

Određivanje geografskih pozicija FM odašiljača metodom triangulacije

Kovač, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:119:920915>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ODREĐIVANJE GEOGRAFSKIH POZICIJA FM ODAŠILJAČA METODOM TRIANGULACIJE

DETERMINING THE GEOGRAPHIC POSITIONS OF FM TRANSMITTERS USING THE METHOD OF TRIANGULATION

Mentor: izv. prof. dr. sc. tech. Mario Muštra

Student: Matej Kovač

JMBAG: 0035218181

Zagreb, rujan 2024.

Zagreb, 18. lipnja 2024.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Lokacijski i navigacijski sustavi**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7687

Pristupnik: **Matej Kovač (0035218181)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Određivanje geografskih pozicija FM odašiljača metodom triangulacije**

Opis zadatka:

Opisati karakteristike propagacije elektromagnetskog vala s obzirom na frekvenciju i propagacijsku okolinu. Predložiti primjenu pogodnog matematičkog modela za proračun snage signala na mjestu prijama. Opisati princip određivanja pozicije odašiljača metodom triangulacije signala odašiljača, navesti parametre koji utječu na točnost i prikazati izvedbu sustava. Uporabom specifičnog mjernog sustava provesti mjerenje snage i smjera dolaska signala te provesti proračun kojim se određuje lokacija odašiljača. Usporediti dobivene rezultate sa stvarnim lokacijama odašiljača.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

Određivanje geografskih pozicija FM odašiljača metodom triangulacije

SAŽETAK

Triangulacija je matematička metoda koja omogućuje određivanje položaja nepoznate točke u prostoru na temelju položaja najmanje dvije poznate točke i kutova pod kojima se te točke vide iz nepoznate točke. U kontekstu lociranja odašiljača, nepoznata točka predstavlja položaj odašiljača, a poznate točke su položaji prijarnika. Triangulacija funkcionira tako što se stvori virtualni trokut između najmanje dvije poznate točke i nepoznate točke (odašiljača). Mjerenjem kutova unutar tog trokuta, moguće je matematički izračunati točne koordinate nepoznate točke. Među izvore odašiljanja ubrajaju se i radijski odnosno, FM odašiljači. Poseban naglasak imaju talijanski radijski odašiljači koji se nalaze na vrhovima Apeninskog poluotoka, a koji su zbog konfiguracije terena često uzrok velikog broja smetnji zemljama u okruženju. Određivanje lokacije radijskih odašiljača metodom triangulacije omogućuje uklanjanje smetnji, a ujedno ukazuje na važnost pažljivog planiranja mjerenja i korištenja sofisticiranih algoritama za obradu podataka. Mjerenja i obrada rezultata moraju se izvoditi pomoću mjernih sustava čije su karakteristike propisane sukladno preporukama Međunarodne telekomunikacijske unije.

KLJUČNE RIJEČI: metoda triangulacije; određivanje lokacije; talijanski FM odašiljači; smetnje; mjerni sustav

Determining the Geographic Positions of FM Transmitters using the Method of Triangulation

SUMMARY

Triangulation is a mathematical method used to determine the position of an unknown point in space based on the known positions of at least two other points and the angles at which these known points are seen from the unknown point. In the context of locating transmitters, the unknown point represents the position of the transmitter, and the known points are the positions of the receivers. Triangulation works by creating a virtual triangle between at least two known points and the unknown point (transmitter). By measuring the angles within this triangle, it is possible to mathematically calculate the exact coordinates of the unknown point. Radio transmitters, including FM transmitters, are examples of such sources. Italian radio transmitters located at the peaks of the Apennine Peninsula are of particular interest due to the terrain configuration, often causing significant interference to surrounding countries. Locating radio transmitters using triangulation allows for the elimination of interference and highlights the importance of careful measurement planning and the use of sophisticated data processing algorithms. Measurements and data processing must be performed using measurement systems whose characteristics are defined according to the recommendations of the International Telecommunication Union (ITU).

