Amplituda:1*

Pri simulaciji PWM modulacije prvo se stvara prijenosni signal pilastog oblika i modulirani signal. Zatim da se postigne modulirani PWM signal (slika 6.1), prijenosni signal se uspoređuje sa modulacijskim signalom te se postavlja amplituda moduliranog signala na vrijednost zadane amplitude u trenucima kada modulacijski

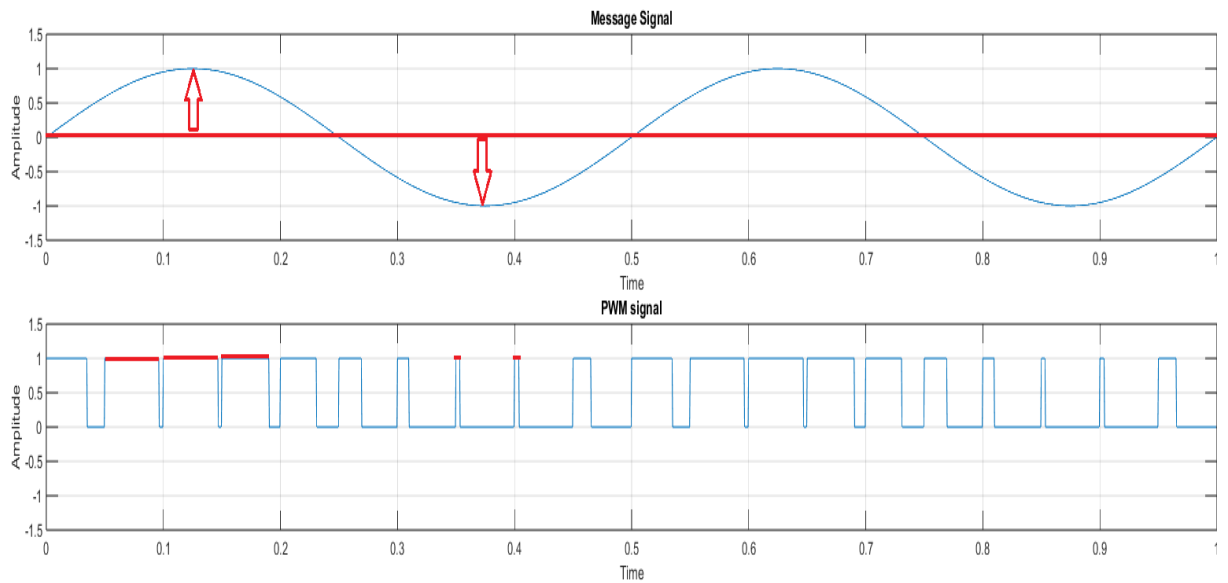
signal ima veću amplitudu od prijenosnog signala. Dakle iz moduliranog PWM signala se vide očekivane karakteristike, a u ovom slučaju su to konstantna amplituda i položaj impulsa, ali promjenjiva širina (koja ovisi o razini amplitude informacije).

Uz dobre ulazne karakteristike iz moduliranog signala, postupkom demodulacije dobiva se demoduliran signal koji bi trebao biti sličan ulaznom modulacijskom signalu (prikazan na dnu slike 6.1).



Slika 6.1 Simulacija PWM u Matlabu, postignuta sa skriptom PWM\_mod

Iz moduliranog PWM signala moguće je očitati njegove glavne karakteristike naspram modulacijskog signala. Moguće je zapaziti odnos amplitude modulacijskog signala naspram širine impulse PWM signala, točnije količina amplitude je proporcionalana širini impulse PWM signala, tj. kako se amplitude povećava tako se širine impulsa povećavaju i obratno (slika 6.2).



Slika 6.2 Modulirani PWM signal

## 7. PPM MODULACIJA

U PPM modulaciji se položaj svakog impulsa u odnosu na početak vremenskog perioda impulsa mijenja prema amplitudi analognog signala. Uobičajeno se radi uz PWM modulaciju (tj. može se gledati kao modifikaciju PWM modulacije).

Karakteristike PPM modulacije su konstantna amplitude i širina impulsa te promjenjiv položaj, dakle informacija se prenosi putem vremenskog rasporeda impulsa.

PPM modulacije se koriste u optičkim komunikacijskim sustavima te nekim bežičnim i RF (radio frequency) komunikacijskim sustavima. Konkretno primjene PPM modulacije bi bile u kontroli zračnog prometa i telekomunikacijskim mrežama, u daljinski upravljanim automobilima, zrakoplovima i vlakovima.

Glavne prednosti PPM modulacije su visoka otpornost na šumove i smetnje, al pod uvjetom da možemo precizno izmjeriti vrijeme impulsa, te učinkovitost u pogledu potrošnje energije jer impulsi imaju fiksnu amplitudu i trajanje. Potencijalne mane bi bile zahtijevnost preciznije sinkronizacije između predajnika i prijemnika te složenost za generiranje i demodulaciju naspram PAM i PWM.

