

Primjena Wi-Fi tehnologije u funkciji brojanja putnika javnog gradskog prijevoza

Fabrični, Lea

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:026721>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Lea Fabrični

**PRIMJENA WI-FI TEHNOLOGIJE U FUNKCIJI
BROJANJA PUTNIKA JAVNOG GRADSKOG PRIJEVOZA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2022.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**PRIMJENA WI-FI TEHNOLOGIJE U FUNKCIJI BROJANJA
PUTNIKA JAVNOG GRADSKOG PRIJEVOZA**

**WI-FI TECHNOLOGY APPLICATIONS IN PUBLIC
TRANSPORT PASSENGER COUNTING**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivan Grgurević

Student: Lea Fabrični

JMBAG: 0135255751

Zagreb, rujan 2022.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET
PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, 4. svibnja 2022.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Računalne mreže**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6875

Pristupnik: **Lea Fabrični (0135255751)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Primjena Wi-Fi tehnologije u funkciji brojanja putnika javnog gradskog prijevoza**

Opis zadatka:

U završnom radu je potrebno dati pregled postojećih istraživanja na temu primjene Wi-Fi tehnologije u funkciji brojanja putnika javnog gradskog prijevoza. Opisati razvoj Wi-Fi tehnologija i sustava brojanja putnika u javnom gradskom prijevozu. Analizirati mogućnosti primjene Wi-Fi-ja u javnom gradskom prijevozu. Izraditi studiju slučaja (case study) na temelju primjera brojanja putnika u kontroliranim uvjetima korištenjem Wi-Fi tehnologije.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Ivan Graurević

PRIMJENA WI-FI TEHNOLOGIJE U FUNKCIJI BROJANJA PUTNIKA JAVNOG GRADSKOG PRIJEVOZA

SAŽETAK

Javni gradski prijevoz kompleksan je sustav koji se sastoji od infrastrukture, voznog parka, zaposlenog osoblja i putnika. Za pravilno funkcioniranje potrebne su analize i istraživanja svih aspekata ovog sustava. Jedna od analiza koja se provodi je brojanje putnika kako bi se mogao prilagoditi vozni red, povećati ili smanjiti broj prijevoznih sredstava i u nekom trenutku proširiti postojeća infrastruktura. Načini brojanja putnika dijele se na ručno i automatsko. Jedan od automatskih načina/metoda utvrđivanja broja putnika, bez potrebe putnikovog sudjelovanja u istom, može se obaviti uz pomoć korištenja mogućnosti Wi-Fi tehnologije. Teorijski dio rada prikazuje i opisuje postojeća istraživanja korištenja Wi-Fi tehnologije u svrhu brojanja putnika, značajke i razvoj Wi-Fi tehnologije te sustave brojanja putnika. Studija slučaja prikazuje primjer implementacije postojećeg koda na mikrokontroler koji omogućava brojanje putnika u kontroliranim uvjetima pomoću Wi-Fi tehnologije.

KLJUČNE RIJEČI: javni gradski prijevoz, brojanje putnika, Wi-Fi tehnologija

WI-FI TECHNOLOGY APPLICATIONS IN PUBLIC TRANSPORT PASSENGER COUNTING

SUMMARY

Urban public transport is a complex system consisting of infrastructure, fleet of vehicles, employees and passengers. In order to have properly functioning system, analysis and research of all its aspects are necessary. One of the analysis that needs to be performed out, for the timetable adjustment, increase or reduce the number of vehicles and at some point expand the existing infrastructure, is the counting of passengers. Counting methods can be divided to manual and automatic. One of the automatic ways/methods of determining the number of passengers, without the need for the passenger's engagement in it, can be done with the usage of developed Wi-Fi technology. The theoretical part of the thesis presents and describes the existing research on the use of the WiFi for the purpose of passenger counting, the features and development of Wi-Fi technology and the passenger counting system. A case study shows an example of the implementation of existing code on microcontroller that enables the counting of passengers under controlled conditions using Wi-Fi technology.

KEYWORDS: urban public transport, passenger counting, Wi-Fi technology

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Pregled postojećih istraživanja	2
3. Razvoj Wi-Fi tehnologija	4
3.1. Standardi 802.11	5
3.1.1. 802.11a standard.....	5
3.1.2. 802.11b standard.....	5
3.1.3. 802.11g standard.....	5
3.1.4. 802.11n standard.....	6
3.1.5. 802.11ac standard.....	6
3.1.6. 802.11ax standard.....	6
3.2. Arhitektura Wi-Fi tehnologija	6
3.2.1. Logička arhitektura Wi-Fi tehnologije	6
3.2.2. Fizička arhitektura Wi-Fi tehnologije	7
3.3. Značajke Wi-Fi tehnologija	8
3.3.1. Radio frekvencijski signal	8
3.3.2. Frekvencije rada Wi-Fi tehnologija.....	10
3.3.3. Sigurnost Wi-Fi mreže	10
3.4. Smjernice razvoja Wi-Fi tehnologije	12
4. Sustavi brojanja putnika u javnom gradskom prijevozu	14
4.1. Ručno brojanje putnika u javnom gradskom prijevozu	14
4.2. Automatsko brojanje putnika u javnom gradskom prijevozu.....	15
4.2.1. Kamere za prepoznavanje lica	16
4.2.2. Eki-Shi-Vision kamera	16
4.2.3. Senzori topline ljudskog tijela	17
4.2.4. Pametne kartice	17
4.2.5. Bluetooth	17
4.2.6. MAC adresa.....	18
5. Mogućnosti primjene Wi-Fi-ja u javnom gradskom prijevozu	19
6. Studija slučaja: Primjer brojanja putnika u kontroliranim uvjetima korištenjem Wi-Fi tehnologije	23
7. Zaključak	35
Literatura	36
Popis kratica i akronima.....	38
Popis slika i tablica	40

1. Uvod

Povećanje broja korisnika javnog gradskog prijevoza dovelo je do potrebe za većim prilagođavanjem voznih redova kako bi pružena usluga bila sukladna zahtjevima putnika. Za omogućavanje navedenog, javlja se potreba za preciznim analizama koje obuhvaćaju točne informacije o broju putnika. To je od iznimne važnosti kako bi se razvoj, promjene i poboljšanja javnog gradskog prijevoza mogle kretati u ispravnom smjeru. Za provedbu mjerenja tj. brojanja putnika, nužno je primijeniti određene tehnike brojanja koje obuhvaćaju nove informacijsko komunikacijske tehnologije kako bi krajnji rezultat bio što egzaktniji.

Dva su glavna načina brojanja putnika, ručno i automatsko brojanje od kojih je automatsko sve više zastupljeno zbog točnosti informacija koje pruža. Razne metode se koriste kao automatsko brojanje, a jedno od njih je brojanje putnika pomoću Wi-Fi tehnologije. Svrha rada je istražiti postojeća istraživanja koja koriste Wi-Fi tehnologiju kao jednu od načina brojanja putnika, opisati sam razvoj navedene tehnologije i prikazati ostale sustave brojanja putnika. Cilj rada je prikazati koje su sve mogućnosti Wi-Fi tehnologije i implementacije koda koji postiže brojanje putnika koristeći navedenu tehnologiju. Rad je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Pregled postojećih istraživanja
3. Razvoj Wi-Fi tehnologija
4. Sustavi brojanja putnika u javnom gradskom prijevozu
5. Mogućnosti primjene Wi-Fi-ja u javnom gradskom prijevozu
6. Studija slučaja: Primjer brojanja putnika u kontroliranim uvjetima
7. Zaključak

U uvodnom dijelu završnog rada dan je pregled teme završnog rada, cilj i svrha te kratki opis poglavlja. U drugom poglavlju dan je pregled postojećih istraživanja koja za brojanje putnika koriste Wi-Fi tehnologiju. Za bolje razumijevanje Wi-Fi tehnologije, treće poglavlje ga kroz opis IEEE standarada, arhitekturu i značajke detaljno objašnjava te daje uvid u daljnji napredak kroz smjernice razvoja. Četvrto poglavlje opisuje sustave brojanja putnika, koji se koriste kako bi se te informacije dalje upotrijebile za planiranje, razvoj i implementaciju javnog gradskog prijevoza. U petom poglavlju detaljnije se opisuju načini i mogućnosti iskorištenja Wi-Fi-ja u svrhu brojanja putnika u javnom gradskom prijevozu. Prikaz implementacije koda koji služi kako bi mikrokontroler bio osposobljen kao uređaj koji će preko Wi-Fi u kontroliranim uvjetima brojati putnike nalazi se u šestom poglavlju. Završno poglavlje sintetizira cjelokupno istraživanje i daje zaključna razmatranja o korištenju Wi-Fi tehnologije kao načina brojanja putnika.

2. Pregled postojećih istraživanja

Bežični pristup Internetu¹ glavni je razlog korištenja Wi-Fi-ja, međutim njegove mogućnosti iskorištene su i za druge svrhe, a jedna od njih je brojanje ljudi/putnika u javnom gradskom prijevozu. Brojna istraživanja provedena su na tu temu kako bi se putniku osigurala nesmetana vožnja do odredišta, a prijevozniku potrebni podaci o količini putnika koja putuje. Dobiveni podaci izrazito su važni radi organizacije i planiranja voznih redova, uvođenja dodatnih linija i prijevoznih sredstava, izgradnje prometne infrastrukture, ali i reduciranje linija tj. ukidanje istih.

Upotreba Wi-Fi tehnologije iskorištena je od strane autora [1] izradom uređaja zvanog iABACUS (engl. *Wi-Fi-based Automatic Bus pAssenger CoUnting System*) čiji je cilj promatranje i analiza urbane mobilnosti praćenjem kretnji putnika tijekom korištenja javnog gradskog prijevoza, bez potrebe da oni poduzmu bilo kakvu radnju. Rezultati testiranja pokazuju da iABACUS učinkovito detektira broj mobilnih uređaja s aktivnim Wi-Fi sučeljem s točnošću do 94 %.

Autori [2] predlažu spajanje MAC² (engl. *Media Access Control*) adresa i podataka GPS³-a (engl. *Global Positioning System*) kako bi rezultati brojanja putnika u autobusu bili točniji, što je i cilj njihovog istraživanja.

Balansiranje opterećenja autobusa zahtijeva informacije o opterećenju, potencijalnom opterećenju putnika na autobusnim stajalištima i stvarnom opterećenju u autobusima. Autori [3] u radu opisuju studiju izvedivosti za mjerenje opterećenja autobusa prikupljanjem Wi-Fi *probe request*⁴ koji šalje mobilni uređaj prilikom traženja pristupne točke (engl. *Access Point*).

Podaci o popunjenosti autobusa, prijevozničke tvrtke mogu upotrijebiti za bolju procjenu potražnje, poboljšanja zadovoljstva kupaca i dugoročne analize u svrhu optimizacije ruta te u slučaju nepredviđenih zastoja tramvaja ili vlakova procjena popunjenosti može pomoći prijevozničkim tvrtkama za raspoređivanje zamjenskih autobusa. Metoda *findProbeWithMatchingMac* u prijevodu pronalazak *probe requesta* s istom MAC adresom korištena je u istraživačkom radu [4].

Na temelju dobivenih podataka ručnim brojanjem putnika i onih dobivenih preko Wi-Fi podatkovnih okvira, autori [5] razvili su statistički model za predviđanje broja putnika koji putuju autobusima kako bi mi se mogla pružiti isplativa i pravovremena usluga.

Autori [6] uvode novi algoritam kojim uklanja Wi-Fi *probe request* ulovljene od uređaja koji se nalaze izvan autobusa tzv. *fine-tuningom*, također opisuje da je potrebno napraviti prilagodbu na temelju statističkog omjera ljudi koji posjeduju mobilni uređaj s omogućenom Wi-Fi mrežom u odnosu na cijelu populaciju kako bi se riješio problem zapisa većeg broja putnika od stvarnog.

Rad napisan od strane autora [7] predlaže procjenu broja putnika analizom jačine signala Wi-Fi *probe requesta* koju šalju mobilni uređaji, klasificirajući ih kao one koji potječu od putničkih uređaja i one koji potječu od neputničkih uređaja pomoću

¹ Internet – globalna mreža za prijenos podataka, koja umrežava milijune računala i pokriva cijeli svijet

² MAC adresa - jedinstvena oznaka mrežnog uređaja [2]

³ GPS - satelitski radionavigacijski sustav za određivanje položaja na Zemlji

⁴ Probe request – zahtjev poslan u obliku upitnog okvira od strane mobitela za spajanje na pristupnu točku [19]

mehanizma za filtriranje. Promatra se RSSI (engl. *Received Signal Strength Indication*) jačina primljenog signala koji je prijemnik primio i vrijeme trajanja signala.

Autori [8] za potvrdu točnosti rezultata dobivenih Wi-Fi-jem koriste rezultate dobivene upotrebom MYKI⁵ pametnih kartica iz čega je zaključeno da se podaci u većini vremena podudaraju. Ovo istraživanje je provedeno na željezničkoj postaji Richmond u Londonu.

Istraživanje provedeno usporedbom detektiranja putnika prikupljanjem Wi-Fi MAC adresa mobilnih uređaja putnika u kontroliranom i nekontroliranom okruženju dalo je uvid u poprilično neujednačene rezultate. Detaljan opis i analizu napravili su autori [9].

Autori u radu [10] povezali su podatke o broju putnika u autobusu, dobivene kamerom i Wi-Fi-jem. Kamera je korištena za preciznije krajnje rezultate broja putnika. Iako je cilj navedenog rada bilježenje ruta putnika i njegove putne navike, metoda rada može se iskoristiti također i za brojanje putnika.

Prikupljanje pasivnih *probese Wi-Fi-ja* koje šalje putnikov mobilni uređaj, iskorišten je s ciljem praćenja, optimizacije i personalizacije javnog gradskog prijevoza prema održivijoj mobilnosti što je bila zamisao autora [11]. Podaci se analiziraju po vozilu i njegovom zaustavljanju te se uspoređuju s podacima dobivenim od prodaje karata, također se koristi metoda procjene izlaska putnika, otkrivanja vršnog opterećenja vozila i navika putnika (polazišta i odredišta).

Rad je napravljen od strane autora [12] koji opisuje metode prikupljanja Wi-Fi podataka i prikazuje dokaze o korisnosti primjene jednostavnih metoda temeljenih na umjetnoj inteligenciji za izvlačenje informacija iz znatne količine Wi-Fi podataka.

Autori [13] fokusirali su se na detektiranje i brojanje putnika na autobusnim stanicama što je dobar okvirni pokazatelj broja putnika u autobusu. Koristili su HARC (engl. *Human Activity Recognition and people Counting*) metodu koja sadrži module za praćenje i analizu podataka, a za prikupljanje podataka o broju potencijalnih putnika koriste WiAR (engl. *Wi-Fi-based Activity Recognition*).

Pregledom postojećih istraživanja dobio se uvid u razne načine iskorištenja Wi-Fi tehnologije, povezivanje navedene s ostalim tehnikama i metodama brojanja putnika. Širokodostupnost i pristupačnost cijene uređaja na kojem je implementiran Wi-Fi, daje pomoć svim zemljama svijeta u brojanju putnika kako bi ostvarili potrebne analize i predviđanja u svrhu poboljšanja, nadogradnje, uvođenja i prepravaka dijelova sustava javnog gradskog prijevoza.

⁵ Myki – naziv za pametnu karticu koja se koristi u javnom gradskom prijevozu u Londonu [8]

3. Razvoj Wi-Fi tehnologija

Telefonska mreža u cijelosti je povezana žičanim putem i prvenstveno je služila za uspostava poziva između korisnika, a daljnjom nadogradnjom iskoristila se za prijenos podataka koji je omogućio pružanje raznovrsnih usluga na korisničkim uređajima. Niz međusobno povezanih komunikacijskih sustava u cjelinu s ciljem distribucije podataka i informacija naziva se mreža, a prema geografskom području koje pokrivaju dijele se na:

- PAN (engl. *Personal Area Network*) mreža koja pokriva do 100m
- LAN (engl. *Local Area Network*) mreža koja pokriva od 10 do 1000m (sobe, zgrade, kampus)
- MAN (engl. *Metropolitan Area Network*) mreža koja pokriva oko 10 km (grad)
- WAN (engl. *Wide Area Network*) mreža koja pokriva od 100 do 1000 km (država, kontinent).