KEY WORDS: Triangulation method; location determination; Italian FM transmitters; interference; measurement system

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Opće karakteristike signala i propagacije	3
2.1. Osnovne definicije i fizikalna svojstva signala	3
2.2. Karakteristike propagacije signala	6
2.3. Modulacija signala.....	8
3. Princip određivanja pozicije signala metodom triangulacije odašiljača i parametri koji utječu na točnost i izvedbu sustava.....	12
3.1. Metoda triangulacije	12
3.2. Čimbenici koji utječu na točnost i izvedbu sustava za triangulaciju	13
4. Mjerni sustav	15
4.1. Sklopovski dio sustava	15
4.2. Programski dio sustava.....	18
5. Postupak mjerenja i otkrivanja lokacije i snage odašiljanja uzročnika istokanalne smetnje.....	21
5.1. Određivanje smjera uzročnika smetnje.....	21
5.2. Identificiranje uzročnika smetnje	23
6. Evaluacija rezultata mjerenja te usporedba sa stvarnim lokacijama odašiljača.....	25
7. Zaključak	28
LITERATURA	29
POPIS KRATICA.....	31
POPIS SLIKA	32
POPIS TABLICA	32

1. Uvod

Postupak određivanja točne geografske lokacije radijskog odašiljača postaje sve važniji, a razlog tome je povećanje broja gusto naseljenih područja, što posljedično dovodi do većeg broja radiostanica. Poseban naglasak je na graničnim područjima, gdje dolazi do miješanja različitih radijskih signala što može izazvati smetnje u emitiranju radijskog sadržaja. U Republici Hrvatskoj, a posebno u priobalnom području, lokalno stanovništvo se susreće s problemom smetnji koje uzrokuju talijanski radijski odašiljači i na taj način ometaju prijam hrvatskih radijskih programa. U ovom radu koristi se metoda triangulacije u svrhu određivanja lokacija talijanskih FM radijskih odašiljača, kako bi se uzročnici smetnje uklonili. Osim uklanjanja smetnji, geolociranje talijanskih radijskih odašiljača u budućnosti bi omogućilo bolje planiranje radio-distribucijske mreže, čime bi se smanjila i mogućnost smetnje od susjednih država. Diplomski rad sastoji se od sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Opće karakteristike signala i propagacije
3. Princip određivanja pozicije metodom triangulacije signala odašiljača parametri koji utječu na točnost i izvedbu sustava
4. Mjerni sustav Argus
5. Postupak mjerenja i otkrivanja lokacije i snage odašiljanja uzročnika istokanalne smetnje
6. Evaluacija rezultata mjerenja usporedbom sa stvarnim lokacijama odašiljača
7. Zaključak.

Drugo poglavlje opisuje karakteristike signala i njegove fizikalne sastavnice. Poglavlje daje uvid u prirodu elektromagnetskog vala i njegove sastavnice te kroz uzročno posljedične veze objašnjava prirodne pojave koje utječu na širenje signala u prostoru, poput refleksije, refrakcije i drugih pojava koje se događaju prilikom putovanja signala od izvora do odredišta. Putovanje signala od izvora do odredišta naziva se propagacija i na nju utječe velik broj čimbenika koji su također obuhvaćeni navedenim poglavljem. Osim navedenog, u istom poglavljju prikazani su postupci promjene parametara signala, odnosno modulacija.

Treće poglavlje daje uvid u osnovna načela metode triangulacije te navodi čimbenike koji mogu utjecati na točnost njezina izvođenja. Princip određivanja lokacije nepoznatog radijskog odašiljača temelji se na metodi triangulacije. U navedenom poglavljju dana je kategorizacija i uvid u svaku od kategorija čimbenika koji utječu na izvođenje iste.

