

# Algoritmi raspodjele resursa u relejnim mrežama zasnovanima na frekvencijskom multipleksu ortogonalnih podnosilaca s višestrukim pristupom

---

Švedek, Velimir

Doctoral thesis / Disertacija

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:645270>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Velimir Švedek

**ALGORITMI RASPODJELE RESURSA U RELEJNIM  
MREŽAMA ZASNOVANIMA NA FREKVENCIJSKOM  
MULTIPLEKSU ORTOGONALNIH PODNOSILACA S  
VIŠESTRUKIM PRISTUPOM**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Velimir Švedek

**ALGORITMI RASPODJELE RESURSA U RELEJNIM  
MREŽAMA ZASNOVANIMA NA FREKVENCIJSKOM  
MULTIPLEKSU ORTOGONALNIH PODNOSILACA S  
VIŠESTRUKIM PRISTUPOM**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
prof. dr. sc. Željko Ilić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Velimir Švedek

**RESOURCE ALLOCATION ALGORITHMS IN  
ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE  
ACCESS BASED RELAY NETWORKS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:  
Professor Željko Ilić, PhD

Zagreb, 2024

Doktorski rad je izrađen na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na  
Zavodu za telekomunikacije

Mentor: prof. dr. sc. Željko Ilić

Doktorski rad ima: 116 stranica

Doktorski rad br.: \_\_\_\_\_

# ŽIVOTOPIS MENTORA

**Željko Ilić** diplomirao je (1995.), magistrirao (1999.) i doktorirao (2004.) na Zavodu za telekomunikacije Fakulteta elektrotehnike i računarstva (FER) Sveučilišta u Zagrebu. Od 2022. godine do sada obavlja poslove redovitog profesora na Zavodu za telekomunikacije FER-a.

Područje njegovog znanstvenog i stručnog interesa su performanse prijenosnih sustava s posebnim naglaskom na algoritme raspodjele resursa u širokopoljnim mrežama temeljenim na metodi višestrukog pristupa OFDM/OFDMA, 5G mobilne mreže i raslojavanje mreže, te programski upravljane mreže. Aktivno sudjeluje u provedbi i vođenju projekata suradnje s gospodarstvom.

## **About the Supervisor**

**Željko Ilić**, received B.Sc., M. Sc. and Ph.D. in electrical engineering in 1995, 1999 and 2004 respectively from the Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Croatia. Currently he works as a full professor at the Department of Telecommunications, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb.

His specific interests are in the area of high-performance digital transmission with particular interests to resource allocation algorithms for multiuser OFDM/OFDMA systems, software-defined networks, 5G mobile networks and network slicing.

# ZAHVALA

Za početak želim se zahvaliti mentoru prof. dr. sc. Željku Iliću na znanstvenom i stručnom usmjeravanju, korisnim savjetima te nesebičnoj pomoći i razumijevanju tijekom izrade ovog doktorskog rada. Hvala za angažiranost i strpljenje tijekom brojnih razgovora koji su bili od iznimne važnosti za ovo istraživanje. Posebnu zahvalu upućujem doc. dr. sc. Adrianu Satji Kurdiji koji mi je svojim savjetima i idejama pomogao pri ostvarivanju doprinosa ovoga doktorskog rada.

Na kraju, htio bih zahvaliti mojoj obitelji koja me uvijek podržavala i poticala da ne odustajem i da se hrabro borim. Put stvaranja ovog rada bio je vrlo dug i zahtjevan.

Mojim roditeljima, majci Anđelki i ocu Tomislavu, zahvaljujem na iskrenoj podršci.

Zahvaljujem mojoj obitelji, supruzi Ivi i sinovima Karlu i Lovri na razumijevanju, pomoći i ljubavi koja mi je bila snažan oslonac i podrška tijekom svih godina moga znanstvenog rada.



## SAŽETAK

Uvođenje novih informacijsko-komunikacijskih tehnologija i povezanih usluga za koje su potrebne velike prijenosne brzine nezamislivo je bez razvijenog širokopojsnog pristupa internetu i izgrađene mrežne infrastrukture. Kombinacija prijenosnih tehnologija zasnovanih na tehnikama frekvencijskog multipleksa ortogonalnih podnosilaca s višestrukim pristupom (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - OFDMA) s relejnim tehnikama omogućava priliku za razvoj bežičnih komunikacijskih mreža sljedeće generacije u kojima su zadovoljeni zahtjevi za velikim prijenosnim brzinama, povećanim dometom te poboljšanom spektralnom efikasnošću i mrežnom stabilnosti. Relejne mreže temeljene na tehnologiji OFDMA učestalo se koriste u širokopojsnim prijenosnim sustavima kao što su IEEE 802.11ax, IEEE 802.16 te mobilnim mrežama. Spomenute mreže iziskuju pažljiv dizajn algoritama procjene kanala, algoritama dodjele resursa, algoritama odabira releja te racionalno korištenje ukupne dostupne snage, pri čemu se kao cilj zajedničke optimizacije istih može postići što veća prijenosna brzina uz što manju uloženu snagu, a uzimajući u obzir i pravednosti raspodjele resursa.

Cilj istraživanja je razvoj nove metode učinkovite procjene bežičnog kanala, u sustavima OFDMA, zasnovane na postupcima interpolacije i suradničkog filtriranja (engl. *Collaborative Filtering* - CF) te temeljem navedenog optimizirati postupak odabira relejnih postaja u svrhu postizanja definiranih parametara kvalitete usluge kao i unaprjeđenje algoritama raspodjele i grupiranja potkanala u OFDMA relejnim mrežama s ciljem maksimiziranja prijenosnih brzina. Disertacija prikazuje metodologiju kao i rezultate simulacija predloženih metoda i algoritama te njihovu usporedbu s istovjetnim metodama i algoritmima iz dostupne literature.

**Ključne riječi** - OFDMA, relejna postaja, tehnike relejnog prijenosa, algoritmi odabira releja, algoritmi dodjele resursa, procjena kanala, suradničko filtriranje, statički relej, mobilni relej

## **ABSTRACT**

# **RESOURCE ALLOCATION ALGORITHMS IN ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS BASED RELAY NETWORKS**

Over the last decade, the accelerated development of wireless broadband access technologies has been noted as a response to the increasing demand for higher quality services with heterogeneous demands on quality of service (QoS). An increasing number of different (dynamic) applications with different QoS parameters simultaneously demand different transmission data rates from the network, with supported latency ranges from a few milliseconds up to a few seconds, and a number of connections that can change to tens of thousands. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), as one of the most widespread modulation techniques successfully deals with above-mentioned requirements. OFDM, as a modulation technique where available frequency spectrum is divided into several orthogonal subcarriers, is characterized by simple implementation, high transmission data rates, high spectral efficiency and robustness against multipath propagation. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) extends the capabilities of OFDM by enabling multiple users to share a channel through distinct subcarrier assignments. It allocates resources among multiple users in both the time and frequency domains.

OFDM and OFDMA are actively used in wireless broadband systems such as IEEE 802.11ax (WLAN), IEEE 802.16 (WiMAX), digital video broadcasting-terrestrial (DVB-T) and mobile networks (4G, 5G). These technologies provide high-speed WLAN services, broadband wireless access services, mobile services, massive machine-type communication and ultra-reliable low-latency communication. The aforementioned networks require careful design

of channel estimation algorithms, resource allocation algorithms, relay selection algorithms and rational use of the total available power, whereby the goal of their joint optimization is to achieve the highest transmission speed with the lowest power consumption, while also taking into account proportional fairness constraints.

By introducing relay stations in communications channel between transmitters and receivers, it is possible to increase the total capacity of an individual cell and the range of the base station, and ultimately achieve a higher level of service quality. Relay based networks attracts a lot of attention from the scientific community, especially in the part of defining the algorithm for selecting relay stations that participate in the transmitter - relay station - receiver communication. Relay station selection algorithms represent a simple technique for achieving spatial diversity in cooperative relay networks. In general, the aforementioned algorithms require that each transmitter, or relay station, knows the state of the wireless channel (Channel-State Information - CSI) in order to make a decision on choosing a transmission path through the network from the transmitter to the receiver. Also, OFDMA-based relay networks open a large area of possible research related to resource allocation methods such as dynamic allocation of subchannels to the user with the aim of optimizing the characteristics of transmission systems (increasing transmission speeds while minimizing transmitter power and bit error probability). Resource allocation methods for different types of relay networks (one or more transmitters, one or more relays, and one or more receivers) have been investigated in a large number of scientific papers, where they deal with subchannel, bit and power allocation algorithms with the aim of achieving maximum transmission speed with minimally used power.

The goal of the research was to develop a new method of effective estimation of the wireless channel state based on interpolation methods and collaborative filtering (CF) procedures, and accordingly to optimize static and mobile relay selection techniques in order to achieve defined QoS parameters. Also, with proposed novel chunk-based subcarrier allocation strategy by grouping subcarriers into two unequal (static and dynamic) chunks aim was to maximize transmission speeds in OFDMA relay based networks.

This dissertation contains five chapters. In Chapter 1 the basic characteristics of the OFDMA relay based systems are described, as well as an overview of relay selection algorithms and resource allocation algorithms. The second Chapter 2 describes the model of the communication system used in the dissertation. Chapter 3 and 4 present the research area, and provide an overview of the existing literature as well as the results and scientific contributions

of this dissertation. Specifically, in Chapter 3 a new method for effective estimation of the wireless channel state based on interpolation and CF procedures is proposed and described. In Chapter 4 an optimization procedure for the selection of relay stations is proposed, together with a new resource allocation algorithms for the distribution and grouping of subchannels in OFDMA relay networks with the aim of maximizing user transmission speeds. Finally, last chapter presents the conclusions from this research and future work.

Chapter 1 describes characteristics of the OFDMA relay based systems and gives an overview of relay selection and resource allocation algorithms. OFDMA is a type of a low complexity modulation technique that allows data transmission by radio waves and as such is widely used in radio transmission systems. In general, this modulation allows data transmission using many parallel narrow-band sub-streams. Each sub-stream is modulated on closely spaced orthogonal frequency subcarriers. Orthogonality of the subcarriers is crucial in OFDMA for simultaneous transmission of data as there is no interference between adjacent subcarriers. One of the crucial issues in OFDMA transmission is the allocation of the power to the available subchannels in order to guarantee the minimum required QoS. In the context of OFDMA, different criteria to allocate the available resources can be performed depending upon whether the network is trying to maximize the overall data rate under a total power constraint, or to minimize the overall transmit power given a fixed data rate or bit error rate (BER). Since the source node in the OFDMA relay based networks depends on the relay nodes to forward the transmission, relay selection and resource allocation for the relay nodes become important in order to obtain optimal performance of the cooperative communication system. The proper selection of the relay can effectively improve the overall performance of the network in terms of higher data rate/throughput, lower power consumption and better BER performance. The relay selection plays an important role in increasing the diversity gain achieved in wireless communication systems, and therefore it has mostly attracted attention of the many research teams over the past few years.

In Chapter 2 system model and channel state estimation methods are described. The transmission of signals through a wireless communication channel takes place in a specific environment, which implies the presence of a large number of different obstacles (mobile and fixed), and which leads to a series of phenomena that affect the quality of communication, the transmission speed, as well as the maximum range of the network. Therefore, mathematical modeling of the wireless communication channel represents the most important, but also the most difficult part of system design. Given that radio channels are non-stationary and have

random characteristics, the determination of the channel model is mainly based on the laws of probability theory and the results of measurements carried out on a specific system. Very precise mathematical models that describe all the specifics of signal propagation in the communication channel are generally not possible to perform or are too complex for further use. Therefore, relatively simple and sufficiently precise statistical models of channels with fading were developed, which can be applied in certain propagation conditions with a good approximation of the communication environment. The models of communication channels are very numerous, and as part of this thesis, the AWGN and Rayleigh communication channel models were considered. In OFDMA, capacity of the system highly depends on the knowledge of CSI between transmitter and receiver and consequently. If channel distortion effect for each of the active subcarriers within an OFDM symbol is estimated accurately, undesirable effects on channel response can be compensated. Channel estimation methods can be grouped into two categories: non-pilot aided and pilot aided. The pilot aided techniques provide better results while sacrificing some part of available bandwidth for pilot data. The pilot aided channel estimation techniques can be performed by either inserting pilot symbols with a specific period into all subcarriers of OFDM symbols (block type) or inserting pilot symbols into each OFDM symbol (comb type). In a comb-type technique, after obtaining the channel information at pilot subcarriers, the OFDMA system receiver needs to use an efficient interpolation technique to estimate channel values at all non-pilot subcarriers. Interpolation methods can have a strong influence on accuracy of channel estimation. High transmission rates and low BER in OFDM systems force the use of interpolation methods that simultaneously fulfil low complexity and high accuracy, as these requirements are crucial for the accuracy of channel estimation. Popular one-dimensional interpolation methods like linear interpolation, second-order polynomial interpolation, and cubic spline interpolation, are often adopted in OFDM systems to accomplish the trade-off between complexity and accuracy. As the channel in wireless communication systems is time variant and frequency selective, efficient and accurate channel estimation is needed for a coherent detection of transmitted data, and it is therefore a challenging task. Currently there is a great interest in channel estimation techniques and interpolation methods that are used in OFDM systems and thus have been studied by many researchers. However, the performance of most of them is limited by either the number or the position of pilot subcarriers.

Chapter 3 presents newly developed method of effective assessment of the wireless channel state based on interpolation methods and CF techniques. High transmission rates and low BER in OFDM systems forces usage of some kind of interpolation methods for calculating the

estimation of channel distortions at non-pilot subcarriers within the symbol transmissions. Those interpolation methods need to simultaneously fulfil low complexity and high accuracy, as they can have a huge impact on the accuracy of channel estimation. As efficiency of the channel estimation is a challenging problem in wireless systems with time and frequency selective variance, we proposed a new channel estimation algorithm which combines commonly used interpolation methods and a memory-based CF technique. CF techniques are among the most successful techniques for building recommender systems. Recommender systems are based on learning systems and are used in e-commerce to recommend/predict useful items to new users from its databases of preferences for items by users. CF techniques use the known preferences of a group of users to make estimates of the unknown preferences for other users, with general assumption that if users  $X$  and  $Y$  rate some items similarly then they will also rate other items similarly. To make satisfactory recommendations in a short time period, CF algorithms are required to manage highly sparse data and to scale with increasing numbers of users and items. Depending on how the data of the rating matrix are processed, CF algorithms can be divided in two main categories: memory-based and model-based. The memory-based algorithms are broadly deployed into commercial systems because they are easy-to-implement and highly effective. They are using the entire or a sample of the user-item database to generate predictions. With assumption that every user is a part of some group of users with similar interests, by identifying the “neighbours” of a new user a prediction of her/his ratings on new items can be produced. In this thesis we propose to employ a memory-based CF approach in a previously unused context, to address challenges of wireless channel estimation in OFDM systems, especially the sensitivity to the number and location of the pilot subcarriers. The basic idea was to combine commonly used interpolation methods with memory-based CF techniques. In our newly proposed channel estimation algorithm, we have modified CF logic for the users of a wireless network in a way that items correspond to the subcarriers of respective users. In a prediction of unknown channel states at non-pilot subcarriers, the assumption was made that channel states at subcarriers of similar (close) users are behaving similarly. The proposed interpolation channel estimation algorithm was less sensitive to the number and location of the pilot subcarriers. Compared to existing estimation methods, the simulation results of the proposed algorithm showed improvements in prediction accuracy metrics for scenarios with low number of pilot subcarriers. Also, as there were not assumed a regular pilot placement, the proposed channel estimation algorithm may be distributed in OFDMA systems with an irregular overall pilot arrangement. However, by increasing the number of pilot subcarriers, the quality of the proposed channel estimation algorithm and, consequently, the accuracy of channel

estimation decreased. In conclusion, the proposed channel estimation algorithm based on collaborative filtering techniques for wireless channel estimation provides a practical algorithm for pilot-aided comb type OFDM based systems where different user channels need to be simultaneously determined at the base station which can induce an irregular overall pilot arrangement.

Chapter 4 presents optimized static and mobile relay selection techniques in order to achieve defined QoS parameters, with proposed novel chunk-based subcarrier allocation strategy by grouping subcarriers into two unequal (static and dynamic) chunks with the aim of maximizing transmission speeds in OFDMA relay based networks. Static and mobile relaying is often used to improve the user data rates in wireless communication networks, which would otherwise suffer due to large distances, interference, obstacles, and fading. In the relay selection phase, an active user should achieve its required minimum data rate. If it cannot be achieved by connecting directly to the base station (because of distance, interference, obstacles, fading, or poor channel gains), a relay should be selected for the corresponding user. Relay station is selected among the set of static relay stations, or among the set of idle users serving as mobile relay stations. We proposed two relay selection strategies, with different accuracies and time complexities: KD-tree (data structure used for fast retrieval of close points) and reduction to the assignment problem (AP). For both strategies, we assumed the knowledge of all current locations of active and idle users, relay stations and the base station. The proposed relay selection relies on the assumption that the goal is to minimize the total distance of two channel hops between an indirect user and the base station. In the tradeoff between the relay selection time and the obtained distance, KD-tree turns out to be the faster choice, while AP gives lower distances in the performed experiments. We also proposed a novel chunk-based subcarrier allocation strategy which makes use of the distinction between cloud network and edge network. Edge network is used for computation with real-time requirements, unlike cloud network which can be used for longer periodical computations if the corresponding entities are static, i.e., their positions and channel condition do not significantly change. Due to the fact that contiguous subcarriers are correlated, it is possible to group them into chunks, so as to reduce the signaling overhead and the complexity of subcarrier allocation. In our strategy, the subcarriers are divided into two unequal chunks: one for static relays and the other for mobile relays and direct users. Since the channel conditions between the base station and static relay stations do not significantly change, we can compute the static subcarrier allocation in the cloud network without real-time computational requirements. On the other hand, the channel between

the base station and direct users or mobile relay stations is constantly changing due to movement, so the allocation of subcarriers within the dynamic chunk can be computed in the edge network with real-time computational requirements. For allocation in both chunks, we propose to use either a greedy algorithm (for each subcarrier, select the relay/user with the highest SNR), or the Hungarian (Kuhn-Munkres) algorithm for the corresponding assignment problem (AP) of matching between relays/users and subcarriers, with assignment costs corresponding to SNR values. Unlike the subcarrier allocation in the dynamic chunk, the allocation of static chunk subcarriers does not need to be performed in each time frame, but only when the channel conditions significantly change, which saves the computational resources and enables the cloud network to schedule the allocation when it is most appropriate, not adhering to real-time constraints. Simulation results show that a greedy variation of the proposed allocation strategy is faster and more appropriate for the dynamic chunk, while the assignment problem (AP) strategy variation gives slightly higher data rates and can be used for the static chunk.

Finally, Chapter 5 presents the conclusions from this research and future work. In this thesis, the following scientific contributions are achieved:

- A new method for efficient assessment of the wireless channel state based on interpolation methods and collaborative filtering (CF) techniques.
- Optimization of the relay station selection procedure through proposed algorithms for static and mobile relay selection that rely on KD-tree and reduction to the generalized assignment problem (AP) with the aim of reducing the total distance between the user and the base station.
- A new chunk-based subcarrier allocation strategy using two unequal chunks (one for static relays and the other for mobile relays and direct users) which makes use of the distinction between cloud network without real-time computational requirements and edge network for computation with real-time requirements.

**Keywords** - OFDMA, Relay Selection, Static Relay, Mobile Relay, Subcarrier Allocation, Chunk, Channel Estimation, Collaborative Filtering



# SADRŽAJ

Uvod.....	1
1. Osnove relejnih mreža zasnovanih na frekvencijskom multipleksu ortogonalnih podnosilaca s višestrukim pristupom .....	4
1.1 Sustavi zasnovani na frekvencijskom multipleksu ortogonalnih podnosilaca .....	4
1.2 Prijenosni sustavi OFDMA .....	10
1.3 Relejni sustavi .....	13
1.3.1 Tehnike relejnog prijenosa .....	18
1.3.2 Algoritmi odabira releja .....	21
1.4 Algoritmi dodjele i pravednosti raspodjele resursa .....	25
1.4.1 Dodjela resursa.....	27
1.4.2 Algoritmi za dinamičku dodjelu resursa .....	30
1.4.3 Spektralna učinkovitost i pravednost raspodjele resursa.....	34
1.5 Otvorena pitanja .....	35
1.6 Sažetak poglavlja.....	36
2. Modeliranje i procjena komunikacijskog kanala .....	38
2.1 Bežični komunikacijski kanal .....	38
2.2 Smetnje u komunikacijskom kanalu .....	40
2.3 Tehnike diverzitija.....	43
2.4 Metode modeliranja komunikacijskog kanala.....	45
2.4.1 AWGN model komunikacijskog kanala .....	46
2.4.2 Rayleighov model komunikacijskog kanala.....	47
2.5 Metode za procjenu bežičnog komunikacijskog kanala.....	48
2.6 Sažetak poglavlja.....	48
3. Metoda za učinkovitu procjenu bežičnog kanala zasnovana na postupcima interpolacije i suradničkog filtriranja .....	50

3.1 Uvod i cilj istraživanja .....	50
3.2 Metode procjene kanala i interpolacijske tehnike u sustavima OFDM .....	53
3.2.1 Linearna interpolacija .....	56
3.2.2 Metoda interpolacijskog polinoma drugog stupnja .....	56
3.2.3 Metoda kubičnog interpolacijskog splajna .....	57
3.3 Tehnike suradničkog filtriranja .....	57
3.3.1 Metoda procjene kanala temeljena na tehnikama suradničkog filtriranja .....	60
3.3.2 Evaluacijske metrike .....	61
3.4 Predloženi algoritam za procjenu kanala .....	62
3.5 Postavke i rezultati simulacije .....	65
3.5.1 Utjecaj praga odluke $C$ na predloženu metodu interpolacije .....	66
3.5.2 Utjecaj gustoće pilot podnosilaca .....	68
3.5.3 Utjecaj razine sličnosti među korisnicima .....	70
3.6 Sažetak poglavlja .....	72
4. Algoritam raspodjele potkanala zasnovan na odsječcima u OFDMA relejnim mrežama uz odabir statičkog i mobilnog releja .....	74
4.1 Uvod .....	74
4.2 Model sustava i prijedlog algoritama .....	77
4.2.1 Odabir releja .....	78
4.2.2 Dodjela potkanala zasnovana na odsječcima .....	82
4.3 Predložene strategije odabira releja - rezultati .....	84
4.4 Dodjela potkanala zasnovana na odsječcima - rezultati .....	88
4.5 Sažetak poglavlja .....	93
5. Zaključak .....	94
Literatura .....	97
Popis slika .....	107
Popis tablica .....	110

Popis kratica .....	111
Životopis .....	113
Popis radova .....	114
Biography .....	116

## UVOD

Tijekom posljednjeg desetljeća zamjetan je ubrzani razvoj bežičnih širokopojasnih pristupnih tehnologija kao odgovor na sve veću potražnju raznovrsnih usluga s heterogenim zahtjevima na kvalitetu usluge (engl. *Quality of Service* - QoS) kao npr. velike prijenosne brzine, mala vremena kašnjenja i dr. Iako su se prijenosne brzine od prve generacije mobilnih sustava uvećale i do tisuću puta, iste i dalje predstavljaju najveći izazov. Uz navedene brzine sve veći broj raznovrsnih (dinamičkih) aplikacija s različitim QoS zahtjevima od mreža zahtjeva istovremeno pružanje različitih prijenosnih brzina u rasponima od nekoliko desetaka kbit/s pa do nekoliko Gbit/s, pri čemu podržano vrijeme kašnjenja može varirati od par milisekundi pa do nekoliko sekundi uz broj konekcija koji se mijenja do nekoliko desetaka tisuća [1]. Također, u posljednjem desetljeću svjedočimo ubrzanom rastu globalnog mobilnog podatkovnog prometa. Za prijenos signala u bežičnim komunikacijskim sustavima nužni su slobodni frekvencijski pojasevi koji su zbog sve većeg korištenja širokopojasnih pristupnih tehnologija postali izuzetno ograničen i tražen resurs.

Sustavi zasnovani na frekvencijskom multipleksu ortogonalnih podnosilaca (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM) predstavljaju najrasprostranjeniju modulacijsku tehniku u radijskim mrežama za ispunjavanje prethodno spomenutih zahtjeva. Kod modulacijske tehnike OFDM tokovi podataka se dijele na paralelne podtokove koji se prenose po preklapajućim podnosiocima raspodijeljenim u frekvencijskom spektru. Osim što uspješno uklanja interferenciju među podnosiocima, OFDM karakterizira i jednostavna implementacija, velika spektralna efikasnost te mogućnost adaptivnog opterećenja podnosilaca. Najpoznatiji prijenosni sustav za višekorisnički prijenos podataka koji koristi OFDM naziva se ortogonalni frekvencijski multipleks s višestrukim pristupom (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - OFDMA) te isti nalazi svoju najširu primjenu u bežičnim širokopojasnim sustavima kao što su IEEE 802.11ax (WLAN), IEEE 802.16 (WiMAX) i mobilnim mrežama (4G/5G) [2]. Prijenosni sustavi OFDMA omogućuje dodjelu potkanala za velik broj korisnika u ovisnosti o različitim uvjetima u kanalu kao i QoS zahtjevima. Jedan od glavnih izazova u svijetu bežičnih komunikacija je područje pokrivanja bežičnim signalom odnosno osiguranje velike prijenosne brzine na rubu pokrivanja baznih postaja gdje korisnici

imaju najlošije uvjete komunikacijskog kanala. Osim toga, u urbanoj sredini, efekt zasjenjenja (engl. *shadowing*) od strane raznih prepreka može značajno smanjiti kvalitetu signala [3]. U bežičnim mrežama porastom frekvencije prigušenje signala raste, tj. snaga signala opada. Iz razloga što su takvi sustavi vrlo osjetljivi na prigušenje signala ostvaruje se manje geografsko područje pokrivanja. Korištenjem relejnih mreža, pri čemu relejne postaje prosljeđuju signal od bazne postaje (predajnika) do korisnika (prijamnika), omogućava veliku priliku za razvoj isplativih bežičnih komunikacijskih mreža sljedeće generacije u kojima su zadovoljeni zahtjevi za velikim prijenosnim brzinama, posebice za korisnike na rubnim područjima pokrivanja baznih postaja [4]. Uvođenjem relejnih postaja između predajnika i prijamnika omogućava se povećanje ukupnog kapaciteta pojedinačne ćelije i dometa bazne postaje, a u konačnici i postizanje veće razine kvalitete usluge. Relejne mreže privlače veliku pažnju znanstvene zajednice posebice u dijelu definiranja *algoritma odabira relejnih postaja* koje sudjeluju u komunikaciji predajnik - relejna postaja - prijamnik. Algoritmi odabira relejnih postaja predstavljaju jednostavnu tehniku postizanja prostornog diverzitija u kooperativnim relejnim mrežama. Općenito, spomenuti algoritmi zahtijevaju da je svakom predajniku, odnosno relejnoj postaji poznato *stanje bežičnog kanala* (engl. *Channel-State Information - CSI*) kako bi se donijela odluka o odabiru prijenosnog puta kroz mrežu od predajnika do prijamnika. Također, OFDMA temeljene relejne mreže otvaraju veliko područje mogućih istraživanja vezano uz *metode dodjele resursa* kao što je dinamička dodjela potkanala korisniku s ciljem optimizacije karakteristika prijenosnih sustava (povećanje prijenosnih brzina uz minimizaciju snage predajnika i vjerojatnosti pogreške bita). Metode dodjele resursa za različite vrste relejnih mreža (jedan ili više predajnika, jedan ili više releja, jedan ili više prijamnika) su istraživane u velikom broju znanstvenih radova pri čemu se iste bave algoritmima dodjele potkanala, bitova i snage s ciljem postizanja maksimalne prijenosne brzine uz minimalno uloženu snagu [5].

Rad je, uz uvodno, organiziran u četiri glavna poglavlja. U prvom poglavlju opisane su osnovne karakteristike sustava OFDMA kao i dan pregled tehnika relejnog prijenosa te algoritama odabira releja i algoritama raspodjele resursa. U drugom poglavlju dan je opis modela komunikacijskog sustava korištenog u disertaciji. Treće i četvrto poglavlje prikazuju istraživačko područje, te daju pregled postojeće literature kao i rezultate i znanstvene doprinose ove disertacije. Konkretno u trećem poglavlju predložena je i opisana nova metoda za učinkovitu procjenu bežičnog kanala zasnovana na postupcima interpolacije i suradničkog

filtriranja. U četvrtom poglavlju predložen je optimizacijski postupak odabira relejnih postaja te je uveden novi algoritam raspodjele i grupiranja resursa, tj. potkanala u OFDMA relejnim mrežama s ciljem maksimiziranja korisničkih prijenosnih brzina. U posljednjem poglavlju izneseni su zaključci doktorske disertacije s naglašenim znanstvenim doprinosima i predviđeni budući rad na ovome području.

# Poglavlje 1

---

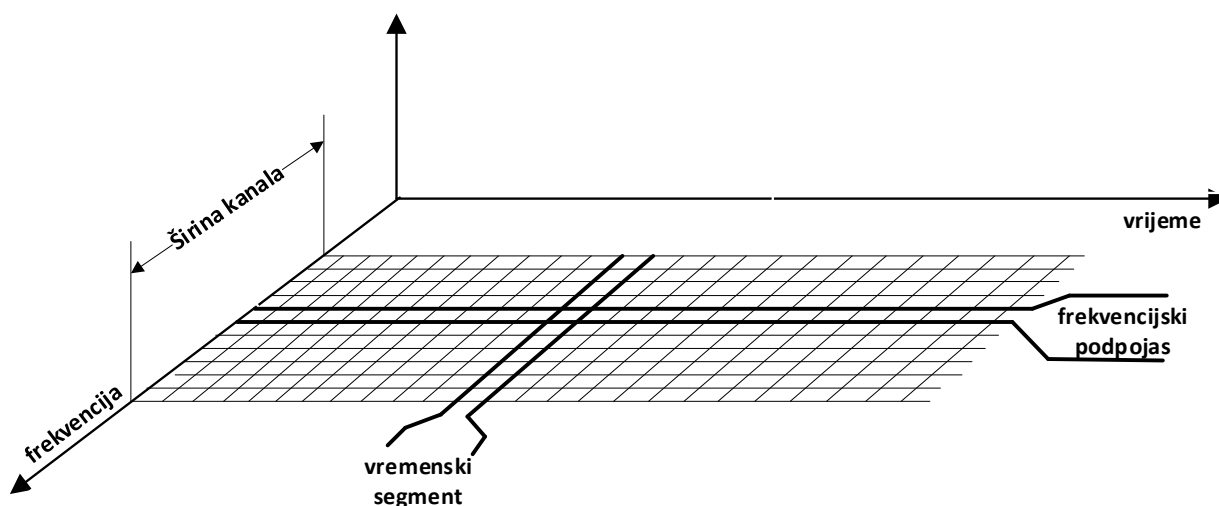
## OSNOVE RELEJNIH MREŽA ZASNOVANIH NA FREKVENCIJSKOM MULTIPLEKSU ORTOGONALNIH PODNOSILACA S VIŠESTRUKIM PRISTUPOM

*Kombinacija prijenosnih tehnologija zasnovanih na tehnikama frekvencijskog multipleksa ortogonalnih podnosilaca s višestrukim pristupom (OFDMA) s relejnim tehnikama omogućava priliku za razvoj bežičnih komunikacijskih mreža sljedeće generacije u kojima su zadovoljeni zahtjevi za velikim prijenosnim brzinama, povećanim dometom te poboljšanom spektralnom efikasnošću i mrežnom stabilnosti. OFDMA temeljene relejne mreže se učestalo koriste u širokopolasnim prijenosnim sustavima kao što su IEEE 802.11ax, IEEE 802.16 i mobilne mreže. Kako bi se u potpunosti iskoristile prednosti OFDMA temeljenih relejnih mreža, ključno je definirati: (i) algoritme odabira relejnih postaja u višerelejnim sustavima, (ii) efikasne algoritme dodjele resursa s ciljem postizanja što većih prijenosnih brzina uz minimizaciju snage predajnika i vjerojatnosti pogreške bita u ovisnosti o različitim korisničkim zahtjevima za kvalitetom usluge.*

### **1.1 Sustavi zasnovani na frekvencijskom multipleksu ortogonalnih podnosilaca**

Sustavi zasnovani na OFDM-u predstavljaju vrstu modulacijske tehnike koja omogućava prijenos podataka putem radiovalova i kao takva predstavlja široko rasprostranjenu modulacijsku tehniku u radijskim prijenosnim sustavima. Općenito gledano, modulacija koristi metodu prijenosa podataka koristeći velik broj uskopojasnih kanala i njima pridruženih nosilaca.

OFDM koristi veliki broj međusobno ortogonalnih podnosilaca (engl. *subcarriers*) i provodi moduliranje istih podacima pri čemu se ortogonalnost postiže pravilnim i točno određenim međusobnim razmakom. Osnovna karakteristika OFDM-a je dijeljenje kanala na veći broj podpojaseva tzv. potkanala, kojima se prenose digitalne informacije. Fizički kanal u OFDM-u se dijeli na frekvencijsko i vremensko područje, a sam kanal je organiziran kao skup frekvencijskih potkanala i vremenskih segmenata (slika 1.1).



Slika 1.1 Istodobni prikaz OFDM signala u vremensko-frekvencijskoj domeni [6]

Broj podnosilaca može varirati od sto pa do nekoliko tisuća pri čemu razmak podnosilaca može biti od nekoliko stotina kHz do nekoliko kHz ovisno o samom broju tih podnosilaca [7]. Zahvaljujući ortogonalnosti podnosilaca i frekvencijskom razmaku između njih nema interferencije među susjednim potkanalima te nema potrebe za zaštitnim frekvencijskim pojasevima. Ukupan frekvencijski spektar prijenosa koristi se vrlo efikasno jer se spektralni pojasevi susjednih podnosilaca mogu i preklopiti što vodi do izrazite učinkovitosti. Podjelom ukupnog kanala prijenosa na više uskopojasnih potkanala s ravnomjernom frekvencijskom karakteristikom, čini ih otpornim na frekvencijski selektivan fading (engl. *fading*).

Uvjet ortogonalnosti podnosilaca jedno je od obilježja OFDM-a pri čemu je ortogonalnost svojstvo koje se pridružuje jedinkama koje su međusobno neovisne, a što matematički znači da se ni jedna od njih ne može prikazati kao linearna kombinacija ostalih. Uvjet ortogonalnosti definira da su dvije kosinusoide različitih frekvencija i slučajnog razmaka u fazi koje traju vrijeme  $T$  ortogonalne ako vrijedi [6]:



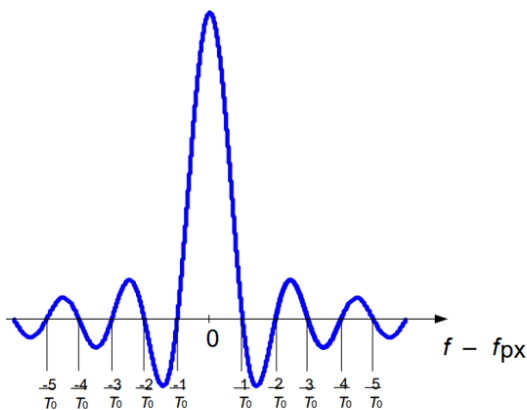
$$\int_0^{T_0} \cos(2\pi f_v \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_z \cdot t) dt \begin{cases} = 0 & \text{za } f_v \neq f_z, \\ \neq 0, (= T_0) & \text{za } f_v = f_z. \end{cases} \quad (1.1)$$

U (1.1) uvjet " $= 0$ " bit će ispunjen samo ako se ova dva podnosioca na intervalu  $T_0$  razlikuju za cijeli broj perioda, tj. frekvencije  $f_v$  i  $f_z$  moraju biti višekratnici iste temeljne frekvencije  $f_0$ . Najmanji razmak frekvencija dvaju podnosilaca  $\Delta f$  koji su ortogonalni je onaj pri kojem se podnosioci razlikuju za jednu periodu [6]:

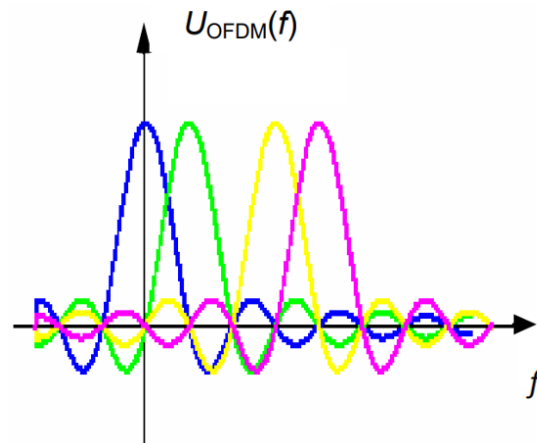
$$\Delta f = \frac{1}{T_0}, \quad f_0 = \frac{1}{T_0}. \quad (1.2)$$

Svaki od podnosilaca dolazi u nultočku spektra ostalih moduliranih podnosilaca (slika 1.2), što osigurava da nema smetnji među nosiocima u pojedinim potkanalima [6]. Zbroj moduliranih ortogonalnih nosilaca predstavlja OFDM simbol.

jedan modulirani nosilac



više moduliranih ortogonalnih nosilaca

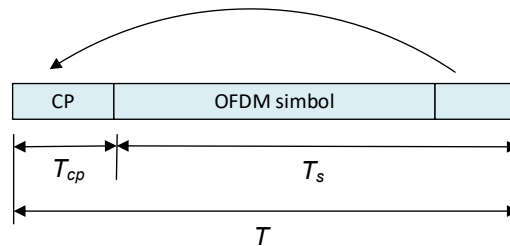


Slika 1.2 Ilustracija slaganja potkanala u frekvencijskoj domeni [6]

Ako se OFDM koristi za prijenos podataka u komunikacijskim sustavima tada je potrebno razmotriti sljedeće parametre [7]:

- Razmak podnosilaca  $\Delta f = 1/T_s$  ;
- Broj podnosilaca  $N_c$  - ovaj parametar u kombinaciji s razmakom podnosilaca u konačnici određuje ukupnu širinu spektra OFDM signala;

- Duljina cikličkog prefiksa  $T_{CP}$  – zaštitni interval koji zajedno s razmakom podnosilaca  $\Delta f$ , određuje ukupno vrijeme OFDM simbola ili, ekvivalentno, brzinu OFDM simbola (slika 1.3).