Raspored mrežnih elemenata kao što su prijenosni mediji (koaksijalni kabeli, bakrena parica, uvrnuta parica, svjetlovod, itd.), predajnici, prijamnici, linkovi, računala, terminalni uređaji, usmjerivači (engl. *Router*), preklopnici (engl. *Switch*) i ostala oprema čine arhitekturu mreže. Najzastupljenija svjetska mreža je Internet koja služi za pretraživanje web preglednika, za slanje elektroničke pošte i druge korisničke usluge. LAN mreža povezuje računala i terminalne uređaje preko zajedničkog medija s ciljem dijeljenja pristupa računalima, aplikacijama, bazama podataka i slično te povezuje određeni broj uređaja spojenih preko *ethernet* kabela koji se fizički spaja na usmjerivač u kojem se nalazi preklopnik koji se dalje preko prijenosnog medija spaja na mrežu, a sve navedeno omogućuje pristup Internetu.

Potrebe korisnika zahtijevale su mobilnost takve mreže što je rezultiralo razvoju bežične mreže tj. korisnik kao mobilna karika je zahtijevao mrežu koja će mu pružiti istu uslugu kao i prethodna, a jedina razlika je što nije priključen fizički na usmjerivač/mrežu već bežično, odnosno *ethernet*⁶ kabel zamijenjen je radiofrekvencijskim⁷ signalom koji putuje prostorom. Wi-Fi tehnologija omogućila je upravo traženo s ograničenjem na kojem djeluje, a to je određena površina pokrivenosti radiofrekvencijskim signalom od oko 20 do 150 metara ovisno o jačini odašiljača. Uređaj koji to omogućuje je pristupna točka (engl. *Access point*) koji se nadgradio u usmjerivač, može funkcionirati sama za sebe tj. da je odvojena od usmjerivača i time povezivati uređaje na mrežu, ali ne nužno imati pristup Internetu, ovisi o ugovorenoj usluzi sa pružateljem internetskih usluga (engl. *Internet Service Provider – ISP*).

Institut inženjera elektrotehnike i elektronike IEEE (engl. *The Institute of Electrical and Electronic Engineers*) zadužen je za specifikaciju i standarde LAN i PAN mreže, a prema vrsti prijenosnog medija standardi se dijele na:

- Žičane LAN standarde (IEEE 802.3 (*Ethernet/FastEthernet⁸/Gigabit*

⁶ **Ethernet kabel** - mrežni kabel koji se koristi kao veza između dva uređaja i omogućava pristup Internetu ili nekoj drugoj mreži [20]

⁷ **Radiofrekvencijski signal** – elektromagnetski val koji se koristi bežičnu komunikaciju i prijenos informacija između uređaja

⁸ **Fast Ethernet** - označava prijenos prometa brzinom od 100 Mbps

*Ethernet*⁹), IEEE 802.4 (*Token Bus*), IEEE 802.5 (*Token Ring*), X3T9-5 (*Fiber Distributed Data Interface FDDI*¹⁰)

- Bežične LAN/PAN standarde (IEEE 802.11 (*Wi-Fi*), IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*), IEEE 802.15.4 (*Zigbee*¹¹, *Near Field Communication*¹² NFC, *Radio-Frequency Identification* RFID¹³) [14].

Fokus u ovom radu je na standarde 802.11 Wi-Fi, koji će u nastavku biti detaljnije objašnjeni.

3.1. Standardi 802.11

IEEE formirao je 1997. godine 802.11 odbor za razvoj i objavu standarda za bežične LAN tj. WLAN (engl. *Wireless Local Area Network*) mreže. 1980-ih godina FCC (engl. *Federal Communications Commission*) otvorila je nekoliko pojaseva radiofrekvencijskog (RF) spektra za korištenje bez licence, to su pojasevi na 900 MHz, 2,4 GHz i 5 GHz preuzeti od ISM-a (engl. *Industrial, Science and Medical band*) i U-NII-a (engl. *Unlicensed National Information Infrastructure band*) kako bi se otvorili za komunikacijske svrhe.

Početna specifikacija standarda IEEE 802.11 iz 1997. koristila je nelicencirani RF spektar od 2,4 GHz i dopuštala prijenos podataka do 2 Mbps (engl. *Megabits per second*). Godine 1999. osnovana je industrijska udruga Wi-Fi *Alliance* koja je osmislila naziv Wi-Fi i zaštitila ga te je odgovoran za testiranje interoperabilnosti i certifikaciju Wi-Fi proizvoda [15].

Tijekom godina uvedeno je još nekoliko standarda, a razvijanje će biti nastavljeno.

3.1.1. 802.11a standard

802.11a dizajniran je 1999. godine, a radi na 5 GHz i koristi OFDM (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) s maksimalnom teoretskom brzinom od 54 Mbps. Dva uređaja moraju podržavati 802.11a standard ako žele pomoću njega ostvariti konekciju, u protivnom neće funkcionirati [15].

3.1.2. 802.11b standard

802.11b dizajniran je iste godine kao i 802.11a, razlika je u radu na frekvenciji od 2,4 GHz i korištenju DSSS (engl. *Direct Sequence Spread Spectrum*) ili FHSS (engl. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) i CCK (engl. *Complementary Code Keying*) za postizanje maksimalne teoretske brzine od 11 Mbps. Mikrovalne pećnice, *Bluetooth* i bežični kućni telefoni rade na istoj frekvenciji što može uzrokovati interferenciju [16].

3.1.3. 802.11g standard

Treća generacija, 802.11g, objavljena je 2003. godine. Radi u frekvencijskom pojasu

⁹ **Gigabit Ethernet** – označava prijenos prometa brzinom od 1 Gbps

¹⁰ **Fiber Distributed Data Interface FDDI** – označava korištenje optike za spajanje LAN mreža

¹¹ **Zigbee** - bežična tehnologija kratkog dometa PAN mreže

¹² **Near Field Communication** – bežična tehnologija kratkog dometa do četiri centimetra

¹³ **Radio-Frequency Identification** – tehnologija koja koristi radiofrekvenciju za razmjenu informacija

od 2,4 GHz kao i 802.11b, ali postiže brzine do 54 Mbps koristeći istu OFDM tehnologiju kao 802.11a. Kompatibilan je sa sklopovskom opremom standarda 802.11b, što je korisnicima olakšalo prijelaz na noviji standard jer su mogli zadržati dio svoje opreme [17].

3.1.4. 802.11n standard

Brzina prijenosa podataka, 2009. godine, dosegla je 600 Mbps u 2,4 i 5 GHz-nom pojasu pomoću MIMO (engl. *Multiple Input Multiple Output*) tehnologije kod novog 802.11n standarda. MIMO povećava kapacitet radio linka korištenjem više odašiljačkih i prijemnih antena bez potrebe za povećanjem snage odašiljača. Rad na 2,4 i 5 GHz omogućava usklađenost sa svim prijašnjim standardima [17].

3.1.5. 802.11ac standard

802.11ac standard, izdan 2014. godine, radi na 2,4 i 5 GHz. Koristi OFDM, MIMO i 256-QAM (engl. *Quadrature Amplitude Modulation*) modulaciju za postizanje teoretskih brzina do 6,9 Gbps (engl. *Gigabits per second*) [18].

3.1.6. 802.11ax standard

Godine 2019. izašao je standard 802.11ax koristeći OFDMA (engl. *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) i MU-MIMO (engl. *MultiUser - Multiple Input Multiple Output*) što znači da je osigurana paralelna komunikacija više uređaja. Omogućava teoretsku brzinu do 9 Gbps, a radi na 2,4 i 5 GHz-nom frekvencijskom pojasu [18].

3.2. Arhitektura Wi-Fi tehnologija

Općenito mrežna arhitektura sastoji se od logičke i fizičke arhitekture gdje se obje oslanjaju jedna na drugu, ali su također neovisne jer se fizička konfiguracija mreže može mijenjati bez promjene logičke arhitekture, a i ista fizička mreža može u raznim situacijama podržati različite stavke logičke arhitekture kao što su standardi i protokoli [19]. Arhitektura Wi-Fi-ja je jednako tako građena što će detaljnije biti opisano u sljedeća dva podpoglavlja.

3.2.1. Logička arhitektura Wi-Fi tehnologije

OSI (engl. *The Open System Interconnect*) referentni model predstavlja okvir od sedam slojeva koji svaki pojedinačno opisuje korake, standarde i protokole na koji način se odvija prijenos podataka. Ti slojevi su:

1. Fizički sloj
2. Podatkovni sloj
3. Mrežni sloj
4. Transportni sloj
5. Sloj sesije
6. Prezentacijski sloj
7. Aplikacijski sloj

Standardi za većinu slojeva napisani su od strane IEEE, a logička arhitektura Wi-Fi-ja određena je standardima koji su namijenjeni za podatkovni i fizički sloj. Internet protokol (engl. *Internet Protocol*) IP odgovoran je za adresiranje i usmjeravanje svakog paketa čime upravlja protokol prijenosnog sloja ili TCP¹⁴ (engl. *Transmission Control Protocol*) ili UDP¹⁵ (engl. *User Datagram Protocol*). IP adresa je 32-bitni broj koji je pridružen svakom paketu i koristi se kako bi programska oprema za usmjeravanje na mreži ili Internet mogli utvrditi izvora i odredište svakog paketa. Za prijenos podatkovnih okvira između uređaja koristi se MAC (engl. *Media Access Control*) adrese kartica mrežnog sučelja (engl. *Network Interface Cards*) NIC-a, a ne IP adrese svakog NIC-ovog glavnog uređaja. Prijenos IP adrese mrežnog sloja i MAC adrese podatkovnog sloja postiže se korištenjem ARP (engl. *Address Resolution Protocol*) protokola.

Podatkovni sloj podijeljen je na dva podsloja:

- LLC (engl. *Logical Link Control layer*) podsloj koji pruža mrežnom sloju mogućnost rada s bilo kojom vrstom MAC podsloja i
- MAC (engl. *Medium Access Control layer*) podsloj kontrolira kako i kada uređaj smije pristupiti fizičkom sloju za prijenos podataka i obavlja postupak aktivnog i pasivnog skeniranja u potrazi za pristupnim točkama.

Fizički sloj odgovoran je za modulacijske metode, sheme kodiranja i prijenos radio signala kroz prostor. Pojas u kojem radi Wi-Fi tj. frekvencija rada dizajnirana je za korištenje u industrijskom, znanstvenom i medicinskom pojasu (engl. *Industrial, Scientific and Medical band*) ISM-ju koji je za uređaje bez licence [19].

3.2.2. Fizička arhitektura Wi-Fi tehnologije

Temeljna shema prema kojoj se nadograđuje arhitektura Wi-Fi tehnologije je BSS (engl. *Basic service set*) koji sadrži jednu ili više terminalnih uređaja i glavnu baznu stanicu tzv. pristupnu točku AP (engl. *Access Point*), dodaci su usmjerivač (engl. *Router*) i/ili preklopnik (engl. *Switch*) koji su put do Interneta. Više BSS-ova zajedno čini ESS (engl. *Extended Service Set*). Ovaj način topologije gdje postoji pristupna točka u cijelom sustavu naziva se infrastrukturna topologija, a ukoliko ne postoji nego terminalni uređaji komuniciraju međusobno i koji nemaju centralnu kontrolu te dotičaj sa Internetom takva topologija naziva se *Ad-Hoc* topologijom. Kada mrežni administrator instalira AP, administrator pristupnoj točki dodjeljuje identifikator SSID (engl. *Service Set Identifier*) od jedne ili dvije riječi.

Standard 802.11 zahtijeva da AP povremeno šalje *Beacon*¹⁶ okvire, od kojih svaki uključuje SSID i MAC adresu AP-a. S obzirom na to da 802.11 radi na frekvenciji od 2.4 GHz sa 85 MHz pojasom definirano je 11 kanala koji se djelomično preklapaju, a jedina 3 koja se ne preklapaju su 1, 6 i 11. Terminalni uređaj znajući da AP-ovi šalju *Beacon* okvire, traži kako bi se pridružio s jednim od njih, skenira 11 kanala i većinom odabire

¹⁴ TCP - konekcijski orijentirani protokol transportnog sloja OSI modela, koji uspostavlja logičku vezu između procesa u mreži

¹⁵ UDP – nekonekcijski protokol transportnog sloja na mreži koja se bazira na IP-u

¹⁶ Beacon okvir – pristupne točke ih koriste za predstavljanje značajki komunikacijske veze koju nude

onog čiji je signal najjači. Taj proces skeniranja kanala i „slušanje“ postoji li neki *Beacon* okvir naziva se pasivno skeniranje, a aktivno skeniranje je kada terminalni uređaj emitira *probe* okvir koji će primiti svi AP-ovi unutar dometa terminalnog uređaja. AP će odgovoriti na takav okvir sa *probe response* okvirom, nakon odabira AP-a s kojim se povezuje, terminalni uređaj šalje AP-u *association request* okvir tj. zahtjev za pridruživanjem, a AP odgovara *association response* okvirom tj. odgovorom na taj zahtjev [19].

3.3. Značajke Wi-Fi tehnologija

Bežična tehnologija pruža više mogućnosti za kontrolu, nadzor, praćenje, održavanje i pružanje informacija na područjima koja nisu toliko pristupačna uz manje troškove. Ostale značajke su:

- Mobilnost – sloboda kretanja korisnika bez gubitka konekcije
- Fleksibilnost – proširenje novih ideja iskorištenja Wi-Fi-ja u razne svrhe
- Smanjeni troškovi – postavljanje i održavanje fizičke mreže skuplje je u odnosu na postavljanje usmjerivača jer nije potrebno kopati, bušiti, dobiti dozvolu za gradnju i odrađivati ostale postupke kako bi se fizička mreža postavila
- Prošireni pristup – pokrivanje mrežom mjesta do kojih nije dostupna fizička mreža
- Bežični *ethernet* – Wi-Fi je zamjena za *ethernet*, oboje dijele iste glavne elemente i dio su IEEE 802.11 standarda
- Frekvencija rada – 2.4 GHz i 5 GHz
- Signal – Radio frekvencijski signal koji omogućava prolazak kroz zidove i određene objekte
- Standardi – 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac i 802.11ax su standardi koji određuju protokole i standarde za bežične mreže kako bi pravilno funkcionirali
- Sigurnost – WEP, WPA (engl. *Wi-Fi Protected Access*) i WPA2 su opcije za provjeru autentičnosti kako bi se osigurala zaštita mreže [19].

3.3.1. Radio frekvencijski signal

Radio frekvencijski signal dio je elektromagnetskog spektra¹⁷ koji se nalazi u rasponu od 3 KHz (engl. *Kilo Hertz*) do 300 GHz, svaka frekvencija ima svoj domet što je vidljivo iz tablice 1. jer je duljina vala jednaka brzini svjetlosti kroz frekvenciju.

¹⁷ Elektromagnetski spektar – prikaz raspona svih elektromagnetskih valova

Tablica 1. Podjela radio frekvencijskog spektra [19]

<i>Transmission type</i>	<i>Frequency</i>	<i>Wavelength</i>
Very low frequency (VLF)	9–30 kHz	33–10 km
Low frequency (LF)	30–300 kHz	10–1 km
Medium frequency (MF)	300–3000 kHz	1000–100 m
High frequency (HF)	3–30 MHz	100–10 m
Very high frequency (VHF)	30–300 MHz	10–1 m
Ultra high frequency (UHF)	300–3000 MHz	1000–100 mm
Super high frequency (SHF)	3–30 GHz	100–10 mm
Extremely high frequency (EHF)	30–300 GHz	10–1 mm

Wi-Fi koristi dvije raspoložive frekvencije 2.4 GHz i 5 GHz ovisi o kojem standardu je riječ. Radio frekvencijski spektar signala koristi se iz razloga tog što može prolaziti kroz razne objekte i predmete kao što su zidovi, drvo, plastiku i ostale elemente, no prolaskom kroz navedene snaga, smjer i udaljenost se smanjuje. Svojstva koja utječu na kvalitetu radiofrekvencijskog signala:

- Refleksija
- Apsorpcija
- Smanjenje jačine signala na geometrijskoj razini
- Gubitak putanje
- Ogib
- Interferencija
- Disperzija
- Odnos signal šum (engl. *S/N Ratio*)

Refleksija signala događa se kada isti naiđe na drugačiji medij, dio ili cijeli signal prođe kroz medij, a dio se reflektira pod kutom koji ovisi o mediju. Apsorpcija znači da se dio ili cijeli signal upija u medij čime se stvara toplinska energija. Smanjenje jačine signala na geometrijskoj razini predstavlja da se snaga signala smanjuje s povećanjem geografske udaljenosti, dakle u jednom trenutku signal više nije dostupan. Razni predmeti, kretanje ljudi i zidovi mogu poremetiti putanju signala i time ga preusmjeriti, dok kod ogiba situacija je da se signal skrene iza prepreke i sadrži odstupanja od prvobitnog širenja. Do interferencije dolazi kada se susretnu dvije iste frekvencije tj. jedna drugu ometa i signal se na objema poništava. Disperzija se događa prilikom naleta signala na površinu od koje se on reflektira u različitim smjerova. Šum je neželjeni zvuk koji pogoršava signal i čini ga nerazumljivim, što je veći omjer između signala i šuma to će do prijamnika stići kvalitetniji signal iz kojeg će izvući prenesenu informaciju, ako je omjer manji prijamnik će jako teško ili neće uopće moći izvući informacije iz primljenog signala.