### 7.1 Simulacija PPM u Matlabu

Ulazne karakteristike:

```
>> PPM_mod
```

*Frekvencija modulacijskog signala:2*

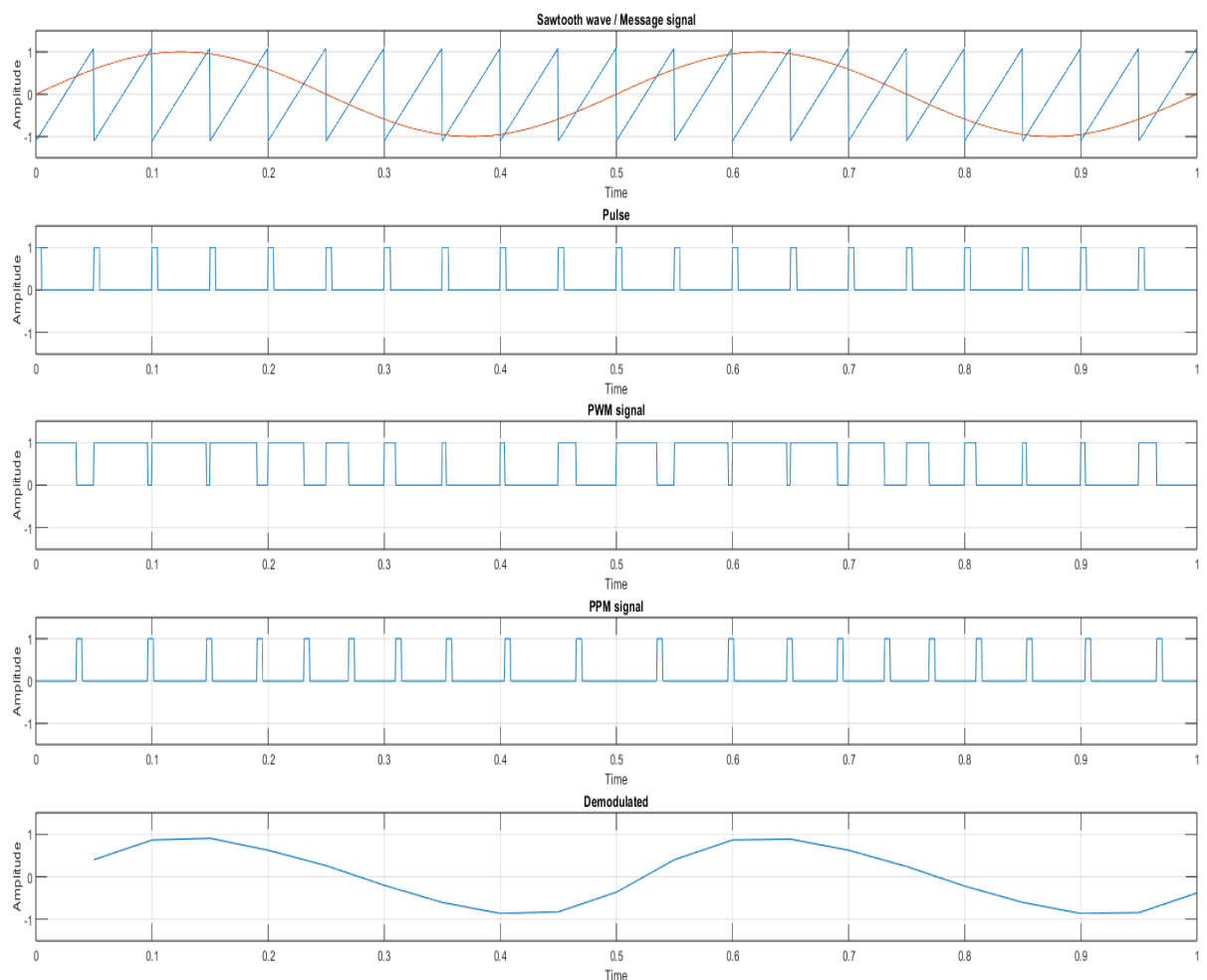
*Frekvencija prijenosnog signala:20*

*Amplituda:1*

Simulacija PPM modulacije je usko povezana uz PWM modulaciju, zato pri simulaciji PPM modulacije prvo se stvara prijenosni signal pilastog oblika i modulacijski signal kao u PWM. Također postoji impuls koji je signal pravokutnog oblika. Da se postigne modulirani PPM signal (slika 7.1) modulacijski signal se uspoređuje sa prijenosnim

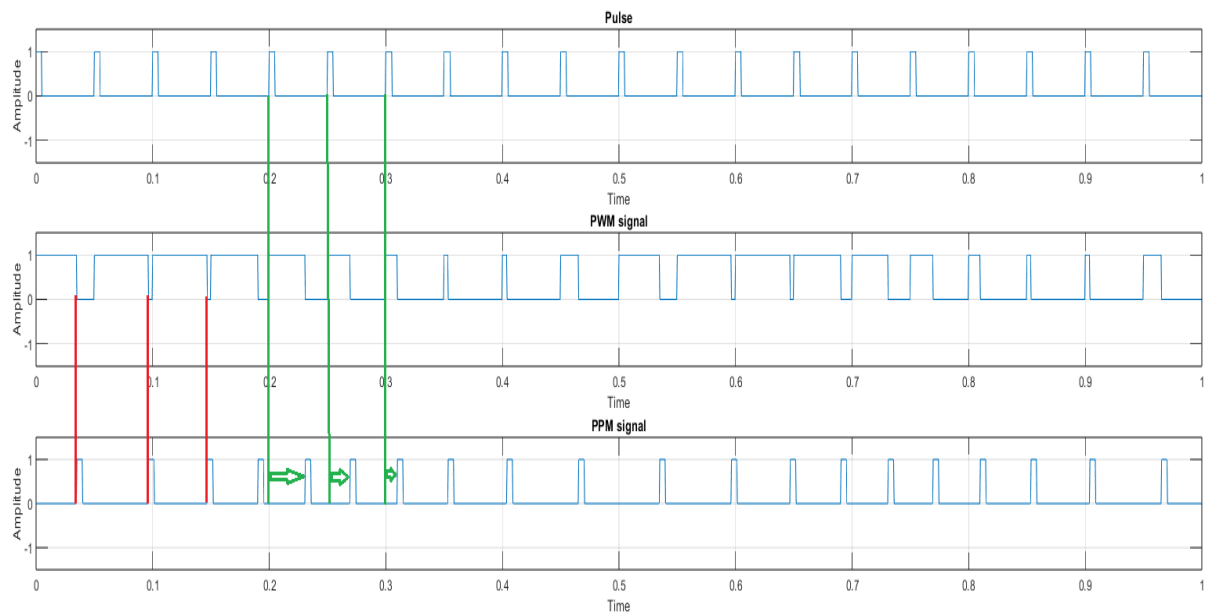
signalom i gledaju se točno indeksi kad je prijenosni signal veći od modulacijskog te točno u tim trenutcima se okida modulirani PPM signal koji ima amplitudu i trajanje kao od prije deklariran impuls. Dakle iz moduliranog PPM signala se vide očekivane karakteristike, a u ovom slučaju su to konstantna amplituda i širina signala, ali promjenjiv položaj.

Uz dobre ulazne karakteristike iz moduliranog signala, postupkom demodulacije dobiva se demoduliran signal koji bi trebao biti sličan ulaznom modulacijskom signalu (prikazan na dnu slike 7.1).



Slika 7.1 Simulacija PPM u Matlabu, postignuta sa skriptom PPM\_mod

Najbitnija karakteristika kod moduliranog PPM signala je pozicija pulsa, pogotovo u odnosu na originalni impuls te PWM modulaciju, ako se pogleda pažljivo, crveno je označen odnos PPM i PWM signala, tj. kad PWM signal prestane biti aktivan PPM signal okine impuls, a zeleno je označen pomak PPM signala naspram originalnog impulsa-proporcionalni su razinama modulacijskog signala u tim trenucima (slika 7.2).