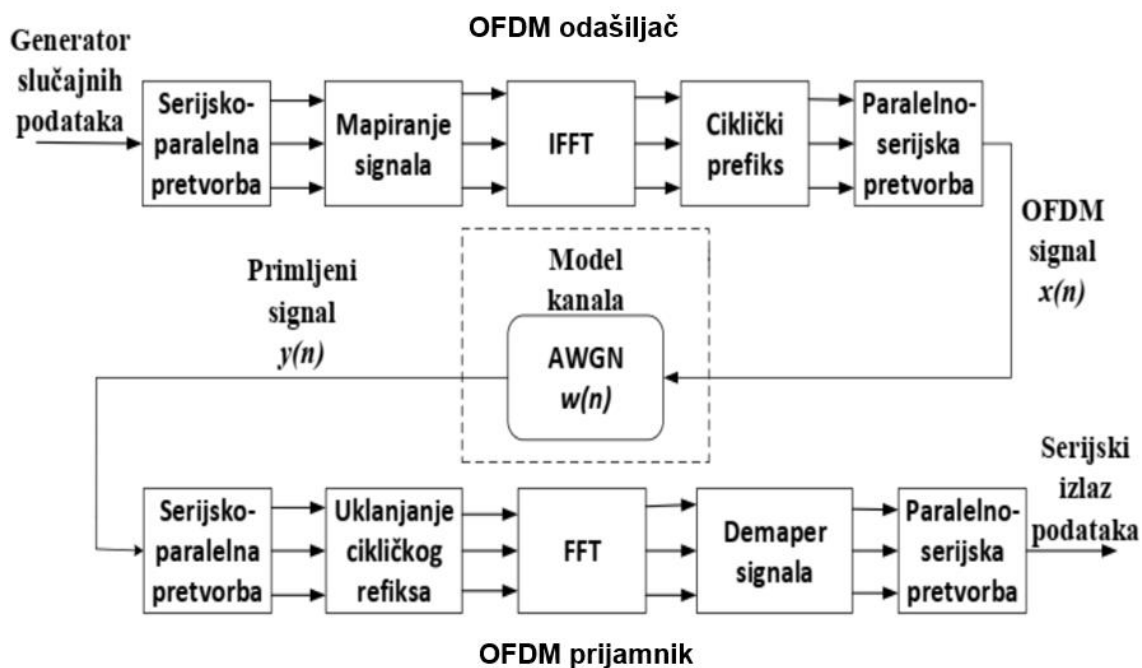
Slika 1.3 Ciklički prefiks

Razmak podnosilaca trebao bi biti što manji kako bi trajanje simbola  $T$  moglo biti što veće. Također je bitno paziti da razmak podnosilaca ne bude premalen iz razloga što premali razmak može rezultirati gubitkom ortogonalnosti pri čemu dolazi do interferencije susjednih podnosilaca.

Osnovna širina pojasa OFDM signala iznosi  $BW_{OFDM} = N_C \cdot \Delta f$ , što predstavlja umnožak broja podnosilaca i njihovog međusobnog razmaka. Za zaštitni pojas OFDM signala u pravilu se uzima 10% spektra signala nosioca [7].

Na prijenosne karakteristike sustava OFDM značajno utječu i problemi samog bežičnog radiokanala kao npr. višestazno širenje vala koje nastaje zbog različitih načina propagacije vala pri čemu signal koji dolazi na prijammnik predstavlja zbroj svih pojedinih komponenti koje su rezultat refleksija od prepreka između predajnika i prijammnika. Upravo postojanje ovako složenog signala na mjestu prijema dovodi do pojave intersimbolne interferencije (engl. *Intersymbol Interference* – ISI) u kanalu. Kao rezultat vremenske disperzivnosti, odnosno izražene frekvencijske selektivnosti kanala, ISI uzrokuje značajne degradacije performansi mreže i jedna je od najvećih prepreka postizanja velikih prijenosnih brzina te povećava učestalost pogreške bita (engl. *Bit Error Rate* - BER). Uvođenje zaštitnog vremenskog intervala s cikličnim prefiksom (ciklički ponovljen dio korisnog OFDM signala) čije je trajanje dulje od trajanja impulsnog odziva kanala, OFDM minimizira efekte frekvencijski selektivnih kanala, odnosno eliminira ISI [8]. Dodavanjem zaštitnog vremenskog intervala povećava se redundantnost, a trajanje zaštitnog intervala određuje se ovisno o sustavu i učestalosti refleksija

u sustavu. Ovim postupkom smanjuje se spektralna učinkovitost na račun robusnosti cjelokupnog sustava.



Slika 1.4 Blok dijagram OFDM sustava [9]

Blok dijagram tipičnog OFDM sustava prikazan je na slici 1.4 te se isti sastoji od tri podsustava: predajnik, bežični komunikacijski kanal i prijatelj [9]. Za prijenos podataka putem OFDM simbola, u OFDM predajniku se prvo bitska sekvenca unutar bloka za konstelacijsko mapiranje pretvara u simbolesku sekvencu (od ulaznih bitova kreiraju se simboli za moduliranje podnosilaca) te se potom izvodi serijsko-paralelna konverzija sekvence bitova. Predajnik transformira ovaj paralelni tok bitova iz frekvencijske u vremensku domenu pomoću inverzne diskretne Fourierove transformacije (engl. *Inverse Discrete Fourier Transformation - IDFT*). U realnim sustavima koristi se algoritam inverzne brze Fourierove transformacije (IFFT) zbog njegove puno veće učinkovitosti obrade. Radi eliminiranja interferencije između blokova, potom se dodaje ciklički prefiks koji predstavlja zaštitni vremenski interval unutar kojeg se šalje ciklički ponovljen dio korisnog signala. Poslije dodavanja cikličkog prefiksa, signal se pretvara u analogni oblik i vrši moduliranje glavnog nosioca (engl. *upconverting*) te se isti prenosi preko kanala. S druge strane, prijatelj obavlja inverzni postupak, počevši od uklanjanja ciklički prefiksa i zatim transformira signal iz vremenske domene natrag u frekvencijsku domenu koristeći brzu Fourierovu transformaciju (FFT). Nakon toga se, blokovi

simbola pretvaraju u sekvencu, vrši detekcija simbola i pretvaranje simbola u bite. Na kraju se na izlazu dobije bitska sekvenca.

OFDM simbol sastoji se od velikog broja moduliranih podnosilaca, koji su nastali IDFT-om. Svaki od podnosilaca je moduliran (BPSK, QPSK, 16-QAM ili dr.). Na taj način se od ulaznih bitova kreiraju simboli za moduliranje podnosilaca. Koncept OFDM-a vrlo blizu aproksimira optimalnu metodu punjenja vode (engl. *water filling*) po potkanalima te omogućava postizanje kapaciteta blisku teorijskom ograničenju prijenosnog kanala uz određena smanjenja uzrokovana neophodnim cikličkim prefiksom i zaštitnim kodiranjem [10]:

$$C = B_N \sum_{j:\gamma(j)\geq\gamma_0} \log_2 \left( \frac{\gamma(j)}{\gamma_0} \right). \quad (1.3.)$$

gdje je  $B_N$  širina pojasa prijenosa svakog potkanala, parametar  $\gamma(j) = \frac{|H(j)|^2}{B_N N_0}$ , (pri čemu je  $H(j)$  frekvencijski odziv kanala na  $j$ -tom podnosiocu,  $N_0$  predstavlja spektralnu gustoću snage aditivnog bijelog Gaussovog šuma (engl. *Additive White Gaussian noise* - AWGN), dok je  $P$  vektor raspodjele snage, a parametar  $\gamma_0$  granična vrijednost koja zadovoljava:

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma(j)} = P_{maks}. \quad (1.4.)$$

U OFDM sustavima se obično koriste pilot signali, odnosno signali poznati i predajniku i prijammniku, koji omogućuju procjenu stanja kanala unutar prijammnika. Učestalost ponavljanja pilot signala ovisi o vremenskoj promjenjivosti uvjeta kanala. Poznavanje karakteristike kanala, sustavu daje mogućnost eliminiranja efekta višestaznog širenja kroz postupak ekvalizacije (ujednačavanja). Ekvalizacijom se minimizira utjecaj intersimbolske interferencije između simbola jednog bloka, odnosno između podnosilaca, nastale propagacijom kroz frekvencijski selektivan kanal.

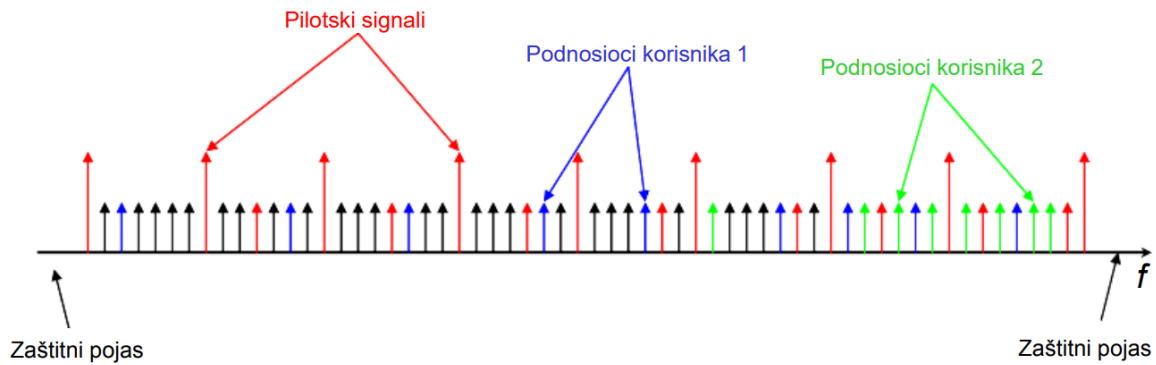
OFDM iako efikasno rješava probleme koji nastaju kao rezultat frekvencijske selektivnosti kanala nije imun na efekte koje prouzrokuje vremenska selektivnost kanala. Naime, Doppler-ov efekt, koji nastaje zbog vremenske selektivnosti kanala, narušava ortogonalnost između OFDM podnosilaca i javlja se interferencija između podnosilaca (engl. *Intercarrier Interference* - ICI) koja značajno može narušiti karakteristike OFDM prijenosnog sustava [11].

Radi svojih povoljnih karakteristika, OFDM je omogućio poboljšanje parametara digitalnih radio sustava, kao što je poboljšanje kvalitete pokrivanja mreže, velika spektralna učinkovitost, otpornost na interferenciju između korisnog signala i ometajućih signala susjednih odašiljača, otpornost na frekvencijski selektivni fading. Zbog navedenih prednosti OFDM je zbog prije spomenutih svojstava našao primjenu u mnogim sustavima koji su dio naše svakodnevnice. Koristi se u lokalnim bežičnim mrežama (WLAN), digitalnoj radiodifuziji televizije (DVB-T), mobilnim mrežama četvrte i pete generacije.

## 1.2 Prijenosni sustavi OFDMA

U OFDM sustavima svi podnosioci se koriste za prijenos podataka istog korisnika, dok današnji prijenosni sustavi najčešće zahtijevaju istovremeno slanje podataka za veći broj korisnika. Stoga su razvijene brojne tehnike višekorisničkog prijenosa podataka, tj. višestrukog pristupa mediju koje to omogućuju. Najpoznatija među njima je tehnika frekvencijskog multipleksa ortogonalnih podnosilaca s višestrukim pristupom OFDMA. Sustavi OFDMA koriste multipleksiranje ortogonalnih podnosilaca da bi omogućili prijenos podataka za veći broj korisnika pri čemu se komunikacijski kanal dijeli na veći broj potkanala putem kojih se podaci paralelno prenose. S obzirom na to da se prijenosni (frekvencijski i vremenski) resursi, dijele između svih korisnika, OFDMA zapravo predstavlja kombinaciju višestrukih pristupa TDMA (engl. *Time Division Multiple Access*) i FDMA (engl. *Frequency Division Multiple Access*).

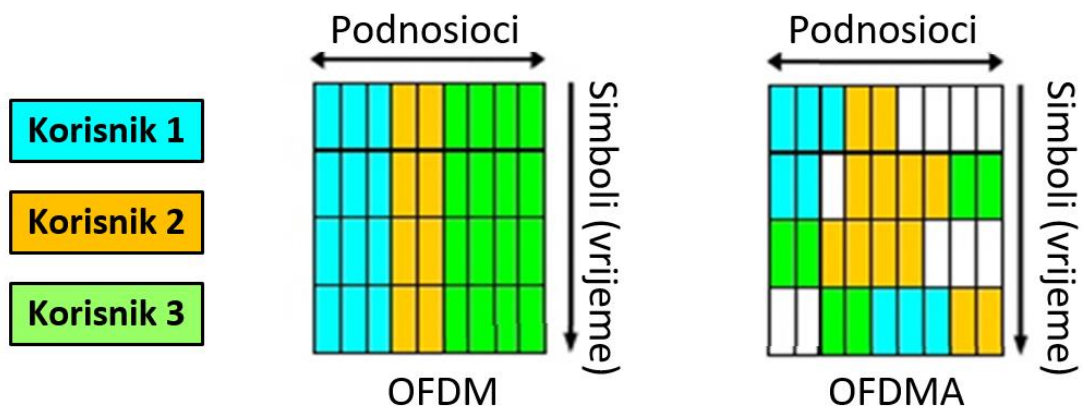
Slično OFDM-u, sustavi OFDMA koriste višestruke usko raspoređene podnosioce koji su podijeljeni u grupe podnosilaca pri čemu se svaka grupa naziva blok resursa. Grupiranje podnosilaca u grupe blokova resursa naziva se potkanalizacija (engl. *subchannelization*). U sustavima OFDMA, OFDM simbol je konstruiran od podnosilaca. Postoji nekoliko vrsta podnosilaca (slika 1.5): (1) podatkovni podnosioci koji se koriste za prijenos podataka, (2) pilotski ili referentni signalni podnosioci koji su modulirani poznatim sekvencama i služe za procjenu kanala i kao ispomoć u sinkronizaciji, i (3) zaštitni podnosioci koji se ne koriste za pilot/prijenos podataka već kao zaštitni pojas (omogućuju dijeljenje spektra te smanjuju smetnje susjednog kanala).



Slika 1.5 OFDMA višestruki pristup [6]

Pilotski podnosioci su važni jer se pomoću njih može izračunati prijenosna karakteristika kanala u određenom trenutku i na određenoj frekvenciji, tj. poziciji pilota, a ostale vrijednosti „kanala“ je onda moguće ekstrapolirati iz postojećih. Frekvencija uzorkovanja odabrana je tako da bude veća ili jednaka prijenosnoj brzini kanala. Broj vremenskih uzoraka u radio okviru uvijek je cijeli broj i kako bi se dodatno pojednostavio dizajn filtra za analogni prijenos, frekvencija uzorkovanja je skalirana faktorom većim od jedan.

OFDMA dijeli cjelokupni prostor podnosilaca u  $n$  skupina od kojih svaka ima  $m$  podnosilaca/potkanala pri čemu se isti dodjeljuju pojedinim korisnicima (slika 1.6). Broj podnosilaca za određenog korisnika je promjenjiv u svakom OFDM simbolu, odnosno podnosioci u svakom OFDM simbolu su ortogonalno podijeljeni među većim brojem korisnika. Kodiranje, modulacija i razine amplitude mogu se namjestiti različito za svaki potkanal ovisno o uvjetima u kanalu kako bi se optimizirao prijenos podataka.



Slika 1.6 OFDM i OFDMA [12]

OFDMA je tehnika prijenosa koja vrlo učinkovito iskorištava različite uvjete u kanalu za velik broj korisnika. Maksimalna prijenosna brzina i minimalna snaga potrebna za prijenos,

moгу se postići dodjelom svakog potkanala korisniku s najboljim uvjetima na tom potkanalu (engl. *single subchannel allocation*).

U literaturi se najčešće navode tri različita načina dodjeljivanja potkanala korisnicima:

1. dodjela potkanala bliskih frekvencija istom korisniku;
2. dodjela jednako udaljenih potkanala istom korisniku;
3. dodjela različito udaljenih potkanala istom korisniku

Metoda dodjele potkanala bliskih frekvencija, koja se zasniva na dodjeli određenog broja podnosilaca  $N$  s frekvencijama  $f_n$  istom korisniku, ima prednost u pogledu pojednostavljene procjene stanja komunikacijskog kanala, pošto su potkanali bliskih frekvencija korelirani. Kako bi se složenost dodjele potkanala smanjila te samim time smanjio dodatni signalizacijski pretek (engl. *signaling overhead*), susjedni potkanali se mogu grupirati u odsječke (engl. *chunks*). Dodjela odsječaka korisnicima se pokazala kao učinkovito rješenje zbog korelacije među susjednim potkanalima sustava OFDMA i jednostavnosti same implementacije [13]. Naime, svojstva nekog potkanala za nekog korisnika vjerojatno impliciraju jednaka svojstva njegovih susjeda za istog korisnika. Iz tog razloga, dodjela potkanala zasnovana na odsječcima pokazuje podjednako dobra svojstva kao i dodjela pojedinačnog potkanala. S obzirom na to da korisnici u istom prijenosnom sustavu mogu imati različit omjer srednje snage signala prema srednjoj snazi šuma (engl. *Signal to Noise Ratio - SNR*) radi efikasnosti potrebno je u komunikacijskom kanalu dodjeljivati dio potkanala korisnicima s boljim uvjetima na tim potkanalima. Glavni nedostatak predstavlja činjenica da bazna postaja (predajnik) mora imati informacije o stanju kanala za svakog korisnika (prijamnik), koju je zbog promjenjivosti kanala potrebno periodično osvježavati i ponovno dodjeljivati podnosiocima korisnicima, što utječe na prijenosnu brzinu. Metode dodjela resursa (potkanala korisnicima), definirane su različitim algoritmima dodjele potkanala, bitova i snage s ciljem postizanja maksimalno moguće prijenosne brzine uz što manju uloženu snagu.

Metoda dodjela jednako udaljenih potkanala istom korisniku zasnovana je na dodjeli  $N$  podnosilaca frekvencije  $f_n$  istom korisniku, gdje je  $Q$  razmak među potkanalima [14]. Prednost ove metode je predefinirana dodjela podnosilaca korisnicima što omogućuje da se prijenos može odvijati jednako kao kod standardnog OFDM sustava pri čemu ne zahtjeva informacije o

stanju kanala. Nedostatak metode je što postoji mogućnost da se određenom korisniku dodijele potkanali na kojima ima loše uvjete prijenosa.

Metoda dodjela različito udaljenih podnosilaca istom korisniku jednaka je kao i dodjela jednako udaljenih podnosilaca, uz prednost u pogledu interferencije među korisnicima na susjednim potkanalima koje su slučajne jer su i susjedni korisnici slučajni.

Prednost OFDMA prijenosa je efikasno korištenje spektra radi mogućnosti preklapanja pojaseva podnosilaca, veća otpornost na frekvencijski selektivni fading podjelom kanala na više uskopojasnih potkanala sa ravnijom frekvencijskom karakteristikom kao i mogućnost korištenja u sustavima NLS (engl. *Non Line-of-Sight*) koji su karakteristični za urbane sredine. Također, jednostavnija je izrada ekvalizatora u prijammniku te lakša primjena prostornog multipleksiranja, odnosno primjene sustava MIMO (engl. *multiple input multiple output*), koji može značajno povećati prijenosnu brzinu. Pored svih navedenih prednosti, ključni nedostatak OFDM-a je u vrlo visokim varijacijama nivoa snage signala. Naime, zbrajanje velikog broja neovisno moduliranih podnosilaca u fazi prijenosa signala generira signal slučajne amplitude s vrlo visokim varijacijama. Odnos vršne (engl. *peak*) i srednje (engl. *average*) vrijednosti snage izlaznog signala se označava kao PAPR (engl. *Peak-to-Average Power Ratio*) i predstavlja mjeru fluktuacije signala [15]. Veliki PAPR direktno povećava cijenu predajnika jer zahtjeva predajnike s izlaznim pojačalima s linearnom karakteristikom na velikom opsegu amplituda ulaznog signala.

### 1.3 Relejni sustavi

Prijenosni signal u bežičnom komunikacijskom kanalu nalazi se pod utjecajem efekata prigušenja ili gubitka staze, zasjenjenja, kašnjenja višestaznih komponenti, fedinga, što utječe na performanse komunikacije i obično smanjuje njezinu pouzdanost. Korištenje releja u bežičnim mrežama može povećati pouzdanost komunikacije smanjujući smetnje na kanalu iskorištavanjem prostornog diverzitija. Koncept relejne tehnologije predstavljen je još 1971. kad je Van Der Meulen opisao proces komunikacije u kojem sudjeluju tri čvora (predajnik, relej, prijammnik) [16]. Relej predstavlja neki oblik međupostaje smještena u liniji vidljivosti s ostalim relejnim postajama ili glavnom baznom postajom (predajnikom), pri čemu ista nije

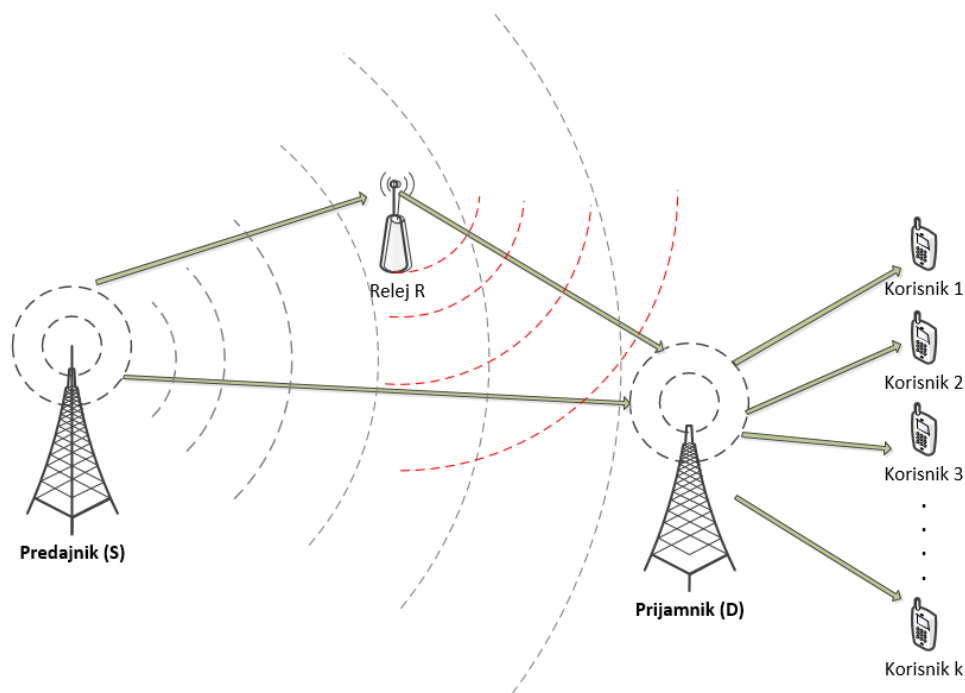


povezana s agregacijskom mrežom. Naime, u situacijama kad izravna komunikacija između bazne postaje (predajnika) i pokretne terminalne opreme (prijamnika) nije moguća signal se šalje preko relejne postaje ili niza relejnih postaja, odnosno višeskočnih relejnih mreža (engl. *multihop relay network*).

Navedeni pristup predstavlja jedno od rješenja poboljšanje dometa prijenosa signala i smanjenja potrošnje utrošene energije (relejne postaje pokrivaju manja područja) kao i povećanja pouzdanosti i kvalitete usluge u bežičnim mrežama bez izlaganja visokim troškovima postavljanja dodatnih baznih postaja. Naime, porastom frekvencije snaga signala opada, a s obzirom da su bežične mreže vrlo osjetljive na isto, ostvaruje se manje geografsko područje pokrivanja koje se korištenjem relejnih postaja može značajno poboljšati. Veća pogodnost u pogledu jednostavnosti implementacije u odnosu na bazne postaje bazirana je na činjenici da su relejne postaje manjih dimenzija, što čini njihovu implementaciju znatno lakšom.

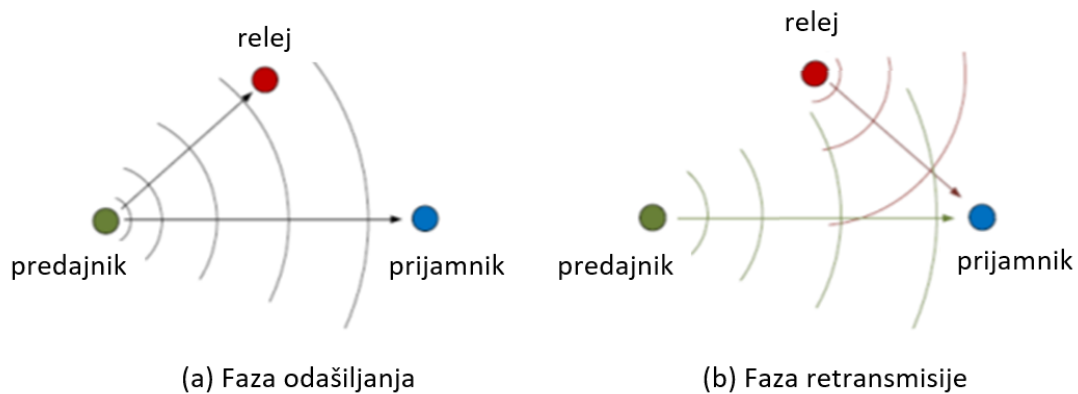
Na temelju topologije, mreža može imati jedan ili više relejnih postaja za prijenos podataka od predajnika do prijamnika. U topologiji s jednim relejem, relej prima signal od predajnika i prosljeđuje ga prijamniku nakon obrade.

Model se sastoji od tri čvora: izvornog čvora/predajnika S, odredišnog čvora/prijamnika D i relejne postaje R, kao što je prikazano na slici 1.7.



Slika 1.7 Prikaz mrežne arhitekture s jednim relejem

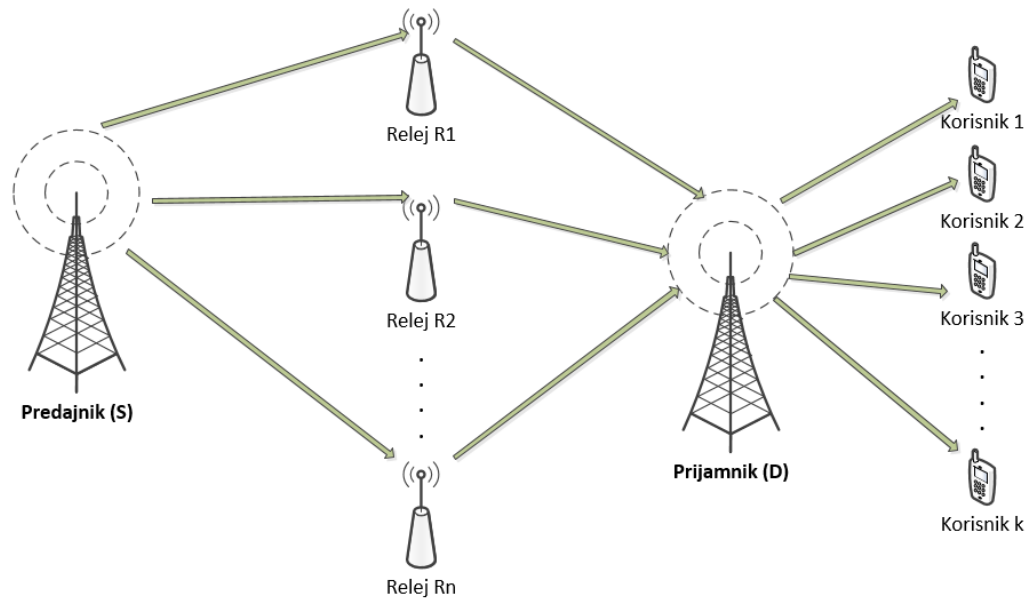
Ako promatramo scenarij u kojem se komunikacija između jednog predajnika S i jednog prijamnika D odvija preko jednog releja R, tada je potrebno primijetiti kako se ista odvija u dvije faze: faza odašiljanja (engl. *broadcast*) i faza retransmisije. U prvom koraku predajnik komunicira s prijamnikom direktno, ali zbog prirode rasprostiranja radijskog signala poslani signal zaprima i relej. Za vrijeme prvog koraka relej ne odašilje nikakav signal. Oba prijemna čvora pohranjuju dolazne verzije signala lokalno.



Slika 1.8 Faze komunikacije u relejnim mrežama

U drugom koraku, relej nekom od tehnika prijenosa prosljeđuje signal, zaprimljen u prvom koraku, prijamniku. U međuvremenu predajnik nastavlja s daljnjim odašiljanjem signala i postupak se ponavlja [17]. Slijedom navedenog, u navedenom modelu komunikacijski kanal se može, kao što je prikazano na slici 1.8, podijeliti na odredišni (broadcast) kanal (S odašilje signal, a R i D zaprimaju), odnosno na (retransmisijski) kanal za višestruki pristup (S i R odašilju, a D zaprima).

U paralelnim relejnim mrežama, više od jednog čvora raspoređeno je između dva komunikacijska terminala tako da predajnik odašilje informaciju svim relejima u prvom skoku, a zatim releji prosljeđuju ovu informaciju prijamniku u drugom skoku. Releji ne komuniciraju jedan s drugim u paralelnim relejnim mrežama.



Slika 1.9 Prikaz mrežne arhitekture s više relejnih postaja

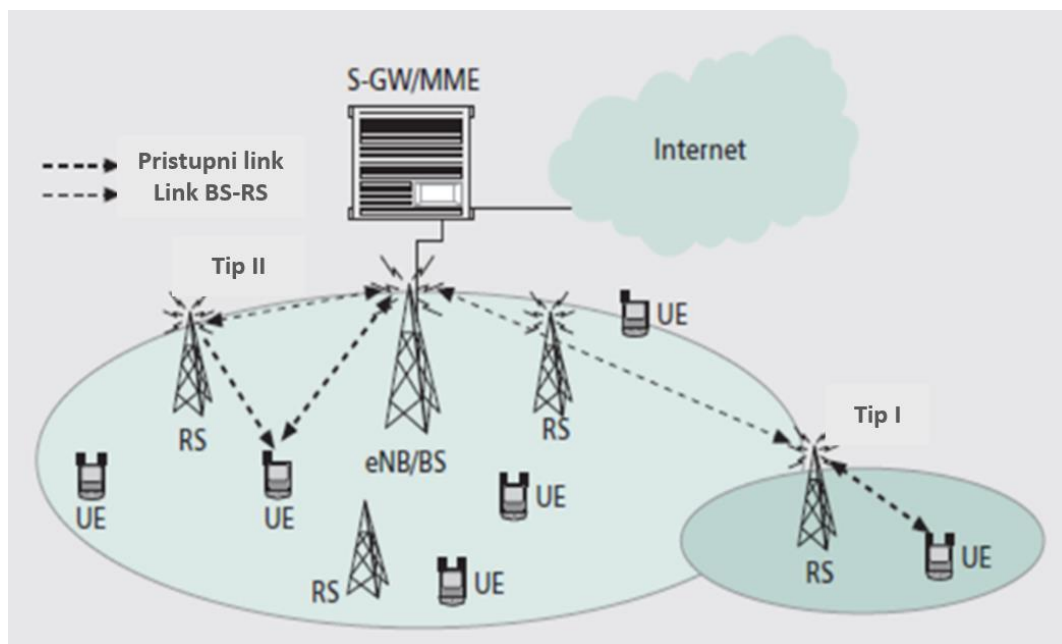
Prikazana arhitektura s više relejnih postaja iziskuje definiranja algoritma odabira relejnih postaja koje će sudjelovati u komunikaciji predajnik-relejna postaja-prijamnik. Općenito, spomenuti algoritmi usmjeravanja zahtijevaju da je svakom predajniku, odnosno relejnoj postaji poznato stanje bežičnog kanala kako bi se donijela odluka o odabiru releja.

Prijenos s dva skoka (s jednim ili više releja) možda neće biti dovoljan za pružanje tražene prijenosne brzine između dva čvora ako je SNR s kraja na kraj vrlo nizak. Rješenje koje može uspješno riješiti navedeni problem je postavljanje više od jednog međusobno povezanog relejnog čvora tako da se prijenos od predajnika do prijamnika odvija u više skokova.

Korištenje višeskočnih relejnih mreža (slika 1.9.) dovodi do smanjenja utjecaja gubitka putanje zbog korištenja višestrukih skokova za prijenos podataka do/od odgovarajućeg predajnika/prijamnika, te se time povećava prijenosna brzina samog sustava kao i smanjuje kašnjenje i gubitak paketa. Međutim, korištenje višeskočnih relejnih mreža zahtijeva više radijskih resursa za prijenos podataka kroz različite skokove. Također, utjecaj interferencije je veći s obzirom na veći broj istodobnih prijenosa u mreži.

U standardu 3GPP LTE-Advanced definirana su dva osnovna tipa releja: Tip I (netransparentan korisničkoj opremi) i Tip II releji (transparentan korisničkoj opremi) [16]. Kao što je prikazano na slici 1.10, Tip-I releji prenose korisničke podatke i kontrolne informacije

korisničkim terminalima koji se nalaze izvan pokrivanja bazne postaje te se primjenjuju u scenarijima proširenja zona pokrivanja i povećanja kapaciteta. Za korisničke terminale ne postoji razlika između releja Tipa-I i baznih postaja. Tip-II releji prenose samo korisničke podatke i za njihovo funkcioniranje je neophodno postojanje direktne komunikacije između korisničke terminalne opreme i bazne postaje. Navedeni tip releja se koristi za poboljšanje kvalitete veze i povećanje kapaciteta kanala (višestruke propagacije relejne i bazne postaje prema terminalnoj opremi).



Slika 1.10. Tipovi releja [18]

Zahtjevi i očekivanja korisnika nisu samo vezani za pokrivenost signalom i dostupnosti usluga, već i za velike prijenosne brzine koje omogućavaju korištenje multimedijских usluga. Zato je bitan izbor odgovarajuće prijenosne tehnike koja može pružiti odgovor na velika očekivanja u pogledu ostvarive prijenosne brzine.

Relejne mreže s obzirom na način prijenosa podataka možemo podijeliti na naizmjenični prijenos (engl. *Half-Duplex* - HD) i dvosmjerni prijenos (engl. *Full-Duplex* - FD). Tradicionalni relejni sustavi rade u HD načinu rada pri čemu su linkovi predajnik-relej i relej-prijamnik ortogonalni kanali zasnovani na frekvencijskom ili vremenskom multipleksu, odnosno nema istovremene komunikacije u oba smjera. U literaturi, velik broj radova je posvećen HD načinu rada releja jer je dizajn istog relativno niske složenosti. Unatoč tome, HD relejni sustavi iziskuju dodatne resurse za prijenos podataka u višeskočnoj relejnoj mreži što dovodi do određenog

gubitka spektralne učinkovitosti sustava, tj. smanjenja prijenosnog kapaciteta [19]. S druge strane, u FD načinu rada relej može istovremeno primati i odašiljati signal. Na taj način se efikasnije koristi kapacitet kanala s obzirom na to da je potreban samo jedan kanal za prijenos s kraja-na-kraj, ali iz istog razloga dolazi i do problema interferencije zbog propuštanja signala između ulaza i izlaza samog releja.

Pored nabrojanih prednosti, relejne mreže ipak imaju i određene nedostatke. Nedostaci implementacije relejnih postaja poput povećane složenost bazne stanice kao izvora informacije zbog potrebe za dodatnim algoritmima raspoređivanja resursa (engl. *scheduling*), veće signalizacijsko zaglavlje, veliko kašnjenje od kraja do kraja i povećanje interferencije, ipak nisu dovoljni da ugroze mogućnost korištenja relejne tehnologije, jer je pozitivan utjecaj koji ova tehnologija ima na razvoj bežičnih komunikacijskih mreža znatno veći.

### 1.3.1 Tehnike relejnog prijenosa

Obzirom na način na koji se signal obrađuje i prosljeđuje unutar pojedine relejne postaje, tehnike relejnog prijenosa mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe: pojačaj i proslijedi (engl. *Amplify and Forward* - AF) koji pripada transparentnim tehnikama prijenosa (ne mijenja se informacijski sadržaj poruke već se samo povećava snaga signala) te dekodiraj i proslijedi (engl. *Decode and Forward* - DF) koji pripada regenerativnim tehnikama [20]. Tehnike prijenosa AF i DF mogu nadmašiti jedna drugu ovisno o uvjetima u komunikacijskom kanalu i dostupnoj snazi prijenosa na predajniku i releju. Obje spomenute tehnike relejnog prijenosa (AF i DF) mogu biti izvedene u HD ili FD načinu rada.

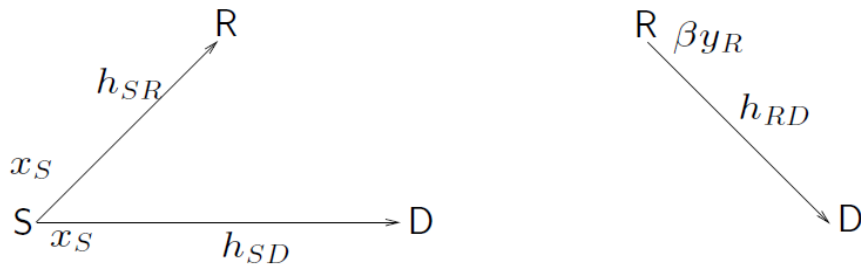
#### Pojačaj i proslijedi (AF)

Kod prijenosne tehnike AF, relej R prvo pojačava snagu primljenog signala zaprimljenu od strane predajnika S, koje može biti adaptivno (engl. *adaptive forwarding*) ili fiksno (engl. *fixed gain amplification*). Potom se zaprimljeni signal bez dekodiranja samog primljenog sadržaja odašilje do sljedećeg releja R ili prijatelja D [21].

Kod pojačanja fiksnog iznosa, iznos pojačanja snage signala unaprijed je određen te isti unosi minimalno vrijeme kašnjenja u prijenosu, zbog toga što uključuje najmanji stupanj obrade

podataka na releju, i kao takav predstavlja najjednostavniji pristup. Razlika između fiksnog i adaptivnog prosljeđivanja je ta da se kod releja sa adaptivnim pojačanjem iznos pojačanja signala prilagođava trenutnom stanju kanala te je u tom slučaju procjena kanala (CSI) bitna informacija. Tehnika adaptivnog prosljeđivanja kao naprednija i složenija tehnika od pojačanja fiksnog iznosa zahtijeva implementaciju uređaja koji u svakome trenutku procjenjuju kanal pri čemu se procjena kanala ostvaruje slanjem slijeda poznatih bitova na različitim frekvencijama te usporedbom na određitu određuje prijenosna funkcija sustava za lakšu prilagodbu na uvjete u kanalu.

Na slici 1.11 Prikazan je AF relejni kanal s dvije faze komunikacije.



Slika 1.11 AF relejni kanal s prikazom faza komunikacije

Primljeni signali kod prijenosne tehnike AF na  $R$  i  $D$  dani su sljedećim formulama [22]:

$$\begin{aligned} y_{D1} &= \sqrt{p_s} h_{SD} x_s + n_{D1}, \\ y_{R1} &= \sqrt{p_s} h_{SR} x_s + n_{R1}, \\ y_{D2} &= \beta y_{R1} h_{RD} + n_{D2}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

pri čemu  $x_s$  predstavlja poslani simbol sa  $S$ ,  $y_{D1}$  i  $y_{D2}$  predstavljaju zaprimljeni signal na  $D$  (direktna komunikacija sa  $S$  i komunikacija preko  $R$ ), a  $y_{R1}$  zaprimljeni simbol na releju.  $h_{SD}$ ,  $h_{SR}$ ,  $h_{RD}$  predstavljaju dobitke kanala između  $S$ ,  $R$  i  $D$ ,  $p_s$  odaslanu snagu signala sa  $S$ , dok  $\beta$  predstavlja faktor pojačanja snage signala u releju.  $n_{D1}$ ,  $n_{R1}$ ,  $n_{D2}$  označavaju aditivni bijeli Gaussov šum u  $S$ - $D$ ,  $S$ - $R$  i  $R$ - $D$  kanalu, slijedno gledano.