Za smanjenje interferencije koristi se tehnika proširenog spektra koja omogućava puno veću propusnost informacija koje se prenose i signal je manje osjetljiv na šumove koji drugi uređaji stvaraju. Postoje dvije tehnike proširenog spektra:

1. Prošireni spektar sa skokovitom frekvencijom FHSS (engl. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) je tehnika kod koje se kontinuirano mijenjaju frekvencije prijenosa kako bi se smanjila interferencija i mogućnost prisluškivanja, funkcionira tako da signal nosilac odašilje kratko vrijeme na jednom uskom pojasu pa ga se prebaci na drugi i tako dalje, na taj način prosječna snaga signala se širi preko širokog raspona frekvencija
2. Prošireni spektar sa izravnim slijedom DSSS (engl. *Direct sequence spread spectrum*) je tehnika koja koristi metodu koja se zove Barkerova sekvenca¹⁸ od 11 čipova za širenje radio signala kroz jedan kanal širine 22 MHz bez mijenjanja frekvencija, svaka signal koristi samo jedan kanal bez mijenjanja frekvencija kao što to čini FHSS, dakle DSSS odašiljač razbija svaki bit u izvornom toku podataka u niz redundantnih uzoraka bitova tj. čipova i šalje ih do prijmnika koji ponovno sastavlja čipove natrag u tok podataka koji je identičan izvorniku

DSSS je tehnika koja je zastupljena kod Wi-Fi tehnologije iz razloga što je brzina prijenosa i domet izuzetno bitan kod navedene, a DSSS to pruža.

Uz navedene tehnike koristi se i tehnika ortogonalnog multipleksiranja sa podjelom frekvencije OFDM koja signal raspodjeljuje u manje podkanale koji moduliraju ortogonalne podnosiocice i na taj način se usporava brzina prijenosa simbola, bez usporavanja stvarne brzine prijenosa podataka, što OFDM čini otpornim na međusimbolske smetnje [19].

3.3.2. Frekvencije rada Wi-Fi tehnologija

Za rad Wi-Fi-a koristi se signal koji radi na dvije frekvencije:

- 2.4 GHz koji sadrži 14 kanala koji su dio ISM pojasa, svaki sa širinom pojasa 22MHz, svaki kanal je razmaknut za 5 MHz gdje se idući kanal preklapa 75% pojasa prethodnog kanala zbog uskopojasnosti istih, takav način omogućava da se najviše 3 kanala mogu konfigurirati za upotrebu bez da se istovremeno ne preklapaju (1, 6 i 11 kanal), pokriva veći prostor signalom, mnogi uređaji rade na navedenoj frekvenciji kao što je Bluetooth, mikrovalne pećnice, otvarači garažnih vrata i slično gdje dolazi do zagušenja što može smanjiti brzinu i kvalitetu signala, koristi ga: 802.11, 802.11b, 802.11g i 802.11n
- 5 GHz - sadrži 25 kanala, a svaki je širok 20 MHz koji je definirao U-NII koji je također 5 GHz podijelio u 4 raspona: UNII-1, UNII-2, UNII-2 prošireni i UNII-3, među njima nema preklapanja zato što još nije toliko iskorištena frekvencija kao prethodna, područje pokrivanja signalom je manje no omogućava veću brzinu prijenosa podataka, koristi ga: 802.11a, 802.11n i 802.11ac

Signali viših frekvencija teže prolaze kroz prepreke nego signali niže frekvencije. To se događa jer se dio energije elektromagnetskog polja prenosi u materijal prepreke (cementni zidovi, cigle, lišće itd.) što smanjuje snagu signala [19].

3.3.3. Sigurnost Wi-Fi mreže

Uvođenjem bežičnih mreža dobivena je fleksibilnost i mobilnost, ali smanjena je

¹⁸ Barkerova sekvenca – služi za sinkronizaciju okvira u digitalnim sustavima [31]

sigurnost mreže jer signal nije ograničen samo na spojene kablove već se isti može širiti i dalje od predviđenog područja. Na taj način se uz odgovarajući prijemnik mogu prikupiti razni podaci sa mreže, ako ona nije dovoljno osigurana, i time uzrokovati neovlašteni pristup korisničkim i mrežnim podacima.

Prvobitno, standard 802.11 uveo je WEP (engl. *Wired Equivalent Privacy Encryption*) enkripciju koja je imala limitiranu autentikaciju i nije sadržavala dovoljno snažnu kriptografiju da na visokoj razini osigura zaštitu mreže. Koristi tajni ključ tj. zaporku koja pruža ograničeni stupanj kontrole pristupa i privatnosti podataka koji se unosi u pristupnu točku i mora ga znati svaka stanica koja se pokušava povezati s pristupnom točkom. Bez poznavanja zaporce, stanica će moći vidjeti mrežni promet, ali se neće moći povezati ili lako dešifrirati podatke.

WEP enkripcija prevodi zaporku u 40-bitni tajni ključ, kojemu se dodaje 24-bitni inicijalizacijski vektor kako bi se stvorio 64-bitni ključ za šifriranje. Privremeni pokušaj jačanja WEP enkripcije bilo je produljenje duljine ključa na 128-bitna (104-bit + 24-bit), no nije poboljšalo zaštitu zbog temeljne ranjivosti, a to je da prislušivač još uvijek može izvući ključ analizirajući otprilike 4 milijuna prenesenih okvira, bez obzira koriste li se 40-bitni ili 104-bitni ključevi. Ključni tok bitova stvara se koristeći RC4 (engl. *Rivest Cipher 4*) algoritam za pseudo-nasumični odabir bajtova iz niza S koji je permutacija svih 256 mogućih bajtova.

Nedostaci su riješeni ratifikacijom standarda 802.11i koji daje temelj za WPA i WPA2. WPA je bila privremena mjera poboljšanih sigurnosnih mehanizama koji su još bili u razvoju. Koristi protokol vremenskog integriteta ključa TKIP (engl. *Temporal Key Integrity Protocol*) za upravljanje ključem i nudi izbor između 802.1x autentifikacijskog okvira zajedno s proširivim protokolom autentifikacije EAP (engl. *Extensible Authentication Protocol*) za WLAN sigurnost tvrtke ili jednostavnijeg unaprijed dijeljenog ključa PSK (engl. *Pre-Shared Key*) za provjeru autentičnosti za kućnu ili malu uredsku mrežu koja nema poslužitelja za provjeru autentičnosti. Ranjivost WEP enkripcije riješena je WPA-ovim dvjema novim značajkama MAC (engl. *Medium Access Control layer*) sloja, a to je protokol za stvaranje i upravljanje ključem koji se naziva TKIP i funkcija provjere integriteta poruke MIC (engl. *Message Integrity Check*). Nakon što je stanica provjerena, za tu sesiju kreira se 128-bitni vremenski ključ, bilo putem autentifikacijskog poslužitelja ili ručnim unosom. TKIP se koristi za distribuciju ključa do stanice i pristupne točke te za postavljanje upravljanja ključem za sesiju, kombinira vremenski ključ s MAC (engl. *Media Access Control*) adresom svake stanice sa TKIP brojačem sekvenci, i dodaje 48-bitni vektor inicijalizacije za proizvodnju početnih ključeva za enkripciju podataka. Ovim pristupom svaka će stanica koristiti različite ključeve za šifriranje prenesenih podataka. Nakon podesivog životnog vijeka ključa TKIP dalje upravlja distribucijom i ažuriranjem tih ključeva na svim stanicama koji može biti od jednom za svaki paket do jednom svakih 10.000 paketa, ovisno o sigurnosnim zahtjevima. Iako se koristi ista RC4 šifra, kao i kod WEP-a, za generiranje toka ključeva za šifriranje, TKIP-ova metoda miješanja i distribucije ključeva značajno poboljšava WLAN sigurnost, zamjenjujući jedan statički ključ koji se koristi u WEP-u s dinamički promjenjivim izborom od 280 trilijuna mogućih ključeva.

WPA2 je zadnja implementacija IEEE 802.11i standarda, uvodi napredni enkripcijski standard (engl. *Advanced Encryption Standard*) AES koristeći brojač s protokolom

autentifikacijskog koda za ulančavanje šifriranih blokova CCMP (engl. *Cipher block Chaining Message authentication code Protocol*). Za razliku od RC4, koji je šifra toka i može šifrirati poruku proizvoljne duljine, AES je blok šifra i koristi fiksnu veličinu bloka poruke od 128 bita zajedno s ključem za šifriranje od 128, 192 ili 256 bita. CCMP zvan još CBC-MAC je metoda provjere autentičnosti i integriteta poruka, a AES-CCMP spoj je AES-a i CCMP-a koji pružaju dodatnu sigurnost između bežične klijentske stanice i pristupne točke [20].

3.4. Smjernice razvoja Wi-Fi tehnologije

Najranija verzija standarda IEEE 802.11 tzv. Wi-Fi realizirana je 1997. godine kao bežično proširenje na postojeće žične LAN mreže. Wi-Fi kontinuirano se razvijao kako bi uključio nove tehnologije i funkcionalnosti, a razvijeno je i nekoliko izmjena i dopuna osnovnog standarda. Upotreba se proširila na širok izbor tržišta, uključujući potrošačko, mobilno, automobilsko i transportno. Nekoliko čimbenika pridonijelo je uspjehu standarda IEEE 802.11, a među najvažnijima su interoperabilnost, jednostavnost korištenja i fleksibilnost. Standardi IEEE 802.11 prvobitno su dizajnirani za korištenje unutar nelicenciranih pojaseva, dakle rade u frekvencijskim pojasevima od 2,4 GHz i 5 GHz, koji su globalno dostupni, iako se za neke aspekte njihove upotrebe mogu primijeniti lokalna ograničenja. Svatko može postaviti Wi-Fi u tim pojasevima pod uvjetom da je zadovoljeno nekoliko osnovnih ograničenja, kao što je maksimalna snaga prijenosa.

Nedostatak te mogućnosti je što je većina postavljena na nekontroliran način s ograničenim ili nikakvim razmatranjem problema smetnji zbog toga je postalo teže jamčiti granice performansi i razumne razine kvalitete usluge. Ovaj problem je dodatno pogoršan zbog postavljanja velikog broja baznih stanica u područjima žarišnih točaka kako bi se moglo biti u koraku s povećanjem prometnih zahtjeva.

Uočeni nedostaci prvih Wi-Fi proizvoda potaknuli su evoluciju standarda IEEE 802.11, a poboljšanja propusnosti bio je prioritet. Prva tehnika poboljšanja bila je OFDM, što je omogućilo postizanje maksimalne brzine prijenosa podataka do 54 Mbit/s. Međutim, tek usvajanjem amandmana IEEE 802.11n 2009. propusnost WLAN-ova približila se onoj žičane Ethernet mreže, kao rezultat uvođenja višestrukih ulaza i višestrukih izlaza MIMO (engl. *Multiple input Multiple output*) tehnologija. U isto vrijeme, predložene su nove izmjene i dopune izvornog standarda kako bi se potaknula raznovrsnija uporaba Wi-Fi proizvoda u različitim domenama primjene. Na primjer, IEEE 802.11p amandman odobren je 2010. godine. Ovim se definiraju poboljšanja standarda IEEE 802.11 za podršku komunikaciji V2V¹⁹ (engl. *Vehicle to Vehicle*) i V2I²⁰ (engl. *Vehicle to Infrastructure*) na 5,9 GHz frekvenciji, koji je licenciran za Inteligentne transportne sustave. U pokušaju da se konsolidiraju i sistematiziraju sva usvojena poboljšanja IEEE 802.11, posljednji standard IEEE 802.11 (identificiran kao IEEE 802.11-2012) objavljen je kako bi u jedinstvenu specifikaciju uključio sve izmjene i dopune objavljene od 2008. do 2011. Radna skupina IEEE 802.11 ubrzano je usmjeravala svoj fokus prema sljedećoj generaciji Wi-Fi-ja. Predviđena su tri ključna pokretača:

- Komunikacije stroj-stroj²¹ (engl. *Machine to Machine communications*)

¹⁹ V2V - komunikacija ostvarena između dva vozila

²⁰ V2I - komunikacija ostvarena između vozila i infrastrukture

²¹ Komunikacije stroj-stroj – razmjena podatka između dva stroja

- Multimedijske komunikacije visoke razlučivosti (engl. *HighDefinition Multimedia Communications*) i

- "Dijeljenje spektra" (engl. *Spectrum Sharing*²²) u licenciranim pojasevima korištenjem kognitivne radio tehnologije.

Pojavom vizije Internet stvari (engl. *Internet of Things-IoT*), tj. svijeta u kojem su sve vrste pametnih objekata (od kućanskih aparata do malih uređaja na baterije) povezane na Internet preko Wi-Fi mreže. U isto vrijeme, difuzija mobilnih uređaja s različitim mrežnim i multimedijskim mogućnostima, kao i široka primjena naprednih multimedijskih aplikacija, potiče rast mobilnog video prometa, koji je krajem 2013. bio više od polovice globalnog mobilnog podatkovnog prometa. Stoga Wi-Fiju su potrebne specifične funkcije za rad s raznim multimedijskim aplikacijama, uključujući interaktivni audio i video u stvarnom vremenu, strujanje uživo ili strujanje pohranjenog audio i videa. Nove, izmijenjene i nadopunjene generacije slijedile su potražnju korisnika pa je 2013. godine odobren IEEE 802.11ac, a IEEE 802.11ax 2019. godine. Otvoreni izazovi koji se razmatraju u razvoju IEEE 802.11ax su:

- poboljšanje performansi Wi-Fi-a pružanjem najmanje četiri povećanja kapaciteta u usporedbi s IEEE 802.11ac
- osigurati podršku za guste mreže
- postići učinkovito korištenje prijenosnih resursa smanjivanjem razmjene upravljačkih i kontrolnih paketa, preispitivanjem strukture paketa i poboljšanjem pristupa kanalu i mehanizama ponovnog prijenosa, između ostalih aspekata
- osigurati kompatibilnost s prethodnim izmjenama i dopunama, to se postiže obveznim prijenosom naslijeđene fizičke preambule u svim okvirima
- uvesti učinkovite mehanizme za uštedu energije kako bi se smanjila potrošnja energije i
- podržati višekorisničke strategije prijenosa daljnjim razvojem MU-MIMO (engl. *Multi User-Multiple Input Multiple Output technology*) i mogućnosti višestrukog pristupa s ortogonalnom frekvencijskom podjelom OFDMA u silaznoj i uzlaznoj vezi [18].

²² **Spectrum sharing** – optimizacija radiovalova ili komunikacijskih kanala za nesmetano korištenje iste frekvencije

4. Sustavi brojanja putnika u javnom gradskom prijevozu

Urbanizacija kao proces porasta gradskog stanovništva, pretvaranje seoskih naselja u gradska i deruralizacija kao proces napuštanja poljoprivrednih djelatnosti i proces preseljenja stanovnika sa sela u gradove uzrokovalo je potrebu korištenja prijevoza koji će moći prevesti veći broj ljudi s jednog mjesta na drugo.

Autobusi, električni tramvaji i vlakovi kao prijevozna sredstva koja mogu prevoziti više putnika, iskorištena su kao prijevoz u gradskim područjima. Tako je nastao javni gradski prijevoz (JGP) koji je u vlasništvu grada, države ili privatnika, a putnicima osigurava prijevoz uz mjesečnu ili godišnju naknadu. Kako bi vozni red bio u skladu s potrebama putnika i brojem samih putnika neophodno je navedeno istražiti. Izrada voznih redova, analiza efikasnosti, efektivno planiranje prijevoznih operacija, zadovoljavanje potreba korisnika zahtijeva precizne i točne podatke o korištenju prijevoznih linija. Prijevoznici iz tog razloga trebaju organizirati prikupljanje podataka te održavati i redovito obnavljati baze podataka. Jedan od načina istrage je i brojanje samih putnika u JGP-u kako bi se utvrdilo kolika količina putnika zaista navedeni koristi, a brojanje se obavlja u vozilima ili na stanicama u različitim vremenskim razdobljima.

Istraživanja se provode za potrebe uvođenja novih ili poboljšanja postojećih linija, izradbe voznog reda, analize prometnih uvjeta, razloga kašnjenja i slično. Brojanjem putnika određuje se njihov protok u prijevoznim sredstvima prema trasama linija, linija gdje se pojavljuje maksimalni protok i variranje protoka u vremenu te analiza kvalitete usluge. Brojanje putnika dijeli se na dvije skupine:

- ručno brojanje putnika i
- rutomatsko brojanje putnika [21].