Slika 7.2 Modulirani PPM signal

## 8. MQAM MODULACIJA

MQAM (kvadratura amplitudna modulacija) je kombinacija amplitudne modulacije (AM) i fazne modulacije (FM) koja se koristi u digitalnim komunikacijskim sustavima za učinkovitiji prijenos podataka. Pojam  $M$  u MQAM označava koliko se bitova prenosi po vremenskom intervalu ili broj simbola za svaku jedinstvenu kombinaciju amplitude/faze. [8] Ovom modulacijom postiže se to da se pomoću amplitudne modulacije istom prijenosnom signal utiskuju dva modulacijska signala.

Prvi modulacijski signal modulira amplitudu prijenosnog signala dok istovremeno drugi modulacijski signal, također modulira amplitudu signala, ali s faznim pomakom od  $90^\circ$  u odnosu na prijenosni signal. Zbrajanjem ta dva signala, dakle kosinusoide i sinusoide istih frekvencija dobiva se modulirani QAM signal. Rezultantni modulirani QAM signal, će dakle imati promjenjivu fazu, ali i amplitudu u odnosu na nemodulirani signal.[9]

MQAM modulacije se koriste u sustavima kao što su:

Wi-Fi (standardi 802.11 koriste 64-QAM i više).

Digitalno TV emitiranje (kao što je DVB).

Mobilne mreže (4G LTE, 5G).

Glavne prednosti MQAM modulacije su visoka spektralna učinkovitost, skalabilnost, učinkovitost u sustavima koji zahtijevaju velike brzine prijenosa podataka dok većina mana dolazi sa velikim iznosima  $M$  kao što su osjetljivost na šum, povećana složenost te energetska učinkovitost.

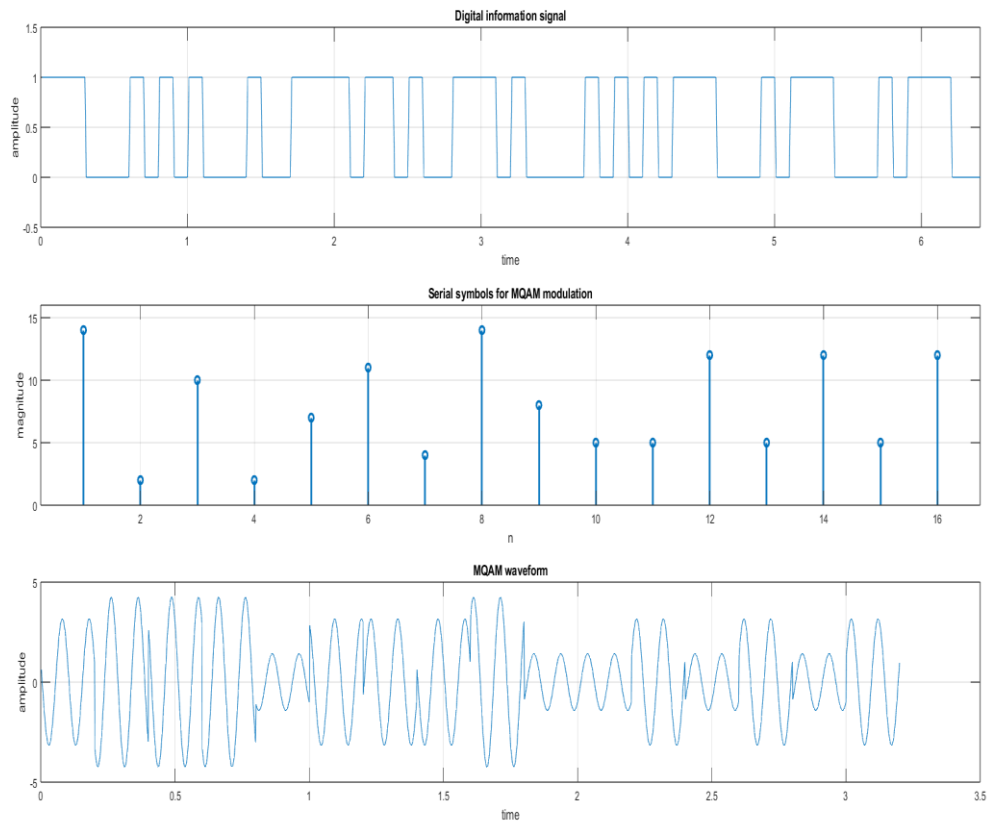
### 8.1 Simulacija MQAM u Matlabu

Ulazne karakteristike:

```
>> MQAM_mod
```

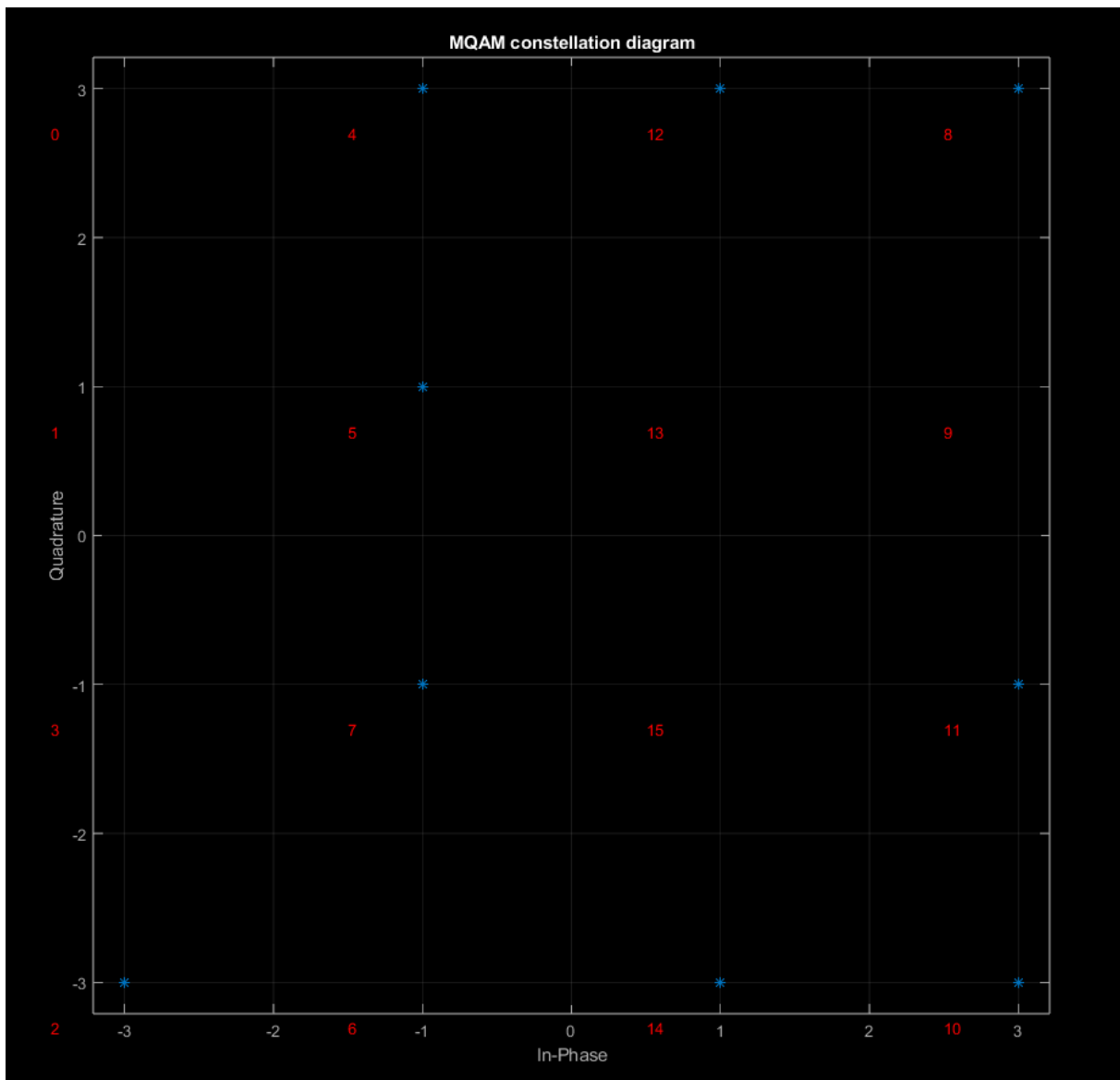
Vrijednost  $M$ (broj stanja) za QAM: 16