AF prijenosne tehnike zajedno s izvornim signalom pojačavaju i šum čime se smanjuje SNR, a samim time i prijenosne karakteristike sustava. Iz navedenog razloga korištenje AF releja pogodno je u scenariju s relativno visokim SNR-om, odnosno kada je kvaliteta veze između predajnika i releja dovoljno pouzdana. Ova tehnika se koristi u situacijama u kojima je potrebno povećati područje pokrivanja i u područjima u kojima problem stvara zasjenjenje [21].

AF prijenosna tehnika je jednostavna za implementaciju i može se lako nadograditi na nove sheme kodiranja.

Kod direktne komunikacije kapacitet komunikacijskog kanala, kojeg prikazujemo kao maksimalnu količinu informacije u jedinici vremena koja se može prenijeti komunikacijskim kanalom [18], glasi:

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N_0 B} \right) \text{ [bit/s]} \quad (1.6)$$

pri čemu  $B$ ,  $S$  i  $N$  označavaju širinu frekvencijskog pojasa, srednju snagu signala, odnosno srednju snagu signala šuma.

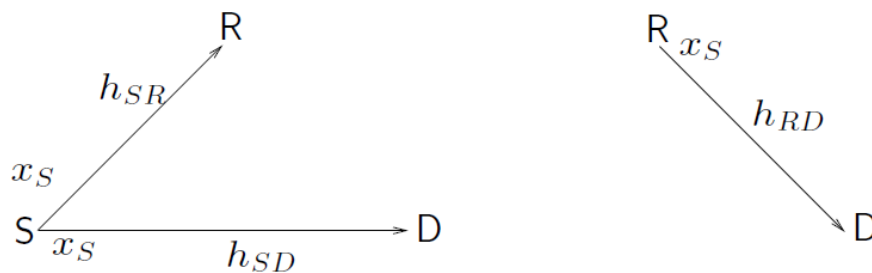
U arhitekturi mreže s više relejnih postaja kapacitet AF mreža iskazan je sljedećom formulom [21]:

$$C_{AF} = \frac{1}{M} \log_2(1 + SNR_{total}). \quad (1.7)$$

pri čemu  $M$  označava broj skokova, a  $SNR_{total}$  omjer srednje snage signala prema srednjoj snazi šuma na prijammniku.

### Dekodiraj i proslijedi (DF)

Kod prijenosne tehnike DF, relej u prvoj fazi komunikacije prvo dekodira primljeni sadržaj bitova s predajnika, a prije ponovnog kodiranja, provodi korekciju pogrešaka te u konačnici prosljeđuju sadržaj do sljedećeg releja ili prijammnika (slika 1.12). Tehnika DF pokazuje najbolje performanse u uvjetima kada je kanal relativno stabilan te nije pod utjecajem degradirajućih faktora (kao što su npr. višestazna propagacija, zasjenjenje, ogib). Ukoliko se na osnovu ciklične provjere zalihosti (engl. *Cyclic Redundancy Check* - CRC) utvrdi da zaprimljeni bitovi ne sadrže pogrešku, podaci se prosljeđuju dalje u drugoj fazi komunikacije [21]. U slučaju pogreške šalje se zahtjev predajniku za retransmisijom podataka.



Slika 1.12 DF relejni kanal s prikazom faza komunikacije

Primljeni signal na R i D kod prijenosne tehnike DF dani su sljedećim formulama [22]:

$$\begin{aligned} y_{D1} &= \sqrt{p_s} h_{SD} x_s + n_{D1}, \\ y_{R1} &= \sqrt{p_s} h_{SR} x_s + n_{R1}, \\ y_{D2} &= \sqrt{p_R} h_{RD} x_s + n_{D2}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

pri čemu  $p_R$  označava odaslanu snagu signala s R.

Implementacijom prijenosne tehnike DF na relejnoj postaji moguće je izbjeći nedostatke tehnike prijenosa AF, odnosno izbjeći kumulativni efekt pojačavanja šuma. Također, tehnika prijenosa DF je bolji izbor za scenarij s malim SNR-om, odnosno za povećanje radijusa pokrivanja bazne postaje. Iz navedenog razloga, kombinacija modulacijske tehnike OFDM i tehnike prijenosa DF omogućava na relejnoj postaji velike prijenosne brzine korisnicima koji su na velikoj udaljenosti od bazne postaje kao i u situacijama kada je potrebno osigurati dovoljni kapacitet na lokacijama s velikim brojem korisnika. Nedostatak ove tehnike je povećana energetska potrošnja te unošenje dodatnog kašnjenja uslijed obrade signala što nije u potpunosti prihvatljivo za vremenski osjetljive usluge, kao npr. govorne usluge kod kojih je kašnjenje ključan parametar [21].

U arhitekturi mreže s više relejnih postaja, ukupni kapacitet DF sustava može se prikazati formulom [21]:

$$C_{DF} = \frac{1}{M} \min\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_M\} = \frac{1}{M} \log_2(1 + \min\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_M\}). \quad (1.8)$$

pri čemu  $\gamma_i$  označava SNR za  $i$ -ti skok, a  $c_i$  kapacitet  $i$ -tog kanala.

Kapacitet svakog pojedinačnog skoka u DF mreži dan je formulom [21]:

$$c_i = \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{\sigma^2} |h_i|^2 \right), \quad i=1,2,\dots,M. \quad (1.9)$$

pri čemu  $\sigma$  označava varijancu aditivnog bijelog šuma.

### 1.3.2 Algoritmi odabira releja

Sastavni dio današnjih bežičnih mreža su obično nekoliko fiksnih relejnih postaja u području između predajnika i prijammnika. Određivanje koji od tih potencijalnih releja će biti izabran za komunikaciju između predajnika i prijammnika je složen problem. Na primjer, relej može imati dobro stanje kanala prema prijammniku, ali istovremeno može biti opterećen prometom drugih predajnika.



Algoritmi odabira relejnih postaja predstavljaju tehniku postizanja prostornog diverzitija u kooperativnim relejnim mrežama. Cilj postupka odabira releja je identificirati jedan relejni čvor od više njih i dodijeliti ga zadanom paru predajnik-prijamnik. Odabir releja koji će sudjelovati u komunikaciji predstavlja izazovan zadatak jer pravilni odabir releja može učinkovito poboljšati prijenosne karakteristike sustava kao npr. osigurati veće prijenosne brzine, manju potrošnju energije i bolji BER. Također, vrlo je važno odrediti odgovarajući algoritam odabira releja, posebno u bežičnim mrežama s puno čvorova, jer proces odabira releja može uzrokovati i značajne štetne učinke na prijenosne karakteristike sustava, tj. kašnjenje i pretjeranu količinu signalizacije.

Algoritmi odabira releja mogu biti klasificirani na slijedeći način [23], [24]:

- Grupni odabir – u ovome postupku odabir releja se događa prije samog prijenosa signala sa svrhom postizanja unaprijed definirane razine performansi sustava.
- Proaktivni odabir – u ovome postupku odabir releja izvodi predajnik ili prijamnik za vrijeme prijenosa.
- Odabir na zahtjev – odabir releja se izvodi po potrebi npr. kada su uvjeti na izravnom komunikacijskom kanalu ispod unaprijed definiranog praga [24].

Ovisno o odnosu između mrežnih entiteta, mehanizmi za odabir releja mogu se podijeliti u dvije sheme [24]:

- Oportunistička (Svaki potencijalni relej odlučuje o prosljeđivanju paketa na temelju informacija koje ima o mreži. Navedeno može dovesti do velike vjerojatnosti odabira više od jednog releja koji će se natjecati za prijenos podataka u bežičnom komunikacijskom kanalu.)
- Kooperativna (U prvoj fazi releji šalju informaciju o spremnosti za prijenos kao i lokalne informacije koje će biti korisne za odabir releja. Takva informacija je dostupna i drugim čvorovima, koji tada mogu sudjelovati u odabiru jednog ili više releja u drugoj fazi. Nedostatak ovog načina je potencijalni nedostatak sinkronizacije između dvije faze. Kao posljedica toga, možda neće doći do prijenosa paketa ako čvor koji je odabran kao relej nije dostupan u trenutku kada je prijenos potreban, primjerice zbog kretanja ili nedostatka energije).

Osnovna oportunistička shema odabira releja temelji se na lokalnim mjerenjima i kao takva se dalje klasificira na sljedeći način:

- odabir releja temeljen na mjerenju (engl. *measurement-based relay selection*) – ne zahtijeva informaciju o topologiji mreže već se oslanja na rezultate lokalnih mjerenja trenutnog stanja kanala [26]. Svaki potencijalni relej procjenjuje stanje kanala (CSI) između predajnika i releja kao i stanje kanala između releja i prijammnika. Procjena stanja kanala temelji se na feding amplitudama između predajnika-releja i relej-prijammnika i na očekivanim performansama kanala predajnik-relej-prijammnik. Nakon CSI procjene, svaki relej postavlja mjerač vremena prijenosa na vrijednost obrnutu od procijenjena CSI vrijednost. Mjerač s najprikladnijom CSI vrijednosti istječe ranije, kvalificirajući taj uređaj kao relej koji će se koristiti u komunikaciji. Kako bi se izbjegao slučaj "skrivenih" releja, kvalificirani relej može zatražiti od predajnika da obavijesti sve druge potencijalne releje o svom prijenosu.
- odabir releja temeljen na performansama (engl. *performance-based relay selection*) – oslanja se na traženu razinu performansi sustava kao što je kašnjenje i energetska efikasnost prilikom odabira najprikladnijeg releja [27]. U prvoj fazi predajnici prenose njihovu potrebnu razinu izvedbe, a u drugoj fazi svi potencijalni releji procjenjuju uvjete svojih kanala.
- odabir releja temeljen na zadanom pragu (engl. *threshold-based relay selection*) – postavljanjem određenih pragova (SNR, BER,...) smanjuje se broj potencijalnih releja i samim time i dodatna signalizacija. Pragovi mogu biti postavljeni kao fiksni ili adaptivni, u slučaju izrazito promjenjivog stanja kanala [24]. U prvoj fazi, svaki susjedni relej uspoređuje kvalitetu signala koju je primio od predajnika (SNR ili BER). U drugoj fazi, samo releji koji su zadovoljili zadani prag će ući u odabir releja prema pravilima algoritma. Nedostatak ove metode je izbor granične vrijednosti; ukoliko je prag fiksno postavljen, algoritam za odabir releja ne može reagirati na varijacije uvjeta kanala.
- adaptivni odabir releja (engl. *adaptive relay selection*) - Zbog varijacija uvjeta kanala vjerojatnost pogreške paketa od veza od predajnika do prijammnika se može smanjiti na način da prijenos signala preko releja nije potreban. Navedenim pristupom predlaže se odabir releja samo ako je relej potreban s velikom vjerojatnošću. U prvoj fazi prijammnik uspoređuje kvalitetu primljenog signala s unaprijed definiranim pragom. Ukoliko je kvaliteta primljenog signala ispod tog praga, tada se pokreće proces odabira releja.

Prva tri spomenuta pristupa pripadaju proaktivnim algoritmima odabira releja, što znači da je relej (ili skup releja) uvijek odabran, dok posljednji pripada algoritmima odabira na zahtjev.

Suprotno od oportunističke sheme odabira releja, procedure sheme kooperativnog odabira releja zahtijevaju razmjenu informacija između uključenih komunikacijskih čvorova. U ovom slučaju postoje dvije kategorije [24]:

- odabir releja temeljem tablice (engl. *table-based relay selection*) na način da se odabire kontrolirani broj releja (jedan ili dva) na temelju podataka koji prikuplja predajnik (CSI za veze između predajnika i potencijalnih releja, kao i CSI za veze između potencijalnih releja i prijamnika). Čvor se može odabrati kao relej ako vrijeme prijenosa preko izravne veze do prijamnika je veći od zbroja vremena prijenosa preko predajnik-relej i relej-prijamnik veze. Kod navedenog pristupa prisutnost pokretnih čvorova predstavlja degradaciju performansi. Još jedan problem s ovim pristupom predstavlja i periodično emitiranje kao i dodatni „handshake“ signali koji mogu ograničiti učinkovitost samog sustava.
- odabir releja temeljen na natjecanju (engl. *contention-based relay selection*) koja dovodi do odabira skupa varijabilnog broja releja na način da se releji sami prijavljuju/natječu za prijenos signala u određenom vremenskom periodu. U prvoj fazi čvorovi procjenjuju lokalne uvjete, a to su položaj releja i stupanj te kvaliteta veze oba relejna kanala s predajnikom i prijamnikom. Ako ove procjene zadovoljavaju određeni prag onda su takvi releji kvalificirani releji za odabir. U drugoj fazi releji odabiru svoj prozor natjecanja na temelju prioriteta. Ograničenje ovog pristupa je utjecaj veličine prozor natjecanja na odabir releja. Štoviše, budući da slijedi kooperativni pristup, postoji problem preteka (engl. *overhead*) zbog emitiranja kvalifikacijskih/nominacijskih poruka.

U višeskočnim relejnim mrežama spomenute metode postupka odabira releja ponavljaju se za svaki skok od predajnika do prijamnika. Međutim, takav pristup može smanjiti kapacitet mreže pa je jedno od rješenja odabrati releje koji može pomoći više od jedne veze istovremeno. Općenito, postupak u algoritmima za odabir releja u višeskočnim relejnim mrežama je sljedeći [23]: potencijalni releji pristupaju informacijama o usmjeravanju (iz sloja lokalnog mrežnog sloja) stvarajući ograničenu sliku mreže izvan susjednih čvorova (uobičajeno dva skoka).

Preslušavanjem prijenosa preko identificiranih čvorova mreže, potencijalni releji mogu odlučiti prenijeti preslušanu informaciju do potencijalnih prijammnika, čak i u nedostatku izravne veze između predajnika i prijammnika informacije. To znači da releji mogu zaprimiti informacije za prijenos izravno od predajnika (kao što se događa u mreži s jednim relejem) ili od drugih releja ili posredničkih čvorova (usmjerivača). Ovo oportunističko ponašanje može se pojačati razmjenom meta-podataka među potencijalnim relejima, podešavanje odabira releja i odluke o rasporedu. U višeskočnim mrežama, prijammnik može zaprimiti više od dva neovisna signala istog paketa (npr. izravno od predajnika, preko posredničkog čvora identificiranog protokolom usmjeravanja ili preko odabranog releja). Ovaj dodatni prostorni diverzitet povećava robusnost i učinkovitost sustava.

## 1.4 Algoritmi dodjele i pravednosti raspodjele resursa

U sustavima OFDMA, raspodjela resursa obuhvaća dodjelu vremena, frekvencija i snage korisnicima i relejima kako bi se postigla maksimalna učinkovitost iskorištavanja resursa i ispunili zahtjevi za kvalitetom usluge. Dodjela resursa u bežičnim mrežama je bitno različita od dodjele u žičanim mrežama s obzirom na vremenski promjenjivu prirodu samog bežičnog signala. U promatranom sustavu OFDMA s  $N$  podnosilaca i  $k$  korisnika, prijenosna brzina  $R_k$  ( $k$ -tog korisnika), iskazuje se sljedećom formulom [5]:

$$R_k = \frac{B}{N} \sum_{n=1}^N c_{k,n} \log_2(1 + \gamma_{k,n}). \quad (1.10)$$

pri čemu je  $B$  ukupni frekvencijski pojas prijenosa,  $c_{k,n}$  je indeks povezanosti  $k$ -tog korisnika i  $n$ -tog podnosioca,  $\gamma_{k,n}$  je omjer srednje snage signala prema srednjoj snazi šuma  $n$ -tog podnosioca za  $k$ -tog korisnika. Parametar  $\gamma_{k,n}$  dan je formulom (1.11):

$$\gamma_{kn} = p_{kn} H_{kn} = \frac{p_{kn} h_{kn}^2}{N_0 \frac{B}{N}} \quad (1.11)$$

gdje je  $p_{kn}$  snaga dodijeljena za  $m$ -tog korisnika na  $n$ -tom podnosiocu.  $H_{kn}$  i  $h_{kn}$  predstavljaju redom šum kanala i iskoristivost kanala za  $m$ -tog korisnika u  $n$ -tom podnosiocu.  $N_0 \frac{B}{N}$  je snaga šuma na svakom podnosiocu, gdje je  $N_0$  spektralna gustoća snage bijelog šuma AWGN.

Problem dodjele resursa se može definirati s dva osnovna cilja i različitim ograničenjima (C1-C5) [5], [28]:

- maksimizacija prijenosne brzine

$$R_T = \frac{B}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,n} h_{k,n}^2}{N_0 \frac{B}{N}} \right) \quad (1.12)$$

- minimizacija snage potrebne za prijenos

$$P_T = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{k,n} p_{k,n}. \quad (1.13)$$

u ovisnosti o sljedećim ograničenjima:

$$C1: \quad c_{nm} \in \{0,1\}, \quad \forall n, m$$

$$C2: \quad \sum_{m=1}^M c_{nm} = 1, \quad \forall n, m$$

$$C3: \quad p_{nm} \geq 0, \quad \forall n, m$$

$$C4: \quad \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{nm} p_{nm} \leq P_{total}$$

C5: zahtjevi korisnika za brzinom prijenosa.

gdje je  $p_{k,n}$  snaga dodijeljena za  $k$ -tog korisnika na  $n$ -tom podnosiocu,  $h_{k,n}$  predstavlja i iskoristivost kanala, tj. prijenosnu funkciju kanala za  $k$ -tog korisnika na  $n$ -tom podnosiocu.  $N_0 B/N$  je srednja snaga šuma na svakom podnosiocu, gdje je  $N_0$  spektralna gustoća snage AWGN-a. C1 i C2 ograničenja povezana su uz dodjelu podnosilaca kako bi se osiguralo dodjela jednog potkanala samo jednom korisniku. C4 ograničenje postoji samo kada postoji ograničenje snage  $P_{total}$  na ukupnoj snazi sustava  $P_T$  (npr. kod algoritama s adaptivnom brzinom prijenosa). C5 određuje fiksne ili promjenjive zahtjeve korisnika za određenom brzinom prijenosa podataka.

Ovisno o zahtjevima sustava, svaki algoritam uzima u obzir druge ciljeve i ograničenja i sukladno tome koristi različite optimizacijske metode kako bi pružio optimalno rješenje za osiguranje boljih performansi i fleksibilnost dinamičke dodjele resursa u višekorisničkim

OFDMA sustavima. Općenito sheme za dodjeljivanje resursa možemo podijeliti u dvije kategorije [29]:

- fiksno dodjeljivanje resursa (TDMA ili FDMA) – predstavlja dodjelu vremenskog odsječka ili potkanala svakom korisniku pri čemu ista ne uzima u obzir trenutno stanje kanala pa stoga nije niti optimalna;
- dinamičko dodjeljivanje resursa – predstavlja promjenjivu dodjelu vremenskog odsječka ili potkanala, ovisno o korisničkoj iskoristivosti kanala te se kao takva u svrhu postizanja boljih performansi koristi u vremenski promjenjivim kanalima.

Općenito, algoritmi za dodjelu resursa mogu biti napravljeni kao centralizirani ili distribuirani model [30]. U centraliziranom modelu, algoritam se pokreće u središnjoj jedinici/predajniku (bazna postaja) koji je svjestan zahtjeva i stanja kanala svih prijammnika. S druge strane u distribuiranom modelu, svaki prijammnik pokušava autonomno ostvariti vlastiti (minimalni) QoS. Centralizirana metoda pokazuje bolju učinkovitost na uštrb veće signalizacije između prijammnika i predajnika, te manju skalabilnost od distribuiranog modela.

### 1.4.1 Dodjela resursa

Dodjela resursa ovisno o stanju kanalu u bežičnom komunikacijskom kanalu bavi se pitanjem kako podijeliti, između različitih korisnika (različitih prijammnika), radijske resurse dostupne u sustavu kako bi se postiglo što je moguće učinkovitije korištenje resursa. Tipično, to podrazumijeva minimiziranje količine resursa potrebnih po korisniku i na taj način omogućavanje što većeg broja korisnika u sustavu, dok se i dalje zadovoljavaju svi zahtjevi za kvalitetom usluge. U formuliranju problema optimizacije dodjele resursa, pretpostavlja se da u sustavu cijelo vrijeme postoji  $K$  aktivnih korisnika, od kojih svaki ima različite zahtjeve za kvalitetom usluge u smislu prijenosne brzine i BER-a [5]. Dodjela resursa je jedna od tehnika za rješavanje problema ograničenog radio resursa kako bi se podržalo više korisnika u bežičnom komunikacijskom sustavu. U sustavima OFDMA uz odabir aktivnih korisnika u vremenskom odsječku, podnosioci i snaga također bi se trebali dodijeliti planiranim korisnicima. U formuliranju problema, ciljna prijenosna brzina za svakog korisnika je odabrana iz mogućeg područja brzine na temelju stanja kanala u tom vremenskom odsječku; resursi se zatim dodjeljuju korisnicima kako bi se postigla ciljana prijenosna brzina. Ako korisnik nije zakazan

u tom vremenskom odsječku, odgovarajuća prijenosna brzina bila bi nula, stoga se neraspoređenom korisniku ne dodjeljuje snaga. Problem raspoređivanja i raspodjele resursa također se naziva i problem raspoređivanje snage. U literaturi su predloženi mnogi algoritmi za raspoređivanje [31]. U ovim algoritmima, funkcija korisnosti definirana je za svakog korisnika kako bi se kvantificirala pravednost i druga pitanja kvalitete usluge u svakom vremenskom intervalu.

Raspoređivanje resursa prijammnicima s trenutačno najboljim uvjetima komunikacijskog kanala često se naziva max-C/I raspodjela, odnosno raspoređivanje s maksimalnom brzinom [7]. Budući da radijski uvjeti za različite kanale unutar ćelije obično variraju neovisno, u svakom trenutku gotovo uvijek postoji kanal čija je kvaliteta kanala blizu maksimuma. Matematički, max-C/I raspodjela može se izraziti kao raspoređivanje korisnika  $k$  na sljedeći način:

$$k = \underset{i}{\operatorname{argmax}} R_i, \quad (1.14)$$

gdje je  $R_i$  trenutna prijenosna brzina za korisnika  $i$ . Iako je, iz perspektive kapaciteta sustava strategija max-C/I raspoređivanja korisna, isto neće biti pravedno u svim situacijama.

Uz pretpostavku kako u prosjeku svi prijammnici „doživljavaju“ slične uvjete kanala i velike varijacije u trenutnim uvjetima kanala samo zbog, na primjer, brzog višestrukog fedinga, tada će svi prijammnici iskusiti istu prosječnu prijenosnu brzinu. Sve varijacije u trenutnoj prijenosnoj brzini su brze i često ih se uopće ne primijeti. Međutim, u praksi će različiti prijammnici također imati razlike u (kratkoročnim) uvjetima kanala – na primjer, zbog razlika u udaljenosti od predajnika. U ovom slučaju, uvjeti kanala s kojima se susreće jedan prijammnik mogu relativno dugo vremena biti lošiji od uvjeta na kanalu s kojima se suočavaju drugi prijammnici. Prema strategiji Max-C/I raspoređivanja, prijammnik s lošim uvjetima kanala tako nikada neće biti raspoređen. Iako rezultira najvećim kapacitetom sustava, ova situacija često nije prihvatljiva sa stajališta kvalitete usluge. Alternativa strategiji max-C/I raspoređivanja je takozvano kružno raspoređivanje (engl. *round robin*). Ova strategija raspoređivanja omogućuje korisnicima da se izmjenjuju u korištenju zajedničkih resursa, bez uzimanja u obzir trenutačnih uvjeta komunikacijskog kanala. Kružno raspoređivanje može se smatrati pravednim raspoređivanjem u smislu da se ista količina radio resursa daje svakoj komunikacijskoj vezi predajnik-prijammnik. Međutim, kružno raspoređivanje nije pravedno u smislu pružanja iste kvalitete usluge svim

komunikacijskim vezama. U tom slučaju više radio resursa mora se dati komunikacijskim vezama s lošim uvjetima kanala. Nadalje, budući da kružno raspoređivanje ne uzima u obzir trenutne uvjete kanala u procesu raspoređivanja, to će dovesti do niže ukupne performanse sustava, ali ujednačenije kvalitete usluge između različitih komunikacijskih veza, u usporedbi s max-C/I raspoređivanjem. Idealna strategija raspoređivanja stoga bi trebala djelovati negdje između max-C/I raspoređivanja i kružnog raspoređivanja – to jest, pokušati iskoristiti brze varijacije u uvjetima kanala što je više moguće, dok još uvijek zadovoljava određeni stupanj pravednosti među korisnicima.

U prethodnom odlomku objašnjene su strategije raspoređivanja iz perspektive silazne veze. Međutim, raspoređivanje je jednako primjenjivo na uzlazne prijenose i u velikoj mjeri mogu se uzeti u obzir ista načela, iako postoje neke razlike između ta dva. U osnovi, u uzlaznoj vezi snaga se distribuira među prijamnicima, dok je u silaznoj vezi raspodjela snage centralizirana unutar predajnika. Strategija max-C/I raspoređivanja bi tako dodijelila sve uzlazne resurse prijammniku s najboljim uvjetima uzlaznog kanala. Zanimajući bilo kakva ograničenja snage u prijammniku, to bi rezultiralo najvećim kapacitetom.

Pohlepni algoritam (engl. *greedy*) jedna je od mogućih strategija raspoređivanja. Uz navedenu strategiju raspodjele, prijammniku s najboljim radijskim uvjetima dodjeljuje se što je moguće veća prijenosna brzina. Ako je razina smetnje na prijammniku niža od najveće podnošljive razine, prijammniku s drugim najboljim uvjetima kanala također je dopušteno odašiljati, nastavljajući sa sve više i više prijammnika dok se ne postigne najveća podnošljiva razina smetnje na prijammniku. Ova strategija maksimizira korištenje zračnog sučelja, ali se isto postiže uz cijenu potencijalno velikih razlika u brzinama prijenosa podataka između korisnika. U ekstremnim slučajevima, prijammnicima na granici ćelije s lošim uvjetima kanala možda uopće neće biti dopušteno slanje. Mogu se zamisliti i strategije između pohlepnog raspoređivanja i max-C/I raspoređivanja, na primjer, različite proporcionalno-pravedne strategije raspoređivanja. To se može postići uključivanjem određenog težinskog faktora za svakog korisnika strategije pohlepnog raspoređivanja, proporcionalnog omjeru između trenutne i prosječne prijenosne brzine podataka. Navedeno raspoređivanje pretpostavlja poznavanje trenutnog stanja kanala, koje može biti teško dostupno u scenarijima uzlazne veze. U situacijama kada informacije o kvaliteti uzlazne radio veze nisu dostupne, može se koristiti i već spomenuto kružno raspoređivanje.



### 1.4.2 Algoritmi za dinamičku dodjelu resursa

Postoje dvije vrste optimizacijskih algoritama za dinamičku dodjelu resursa, a koji se temelje na optimizacijskom problemu [5]:

- Marginom prilagodljivi algoritmi (engl. *margin adaptive algorithms*) – algoritmi koji minimiziraju performanse sustava uz očuvanje prijenosne brzine i BER-a;
- Prijenosnom brzinom prilagodljivi algoritmi (engl. *rate adaptive algorithms*) – algoritmi koji maksimiziraju prijenosnu brzinu uz ograničenje performansi sustava.

Kod marginom prilagodljivih algoritama rješava se sljedeći optimizacijski problem [30]:

$$\min_{P, \mathcal{N}} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}_k} P_{kn} \quad (1.15)$$

što ovisi o:

$$C1: \quad \sum_{n \in \mathcal{N}_k} r_{kn} \geq \bar{r}_k \quad \forall k \in K$$

$$C2: \quad \sum_{n \in \mathcal{N}_k} p_{kn} \geq \bar{p}_k \quad \forall k \in K$$

$$C3: \quad \mathcal{N}_k \cap \mathcal{N}_j = \emptyset \quad \forall k, j \in K, \quad k \neq j$$

gdje  $k \in K = [1, \dots, K]$  predstavlja oznaku bežičnog terminala koji obavlja prijenos sa snagama  $\mathbf{p}_k = [p_{k1}, \dots, p_{kn}, \dots, p_{kN}]$  preko  $N$  podnosilaca, koji su prikazani skupom  $\mathcal{N} = [1, \dots, n, \dots, N]$  i  $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_k, \dots, \mathbf{p}_K]$ . Neka je  $\mathcal{N}_k \in \mathcal{N}$  skup podnosilaca dodijeljen korisniku  $k$ , a  $r_{kn}$  kapacitet kanala koji može postići korisnik  $k$  preko  $n$ -tog podnosioca. Skupovi dodijeljenih podnosilaca su disjunktne, kao što je navedeno u (C3), što znači da nije dopušteno da podnosilac bude dijeljen od strane više od jednog terminala. Svaki korisnik  $k$  želi postići svoju ciljanu prijenosnu brzinu  $r_k$ , kako je navedeno u (C1), pod ograničenjem  $p_k$  na njegovu ukupnu snagu prijenosa, kako je formulirano u (C2). Jasno je kako za svaki terminal  $k$  i svaki  $n \notin \mathcal{N}_k$  imamo  $p_{kn} = 0$ , i prema tome,  $r_{kn} = 0$ . Ukupna prijenosna brzina svakog korisnika je izražena Shannonovom formulom i iznosi:

$$r_k = \sum_{n \in \mathcal{N}_k} r_{kn} = \sum_{n \in \mathcal{N}_k} \log_2 \left( 1 + \frac{h_{kn} p_{kn}}{\sigma_w^2} \right) \quad (1.16)$$

u kojem  $h_{kn}$  označava dobitak kanala za korisnika  $k$  na podnosiocu  $n$ , i  $\sigma_w^2$  je šum u kanalu na svakom podnosiocu uz Gaussovu razdiobu, srednje vrijednosti 0, a spektralne gustoće snage

šuma  $N_0/2$ . Optimizacija se svodi na pronalaženje minimalne (margine) snage potrebne za prijenos podataka određenom prijenosnom brzinom. Ukoliko se minimalna snaga definira za svakog korisnika postiže se i minimalna snaga cijelog sustava OFDMA.

U slučaju prijenosnom brzinom prilagodljivih algoritama rješava se sljedeći optimizacijski problem [30]:

$$\max_{p, \mathcal{N}} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}_k} r_{kn} \quad (1.17)$$

što ovisi o:

$$C1: \sum_{n \in \mathcal{N}_k} r_{kn} \geq \bar{r}_k \quad \forall k \in K$$

$$C2: \sum_{n \in \mathcal{N}_k} p_{kn} \leq \bar{p}_k \quad \forall k \in K$$

$$C3: \mathcal{N}_k \cap \mathcal{N}_j = \emptyset \quad \forall k, j \in K, k \neq j$$

Cilj ove optimizacije je raspodijeliti bitove i snagu među različitim podnosiocima na takav način da je u sustavu ukupna prijenosna brzina maksimizirana.

Prednosti dinamičke dodjele resursa u višekorisničkim OFDMA sustavima djelomično su posljedica višekorisničkog diverzitija koji se temelji na dodjeljivanju svakog potkanala korisniku s dobrim pojačanjem (dobitkom) kanala na njemu. Da bi se to postiglo, pretpostavlja se da čvorovi savršeno procjenjuju stanje svog kanala te istu prosljeđuju predajniku kako bi stanje kanala uvijek bilo dostupno predajniku na početku svakog bloka prijenosa. Također, pretpostavlja se da je brzina fadinga kanala dovoljno spora tako da se vremenski promjenjivi kanal može smatrati kvazistatičnim gdje se stanje kanala ne mijenja unutar svakog OFDMA prijenosnog bloka. U suprotnom, resursi bi se dodijelili na temelju stanja kanala koje se već promijenilo, čime se poništava očekivana izvedba.

Navedeni algoritmi temelje se na pretpostavci savršene informacije o stanju kanala kako na predajniku tako i na prijammniku. Ipak u bežičnom komunikacijskom kanalu, rijetko je moguće da predajnik dobije informaciju o savršenom stanju kanala što je posljedica pogrešaka u procjeni kanala i kašnjenja povratnih informacija o stanju kanala. Velika količina povratnih

informacija koja se zahtijeva od prijamnika predstavlja jedan od problema u OFDMA mrežama. Budući da se za različite prijavnike informacije mogu prenositi različitim putem i preko različitih podnosilaca, prijavnici moraju dati predajniku mjerne informacije o stanju svakog podnosioca. Ukoliko promatramo mrežu s  $K$  aktivnih OFDM prijavnika terminala i  $N$  ukupno dostupnih podnosilaca. Dodjela resursa zahtijeva punu informaciju o stanju kanala koja se sastoji od  $K \times N$  kompleksnih brojeva (vrijednost značajke frekvencijskog odziva kanala na svakom podnosiocu za svakog korisnika). Ova povratna informacija predstavlja vrlo veliko opterećenje za mrežu ako postoji mnogo prijavnika u sustavu.

Prijenosnom brzinom prilagodljivi algoritmi dijele se na dvije veće podskupine:

- Prijenosnom brzinom prilagodljivi algoritmi sa stalnim zahtjevima (engl. *rate adaptive algorithms with fixed rate requirements*) - zahtjevi za korisničkim brzinama prijensa konstantni su za svakog korisnika s ciljem dodjele svakog podnosioca korisniku koji može postići najveću snagu na tom nosiocu [32];
- Prijenosnom brzinom prilagodljivi algoritmi s promjenjivim zahtjevima (engl. *rate adaptive algorithms with variable rate requirements*) imaju za cilj maksimizaciju ukupne prijenosne brzine uz zadržavanje proporcionalnosti brzine svakog korisnika [29, 33].

Optimizacijski problem za prijenosnom brzinom prilagodljive algoritme sa stalnim zahtjevima može se iskazati matematički kao [30]:

$$R_T = \frac{B}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{nm} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{nm} h_{nm}^2}{N_0 \frac{B}{N}} \right), \quad \max(c_{nm}, p_{nm}) \quad (1.18)$$

što ovisi o:

$$C1: \quad c_{nm} \in \{0,1\}, \quad \forall n, m$$

$$C2: \quad \sum_{n=1}^N c_{nm} = 1, \quad \forall n, m$$

$$C3: \quad p_{nm} \geq 0, \quad \forall n, m$$

$$C4: \quad \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{nm} p_{nm} \leq P_{total}$$

$$C5: \quad R_m \geq R_{m,min}, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

$R_m$  i  $R_{m,min}$  su postignuta i najmanja moguća prijenosna brzina za  $m$ -tog korisnika. Maksimalna prijenosna brzina se može postići ukoliko se svaki podnosilac dodijeli korisniku koji može postići najveću snagu na tom podnosiocu. Međutim, iako je maksimizirana prijenosna brzina, korisnička ograničenja nisu uzeta u obzir. Problem se može riješiti u tri koraka:

1. Odrediti koliko podnosilaca  $N_m$  i koliko snage  $p_m$  je potrebno svakom korisniku.
2. Dodijeliti podnosiocce svakom korisniku.
3. Odrediti koliko se bitova dodjeljuje svakom korisniku, odnosno kolika se snaga dodjeljuje korisnicima.

Algoritmi s adaptivnom brzinom prijenosa sa promjenjivom brzinom mogu se opisati matematički kao:

$$R_T = \frac{B}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{nm} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{nm} h_{nm}^2}{N_0 \frac{B}{N}} \right), \quad \max(c_{nm}, p_{nm}) \quad (1.19)$$

što ovisi o:

- C1:  $c_{nm} \in \{0,1\}, \forall n, m$
- C2:  $\sum_{m=1}^M c_{nm} = 1, \forall n, m$
- C3:  $p_{nm} \geq 0, \forall n, m$
- C4:  $\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{nm} p_{nm} \leq P_{total}$
- C5:  $R_1 : R_2 : \dots : R_M = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_M$

Cilj je maksimizacija ukupne prijenosne brzine uz održavanje proporcionalnosti brzine svakog korisnika što određuje stavka C5. U njoj je  $\{ \alpha_1, \alpha_2; \dots, \alpha_M \}$  skup predefiniраниh konstantnih korisničkih prijenosnih brzina u kojima je  $\alpha_m$  pozitivan realan broj u kojem je  $\alpha_{min} = 1$  za korisnika s najmanjom brzinom prijenosa.

### 1.4.3 Spektralna učinkovitost i pravednost raspodjele resursa

Spektralna učinkovitost (engl. *spectral efficiency*) i pravednost sustava (engl. *fairness*) dva su ključna pitanja u dodjeli resursa. Spektralna učinkovitost definirana je kao prijenosna brzina po jedinici širine pojasa prijenosa. Stoga, uzima se u obzir ukupna prijenosna brzina, a ne postignuta prijenosna brzina svakog korisnika. Sustav bi mogao postići najveću prijenosnu brzinu, a time i najveću spektralnu učinkovitost, ali bi bio nepravedan prema onim korisnicima koji su daleko od predajnika ili s lošim uvjetima kanala. Problem postaje još izraženiji kada se korisnici manje kreću budući da se uvjeti u kanalu minimalno mijenjaju (ili su gotovo statični) što može dovesti do dugotrajne nepravednosti u raspodjeli resursa. Koncept pravednosti raspodjele resursa pokazuje koliko su resursi ravnomjerno raspoređeni među korisnicima. Jedan od osnovnih problema kod dodjeljivanja slobodnih resursa i snage mrežnim elementima je kako maksimizirati ukupnu prijenosnu brzinu sustava, a pri tome održati kvalitetu usluge. Drugim riječima, navedeni koncept zapravo iziskuje određeno odricanje od maksimalno ostvarive prijenosne brzine kako bi se osigurala određena razina pravednosti raspodjele resursa [34]. Problem pravednosti raspodjele resursa predstavlja još veći izazov u višeskočnim relejnim mrežama.

Koncept pravednosti utječe na korisničko iskustvo i zadovoljstvo pruženim uslugama neovisno o lokaciji i stanju na kanalu. U modernim mrežama gdje istovremeno koegzistiraju različiti tipovi prometa s različitim QoS zahtjevima definiraju se različite QoS klase ovisno tipu prometa. Pravednost raspodjele resursa može biti definirano u smislu različitih parametara sustava pa tako na primjer može biti definirana [5]:

- u pogledu prijenosne brzine sustava, gdje se svakom korisniku dodjeljuje jednaki broj podnosilaca,
- u pogledu dodjele snage, gdje se svakom korisniku dodjeljuje jednaka količina snage u odnosu na ukupnu dostupnu snagu sustava ili
- u pogledu prijenosne brzine, gdje je cilj dodijeliti resurse svakom korisniku na način da svi korisnici ostvare jednaku brzinu.

## 1.5 Otvorena pitanja

Iako danas postoji velik broj znanstvenih radova koji se bave problematikom OFDMA relejnih mreža te su napravljene mnoge analize performansi relejnih mreža ipak postoji veliki broj još uvijek otvorenih pitanja koja se nameću kao bitan čimbenik u daljnjem povećanju prijenosnih brzina i kvalitete usluge, osobito onih vezanih uz način implementacije releja u mobilnim mrežama sljedeće generacije, ili pak definiranja algoritma odabira relejnih postaja koje sudjeluju u komunikaciji predajnik - relejna postaja – prijammnik. Algoritmi odabira relejnih postaja, kojim će se odrediti koja relejna postaja će biti odabrana za komunikacije između predajnika i prijammnika, predstavljaju tehniku postizanja prostornog diverzitija u kooperativnim relejnim mrežama.