4.1. Ručno brojanje putnika u javnom gradskom prijevozu

Ručno brojanje putnika zahtjeva osoblje, promatrače, koji će odrađivati brojanje putnika, zapisivati podatke na obrazac i to sve mjeriti u zadanom vremenu. Za svako vozilo potreban je jedan promatrač, ali ako je trasa opterećena potreban je veći broj osoba tj. timova promatrača kako bi brojanje što kvalitetnije bilo odrađeno. Promatrač mora biti adekvatno pripremljen za postupak brojanja, a zbog kratkog vremena stajanja prijevoznog sredstva promatrač mora napraviti brzu procjenu broja putnika što može dovesti do netočne procjene broja putnika. Uz navedeno, osoblje mora znati podatke o broju sjedećih mjesta, kapacitetu pojedinoga prijevoznog sredstva da bi moglo precizno procijeniti broj putnika u punom vozilu.

Oprema koju svaki promatrač mora imati je: posebno dizajniran obrazac, mapu, olovku i sat. Brojanje ulazaka i izlazaka putnika je jednostavnije u odnosu na metodu određivanja popunjenosti prijevoznog sredstva. Nakon pravilne obuke bilježe se sljedeći podaci u obrazac:

- opis brojanja: linija, lokacija, kapacitet prijevoznog sredstva, datum i dan,

- vrijeme brojanja, vremenski uvjeti, ime promatrača, bilješke te podaci o brojanju po rubrikama: oznaka vozila, dolazak po voznom redu i stvarno vrijeme dolaska vozila, brojanje putnika: u pridošlom vozilu, broj iskrvanih i ukrcanih (ako je moguće), i u odlazećem vozilu (to se kasnije može izračunati).

Daljnjom analizom ostvarenih rezultata dobiju se podaci za 15-minutno ili 20-minutno vršno opterećenje, 30-minutno ili 60-minutno izvanvršno opterećenje i prosječno opterećenje prijevoznog sredstva u pojedinom vremenu. Za najdetaljnije informacije o protoku putnika na liniji dobiju se brojanjem ulazaka i izlazaka putnika na svakoj stanici uzduž linije. Time se dobivaju podaci o broju putnika prema stanicama kao i opterećenje prijevoznog sredstva po dionicama linije na temelju čega je moguće izračunati raspodjelu duljina putovanja putnika i učinak linije u putničkim kilometrima za bilo koji sat u danu. Prema konačnim podacima izrađuje se vozni red, analiza vožnje prijevoznog sredstva, produljenje ili skraćenje linije, dodavanje ili ispuštanje određenih postaja, itd.

Takva istraživanja iziskuju visoka financijska sredstva jer je potrebno zaposliti poveći broj osoblja i obučiti ga, opskrbiti ih opremom i alatom uz to mora se uzeti u obzir ljudski faktor pogreške kao i vremenske nepogode što sve navedeno utječe na krajnji odabir metode kojim će se putnici brojati, ali su to i nedostaci koji imaju utjecaja na točnost podataka o broju putnika [21].

4.2. Automatsko brojanje putnika u javnom gradskom prijevozu

Radi olakšavanja procesa brojanja putnika u JGP uvedeni su uređaji koji omogućavaju automatsko brojanje putnika (engl. *Automatic Passenger Counting*) APC. Mogu biti korišteni na različite načine u svrhu smanjenja osoblja, povećanja količine podataka o brojanju i njihove točnosti te zbog pojednostavnjenja bilježenja podataka. Napredovanje u tehnologiji potiče poboljšanje uređaja koji bi se koristili za praćenje putnika, neki od uređaja koji su u upotrebi su automatski skeneri i detektori pritiska koji se nalaze na vratima vozila, senzori za detekciju tijela, kamere, skeneri QR (engl. *Quick response*)koda²³, brojači koji se nalaze unutar uređaja za poništenje karte, brojači koji koriste *Bluetooth* i *Wi-Fi* tehnologije te ostali.

U modernim i brzim prijevoznim sustavima s kompletno nadziranom postajama, s digitalno kontroliranim naplatnim vratima gdje svaki putnik prislanja magnetsku karticu pri ulasku i izlasku moguće je dobiti potpuno pouzdane podatke o broju putnika, neprekinuto brojanje ulazaka i izlazaka na svakoj postaji, tako da se prikupe svi podaci o korištenju stanica i opterećenju uzduž linije. Takav način zahtjeva disciplinu putnika koji će redovno izvršavati postupak prislanjanja kartice, ali i prijevoznik mora posjedovati kvalitetnu opremu i obavljati preventivno

²³ QR kod – kod koji se koristi za pristup internetskoj stranici pomoću digitalne kamere pametnog mobilnog uređaja

održavanje kako bi sustav u potpunosti mogao nesmetano funkcionirati. Putnici koji presjedaju između dviju ili više linija ovim načinom brojanja bit će na kraju razvrstani u posebnu skupinu od onih koji putuju samo na jednoj liniji. Podjela u skupine iskorištena je za planiranje vrsta naplate prijevoza. Većina prijevoznika i putnika nije u tolikoj razini organizirano stoga su potrebne razne metode automatskog brojanja i uređaja koji će biti prilagođeni situaciji kako bi informacije o broju putnika bile što relevantnije. Neke općenite prednosti APC sustava su:

- točnost sustava veća je od 98 % što daje vjerodostojnu sliku koliki broj putnika koristi JGP
- neovisan je o količini putnika
- ušteda na zapošljavanju i obučavanju ljudi za ručno brojanje putnika
- automatsko generiranje izvješća
- mogućnost mjerenja dodatnih parametara potrebnih za uslugu te
- minimalno ili gotovo nikakvo zahtijevanje voznog osoblja i putnika za sudjelovanje prilikom brojanja.

Nedostaci se očituju u visokim inicijalnim troškovima pri nabavi i ugradnji sustava, u neusklađenosti broja putnika prilikom ulaska i izlaska na istoj stanici, te u posjedovanju više mobilnih uređaja od strane putnika u JGP-u. Primjerice, prilikom primjene metode brojanja putnika pomoću Wi-Fi-ja, uređaj može detektirati više mobilnih uređaja i ekvivalentno tome zabilježiti više osoba. Također, nailazi se i na problem detekcije mobilnih uređaja koji su izvan JGP-a.

Razne metode automatskog brojanja imaju svoje prednosti i nedostatke, kako je prije navedeno u radu, stoga je potrebno odrediti koje se točno informacije žele prikupiti i prema tome izabrati onu koja je u skladu sa pouzdanošću podataka i ekonomičnosti [22].

U sljedećim podpoglavljima bit će ukratko opisani sustavi koji se koriste za automatsko brojanje putnika.

4.2.1. Kamere za prepoznavanje lica

Kamere koje imaju sposobnost prepoznati čovjekovo lice koriste razne programske podrške za detekciju oblika lica, boje kože i pokreta. Prikaz slika isprva je bio dvodimenzionalan 2D, a nadogradnjama je prešao na trodimenzionalan 3D kojim se ostvarila kvalitetnija detekcija ljudi. Nakon detekcije lica, praćen je prolazak lica kroz zamišljenu liniju koja bi to zabilježila i na taj način brojala putnike.

Implementacija kamera je iznad ulaznih vrata kako bi uhvatile što bolji kut lica, pogotovo u slučaju prenapučenosti JGP-a. Nepovoljna situacija ove metode je u narušavanju privatnosti putnika i otvaranje mogućnosti za zloupotrebom nastalih videozapisa od strane pojedinaca [23].

4.2.2. Eki-Shi-Vision kamera

Zaštita i privatnost putnika stavka je koja se sve više uzima u obzir, iz tog razloga dotadašnje kamere koje su prikazivale realne slike, isprogramirana je verzija koja koristi *Eki-Shi-Vision* programsku podršku. Ona detektira položaje i smjerove kretanja

ljudi na video, preklapa ih sa obrisima u obliku čovjeka koji su okrenuti u smjeru prema kojem stvarna osoba ide i spaja ih s pozadinskom slikom za lakšu detekciju. Prikaz na koji način objašnjeno izgleda vidi se na slici 1.



Slika 1. Prikaz ljudi na *Eki-Shi-Vision* kameri [24]

Informacije koje pruža ova tehnologija isključuju sve elemente koji se odnose na privatnost prikazanih osoba. Glavni cilj dizajniranja ovakve vrste kamere bio je pratiti zagušenost u JGP-u koju bi putnici mogli pratiti putem aplikacije na terminalnom uređaju i time bi im bilo olakšano odabiranje puta kojim bi putovali, ali uz to iskorištena je i za brojanje putnika te ostale pogodnosti [24].

4.2.3. Senzori topline ljudskog tijela

Termalni senzor dizajniran je za prepoznavanje ljudske topline kako bi mogao izbrojati putnike. Potrebno ga je postaviti iznad vrata tako da kada ljudi ulaze i izlaze iz vozila se to može zabilježiti. U ovoj kategoriji bitno je za jednostavnije brojanje da sustav može prepoznati uz toplinu i siluetu čovjeka [25].

4.2.4. Pametne kartice

Podaci pametne kartice mogu pružiti puno detaljnije informacije o ponašanju pojedinog putnika na destinaciji. Može se povezati s adresom stanovanja putnika i agencija može dobiti socioekonomske podatke putnika, a s obzirom na to da se pametne kartice čuvaju puno dulje od ostalih karata i mogu se koristiti za proučavanje promjena ponašanja putnika tijekom vremena.

Kombinacija podataka pametne kartice s drugim sveobuhvatnijim podacima iz sustava automatskog prikupljanja podataka može pružiti dublje razumijevanje ponašanja putnika u tranzitu [26].

4.2.5. Bluetooth

Uređaj tj. skener koji u sebi sadrži *Bluetooth* postavljen je na krov unutar kabine autobusa, u blizini izlaza koji se nalazi u sredini autobusa. Programska podrška skenera funkcionira na način da skener neprestano šalje zahtjev za otkrivanje *Bluetooth*-a.

Prema standardnom *Bluetooth* protokolu, *Bluetooth* uređaj postavljen na način rada "Vidljivo" mora odgovoriti na zahtjev za otkrivanje odašiljanjem svog jedinstvenog

Bluetooth identifikatora (12 heksadecimalnih znamenki) i klase uređaja (6 heksadecimalnih znamenki). Skener stalno izdaje isti zahtjev za otkrivanje i stalno bilježi prisutnost različitih uređaja na koje naiđe (zajedno s datumom i vremenom svake različite instance kada je uređaj otkriven). Koristeći ovaj pristup nije potrebna posebna programska podrška na uređajima putnika kako bi ovaj pristup funkcionirao. Jedini uvjet je da putnici na svojim uređajima *Bluetooth* postave u način rada "Vidljiv" [27].

4.2.6. MAC adresa

Komunikacija između pametnog mobilnog uređaja i AP-a odvija se preko komutacije paketa od kojih se svaki sastoji od okvira koji ga opisuju. Jedan od njih je i *probe request* okvir kojem je svrha pronaći prvu pristupnu točku, naziv za taj postupak je *ping*.

U navedenom okviru nalazi se MAC adresa koja je jedinstvena za svaki uređaj. Pomoću programske i sklopovske podrške moguće je napraviti uređaj koji će zabilježiti MAC adrese i na temelju nje odrediti koliki se broj ljudi nalazi u autobusu, tramvaju, vlaku ili nekom drugom mjestu. Uređaj vrši osvježavanje podataka u određenom vremenu i kada osoba ode sa mjesta na kojemu je bila uređaj će detektirati da ta MAC adresa više nije prisutna u okruženju.

Postoje još mnogi načini koji se koriste za automatsko brojanje putnika u javnom gradskom prijevozu, a neki od njih su podni senzori koji bilježe svaki puta kada osoba stane na njega, brojanje pomoću OFDM signala, CO₂ (engl. *Carbon Dioxide*) senzori, *infrared* senzori i tako dalje. Uz navedeno, koriste se hibridni načini brojanja, a to znači da se koristi više od jedne tehnologije i načina odjednom, za što bolji dobitak krajnjih rezultata [28].

5. Mogućnosti primjene Wi-Fi-ja u javnom gradskom prijevozu

Brojanje aktivnih sučelja Wi-Fi-ja koje je detektirala pristupna točka tek se odnedavno počela primjenjivati u svrhu određivanja broja ljudi. Funkcionira tako što aktivno sučelje sadrži MAC adresu koja se onda identificira kao jedan čovjek. Problem u tome je što su kompanije poput *Googlea*, *Applea* i *Microsofta* uveli *randomizaciju* MAC adresa, što znači da je MAC adresu programsko sučelje slučajno generiralo i periodično ga mijenja.

iABACUS je prvi alat koji rješava problem *randomizacije* ugradnjom sustava koji prati putnikov uređaj (pametni telefon, laptop, tablet, itd.) od trenutka kada uđu u vozilo do trenutka kada izađu. Prije nego li je Wi-Fi uređaju dopušteno slanje podatka preko pristupne točke, prvo se mora povezati na nju tako što uređaj šalje *probe request* okvire odnosno poruke koje se povremeno emitiraju s bilo kojeg Wi-Fi aktivnog sučelja za spajanje na najbližu priključnu točku. *Probe request* sadrži informacije, među njima i MAC adresu, koje se mogu povezati s uređajem koji ih je poslao što omogućava njegovu identifikaciju i brojanje. Jezgra iABACUS-a je Wi-Fi *sniffer* koji hvata *probe requestove*, sakuplja ih i analizira. S obzirom na to da je uvedena *randomizacija* MAC adresa razlikovanje prave i nasumične je u tome što je prvih 6 okteta prave MAC adrese ustvari OUI (engl. *Organizationally Unique Identifier*) broj dodijeljen od strane IEEE i identificira proizvođača mrežne kartice. Tih 6 okteta nalazi se u *probe request* okviru, dalje se uspoređuje sa svim OUI-jima koji su na listi, ako se oni ne nalaze na listi algoritam za *derandomizaciju* se odmah pokreće, prije algoritma za brojanje. U suprotnom, nije potrebna *derandomizacija* i *probe request* se šalje direktno algoritmu za brojanje. Glavni cilj algoritma za brojanje je razumjeti koji od primljenih *probe requesta* dolaze od uređaja koji su zapravo u autobusu ili su zaprimljeni zbog automobila ili ljudi koji se kreću u njegovoj blizini. Eksperiment se sastoji od *Wireshark sniffer*²⁴ koji je postavljen da prikuplja samo *probe request* okvire, *MySQL*²⁵ baze podataka u kojoj će se spremati prikupljeni okviri, komunikacija između *sniffera* i baze podataka ostvarena je pomoću *Lua*²⁶ skripte i PHP (engl. *Hypertext Preprocessor*) aplikacija koja provjerava točnost baze podataka. Rezultati istraživanja u dinamičnom uvjetu iznosili su skoro 94% točnosti, dok je u kontroliranom uvjetu točnost bila 100%. Najveći problem bio je *randomizacija* MAC adresa, iako je korišten algoritam za *derandomizaciju* čak tri uređaja mogu uzrokovati da krajnja brojka uređaja bude šest puta veća [1].

Istraživanje o automatskom brojanju putnika pomoću Wi-Fi skenera, provedeno u gradu Nagano (Japan), napravila je skupina znanstvenika [2] koja je koristila Wi-Fi skener kako bi ulovila MAC adrese uređaja koji se nalaze u autobusu. Wi-Fi skener

²⁴ **Wireshark sniffer** – alat za praćenje mrežnih performansi i analizu paketa

²⁵ **MYSQL** – predstavlja sustav za upravljanje relacijskim bazama podataka

²⁶ **Lua skripta** – programski jezik

nalazio se na *Raspberry Pi-ju*²⁷ minijaturnom računalu koji je dodatno sadržavao BU 353 GPS (engl. *Global Positioning System*) i mikro SD (engl. *Secure Digital*) port za pohranu podataka, također autori su isprogramirali kod u *Phytonu*²⁸ za *Raspberry Pi* kako bi bili sigurni da Wi-Fi oprema funkcionira kao Wi-Fi skener. Wi-Fi skener postavljen je u blizini vozača autobusa, a njegov domet je od 100-300 metara. Nakon završetka autobusne rute, Wi-Fi skener je isključen, a MAC adrese i GPS podaci preuzeti za daljnju analizu. Rezultati istraživanja daju Wi-Fi i GPS podatke, Wi-Fi sadrži podatke o vremenu i MAC adresi, dok GPS zapis sadrži podatke o vremenu i koordinatama. Postupak obrade podataka kombinira Wi-Fi i GPS zapisnike i pretvara koordinatni sustav u UTM (engl. *Universal Transverse Mercator*), analizira brzine MAC adrese i GPS-a, kategorizira MAC adrese, izdvajaju se MAC adrese koje su dobivene tijekom na autobusnoj ruti od onih koje su dobivene na autobusnim stajalištima te se na kraju ispisuju čisti podaci za izračun broja putnika. Procijenjeni rezultati putnika i stvarni podaci imaju visoku korelaciju od 0,78 (*Pearsonov* koeficijent korelacije²⁹), to znači da je broj putnika procijenjen ovom metodom sličan istinitim podacima što je dobar početak za daljnje nadogradnje.