Četvrto poglavlje definira mjerni sustav i njegove karakteristike koje prema preporuci Međunarodne telekomunikacijske unije (engl. *International telecommunication union* – ITU) omogućuju geolociranje smetnji te analizu i praćenje promjena u radiofrekvencijskom spektru. Za otkrivanje lokacije nepoznatog radijskog odašiljača potreban je pravilan i umjeren mjerni sustav. Mjerni se sustav općenito sastoji od sklopovskog i programskog dijela. U ovom poglavljju

opisan je primjer konkretnog mjernog sustava čije se sklopovlje sastoji od velikog broja usmjerenih i neusmjerenih antena za goniometriiranje, odnosno određivanje lokacije izvora odašiljanja na temelju određivanja kuta dolaska signala. Programski dio mjernog sustava čini program R&S Argus sa nekoliko načina mjerenja koji su detaljno objašnjeni u navedenom poglavlju.

Peto poglavlje opisuje postupke i preporuke koje definira Međunarodna telekomunikacijska unija, kako bi se osigurala unificirana i pouzdana mjerenja, a posljedično čist i iskorišten radiofrekvencijski spektar. Kroz definirane postupke, u petom poglavlju, je opisan način na koji mjeritelj određuje smjer iz kojeg dolazi signal najveće snage te na koji način identificira uzročnika istokanalne smetnje.

Šesto poglavlje opisuje na koji način mjeritelj evaluira rezultate mjerenja i uspoređuje ih sa stvarnim lokacijama radijskih odašiljača. Osim usporedbe stvarne i matematičke lokacije, poglavlje opisuje na koji način se smetnje uklanjaju te kakav je utjecaj smetnji talijanskih radijskih odašiljača na zemlje u okruženju.

Sedmo poglavlje iznosi najvažnije teze rada te sumira rezultate dobivene mjerenjem. U zaključku je iskazana svrha i cilj diplomskog rada.

2. Opće karakteristike signala i propagacije

U informacijsko-komunikacijskim sustavima (engl. *Information and communication system* – ICT) elementi koji čine sustav generiraju velik broj informacija koje se zatim u obliku poruke prenose do drugih elemenata. Poruka na neki način predstavlja proizvod koji je generiran, odnosno stvoren, od strane nekog elementa informacijsko-komunikacijskog sustava. Jedna poruka može sadržavati veći ili manji broj informacija, dok sama informacija sadrži veliki skup podataka [1]. Poruke se u informacijsko-komunikacijskim sustavima prenose u obliku signala, a sam signal može se opisati matematički kao funkcija promjene neke od fizikalnih veličina u vremenu kao što je to npr. pad napona, struja, energija i druge veličine. S obzirom na fizikalna svojstva signali se mogu podijeliti u zvučne, svjetlosne, elektromagnetske i druge vrste, no u informacijsko-komunikacijskim sustavima najveću važnost imaju elektromagnetskih valovi, odnosno signali budući da se oni kao takvi koriste za prijenos poruka u navedenim sustavima [1].

2.1. Osnovne definicije i fizikalna svojstva signala

Valovi se mogu kategorizirati, ovisno o smjeru titranja čestica u odnosu na smjer širenja vala, na transverzalne i longitudinalne valove. U informacijsko-komunikacijskim sustavima podaci se prenose putem elektromagnetskih valova. Elektromagnetski valovi ubrajaju se u transverzalne valove budući da su čestice koje titraju u električnom i magnetskom polju okomite na smjer širenja vala. Izvori elektromagnetskih valova su električni strujni krugovi ili titranje atoma i molekula u tvarima. Elektromagnetski val sastoji se od električnog i magnetskog polja. Polja su međusobno okomita, a promjena u jednom polju uzrokuje promjene u drugom polju. Međusobnu ovisnost polja dokazao je James Clerk Maxwell [2], [3]. Smjer širenja elektromagnetskog vala određuje se pravilom desne ruke. Prema pravilu desne ruke, ako prsti desne ruke pokazuju smjer električnog polja, a dlan smjer magnetskog polja, tada palac ukazuje na smjer širenja elektromagnetskog vala. Fizikalne veličine koje definiraju elektromagnetski val su frekvencija, valna duljina, brzina širenja i polarizacija. Frekvencija je veličina koja opisuje brzinu kojom titraju čestice u magnetskom i električnom polju. Njen iznos ovisi o broju titraja izvora i ubrzanju čestica u poljima. Dakle što je veća brzina titranja, odnosno ubrzanja čestica, to je iznos frekvencije veći i obrnuto. Frekvencija kao veličina ostaje ista neovisno o sredstvu kojim se širi elektromagnetski val. Označava se slovom f te se izražava u hertzima (Hz). Frekvencija predstavlja omjer brzine širenja vala i valne duljine kako je prikazano izrazom (1) [2], [3].