OFDMA temeljene relejne mreže otvaraju veliko područje mogućih istraživanja vezano uz metode dodjele resursa kao što je dinamička dodjela potkanala korisniku s ciljem optimizacije karakteristika transmisijskih sustava (povećanje prijenosnih brzina uz minimizaciju snage predajnika i vrijednosti BER-a). Metode dodjele resursa za različite vrste relejnih mreža su istraživane u velikom broju znanstvenih radova [5], [29], [33] pri čemu se iste bave algoritmima dodjele potkanala, bitova i snage kojima je glavni cilj postići što veću prijenosnu brzinu uz što manju uloženu snagu. Predložene su i relejne sheme zasnovane na odsječcima, ali bez primjene pravednosti raspodjele resursa i koristeći jednoliku raspodjelu snage na predajniku kao i releju [35].

Algoritmi za pravednosti raspodjele resursa, koji su zaduženi za osiguranje pravedne raspodjele resursa u ovisnosti o različitim korisničkim zahtjevima za kvalitetom usluge, u dostupnoj literaturi su predloženi većinom za direktan kanal (predajnik-prijammnik), ali ne i za relejne mreže te ne uzimajući u obzir mogućnosti grupiranja potkanala u odsječke [36]. Naime, u realnom svijetu, korisnici koriste različite usluge s pripadajućim brzinama prijenosa i ostalim QoS parametrima pa sukladno tome pravedna dodjela resursa unutar sustava postaje bitna karakteristika OFDMA relejnih mreža. Stoga je moguće uvesti „personalizirano“ upravljanje sustavom definirajući određene QoS klase ovisno o vrsti korištene usluge od strane korisnika te iste uzeti u obzir prilikom dodjele resursa i snage. Također, moguće je u optimizacijski problem uključiti i stanje spremnika (engl. *buffer*) ili duljina reda čekanja na pojedinom čvoru

te na taj način optimalno raspodijeliti prometne tokove ovisno o zauzetosti pojedinog čvora u sustavu.

Smanjenje potrošnje električne energije pri radu komunikacijske opreme, pa tako i u bežičnim mrežama, postao je globalni imperativ, posebice za mreže novih generacija. Stoga je važno napomenuti da je, osim povećanja prijenosnih brzina, efikasnom dodjelom resursa, bitova i snage moguće postići i druge ciljeve kao npr. ušteda električne energije. Prema nekim statističkim podacima [37] više od 50% od ukupne energije koje koriste bežične mreže se konzumira od strane radio dijela pristupne mreže, pri čemu se 50-80% troši od strane pojačala. Dakle, navedene koristi od postizanja ekoloških prihvatljivih tehnologija i postizanje što veće energetske učinkovitosti rada OFDMA relejnih mreža su u skladu s nastojanjima energetske učinkovitog svijeta te stoga isto pobuđuje veliki interes znanstvene zajednice.

## 1.6 Sažetak poglavlja

Kombinacija prijenosnih tehnologija poput OFDMA s relejnim tehnikama omogućava priliku za razvoj bežičnih komunikacijskih mreža sljedeće generacije u kojima su zadovoljeni sve veći korisnički zahtjevi za velikim prijenosnim brzinama, kratkim vremenima kašnjenja i povećanim dometom te poboljšanom spektralnom efikasnošću i mrežnom stabilnosti.

Navedeno se može djelomično postići korištenjem različitih adaptivnih metoda poput kodiranja i modulacije, koje omogućuju optimiziranje sustava i maksimalnu iskoristivost raspoloživog spektra, ali ova rješenja nisu dovoljna. Zato se za povećanje prijenosne brzine i povećanje kapaciteta sustava OFDMA kao najbolje rješenje izdvaja mogućnost unapređenja arhitekture mobilnih (bežičnih) mreža kroz koncept uvođenje relejnih postaja.

Kombinacija sustava OFDMA i relejnih mreža iziskuje pažljivi dizajn algoritama dodjele resursa, algoritama odabira releja te racionalno korištenje ukupne dostupne snage, pri čemu se kao cilj zajedničke optimizacije istih može postići što veća prijenosna brzina uz što manju uloženu snagu, a pri tome voditi računa o pravednosti sustava i ispunjavanju individualnih korisničkih QoS zahtjeva.

U ovome poglavlju dan je pregled trenutnog stanja razvoja OFDMA mreža s više relejnih postaja kao i pregled najvažnijih primjera algoritama odabira releja i algoritama dodjele resursa. U navedenom području identificirana su neka otvorena pitanja, odnosno prostor za daljnja istraživanja koja zahtijevaju dodatne analize i razmatranja u smjeru rješavanja navedenih optimizacijskih problema.



## Poglavlje 2

---

# MODELIRANJE I PROCJENA KOMUNIKACIJSKOG KANALA

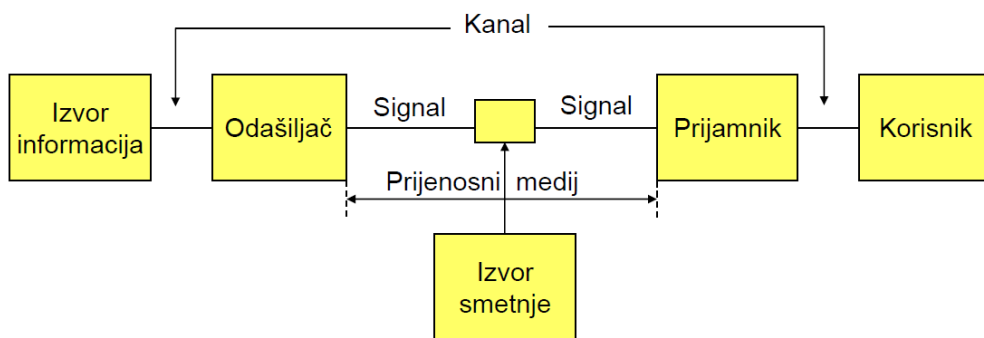
*Prijenos signala bežičnim komunikacijskim kanalom odvija se u specifičnoj okolini koja podrazumijeva prisustvo velikog broja različitih prepreka, koje mogu biti pokretne i nepokretne pri čemu iste dovode do niza pojava koje u utječu na kvalitetu komunikacije, prijenosnu brzinu, kao i na maksimalni domet mreže. Stoga, matematičko modeliranje mobilnog komunikacijskog kanala predstavlja najbitniji, ali i najteži dio projektiranja sustava. S obzirom da su radiokanali nestacionarni i slučajnih karakteristika, određivanje modela kanala se uglavnom zasniva na zakonima teorije vjerojatnosti i rezultatima mjerenja provedenih na konkretnom sustavu. Vrlo precizne matematičke modele koji opisuju sve specifičnosti propagacije signala u komunikacijskom kanalu uglavnom nije moguće izvesti ili su veoma složeni za dalju upotrebu. Stoga su razvijeni relativno jednostavni i dovoljno precizni statistički modeli kanala sa fadingom, koji se mogu primijeniti u određenim propagacijskim uvjetima uz dobru aproksimaciju komunikacijskog okruženja.*

### 2.1 Bežični komunikacijski kanal

Komunikacijski kanal predstavlja medij za prijenos podataka od predajnika do prijammnika pri čemu su šum i smetnje njegov sastavni dio koji utječu na signal koji se prenosi (slika 2.1). Stoga je prilikom implementacije prijenosnih sustava potrebno utjecaj šuma odnosno smetnje u komunikacijskom kanalu na poslana podatke smanjiti na što je moguće manju mjeru. Pouzdana komunikacija velikim brzinama korištenjem bežičnog komunikacijskog kanala izazovan je zadatak.

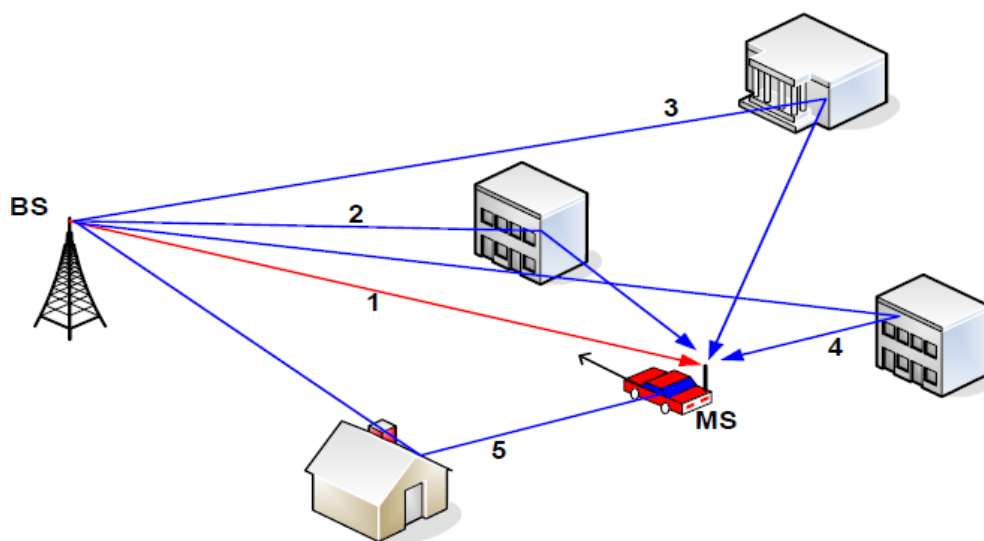
Tipični načini propagacije signala kroz bežični komunikacijski kanal su putem izravne zrake, refleksijom, difrakcijom i raspršenjem. Ukoliko na putu od prijammnika do predajnika ne postoji prepreka, odnosno postoji optička vidljivost, val se rasprostire putem izravne zrake (engl. *Line of Sight* - LOS). Refleksija je pojava do koje dolazi kada se elektromagnetski val

odbije o objekte čija je dimenzija velika, a hrapavost mala u odnosu na valnu duljinu signala (npr. tlo, zidovi, zgrade itd.). Prilikom sudara s objektom, val se može potpuno ili samo djelomično odbiti, ovisno o svojstvima medija, polarizaciji, kutu upada i frekvenciji [38]. Difrakcija nastaje kada se val sudari s preprekom čija površina ima oštre rubove, a val koji nastaje na površini prepreke nastavlja se širiti u prostor, čak i onda kada između predajnika i prijamnika ne postoji izravna optička vidljivost. Raspršenje je pojava koja nastaje u radiokanalima u kojem postoji veliki broj prepreka, čija je veličina u odnosu na valnu duljinu malena ili istog reda veličine. Raspršeni valovi nastaju na grubim površinama, sitnim objektima i drugim nepravilnostima u kanalu (npr. prometni znakovi, rasvjetni stupovi, stepeništa u zgradama itd.).



Slika 2.1 Bežični komunikacijski kanal

Posljedica širenja signala kroz prirodne prepreke poput zgrada, drveća, itd. je višestazna propagacija odnosno višestazno širenje signala (slika 2.2). Višestazno širenje signala pretpostavlja i prostiranje dodatnih NLOS komponenti koje predstavljaju kopije poslanog signala.



Slika 2.2 Primjer višestaznog širenja signala [39]

Komponente višestaznog širenja signala različito su oslabljene, jer prelaze različite udaljenosti na putu do prijamnika. Osim različitih razina slabljenja, prelazak različitih udaljenosti istom brzinom uzrokuje dolazak velikog broja kopija signala različitih amplituda, faza i kašnjenja koje se na prijamniku zbrajaju, a koje mogu izazvati nepredvidljive fluktuacije amplitude i faze prenošenog signala koje se nazivaju feding. Feding može izazvati vrlo brze, praktički nepredvidive, promjene ili propade, što otežava planiranje i izvođenje klasičnog komunikacijskog sustava.

Signal  $s$  bazne postaje  $s(t)$  sastoji se od signala osnovnog pojasa (izvorna kodirana informacija) te od prijenosnog signala frekvencije  $f_c$ . Signal na ulazu u kanal [39]:

$$s(t) = \tilde{s}(t)e^{j2\pi f_c t} \quad (2.1)$$

U prostoru bez prepreka, prijamnik bi primio oslabljenu i zakašnjelu repliku odaslanog signala. Uz prisustvo prepreka prijemni signal  $r(t)$  u višestaznom kanalu je zbroj višestrukih replika odaslanog signala, svaka sa svojom amplitudom, fazom i kašnjenjem. Ukoliko se uzme konačni broj od  $L$  staza, prijemni signal bio bi:

$$r(t) = \sum_{i=1}^L a_i s(t - \tau_i) e^{-j2\pi f_{D,i} t} \quad (2.2)$$

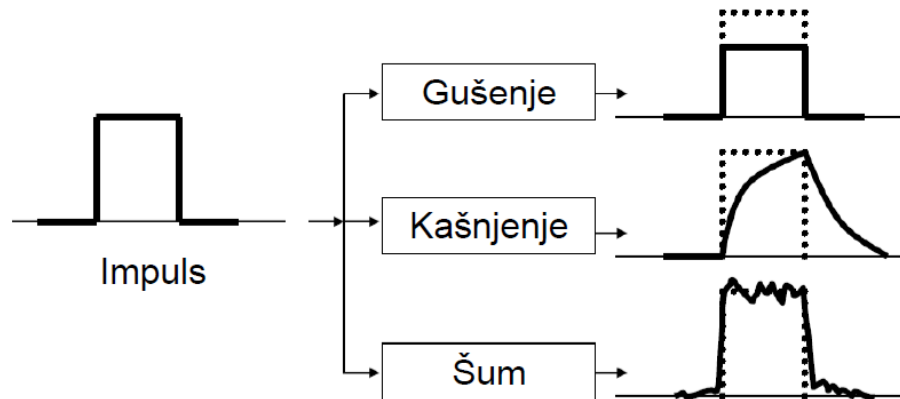
pri čemu je  $a_i$  – amplitudni faktor kanala (prigušenje, feding),  $s(t - \tau_i)$  – kašnjenja svake zrake poslanog signala,  $f_{D,i}$  – Dopplerov frekvencijski pomak za  $i$ -tu stazu (ukoliko se prijamnik ili reflektivni objekti kreću).

## 2.2 Smetnje u komunikacijskom kanalu

Smetnje u komunikacijskom kanalu (slika 2.3) možemo ugrubo podijeliti na tri cjeline [39]:

- gušenje signala (atenuacija);
- kašnjenje signala (povezano je s izobličenjem);
- šum.

Gušenje signala predstavlja smanjenje razine električnog signala pri prijenosu komunikacijskim kanalom te ovisi o vrsti prijenosnog medija koji se koristi za prijenos signala kao i o frekvenciji signala (raste porastom frekvencije).



Slika 2.3 Utjecaj komunikacijskog kanala na impuls [6]

Obično se označava oznakom  $L$ , a iskazuje se kao omjer snage signala na ulazu u komunikacijski kanal ( $P_{ul}$ ) i snage signala na izlazu iz kanala ( $P_{izl}$ ) u decibelima (dB) [40]:

$$L = 10 \log \left( \frac{P_{ul}}{P_{izl}} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.3)$$

Izobličenje nastaje zbog promjenjivosti kašnjenja spektralnih komponenti signala (i samih signala), a to su značajke prijenosnih medija. Ova pojava izaziva proširenje impulsa i smetnje među simbolima (komponente signala jednog bita se proširuju na položaje drugih bita) koje ograničavaju prijenosnu brzinu u sustavu.

Šum se može dodatno definirati kao neželjeni signal koji se pojavljuje u isto vrijeme, na istom mjestu ili u istom frekvencijskom području kao i željeni signal. Uvijek je prisutan u komunikacijskim sustavima. U elektroničkim komunikacijskim sustavima pojavljuje se [40]:

- termički ("bijeli") šum,
- intermodulacijski šum,
- preslušavanje,
- impulsni šum.

Djelovanje šuma se opisuje kao matematička operacija zbroja korisnog signala i šuma, uvijek prisutan u komunikacijskim sustavima i ne može biti uklonjen te postavlja gornju granicu značajki sustava.

Širenjem signala, signal postaje sve slabiji tako da u određenom trenutku razina šuma (koja je najčešće vrlo niska) postaje ograničavajući faktor za realizaciju komunikacije. U procjeni utjecaja šuma na značajke komunikacijskog sustava važan je relativni odnos snage signala i snage šuma, a ne njihovi apsolutni iznosi. Omjer snage signala ( $S$ ) i snage šuma ( $N$ ) naziva se odnos signal/šum (engl. *Signal/Noise* -  $S/N$ ) i izražava se u decibelima (dB)

U digitalnim sustavima loš (pre mali) odnos signal šum smanjuje kvalitetu digitalne informacije na prijamoj strani. Kvaliteta je određena i parametrom učestalosti pogreške bita (BER). Pogreška bita nastaje kad postoji razlika između odaslanog bita  $i$  iz prijavnika isporučenog bita. Ako se u slijedu od  $N$  bita nalazi  $n$  pogrešnih bitova onda je,

$$BER = \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{n}{N} \right). \quad (2.4)$$

Pogreške u prijenosu nastaju zbog prevelikih smetnji među simbolima digitalnog signala ili zbog djelovanja šuma koji maskiraju impulse digitalnog signala.

Kapacitet komunikacijskog kanala iskazuje se kao prijenosna brzina (bit/s) i predstavlja najveću brzinu kojom se podaci mogu prenositi. Kapacitet kanala ovisi o frekvencijskoj širini pojasa  $B$  (Hz) i o parametrima odašiljača te vrsti prijenosnog medija. Na kapacitet kanala utječe:

- broj naponskih razina signala,
- srednja razina šuma u kanalu,
- prihvatljiva učestalost pogreške bita.

Sukladno Shannonovom teoremu o kapacitetu kanala definirana je teorijska najviša moguća brzina pouzdanog prijenosa informacije u zadanome pojasu frekvencija u uvjetima djelovanja bijelog šuma ili kapacitet kanala i jednaka je [40]:

$$C = B \log_2(1 + SN) \text{ [bit/s]}, \quad (2.5)$$

gdje je  $B$  širina pojasa koji zauzima kanal,  $S$  srednja snaga signala i  $N$  snaga bijelog šuma u pojasu širine  $B$ .  $S/N$  je omjer snaga u apsolutnom iznosu (nije iskazan u dB). Izraz pokazuje da se smanjenjem širine kanala povećava potrebni omjer signala i šuma, a da bi se zadržao nepromijenjeni kapacitet kanala.

Signal u bežičnom komunikacijskom kanalu nije samo osjetljiv na šum, interferenciju i druge smetnje kanala, već se te smetnje mijenjaju tijekom vremena na nepredvidiv način zbog

pokretljivosti korisnika. Varijacije u snazi primljenog signala na udaljenosti uzrokovane su gubitkom staze te utjecajem zasjenjenja i fedinga. Gubitak putanje uzrokovan je disipacijom snage koju zrači predajnik kao i učincima propagacijskog kanala. Zasjenjenje nastaje zbog prepreka između predajnika i prijamnika koje smanjuju snagu signala kroz apsorpciju, refleksiju, raspršenje i difrakciju.

## 2.3 Tehnike diverzitija

Sofisticirane tehnike obrade signala mogu se koristiti na predajniku i prijamniku za ublažavanje višestaznog fedinga. Jedna tehnika koja se može upotrijebiti je izjednačavanje signala (engl. *signal equalization*), gdje predajnik prvo odašilje niz signala koji je poznat prijamniku [41].

Na temelju primljenog signala, prijamnik može procijeniti učinak višestaznog fedinga na sljedeće prijenose. Međutim, na mobilnim čvorovima ili u dinamičnim okruženjima, višestazni feding postaje teško predvidjeti, a izjednačavanje je manje pouzdano. Nadalje, u malim uređajima male snage teško se može primijeniti sofisticirana obrada signala jer je računalna snaga vrlo ograničena zbog strogih ograničenja veličine i složenosti.

Tehnika diverzitija [42] može znatno smanjiti kolebanje signala zbog višestaznog fedinga. Predloženo je nekoliko tehnika diverzitija za suzbijanje višestaznog fedinga koristeći intrinzična svojstva bežičnog komunikacijskog kanala. Glavni princip diverzitija je odaslati i/ili primiti istu informaciju iz različitih potkanala, uz pretpostavku da je vjerojatnost da su svi kanali u fedingu puno manja od vjerojatnosti da je samo jedan kanal u fedingu. Ukoliko su primljene kopije tijekom propagiranja prema prijamniku doživjele različiti utjecaj višestaznog fedinga, jedna od njih ili njihova kombinacija može dovesti do uspješnog oporavka poslanih informacija.

Sljedeće tehnike diverzitija se obično koriste [42]:

- Vremenski diverziti: Predajnik šalje kopije podataka na istom frekvencijskom kanalu u odvojenim vremenskim intervalima. Zbog malih promjena u okruženju ili kretanja predajnika i prijamnika za vrijeme prijenosa podataka, zaprimljeni signali na prijamniku

imaju različiti utjecaj višestaznog fedinga. Međutim, kada dodatne kopije podataka dolaze s vrlo sličnim fedingom, one ne daju nikakve nove informacije za oporavak signala. To može biti slučaj, npr., u okruženjima s niskom mobilnošću, gdje su feding kanali snažno korelirani u vremenu.

- **Frekvencijski diverziti:** Predajnik šalje kopije signala na različitim frekvencijskim kanalima. Kako bi se ostvarila nezavisnost različitih grana diverzitija, udaljenost između nosilaca kojima se prenose diverziti signali treba biti veća od koherentnog opsega kanala. Budući da se radiovalovi različito šire na različitim frekvencijama, oni dolaze do prijammnika s različitim višestaznim fedingom, što se opet može iskoristiti. Međutim, to je moguće samo kada je feding na korištenim frekvencijama nekoreliran. Frekvencijski diverziti se koristi u OFDM-u i zahtijeva upotrebu znatno većeg frekvencijskog opsega u cilju poboljšanja performansi sustava.
- **Prostorni diverziti:** Tehnika temeljena na korištenju više od jedne antene za prijenos nekoliko kopija informacije. Zbog prostorno odvojenih antena, prenesene kopije informacija doživljavaju različit utjecaj višestaznog fedinga. Ukoliko se primjenjuju ortogonalni prostorno-vremenski kodovi, predajnik može slati iste ili različite informacije na svojim antenama istovremeno i osigurati bolju prijenosnu brzinu. Implementacija je relativno jednostavna, ne zahtijeva korištenje dodatnog spektra, a statistička nezavisnost primljenih signala se ostvaruje adekvatnim razmakom antena. Međutim, velika udaljenost između antena, kako bi fedinzi bili nekorelirani, a time i ostvaren maksimalni diverziti dobitak, može predstavljati veliki problem te isto nije moguće ispuniti na malim uređajima. Efikasno rješenje za rješavanje tog nedostatka predstavlja polarizacijski diverziti.
- **Polarizacijski diverziti:** Za razliku od prostornog, polarizacijski diverziti podrazumijeva korištenje jedne, dvojno polarizirane antene. Inovativni pristup za dobivanje prostornog diverzitija bez postavljanja više antena predstavlja kooperativni diverziti, također poznata kao kooperativna komunikacija.
- **Kooperativni diverziti:** Predajnik emitira podatke prijammniku i drugom čvoru koji se naziva relej. Nakon primitka podataka, relej ponovno šalje svoju kopiju prema predajniku. Na taj način dvije kopije istih podataka stižu do odredišta različitim putovima - izravno od izvora i od releja. Zbog prostornog odvajanja izvora i releja, signali koji dolaze iz ovih čvorova doživljavaju različit utjecaj višestaznog fedinga, što

se može iskoristiti na određitu za pouzdan oporavak podataka. Budući da se kooperativni diverziti oslanjaju na antene drugih čvorova u mreži, isti se može promatrati kao distribuirani prostorni diverziti.

## 2.4 Metode modeliranja komunikacijskog kanala

S obzirom da se prijenos signala u radiokanalu odvija kroz različite mehanizme propagacije signala, različita radio okruženja, različit nivo mobilnosti korisnika i objekata na koje signal nailazi, jasno je da bežični komunikacijski kanal ima nepredvidljiv karakter, a sam prijenos signala iznimno složen. Slučajna priroda radiokanala predstavlja ozbiljan izazov prilikom dizajniranja bežičnih komunikacijskih mreža, stoga je poznavanje karakteristika prijenosa signala u bežičnom komunikacijskom kanalu ključan element prilikom razvijanja modela bežičnog komunikacijskog kanala.

Za modeliranje komunikacijskog bežičnog kanala koriste se tri metode [43]:

- Realistični modeli kanala: U ovim se modelima koristi sonda za mjerenje, digitalizaciju i pohranjivanje impulsnog odziva kanala. Nedostatak ove metode je što zahtijeva veliki napor za prikupljanje podataka, a karakterizira samo određeno područje.
- Deterministički modeli kanala: U ovim se modelima geografski i morfološki podaci koriste za formiranje baze podataka za determinističko rješenje Maxwellovih jednadžbi. Glavna prednost je da je računalne simulacije lakše izvesti od realnih mjerenja, ali ti su modeli manje točni u usporedbi s realističnim modelima kanala.
- Stohastički modeli kanala: Ove metode ne pokušavaju ispravno predvidjeti impulсни odgovor na jednoj određenoj lokaciji, već predviđaju funkciju gustoće vjerojatnosti (engl. *probability density function*) kanala na velikom području. Primjer ovog pristupa je model Rayleigh-fedinga.

Komunikacijski se kanal može modelirati na fizički i statistički način [14]. Kod fizičkog načina se komunikacijski kanal modelira matematičkim oblikovanjem fizičkog procesa koji mijenja odaslani signal, dok se kod statistički komunikacijski kanal uobičajeno modelira kao trostruki skup koji se sastoji od ulaznog signala  $u$ , izlaznog signala  $v$  te vjerojatnosti prijenosa  $p(u, v)$  za svaki par  $(u, v)$ . Vjerojatnost prijenosa  $p(u, v)$  predstavlja vjerojatnost da je primljen



simbol  $v$ , ukoliko je odaslan simbol  $u$ . Fizičko i statističko modeliranje komunikacijskog kanala se može kombinirati na način da se bežični komunikacijski kanali modeliraju uz slučajnu atenuaciju i aditivan bijeli šum. Slučajna atenuacija predstavlja pojednostavljenje fizičkih procesa koji utječu na signal tijekom njegovog prijenosa, dok bijeli šum u modelu predstavlja vanjske smetnje i šum u prijammniku.

Postoje razni modeli komunikacijskih kanala pa tako su neki od najčešće korištenih modela AWGN i Rayleighov komunikacijski kanal (u obzir uzima i smetnje poput kašnjenja, refleksije, i dr.). U disertaciji su korišteni AWGN i Rayleighov model komunikacijskog kanala.

### 2.4.1 AWGN model komunikacijskog kanala

AWGN predstavlja najjednostavniji model komunikacijskog kanala jer se jedina promjena signala u prijenosnom mediju očituje u linearnom dodavanju bijelog (Gaussovog) šuma koji ima konstantnu spektralnu gustoću (eng. *spectral density*) izraženu u jedinicama W/Hz. Ovisnost zaprimljenog signala u odnosu na poslani signal u AWGN modelu kanala prikazana je kroz jednadžbu:

$$V_t = U_t + N_t \quad (2.6)$$

gdje je  $U_t$  ulaz u kanal,  $V_t$  izlaz iz kanala, a  $N_t$  AWGN slučajna varijabla.

Navedeni komunikacijski kanal ima Gaussovu razdiobu amplituda šuma pri čemu se amplituda aditivnog bijelog šuma može smatrati slučajnom varijablom  $X$  s funkcijom gustoće vjerojatnosti prikazanom formulom:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.7)$$

gdje je  $\mu$  srednja vrijednost, a  $\sigma^2$  varijanca šuma. Za srednju vrijednost šuma se u AWGN modelu najčešće uzima  $\mu = 0$ . AWGN model kao najjednostavniji model komunikacijskog kanala ne uzima u obzir frekvencijsku selektivnost kanala, interferencije, nelinearnosti, disperzije i slično [44]. Međutim, omogućava jednostavne i razumljive matematičke modele

koji su korisni za dobivanje uvida u osnovno ponašanje sustava prije nego što se ti drugi fenomeni razmotre.

## 2.4.2 Rayleighov model komunikacijskog kanala

Zbog svoje složenosti i nepredvidivosti, svojstva višestazne okoline opisuju se stohastičkim razdiobama, najčešće pomoću Rayleighove razdiobe. Rayleighov model se obično koristi za modeliranje bežičnog komunikacijskog kanala u kome se na putu od predajnika do prijmnika nalazi više prepreka, tako da na mjesto prijema dolazi više reflektiranih signala, dok je direktni blokiran preprekom NLOS [44]. Budući da nema direktnog signala, Rayleighov model često se klasificira kao najgori slučaj fedinga. Rayleighov model pretpostavlja da će se amplituda signala koji je prošao kroz prijenosni medij (komunikacijski kanal) mijenjati na slučajan način ili će se u potpunosti potisnuti. Ovisnost izlaza Rayleighovog modela komunikacijskog kanala u odnosu na ulaz u kanal prikazana je jednadžbom [45]:

$$V_t = \sqrt{A_t} \exp(j\rho) U_t + N_t \quad (2.8)$$

gdje su  $V_t$ ,  $U_t$  i  $N_t$  jednaki kao u jednadžbi (2.1.1).  $\sqrt{A_t} \exp(j\rho)$  predstavlja kompleksni faktor potiskivanja s amplitudom  $\sqrt{A_t}$  i fazom  $\rho$  u vremenu  $t$ .

Rayleighov se model oslanja na Rayleighovu distribuciju amplituda  $\sqrt{A_t}$  i uniformnu distribuciju faze  $\rho$  na intervalu  $[0, 2\pi)$ . Rayleighova distribucija slučajne varijable  $X$  predstavlja radijalnu komponentu zbroja dvaju Gaussovih slučajnih varijabli predstavljenih prethodnom formulom (2.7), odnosno [14]:

$$R \sim \text{Rayleigh}(\sigma)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.9)$$

gdje su  $X \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$  i  $Y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ . Jednadžba Rayleighove distribucije slučajne varijable  $X$  se može zapisati kao:

$$f_X(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \geq 0. \quad (2.10)$$

## 2.5 Metode za procjenu bežičnog komunikacijskog kanala

U cilju ostvarivanja pouzdane i brze komunikacije u bežičnim komunikacijama, procjena kanala ima veoma važnu ulogu, jer se na osnovu nje dobivaju informacije o stanju komunikacijskog kanala (CSI). CSI zapravo opisuje propagaciju signala od predajnika do prijammnika i uključuje kombinaciju više efekata, kao što su feding, refleksija i difrakcija signala i druge.

Postoje dva osnovna tipa CSI-a, koja se razlikuju u odnosu na preciznost procjene kanalnih karakteristika: trenutni i statistički [46]. Trenutni CSI (engl. *short-term CSI*) predstavlja poznavanje trenutnog stanja u kanalu, što je jednako poznavanju impulsnog odziva digitalnog filtra. Navedeno omogućava prilagodbu poslanog signala impulsnom odzivu kanala, što pomaže u postizanje niskih vrijednosti BER-a. S druge strane statistički CSI (engl. *long-term CSI*) predstavlja statističko poznavanje karakteristika komunikacijskog kanala kao npr. poznavanje funkcije raspodjele fedinga prisutnog u kanalu, srednju vrijednost gubitka kanala i LOS komponentu.

Tehnike procjene kanala obično se dijele u tri kategorije: temeljene na obuci (engl. *training-based*), slijepe (engl. *blind*) i poluslijepe (engl. *semi-blind*) [47]. U prvom slučaju, procjena se u potpunosti temelji na prijenosu sekvenci učenja (prethodno poznatih primatelju), odnosno pilot signalima. Metoda koja se temelji na procjeni kanala sekvence obuke je najčešće korištena i ima stabilniju izvedbu, ali se vrijeme i snaga utrošeni na obuku oduzimaju od stvarnog prijenosa podataka. Druga krajnost je slijepa procjena, koja se temelji na iskorištavanju statističkih informacija iz primljenih simbola. Ista ima prednost u uštedi širine prijenosnog pojasa, ali je ograničena na kanale sa sporim vremenskim promjenama te ima veću složenost na prijammniku. Kombinacija prethodno spomenutih tehnika procjena kanala naziva se poluslijepa procjena te ista koristi pilot simbole za procjenu.

## 2.6 Sažetak poglavlja

Komunikacijski kanal se definira kao medij kroz koji se prenose podaci od predajnika do prijammnika. Šum i smetnje su sastavni dio komunikacijskog kanala i oni utječu na signal koji se prenosi te se njihov utjecaj reprezentira kao izobličavanje signala na njegovom putu.

Prijenosne sustave potrebno je implementirati na način da šum i smetnje u komunikacijskom kanalu nemaju ili imaju neznatni utjecaj na poslane podatke. Iz tog je razloga prilikom simulacije prijenosnih sustava potrebno u razmatranja uključiti i utjecaj komunikacijskog kanala na signal.

Modeli komunikacijskih kanala su veoma brojni, a u sklopu ovog rada razmatrani su modeli AWGN i Rayleighovog komunikacijskog kanala. Kod AWGN modela odaslanom se signalu samo pribrajaju slučajno generirani brojevi koji predstavljaju šum, dok Rayleighov model u obzir uzima i smetnje (kašnjenje, refleksiju, ...) prisutne tijekom prijenosa signala. Funkcioniranje suvremenih sustava za prijenos putem OFDMA se u velikoj mjeri oslanja na pouzdane informacije o stanju kanala (CSI). Uz pomoć CSI moguće je prilagoditi način predaje signala trenutnom stanju u kanalu, što je od iznimne važnosti u cilju ostvarivanja pouzdane i brze komunikacije u bežičnim komunikacijskim sustavima.

## Poglavlje 3

---

# **METODA ZA UČINKOVITU PROCJENU BEŽIČNOG KANALA ZASNOVANA NA POSTUPCIMA INTERPOLACIJE I SURADNIČKOG FILTRIRANJA**

U ovom poglavlju prikazane su uobičajeno korištene metode procjene kanala i interpolacijske tehnike u sustavima OFDMA. Metode interpolacije moraju istovremeno zadovoljiti nisku složenost i visoku točnost, jer mogu značajno utjecati na točnost procjene kanala. Tehnike suradničkog filtriranja koriste se u preporučiteljskim sustavima u svrhu predviđanja nepoznatih vrijednosti za određene korisnike na temelju poznatih vrijednosti grupe sličnih korisnika. Spomenute tehnike imaju sposobnost preciznog predviđanja na temelju malog broja poznatih podataka u kratkom vremenu. Navedeno je vrlo korisno u sustavima OFDMA, gdje se istodobno u kratkom vremenu mora procijeniti stanje kanala za veliki broj korisnika. Budući da je učinkovitost procjene kanala izazovan problem u bežičnim komunikacijskim sustavima, u poglavlju je predložen novi algoritam procjene kanala koji kombinira uobičajene metode interpolacije i memorijski temeljene tehnike suradničkog filtriranja. Za predloženu interpolacijsku metodu provedene su simulacije, a dobiveni rezultati su uspoređeni s uobičajeno korištenim interpolacijskim metodama. U svrhu provjere poboljšanja točnosti procjene kanala korištena je metrika RMSE (engl. *Root Mean Squared Error*).

### **3.1 Uvod i cilj istraživanja**

Tijekom posljednjeg desetljeća primjetan je ubrzani razvoj tehnologija bežičnog širokopojsnog pristupa kao odgovor na sve veću potražnju za uslugama s heterogenim QoS zahtjevima. Sve veći broj različitih (dinamičkih) aplikacija s različitim QoS parametrima istovremeno zahtijevaju različite prijenosne brzine s podržanim rasponom parametra kašnjenja od nekoliko milisekundi do nekoliko sekundi s brojem veza koji se može promijeniti do desetaka tisuća [1]. Modulacijska tehnika OFDM kao jedna od najraširenijih modulacijskih tehnika uspješno se nosi s gore navedenim zahtjevima. Aktivno se koristi u bežičnim

širokopojasnim sustavima kao što su IEEE 802.11ax (WLAN), IEEE 802.16 (WiMAX), DVB-T i 4G/5G [2]. Kao što je već spomenuto, OFDM kao tehniku modulacije, gdje je raspoloživi frekvencijski spektar podijeljen na ortogonalne podnosiocice, karakterizira jednostavna implementacija, velike prijenosne brzine, visoka spektralna učinkovitost i otpornost na višestazno širenje [11].

Kako je kanal u bežičnim komunikacijskim sustavima vremenski promjenljiv i frekvencijski selektivan, potrebna je učinkovita i točna procjena kanala za koherentnu detekciju odaslanih podataka, što predstavlja izazovan zadatak. Procjena kanala ima za cilj procijeniti vremensku domenu ili odziv frekvencijske domene kanala kako bi se povećao kapacitet OFDM sustava poboljšanjem BER performansi. U OFDM-u, kapacitet sustava uvelike ovisi o poznavanju stanja kanala (CSI) između predajnika i prijarnika. Ukoliko se točno procijeni učinak izobličenja kanala za svaki od aktivnih podnosilaca unutar OFDM simbola, biti će moguće kompenzirati većinu neželjenih učinaka na odziv kanala [48]. Metode procjene kanala mogu se grupirati u dvije kategorije [49]:

- pomoću pilotskih podnosilaca:
  - češljasti (engl. *comb-type channel estimation*) i
  - blokovski tip (engl. *block-type channel estimation*)
- bez pilotskih podnosilaca.

U sustavima temeljenim na OFDM-u, češljasti tip procjene kanala pomoću pilotskih podnosilaca obično uključuje neku metodu interpolacije za procjenu stanja kanala na nepilotskim (podatkovnim) podnosiocima. Metode interpolacije stoga imaju veliki utjecaj na točnost procjene kanala u smislu smanjenja količine pogrešno prenesenih podataka te smanjenja ukupne korištene prijenosne snage. Metode interpolacije koje se obično koriste su linearna interpolacija, interpolacija drugog reda i kubična splajn interpolacija [49]. Trenutno postoji veliki interes za tehnike procjene kanala i metode interpolacije koje se koriste u sustavima OFDM i stoga su ih proučavali mnogi istraživači [50], [51], [52]. Međutim, performanse većine njih ograničene su ili brojem ili položajem pilot podnosilaca [49].

U ovom poglavlju predložena je nova metoda za procjenu kanala, koja poboljšava uobičajeno korištene metode interpolacije, upotrebom tehnika suradničkog filtriranja (engl. *Collaborative Filtering* - CF), koje su manje osjetljive na broj i lokaciju pilot podnosilaca.

Metode za procjenu kanala koje se temelje na nepravilnim i rijetkim rasporedima pilotskih podnosilaca poželjne su u sustavima OFDMA gdje se različiti korisnički kanali moraju istodobno procijeniti na baznoj stanici, a kod kojih je prisutan nepravilan ukupni raspored pilotskih podnosilaca [53].

U preporučiteljskim sustavima tehnike CF se koriste u svrhu predviđanje nepoznatih vrijednosti za određene korisnike na temelju poznatih vrijednosti grupe sličnih korisnika. Iste imaju sposobnost preciznog predviđanja na temelju malog broja poznatih podataka u kratkom vremenu što može biti vrlo korisno u sustavima OFDMA gdje se istodobno u kratkom vremenu mora procijeniti stanje kanala za veliki broj korisnika.