Jedan od glavnih izazova u procjeni broja putnika u javnom gradskom prijevozu su WiFi uređaji koji su pored autobusa i u susjednim vozilima što često dovodi do precjenjivanja. Autori [4] napravili su istraživanje u Melbourneu (Australija) i predložili rješenje spajanja nekoliko Wi-Fi senzora za kontinuirano skeniranje *probe request* okvira. Nakon skeniranja algoritam broji uređaje sa aktivnim Wi-Fi sučeljem koji su u autobusu ako su svi Wi-Fi senzori detektirali okvire u isto vrijeme, primili RSSI veći od zadanog praga, najraniji i posljednji okvir su nekoliko sekundi razlike i okvir je detektiran minimalno jednom. Korištenjem četiri Wi-Fi senzora zajedno maksimalno precjenjivanje putnika iznosilo je 15 %.

Kako bi se uređaj isprogramiran za brojanje putnika prikazao uspješnim, autori [9] su ga analizirali u kontroliranom i nekontroliranom okruženju i na kraju napravili usporedbu s ručnim brojanjem putnika. U kontroliranom okruženju utvrđeno je da kada se rezultati analiziraju u agregiranom obliku, procjene ukrcaja i izlaska putnika iznose oko 85 % do 90 % ručnog brojanja, što ukazuje na zadovoljavajuće procjene. Gledajući raščlanjene podatke, pogreške u procjeni su prilično visoke, a posljedica su pretjeranog i podcijenjenog broja uređaja u blizini. U nekontroliranom okruženju rezultati automatskog i ručnog broja putnika podosta se razlikuju. Autori vjeruju da je to zbog različitog vremena između autobusnih stanica jer ukoliko je vrijeme između stanica duže utoliko dolazi do pretjeranog broja uređaja, a kada je vrijeme kraće dolazi do podcjenjivanja broja uređaja jer vrijeme detekcije je nešto duže. Uz navedeno, smatraju da je do podcjenjivanja došlo zbog ne detektiranja uređaja koji su trebali biti detektirani, ugašenog Wi-Fi uređaja ili Wi-Fi sučelja i neposjedovanja Wi-Fi uređaja.

Noviji pristup brojanja putnika u javnom gradskom prijevozu predložen je u radu [5], a taj način osigurava kontinuirane i ažurirane informacije o broju putnika uz

²⁷ **Raspberry Pi** – minijaturno računalo koje se nalazi na maloj pločici

²⁸ **Phyton**- programski jezik visoke razine

²⁹ **Pearsonov koeficijent korelacije** – broj između -1 i 1 koji mjeri relaciju između dvije varijable

isplativ izvor podataka. Na temelju *ExpectationMaximization*³⁰ algoritma kombiniranog s *Gibbs* uzorkovanjem napravljen je teoretski model koji predviđa broj putnika temeljen na stvarnim podacima koji su dobiveni korištenjem ručnog brojanja putnika i MAC adresi uređaja prikupljenih pomoću Wi-Fi-ja. Ova metodologija ne ovisi o identificiranju određenog korisnika, već o uređaju u nekom kratkom vremenskom rasponu i praćenju njegovih WiFi okvira.

Neravnomjerna popunjenost autobusa pogoršava iskustvo putovanja putnika iz raznih razloga. Ovaj rad [3] opisuje mjerenje opterećenja autobusa praćenjem *probe request* aktivnosti WiFi uređaja. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je WiFi aktivnost u korelaciji s promatranim protokom putnika na autobusnim stanicama i opterećenjem u autobusu dok je na putu. Eksperiment se sastojao od *Atheros AR9285*³¹ kontrolera i bežičnog mrežnog sučelja prijenosnog računala *Hewlett-Packard ProBook 4320s*³² s *Ubuntu Linuxom*³³, a za snimanje podataka u razdoblju od šezdeset minuta korišten je *airodump-ng*³⁴. Tijekom bilježenja podataka vremena dolaska i odlaska autobusa zabilježen je i približan broj putnika koji putuju na svakom od njih. Podaci koje je prikupio *airodump-ng* uključuju agregirane informacije za svaku mobilnu stanicu, uključujući prvi i zadnji put kada je stanica viđena, ukupan broj paketa koje je odaslala i snagu signala njenog radio odašiljača. Datoteka s podacima formatirana je kao vrijednosti odvojene zarezima i njome se upravlja skriptama pomoću standardnih *Unix*³⁵ alata. Neobrađeni podaci vizualizirani su pomoću *GhostScripta*³⁶, a obrađeni podaci vizualizirani su pomoću *gnuplota*³⁷.

Autori rada [6] istražili su izvedivost rješenja kada se Wi-Fi senzori postave na više autobusa koji voze u gradu. To će omogućiti procjenu broja ljudi u autobusu i broja ljudi u neposrednoj blizini autobusa dajući potrebne podatke o opterećenosti autobusa korisnicima javnog prijevoza u svrhu planiranja putovanja i pružanje ažurirane slike o broju ljudi u različitim dijelovima grada za cijeli grad. Sustav za brojanje sadrži tri glavna modula: senzorski čvor, server za pohranu podataka i usluga obrade podataka. Naši nalazi pokazuju da je izvedba algoritma vrlo osjetljiva na postavke parametra algoritma. Kako bi se postigla visoka točnost krajnjih rezultata, potrebno je korektno podesiti parametre koji se odnose na minimalne vrijednosti za vrijeme promatranja uređaja i RSSI signala s uređaja.

Ovaj rad [7] predlaže procjenu broja putnika analizom signala s njihovih Wi-Fi uređaja, klasificirajući ih kao one koji potječu od putničkih ili neputničkih uređaja pomoću mehanizma filtriranja u stvarnom vremenu. Provjeravan je koristan odnos između snage signala i blizine unutar autobusa, te da su signali jači od uređaja unutar autobusa nego od onih izvana. Određen je koristan raspon jačina signala za

³⁰ **ExpectationMaximization** - je algoritam koji služi za izvođenje procjene maksimalne vjerojatnosti u prisutnosti latentnih varijabli

³¹ **Atheros AR9285** - bežični čip namijenjen za mrežnu komunikaciju

³² **Hewlett-Packard ProBook 4320s** - marka prijenosnog računala

³³ **Ubuntu Linux** - operativni sustav otvorenog koda na Linuxu za poslovne poslužitelje, radnu površinu, oblak i IoT

³⁴ **Airodump-ng** - programska oprema koja se koristi za dohvrat paketa 802.11 okvira

³⁵ **Unix** - operativni sustav

³⁶ **GhostScript** - programska podrška koja služi za tumačenje PDF (engl. *Portable Document Format*) datoteka

³⁷ **Gnuplot** - programska podrška za prikaz dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih prikaza

parametre metode filtriranja. Eksperimentalna validacija provedena je na autobusima različitih tipova koji voze različitim rutama, rezultati pokazuju da filtrirani podaci mogu klasificirati signale putničkih uređaja od vanjskih signala s točnošću od 75%, što je obećavajuća osnova za pružanje informacija putnicima u stvarnom vremenu.

Pametni mobilni uređaji s bežičnim umrežavanjem su sveprisutni, ako su uključeni automatski će tražiti bežične pristupne točke u svojoj neposrednoj blizini. Ovo se može iskoristiti za brojanje tih uređaja i, prema povezivanju, broja ljudi u blizini. S dovoljno senzora može se mapirati broj i protok ljudi kroz prostor. Neke od kratkoročnih i dugoročnih prednosti koje ove informacije mogu pružiti:

- Kratkoročne koristi:
 - Učinkovita raspodjela osoblja na stanicama na temelju gužve na peronu
 - Alarmi koji omogućuju osoblju postaje da se nosi s prenatrpanošću perona
 - Optimizirati usluge zamjene autobusa tijekom poremećaja
 - Preusmjeravanje putnika u vagone s manje gužve kako bi se smanjilo zadržavanje na kolodvoru
- Dugoročne koristi:
 - Strateška obnova infrastrukture
 - Prilagodbe rasporeda
 - Unos u projektiranje infrastrukture (platforme, vozni park itd.).

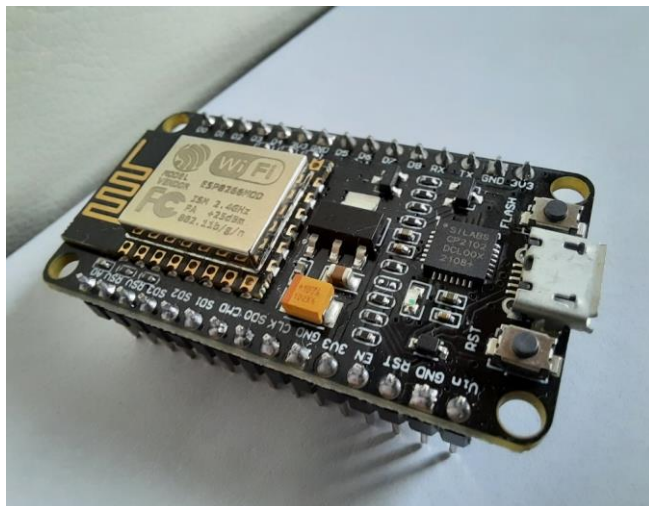
Kako bi se utvrdilo točnost broja putnika dobivene korištenjem Wi-Fi-a, napravljena je usporedba između broja *probe requesta* i onih koji su se uključili i isključili korištenjem MYKI podataka o izdavanju karata. Za većinu radnih dana rezultati su se približno podudarali [8].

Ovaj rad [12] istražuje o problemima procjene broja putnika na dva različita načina. Nakon konstruiranja linearnih modela i procjene apsolutnih i relativnih pogrešaka, zaključeno je da se relativna pogreška procjene temeljene na Wi-Fi-u može značajno smanjiti ako se skupovi podataka pravilno obrađuju. Kada se dnevna Wi-Fi analiza podijeli na dijelove između stanica, metoda linearne korekcije može se primijeniti na te dijelove, i kao rezultat toga, relativne pogreške mogu se smanjiti.

6. Studija slučaja: Primjer brojanja putnika u kontroliranim uvjetima korištenjem Wi-Fi tehnologije

Autor [29] kreirao je kod za mikrokontroler koji omogućuje brojanje aktivnih Wi-Fi sučelja koje šalje mobilni uređaj, odnosno prema tom broju zaključuje koliki je broj ljudi zbog pretpostavke da svaka osoba posjeduje jedan mobilni uređaj. Projekt je prikazan kroz nekoliko koraka, dakle svaki korišteni alat i postupak koji je proveden kako bi se mogao isprogramirati navedeni uređaj i dovesti u funkciju.

Prvenstveno je potrebno nabaviti sklop tj. čip na koju će se postaviti cijeli kod. Korišten je NodeMCU (engl. *Node MicroController Unit*) ESP8266 Wi-Fi mikrokontroler, vrsta SoC (engl. *System-on-a-Chip*) čipa na kojem je skoro većina ili sve komponente računala (procesorska jezgra, memorija (NOR Flash³⁸, OTP³⁹ (engl. *One Time Programmable*) ROM (engl. *Read-only memory*) i RAM (engl. *Random Access Memory*) memoriju) i ulazno/izlazne jedinice) ugrađene na jednu pločicu tj. čip. Wi-Fi označava da sadrži komponentu ESP12 RF (engl. *Radio-Frequency*) modul koji služi za primanje i odašiljanje radio signala, dakle antenu. Ova nadogradnja olakšava dizajnirati uređaj s Wi-Fi mogućnostima jer nije potrebno dodavati druge komponente. NodeMCU označava da uz ESP12 komponentu, ESP8266 sadrži i iglene nožice prilagođene za matičnu ploču te USB (engl. *Universal Serial Bus*) konektor što osigurava lakše testiranje i programiranje projekata [30]. NodeMCU ESP8266 Wi-Fi mikrokontroler prikazan je na slici 2.



Slika 2. Prikaz NodeMCU ESP8266 Wi-Fi mikrokontrolera

³⁸ NOR Flash – trajna memorija uređaja

³⁹ OTP ROM – memorija koja se može samo jednom iskoristiti i više ne, tj. uređaj kada se jednom isprogramira sadržaj više ne može biti promijenjen

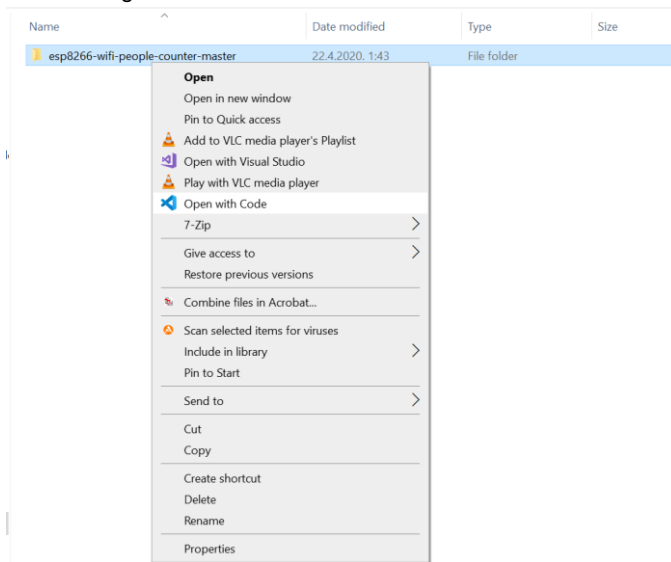
Programska oprema koja je korištena za osposobljavanje ESP8266:

- *Microsoft Visual Studio Code Extension for Arduino*⁴⁰

Alati koji su potrebni kako bi se zabilježeni podaci poslali, pohranili i prikazali na grafu:

- *Mosquitto message broker*⁴¹ (*MQTT protocol*⁴²)
- *InfluxDB*⁴³ i
- *Grafana*⁴⁴

Programsku opremu i alate potrebno je preuzeti s Interneta i napraviti korisničke račune kako bi se u kodu mogli staviti korisnički podaci za povezivanje sva četiri sustava. Datoteku s programskim kodovima potrebno je preuzeti s autorove stranice [29]. Nakon što je datoteka preuzeta potrebno ju je otvoriti s *Microsoft Visual Studio Code Extension for Arduino* programom što je prikazano na slici 3. Važno je napomenuti da se datoteke unutar navedene mogu pojedinačno otvarati, ali svaka samostalno neće funkcionirati iz razloga jer se nadovezuju jedna na drugu.



Slika 3. Prikaz otvaranja datoteke pomoću programa *Microsoft Visual Studio Code*

Potrebno je pričekati određeno vrijeme dok se sve datoteke učitaju, a to ovisi o

⁴⁰ **Microsoft Visual Studio Code Extension for Arduino** – programska podrška namijenjena za izradu Arduino programa

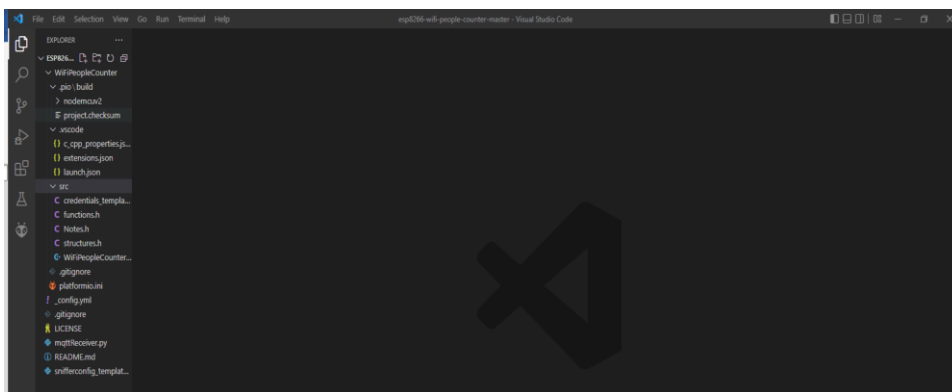
⁴¹ **Mosquitto message broker** – server koji prima sve dobivene poruke i zatim ih usmjerava na odgovarajuće odredište

⁴² **MQTT protocol** - protokol za razmjenu poruka koji mrežnim klijentima s ograničenim resursima pruža jednostavan način za distribuciju informacija u okruženjima niske propusnosti.