Pomoću ulaznog toka bitova se stvara valni oblik MQAM modulacije (prikazano na dnu slike 8.1). Ovdje je odrađen 16 QAM što predstavlja 16 mogućih simbola od kojih se svaki sastoji od 4 bita, primljeni simboli (označeni plavo) se nalaze na konstelacijskom dijagramu zajedno sa svim mogućim vrijednostima simbola (prikazano na slici 8.2.). Slika 8.3 prikazuje dobivene simboli zajedno sa demoduliranim signalom.

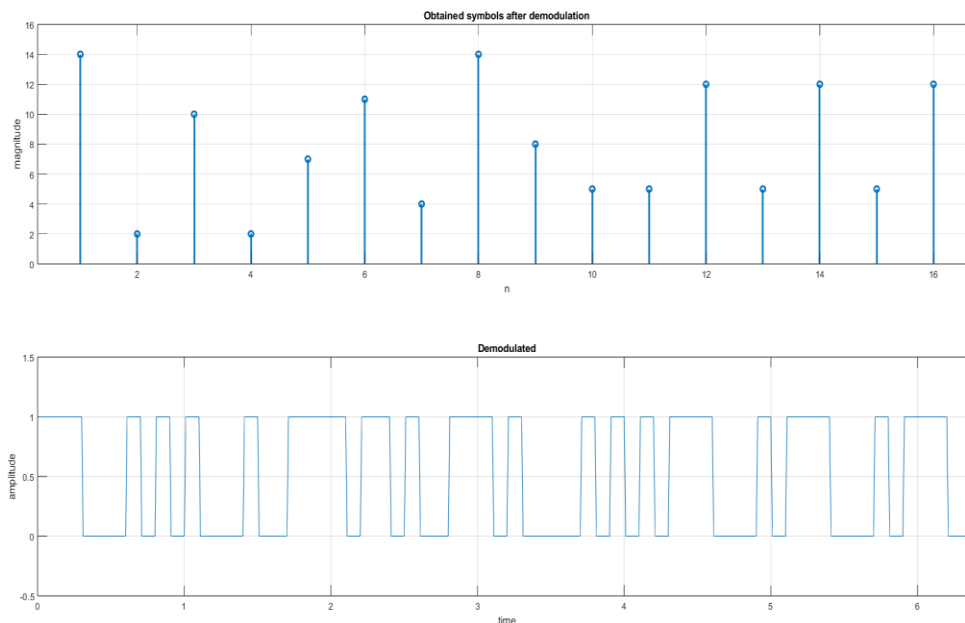


Slika 8.1 16-QAM modulacija, postignuta sa skriptom MQAM\_mod



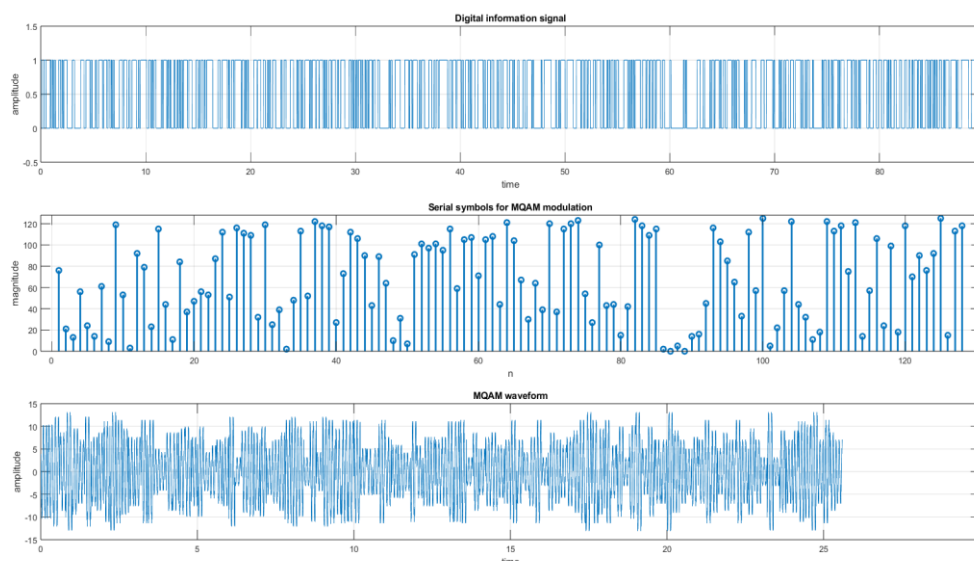


Slika 8.2 Konstelacijski dijagram zajedno sa prenesenim simbolima, postignuto sa skriptom MQAM\_mod