Tehnike CF mogu se podijeliti u tri kategorije:

- tehnike temeljene na modelu (engl. *model based*),
- memorijski temeljene tehnike (engl. *memory based*) te
- hibridne tehnike [54].

Memorijski temeljene CF tehnike, koje koriste uzorak ili cijelu bazu podataka korisničkih stavki za generiranje predviđanja uglavnom se koriste u sustavima e-trgovine zbog njihove jednostavne implementacije i visoke učinkovitosti [55]. Kod navedenih tehnika algoritam računa sličnosti u memoriji bez prethodno generiranog modela i često se za njih kaže da su temeljeni na susjedstvu (engl. *neighbourhood based*) jer se najbolji kandidati pronalaze u skupu najboljih susjeda. Naime, ukoliko se pretpostavi da je svaki korisnik dio grupe ljudi sa sličnim interesima tada se identificiranjem "susjeda" aktivnog/novog korisnika može proizvesti predviđanje povezanih preferencija za nove stavke [56]. Navedeni algoritmi podatke o korisnicima i stavkama drže u memoriji i direktno računaju preporuke, odnosno sličnost među susjedstvom računa se svaki put kada se korisniku želi dati preporuka. S druge strane tehnike CF temeljene na modelu generiraju model sustava i koriste faktorizaciju matrice sličnosti za pronalazak skrivenih faktora.

*Kod predložene nove metode za procjenu kanala napravljena je modifikacija CF logike za korisnike bežične komunikacijske mreže na način da parametri tehnike CF odgovaraju podnosiocima dotičnih korisnika. U predviđanju nepoznatih stanja kanala na podnosiocima*

koji nisu pilotski uzeta je pretpostavka da se stanja kanala na podnosiocima bliskih korisnika ponašaju slično [57].

## 3.2 Metode procjene kanala i interpolacijske tehnike u sustavima OFDM

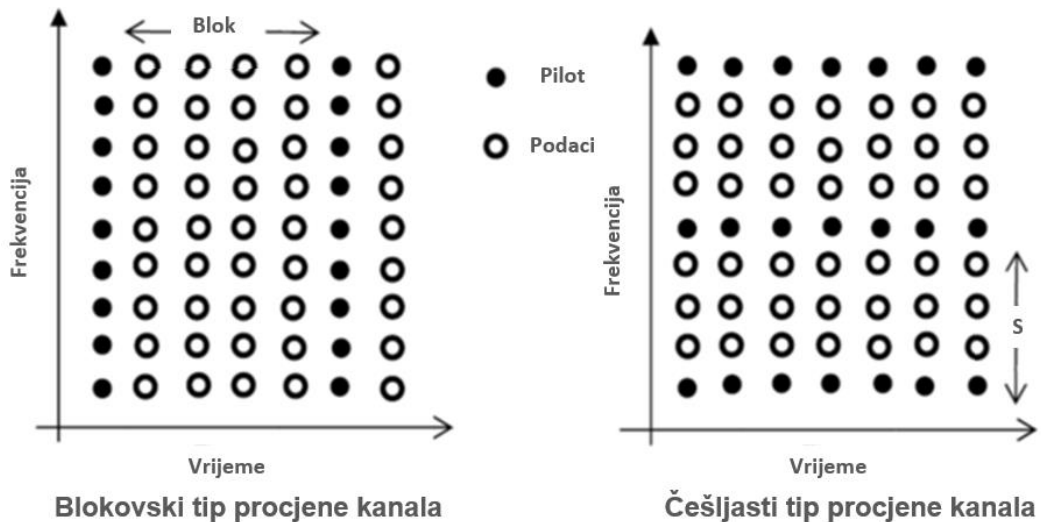
Kao što je već spomenuto u prethodnim poglavljima, OFDM je vrsta modulacijske tehnike niske složenosti koja omogućuje prijenos podataka putem radiovalova i kao takva se naširoko koristi u sustavima bežičnog prijenosa. Općenito, modulacija omogućuje prijenos podataka pomoću velikog broja paralelnih uskopojasnih podtokova. Svaki podtok je moduliran na blisko raspoređenim ortogonalnim frekvencijskim podnosiocima. Uvjet ortogonalnosti podnosilaca ključan je u OFDM-u za istodobni prijenos podataka budući da uklanja interferenciju između susjednih podnosilaca [58]. U sustavima OFDM, pilot simboli (poznati signali za prijammnik i predajnik) obično se umeću u tokove podataka, omogućujući procjenu kanala unutar prijammnika. Pilot simboli mogu biti raspršeni u vremenskim i/ili frekvencijskim smjerovima u OFDM okvirima.

Iako je glavni dio OFDM prijenosa FFT/IFFT transformacija, kapacitet OFDM sustava uvelike ovisi o CSI-u [59]. Naime, u bežičnim komunikacijama procjenom kanala dobivaju se informacije o stanju komunikacijskog kanala koji zapravo opisuje propagaciju signala od predajnika do prijammnika i uključuje kombinaciju više efekata, kao što su feding, refleksija i difrakcija signala, ovisnost snage signala od udaljenosti i druge. Uz pomoć informacije o stanju kanala moguće je prilagoditi način predaje signala trenutnom stanju u kanalu, što je od iznimne važnosti u cilju ostvarivanja pouzdane i brze komunikacije u sustavima OFDMA.

Kao što je već prethodno navedeno, u dostupnoj literaturi predložene su različite metode za procjenu kanala u sustavima OFDMA koji se načelno mogu podijeliti u dvije kategorije: bez pilotskih podnosilaca i pomoću pilotskih podnosilaca (češljasti i blokovski tip). Metode bez pilotskih podnosilaca koriste statistiku ponašanja primljenih signala i zahtijevaju veću količinu informacija, te zbog toga trpe ozbiljno smanjenje performansi u kanalima s brzim fedingom. S druge strane, metode s pilot podnosiocima temelje se na pilot podnosiocima koji se šalju zajedno s informacijskim signalom. Sekvence pilotskih podnosilaca ili simboli umetnuti su na



fiksne položaje odaslanih signala kako bi se pratila promjenjiva statistika bežičnog kanala. Prijamnik ima „savršeno“ znanje o sekvenci pilota i također o fiksnim pozicijama pilota tako da može procijeniti kanal ovisno o primljenoj sekvenci pilota. Pilotske potpomognute tehnike daju bolje rezultate unatoč tome što se „žrtvuje“ dio raspoložive prijenosne brzine sustava radi prijenosa pilotskih podnosilaca [60]. Navedene tehnike mogu se izvesti ili umetanjem pilot simbola s određenim periodom u sve podnosiocce OFDM simbola (blokovski tip) ili umetanjem pilot simbola u svaki OFDM simbol (češljasti tip) [61], kao što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1 Glavne metode razmještanja pilotskih simbola za procjenu OFDM kanala

Kod blokovskog tipa procjene kanala OFDM simboli s pilotima na svim podnosiocima periodički se prenose za procjenu kanala. Dakle, za procjenu kanala cijeli OFDM simbol je namijenjen za prijenos pilot uzoraka na svim podnosiocima, te se periodički šalje u vremenskoj domeni. Budući da blok za trening obuhvaća sve frekvencije podnosilaca, interpolacija kanala nije potrebna.

Neka  $T_p$  označava period pilot simbola u vremenu. Kako bi se pratile vremenski promjenjive karakteristike kanala, pilot simboli se moraju postavljati onoliko često koliko je i vrijeme koherencije (engl. *coherence time*). Budući da je vrijeme koherencije dano u inverznom obliku Dopplerove frekvencije  $f_{Doppler}$  u kanalu, period pilot simbola mora zadovoljiti sljedeću nejednakost:

$$T_p \leq \frac{1}{f_{Doppler}} \quad (3.1)$$

Prijamnik koristi procijenjene uvjete kanala za dekodiranje primljenih podataka unutar bloka dok ne stigne sljedeći pilot simbol. Procjena se može temeljiti na algoritmima LS (engl. *Least Square*), MMSE (engl. *Minimum Mean-Square*) i modificiranom MMSE. Algoritmi LS i MMSE koriste se za dobivanje informacija o kanalu na pilot podnosiocima [62]. Algoritam LS ima nižu složenost, jednostavan je i ne zahtijeva statističke informacije o kanalu i šumu, no njegova točnost je niža u frekvencijski selektivnim kanalima u usporedbi s algoritmom MMSE. Algoritam MMSE otporan je na Dopplerov efekt u višestaznim kanalima, no zahtijeva izračun matrice kovarijance, inverzne matrice i poznavanje statističkih informacija o šumu na strani prijamnika, što rezultira visokom složenošću istog [59]. Oba algoritma zahtijevaju određeni broj jednoliko raspoređenih pilotskih signala.

Metoda blokovskog tipa procjene kanala pomoću pilotskih podnosilaca je relativno neosjetljiva na frekvencijsku selektivnost kanala te je prikladnija za kanale sa sporim fadingom. Naime, za kanale s brzim fadingom, moglo bi doći do prevelikog opterećenja za praćenje varijacija kanala te smanjenja perioda pilot simbola.

Češljasti tip procjene kanala pomoću pilotskih podnosilaca se izvodi umetanjem ravnomjerno raspoređenih pilota u određene podnosiocice svakog OFDM simbola, gdje je određena metoda interpolacije potrebna za procjenu stanja kanala na ne-pilotskim (podatkovnim) podnosiocima [63], [64]. Metode interpolacije stoga imaju veliki utjecaj na točnost procjene kanala u smislu smanjenja količine pogrešno prenesenih podataka te smanjenja ukupne korištene prijenosne snage.

Neka je  $T_F$  period pilot tonova gledajući na frekvenciju. Kako bi se pratile karakteristike frekvencijski selektivnog kanala, pilot simboli moraju biti postavljeni onoliko često koliko iznosi koherentna širina pojasa prijenosa. Budući da je koherentna širina pojasa prijenosa obrnuto proporcionalan u odnosu na faktor maksimalnog širenja kašnjenja  $\sigma_{\tau MAX}$ , period pilot simbola mora zadovoljiti sljedeću nejednakost:

$$T_F \leq \frac{1}{\sigma_{\tau MAX}} \quad (3.2)$$

Za razliku od metode blokovskog tipa, metoda češljastog tipa pokazuje osjetljivost na frekvencijsku selektivnost i bolja je za kanale s bržim fadingom [52].

Visoki prijenosni kapaciteti i nizak BER u sustavima OFDM zahtijevaju upotrebu interpolacijskih metoda koje istovremeno ispunjavaju nisku složenost i visoku točnost, budući da su ti zahtjevi ključni za točnost procjene kanala. Općenito, interpolacija se koristi za procjenu nepoznatih podataka između poznatih točaka podataka. Popularne jednodimenzionalne metode interpolacije poput linearne interpolacije, interpolacije polinomima drugog reda i kubične splajn interpolacije često se koriste u sustavima OFDM kako bi se postigao kompromis između složenosti i točnosti [49], [50], [64], [66], [67].

### 3.2.1 Linearna interpolacija

U linearnoj interpolaciji, frekvencijski odziv podatkovnih podnosilaca smatra se ravnim pravcem između dva susjedna pilot podnosioca. Upotrebom linearne interpolacije, procjena na frekvenciji podatkovnog podnosioca  $k$  koji se nalazi između  $m$ -tog i  $(m+1)$ -tog pilot podnosioca, koji su razmaknuti s  $L$ , prikazana je formulom [68]:

$$\begin{aligned}\hat{H}(k) &= \hat{H}(mL+l) = \left(1 - \frac{l}{L}\right) \hat{H}_p(m) + \frac{l}{L} \hat{H}_p(m+L) \\ &= \hat{H}_p(m) + \frac{l}{L} \left( \hat{H}_p(m+1) - \hat{H}_p(m) \right), 0 \leq l < L.\end{aligned}\tag{3.3}$$

gdje  $\hat{H}_p(m)$  označava vrijednost primljenog pilot podnosioca na frekvenciji  $m$ .

Linearna interpolacija ima nisku računalnu složenost i pruža najbolje performanse u modelima gdje postoji dovoljno pilot podnosioca i gdje su podnosioci blizu jedan drugom [69]. Iako linearna interpolacija značajno pogoršava performanse BER-a ako se kanal brzo mijenja između susjednih pilot podnosioca, i dalje se najčešće koristi u sustavima OFDM zbog svoje jednostavne implementacije i inherentne jednostavnosti [52].

### 3.2.2 Metoda interpolacijskog polinoma drugog stupnja

Budući da linearna interpolacija zahtijeva više pilot podnosioca za bolje performanse u visokofrekventnim selektivnim kanalima, korištenje interpolacijskog polinoma višeg stupnja može rezultirati boljim performansama procjene, ali uz povećanu računalnu složenost [64]. Interpolacijski polinom višeg stupnja pogodniji su za kanale s visokom vremenskom i frekvencijskom selektivnošću. Inače, njihova upotreba može narušiti performanse sustava

prijenosa, budući da modeliranje koristi šum kao sredstvo za prikazivanje kanala [70]. Procjena kanala pomoću metode interpolacijskog polinoma drugog stupnja prikazana je formulom [68]:

$$\begin{aligned}\hat{H}(k) &= \hat{H}(ml + l) \\ &= c_1 \hat{H}_p(m - 1) + c_0 \hat{H}_p(m) + c_{-1} \hat{H}_p(m + 1),\end{aligned}$$

gdje je  $c_1 = \alpha(\alpha - 1)/2$ , (3.4)  
 $c_0 = -(\alpha - 1)(\alpha + 1)$ ,  $\alpha = 1/N$   
 $c_{-1} = \alpha(\alpha + 1)/2$ .

### 3.2.3 Metoda kubičnog interpolacijskog splajna

Kubična interpolacijska splajn krivulja, može preciznije odražavati trend promjene stvarnih krivulja pomoću prilagodbe niza jedinstvenih kubičnih polinoma između svakog od podnosilaca [70]. Metoda kubičnog interpolacijskog splajna „proizvodi“ glatki i kontinuirani polinom prilagođen zadanim točkama podataka pri čemu se koristi interpolacija višeg reda radi bolje točnosti. Aproximacija svakog podnosilaca izvodi se pomoću polinoma trećeg reda na četiri susjedna referentna signala i njihovih derivacija. Kako bi se provela procjena podnosilaca, vrijednosti se dobivaju pomoću sljedeće jednadžbe [61]:

$$\begin{aligned}\hat{H}(k) &= \hat{H}(mL + l) \\ &= \alpha_1 \hat{H}_p(m + 1) + \alpha_0 \hat{H}_p(m) + L\alpha_1 \hat{H}'_p(m + 1) - L\alpha_0 \hat{H}'_p(m),\end{aligned}$$

$m = 0, 1, \dots, \dots, \dots, N_p - 1$ , (3.5)

gdje je  $\hat{H}'_p(m)$  derivacija prvog reda od  $\hat{H}_p(m)$ , a  $N_p$  je broj pilot simbola i

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 3(L - l)^2/L^2 - 2(L - l)^3/L^3 \\ \alpha_0 &= 3l^2/L^2 - 2l^3/L^3.\end{aligned}$$

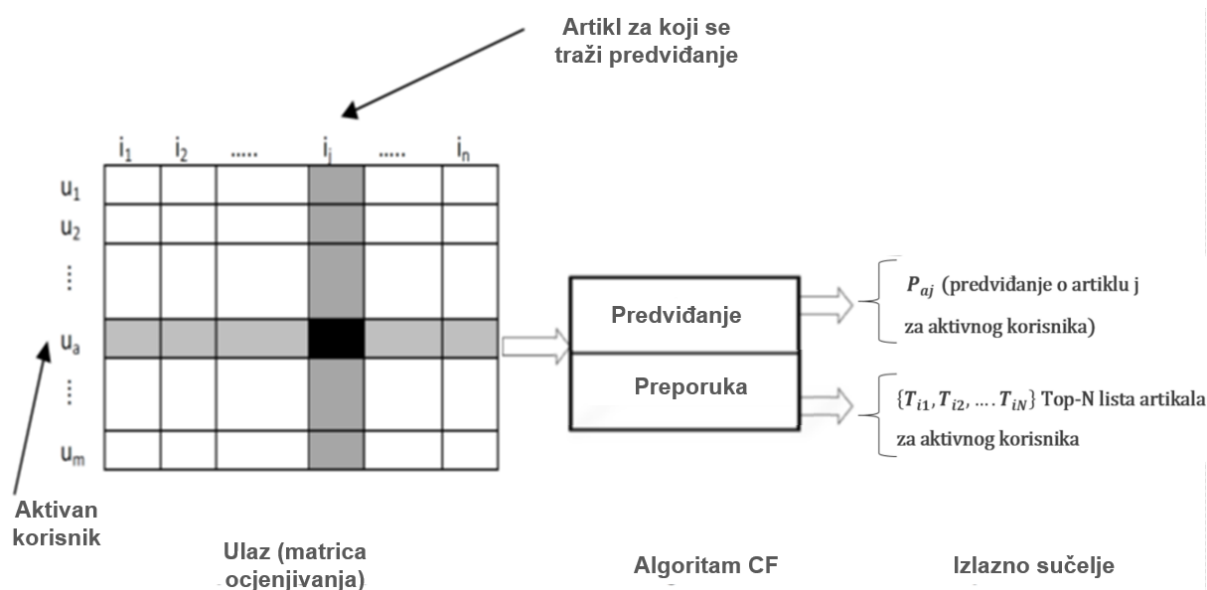
### 3.3 Tehnike suradničkog filtriranja

U preporučiteljskim sustavima postoje tri osnovna pristupa stvaranju preporuka [72]:

- preporučiteljski sustavi temeljeni na sadržaju (engl. *content-based recommendation*),
- preporučiteljski sustavi temeljeni na suradnji korisnika (engl. *collaborative filtering recommendation*) i
- hibridni preporučiteljski sustavi.

Kod preporuka prema sličnosti sadržaja korisniku se preporučuju artikli koji su slični artiklima za koje je korisnik prethodno iskazao interes, jer se za kreiranje preporuka isključivo koristi sličnost sadržaja. Kod preporuka prema suradnji, korisničke preporuke se kreiraju tako da se pronalaze slični korisnici te se trenutnom korisniku nude oni artikli koje su ranije koristili njemu slični korisnici. Pojam suradnje podrazumijeva zajedničko djelovanje više uključenih strana, kako bi se izvršio određeni posao. U ovoj širokoj skupini preporučitelja, postoji vrsta preporučitelja u kojoj je potrebno utvrditi sličnost i susjedstvo korisnika (engl. *neighborhood-based model*) ili se sličnost određuje između objekata (engl. *item-based model*). U preporučiteljskom sustavu vrlo je često slučaj da se kombiniraju dvije navedene vrste kreiranja preporuka po sadržaju i suradnji korisnika, te takvi sustavi nose naziv hibridni preporučiteljski sustavi.

Tehnike suradničkog filtriranja (CF) su među najuspješnijim tehnikama za izgradnju sustava preporuka [56]. Sustavi preporuka temelje se na sustavima učenja i koriste se u e-trgovini za preporuku/predviđanje korisnih artikala novim korisnicima iz svojih baza podataka o korisničkim preferencijama za artikle. CF tehnike koriste poznate preferencije grupe korisnika kako bi se napravile procjene nepoznatih preferencija za druge korisnike, uz opću pretpostavku da ako korisnici  $X$  i  $Y$  na sličan način ocjene neki artikl, onda će vjerojatno na sličan način ocjenjivati i druge artikle [54]. Kako bi pružile zadovoljavajuće preporuke u kratkom vremenskom razdoblju, CF tehnike moraju upravljati vrlo rijetkim podacima i skalirati se s rastućim brojem korisnika i artikala. Obično u svakom CF scenariju [73] postoji popis od  $m$  korisnika  $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  i popis od  $n$  artikala  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ . Svaki korisnik  $u_i$  ima pridružen popis artikala  $I_{u_i}$  koje je korisnik ocijenio. Ocjene korisnika pohranjuju se u matricu ocjena  $\mathbf{V}$  koja se koristi za generiranje preporuka. Element  $r_{u,i}$  u matrici  $\mathbf{V}$  označava ocjenu koju je korisnik  $u$  dao artiklu  $i$ , dok vrijednost 0 označava da artikl još nije ocijenjen. Cilj CF tehnike je precizno predvidjeti vrijednosti  $\mathbf{V}$  u ovim slučajevima kako je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2 Shema CF procesa [74]

Ovisno o tome kako se obrađuju podaci matrice ocjenjivanja, CF tehnike mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije [75]:

- temeljene na modelu i
- memorijski utemeljene.

Memorijski temeljene CF tehnike široko se koriste u komercijalnim sustavima jer su jednostavni za implementaciju i vrlo učinkoviti [56]. Oni koriste cijelu bazu podataka korisničkih artikala ili uzorak baze podataka za generiranje predviđanja. Uz pretpostavku da je svaki korisnik dio neke grupe korisnika sa sličnim interesima, identificiranjem "susjeda" novog korisnika može se proizvesti predviđanje njezinih/njegovih ocjena za nove artikle. Pojam susjedstva definira bliskost ili sličnost entiteta po određenom kriteriju ili preferencijama. U memorijski temeljenim CF tehnikama podaci o korisnicima i artiklima drže se u memoriji iz kojih se direktno računaju preporuke. Sličnost među susjedstvom računa se svaki put kada se korisniku želi dati preporuka.

CF sustavi bazirani na modelu generiraju model sustava na temelju kojega generiraju preporuku. Kod takvog pristupa model se kreira unaprijed, a preporuka se generira on-line na temelju modela. Pri generiranju modela koristi se faktorizacija matrice korisnosti korisnika i artikala na dvije matrice u kojima je moguće zaključiti o nekim skrivenim faktorima u sustavu, ali ti faktori često nisu izravno povezani sa stvarnim svojstvima artikla ili korisnika. Najveći

nedostatak ove tehnike je potreba računanja modela svaki puta kada dođe do veće promjene u početnoj matrici, odnosno svaki puta kada se doda novi korisnik u sustav. Pregled tehnika suradničkog filtriranja sažeto je prikazano u Tablici I.

Tablica I Pregled tehnika suradničkog filtriranja

Kategorije CF-a	Reprezentativne tehnike	Glavne prednosti	Glavni nedostaci
Memorijski utemeljene	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Neighborhood-based</i> model</li> <li>• <i>Item-based</i> model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednostavna implementacija</li> <li>• novi podaci se mogu lako dodati</li> <li>• nije potrebno razmatrati sadržaj artikla koji se preporučuje</li> <li>• skalira se dobro s povezanim predmetima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ovisan o ljudskim ocjenama</li> <li>• performanse opadaju kada su dostupni podaci rijetki</li> <li>• nemogućnost preporuke za novog korisnika ili artikla</li> <li>• ograničena skalabilnost za velike setove podataka</li> </ul>
Temeljene na modelu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Bayesian belief nets</i> model</li> <li>• Grupirajući model</li> <li>• <i>MDP-based</i> model</li> <li>• Latentni semantički model</li> <li>• Model analize rijetkih faktora</li> <li>• Modeli s tehnikama smanjenja dimenzionalnosti (SVD, PCA)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bolje rješava probleme skalabilnosti i rijetkosti podataka</li> <li>• poboljšava performanse predviđanja</li> <li>• pruža intuitivno obrazloženje preporuke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• skupocjena izgradnja modela</li> <li>• kompromis između performansi preporuke i skalabilnosti</li> <li>• gubitak korisnih informacija kod korištenja tehnika smanjenja dimenzionalnosti</li> </ul>

U ovom radu predlažemo upotrebu memorijski utemeljene CF tehnike, kako bismo odgovorili na izazove procjene bežičnog kanala u OFDM sustavima, uzimajući posebno u obzir osjetljivost na broj i lokaciju pilot podnosilaca.

### 3.3.1 Metoda procjene kanala temeljena na tehnikama suradničkog filtriranja

Memorijski utemeljene tehnike CF koriste cijelu matricu ocjenjivanja kako bi generirali predviđanja. Obično koriste statističke tehnike temeljene na susjedstvu kako bi odabrali korisnike slične ciljnom korisniku. Predviđanje za korisnika tada se izračunava na temelju ocjena tih susjeda, uzimajući u obzir sličnost ili težinu  $w_{u,v}$  koja odražava korelaciju ocjena između korisnika  $u$  i  $v$ , te uzimanjem ponderiranog zbroja (jednostavna ponderirana sredina) svih razmatranih ocjena za taj artikl [76].

#### Računanje sličnosti

Kako bismo točno izračunali korelacijsku sličnost  $w_{u,v}$  između dva korisnika  $u$  i  $v$  koji su ocijenili neke zajedničke artikle, prvo moramo izolirati slučajeve koji su ocijenjeni zajedno

(stavke ocijenjene i  $u$  i  $v$ ). Zatim se korelacijska sličnost može mjeriti računanjem Pearsonove korelacije, koja se široko koristi u istraživačkoj zajednici za suradničko filtriranje [56]:

$$w_{u,v} = \frac{\sum_{i \in I} (r_{u,i} - \bar{r}_u)(r_{v,i} - \bar{r}_v)}{\sqrt{\sum_{i \in I} (r_{u,i} - \bar{r}_u)^2} \sqrt{\sum_{i \in I} (r_{v,i} - \bar{r}_v)^2}}, \quad (3.6)$$

gdje je  $I$  skup zajednički ocijenjenih artikala, a  $\bar{r}_u$  i  $\bar{r}_v$  označavaju prosječnu ocjenu zajednički ocijenjenih artikala od strane  $u$ -tog i  $v$ -tog korisnika.

### Računanje predviđanja

Cilj tehnika CF jest generirati predviđanje. Nakon što izdvojimo podskup najbližih susjeda ciljanog korisnika, sljedeći korak je pregledati ocjene ciljnih korisnika i napraviti ponderirani zbroj njihovih ocjena kako bismo napravili predviđanje [56]. Predviđanje ocjene korisnika  $a$  na artiklu  $i$  izračunava se prema sljedećoj formuli [77]:

$$P_{a,i} = \bar{r}_a + \frac{\sum_{u \in U} (r_{u,i} - \bar{r}_u) w_{a,u}}{\sum_{u \in U} |w_{a,u}|}, \quad (3.7)$$

gdje je  $U$  skup najbližih susjeda korisnika  $a$ ,  $\bar{r}_a$  i  $\bar{r}_u$  su prosječne ocjene korisnika  $a$  i korisnika  $u$  za sve ostale ocijenjene artikle, a  $w_{a,u}$  je težina (sličnost) između korisnika  $a$  i korisnika  $u$ . Ako je korisnik sličniji ciljnom korisniku, procjena će biti preciznija.

### 3.3.2 Evaluacijske metrike

Jedna od najbitnijih svojstava sustava za preporuke je kvaliteta preporuke. Kvaliteta preporuke može se mjeriti na više različitih načina, a prema [56] osnovni tipovi su:

- metrike obzirom na predikciju (engl. *predictive accuracy metrics*),
- metrike obzirom na rang (engl. *rank accuracy metrics*) i
- normalizirana metrika obzirom na udaljenost (engl. *normalized distance-based performance metrics*).

Iz skupa metrika obzirom na predikciju najčešće korištene metrike su:

- srednja apsolutna pogreška predikcije (engl. *Mean Absolute Error - MAE*) i
- korijen srednje kvadratne pogreške predikcije (engl. *Root Mean Squared Error - RMSE*).



Metrika MAE predstavlja srednju vrijednost odstupanja svih predviđenih vrijednosti. MAE pokazuje koliko su predviđene vrijednosti blizu ciljanih vrijednosti, odnosno računa prosječnu apsolutnu razliku između procijenjene vrijednosti i prave vrijednosti. Općenito, MAE može biti u rasponu od 0 do beskonačnosti, ali što je niži MAE to je bolja točnost, odnosno kvaliteta predviđanja. MAE se računa prema formuli [56]:

$$MAE = \frac{\sum_{\{i,j\}} |p_{i,j} - r_{i,j}|}{n}, \quad (3.8)$$

gdje je  $r_{i,j}$  stvarna vrijednost podatka,  $p_{i,j}$  predviđenu vrijednost podatka za korisnika  $i$  na artiklu  $j$ , dok je  $n$  broj predviđenih vrijednosti svih korisnika.

Metrika RMSE temelji se na apsolutnim pogreškama između predviđanja i stvarnih vrijednosti. Za razliku od metrike MAE, metrika RMSE stavlja težinu na većim pogreškama koje mogu imati najveći utjecaj na odluku korisnika. Iz tog razloga, RMSE bi trebao bolje otkriti razlike u izvedbi modela nego MAE [78]. U kontekstu suradničkog filtriranja i sustava preporuka, RMSE se često koristi za procjenu koliko dobro predviđanja sustava odgovaraju stvarnim preferencijama korisnika. Niže vrijednosti RMSE-a ukazuju na bolje podudaranje između predviđenih i stvarnih ocjena, što odražava točniji sustav preporuka. Izračunava se pomoću sljedeće formule [56]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\{i,j\}} (p_{i,j} - r_{i,j})^2} \quad (3.9)$$

U ovom radu usredotočit ćemo se na metriku RMSE uz standardnu pretpostavku da su pogreške nepristrane i da slijede normalnu distribuciju.

### 3.4 Predloženi algoritam za procjenu kanala

Kako bi se riješili izazovi procjene bežičnog kanala na ne-pilotskim podnosiocima u sustavima OFDM, posebno osjetljivih na broj i lokaciju pilot podnosilaca, predložena je nova interpolacijska metoda (algoritam) kao što je prikazano na slici 3.4. Osnovna ideja je kombinirati često korištene metode interpolacije s memorijski utemeljenom tehnikom suradničkog filtriranja (CF).

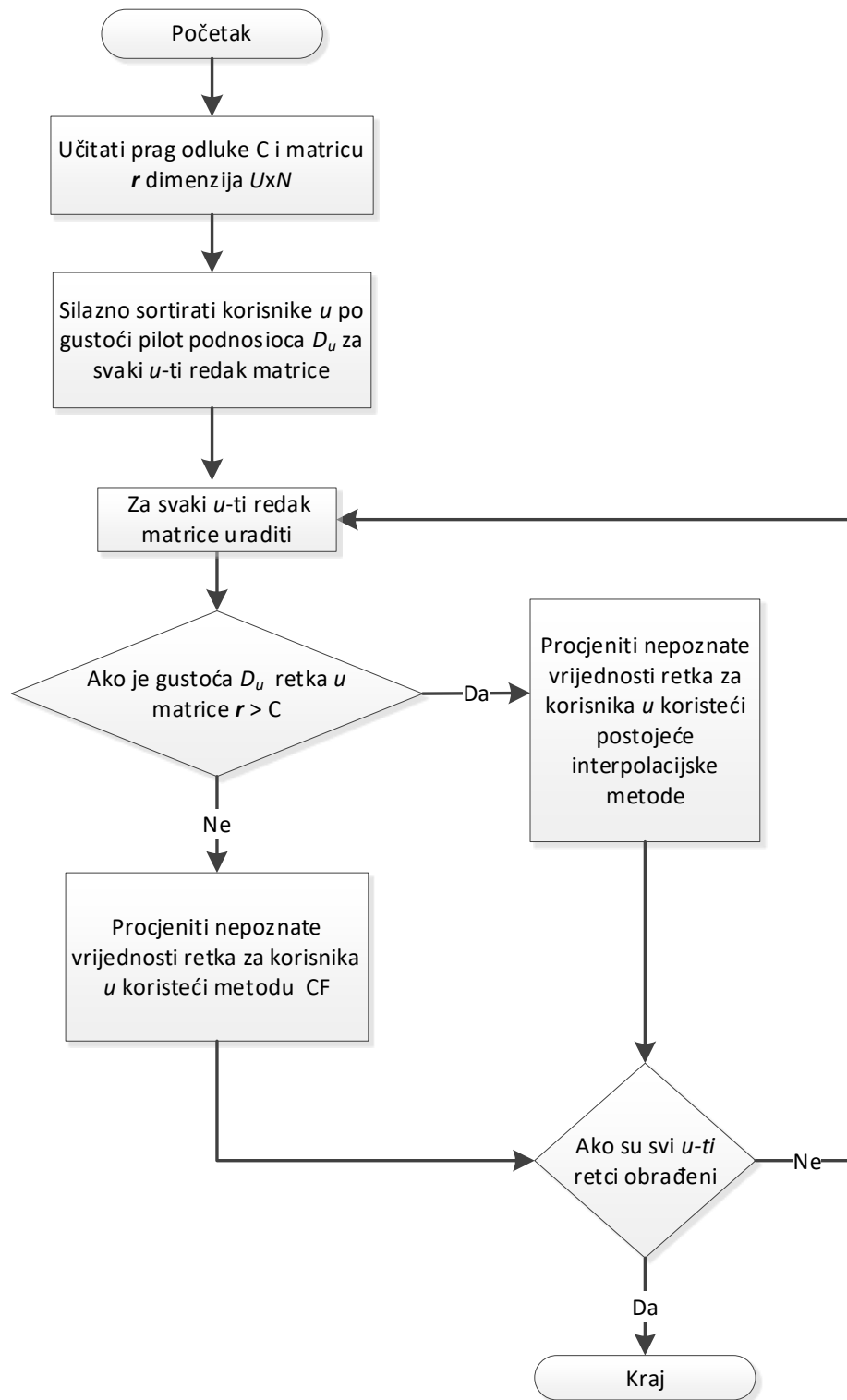
Ulazni podatak je matrica  $\mathbf{r}$  dimenzija  $U \times N$ , gdje je  $U$  broj korisnika, a  $N$  broj podnosilaca. Neka  $r_{u,i}$  označava vrijednost frekvencijskog odziva korisnika  $u$  na podnosiocu  $i$ . Za svakog korisnika u  $u$ -tom retku imamo vrijednosti frekvencijskog odziva kanala na pilot podnosiocima, dok su vrijednosti na ne-pilot podnosiocima nepoznate. Neka  $D_u$  označava gustoću poznatih vrijednosti  $u$ -tog retka matrice. Izlazni podaci bit će matrica popunjena procijenjenim vrijednostima kanala na podnosiocima koji nisu pilot podnosioci. Pretpostavljamo da postoje skupine korisnika s vrlo sličnim uvjetima kanala i, posljedično, sličnim vrijednostima frekvencijskog odziva kanala. To je motivacija za korištenje tehnika CF.

Predloženi algoritam se realizira na sljedeći način [57]. Prvo se korisnici sortiraju silaznim redosljedom na temelju gustoće pilot podnosilaca  $D_u$  (poznate vrijednosti). Ovisno o konstanti  $C$ , koja je unaprijed definirana vrijednost praga odluke (npr. 5%), algoritam će izvesti ili metodu interpolacije ili metodu CF za određenog korisnika. Razlog za takvu metodologiju je taj što metode interpolacije rade bolje kada postoji veća gustoća pilot podnosilaca, inače nisu toliko precizne. Predefinirana vrijednost  $C$  u algoritmu može se mijenjati kako bi se pronašla najbolja vrijednost praga odluke za koju će točnost predviđanja biti najveća. Dijagram toka procesa procjene kanala prikazan je na slici 3.3.

U prvoj fazi algoritma, za svakog korisnika koji zadovoljava  $D_u > C$ , koristila se metoda interpolacije za procjenu vrijednosti kanala na ne-pilot podnosiocima. U simulacijama su se razmatrale tri postojeće metode interpolacije. U drugoj fazi, za preostale korisnike koji ispunjavaju kriterij  $D_u < C$ , algoritam započinje izvođenje metode CF temeljene na susjedstvu, prvo računanjem korelacijskih sličnosti s ciljanim korisnikom, računanjem Pearsonovih korelacija koristeći (3.6). Nakon što se izdvoji podskup najbližih susjeda ciljnog korisnika, sljedeći korak je napraviti predviđanja za ciljnog korisnika na ne-pilot podnosiocima uzimajući ponderiranu srednju vrijednost frekvencijskog odziva susjeda na određenom podnosiocu pomoću (3.7). CF metoda u svakom koraku uzima u obzir sve vrijednosti izračunate u prethodnim koracima metodom interpolacije. Konkretnije, u CF metodi se za trenutnog korisnika u koji zadovoljava kriterij  $D_u < C$  izvode sljedeći koraci:

- 1) izračunati sve korelacijske sličnosti  $w_{x,u}$  za ostale korisnike  $x$  prema ciljnom korisniku koristeći izraz (3.6),

- 2) za svaku nepoznatu vrijednost na podnosiocu  $i$  izračunati procjenu  $r_{u,i}$  uzimajući ponderirani srednju vrijednost  $r_{x,i}$  svih sličnih korisnika  $x$  koristeći formulu (3.7).



Slika 3.3 Dijagram toka predložene metode procjene kanala

Vremenskom složenosti algoritma dominiraju izračuni sličnosti, koji se izvode u ukupnom vremenu  $O(U'UN)$ , gdje je  $U'$  broj "rijetkih" korisnika za koje vrijedi  $D_u < C$ . To je zato što algoritam izračunava sličnost svakog takvog korisnika ( $U'$ ) i svakog drugog korisnika ( $U$ ), a složenost izračuna Pearsonove korelacije proporcionalna je broju podnosilaca:  $O(N)$ . U najboljem slučaju, broj korisnika s gustoćom podnosilaca ispod praga odluke ( $D_u < C$ ) puno je manji od  $U$ , pa je  $U' \approx O(1)$ , a složenost postaje  $O(UN)$ . U najgorem slučaju,  $U' \approx U$  sa složenosti  $O(U^2N)$ .

### 3.5 Postavke i rezultati simulacije

U simulacijama je pretpostavljen češljasti tip procjene kanala pomoću pilotskih podnosilaca na temelju nepravilnog i rijetkog rasporeda pilota. Glavni ciljevi simulacija bili su:

- usporediti metriku RMSE za različite odabire praga odluke  $C$ ,
- usporediti uobičajeno korištene metode interpolacije i novo predloženu metodu interpolacije te
- istražiti utjecaj gustoće matrice  $\mathbf{r}$  s različitim unaprijed definiranim pragovima odluke  $C$  na izvedbu predložene metode interpolacije.