⁴³ **InfluxDB** – baza podataka koja pohranjuje i dohvaća podatke u područjima kao što su praćenje operacija, podaci senzora interneta stvari i analitika u stvarnom vremenu

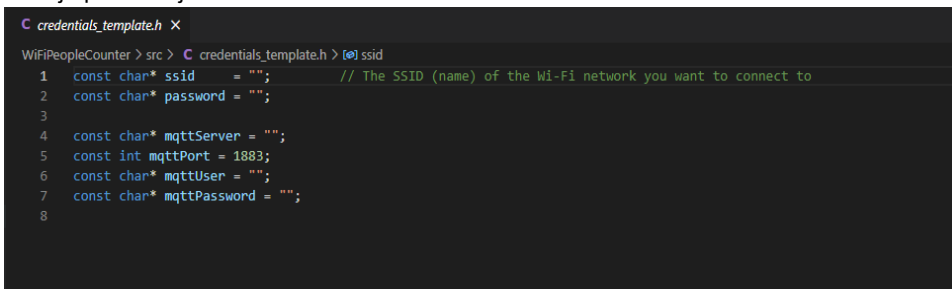
⁴⁴ **Grafana** – web aplikacija za vizualizaciju podataka u obliku grafova, histograma, geografskih mapi, itd.

performansama računala. Nakon učitavanja glavne datoteke, izgled i redoslijed kojem su unutarnje datoteke posložene prikazano je slikom 4. Sastoji se od *WifiPeopleCounter* datoteke, *mqttReceiver.py* i *snifferconfig_template.py*. Primarna datoteka *WifiPeopleCounter* sadrži dodatne datoteke s kodovima koji omogućavaju povezivanje na ESP8266 koji će preko *Mosquitto* MQTT protokola slati zaprimljene podatke na *InfluxDB* bazu podataka jer ESP8266 ima ograničenu memoriju, stoga je potrebno u određenim vremenskim intervalima slati podatke na vanjsku bazu podataka.



Slika 4. Prikaz datoteka u *Microsoft Visual Studio Code* programu

Za funkcioniranje MQTT protokola potrebno je spajanje na Internet kako bi se *client* mogao povezati s *Mosquitto brokerom*, a u ovom slučaju spajanje na Internet se odvija preko Wi-Fi mreže. Kako bi se ESP8266 spojio na željenu Wi-Fi mrežu, potrebno je unijeti ime Wi-Fi mreže, lozinku Wi-Fi-ja, naziv MQTT servera, njegov port, MQTT korisničko ime i lozinku. Spajanje na Internet potrebno je i za slanje podataka na *InfluxDB* bazu podataka, a izgled sučelja prikazan je slikom 5.



Slika 5. Prikaz potrebnog sučelja za spajanje na Wi-Fi mrežu i MQTT server

Nakon unosa podataka, prelazi se na datoteku s kodom naziva *functions.h*. U njoj je definiran maksimalni broj pristupnih točki i uređaja s MAC adresom. Za pristupnu točku postavljeno je ograničenje na 100, a za MAC adrese 200. Ograničenje je postavljeno zbog nedostatka memorije koju ESP8266 ima, ali bez obzira na to za mjerenje u kontroliranim

uvjetima je sasvim dovoljno. Za korištenje u urbanim područjima tj. nekontroliranim uvjetima taj broj bi se morao povećati zbog većeg kapaciteta ljudi. Nakon ograničenja, slijede deklaracije varijabli koje će se u daljnjem postupku iskoristiti za spremanje podataka. Prilikom detektiranja MAC adrese spremaju se podaci o jačini signala kojom je odaslana, odnosno jačini zaprimljenog signala RSSI (engl. *Received Signal Strength Indicator*) i podaci o *beacon* okviru. U ovom dijelu kod, prikazan na slici 6., radi u *Promiscuous* modu kako bi detektirao sve pakete koje šalju mobilni uređaji.

```

1 // Expose Espressif SDK functionality
2
3 extern "C" {
4     #include "user_interface.h"
5     typedef void (*freedom_outside_cb_t)(uint8 status);
6     int wifi_register_send_pkt_freedom_cb(freedom_outside_cb_t cb);
7     void wifi_unregister_send_pkt_freedom_cb(void);
8     int wifi_send_pkt_freedom(uint8 *buf, int len, bool sys_seq);
9 }
10
11 #include <ESP8266WiFi.h>
12 #include "../structures.h"
13
14 #define MAX_APS_TRACKED 100
15 #define MAX_CLIENTS_TRACKED 200
16
17 int aps_known_count = 0; // Number of known APs
18 int nothing_new = 0;
19 int clients_known_count = 0; // Number of known CLIENTS
20 int foundMAC;
21
22 void promisc_cb(uint8_t *buf, uint16_t len)
23 {
24     signed int potencia;
25     if (len == 12) {
26         struct RxControl *sniffer = (struct RxControl*) buf;
27         potencia = sniffer->rssi;
28     } else if (len == 128) {
29         struct sniffer_buf2 *sniffer = (struct sniffer_buf2*) buf;
30         struct beaconinfo beacon = parse_beacon(sniffer->buf, 112, sniffer->rx_ctrl.rssi);
31         potencia = sniffer->rx_ctrl.rssi;
32     } else {
33         struct sniffer_buf *sniffer = (struct sniffer_buf*) buf;
34         potencia = sniffer->rx_ctrl.rssi;
35     }
36     char currentMAC[12];
37

```

Slika 6. Prikaz naredbi za detekciju MAC adresa i jačine primljenog signala

Naredbe *for*, *if* i *if else* korištene su dalje u kodu, koji je prikazan slikom 7, kako bi se nakon pronalaska MAC adresa provjeravala je li takva MAC adresa već detektirana, ako je ne uzima se u obzir, ako nije ide dalje na provjeru podataka koje sadrži. Ti podaci se bilježe u prethodno deklarirane varijable, a nakon što se *buffer* popuni šalje se zahtjev MQTT protokolu za slanje zaprimljenih podataka u *InfluxDB* bazu podataka.

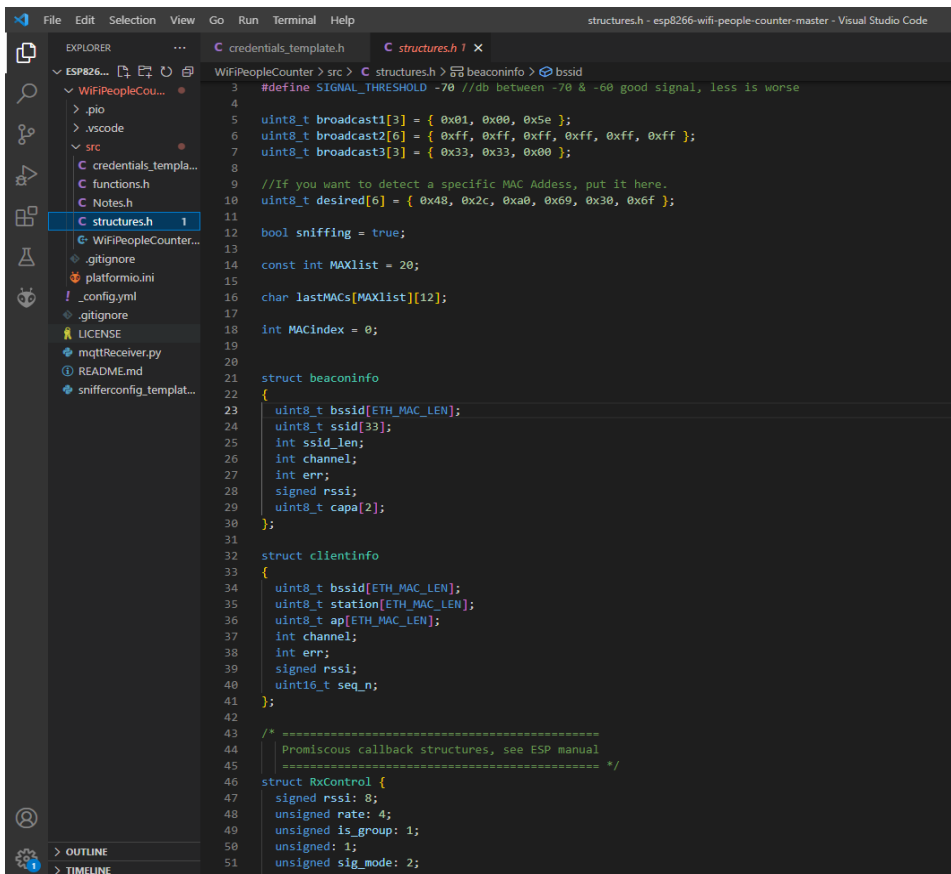

```
59     for (int i=0;i<MAXlist;i++) {
60         foundMAC = 1;
61         for (int bytupos=0;bytupos<12;bytupos++) {
62             if (currentMAC[bytupos] != lastMACs[i][bytupos]) {
63                 foundMAC = 0;
64             }
65         }
66         if (foundMAC == 1) {
67             //Serial.print("FOUND RECORDED MAC AT ");
68             //Serial.println(i);
69             break;
70         }
71     }
72     if (!foundMAC && int8_t(potencia)>SIGNAL_THRESHOLD) {
73         strncpy(lastMACs[MACindex],currentMAC,12);
74         Serial.print("NEW MAC WITH GOOD SIGNAL DETECTED: ");
75         Serial.print(currentMAC);
76         Serial.print(" SIGNAL:");
77         //Serial.print(int8_t(buf[0]));
78         //Serial.print(" ");
79         Serial.println(potencia);
80         MACindex++;
81     }
82     if (MACindex == MAXlist) {
83         Serial.println("BUFFER FULL: READY TO START SENDING MACS INFORMATION TO MQTT SERVER");
84         for (int i=0;i<MAXlist;i++) {
85             for (int i2=0;i2<12;i2++) {
86                 Serial.print(lastMACs[i][i2]);
87             }
88             Serial.println();
89         }
90         MACindex = 0;
91         // stop sniffing and start sending data (change WiFi configuration)
92         sniffing = false;
93     }
94 }
95 // Enable this lines if you want to scan for a specific MAC address
96 // Specify desired MAC address on line 10 of structures.h
97
98 int same = 1;
99 for(int i=0;i<6;i++)
100 {
101     if(buf[22+i]!=desired[i])
102     {
103         same=0;
104         break;
105     }
106 }
107 if(same)
108 {
109     Serial.print("MAC found: ");
110     Serial.println(currentMAC);
111 }
112 //different device
113 else
114 {
115     //Serial.println(currentMAC);
116 }
117 }
```

Slika 7. Prikaz naredbi za detekciju MAC adresa i jačine primljenog signala

Sljedeća datoteka koja se otvara je *structures.h* u kojoj se nalaze naredbe, prikazane na slici 8., slici 9. i slici 10. S obzirom na to da odaslani radiofrekvencijski signal slabi s kvadratom udaljenosti to znači da će RSSI isto biti manji. Postavljanjem granice RSSI signala koja je u ovom slučaju između -70 dB (engl. *Decibel*) i -60 dB, zabilježit će se samo oni koji su u blizini mikrokontrolera, a ostatak će se odbaciti zbog slabog signala što znači da je detektirani uređaj dosta daleko od mikrokontrolera.

Pregledom postojećih istraživanja u kojima se koristi Wi-Fi tehnologija zabilježeno je da je takav način u kojem se postavljaju granice signala ključan za određivanje krajnjeg broja

putnika jer se time izbacuju oni koji se ne nalaze u vozilu. Nadalje, radi se deklaracija varijabli u koje će se spremati dohvaćeni podaci.

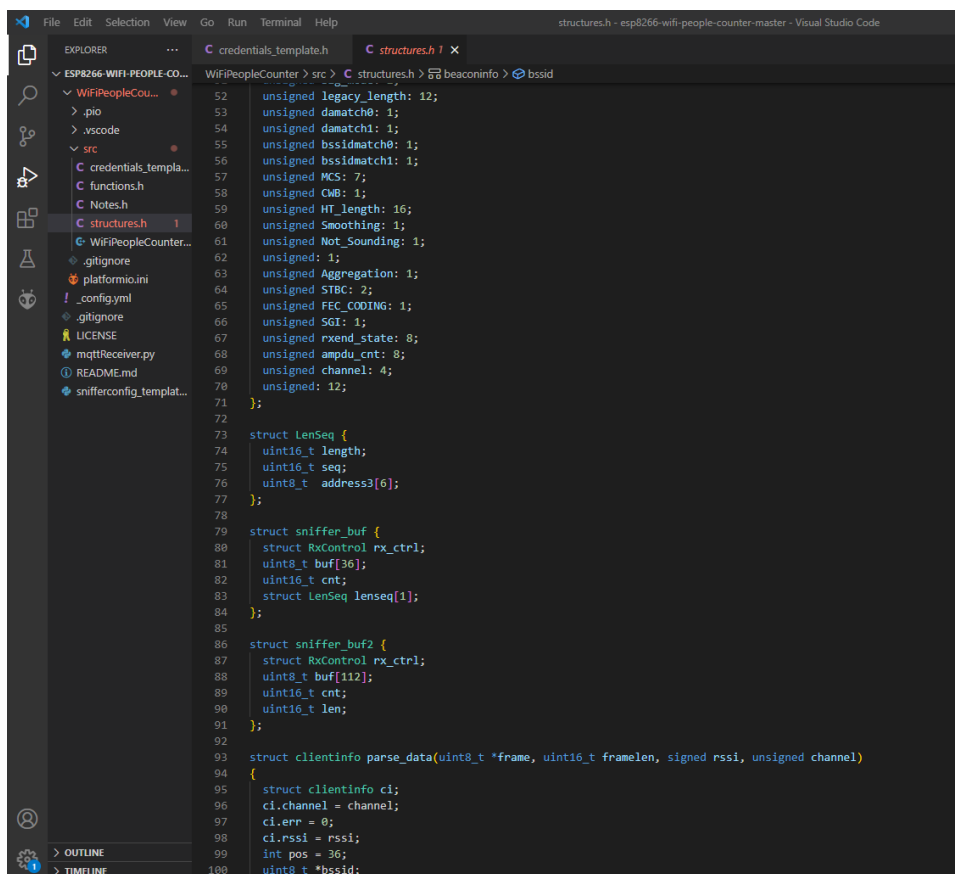


```
3 #define SIGNAL_THRESHOLD -70 //db between -70 & -60 good signal, less is worse
4
5 uint8_t broadcast1[3] = { 0x01, 0x00, 0x5e };
6 uint8_t broadcast2[6] = { 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, 0xff };
7 uint8_t broadcast3[3] = { 0x33, 0x33, 0x00 };
8
9 //If you want to detect a specific MAC Address, put it here.
10 uint8_t desired[6] = { 0x48, 0x2c, 0xa0, 0x69, 0x30, 0x6f };
11
12 bool sniffing = true;
13
14 const int MAXlist = 20;
15
16 char lastMACs[MAXlist][12];
17
18 int MACindex = 0;
19
20
21 struct beaconinfo
22 {
23     uint8_t bssid[ETH_MAC_LEN];
24     uint8_t ssid[33];
25     int ssid_len;
26     int channel;
27     int err;
28     signed rssi;
29     uint8_t capa[2];
30 };
31
32 struct clientinfo
33 {
34     uint8_t bssid[ETH_MAC_LEN];
35     uint8_t station[ETH_MAC_LEN];
36     uint8_t ap[ETH_MAC_LEN];
37     int channel;
38     int err;
39     signed rssi;
40     uint16_t seq_n;
41 };
42
43 /*
44  * Promiscuous callback structures, see ESP manual
45  * ===== */
46 struct RxControl {
47     signed rssi: 8;
48     unsigned rate: 4;
49     unsigned is_group: 1;
50     unsigned: 1;
51     unsigned sig_mode: 2;
52     unsigned: 10;
53 }
```

Slika 8. Prikaz deklariranja varijabli *beacon* i *RxControl*

Deklarira se varijabla *beacon* okvir, mobilni uređaj, *RxControl* i *sniffer* u koje će se spremati detektirani podaci