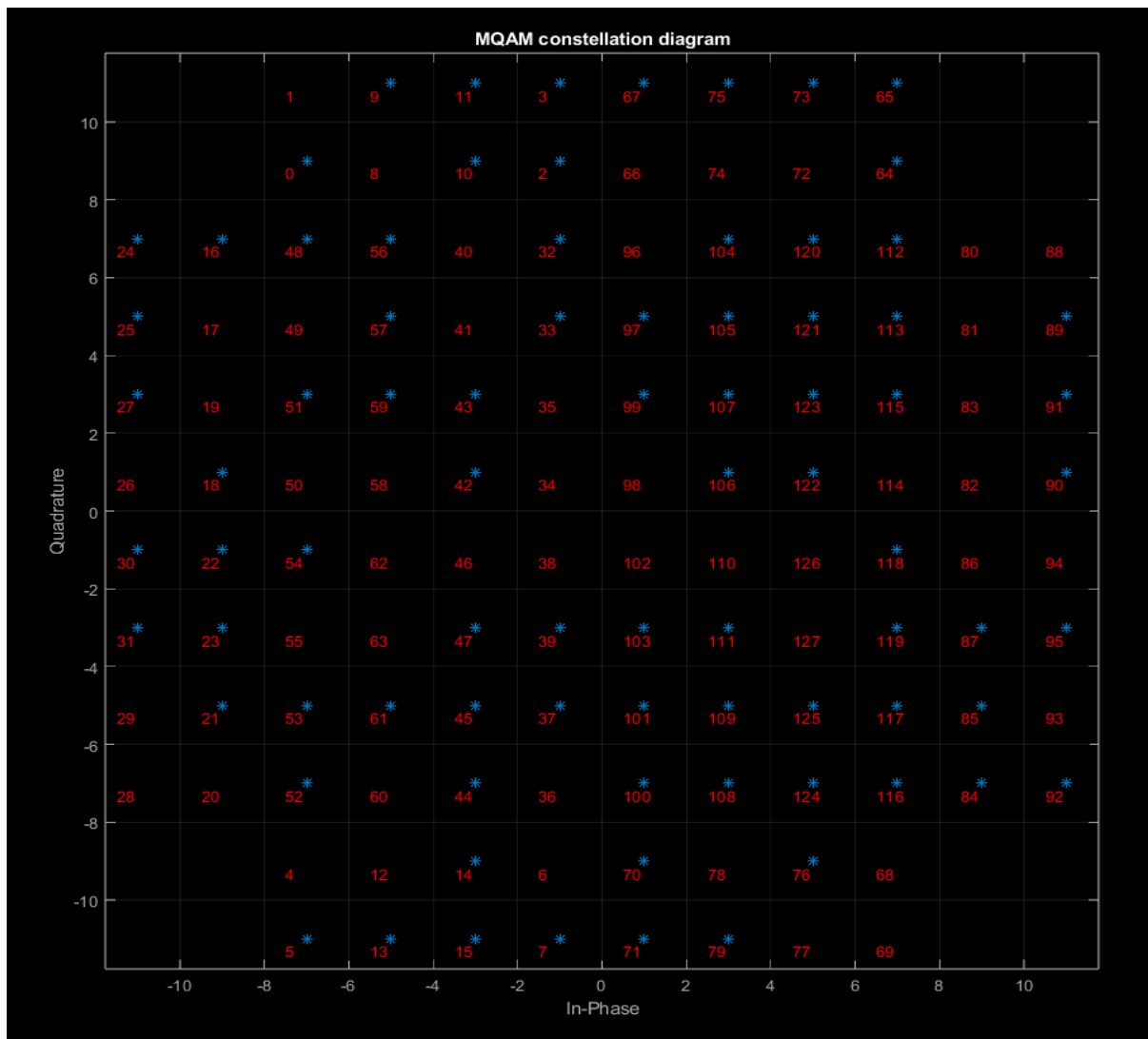


Slika 8.3 16-QAM demodulacija, postignuta sa skriptom MQAM\_mod

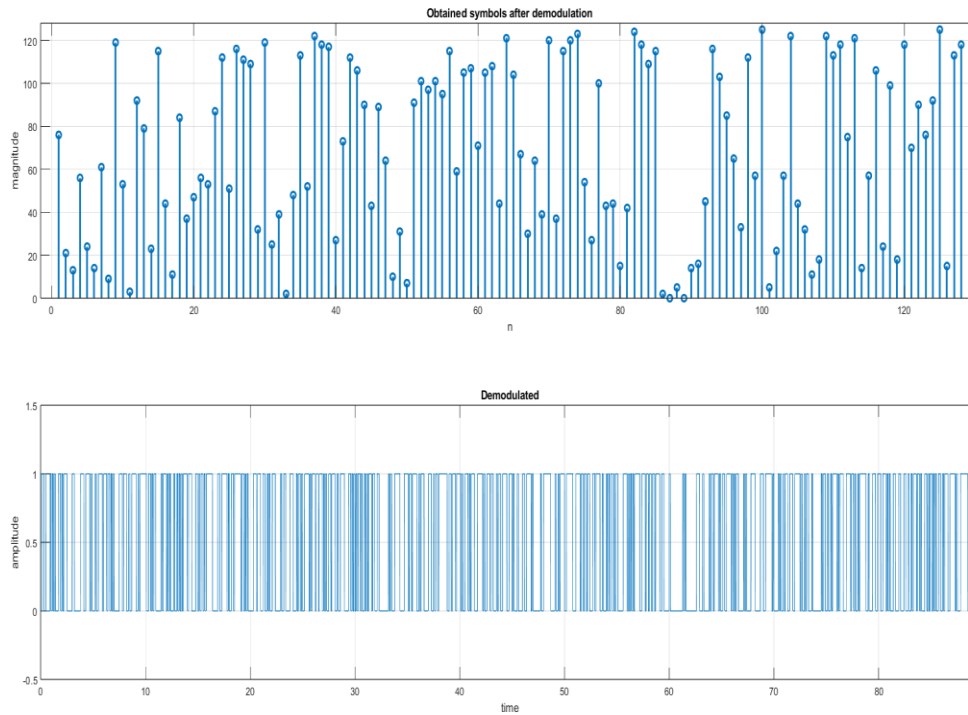
Za sljedeći prikaz QAM modulacije, odrađen je QAM sa M vrijednosti 128 (slike 8.4, 8.5 i 8.6), moguće je vidjeti veći broj bitova, ali također i povećanu kompleksnost sustava, posebice vidljivo na konstelaciji - simboli su više zgusnuti (prikazano na slici 8.5).