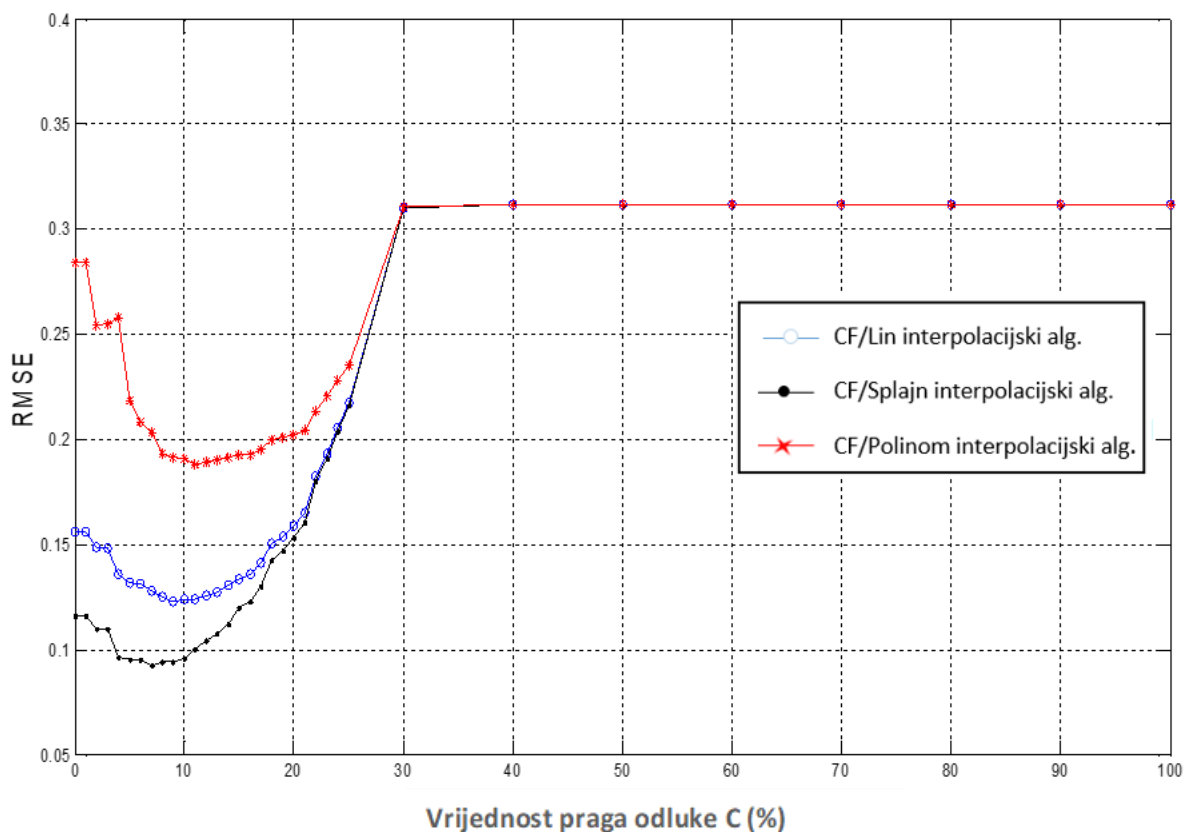
U simulaciji je korišten Rayleighov kanal s frekvencijskim selektivnim fadingom, koji pretpostavlja kompleksne elemente Gaussove matrice s neovisnim faznim i kvadraturnim komponentama, modeliranim kao zbroj  $N$  Rayleighovih potkanala s ravnim fadingom. Korišten je Rayleighov fading model s profilom kašnjenja snage  $P(\tau) = [1, e^{-1}, e^{-2}, e^{-3}, e^{-4}]$ . Broj podnosilaca po OFDM simbolu bio je 128, dok su uzorci pilota nejednako udaljeni s nepravilnom distribucijom položaja pilota. Nepravilan raspored pilot podnosilaca za svakog korisnika odabran je nasumično u rasponu od 5% do 30% (gustoća matrice  $\mathbf{r}$ ) bez ikakva obrasca rasporeda pilota kako bi se simulirao najgori mogući scenarij u pogledu performansi i složenosti sustava. U svakoj simulaciji algoritam je testiran na 100 različitih matrica kanala, a rezultati su zatim uprosječeni. Linearna, polinomska interpolacija drugog reda i kubična splajn interpolacija simulirane su i uspoređene s predloženom interpolacijskom metodom pomoću funkcija ugrađenih u programski alat MATLAB (široko korišten programski jezik i razvojno okruženje za matematičko modeliranje i numeričko izračunavanje) [57].

Prvi korak u analizi predloženog algoritma je generiranje cijele matrice  $\mathbf{r}$  s vrijednostima frekvencijskog odziva kanala na svim podnosiocima. Zatim se u izvornu matricu unose vrijednosti nule, formirajući novu matricu s nekim nepoznatim vrijednostima. Nepoznate vrijednosti predstavljaju ne-pilot podnosiocce, dok poznate vrijednosti predstavljaju vrijednosti kanala na pilot podnosiocima. Gustoća matrice može se proizvoljno odabrati kako bi se simulirali različiti scenariji implementacije. Ako nije drugačije navedeno, u simulacijama je generirano 5 grupa, svaka s 20 korisnika koji imaju slične uvjete kanala i vrijednosti frekvencijskog odziva kanala unutar odgovarajuće grupe.

Na kraju, nakon završetka predložene metode interpolacije metrika RMSE se koristi za procjenu točnosti rezultata dobivenih predloženom metodom interpolacije te konačno za usporedbu s postojećim metodama interpolacije.

### 3.5.1 Utjecaj praga odluke $C$ na predloženu metodu interpolacije

U prvom scenariju simulacije, na generiranoj matrici  $\mathbf{r}$  s ukupnom prosječnom gustoćom  $D=15\%$  (Napomena: gustoće korisnika  $D_u$  odabirane su nasumično u rasponu od 5% do 30%.) simuliran je predloženi algoritam u kombinaciji s tri različite metode interpolacije za različite vrijednosti praga odluke  $C=[0\% 1\% 2\% 3\% 4\% 5\% 6\% 7\% 8\% 9\% 10\% 11\% 12\% 13\% 14\% 15\% 16\% 17\% 18\% 19\% 20\% 21\% 22\% 23\% 24\% 25\% 26\% 27\% 28\% 29\% 30\% 40\% 50\% 60\% 70\% 80\% 90\% 100\%]$  kako je prikazano na slici 3.4. Legende "CF/Lin", "CF/Splajn" i "CF/Polinom" označavaju novu interpolacijsku metodu (algoritam) koja kombinira uobičajeno korištene interpolacijske metode s metodom CF.

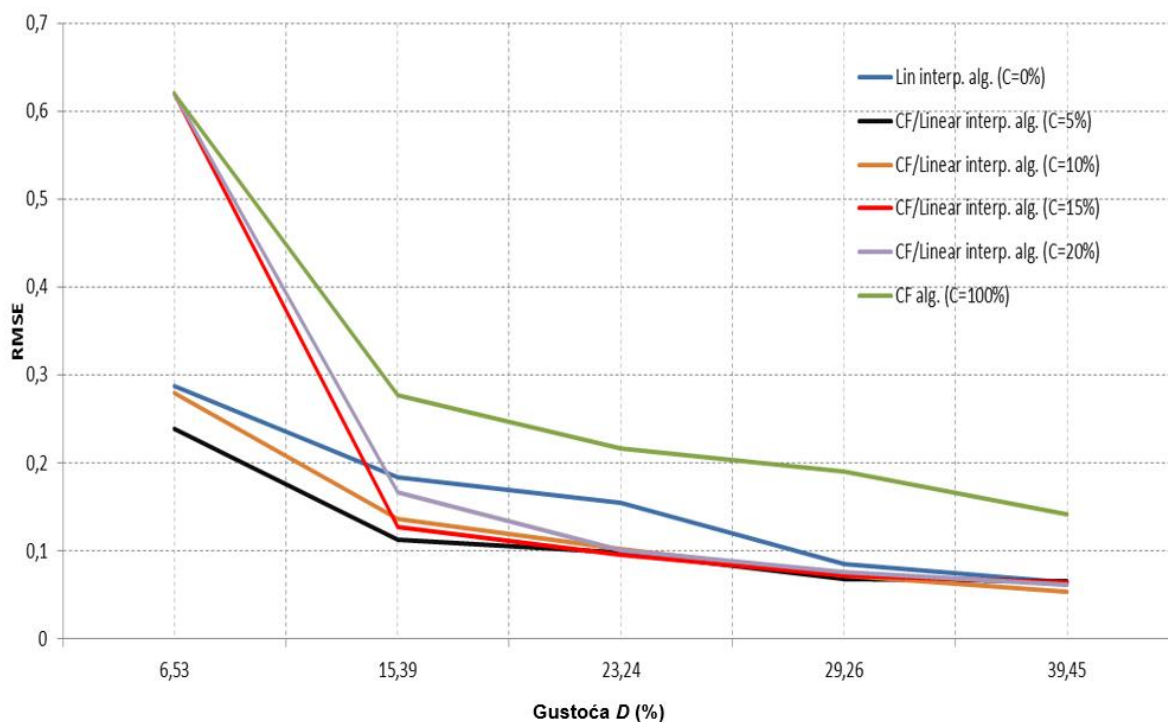


Slika 3.4 RMSE za predložene metode interpolacije

Vrijednost RMSE za vrijednost praga odluke  $C=0\%$  predstavlja čistu metodu linearne/splajn/polinomske interpolacije, dok vrijednost RMSE za vrijednosti praga odluke  $C=100\%$  predstavlja čistu metodu CF. Rezultati su pokazali da se među “čistim” interpolacijskim metodama najbolji rezultati postižu kubična splajn interpolacijskom metodom. Također se može primijetiti da su u svakoj *predloženoj metodi* interpolacije, postignuti bolji rezultati izvedbe (za vrijednosti praga odluke  $C$  od  $2\%$  do  $25\%$ , ovisno o predloženoj metodi) u usporedbi s uobičajeno korištenim metodama interpolacije. Za *CF/Lin* metodu interpolacije, najbolji RMSE se postiže za prag odluke  $C=9\%$ , a u usporedbi s RMSE-om za čistu linearnu interpolacijsku metodu dobitak je  $21,3\%$ . Za *CF/Splajn* i *CF/Polinom* interpolaciju, najbolji RMSE se postiže na pragovima odluke  $C=7\%$  (dobitak od  $20,32\%$ ) odnosno  $C=11\%$  (dobitak od  $33,7\%$ ).

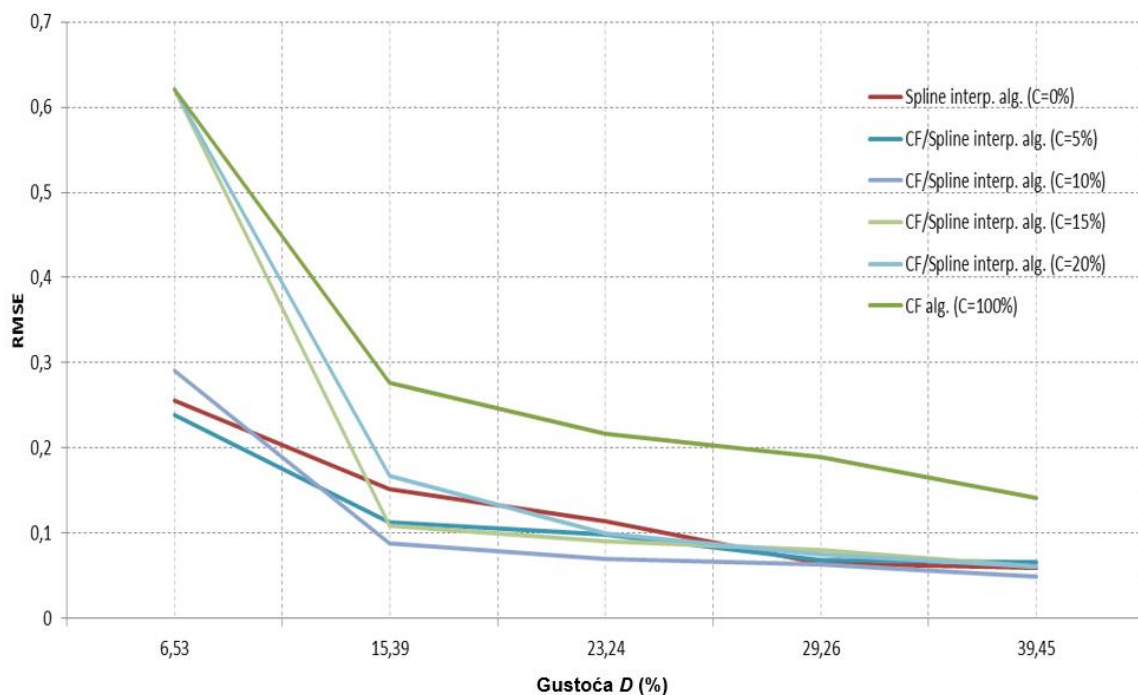
### 3.5.2 Utjecaj gustoće pilot podnosilaca

U sljedećem simulacijskom scenariju kreirano je pet matrica  $\mathbf{r}$  s različitim ukupnim prosječnim gustoćama matrica u rasponu od 6% do 40% kako bi se istražilo ponašanje RMSE vrijednosti ako se gustoća pilot podnosilaca povećava. Slike 3.5, 3.6 i 3.7 prikazuju RMSE vrijednosti u odnosu na gustoću matrice za svaku predloženu interpolacijsku metodu uz različite vrijednosti praga odluke  $C = [0\% \ 5\% \ 10\% \ 15\% \ 20\% \ 100\%]$ .



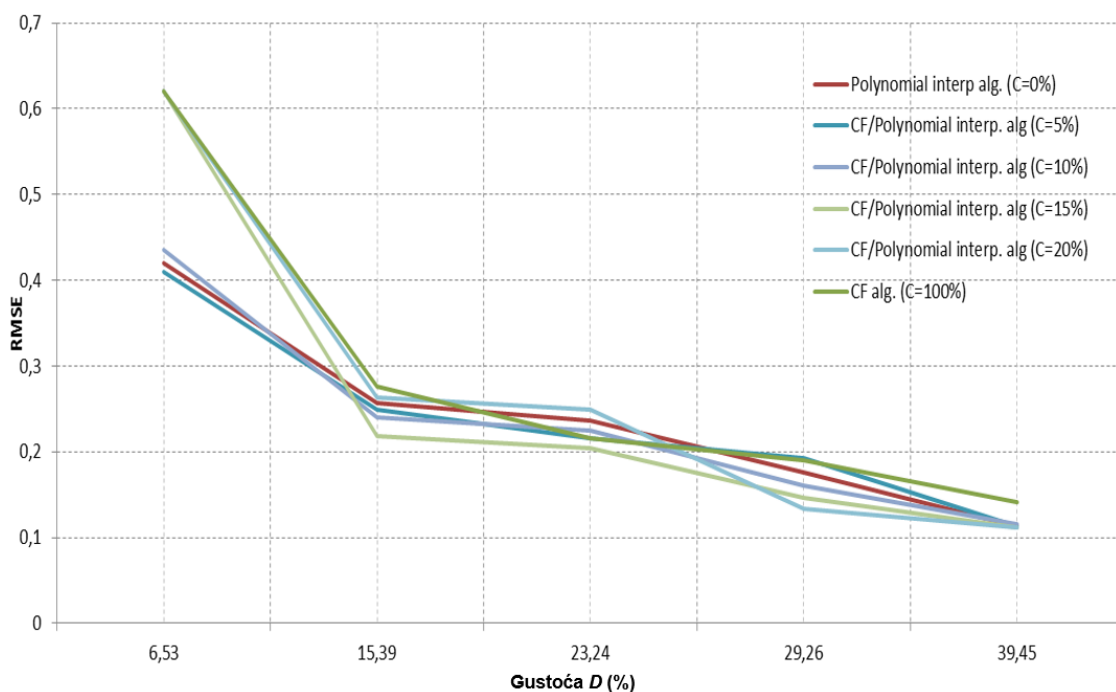
Slika 3.5 RMSE s obzirom na ukupnu prosječnu gustoću matrice za predloženu CF/Lin metodu interpolacije (za različite vrijednosti praga odluke  $C$ )

Rezultati su pokazali da učinkovitost predloženih metoda interpolacije korelira s gustoćom promatrane matrice. Rezultat je očekivan jer veći broj pilot podnosilaca (veća prosječna gustoća matrice) u metodama interpolacije u konačnici daje bolje rezultate performansi sustava.



Slika 3.6 RMSE s obzirom na ukupnu prosječnu gustoću matrice za predloženu CF/Splajn metodu interpolacije (za različite vrijednosti praga odluke C)

Također se može uočiti da predložene metode interpolacije uglavnom daju bolje rezultate na nižim gustoćama matrice, dok na višim gustoćama njihov učinak nestaje. Navedeno je u skladu s činjenicom da su tehnike CF manje osjetljive na broj pilot podnosilaca.



Slika 3.7 RMSE s obzirom na ukupnu prosječnu gustoću matrice za predloženu CF/Polinom metodu interpolacije (za različite vrijednosti praga odluke C)

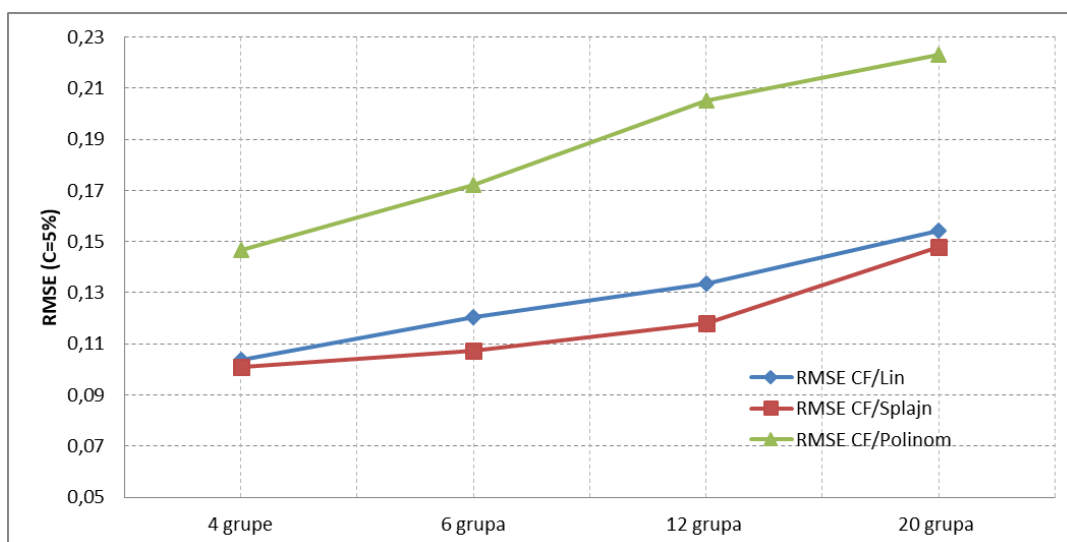


### 3.5.3 Utjecaj razine sličnosti među korisnicima

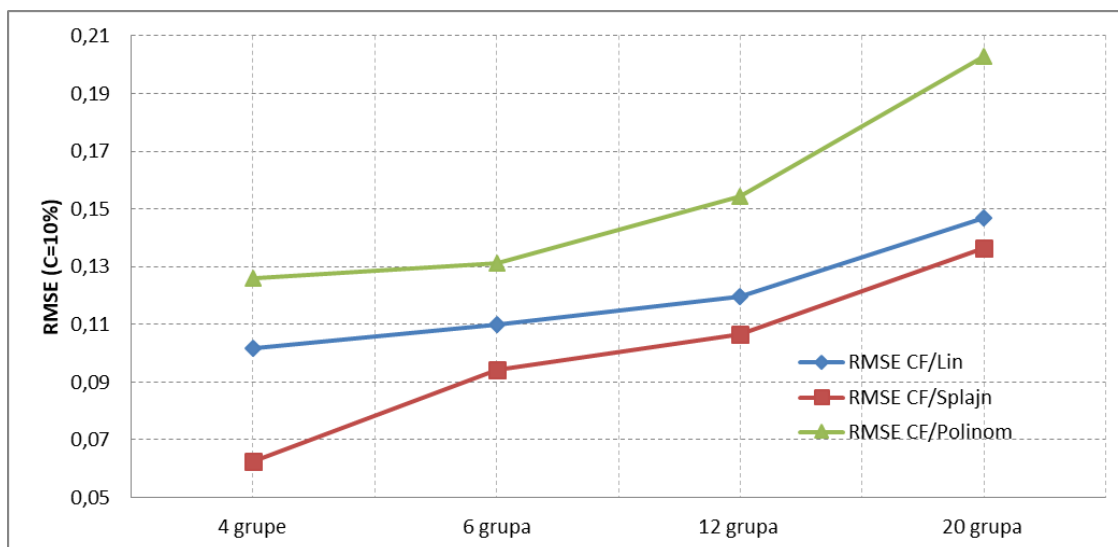
Utjecaj razine sličnosti među korisnicima može biti ključan u scenarijima u kojima se primjenjuju predložene metode interpolacije. U kontekstu procjene bežičnog kanala u sustavima OFDM, sličnost korisnika odnosi se na sličnost vrijednosti frekvencijskog odziva kanala među različitim korisnicima, posebice na referentnim podnosiocima. Pretpostavka je da će se u slučaju visoke razine sličnosti među korisnicima, što znači da su njihovi uvjeti kanala korelirani, predložene interpolacijske metode obično bolje ponašati. Također, kako broj skupina korisnika raste, što ukazuje na manju sličnost među korisnicima, točnost predloženih metoda interpolacije trebala bi opadati [57]. Navedeno je u skladu s prirodom metode CF, koja se bolje ponaša kada korisnici imaju više sličnosti.

U posljednjem simulacijskom scenariju generirane su matrice  $\mathbf{r}$  s različitim ukupnim prosječnim gustoćama matrica u rasponu od 5% do 30% te grupirali korisnike (4 grupe s 30 korisnika; 6 grupa s 20 korisnika; 12 grupa s 10 korisnika; 20 grupa s 6 korisnika) sa sličnim vrijednostima frekvencijskog odziva kanala na pilot podnosiocima. Slike 3.8, 3.9 i 3.10 pokazuju da RMSE ovisi o broju sličnih korisničkih grupa u generiranoj matrici.

Može se uočiti kako je predložena metoda interpolacije manje točna, kada je broj grupa relativno „velik“, a time i sličnost među korisnicima niska. S druge strane, kada postoji veća sličnost među korisnicima (manje grupa), učinak tehnika CF u predloženim metodama interpolacije (algoritmima) je vidljiviji jer predviđanja postaju točnija.

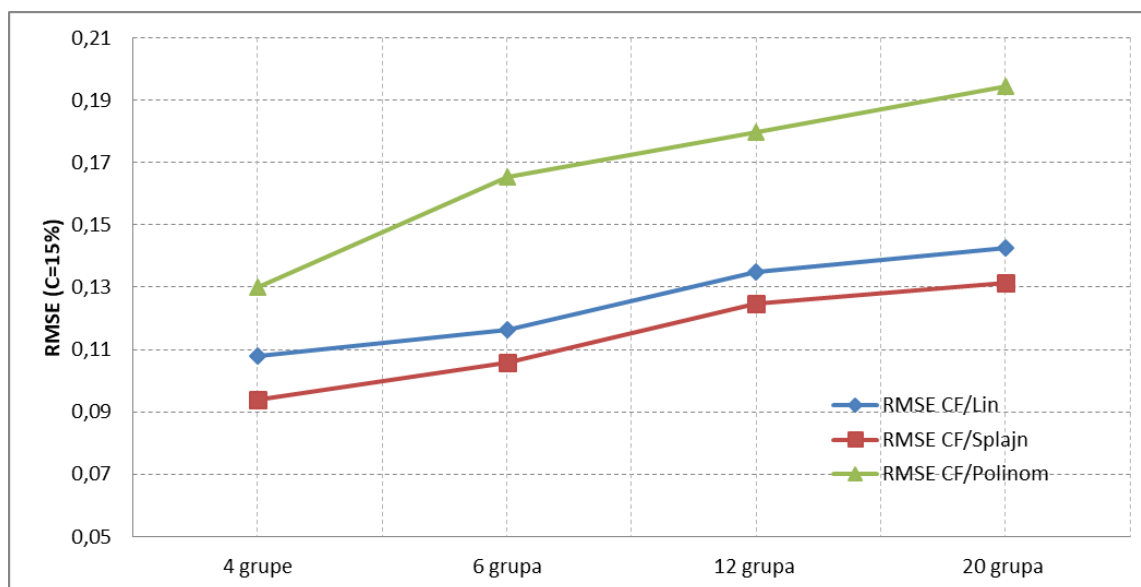


Slika 3.8 RMSE u ovisnosti o broju grupa sličnih korisnika u generiranoj matrici za vrijednost praga odluke  $C=5\%$



Slika 3.9 RMSE u ovisnosti o broju grupa sličnih korisnika u generiranoj matrici za vrijednost praga odluke  $C=10\%$

Simulacije su pokazale da predložene metode interpolacije (algoritmi) poboljšavaju metriku točnosti predviđanja u usporedbi s uobičajenim metodama procjene. Stoga su učinkovitije u situacijama kada ima manje pilot podnosilaca. Također, budući da nije pretpostavljen pravilni raspored pilot podnosilaca, predložene metode interpolacije mogu se koristiti i u sustavima OFDMA s nepravilnom rasporedom pilot podnosilaca.



Slika 3.10 RMSE u ovisnosti o broju grupa sličnih korisnika u generiranoj matrici za vrijednost praga odluke  $C=15\%$

Iz navedenih rezultata potvrđuje se pretpostavka kako je uspjeh predloženih metoda interpolacije usko povezan s razinom sličnosti među korisnicima. Veća sličnost korisnika poboljšava učinkovitost metode CF, dovodeći do poboljšane točnosti u predviđanju stanja kanala za ne-pilot podnosiocce. Predložena metoda procjene bežičnog kanala temeljena na tehnikama CF, sukladno rezultatima, pokazala je dobitke te se može koristiti za optimizaciju postupka odabira relejnih postaja u svrhu postizanja definiranih parametara kvalitete usluge [57].

### 3.6 Sažetak poglavlja

Veće prijenosne brzine i tražene razine učestalosti pogreške bita (BER) u sustavima OFDMA uvjetuju uporabu neke vrste interpolacijskih metoda za računanje procjene stanja kanala ne-pilotskih podnosilaca. Metode interpolacije moraju istodobno zadovoljiti nisku složenost i visoku točnost, jer mogu značajno utjecati na točnost procjene kanala.

Tehnike suradničkog filtriranja (CF) su među najuspješnijim tehnikama za izgradnju sustava preporuka. Tehnike CF obično se koriste u kontekstu sustava preporuka (e-trgovina) za predviđanje ocjena artikla nepoznatog korisnika na temelju poznatih vrijednosti sličnih korisnika. Tehnike CF, koje se koriste u preporučiteljskim sustavima, imaju sposobnost preciznog predviđanja na temelju malog broja poznatih podataka u kratkom vremenu što može biti vrlo korisno u sustavima OFDMA, gdje se istodobno u kratkom vremenu mora procijeniti stanje kanala za veliki broj korisnika.

Budući da je učinkovitost procjene kanala izazovan problem u bežičnim komunikacijskim sustavima s vremenskom i frekvencijskom selektivnom varijansom, u ovom poglavlju predložen je novi algoritam procjene kanala koji kombinira uobičajeno metode interpolacije i memorijski temeljene tehnike CF. Za predloženu interpolacijsku metodu provedene su simulacije, a dobiveni rezultati su uspoređeni s uobičajeno korištenim interpolacijskim metodama, u svrhu provjere poboljšanja točnosti procjene kanala, koristeći metriku RMSE. Predložena metoda interpolacije manje je osjetljiva na broj i lokaciju pilot podnosilaca. Rezultati simulacije pokazuju da predložena metoda poboljšava metriku točnosti

predviđanja za scenarije s malim brojem pilot podnosilaca, u usporedbi s uobičajenim metodama procjene. Međutim, povećanjem broja pilot podnosilaca kvaliteta predložene interpolacijske metode (algoritma) i, posljedično, točnost procjene kanala opada. Zaključno, predloženi algoritam za procjenu kanala pogodan je za distribuciju u sustavima OFDMA s nepravilnim rasporedom pilotskih podnosilaca.

## Poglavlje 4

---

# ALGORITAM RASPODJELE POTKANALA ZASNOVAN NA ODSJEČCIMA U OFDMA RELEJNIM MREŽAMA UZ ODABIR STATIČKOG I MOBILNOG RELEJA

*OFDMA relejne mreže su postale osnova modernih bežičnih komunikacija nudeći velike prijenosne brzine, spektralnu učinkovitost i fleksibilnost raspodjele resursa. Međutim, kako bi se maksimizirao njihov potencijal, u prisutnosti prepreka, smetnji i fadinga, optimizacija metode odabira releja i algoritama raspodjela potkanala postaju sve važnija. Koncept statičkih i mobilnih releja često se koristi za poboljšanje prijenosne brzine korisnika u bežičnim mrežama. Odabir statičkih releja uključuje korištenje unaprijed određenih releja za poboljšanje komunikacije uz osiguranje stabilnosti sustava. Odabir mobilnih releja uvodi veću prilagodljivost uvjetima kanala uz omogućavanje pokretljivosti relejima unutar mreže pri čemu obrasci kretanja mogu biti unaprijed definirani ili temeljeni na stvarnim uvjetima kanala. U poglavlju su predložena dva algoritma za odabir statičkog i mobilnog releja kako bi se smanjila ukupna udaljenost između korisnika i bazne postaje. Performanse mreže dodatno se optimiziraju dodjelom resursa na temelju grupiranja podnosilaca u odsječke, pri čemu se isti dodjeljuje korisnicima i relejima na temelju mrežnih uvjeta. Navedeno osigurava učinkovit prijenos podataka dinamičkom dodjelom podnosilaca kako bi se zadovoljili zahtjevi korisnika. U poglavlju je predložen i algoritam za dodjelu podnosilaca uzlaznog OFDMA kanala grupiranih u statički odsječak koji se koristi za statičke releje i dinamički odsječak koji se koristi za mobilne releje i izravne korisnike. Za sve predložene algoritme provedene su simulacije, a dobiveni rezultati su uspoređeni s referentnim algoritmima dostupnim u relevantnoj literaturi.*

### 4.1 Uvod

Komunikacijske mreže zasnovane na sustavima OFDMA postale su osnova modernih bežičnih komunikacija zbog svoje sposobnosti ostvarivanja velikih prijenosnih brzina i učinkovite upotrebe spektra. U takvim mrežama, efikasna dodjela frekvencijskih podnosilaca

igra ključnu ulogu u optimizaciji performansi. Danas se OFDMA bežične komunikacijske mreže koriste za mnoge različite svrhe, uključujući mreže IoT (engl. *Internet of Things*) i 5G koje postaju široko rasprostranjene. Broj povezanih uređaja ubrzano raste. Korištenje relejnih sustava u OFDMA mrežama prihvaćeno je kao jedan od troškovno učinkovitih načina za uklanjanje ograničenja pokrivenosti i kapaciteta. Glavna ideja je zadovoljiti QoS zahtjeve svakog korisnika bez obzira na njegovu udaljenost od bazne postaje korištenjem relejnih postaja između bazne postaje i mobilnih korisnika. Kako bi se očuvale velike prijenosne brzine u prisutnosti prepreka, smetnji, fedinga i velikih udaljenosti, optimizacija odabira releja i raspodjela potkanala postaje sve važnija. Problem postaje složeniji i zahtjevniji za računanje u scenarijima s više korisnika i više releja, posebno kada su informacije o stanju kanala neprecizne ili nepotpune.

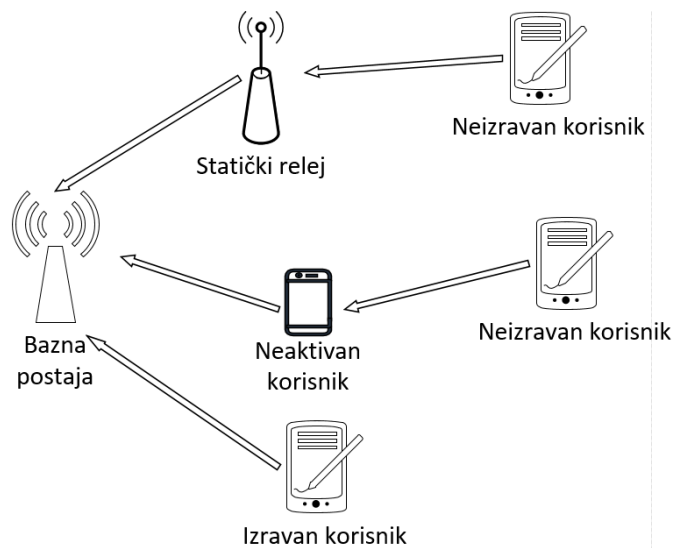
Problem nesigurnosti pojačanja kanala može se ublažiti tehnikama procjene kanala, od kojih se neke temelje na suradničkom filtriranju [57]. Shema maksimiziranja prijenosne brzine predložena je u [79] za višekorisničku IoT relejnu mrežu s jednim bežičnim relejem. Druga strategija maksimiziranja prijenosne brzine predložena je u [80] za relejnu mrežu s izravnom vezom između predajnika i prijammnika. Algoritmi za pravednost raspodjele resursa u mrežama OFDMA s jednom ili više relejnih postaja predložena je u [13] pri čemu se pretpostavljaju samo fiksne relejne postaje. Kada je udaljenost korisnika od releja prevelika ili postoje čimbenici koji utječu na kvalitetu veze, fleksibilnost mreža OFDMA s fiksnim relejnim postajama je slaba te ista ne može nastaviti zadovoljavati potrebe mobilnih korisnika. Korištenje fiksnih relejnih postaja dovodi i do visokih troškova infrastrukture kao i visokih operativnih troškova te troškova održavanja. Fleksibilniji pristup, gdje neaktivni korisnici djeluju kao mobilne relejne postaje, predložen je u [81]. Odabir mobilnog releja ne samo da poboljšava energetska učinkovitost sustava, već i uvelike poboljšava fleksibilnost sustava u usporedbi s komunikacijskim mrežama potpomognutim isključivo fiksnim relejima. Mobilni relejni čvorovi imaju prednost jer mogu povećati performanse sustava bez potrebe za dodatnim infrastrukturnim troškovima. U sustava promatranom u disertaciji [82], model sadrži baznu postaju,  $n$  izravnih korisnika čija je ostvariva brzina veća od minimalne brzine  $R_{min}$  te  $i$  neizravnih korisnika čija je ostvariva prijenosna brzina niža od  $R_{min}$ . To znači da neizravni korisnici ne mogu ispuniti zahtjev minimalne brzine izravnim prijenosom zbog udaljenosti, prepreka, smetnji i drugih čimbenika. Također u modelu postoji i  $j$  neaktivnih korisnika. U

predloženom pristupu, kandidati koji bi mogli djelovati kao mobilni relej za neizravnog korisnika  $i$  su oni neaktivni korisnici  $j$  koji zadovoljavaju  $d_{j,b} < d_{i,b}$ , gdje su  $d_{j,b}$  i  $d_{i,b}$  odgovarajuće udaljenosti do predajnika, odnosno bazne postaje. U navedenom pristupu ne uzima se u obzir udaljenost  $d_{i,j}$  između  $i$  i  $j$ .

U ovom poglavlju predložena su dva algoritma odabira releja koje optimiziraju  $d_{i,j} + d_{j,b}$ . Prvi predloženi algoritam temelji se na poopćenom problemu dodjeljivanja AP (engl. *Assignment Problem*) [83], dok se drugi temelji na KD-stablu ( $k$ -dimenzionalno stablo), strukturi koja se koristi za brzo pronalaženje bliskih točaka [84]. AP se bavi pitanjem kako dodijeliti  $n$  objekata  $m$  drugim objektima na način koji je injektivan, što znači da se svaki objekt dodjeljuje samo jednom. Problem dodjele u potpunosti je određen svojim dvjema komponentama, dodjelama, koje određuju kombinatornu strukturu te ciljnom funkcijom koju treba optimizirati, a koja modelira "najbolji mogući način". Ovaj problem spada u specifičnu klasu problema linearnog programiranja. Glavni cilj je dodijeliti skup resursa jednakom broju aktivnosti u jedan-na-jedan odnosu. Ova dodjela ima za cilj minimizirati ukupne troškove izvršenja zadataka ili maksimizirati ukupni profit koji proizlazi iz dodjele. U osnovi, problem traži najefikasniju strategiju dodjele koja optimizira zadanu ciljnu funkciju. Također predložena je nova strategija raspodjele podnosilaca zasnovana na odsječcima koja koristi razliku između koncepta računarstva u oblaku (engl. *cloud computing*) i računarstva na rubu mreže (engl. *edge computing*) na sličan način kako je modelirano u [85] i [86]. Koncept računarstva na rubu mreže koristi se za računanje zahtijeva u stvarnom vremenu, za razliku od koncepta računarstva u oblaku koji se može koristiti za dulja periodična izračunavanja ako su odgovarajući entiteti statični, tj. njihovi položaji i stanje kanala se značajno ne mijenjaju u vremenu. Na taj način podaci koji su prije trebali biti obrađeni i pohranjeni u *oblaku* mogu se čuvati na *rubu* mreže, smanjujući ukupno kašnjenje i povećavajući sigurnost i pouzdanost. U predloženoj strategiji, podnosioci su podijeljeni u dva nejednaka odsječka: jedan za statičke releje, a drugi za preostale releje. Ideja nejednakih odsječaka prvi put je predstavljena u [87], gdje se algoritmom dodjele podnosilaca na temelju odsječka pokazala maksimizacija ukupne prijenosne brzine za sustave OFDMA uz uvjet da je broj odsječaka u sustavu OFDMA jednak broju korisnika. Broj potkanala po svakom odsječku (veličina odsječka) nije bio definiran unaprijed i varijabilan je u svakom odsječku, tj. veličina svakog odsječka se dinamički mijenja u skladu s uvjetima kanala.

## 4.2 Model sustava i prijedlog algoritama

Kao promatrani model pretpostavljen je uzlazni kanal OFDMA komunikacijske mreže s jednim predajnikom, odnosno baznom postajom potpomognutom s  $N$  statičkih relejnih postaja. U danom vremenskom okviru  $T$ , postoji  $U$  aktivnih korisnika i  $M$  trenutno neaktivnih korisnika koji mogu djelovati kao mobilne relejne postaje u promatranom vremenskom okviru (kako je opisano u [81]). Relejne postaje rade u dekodiraj i proslijedi (DF) načinu rada s naizmjeničnim prijenosom (HD). Svaki aktivni korisnik može se povezati na baznu postaju bilo izravno, bilo pomoću statičke relejne postaje, bilo pomoću mobilne relejne postaje. Pretpostavka je kako svaka statička relejna postaja može opsluživati do  $k$  aktivnih korisnika, a da svaki neaktivni korisnik (koji djeluje kao mobilna relejna postaja) može opsluživati samo jednog neizravnog aktivnog korisnika (ovaj broj će se nazivati faktorom opsluživanja releja). Entiteti sustava prikazani su na slici 4.1.



Slika 4.1 Model promatranog sustava

Pretpostavlja se kako je komunikacijski vremenski okvir  $T$  podijeljen na dva vremenska odsječka. U prvom vremenskom intervalu neizravni korisnici šalju podatke svojim odgovarajućim relejnim postajama, dok u drugom vremenskom intervalu relejne postaje prosljeđuju podatke baznoj postaji. U kanalu između bazne postaje i drugih entiteta, pretpostavlja se kako je SNR vrijednost na svakom podnosiocu  $i$  za svaki relej/korisnik  $u$  poznata ulazna vrijednost  $i$  jednak je:



$$\gamma_{i,u} = \frac{P_{tot}/K}{\sigma_n^2} |H_{i,u}(f)|^2 \quad (4.1)$$

gdje je  $K$  ukupni broj podnosilaca,  $P_{tot}$  je ukupna snaga sustava koja je jednako raspoređena među podnosiocima,  $|H_{i,u}(f)|^2$  je dobitak kanala za korisnika  $u$  na podnosiocu  $i$ , a  $\sigma_n^2$  šum u kanalu uz Gaussovu razdiobu, koji je srednje vrijednosti nula i srednje snage jednaka  $\sigma_w^2$ .