Commented [IG1]: Nedostaje tekst u fusnoti.



```
52 unsigned legacy_length: 12;
53 unsigned damatch0: 1;
54 unsigned damatch1: 1;
55 unsigned bssidmatch0: 1;
56 unsigned bssidmatch1: 1;
57 unsigned MCS: 7;
58 unsigned CMB: 1;
59 unsigned HT_length: 16;
60 unsigned Smoothing: 1;
61 unsigned Not_Sounding: 1;
62 unsigned: 1;
63 unsigned Aggregation: 1;
64 unsigned STBC: 2;
65 unsigned FEC_CODING: 1;
66 unsigned SGI: 1;
67 unsigned rxend_state: 8;
68 unsigned ampdu_cnt: 8;
69 unsigned channel: 4;
70 unsigned: 12;
71 };
72
73 struct LenSeq {
74     uint16_t length;
75     uint16_t seq;
76     uint8_t address3[6];
77 };
78
79 struct sniffer_buf {
80     struct RxControl rx_ctrl;
81     uint8_t buf[36];
82     uint16_t cnt;
83     struct LenSeq lenseq[1];
84 };
85
86 struct sniffer_buf2 {
87     struct RxControl rx_ctrl;
88     uint8_t buf[112];
89     uint16_t cnt;
90     uint16_t len;
91 };
92
93 struct clientinfo parse_data(uint8_t *frame, uint16_t framelen, signed rssi, unsigned channel)
94 {
95     struct clientinfo ci;
96     ci.channel = channel;
97     ci.err = 0;
98     ci.rssi = rssi;
99     int pos = 36;
100     uint8_t *bssid;
```

Slika 9. Prikaz deklariranja varijabli *RxControl* i *sniffer*

Naredbom *switch*, koja u sebi sadrži naredbu *case* i *break*, će se upravljati i povjeravati detektirani okviri mobilnog uređaja te se uz navedenu naredbu koristi i ona za upravljanje memorijom.

```

99 int pos = 36;
100 uint8_t *bssid;
101 uint8_t *station;
102 uint8_t *ap;
103 uint8_t ds;
104
105 ds = frame[1] & 3; //Set first 6 bits to 0
106 switch (ds) {
107     // p[1] - xxxx xx00 -> NODS p[4]-DST p[10]-SRC p[16]-BSS
108     case 0:
109         bssid = frame + 16;
110         station = frame + 10;
111         ap = frame + 4;
112         break;
113     // p[1] - xxxx xx01 -> TODS p[4]-BSS p[10]-SRC p[16]-DST
114     case 1:
115         bssid = frame + 4;
116         station = frame + 10;
117         ap = frame + 16;
118         break;
119     // p[1] - xxxx xx10 -> FromDS p[4]-DST p[10]-BSS p[16]-SRC
120     case 2:
121         bssid = frame + 10;
122         // hack - don't know why it works like this...
123         if (memcmp(frame + 4, broadcast1, 3) || memcmp(frame + 4, broadcast2, 3) || memcmp(frame + 4, broadcast3, 3)) {
124             station = frame + 16;
125             ap = frame + 4;
126         } else {
127             station = frame + 4;
128             ap = frame + 16;
129         }
130         break;
131     // p[1] - xxxx xx11 -> MDS p[4]-RCV p[10]-TRM p[16]-DST p[26]-SRC
132     case 3:
133         bssid = frame + 10;
134         station = frame + 4;
135         ap = frame + 4;
136         break;
137 }
138
139 memcpy(ci.station, station, ETH_MAC_LEN);
140 memcpy(ci.bssid, bssid, ETH_MAC_LEN);
141 memcpy(ci.ap, ap, ETH_MAC_LEN);
142
143 ci.seq_n = frame[23] * 0xFF + (frame[22] & 0xF0);
144 return ci;
145 }
146
147 struct beaconinfo parse_beacon(uint8_t *frame, uint16_t frameLen, signed rssi)

```

Slika 10. Prikaz naredbe za premještanje memorije i naredbe switch

Za pravilno funkcioniranje MQTT protokola tj. *Mosquitto* brokera, uz to što mora biti spojen na Internet, potrebno je i unijeti korisničke podatke brokera, a točan prikaz vidi se na slici 11.

```

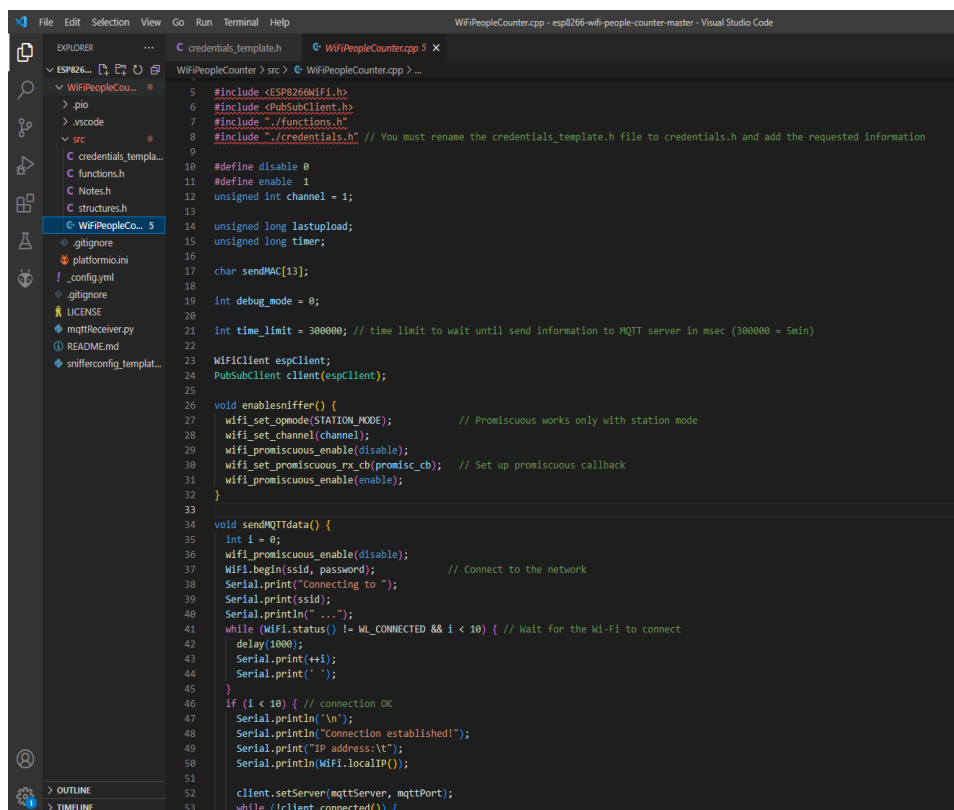
EXPLORER
ESP8266-WIFI-PEOPLE-CO...
src
snifferconfig_template.py
1 broker_address="localhost"
2 broker_port=1883
3 broker_user=""
4 broker_password=""
5 broker_topic="esp/sniffer"
6 db_address="localhost"
7 db_port=8086
8 db_name="sniffer"
9

```

Slika 11. Prikaz polja za unos korisničkih podataka Mosquitto brokera

Glavni dio programa prikazan je slikom 12. i slikom 13. gdje se svi prijašnji kodovi spajaju.

Potrebno je postaviti ograničeno vrijeme punjenja *buffera* jer ukoliko se prepuni utoliko neće više moći primiti podatke i funkcija mikrokontrolera neće moći biti izvršena. Vrijeme je postavljeno na pet minuta jer se ide s pretpostavkom da će se u toliko vremena detektirati broj maksimalni broj MAC adresa. Ovdje se nalaze i naredbe koje služe kako bi se primljeni podaci putem MQTT protokola prenosile dalje do MQTT servera i naredbe za provjeru konekcije između mikrokontrolera i Wi-Fi mreže, ako je sve uredi prijenos podataka će biti ostvaren, ako nije izbacit će pogrešku.



```
5 #include <ESP8266WiFi.h>
6 #include <PubSubClient.h>
7 #include "../functions.h"
8 #include "../credentials.h" // You must rename the credentials_template.h file to credentials.h and add the requested information
9
10 #define disable 0
11 #define enable 1
12 unsigned int channel = 1;
13
14 unsigned long lastupload;
15 unsigned long timer;
16
17 char sendMAC[13];
18
19 int debug_mode = 0;
20
21 int time_limit = 300000; // time limit to wait until send information to MQTT server in msec (300000 = 5min)
22
23 WiFiClient espClient;
24 PubSubClient client(espClient);
25
26
27 void enablesniffer() {
28     wifi_set_omode(STATION_MODE); // Promiscuous works only with station mode
29     wifi_set_channel(channel);
30     wifi_promiscuous_enable(disable);
31     wifi_set_promiscuous_rx_cb(promisc_cb); // Set up promiscuous callback
32     wifi_promiscuous_enable(enable);
33 }
34
35 void sendMQTTdata() {
36     int i = 0;
37     wifi_promiscuous_enable(disable);
38     WiFi.begin(ssid, password); // Connect to the network
39     Serial.print("Connecting to ");
40     Serial.print(ssid);
41     Serial.println(" . . .");
42     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && i < 10) { // Wait for the Wi-Fi to connect
43         delay(1000);
44         Serial.print(++i);
45         Serial.print(' ');
46     }
47     if (i < 10) { // connection OK
48         Serial.println("\n");
49         Serial.println("Connection established!");
50         Serial.print("IP address:\t");
51         Serial.println(WiFi.localIP());
52     }
53     client.setServer(mqttServer, mqttPort);
54     while (!client.connected()) {
```

Slika 12. Prikaz glavnog koda *Wi-FiPeopleCounter*a

```
50 Serial.println(WiFi.localIP());
51
52 client.setServer(mqttServer, mqttPort);
53 while (!client.connected()) {
54     Serial.println("Connecting to MQTT...");
55
56     if (client.connect("ESP8266Client", mqttUser, mqttPassword)) {
57         Serial.println("Connected to MQTT SERVER");
58     } else {
59         Serial.print("failed with state ");
60         Serial.print(client.state());
61         delay(2000);
62     }
63 }
64 // sending buffer information to MQTT server
65 for (int i=0;i<MAXLIST;i++) {
66     int noempty = 0;
67     for (int i2=0;i2<12;i2++) {
68         sendMAC[i2]=lastMACs[i][i2];
69         if (lastMACs[i][i2]!=0x00) {
70             noempty=1;
71         }
72     }
73     sendMAC[i2]='\0';
74     if (noempty == 1) {
75         client.publish("esp/sniffer", sendMAC);
76         Serial.print("SENDING MAC TO MQTT SERVER: ");
77         Serial.println(sendMAC);
78         delay(200);
79     }
80     for (int i2=0;i2<12;i2++) lastMACs[i][i2]=0x00; // clean the array (fill with 0's)
81 }
82 MACindex = 0;
83 // reenale sniffing
84 enablesniffer();
85 } else {
86     Serial.println('\n');
87     Serial.println("WiFi Connection failed");
88     MACindex = 0;
89     // reenale sniffing
90     enablesniffer();
91 }
```

Slika 13. Prikaz nastavka glavnog koda *Wi-FiPeopleCounter*a

Zadnja datoteka koda koja je potrebna kako bi se podaci mogli proslijediti putem MQTT *brokera* na *InfluxDB* prikazana je na slici 14. Ovdje se pozivaju varijable deklarirane u prijašnjim datotekama kako bi se mogle provjeriti jesu li detektirane MAC adrese *randomizirane* - jer ako jesu, odbacuje ih se, a u suprotnom ih se zadržava, dok taj dio se odrađuje naredbama *if* i *if else* prije nego ih se pošalje do baze podataka *InfluxDB*.

```

1
2 from influxdb import InfluxDBClient
3 import paho.mqtt.client as mqtt
4 import time
5 import datetime
6 import snifferconfig as cfg
7
8 def on_message(client,userdata,message):
9     mac = str(message.payload.decode("utf-8"))
10    if mac != "":
11        if mac_randomizer_mode:
12            mac_half=mac[0:6]
13            last15mResults = influxclient.query("SELECT activity FROM traffic_accounting WHERE mac = '"+mac_half+"' and time > now() - 15m;")
14        else:
15            last15mResults = influxclient.query("SELECT activity FROM traffic_accounting WHERE mac = '"+mac+"' and time > now() - 15m;")
16            last15mPoints = list(last15mResults.get_points())
17            last15mPoints = list(last15mPoints)
18            twoHoursResults = influxclient.query("SELECT activity FROM traffic_accounting WHERE mac = '"+mac+"' and time > now() - 2h;")
19            twoHoursPoints = twoHoursResults.get_points()
20            twoHoursPoints = list(twoHoursPoints)
21            allResults = influxclient.query("SELECT activity FROM traffic_accounting WHERE mac = '"+mac+"'")
22            allPoints = allResults.get_points()
23            allPoints = list(allPoints)
24            lenAllPoints = len(allPoints)
25            if len(last15mPoints) == 0 and len(twoHoursPoints) > 4:
26                json_insert = [ {"measurement": "traffic_accounting", "tags": { "mac": mac, "permanent": "yes" }, "fields": { "activity": 1, "total_activity": lenAllPoints } } ]
27                influxclient.write_points(json_insert)
28                if log:
29                    logfile.write("%s,PERMANENT,%s\n" % (mac,datetime.datetime.now()))
30                if debug:
31                    print("MAC Received:",mac,"ADDED AS PERMANENT at",datetime.datetime.now())
32            elif len(last15mPoints) == 0 and len(twoHoursPoints) <= 4:
33                json_insert = [ {"measurement": "traffic_accounting", "tags": { "mac": mac, "permanent": "no" }, "fields": { "activity": 1, "total_activity": lenAllPoints } } ]
34                influxclient.write_points(json_insert)
35                if log:
36                    logfile.write("%s,NOT PERMANENT,%s\n" % (mac,datetime.datetime.now()))
37                if debug:
38                    print("MAC Received:",mac,"ADDED AS NOT PERMANENT at",datetime.datetime.now())
39            else:
40                if log:
41                    logfile.write("%s,NOT ADDED (TOO SOON),%s\n" % (mac,datetime.datetime.now()))
42                if debug:
43                    print("MAC Received:",mac,"NOT ADDED BECAUSE RECENT PREVIOUS PRESENCE DETECTED < 15h at",datetime.datetime.now())
44
45    debug = True
46    log = True
47    mac_randomizer_mode = False # to avoid WiFi mac randomizer mode
48
49    if log:
50        debug = True
51        log = True
52        mac_randomizer_mode = False # to avoid WiFi mac randomizer mode
53
54    if log:
55        logfile = open("log.csv", "a")
56
57    # Influx setup
58    influxclient = InfluxDBClient(host=cfg.db_address, port=cfg.db_port)
59    influxclient.switch_database(cfg.db_name)
60
61    #print("creating new instance")
62    mqttclient = mqtt.Client("mqttsniffer") #create new instance
63    mqttclient.username_pw_set(cfg.broker_user, cfg.broker_password)
64
65    #print("connecting to broker")
66    mqttclient.connect(cfg.broker_address, port=cfg.broker_port) #connect to broker
67    mqttclient.loop_start()
68
69    #print("Subscribing to topic")
70    mqttclient.subscribe(cfg.broker_topic)
71    mqttclient.on_message=on_message #attach function to callback
72
73    try:
74        while True:
75            time.sleep(1)
76
77    except KeyboardInterrupt:
78        print("bye")
79        if log:
80            logfile.close()
81        mqttclient.disconnect()
82        mqttclient.loop_stop()

```

Slika 14. Prikaz koda za prijenos podataka preko Mosquitto brokera na InfluxDB

Kada je sve postavljeno, potrebno je otvoriti Grafanau i povezati ju s InfluxDB kao izvor podataka te kreirati nadzornu ploču za prikaz filtriranih MAC adresa.

Ovo je jedan od načina koji se može iskoristi za brojanje putnika u kontroliranim uvjetima. Ima veliki potencijal za korištenje u urbanom okruženju zbog naredbi koje odbacuju MAC adrese koje imaju slab signal odnosno RSSI i naredbi za odbacivanje *radnomiziranih* MAC adresa. Nedostatak je u tome što je postavljeno ograničenje na broj MAC adresa koje se mogu detektirati, a u nekontroliranom okruženju nije moguće imati tako mali broj MAC adresa. Za tu uporabu potrebna je dodatna konfiguracija i prilagodba koda kako bi mogao pravilno funkcionirati i podnositi neplanske situacije.

7. Zaključak

Pregledom postojećih istraživanja koja su koristila Wi-Fi tehnologiju kao način brojanja putnika, može se uočiti pouzdanost tog sustava jer su prilikom usporedbi s ručnim načinom rezultati bili poprilično slični. Do ne podudaranja dolazi zbog nekoliko razloga, a to su dohvaćene MAC adrese mobilnih uređaja koji se nalaze izvan vozila za javni gradski prijevoz, neposjedovanje mobilnog uređaja, odašiljanje slabih *probe request* okvira zbog niske razine baterije mobilnog uređaja, posjedovanje dva ili više mobilna uređaja, nemogućnost detekcije mobilnog uređaja i prekratak boravak u vozilu.