Slika 8.4 128-QAM demodulacija, postignuta sa skriptom MQAM\_mod

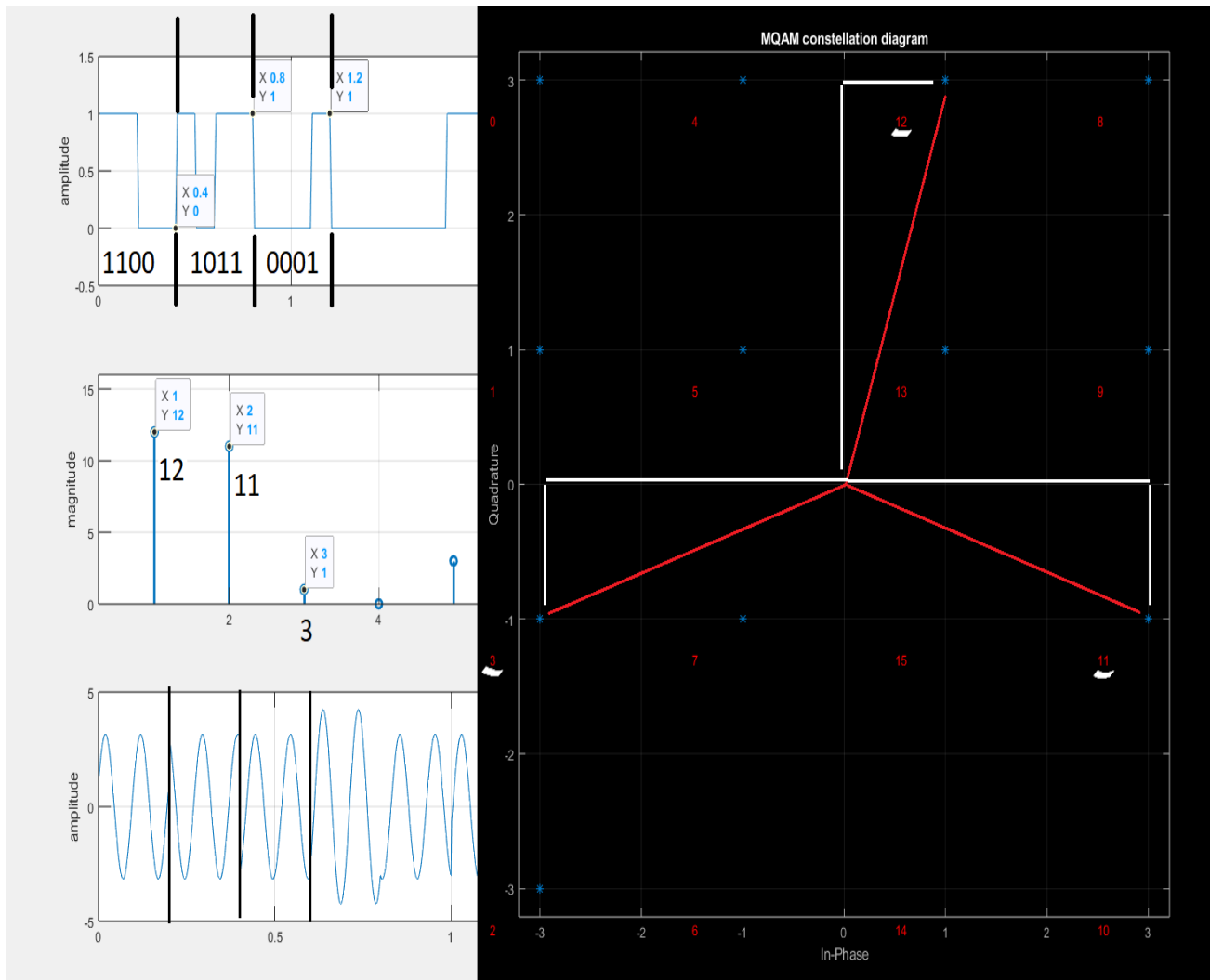


Slika 8.5 Konstelacijski dijagram zajedno sa prenesenim simbolima, postignuto sa skriptom MQAM\_mod



Slika 8.6 128-QAM demodulacija, postignuta sa skriptom MQAM\_mod

Glavne karakteristike QAM modulacije su činjenica da QAM valni oblik sadrži promjene u fazi i amplitude koje se očituju na konstelacijskom dijagramu, na slici 8.7 se promatra slanje simbola 12,11 i 3.



Slika 8.7 Princip rada MQAM modulacije

Na desnoj strani su označeni simboli na konstelacijskom dijagramu dok na lijevoj strani ih se vidi u binarnom, decimalnom, te valnom obliku. Svaki simbol je prikazan unutar konstelacije sa vrijednošću svoje realne (Re, x os, in-phase) i imaginarne (Im, y os, quadrature) komponente. Amplituda se dobiva tako da se korijenuje zbroj kvadrata Im i Re vrijednosti, a faza se očitava pomoću funkcije arkus tangensa,  $\arctg(\text{Im}/\text{Re})$ .

Primjer odrađen za simbol vrijednosti 11:

$$\text{Amplituda} = \sqrt{3^2 + (-1)^2} = 3.16$$

$$\text{Faza} = \tan^{-1}\left(\frac{-1}{3}\right) = -18.43^\circ$$

## 9. ZAKLJUČAK

Tema ovog rada je bila simulacija PAM, PWM, PPM i MQAM modulacije koristeći se računalnim programom Matlab. Također se u radu pokriva teorijski važnost ne samo pulsne modulacije nego i općenito modulacije signala.

Moguće je zaključiti da je modulacija od ogromne važnosti za današnje doba, te se primjenjuje u telekomunikacijama, prijenosu podataka, kontrolu snage i obradu signala. Također treba zapaziti važnost simulacije ovakvih postupaka. Softver za simulaciju može pomoći u optimizaciji dizajna, provjeri izračuna i identificiranju potencijalnih problema prije izrade fizičkog prototipa.

Bitno je napomenuti i druge pristupe pri simulaciji modulacije, što se tiče softverskog pristupa, Matlab nije jedini softver, primjerice postoji još i LTspice. Kompletno drugi način testiranja moduliranog signala je korištenje generatora signala i analizatora signala. Generator signala je uređaj koji može proizvoditi različite vrste signala, a analizator signala je uređaj koji može mjeriti i prikazivati karakteristike signala. Povezivanjem generatora signala i analizatora signala moguće je generirati i testirati modulirani signal u stvarnom vremenu i usporediti ga s rezultatima simulacije.