Odgovarajuća prijenosna brzina [bit/simbol] ograničena je formulom:

$$R_{i,u} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{i,u}). \quad (4.2)$$

### 4.2.1 Odabir releja

U fazi odabira releja, aktivni korisnik  $u$  treba postići svoju potrebnu minimalnu prijenosnu brzinu  $R_{min}$ :

$$R_{min} \leq \sum_{i=1}^K R_{i,u}. \quad (4.3)$$

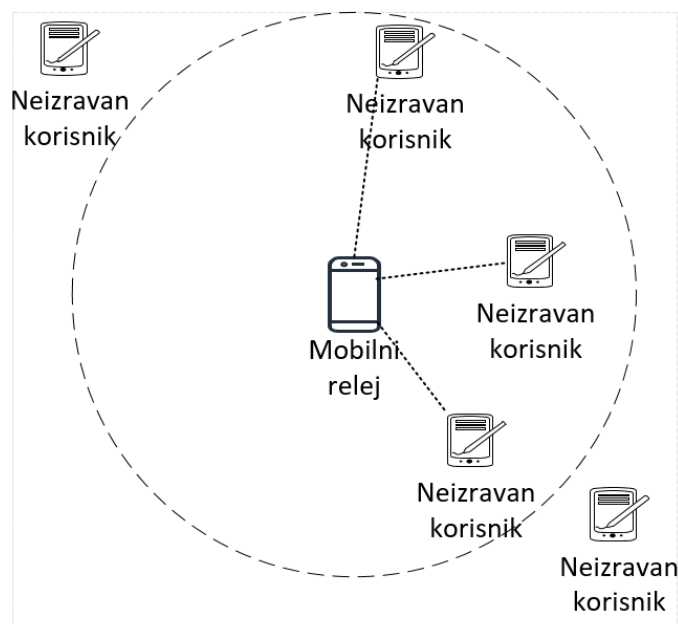
Ukoliko se postizanje minimalne prijenosne brzine ne može postići izravnom vezom na baznu postaju (zbog udaljenosti, smetnji, prepreka ili fedinga), relejna postaja treba biti odabrana za odgovarajućeg korisnika. Relejna postaja se bira unutar skupa statičkih relejnih postaja ili unutar skupa neaktivnih korisnika koji djeluju kao mobilne relejne postaje. Budući da je distribucija korisnika u stanju mirovanja nasumična, kako bi se osigurala kvaliteta komunikacije između neizravnih korisnika i bazne postaje, potrebno je utvrditi koji se neaktivni korisnici mogu koristiti kao mobilni releji za dekodiranje i prosljeđivanje informacija. Osnovni uvjet je da korisnici u stanju mirovanja budu između neizravnih korisnika i bazne postaje. U disertaciji su predložene dvije nove strategije odabira relejnih postaja, s različitim točnostima i vremenskom složenošću. Za obje strategije pretpostavljeno je poznavanje svih trenutačnih lokacija aktivnih i neaktivnih korisnika, relejnih postaja i bazne postaje.

Predložene strategije odabira releja temelje se na pretpostavci da je cilj minimizirati ukupnu udaljenost između kanala neizravnog korisnika i bazne postaje preko relejne postaje s prijenosom u dva skoka; drugim riječima, potrebno je minimizirati prosječnu udaljenost [88]:

$$d(user, relay) + d(relay, base). \quad (4.4)$$

Također, pretpostavka je da se vremenski gledano lokacije korisnika ne mijenjaju brzo, što omogućuje njihovu pohranu u strukturu podataka prikladnu za brzo pretraživanje susjeda. Predložene su sljedeće dvije strategije:

- KD-stablo - lokacije neizravnih korisnika pohranjuju se u podatkovnu strukturu poznatu kao KD-stablo [84], koja je prikladna za brzo pretraživanje bliskih točaka. KD-stablo (engl. *KD-tree*) je struktura podataka za skladištenje konačnog skupa podataka u  $k$ -dimenzionalnom prostoru, gdje  $k$  predstavlja broj dimenzije te ista zapravo predstavljaju modifikaciju binarnog stabla pretrage. Iako se KD-stablo može primijeniti za probleme u bilo kojoj dimenziji, najčešće se koristi za rješavanje problema u dvije ili tri dimenzije. Kad god se lokacije korisnika značajno promijene, KD-stablo je potrebno uvijek ponovno izgraditi. U svakom vremenskom okviru prvo sortiramo sve releje prema njihovoj udaljenosti  $d_{j,b}$  od bazne postaje, prema uzlaznom redoslijedu. Zatim, za svaki relej  $j$  s faktorom opsluživanja  $k$ , izvodi se upit na KD stablu tražeći  $k$  korisnika najbližih releju  $j$  (slika 4.2) te se potom isti povezuju s relejem  $j$  (ukoliko isti već nisu bili povezani s prethodnim relej). Nakon ovog postupka, ukoliko neki neizravni korisnici ostanu nepovezani, povezuje se svaki od njih s prvim dostupnim/slobodnim relejem.



Slika 4.2 Primjer traženja  $k = 3$  najbliže točke ( $\min. d_{i,j}$ ) u KD-stablu

- Redukcija na poopćeni problem dodjeljivanja (AP) - svaki relej s faktorom opsluživanja  $k$  modelira se kao popis od  $k$  virtualnih releja koji mogu opsluživati jednog korisnika. Trošak grana u grafu između neizravnog korisnika  $i$  i (virtualnog) releja  $j$  definiran je

kao  $d_{i,j} + d_{j,b}$ , te se traži 1-na-1 dodjela korisnika virtualnim relejima s minimalnim ukupnim troškom, što je standardni problem dodjele koji se može riješiti Hungarian (Kuhn-Munkres) metodom ili tzv. Mađarskom metodom [89].

Poopćeni problem dodjeljivanja se često javlja u praksi - kao samostalni problem ili kao potproblem u područjima raspoređivanja resursa, preusmjeravanja vozila i proizvodnih sustava [90]. Svaki AP ima pridruženu tablicu ili matricu. Općenito, redovi sadrže objekte koje želimo dodijeliti, a stupci obuhvaćaju aktivnosti koje želimo dodijeliti tim objektima. Promatramo problem dodjeljivanja  $n$  resursa za  $m$  aktivnosti kako bi se smanjio ukupni trošak ili vrijeme na takav način da se svaki resurs može povezati s jednim i samo jednim poslom. Ako je matrica troškova  $C = (c_{ij})$ , to jest  $n \times n$  matrica gdje  $c_{ij}$  označava trošak potreban da objekt  $i$  odradi traženu aktivnost  $j$ , tada je ista definirana kao [83]:

		<b>Aktivnosti</b>				
		$A_1$	$A_2$	.....	$A_n$	
<b>Resursi</b>	$R_1$	$c_{11}$	$c_{12}$	.....	$c_{1n}$	1
	$R_2$	$c_{21}$	$c_{22}$	.....	$c_{2n}$	1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$R_n$	$c_{n1}$	$c_{n2}$	.....	$c_{nm}$	1
<b>Potrebno</b>		1	1	.....	1	

Neka  $x_{ij}$  označava dodjelu  $i$ -tog resursa  $j$ -toj aktivnosti, tako da vrijedi

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ako je red } i \text{ dodijeljen stupcu } j \\ 0, & \text{u suprotnom slučaju} \end{cases} \quad (4.5)$$

Tada je matematička formulacija problema dodjeljivanja [83]:

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4.6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$
$$x_{ij} \in 0, 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

Mađarska metoda je jedna od najkorištenijih metoda za rješavanja problema dodjeljivanja jer postiže dobre performanse i brzinu kod rješavanja samog problema. Ista omogućava učinkovit način pronalazjenja optimalnih rješenja bez potrebe za izravnom usporedbom svake opcije. Radi na principu redukcije matrice [83]. To jednostavno znači da oduzimanjem i dodavanjem odgovarajućih brojeva u tablicu troškova ili matricu, može se svesti problem na matricu oportunitetnih troškova. Ako je moguće reducirati matricu do točke gdje postoji jedan nulti element u svakom retku i stupcu, tada će biti moguće napraviti optimalnu dodjelu, tj. dodjelu u kojoj su svi oportunitetni troškovi jednaki nuli. Mađarska metoda problema dodjele (slučaj redukcije) može se sažeti u sljedeće korake [91]:

1. Pronalazi se minimalni element u svakom redu  $n \times n$  matrice troškova te se potom stvara nova matrica na način da se minimalni trošak reda oduzima od svakog elementa u tom redu. U novo kreiranoj matrici se ponavlja prethodni postupak ali ovaj put po svim stupcima umjesto redovima. Krajnje dobivena matrica se naziva matrica reduciranih troškova i ista u svakom redu i stupcu sadrži barem jednu nulu.
2. Minimalnim brojem linija (horizontalnih i/ili vertikalnih) precrtati sve nule u matrici reduciranih troškova. Ako je za to potrebno točno  $n$  linija tada je moguće pronaći optimalno rješenje među precrtanim nulama, no ako je broj linija manji od  $n$  nastavlja se s trećim korakom.
3. Pronaći najmanji ne nulti element u matrici reduciranih troškova koji nije prekriven linijama iz drugog koraka. Pronalaskom tog elementa, isti je potrebno oduzeti od svih linijama ne pokrivenih elemenata te ga dodati svim elementima pokrivenim s dvije linije, nakon toga se vratiti na drugi korak.

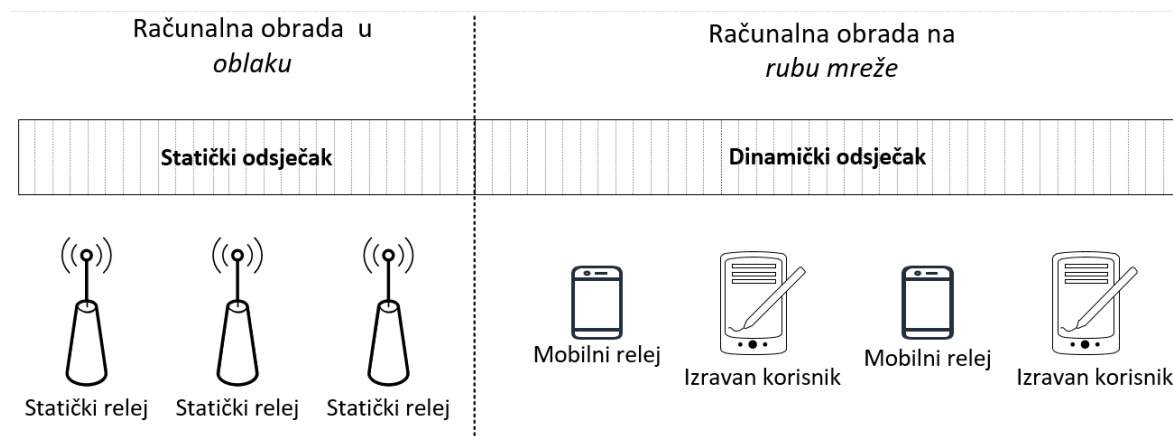
Vremenska složenost pretrage najbližeg susjeda u KD-stablu je  $O(\log U)$ , što postaje  $O(k \log U)$  za  $k$  susjeda. Stoga je ukupna vremenska složenost odabira releja temeljenog na KD-stablu  $O(M \log U + Nk \log U)$ , gdje zapis  $M \log U$  predstavlja  $M$  upita za mobilne releje ( $k = 1$ ), a dok zapis  $Nk \log U$  odgovara  $N$  upitima za statičke releje. U odabiru releja temeljenog na AP-u, broj virtualnih releja je  $M+kN$  jer postoji  $M$  mobilnih releja s faktorom opsluživanja 1 i

$N$  statičkih releja s faktorom opsluživanja  $k$ . Budući da Mađarska metoda za rješavanje  $n \times n$  matrice dodjela zahtijeva  $O(n^3)$  vremena, vremenska složenost odabira releja temeljenog na AP-u je  $O((M+kN)^3)$ .

#### 4.2.2 Dodjela potkanala zasnovana na odsječcima

Najbolje izvedbe prijenosnog sustava (tj. maksimalna prijenosna brzina i minimalna snaga prijenosa) mogu se postići dodjelom svakog potkanala korisniku s najboljim stanjem kanala, što se naziva dodjela pojedinačnog potkanala. Kako bi se dodjela pojedinačnog potkanala učinila manje složenom i kako bi se smanjio teret signalizacije, grupiranje niza susjednih potkanala u odsječke pokazalo se učinkovitim rješenjem zbog korelacije između susjednih potkanala u sustavima OFDMA. Naime, dobro (loše) stanje kanala potkanala vjerojatno implicira dobro (loše) stanje kanala njegovih susjednih potkanala. Stoga se prijenosna brzina postignuta dodjelom potkanala na temelju odsječaka približava prijenosnoj brzini postignutoj pojedinačnom dodjelom potkanala [13]. Općenito, gore spomenuti algoritmi koji se temelje na odsječcima pokušavaju maksimizirati ukupnu brzinu u sustavima OFDMA, pod pretpostavkom da je broj odsječaka u sustavu i broj potkanala po svakom odsječku (veličina odsječaka) unaprijed određen. Međutim, unaprijed definiranje veličine odsječaka i broja odsječaka može smanjiti izvedbu sustava, posebno u slučaju selektivnih frekvencijskih kanala [13].

U drugom vremenskom intervalu prijenosa podataka, releji i izravni korisnici šalju podatke baznoj postaji. U disertaciji je predložen novi algoritam grupiranja podnosilaca kanala u dva nejednaka dijela: statički i dinamički dio [87]. Podnosioci statičkog odsječaka dodjeljuju se statičkim relejima, dok su podnosioci dinamičkog odsječaka dodjeljuju mobilnim relejima i izravnim korisnicima. Budući da se uvjeti kanala između bazne postaje i statičkih releja značajno ne mijenjaju, statičku dodjelu podnosilaca možemo izračunati u *oblaku* bez računalnih zahtjeva u stvarnom vremenu. S druge strane, kanal između bazne postaje i izravnih korisnika ili mobilnih releja stalno se mijenja zbog kretanja, pa se dodjela podnosilaca unutar dinamičke skupine može izračunati na *rubu* mreže [86] s računalnim zahtjevima u stvarnom vremenu. Navedeno je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.3 Dodjela potkanala zasnovana na odsječcima

Za dodjelu u oba dijela, statičkom i dinamičkom odsječku, predloženo je korištenje ili pohlepnog algoritma (za svakog podnosioca potrebno odabrati relej/korisnik s najvećim SNR-om) ili Mađarske metode za odgovarajući problem dodjele (AP) podudaranja između releja/korisnika i podnosioca, s troškovima dodjele koji odgovaraju SNR vrijednostima. Ukoliko je  $K$  broj podnosilaca, a  $n$  broj releja/korisnika, vremenska složenost je  $O(K^3)$  za Mađarsku metodu (AP), a  $O(nK)$  za pohlepni algoritam. Ova dva pristupa predstavljaju kompromis između brzine izvođenja i postignute prijenosne brzine, što se istražuje u rezultatima simulacije.

Za razliku od dodjele podnosilaca u dinamičkom odsječku, dodjeljivanje podnosilaca statičkom odsječku ne mora se izvoditi u svakom vremenskom okviru, već samo kada se uvjeti kanala značajno promijene, što štedi računalne resurse i omogućuje mreži u *oblaku* da rasporedi vremena dodjele resursa kada je to najprikladnije, ne pridržavajući se ograničenja u stvarnom vremenu. Potrebno je napomenuti kako se dodjela podnosilaca u prvom vremenskom odsječku, gdje neizravni korisnici šalju podatke svojim odabranim relejima, može promatrati kao poseban slučaj predložene strategije gdje svi podnosioci pripadaju dinamičkom odsječku. Navedeno se može riješiti na već predloženi način: procijeniti SNR svakog podnosioca za svakog korisnika i primijeniti algoritam AP ili pohlepni algoritam na *rubu* mreže.

### 4.3 Predložene strategije odabira releja - rezultati

Novo predložene strategije odabira releja KD-stablo i poopćeni problem dodjeljivanja (AP), prethodno objašnjene u potpoglavlju 4.2.1., implementirani su u programsku jeziku Python 3 (objektno orijentiran i interpretiran programski jezik na visokoj razini s dinamičkom semantikom). Također, u svrhu usporedbe, implementirane su jednostavne referentne strategije:

- Algoritam prvog dostupnog releja (engl. *First available*) - kako bi se skratilo vrijeme računanja što je više moguće, za svakog korisnika prolazi se kroz popis releja (razvrstanih prema njihovoj udaljenosti od bazne stanice), zaustavljajući se i odabirući prvi relej koji je dostupan (tj. ima faktor opsluživanja različit od nule).
- Pohlepni algoritam - za svakog korisnika prolazi se kroz cijeli popis releja i odabire se dostupni relej koji je najbliži promatranom korisniku [92].

U simulaciji su razmatrana tri scenarija. U svim scenarijima bilo je 500 neizravnih korisnika za odabir releja:

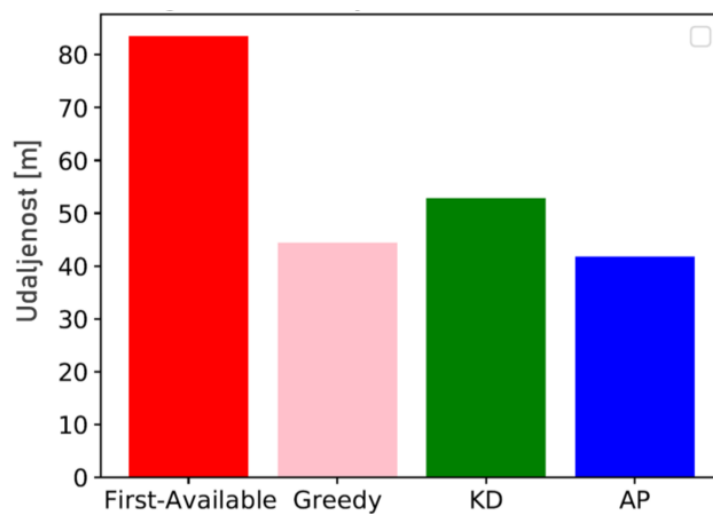
1. U scenariju A bilo je 20 mobilnih releja i 120 statičkih releja s faktorom opsluživanja od 5 korisnika.
2. U scenariju B bilo je 40 mobilnih releja i 100 statičkih releja s faktorom opsluživanja od 10 korisnika.
3. U scenariju C bilo je 60 mobilnih releja i 80 statičkih releja s faktorom opsluživanja od 15 korisnika.

Potrebno je napomenuti kako mobilni releji (neaktivni korisnici) mogu opslužiti samo jednog korisnika. Za svaki scenarij provedeno je 30 simulacija, a rezultati su uprosječeni. U svakoj simulaciji, lokacije svih entiteta (bazne postaja, relej i korisnik) nasumično su odabrane unutar pravokutnika  $[0, 100] \times [0, 100]$  metara. Simulacija se sastojala od 50 vremenskih okvira. Prije svakog vremenskog okvira, svi korisnici se pomiču u nasumičnim smjerovima  $(\Delta x, \Delta y) \in [-5, 5] \times [-5, 5]$  metara, a zatim se izvodi odabir releja. Parametri simulacije sažeti su u Tablici II.

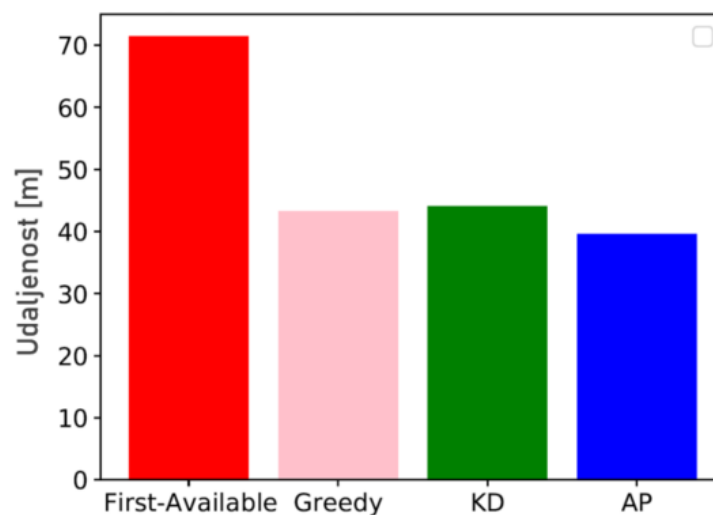
Tablica II Parametri simulacije strategije odabira releja

parametar	vrijednost (scenarij A)	vrijednost (scenarij B)	vrijednost (scenarij C)
Broj simulacija	30		
Lokacije entiteta	[0, 100] x [0, 100] metara		
Broj vremenskih okvira	50		
Kretanje korisnika	$(\Delta x, \Delta y) \in [-5, 5] \times [-5, 5]$ metara		
Broj neizravnih korisnika	500		
Broj mobilnih releja (faktor opsluživanja)	20 (1)	40 (1)	60 (1)
Broj statičkih releja (faktor opsluživanja)	120 (5)	100 (10)	80 (15)

U predloženim strategijama odabira releja cilj je minimizirati ukupnu udaljenost između kanala neizravnog korisnika i bazne postaje preko relejne postaje, odnosno potrebno je minimizirati prosječnu udaljenost. Rezultati su prikazani na slikama 4.4, 4.5 i 4.6.

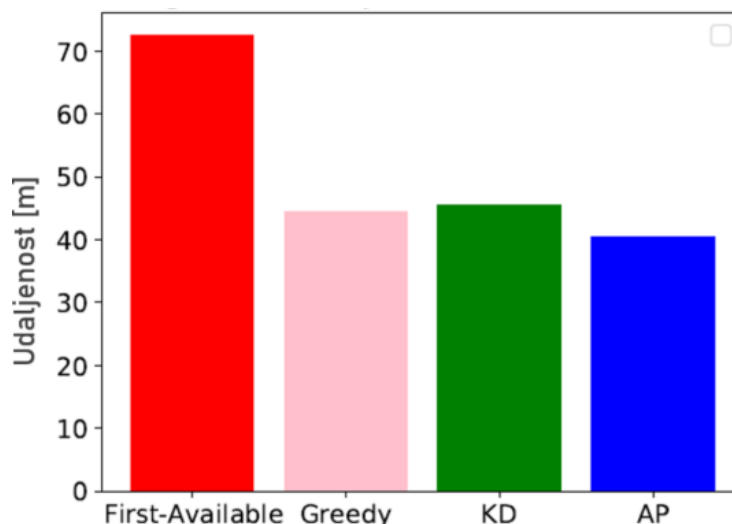


Slika 4.4 Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za prosječne udaljenosti u scenariju A



Slika 4.5 Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za prosječne udaljenosti u scenariju B

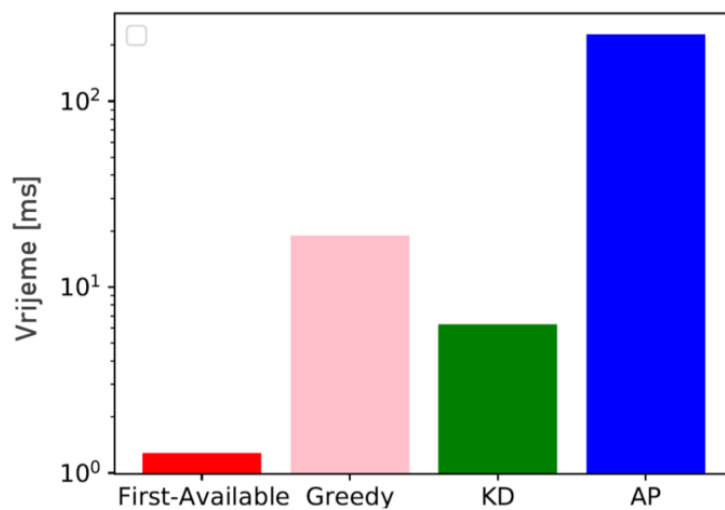




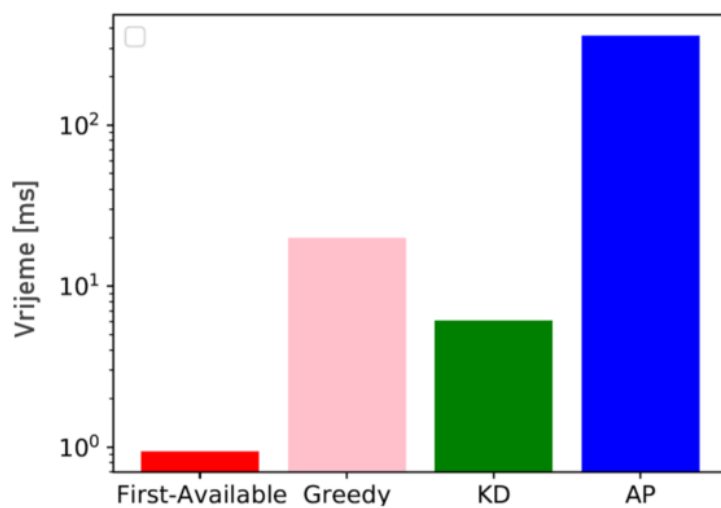
Slika 4.6 Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za prosječne udaljenosti u scenariju C

U pogledu rezultata vezanih za prosječne udaljenosti bazna postaja-relej-korisnik, predloženi algoritam AP nadmašuje sve druge strategije u svim scenarijima, dok je pohlepni (*Greedy*) algoritam malo bolji od predloženog algoritma KD-stablo. Tako na primjer u scenariju C, pohlepni (*Greedy*), KD-stablo i AP algoritmi dobivaju udaljenosti od 44.43, 45.49, odnosno 40.37 metara. Kao što je vidljivo na slikama algoritam prvog dostupnog releja (*First available*) radi znatno lošije od svih ostalih algoritama u svim scenarijima.

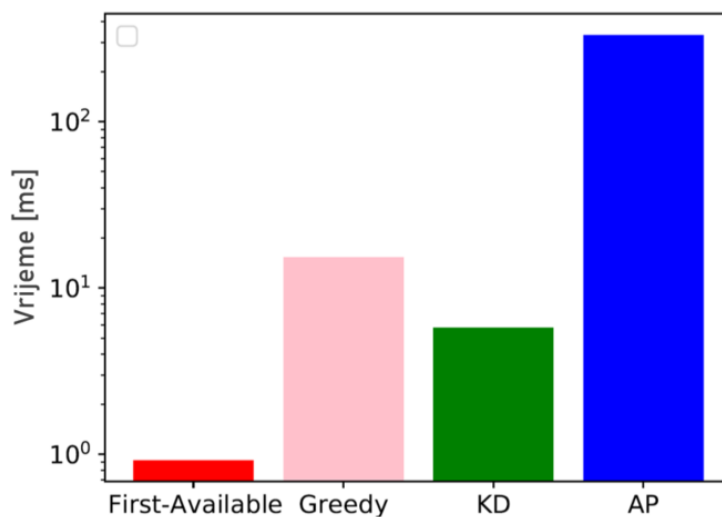
Osim minimiziranja prosječne udaljenosti, poželjno je da predloženi algoritmi imaju i što kraće vrijeme odabira releja. Rezultati su prikazani na slikama 4.7, 4.8 i 4.9. Potrebno je napomenuti kako je na grafovima y-os logaritamska. U odnosu na prethodni poredak algoritama u pogledu rezultata vezanih za prosječne udaljenosti, ako se rezultati novo predloženih algoritama i referentnih algoritama odabira releja promatraju u smislu potrebnog vremena za odabir, poredak je potpuno obrnut. Naime, algoritam prvog dostupnog releja (*First available*) je daleko najbrži, dok je KD-stablo otprilike 3 puta brži od pohlepnog (*Greedy*) algoritma, dok je algoritam AP pri tome najsporiji i to za red veličine.



Slika 4.7 Algoritmi odabira rejeja – rezultati simulacije za potrebno vrijeme odabira rejeja (scenarij A)



Slika 4.8 Algoritmi odabira rejeja – rezultati simulacije za potrebno vrijeme odabira rejeja (scenarij B)



Slika 4.9 Algoritmi odabira rejeja – rezultati simulacije za potrebno vrijeme odabira rejeja (scenarij C)

Rezultati pokazuju kompromis između točnosti algoritma i vremena potrebnog za odabir releja. U provedenim simulacijama predloženi algoritam AP daje najbolje udaljenosti, dok je predloženi algoritam KD-stablo značajno brža opcija pri čemu daje samo malo veće udaljenosti između kanala neizravnog korisnika i bazne postaje preko releja. Stoga je preporuka koristiti algoritam AP kada vrijeme odabira releja nije ograničavajući čimbenik, a u suprotnom je potrebno koristiti algoritam KD-stablo.

Zaključno, u ovom potpoglavlju su za predložene dvije nove strategije odabira releja za mreže OFDMA, potpomognutim sa statičkim i mobilnim relejnim postajama, izvršene pripadajuće simulacije. Predloženi algoritmi oslanjaju se na KD-stablo i redukciju na problem dodjele (AP), minimizirajući ukupnu udaljenost između neizravnog korisnika i bazne postaje preko relejne postaje. Generalno se temeljem izvedenih simulacija može zaključiti kako uzimajući u obzir kompromis između vremena odabira releja i dobivene udaljenosti, algoritam KD-stablo se pokazao kao brži izbor, dok s druge strane algoritam AP daje tražene manje udaljenosti (i do 26,5%) uz nedostatak duljeg vremena računanje odabira releja [88].

## 4.4 Dodjela potkanala zasnovana na odsječcima - rezultati

U simulaciji su razmatrani scenariji A, B i C s istim brojem statičkih i mobilnih releja kao u prethodnom potpoglavlju 4.3. Dodatno, u svakom scenariju bilo je 60 tzv. izravnih korisnika, odnosno korisnika koji imaju izravnu optičku vidljivost s baznom postajom. Dobici kanala generirani su korištenjem normalne razdiobe s odabranim prosječnim pojačanjem (jednoliko odabranim između [0.3, 1] za svakog korisnika/relej) i varijancom 0.3. Kako bi dobili SNR-ove, dobici su pomnoženi s vrijednošću  $\frac{P_{tot}/K}{\sigma_n^2}$  koji je postavljena na 20 dB. Dodjela je izvršena s 200 podnosilaca, koji su proporcionalno podijeljeni u statičke i dinamičke odsječke na temelju broja statičkih releja u odnosu na broj neaktivnih i izravnih korisnika. U svakom odsječku, dodjela je izvršena koristeći dvije strategije: pohlepni (*Greedy*) algoritam (pri čemu je za svakog podnosioca odabran relej/korisnik s najvišim SNR-om) i algoritam AP (pri čemu je cilj riješiti odgovarajući problem dodjele). Simulacija je provedena 30 puta s različitim nasumičnim

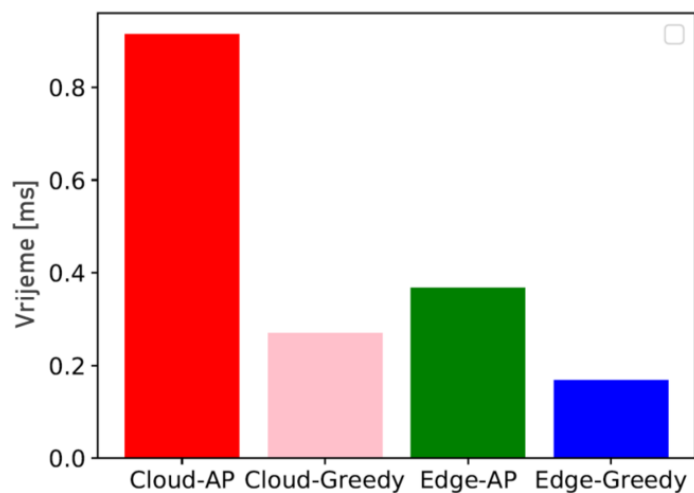
vrijednostima te su na kraju dobiveni rezultati uprosječeni. Parametri simulacije sažeti su u Tablici III.

Tablica III Parametri simulacije dodjele potkanala zasnovana na odsječcima

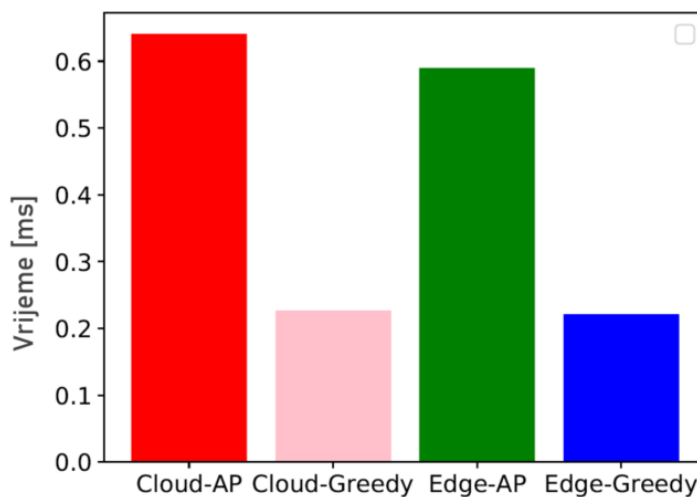
parametar	vrijednost (scenarij A)	vrijednost (scenarij B)	vrijednost (scenarij C)
Broj simulacija	30		
Broj podnosilaca	200		
Broj vremenskih okvira	50		
Dobici kanala	normalna razdioba s odabranim prosječnim pojačanjem (jednoliko odabranim između [0.3, 1] za svaki par korisnik-relej)		
$\frac{P_{tot}/K}{\sigma_n^2}$	20dB		
Broj neizravnih korisnika	500		
Broj izravnih korisnika	60		
Broj mobilnih releja (faktor opsluživanja)	20 (1)	40 (1)	60 (1)
Broj statičkih releja (faktor opsluživanja)	120 (5)	100 (10)	80 (15)

Predložena dva algoritma predstavljaju kompromis između brzine izvođenja dodjele i postignute prijenosne brzine podataka, što je analizirano (istraženo) u rezultatima simulacije. Potrebno je napomenuti kako je na slikama radi jasnoće zapisa korišten pojam "Cloud" pristup koji zapravo odgovara statičkom odsječku i pojam "Edge" pristup koji zapravo odgovara dinamičkom odsječku. Podnosioci statičkog odsječka dodjeljuju se statičkim relejima, dok se podnosioci dinamičkog odsječka dodjeljuju mobilnim relejima i izravnim korisnicima.

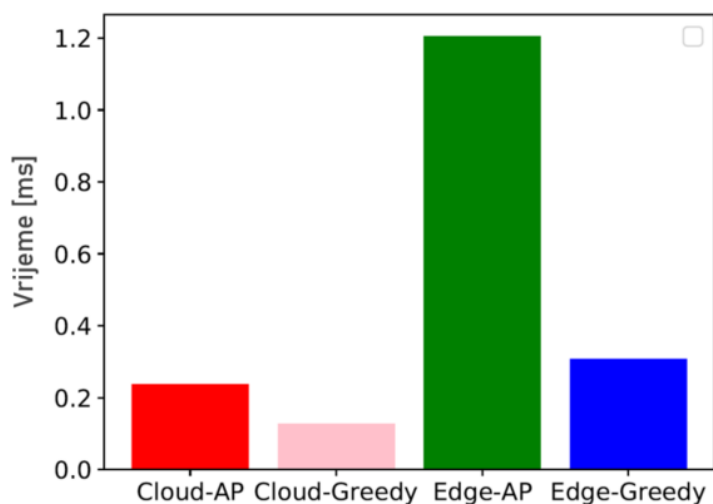
Rezultati prosječnog vremena izvođenja dodjele potkanala prikazani su na slikama 4.10, 4.11 i 4.12. Promatrajući prosječna vremena izvođenja dodjele potkanala, rezultati simulacije pokazuju kako je algoritam AP značajno sporiji od pohlepnog (*Greedy*) algoritma i to u svim scenarijima. Razlika u vremenima izvođenja dodjele između "Cloud" i "Edge" pristupa leži u različitom broju podnosilaca i entiteta u statičkim i dinamičkim odsječcima.



Slika 4.10 Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na vrijeme izvođenja dodjele (scenarij A)

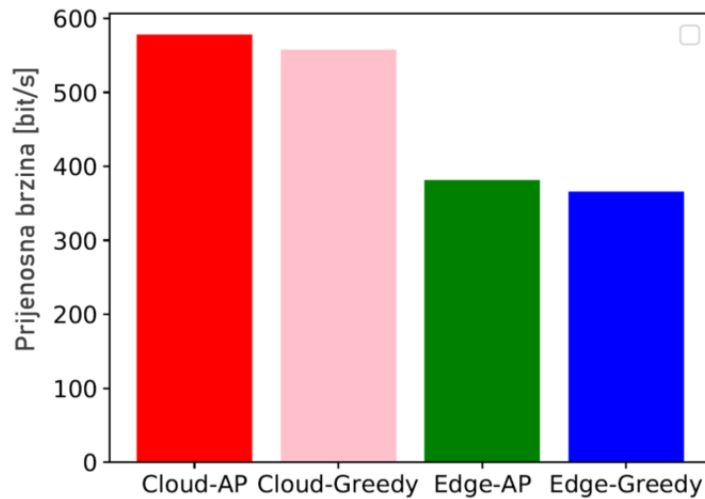


Slika 4.11 Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na vrijeme izvođenja dodjele (scenarij B)

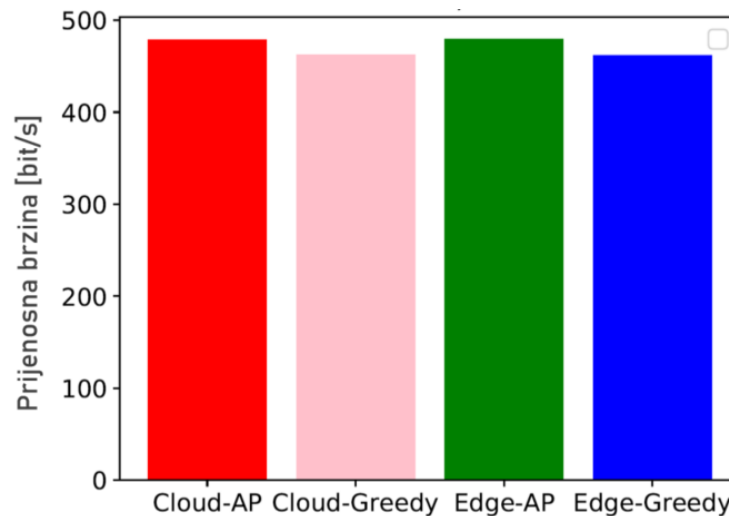


Slika 4.12 Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na vrijeme izvođenja dodjele (scenarij C)

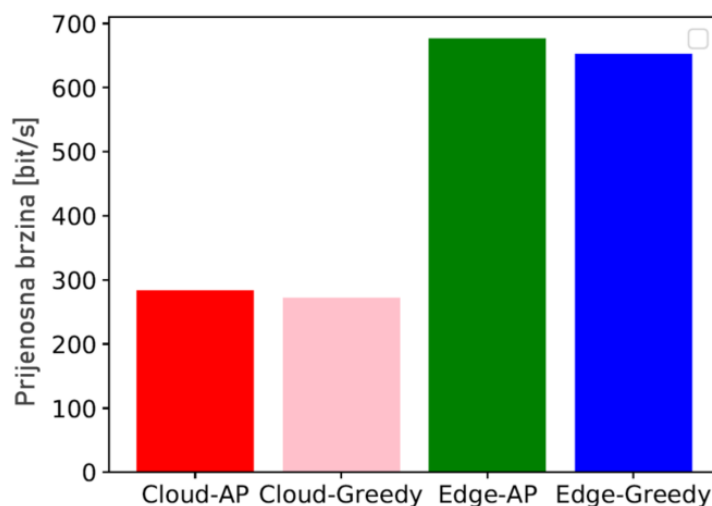
U provedenim simulacijama promatrane su i postignute ukupne prijenosne brzine za svaki scenarij. Rezultati su prikazani na slikama 4.13, 4.14 i 4.15. U pogledu postignute ukupne prijenosne brzine podataka, AP algoritam neznatno nadmašuje pohlepni (*Greedy*) algoritam u svim scenarijima (npr. u scenariju B za "Cloud" pristup, algoritam AP ostvaruje 478,72 bit/s prema 462,16 bit/s pohlepnog (*Greedy*) algoritma).