Nadalje, napravljena je detaljna analiza Wi-Fi tehnologije kroz koju se dobio kronološki uvid razvoja WiFi standarda, arhitekture, značajki i budućeg napredovanja. Standardi su se tijekom godina nadograđivali i poboljšavali što se naviše vidi u brzini prijenosa podataka koje Wi-Fi tehnologija postiže. S obzirom na to da za prijenos podataka koristi radiofrekvencijski signal omogućila je korisnicima uporabu bežičnih uređaja to jest uređaja koji ne zahtijevaju povezanost na fizičku mrežu. Način na koji se vrši prijenos podataka opisan je OSI referentnim modelom kroz sedam slojeva, a svaki sloj ima posebnu odgovornost i zadaću koju izvršava. Kroz rad je prikazano na koji način se mogu primijeniti funkcionalnosti Wi-Fi tehnologije od kojih je jedna automatsko brojanje putnika. Automatsko brojanje putnika ima svoje prednosti i nedostatke, ali napretkom tehnologije omogućeno je smanjenje tih nedostataka. Neke od opreme koja se koristi za automatsko brojanje su kamere, senzori, pametne kartice, *bluetooth* i najvažnije za ovaj rad MAC adrese.

Detaljnijim pregledom provedenih istraživanja dobiva se uvid u to koliko je metoda brojanja putnika pomoću Wi-Fi tehnologije jednostavna za primjenu, ali kompleksna prilikom izrade. Jednostavnost je u samoj ugradnji uređaja u prijevozno sredstvo, praćenju dobivenih podataka, pristupačnoj cijena uređaja i objašnjenju na koji način ova tehnologija funkcionira. Kompleksnost se nalazi u kodu koji će odradi posao prikupljanja, *randomizacije*, *derandomizacije*, odvajanja, slanja i na kraju pohranjivanja podataka na zahtijevano mjesto. U zajedničkom radu s ostalom opremom daje hibridni način rada što se pokazalo kao najbolji izvor informacija jer jedan sustav nadopunjava drugi.

Kroz studiju slučaja prikazan je kod potreban za osposobljavanje mikrokontrolera NodeMCU ESP8266 Wi-Fi. Također, opisani su koraci koji se moraju slijediti kako bi uređaj mogao brojati MAC adrese u kontroliranim uvjetima, uz pretpostavku da svaka osoba ima samo jedan mobilni uređaj stoga jedna MAC adresa predstavlja jednu osobu. Za rad u nekontroliranom okruženju potrebno je napraviti izmjene u kodu, prilagoditi naredbe i postaviti drugačija ograničenja, ali svakako ima potencijala za daljnji razvoj i nadogradnju.

Literatura

- [1] Nitti M., Pinna F., Pintor L., Pilloni V., Barabino B.: *iABACUS: A Wi-Fi Based Auto-matic Bus Passenger Counting System*. *Energies*, no. 6, vol. 13, 1–21 (2020).
- [2] Hidayat A., Terabe S., Yaginuma H.: *Estimating bus passenger volume based on a Wi-Fi scanner survey, Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Volume 6, 100142 (2020)..*
- [3] Oransirikul, T., Nishide, R., Piumarta, I., Takada, H.: *Measuring Bus Passenger Load by Monitoring Wi-Fi Transmissions from Mobile Devices, Procedia Technology, Volume 18, 2014, pp 120-125.*
- [4] Mehmood, U., Moser, I., Jayaraman, P.P., Banerjee. A.: *Occupancy Estimation using Wi-Fi: A Case Study for Counting Passengers on Busses. IEEE 5th World Forum on Internet of Things, pp 165–170 (2019).*
- [5] Myrvoll, T.A., Håkegård, J.E., Matsui, T., Septier, F.: *Counting public transport passenger using WiFi signatures of mobile devices. IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, Japan, pp. 1-6. (2017)..*
- [6] Mikkelsen L., Buchakchier R., Madsen T., Schwefel H.P.: *Public Transport Occupancy Estimation Using. Aalborg University, Denmark. pp. 302-308 (2016).*
- [7] Oranshikul T., Piumarta I., Takada H.: *Classifying Passenger and Non-passenger Signals in Public Transportation by Analysing Mobile Device Wi-Fi Activity, Journal of Information Processing, Vol. 27, 25-32 (2019).*
- [8] Reichl P., Oh B., Tavakoli S., Ravitharan R., Stafford M.: *Using WiFi technologies to count passenger in near real time in and around rail infrastrucure, Institute of Railway Technology, Monash University, Metro-Trans-Melbourne, YPB Group, Australia,, pp. 1-5 (2018).*
- [9] Paradedad D., Junior W., Carlson R.: *Bus passenger counts using Wi-Fi signals: some cautionary findings, Transportes 27(3): 115-130, (2019).*
- [10] Ryu, S., Park, B.B. & El-Tawab, S. *WiFi Sensing System for Monitoring Public Transportation Ridership: A Case Study. KSCE J Civ Eng 24, 3092–3104 (2020).*
- [11] Ribeiro, M., Galvão, B., Prandi, C., Nunes, N.: *Passive Wi-Fi Monitoring in Public Transport: A case study in the Madeira Island. Proceedings of TRA2020, the 8th Transport Research Arena: Rethinking transport towards clean and inclusive mobility,, Helsinki, Finland. (2020).*
- [12] Bánhalmi A., Bilicki V., Megyeri I., Petri Z., Csirik J.: *Extracting information from Wi-fi traffic on public transport, International Journal of Transport Development and Integration, Volume 5 (2021).*
- [13] Alizadeh R., Savaria Y. and Nerguizian C., "Human Activity Recognition and People Count for a SMART Public Transportation System," 2021 IEEE 4th 5G World Forum (5GWF), 2021, pp. 182-187.
- [14] Forenbacher I., *Autorizirana predavanja: Telekomunikacijski koncepti, definicije i terminologija, Sveučilište u Zagrebu,, Fakultet prometnih znanosti. Preuzeto s: https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/5833595/mod_resource/content/1/2.%20Telekomunikacijski%20koncepti%2C%20definicije%20i%20terminologija.pdf.(Pristupljeno kolovoz 2022)*
- [15] Danel E.: *The Evolution of WiFi, Veex-The Verificatin Experts, (2016). Preuzeto s: https://telecomtest.com.au/wp-content/uploads/2017/05/D08-00-023_A00_WP_WiFi_Air_Expert_Series.pdf.(Pristupljeno rujan 2022.)*
- [16] Koivisto T.: *Overview of IEEE 802.11b Wireless LAN, S-72.4210 Postgraduate course in Radio Communications, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2006., Preuzeto s: http://www.comlab.hut.fi/opetus/4210/presentations/8_wlan.pdf.(Pristupljeno kolovoz 2022.)*
- [17] Dahiya M.: *Evolution of Wireless LAN in Wireless Networks, 2017.*
- [18] Bellalta B., Bononi L., Bruno R, Kassler A.: *Next generation IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks: Current status, future directions and open challenges, Volume 75, Pages 1-25, (2016).*
- [19] Rackley S. *Wireless Networking Technology: From Principles to Successful, Implementation 1st Edition, Oxford. Burlington, 2007..*
- [20] Kurose J., Ross K.: *Computer Networking, A TOP-DOWN APPROACH, Seventh edition, Hoboken, New*

Jersey: Pearson, (2017).

- [21] Brčić D., Ševrović: M.: *Logistika prijevoza putnika, Fakultet prometnih.*
- [22] *Retail Sensing, Vehicle&People Counting, 2021. Preuzeto s: <https://www.retailsensing.com/automated-passenger-counting.html>.(Pristupljeno kolovoz 2022.)*
- [23] Chen T. -Y., Chen C. -H., Wang D. -J. and Kuo Y. -L., "A People Counting System Based on Face-Detection," *2010 Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, 2010, pp. 699-702.*
- [24] Matsukuma N., Osawa T., Nukaga N.: *Using People Flow Technologies with Public Transport, Hitachi Review Vol. 66, No. 2 (2017).*
- [25] *GetDor, People Counter. Preuzeto s: <https://www.getdor.com/solutions/people-counting>.(Pristupljeno kolovoz 2022.)*
- [26] Kieu L. M., Bhaskar A. and Chung E., "Passenger Segmentation Using Smart Card Data," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1537-1548, (2015).
- [27] Kostakos V.: *Using Bluetooth to capture passenger trips on public transport buses, University of Madeira Human Computer Interaction Institute, Carnegie Mellon University, (2008).*
- [28] Determe J.-F., Azzagnuni S., Horlin F., Doncker P.: *MAC Address Anonymization for Crowd Counting. Algorithms 2022, 15, 135.*
- [29] *Fabregas F: ESP8266 WiFi People Counter, CC BY-NC, (2020). Preuzeto s: <https://www.hackster.io/ferrithemaker/esp8266-wifi-people-counter-8cc40c>.(Pristupljeno kolovoz 2022.)*
- [30] *Spacehuhn blog, NODEMCU, 2021. Preuzeto s: <https://blog.spacehuhn.com/nodemcu-vs-esp8266> (Pristupljeno kolovoz 2022.).*

Popis kratica i akronima

AES	(engl. <i>Advanced Encryption Standard</i>) standard za naprednu enkripciju
APC	(engl. <i>Automatic Passenger Counting</i>) automatsko brojanje putnika
ARP	(engl. <i>Address Resolution Protocol</i>) protokol za otkrivanje MAC adresa
BSS	(engl. <i>Basic service set</i>) osnovni set usluga
CCK	(engl. <i>Complementary Code Keying</i>) modulacijska shema
CCMP	(engl. <i>Cipher block Chaining Message authentication code Protocol</i>) protokol autentifikacijskog koda za ulančavanje šifriranih blokova
CO2	(engl. <i>Carbon Dioxide</i>) senzori osjetljivi na ugljikov dioksid
DSSS	(engl. <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>) prošireni spektar s direktnim slijedom
EAP	(engl. <i>Extensible Authentication Protocol</i>) protokol za autentifikaciju
ESS	(engl. <i>Extended Service Set</i>) više povezanih osnovnih setova usluga
FCC	(engl. <i>Federal Communications Commissoins</i>) vladina nezavisna agencija
FHSS	(engl. <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>) modulacijska tehnika fizičkog sloja pojedinih 802.11 mreža
Gbps	(engl. <i>Gigabits per second</i>) gigabit po sekundi
GPS	(engl. <i>Global Positioning System</i>) globalni sustav za pozicioniranje
HARC	(engl. <i>Human Activity Recognition and people Counting</i>) metoda za praćenje podataka
iABACUS	(engl. <i>Wi-Fi-based Automatic Bus pAssenger CoUnting System</i>) alat za automatsko brojanje putnika
IEEE	(engl. <i>The Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>) Institut inženjera elektrotehnike i elektronike
IP	(engl. <i>Internet Protocol</i>) Internet protokol
ISM	(engl. <i>Industrial, Science and Medical band</i>) industrijski, znanstveni i medicinski pojas
ISP	(engl. <i>Internet Service Provider</i>) pružatelj internetskih usluga
JGP	Javni gradski prijevoz
LAN	(engl. <i>Local Area Network</i>) mreža koja pokriva od 10 do 1000m (sobe, zgrade, kampus)
LLC	(engl. <i>Logical Link Control layer</i>) kontrolni link
MAC address	(engl. <i>Media Access Control address</i>) jedinstvena oznaka mrežnog uređaja
MAN	(engl. <i>Metropolitan Area Network</i>) mreža koja pokriva oko 10 km (grad)
Mbps	(engl. <i>Megabits per second</i>) megabit po sekundi
MIC	(engl. <i>Message Integrity Check</i>) provjera integriteta poruka
MIMO	(engl. <i>Multiple Input Multiple Output</i>) tehnologija višestrukih ulaza i izlaza
MU-MIMO	(engl. <i>Multi User-Multiple Input Multiple Output technology</i>) tehnika višekorisničke strategije prijenosa
NIC	(engl. <i>Network Interface Cards</i>) kartica mrežnog sučelja
NodeMCU	(engl. <i>Node MicroControler Unit</i>) mikrokontroler
OFDM	(engl. <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>) kodiranje digitalnih podatka na više frekvencijski podnosioca koju koriste pojedine 802.11 mreže
OFDMA	(engl. <i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>)
OSI	(engl. <i>The Open System Interconnect</i>) okvir od 7 slojeva koji opisuje prijenos podataka
OTP	(engl. <i>One Time Programmable</i>) trajna memorija
OUI	(engl. <i>Organizationally Unique Identifier</i>) 24-bitni jedinstveni broj kojim se identificira proizvođač ili prodavač

PAN	(engl. <i>Personal Area Network</i>) mreža koja pokriva do 100m
PHP	(engl. <i>Hypertext Preprocessor</i>) aplikacija koja provjerava točnost baze podataka
PSK	(engl. <i>Pre-Shared Key</i>) unaprijed dodijeljeni ključ
QAM	(engl. <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>) kvadraturna amplitudna modulacija
RAM	(engl. <i>Random Access Memory</i>) privremena memorija
RC4	(engl. <i>Rivest Cipher 4</i>) algoritam za nasumični odabir bajtova
RF	(engl. <i>Radio-Frequency</i>) radiofrekvencija
ROM	(engl. <i>Read-only memory</i>) trajna memorija
RSSI	(engl. <i>Received Signal Strength Indication</i>) jačina signala
SD	(engl. <i>Secure Digital</i>) port za pohranu podataka
SoC	(engl. <i>System-on-a-Chip</i>) sustav na čipu
SSID	(engl. <i>Service Set Identifier</i>) mrežno ime
TCP	(engl. <i>Transmission Control Protocol</i>) transportni protokol
TKIP	(engl. <i>Temporal Key Integrity Protocol</i>) protokol vremenskog integriteta ključa
UDP	(engl. <i>User Datagram Protocol</i>) transportni protokol
U-NII	(engl. <i>Unlicensed-National Information Infrastructure</i>) pojas iskorišten za komunikacijske svrhe
USB	(engl. <i>Universal Serial Bus</i>) univerzalna serijska sabirnica
UTM	(engl. <i>Universal Transverse Mercator</i>) mapna projekcija
V2I	(engl. <i>Vehicle to Infrastructure</i>) komunikacija između vozila i infrastrukture
V2V	(engl. <i>Vehicle to Vehicle</i>) komunikacija između dva vozila
WAN	(engl. <i>Wide Area Network</i>) mreža koja pokriva od 100 do 1000 km (država, kontinent)
WEP	(engl. <i>Wired Equivalency Privacy</i>) vrsta enkripcije
WiAR	(engl. <i>Wi-Fi-based Activity Recognition</i>) alat za prikupljanje podataka o broju putnika koristeći Wi-Fi tehnologiju
WLAN	(engl. <i>Wireless Local Area Network</i>) bežična lokalna mreža
WPA	(engl. <i>Wi-Fi Protected Access</i>) vrsta enkripcije i sigurnosnog mehanizma

Popis slika i tablica

Slika 1. Prikaz ljudi na <i>Eki-Shi-Vision</i> kameri [24]	17
Slika 2. Prikaz NodeMCU ESP8266 Wi-Fi mikrokontrolera	23
Slika 3. Prikaz otvaranja datoteke pomoću programa <i>Microsoft Visual Studio Code</i>	24
Slika 4. Prikaz datoteka u <i>Microsoft Visual Studio Code</i> programu	25
Slika 5. Prikaz potrebnog sučelja za spajanje na Wi-Fi mrežu i MQTT server	25
Slika 6. Prikaz naredbi za detekciju MAC adresa i jačine primljenog signala	26
Slika 7. Prikaz naredbi za detekciju MAC adresa i jačine primljenog signala	27
Slika 8. Prikaz naredbi za dohvat informacija o <i>beatconu</i> i <i>RxControlu</i>	28
Slika 9. Prikaz naredbi za dohvat <i>RxControla</i> i <i>sniffera</i>	29
Slika 10. Prikaz naredbi za informacije o ulovljenim okvirima MAC adresa i naredbi za premještanje memorije	30
Slika 11. Prikaz polja za unos korisničkih podataka.....	30
Slika 12. Prikaz glavnog koda <i>Wi-FiPeopleCounter</i> a	31
Slika 13. Prikaz nastavka glavnog koda <i>Wi-FiPeopleCounter</i> a	32
Slika 14. Prikaz koda za prijenos podataka preko <i>Mosquitto</i> brokera na <i>InfluxDB</i>	33

Popis tablica

Tablica 1. Podjela radio frekvencijskog spektra [19]	17
---	----

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ završni rad _____
(vrsta rada)
isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Primjena Wi-Fi tehnologije u funkciji brojanja putnika javnog gradskog prijevoza, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 5.9.2022.

Lea Fabrićni
(ime i prezime, potpis)