## LITERATURA

- [1] Matlab, dostupno na: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [17.9.2024.]
- [2] MathWorks, MATLAB (R2024b), dostupno na: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [17.9.2024.]
- [3] I. Modlić, B. Modlić Visokofrekvencijska Elektronika. 2, Modulacija, Modulatori, Sintezatori Frekvencije, Školska knjiga, Zagreb, 1982.
- [4] What is Modulation and Different Types, dostupno na: <https://www.elprocus.com/different-types-of-modulation-techniques-in-communication-systems/> [17.9.2024.]
- [5] Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Modulation and demodulation, dostupno na: <https://web.mit.edu/6.02/www/f2011/handouts/Modulation.pdf> [17.9.2024.]
- [6] ACS College of Engineering, PULSE MODULATION, dostupno na: <https://www.acsce.edu.in/acsce/wp-content/uploads/2020/03/ADC-module-3-final.pdf> [17.9.2024.]
- [7] Pulse modulation, dostupno na <https://www.rfcafe.com/references/popular-electronics/pulse-modulation-october-1960-popular-electronics.htm> [17.9.2024.]
- [8] L. E. Frenzel, Electronics Explained: Fundamentals for Engineers, Technicians, and Makers. Newnes, Oxford, 2017.
- [9] Fakultet prometnih znanosti – UniZG, OBRADA SIGNALA I MULTIPLEKSNI SUSTAVI, dostupno na <https://www.fpz.unizg.hr/zto/PRSUS/Modulacija.pdf> [17.9.2024.]

## SAŽETAK

PAM mijenja amplitudu impulsa, s fiksnom širinom i položajem. PWM mijenja širinu impulsa, s fiksnom amplitudom i položajem. PPM mijenja položaj impulsa, s fiksnom amplitudom i širinom. MQAM je kombinacija amplitudne modulacije (AM) i fazne modulacije (FM) koja se koristi u digitalnim komunikacijskim sustavima za učinkovitiji prijenos podataka.

Svaka od ovih tehnika modulacije ima svoje specifične primjene, prednosti i ograničenja, što ih čini prikladnima za različite vrste komunikacijskih i kontrolnih sustava.

Za proučavanje i simulaciju ovih modulacijskih tehnika koristimo Matlab, jer Matlabovi opsežni paketi alata i alati za vizualizaciju ga čine idealnom platformom za proučavanje, projektiranje i optimiziranje tehnika modulacije signala u akademskim i profesionalnim okruženjima.

Ključne riječi: modulacija, demodulacija, Matlab, impuls, PAM, PWM, PPM, MQAM



## **ABSTRACT**

PAM varies the amplitude of pulses, with fixed width and position. PWM varies the width of pulses, with fixed amplitude and position. PPM varies the position of pulses, with fixed amplitude and width. MQAM is a combination of phase modulation (PM) and amplitude modulation (AM) , it is used in digital communication systems for more efficient data transmission.

Each of these modulation techniques has its specific use cases, advantages, and limitations, making them suitable for different types of communication and control systems.

To study and simulate these modulation techniques we use Matlab, because Matlab's extensive toolboxes and visualization tools make it an ideal platform for studying, designing, and optimizing signal modulation schemes in both academic and professional settings.

Keywords: modulation, demodulation, Matlab, impulse, PAM, PWM, PPM, MQAM

## PRILOG

### Matlab skripte

#### PAM modulacija (PAM\_mod.m):

```
close all;
clear all;

fm = input("Frekvencija modulacijskog signala:");
fc = input("Frekvencija prijenosnog signala:");
if(fc < (2*fm))
    error("Nyquist–Shannon sampling theorem: frekvencija " + ...
        "prijenosnog mora biti >2* naspram frekvencije " + ...
        "modulacijskog signala, preporuča se oko 10 do 20 " + ...
        "puta veća vrijednost za dobru modulaciju")
end

fs = fm*fc*50;

amplitude = input("Amplituda:");

t = 0:1/fs:1-1/fs;

dutyC = input("Duty Cycle:");
if(dutyC < 0 || dutyC > 100)
    error("Duty cycle mora biti [0,100]")
end

pulse = amplitude * square(2*pi*fc*t, dutyC);
pulse(pulse < 0) = 0;

message = amplitude * sin(2*pi*fm*t);
```

```

samples_period = length(t)/fc;
index = 1:samples_period:length(t);
index = floor(index);
samplesON = ceil(samples_period * dutyC/100);

PAM = zeros(1,length(t));
for i = 1 : length(index)
    PAM(index(i):index(i) + samplesON-1) = message(index(i));
end

x = amplitude*1.5;

```

```

subplot(4,1,1);plot(t,pulse);title('Pulse');xlabel('Time');
ylim([-x,x]);ylabel('Amplitude');grid on;
subplot(4,1,2);plot(t,message);title('Message Signal');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;
subplot(4,1,3);plot(t,PAM);title('PAM Signal');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;

```

```

mask = [true, diff(PAM) ~= 0];
demodulated=PAM;
demodulated=demodulated(mask);
demodulated=nonzeros(demodulated);
td=1/length(demodulated):1/length(demodulated):1;
subplot(4,1,4);plot(td,demodulated);title('Demodulated');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;

```

### **PWM modulacija(PWM\_mod.m):**

```

close all;
clear all;

fm = input("Frekvencija modulacijskog signala:");
fc = input("Frekvencija prijenosnog signala:");
if(fc<(2*fm))

```

```

error("Nyquist–Shannon sampling theorem: frekvencija " + ...
      "prijenosnog mora biti >2* naspram frekvencije " + ...
      "modulacijskog signala, preporuča se oko 10 do 20 " + ...
      "puta veća vrijednost za dobru modulaciju")
end

fs= fm*fc*50;
t=0:1/fs:1-1/fs;

amplitude = input("Amplituda:");

s=amplitude*1.1*sawtooth(2*pi*fc*t);
message=amplitude* sin(2*pi*fm*t);

PWM = zeros(1,length(s));

for i=1:length(s)
    if (message(i)>s(i))
        PWM(i)=amplitude;
    else
        PWM(i)=0;
    end
end

x=amplitude*1.5;

subplot(4,1,1);plot(t,s);title('Sawtooth wave');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;
subplot(4,1,2);plot(t,message);title('Message Signal');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;
subplot(4,1,3);plot(t,PWM);title('PWM signal');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;

demodulated = demod(PWM,fc,fs,'pwm');