Slika 4.13 Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na postignutu prijenosnu brzinu (scenarij A)



Slika 4.14 Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na postignutu prijenosnu brzinu (scenarij B)



Slika 4.15 Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na postignutu prijenosnu brzinu (scenarij C)

Razlika između "Cloud" i "Edge" pristupa ponovno leži u različitom broju statičkih i dinamičkih entiteta. Gledajući oba aspekta učinkovitosti algoritma, preporuka je koristiti algoritam AP za veće prijenosne brzine u *Cloud* mreži (za statičku dodjelu odsječaka) budući da nema zahtjeva za računanjem u stvarnom vremenu te koristiti pohlepni (*Greedy*) algoritam *na rubu* mreže (za dinamičku dodjelu odsječaka) s zahtjevima za računanjem u stvarnom vremenu.

Zaključno, u ovom potpoglavlju izvršene su pripadajuće simulacije za predloženi novi algoritam dodjele podnosilaca, temeljeno na statičkoj i dinamičkoj dodjeli odsječaka koji koristi razliku između računarstva u oblaku i računarstva na rubu mreže. Algoritam dijeli podnosioce na statički odsječak koji se koristi za statičke releje i dinamički odsječak koji se koristi za mobilne releje i izravne korisnike. Dinamičku dodjelu podnosilaca potrebno je izvoditi u stvarnom vremenu na rubu mreže, dok se statička dodjela podnosilaca može periodički izvoditi u oblaku. Generalno se temeljem izvedenih simulacija može zaključiti kako je predložena strategija dodjele podnosilaca s implementiranim pohlepnim (*Greedy*) algoritmom značajno brža (i do 3,9 puta) i prikladnija za dinamički odsječak, dok strategija dodjele podnosilaca s implementiranim algoritmom AP ipak daje nešto veće prijenosne brzine te bi se trebala koristiti za statički odsječak [88].

## 4.5 Sažetak poglavlja

Mreže zasnovane na tehnologiji pristupa OFDMA postale su osnova modernih bežičnih komunikacija zbog svoje sposobnosti velikih prijenosnih brzina i učinkovite upotrebe spektra. Kako bi se očuvale velike prijenosne brzine u prisutnosti prepreka, smetnji, fadinga i velikih udaljenosti, optimizacija odabira releja i raspodjela potkanala postaje sve važnija. Koncept statičkih i mobilnih releja često se koristi za poboljšanje korisničke prijenosne brzine u bežičnim komunikacijskim mrežama, koje bi inače trpjele zbog velikih udaljenosti, smetnji, prepreka i fadinga. U ovom radu predložena su dva algoritma za odabir statičkog i mobilnog releja kako bi se smanjila ukupna udaljenost između korisnika i bazne postaje. Najučinkovitiji algoritam (prema rezultatima simulacije) oslanja se na KD-stablo, što je struktura podataka koja se koristi za brzo pronalaženje bliskih točaka.

Također, predložen je i algoritam za dodjelu podnosilaca koji grupira podnosiocima uzlaznog OFDMA kanala na statički odsječak koji se koristi za statičke releje i dinamički odsječak koji se koristi za mobilne releje i izravne korisnike. Dinamička dodjela bi se trebala obavljati *na rubu* mreže u stvarnom vremenu, dok se statička dodjela može povremeno obavljati u *oblaku*. Rezultati simulacije pokazuju da je predložena strategija dodjele podnosilaca s pohlepnim (*Greedy*) algoritmom brža i prikladnija za dinamičku dodjelu, dok bi se strategija dodjele podnosilaca s implementiranim algoritmom AP, koja daje nešto veće prijenosne brzine, trebala koristiti za statičku dodjelu.



## Poglavlje 5

---

### ZAKLJUČAK

Funkcioniranje suvremenih sustava za prijenos podataka koristeći sustave OFDMA u velikoj mjeri se oslanja na pouzdane informacije o stanju kanala. Uz pomoć informacija o stanju kanala moguće je prilagoditi način predaje signala trenutnom stanju u kanalu, što je od iznimne važnosti u cilju ostvarivanja pouzdane i brze komunikacije u bežičnim komunikacijskim sustavima. Prijenos signala bežičnim komunikacijskim kanalom odvija se u specifičnoj okolini koja podrazumijeva prisustvo velikog broja različitih prepreka, koje mogu biti pokretne i nepokretne pri čemu iste dovode do niza pojava koje utječu na kvalitetu komunikacije, prijenosnu brzinu signala, kao i na maksimalni domet mreže. Kombinacija prijenosnih tehnologija zasnovanih na OFDMA-u s relejnim tehnikama omogućava priliku za razvoj bežičnih komunikacijskih mreža sljedeće generacije u kojima su zadovoljeni zahtjevi za velikim prijenosnim brzinama, povećanim dometom te poboljšanom spektralnom efikasnošću i mrežnom stabilnosti. Navedeno iziskuje pažljivi dizajn algoritama dodjele resursa, algoritama odabira releja te racionalno korištenje ukupne dostupne snage, pri čemu se kao cilj zajedničke optimizacije istih može postići što veća prijenosna brzina uz što manju uloženu snagu, a pri tome voditi računa o pravednosti sustava i ispunjavanju individualnih korisničkih zahtjeva za kvalitetom usluge.

Iako danas postoji velik broj znanstvenih radova koji se bave problematikom relejnih mreža zasnovanih na sustavima OFDMA te su napravljene mnoge analize performansi relejnih mreža ipak postoji veliki broj još uvijek otvorenih pitanja koja se nameću kao bitan čimbenik u daljnjem povećanju prijenosnih brzina i kvalitete usluge. Iz danog pregleda područja istraživanja jasno je da su, u svrhu iskorištavanja prednosti OFDMA temeljenih relejnih mreža, postojeća istraživanja ponajviše usmjerena na: (i) metode procjene stanja kanala, (ii) algoritme odabira relejnih postaja u višerelejnim sustavima, (iii) efikasne algoritme dodjele resursa s ciljem postizanja što većih prijenosnih brzina uz minimizaciju snage predajnika.

Disertacija sadrži nekoliko znanstvenih doprinosa. Prvi je doprinos metoda procjene bežičnog kanala zasnovana na postupcima interpolacije i tehnike suradničkog filtriranja (CF). Tehnike suradničkog filtriranja, koje se koriste u preporučiteljskim sustavima, u svrhu predviđanja nepoznatih vrijednosti za određene korisnike na temelju poznatih vrijednosti grupe sličnih korisnika, imaju sposobnost preciznog predviđanja na temelju malog broja poznatih podataka u kratkom vremenu. Navedeno je vrlo korisno u sustavima OFDMA, gdje se istodobno u kratkom vremenu mora procijeniti stanje kanala za veliki broj korisnika. Predložena metoda procjene kanala manje je osjetljiva na broj i lokaciju pilot podnosilaca. Rezultati simulacije pokazuju da u usporedbi s uobičajenim metodama procjene kanala, predložena metoda poboljšava metriku točnosti predviđanja za scenarije s malim brojem pilot podnosilaca. Također, predložena metoda za procjenu kanala pogodna je za distribuciju u sustavima OFDMA s nepravilnim rasporedom pilotskih podnosilaca. Drugi ključni doprinos su predloženi algoritmi za odabir statičkog i mobilnog releja u OFDMA relejnim mrežama koji se oslanjaju na KD-stablo i redukciju na problem dodjele (AP) s ciljem smanjenja ukupne udaljenost između korisnika i bazne postaje. Koncept statičkih i mobilnih releja često se koristi za poboljšanje prijenosne brzine korisnika u bežičnim komunikacijskim mrežama, koje bi inače trpjele zbog velikih udaljenosti, smetnji, prepreka i fedinga. Prema rezultatima simulacija najučinkovitiji algoritam temeljen je na strukturi podataka KD-stablo, koja se koristi za brzo pronalaženje bliskih točaka, dok s druge strane algoritam AP daje tražene manje udaljenosti uz nedostatak dulje potrebnog vremena računanja samog odabira relejn postaje. Naposljetku, kao treći znanstveni doprinos predložen je algoritam za dodjelu podnosilaca koji grupira podnosioc uzlaznog OFDMA kanala u statički odsječak koji se koristi za statičke releje i dinamički odsječak koji se koristi za mobilne releje i izravne korisnike. Dinamička dodjela se obavlja *na rubu* mreže u stvarnom vremenu, dok se statička dodjela može povremeno obavljati u strukturi mreže zasnovanoj na računarstvu u oblaku. Rezultati simulacije pokazuju da je predložena strategija dodjele podnosilaca s pohlepnim (*Greedy*) algoritmom brža i prikladnija za dinamičku dodjelu, dok strategija dodjele podnosilaca s implementiranim algoritmom AP ipak daje nešto veće prijenosne brzine te bi se trebala koristiti za statičku dodjelu.

Ovo je istraživanje na neki način samo otvorilo vrata jednom novom pravcu, a potencijal za budući rad je zaista velik. Naime, procjena bežičnog kanala putem tehnika suradničkog filtriranja pokazala se prikladnom za sustave OFDMA, naročito kada se radi o složenim i

dinamičnim komunikacijskim okruženjima. Iako tehnika suradničkog filtriranja, koja je dobro poznata tehnika u sustavima preporuka i analizi podataka, ne spada u konvencionalne tehnike procjene kanala, ista se može prilagoditi te pronaći primjene u optimizaciji dodjele resursa i poboljšanju korisničkog iskustva uz naglasak na energetske efikasnost za nove primjene relejnih sustava u mrežama OFDMA, uključujući IoT, pametne gradove, povezane automobile i industrijske aplikacije. Svaki od ovih scenarija postavlja svoje specifične izazove i zahtjeve. U odabiru i pravilnom raspoređivanju resursa, cilj je optimizirati izvedbu mreže, povećati kapacitet i smanjiti interferenciju signala. Različiti algoritmi i metode mogu se primijeniti ovisno o specifičnostima mreže i zahtjevima korisnika. Buduća istraživanja u ovom području trebala bi biti usmjerena na razvoj složenijih i naprednijih algoritama, poput primjene strojnog učenja (neuronske mreže i tehnike podržanog učenja) za automatski odabir optimalnog releja, ovisno o kvaliteti kanala, trenutnom opterećenju i energetske resursima, a koji će pružiti optimalne rezultate u raznovrsnim okruženjima bežičnih mreža OFDMA. S obzirom da će buduće mreže biti vrlo heterogene, s različitim vrstama uređaja, frekvencijskim pojasevima i mrežnim tehnologijama, algoritmi dodjele resursa moraju biti prilagodljivi i sposobni za upravljanje ovom složenošću. Jedno od mogućih rješenje će svakako biti i lokalna dodjela resursa na rubu mreže, kako bi se smanjilo kašnjenje i poboljšale brzine obrade podataka.

## LITERATURA

- [1] M. Zheng, Z. ZhengQuan, D. ZhiGuo, F. PingZhi, L. HengChao, "Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives", *Science China Information Sciences*, Vol. 58 (4), 2015, str. 1-20.
- [2] S. Alam, J. W. Mark, X. Shen, "Relay Selection and Resource Allocation for Multi-User Cooperative OFDMA Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 12, No. 5, 2013., str. 2193-2205.
- [3] W. Zhuang, M. Ismail, "Cooperation in wireless communication networks", *IEEE Wireless Communications.*, Vol. 19, No. 2, 2012., str. 10–20.
- [4] M. Salem, A. Adinoyi, M. Rahman, H. Yanikomeroğlu, D. Falconer, Y. Kim, E. Kim, Y. Cheong, "An Overview of Radio Resource Management in Relay-Enhanced OFDMA-Based Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 12, No. 3, 2010., str. 422-438.
- [5] S. Sadr, A. Anpalagan, K. Raahemifar, "Radio Resource Allocation Algorithms for the Downlink of Multiuser OFDM Communication Systems", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 11, No. 3, 2009., str. 92-106.
- [6] G. Šišul, "Odabrana poglavlja elektroničkih komunikacija - fizički sloj", nastavni tekst - predavanja iz predmeta: Elektroničke komunikacije, dostupno na: <https://www.fer.unizg.hr/predmet/elekom/materijali> (24. siječnja 2024.).
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband", Second Edition, Elsevier Ltd., Oxford, 2014.
- [8] A. Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University Press, 2005.
- [9] I. Ramljak, "Metoda detekcije energije u MIMO-OFDM kognitivnim radijskim mrežama primjenom tehnike kombiniranja kvadriranih prijemnih signala", doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i

- brodogradnje, Split, Hrvatska, 2023.
- [10] H. Hassan Al-Tous, "Resource allocation for wireless relay networks", doktorski rad, United Arab Emirates University, College of Engineering, UAE, 2014.
- [11] J. G. Proakis, M. Salehi, "Digital Communications", Fifth Edition, McGraw-Hill Education, 2007.
- [12] I. Najm, M. Ismail, G. Abed, "High-Performance Mobile Technology LTE-A using the Stream Control Transmission Protocol: A Systematic Review and Hands-on Analysis", *Journal of Applied Sciences* (19), 2014., str. 2194-2218.
- [13] A. S. Kurdija, M. Smiljanić, Ž. Ilić, "A chunk and power allocation algorithm for proportional fairness in OFDMA relay networks", *Wireless Networks (The Journal of Mobile Communication, Computation and Information)*, Vol 22, Issue 8, 2016., str. 2741–2751.
- [14] F. Lemić, "Algoritmi raspodjele potkanala, bitova i snage u višekorisničkim ofdma sustavima" diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, Hrvatska, 2012.
- [15] D. Sinanović, G. Šišul, B. Modlic, "Comparison of BER characteristics of OFDM and SC-FDMA in frequency selective channels," 18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, Sarajevo, Bosna i Hercegovina, 2011., str. 1-4.
- [16] K. J. Ray Liu, A.K. Sadek, W. Su, A. Kwasinski, "Cooperative communications and networking", Cambridge university Press, 2009.
- [17] M. Tao and Y. Liu, "A Network Flow Approach to Throughput Maximization in Cooperative OFDMA Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 12, No. 3, 2013., str. 1138-1148.
- [18] Y. Yang, H. Hu, J. Xu, G. Mao, "Relay technologies for WiMAX and LTE-Advanced mobile systems", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, No. 10, 2009., str. 100-105.
- [19] L. Song, Y. Li, Z. Han, "Resource Allocation in Full-Duplex Communications for Future Wireless Networks", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 22, No. 4, 2015.,

- str. 88-96.
- [20] M. Pejanovic-Djurisic, E. Kocan, R. Prasad, "OFDM Based Relay Systems for Future Wireless Communications", River publishers, New York, 2012.
- [21] A. Caplić, Ž. Ilić, "Poboljšanje performansi bežičnih mreža korištenjem relejnih postaja", 36th International convention MIPRO, 2013., str. 1643-1648.
- [22] T. Chiu-Yam Ng, W. Yu, "Joint Optimization of Relay Strategies and Resource Allocations in Cooperative Cellular Networks", IEEE Journal on selected areas in Communications, Vol. 25, No. 2, 2007., str. 328-339.
- [23] T. Jamal, P. Mendes, "Relay selection approaches for wireless cooperative networks," 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Niagara Falls, ON, Canada, 2010., str. 661-668.
- [24] V. K. Shah, A. P. Gharage, "A Review on Relay Selection Techniques in Cooperative Communication", International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Vol. 2, No. 5, 2012., str. 65-69.
- [25] H. Adam, C. Bettstetter, S. M. Senouci, "Adaptive Relay Selection in Co-operative Wireless Networks", 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Cannes, France, 2008., str. 1-5.
- [26] H. Shan, W. Z. P. Wang, Z. Wang, "Cross-layer Cooperative Triple Busy Tone Multiple Access for Wireless Networks", IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, USA, 2008., str. 1-5.
- [27] Z. Zhou, S. Zhou, J. Cui, S. Cui, "Energy-Efficient Cooperative Communications based on Power Control and Selective Relay in Wireless Sensor Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 7, No. 8, 2008., str. 3066-3078,
- [28] N. Odeh, "Resource allocation for multi-cell OFDMA based cooperative relay network", doktorski rad, University of Technology, Sydney, Faculty of Engineering and Information Technology, 2014.
- [29] Z. Shen, J. G. Andrews, B. L. Evans, "Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems With Proportional Rate Constraints", IEEE Transactions on

- Wireless Communications, Vol. 4, No. 6, 2005., str. 2726-2737.
- [30] F. Shams, G. Bacci, M. Luise, "A survey on resource allocation techniques in OFDM(A) networks", *Computer Networks*, Vol. 65, 2014., str. 129-150.
- [31] J. Huang, V. Subramanian, R. Arawal, R. Berry, "Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 1, 2006., str. 1272–1279.
- [32] H. Yin, H. Liu, "An efficient multiuser loading algorithm for OFDM based broadband wireless systems", *Globecom '00 - IEEE. Global Telecommunications Conference*, San Francisco, USA, Vol. 1, 2000., str. 103–107.
- [33] J. Jang, K. B. Lee, "Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, No. 2, 2003., str. 171–178.
- [34] L. Xiao, T. Zhang, Y. Zhu, L. Cuthbert, "Two-hop subchannel scheduling and power allocation for fairness in OFDMA relay networks", *2009 fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, Cannes/La Bocca, Francuska, 2009., str. 267-271.
- [35] M. Herdin, "A chunk based OFDM amplify-and-forward relaying scheme for 4G mobile radio systems", *2006 IEEE International Conference on Communications*, Istanbul, Turska, 2006., str. 4507-4512.
- [36] Y. Shen, G. Feng, B. Yang, X. Guan, "Resource allocation with proportional rate fairness in orthogonal frequency division multiple access relay networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2014., str. 269–283.
- [37] S. Mallick, "Resource Optimization in Relay Based Cooperative Wireless Systems Under Channel Uncertainty", doktorska disertacija, University of British Columbia, Kanada, 2014.
- [38] A. Katalinić Mucalo, "Referentni deterministički model obostrano usmjerenog radiokanala", doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, Hrvatska, 2013.
- [39] G. Šišul, "Mobilne komunikacije - 3. predavanje", nastavni tekst iz predmeta:

- Mobilne komunikacije, 2023., dostupno na: [https://www.fer.unizg.hr/predmet/mobkom\\_b/materijali#%23!p\\_rep\\_138104!\\_-204599](https://www.fer.unizg.hr/predmet/mobkom_b/materijali#%23!p_rep_138104!_-204599) (24. siječnja 2024.).
- [40] M. Bosiljevac, S. Grgić, G. Šišul, D. Bosinjac, "Prijenos digitalnog signala u osnovnom pojasu frekvencija", nastavni tekst iz predmeta: Komunikacijski sustavi, 2021., dostupno na: [https://www.fer.unizg.hr/predmet/komsus/materijali#%23!p\\_rep\\_121873!\\_-185843](https://www.fer.unizg.hr/predmet/komsus/materijali#%23!p_rep_121873!_-185843) (24. siječnja 2024.).
- [41] N. Marchenko, "Resource-Efficient Relay Selection in Cooperative Wireless Networks", doktorska disertacija, Institute of Networked and Embedded Systems, University of Klagenfurt, Austrija, 2013.
- [42] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, "LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice", John Wiley & Sons Ltd., Ujedinjeno Kraljevstvo, 2009.
- [43] A. F. Molisch, "Wireless Communications", 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd., Ujedinjeno Kraljevstvo, 2011.
- [44] R. Agaiby, "Performance Evaluation of Multi-Hop Multi-branch Hybrid AF/DF Relaying Networks", diplomski rad, Information Engineering and Technology Faculty, The German University in Cairo, Egipat, 2020.
- [45] J. Li, A. Bose, Y. Q. Zhao, "Rayleigh Flat Fading Channels' Capacity", IEEE Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR'05), Halifax, Kanada, 2005., str. 214-217.
- [46] V. Kovačević, U. Urošević, Z. Veljović, "Channel estimation techniques for MIMO-OFDM system", Tehnika, Vol. 70, No. 1, 2015., str. 112-117.
- [47] P. Ganesan, R. Jeya, B. Amutha, "Literature survey on lte downlink channel estimation techniques", International journal of pharmacy and technology (IJPT), Vol. 9, No. 1, 2017., str. 29173-29180.
- [48] S. Adegbite, B. G. Stewart, S. G. McMeekin, "Least Squares Interpolation Methods for LTE System Channel Estimation over Extended ITU Channels", International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 3, No. 4, 2013., str. 414-



- 418.
- [49] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, A. Bahai, "A Study of Channel Estimation in OFDM Systems", In proceedings of 56th Vehicular Technology Conference, Vancouver, Kanada, Vol. 2, 2002., str. 894-898.
- [50] D. V. Adakane, K. Vasudevan, "An efficient pilot pattern design for channel estimation in OFDM systems", IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPC), Solan, India, 2013., str. 1-5.
- [51] A. Laraki, D. El Ouadghiri, A. Jamali, "LTE standard: channel estimation algorithms from the base station to the terminal", Journal of Theoretical & Applied Information Technology, Vol. 68, No. 1, 2014., str. 191-200.
- [52] Y. Acar, H. Dogan, E. Panayirci, "Pilot Symbol Aided Channel Estimation for Spatial Modulation-OFDM Systems and its Performance Analysis with Different Types of Interpolations", Wireless Personal Communications, Vol. 94, No. 3, 2017., str. 1387–1404.
- [53] P. Fertl, G. Matz, "Channel Estimation in Wireless OFDM systems with irregular pilot distribution", IEEE Transactions on signal processing, Vol. 58, No. 6, 2010., str. 3180 - 3194.
- [54] L. Candillier, F. Meyer, M. Boull, "Comparing State-of-the-Art Collaborative Filtering Systems", In Proceedings of the 5th international conference on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition, Leipzig, Njemačka, 2007., str. 548 – 562.
- [55] G. Linden, B. Smith, J. York, "Amazon.com recommendations: item-to-item collaborative filtering", IEEE Internet Computing, Vol. 7, No. 1, 2003., str. 76-80.
- [56] X. Su, T. M. Khoshgoftaar, "A Survey of Collaborative Filtering Techniques", Advances in Artificial Intelligence, Vol. 2009, Article ID 421425, 2009., str. 1-19.
- [57] V. Švedek, A. S. Kurdija, Ž. Ilić, "Wireless channel estimation in OFDM systems based on collaborative filtering techniques", Journal of Electrical Engineering, Vol. 70, No. 3, 2019., str. 244–252.
- [58] K. Fazel, S. Kaiser, "Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and

- MC-CDMA to LTE and WiMAX", 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd., Ujedinjeno Kraljevstvo, 2008.
- [59] R. Hajizadeh, K. Mohamedpor, M.R. Tarihi, "Channel Estimation in OFDM System Based on the Linear Interpolation, FFT and Decision Feedback", In Proceedings of 18th Telecommunications forum TELFOR 2010, Beograd, Srbija. 2010., str. 484-488.
- [60] S. Lee, H. Hung, J. Wen, "A New Interpolation Method for Channel Estimation of OFDM Systems", In Proceedings of TENCON 2005 IEEE Region 10 Conference, Melbourne, Australija, 2005., str. 1-5.
- [61] R. Verma, S. Moghe, "A Survey on Pilot Symbol Assisted Channel Estimation in OFDM Systems", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 5, No. 8, 2016., str. 316-320.
- [62] P. Sure, C. M. Bhuma, "A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 20, No. 2, 2017., str. 629-636.
- [63] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, A. Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48, No. 3, 2002., str. 223-229.
- [64] M. K. Ozdemir and H. Arslan, "Channel estimation for wireless ofdm systems", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 9, No. 2, 2007., str. 18-48.
- [65] Y. Shen, E. Martinez, "Channel Estimation in OFDM Systems", Freescale semiconductor Application Note AN3059, 2006., dostupno na: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3059.pdf> (24. siječnja 2024.).
- [66] M. Rana, J. Kim, J., W. Cho, "Low Complexity Downlink Channel Estimation for LTE Systems", In Proceedings of 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Južna Koreja, 2010., str. 1198-1202.
- [67] Y. Soo Cho, J. Kim, W. Yang, C. Kang, "MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB", John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2010.
- [68] M. Hsieh, C. Wei, "Channel estimation for OFDM systems based on comb-type

- pilot arrangement in frequency selective fading channels", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 44, No. 1, 1998., str. 217-225.
- [69] M. Henkel, C. Schilling, W. Schroer, "Comparison of Channel Estimation Methods for Pilot Aided OFDM Systems", 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring, Dublin, Irska, 2007., str. 1435-1439
- [70] X. Wang, K. J. R. Liu, "OFDM channel estimation based on time-frequency polynomial model of fading multipath channels", GLOBECOM'01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No.01CH37270), San Antonio, USA, 2001., str. 212-216.
- [71] S. G. Kang, Y. M. Ha, E. K. Joo, "A comparative investigation on channel estimation algorithms for OFDM in mobile communications", in IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 49, No. 2, 2003., str. 142-149.
- [72] M. Kurtoić, "Programski modul za preporučivanje sadržaja na web-portalima", diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2016.
- [73] F. Cacheda, V. Carneiro, D. Fernandez, V. Formoso, "Comparison of Collaborative Filtering Algorithms: Limitations of Current Techniques and Proposals for Scalable, High-Performance Recommender Systems", Journal Transactions on the Web (TWEB), Vol. 5, No. 1, 2011., str. 1-33.
- [74] B. Sarwar, G. Karypis, J. Konstan, J. Riedl, "Item-Based Collaborative Filtering Recommendation Algorithms", Proceedings of the 10th international conference on World Wide Web (WWW10), Hong Kong, 2001., str. 285-295.
- [75] J. S. Breese, D. Heckerman, C. Kadie, "Empirical Analysis of Predictive Algorithms for Collaborative Filtering", Proceedings of the 14th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, Wisconsin, USA, 1998., str. 43-52.
- [76] S.Najafi, Z. Salame, "Evaluating Prediction Accuracy for Collaborative Filtering Algorithms in Recommender Systems", Student thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2016., dostupno na <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:927356/FULLTEXT01.pdf>.

- [77] P. Resnick, N. Iacovou, M. Suchak, P. Bergstrom, J. Riedl, "GroupLens: an open architecture for collaborative filtering of netnews", Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, North Caroline, USA, 1994., str. 175–186.
- [78] T. Chai, R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature", Geoscientific Model Development, Vol. 7, No. 3, 2014., str. 1247-1250.
- [79] P. Ramezani, Y. Zeng, A. Jamalipour, "Optimal resource allocation for multiuser internet of things network with single wireless-powered relay", IEEE Internet of Things Journal, Vol. 6, No. 2, 2019., str. 3132–3142.
- [80] N. Zhao, F. Hu, Z. Li, Y. Gao, "Simultaneous wireless information and power transfer strategies in relaying network with direct link to maximize throughput", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 67, No. 9, 2018., str. 8514–8524.
- [81] J. Xu, H. Niu, T. Zhao, X. Gao, J. Ye, C. Liang, Z. Liu, J. Liang, "Robust Optimal Power Control and Subcarrier Allocation in Uplink OFDMA Network With Assistance of Mobile Relay", IEEE Access, Vol. 9, 2021., str. 57475–57485.
- [82] I. Baştürk, Y. Chen, "Energy-Efficiency for MISO-OFDMA Based User-Relay Assisted Cellular Networks", IEEE Systems Journal, Vol. 14, No. 4, 2020., str. 5274-5283.
- [83] S. Singh, G. Dubey, R. Shrivastava, "A comparative analysis of assignment problem", IOSR Journal of Engineering, Vol. 2, No. 8, 2012., str. 01–15.
- [84] J. L. Bentley, "Multidimensional binary search trees used for associative searching", Communications of the ACM, Vol. 18, No. 9, 1975., str. 509–517.
- [85] Q. Luo, S. Hu, C. Li, G. Li, W. Shi, "Resource Scheduling in Edge Computing: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 23, No. 4, 2021., str. 2131-2165.
- [86] A. Sarah, G. Nencioni, M. M. I. Khan, "Resource Allocation in Multi-access Edge Computing for 5G-and-beyond networks", Computer Networks, Vol. 227, No. C, 2023.

- [87] A. S. Kurdija, Ž. Ilić, G. Šišul, "Unequal-Slot Based Data Rate Maximization Algorithm for Multiuser OFDMA Systems", *IEEE Communications Letters*, Vol. 16, No. 5, 2012., str. 682–684.
- [88] V. Švedek, A. S. Kurdija, Ž. Ilić, "Static and Mobile Relay Selection with Chunk-Based Subcarrier Allocation in Uplink OFDMA Networks", *Proceedings ELMAR-2023: 65th International Symposium ELMAR-2023, Zadar, Hrvatska, 2023.*, str. 137-140.
- [89] H. W. Kuhn, "The hungarian method for the assignment problem", *Naval research logistics quarterly*, Vol. 2, No. 1-2, 1955., str. 83–97.
- [90] P. Ćustić, "Poopćeni problem dodjeljivanja", diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2017.
- [91] H. Lesar, "Izrada programske aplikacije za rješavanje problema raspoređivanja pomoću mađarske metode", završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike, Varaždin, 2022.
- [92] S. Najeh, H. Besbes, A. Bouallegue, "Greedy Algorithm for Dynamic Resource Allocation in Downlink of OFDMA System", *2005 2nd International Symposium on Wireless Communication Systems*, Siena, Italija, 2005., str. 475-479.

## POPIS SLIKA

---

Slika 1.1	Istodobni prikaz OFDM signala u vremensko-frekvencijskoj domeni [6].....	5
Slika 1.2	Ilustracija slaganja potkanala u frekvencijskoj domeni [6].....	6
Slika 1.3	Ciklički prefiks .....	7
Slika 1.4	Blok dijagram OFDM sustava [9] .....	8
Slika 1.5	OFDMA višestruki pristup [6] .....	11
Slika 1.6	OFDM i OFDMA [12] .....	11
Slika 1.7	Prikaz mrežne arhitekture s jednim relejem .....	14
Slika 1.8	Faze komunikacije u relejnim mrežama.....	15
Slika 1.9	Prikaz mrežne arhitekture s više relejnih postaja .....	16
Slika 1.10.	Tipovi releja [18].....	17
Slika 1.11	AF relejni kanal s prikazom faza komunikacije .....	19
Slika 1.12	DF relejni kanal s prikazom faza komunikacije .....	20
Slika 2.1	Bežični komunikacijski kanal.....	39
Slika 2.2	Primjer višestaznog širenja signala [39].....	39
Slika 2.3	Utjecaj komunikacijskog kanala na impuls [6] .....	41
Slika 3.1	Glavne metode razmještanja pilotskih simbola za procjenu OFDM kanala .....	54
Slika 3.2	Shema CF procesa [74] .....	59
Slika 3.3	Dijagram toka predložene metode procjene kanala.....	64
Slika 3.4	RMSE za predložene metode interpolacije .....	67
Slika 3.5	RMSE s obzirom na ukupnu prosječnu gustoću matrice za predloženu CF/Lin metodu interpolacije (za različite vrijednosti praga odluke C).....	68
Slika 3.6	RMSE s obzirom na ukupnu prosječnu gustoću matrice za predloženu CF/Splajn metodu interpolacije (za različite vrijednosti praga odluke C).....	69
Slika 3.7	RMSE s obzirom na ukupnu prosječnu gustoću matrice za predloženu CF/Polinom metodu interpolacije (za različite vrijednosti praga odluke C).....	69

Slika 3.8	RMSE u ovisnosti o broju grupa sličnih korisnika u generiranoj matrici za vrijednost praga odluke $C=5\%$ .....	70
Slika 3.9	RMSE u ovisnosti o broju grupa sličnih korisnika u generiranoj matrici za vrijednost praga odluke $C=10\%$ .....	71
Slika 3.10	RMSE u ovisnosti o broju grupa sličnih korisnika u generiranoj matrici za vrijednost praga odluke $C=15\%$ .....	71
Slika 4.1	Model promatranog sustava .....	77
Slika 4.2	Primjer traženja $k = 3$ najbliže točke (min. $d_{i,j}$ ) u KD-stablu.....	79
Slika 4.3	Dodjela potkanala zasnovana na odsječcima.....	83
Slika 4.4	Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za prosječne udaljenosti u scenariju A .....	85
Slika 4.5	Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za prosječne udaljenosti u scenariju B .....	85
Slika 4.6	Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za prosječne udaljenosti u scenariju C .....	86
Slika 4.7	Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za potrebno vrijeme odabira releja (scenarij A) .....	87
Slika 4.8	Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za potrebno vrijeme odabira releja (scenarij B) .....	87
Slika 4.9	Algoritmi odabira releja – rezultati simulacije za potrebno vrijeme odabira releja (scenarij C) .....	87
Slika 4.10	Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na vrijeme izvođenja dodjele (scenarij A) .....	90
Slika 4.11	Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na vrijeme izvođenja dodjele (scenarij B) .....	90
Slika 4.12	Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na vrijeme izvođenja dodjele (scenarij C) .....	90
Slika 4.13	Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na postignutu prijenosnu brzinu (scenarij A).....	91
Slika 4.14	Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na postignutu prijenosnu brzinu (scenarij B) .....	91

Slika 4.15 Algoritmi dodjela potkanala zasnovani na odsječcima – rezultati simulacije u odnosu na postignutu prijenosnu brzinu (scenarij C)..... 92



## **POPIS TABLICA**

---

Tablica I Pregled tehnika suradničkog filtriranja .....	60
Tablica II Parametri simulacije strategije odabira releja.....	85
Tablica III Parametri simulacije dodjele potkanala zasnovana na odsječcima .....	89

## POPIS KRATICA

---

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AF	Amplify and Forward
AP	Assignment Problem
AWGN	Additive White Gaussian noise
BER	Bit Error Rate
CF	Collaborative Filtering
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel-State Information
DF	Decode and Forward
FD	Full-Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
HD	Half-Duplex
ICI	Intercarrier Interference
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transformation
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IoT	Internet of Things
ISI	Intersymbol Interference
KD-tree	K-Dimensional Tree
LOS	Line of Sight
LS	Least Square
MAE	Mean Absolute Error
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMSE	Minimum Mean-Square
NLS	Non Line-of-Sight

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
QoS	Quality of Service
RMSE	Root Mean Squared Error
S/N	Signal/Noise
SNR	Signal to Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access

## ŽIVOTOPIS

Velimir Švedek rođen je u Zagrebu 1980. Srednju školu pohađao je u Zagrebu, gdje je i maturirao u matematičkoj gimnaziji 1999. Iste godine upisuje studij na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, smjer telekomunikacije i informatika. Diplomirao je u lipnju 2004. s temom „Organizacija GPRS mobilne mreže“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Mladena Tkalića. Također na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, 2016. godine upisuje poslijediplomski doktorski studij pod mentorstvom prof. dr. sc. Željka Ilića.

Od 2005. radi u Hrvatskoj regulatornoj agenciji za mrežne djelatnosti u Odjelu komunikacijskih usluga, koji se između ostalog bavi praćenjem razvoja i nadziranjem kakvoće pružanja elektroničkih komunikacijskih usluga, očuvanjem mrežne neutralnosti, osiguravanjem sigurnosti i cjelovitosti ugovorenih elektroničkih komunikacijskih usluga te upravljanjem adresnim i brojevnim prostorom. Također je aktivno sudjelovao u radu CEPT-ovih (Europske konferencije poštanskih i telekomunikacijskih uprava) i BEREC-ovih (Tijelo europskih regulatora za elektroničke komunikacije) radnih grupa, a čiji je zadatak kroz izradu i donošenje mišljenja, preporuka i smjernica osigurati dosljednu primjenu regulatornog okvira Europske unije nastojeći promicati konkurenciju, inovacije i učinkovito ulaganje u razvoj telekomunikacijskog tržišta, te istovremeno promicati i štititi interese potrošača.

U sklopu znanstveno-istraživačkog rada na poslijediplomskom studiju, objavio je nekoliko znanstvenih radova na međunarodnim konferencijama i u časopisu s međunarodnom recenzijom.

## POPIS RADOVA

Časopis s međunarodnom recenzijom:

1. V. Švedek, A. S. Kurdija, Ž. Ilić, "Wireless channel estimation in OFDM systems based on collaborative filtering techniques", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 70, no. 3, 2019., str. 244-252, dostupno na <https://doi.org/10.2478/jee-2019-0033> (24. siječnja 2024).

Znanstveni skupovi s međunarodnom recenzijom:

1. V. Švedek, A. S. Kurdija, Ž. Ilić, "Static and Mobile Relay Selection with Chunk-Based Subcarrier Allocation in Uplink OFDMA Networks", *Proceedings ELMAR-2023: 65th International Symposium ELMAR-2023, Zadar, Hrvatska, 2023*, str. 137-140.
2. V. Mikac, Ž. Ilić, M. Šilić, G. Jurin, V. Švedek, "Coexistence of G.fast and VDSL2 systems in copper access networks", *23rd Workshop on information and communication technologies, Split, Hrvatska, 2017.*, str. 1-5.
3. V. Mikac, Ž. Ilić, G. Jurin, V. Švedek, "Vectored VDSL2: Theoretical possibilities on quad cables", *13th International Conference on Telecommunications (ConTEL), Graz, Austrija, 2015*, str. 1-5.
4. V. Mikac, Ž. Ilić, T. Beriša, A. Bažant, M. Kos, G. Jurin, V. Švedek, "Capacity analysis of RT-based VDSL2 copper access networks", *22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, Hrvatska, 2014*, str. 165-169.
5. Z. Jukić, M. Weber, V. Švedek, M. Vuković, D. Katušić, G. Ježić, "Technical aspects of network neutrality," *Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications, Graz, Austrija, 2011.*, str. 405-410.

6. V. Švedek, G. Jurin, M. Weber, "Increasing availability of broadband access over copper network infrastructure", 2011 Proceedings of the 34th International Convention MIPRO, Opatija, Hrvatska, 2011., str. 407-412.

## **BIOGRAPHY**

Velimir Švedek was born in 1980 in Zagreb. He attended elementary school in Zagreb, where he also finished high school in 1999. The same year he started his studies at the Faculty of electrical engineering and computing at University of Zagreb. He graduated in June 2004, defending the graduate thesis "Organization of the GPRS mobile network" under the supervision of prof. dr. sc. Mladen Tkalić. In the year 2016 he began postgraduate study in the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing under the supervision of prof dr. sc. Željko Ilić.

In 2005 he started working in the Communications Services Department at Croatian Regulatory Authority for Network Industries (HAKOM), dealing mostly with monitoring the development and the quality of electronic communication services, preserving network neutrality, ensuring the security and integrity of electronic communication services and managing addressing and numbering resources. He was also engaged in work of the CEPT and BEREC working groups which are responsible for adopting opinions, recommendations, guidelines or advices in order to ensure a consistent application of the European Union regulatory framework and by aiming to promote competition and efficient investment, contributing to the development of the internal market with goal to bring greater benefits to consumers and businesses.

As part of the scientific-research work at the post-graduate study, he published several scientific papers at international conferences proceedings and in a journal with an international review.