```

```

demodulated = 2*amplitude*(demodulated-0.5);
td=1/length(demodulated):1/length(demodulated):1;
subplot(4,1,4);plot(td,demodulated);title('Demodulated');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;

```

### **PPM modulacija (PPM\_mod.m):**

```

close all;
clear all;

fm = input("Frekvencija modulacijskog signala:");
fc = input("Frekvencija prijenosnog signala:");
if(fc<(2*fm))
    error("Nyquist–Shannon sampling theorem: frekvencija " + ...
        "prijenosnog mora biti >2* naspram frekvencije " + ...
        "modulacijskog signala, preporuča se oko 10 do 20 " + ...
        "puta veća vrijednost za dobru modulaciju")
end

fs= fm*fc*50;

amplitude = input("Amplituda:");

t=0:1/fs:1-1/fs;

s=amplitude*1.1*sawtooth(2*pi*fc*t);
message=amplitude* sin(2*pi*fm*t);

PWM = zeros(1,length(s));

dutyC = 10;
pulse =amplitude* square(2*pi*fc*t,dutyC);
pulse(pulse<0) = 0;

for i=1:length(s)

```

```

    if (message(i)>s(i))
        PWM(i)=amplitude;
    end
end

index = find(s > message);
index = ceil(index);
if (isempty(index))
    index = 1;
end
changes_in_index = diff(index);
points_of_change = find(changes_in_index ~= 1);
temp_PPM(1) = index(1);
temp_PPM(2:length(points_of_change)+1) = index(points_of_change + 1);

PPM = zeros(1,length(pulse));
on_ppm = ceil(fs/fc*dutyC/100);

for i = 1:length(temp_PPM)
    PPM(temp_PPM(i) : temp_PPM(i) + on_ppm - 1) = amplitude;
end

x=amplitude*1.5;

subplot(5,1,1);plot(t,s);title('Sawtooth wave / Message signal');
ylim([-x,x]);hold on;plot(t,message);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;
subplot(5,1,2);plot(t,pulse);title('Pulse');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;
subplot(5,1,3);plot(t,PWM);title('PWM signal');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;
subplot(5,1,4);plot(t,PPM);title('PPM signal');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;

demodulated = demod(PWM,fc,fs,'pwm');

```

```

demodulated = 2*amplitude*(demodulated-0.5);
td=1/length(demodulated):1/length(demodulated):1;
subplot(5,1,5);plot(td,demodulated);title('Demodulated');
ylim([-x,x]);xlabel('Time');ylabel('Amplitude');grid on;

```

### **MQAM modulacija (MQAM\_mod.m):**

```

clear all;
close all;

M=input('Vrijednost M(broj stanja) za QAM: ');
l2m=log2(M);
if(~(floor(l2m)==ceil(l2m)) || M<2)
    error('M mora biti potencija broja 2');
end

nbit=log2(M)*M;
msg=round(rand(nbit,1));

x=msg;
bp=1/10;
bit=[];
for n=1:1:length(x)
    if x(n)==1
        bv=ones(1,10);
    else
        bv=zeros(1,10);
    end
    bit=[bit bv];
end

t1=bp/10:bp/10:10*length(x)*(bp/10);
figure(1)

```

```
subplot(3,1,1);plot(t1,bit);axis([ 0 bp*length(x) -0.5 1.5]);
ylabel('amplitude');xlabel('time');title('Digital information signal');grid on;
```

```
msg_reshape=reshape(msg,log2(M),nbit/log2(M));
```

```
for j=1:1:nbit/log2(M)
    for i=1:1:log2(M)
        sym(j,i)=num2str(msg_reshape(j,i));
    end
end
```

```
symbols=bin2dec(sym);
symbols=symbols';
figure(1)
subplot(3,1,2);stem(symbols,'Linewidth',2);
title('Serial symbols for MQAM modulation');
ylim([0 M]);xlabel('n');ylabel('magnitude');grid on;
```

```
p=qammod(symbols,M);
sym=0:1:M-1;
```

```
RR=real(p);
II=imag(p);
sym_per=bp*2;
sym_rate=1/sym_per;
f=sym_rate*2;
t=sym_per/100:sym_per/100:sym_per;
ss=length(t);
mqam=[];
for k=1:1:length(RR)
    yr=RR(k)*cos(2*pi*f*t);
    yim=II(k)*sin(2*pi*f*t);
```



```

    y=yr+yim;
    mqam=[mqam y];
end

tm=sym_per/100:sym_per/100:sym_per*length(RR);
figure(1);
subplot(3,1,3);plot(tm,mqam);title('MQAM waveform');
xlabel('time');ylabel('amplitude');grid on;

m1=[];
m2=[];
for n=ss:ss:length(mqam)
    t=sym_per/100:sym_per/100:sym_per;
    y1=cos(2*pi*f*t);
    y2=sin(2*pi*f*t);
    ym1=y1.*mqam((n-(ss-1)):n);
    ym2=y2.*mqam((n-(ss-1)):n);
    tz1=trapz(t,ym1);
    tz2=trapz(t,ym2);
    tz1r=round(2*tz1/sym_per);
    tz2r=round(2*tz2/sym_per);
    m1=[m1 tz1r];
    m2=[m2 tz2r];
end

clear j;
for k=1:1:length(m1)
    c_sym(k)=m1(k)+j*m2(k);
end

demodulated=qamdemod(c_sym,M);
figure(2);

```

```

subplot(2,1,1);stem(demodulated,'linewidth',2);
title('Obtained symbols after demodulation');
ylim([0 M]);xlabel('n');ylabel('magnitude');grid on;

bin_s=dec2bin(demodulated);
[row, col]=size(bin_s);
c=1;
for i=1:1:row
    for j=1:1:col
        dem_bin(c)=str2num(bin_s(i,j));
        c=c+1;
    end
end

x=dem_bin;
bit=[];
for n=1:1:length(x)
    if x(n)==1
        bv=ones(1,10);
    else
        bv=zeros(1,10);
    end
    bit=[bit bv];
end

figure(2);
subplot(2,1,2);plot(t1,bit);axis([ 0 bp*length(x) -0.5 1.5]);
ylabel('amplitude');xlabel('time');title('Demodulated');grid on;

symg = qammod(sym,M,"gray");
x = (0:M-1);
scatterplot(p,1,0,'*');
for k = 1:M
    text(real(symg(k)) - 0.5,imag(symg(k)) - 0.3, ...
        num2str(x(k)),'Color',[1 0 0]);
end

```

```
end  
grid on;title('MQAM constellation diagram');
```