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje: f – frekvencija titranja elektromagnetskog vala, v – brzina širenja elektromagnetskog vala nekim sredstvom, λ – valna duljina.

Brzina širenja elektromagnetskog vala je brzina kojom se elektromagnetski val širi u nekom sredstvu. U slučaju da se elektromagnetski val širi kroz vakuum, brzina širenja jednaka je brzini svjetlosti. Brzina širenja elektromagnetskog vala označava se slovom v . Gledano iz fizikalne perspektive, tvari kroz koje se elektromagnetski val širi imaju tendenciju opirati se širenju vala, osim kada je riječ o praznom prostoru, odnosno vakuumu. U tom slučaju elektromagnetski valovi se šire brzinom svjetlosti. Elektromagnetski valovi se u materijalnim sredstvima šire manjom brzinom u odnosu na brzinu širenja u vakuumu. Iznos njihovih brzina širenja ovisi o relativnoj dielektričnoj permitivnosti (ϵ_r) i relativnoj magnetskoj permeabilnosti sredstva (μ_r) kroz koje se elektromagnetski valovi šire. Relativna dielektrična permeabilnost je fizikalna veličina koja predstavlja količnik dielektrične permitivnosti tvari i dielektrične permitivnosti vakuuma, kako je prikazano izrazom (2) [2], [3]. Navedena veličina opisuje povećanje kapaciteta nekog električnog kondenzatora u slučaju da se između elektroda nalazi neka druga tvar, a ne vakuum.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2)$$

pri čemu oznake sljedeće značenje: ϵ – dielektrična permitivnost tvari, odnosno medija kojim se širi val, ϵ_0 – dielektrična permitivnost vakuuma. Isti princip primjenjuje se na relativnu magnetsku permeabilnost, koja je također količnik magnetske permeabilnosti μ i magnetske permeabilnosti vakuuma μ_0 kako je prikazano izrazom (3).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje: μ – magnetska permeabilnost sredstva, μ_0 – magnetska permeabilnost vakuuma, μ_r – relativna magnetska permeabilnost.

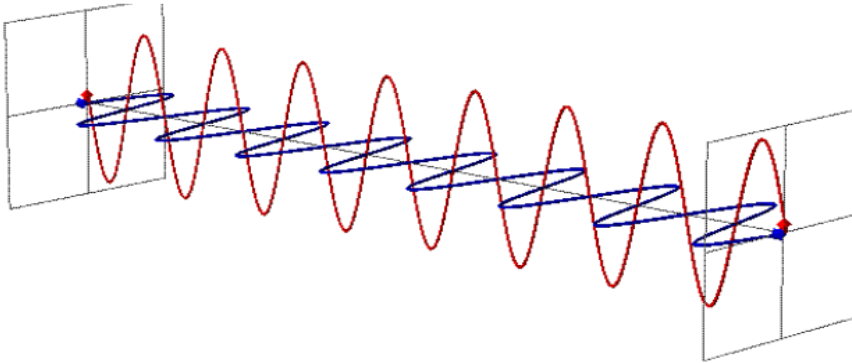
Indeks loma je omjer brzine širenja elektromagnetskog vala u prostoru, koji je ispunjen nekom materijalnom tvari, i brzine širenja elektromagnetskog vala u vakuumu. Valna duljina je fizikalna veličina koja ovisi o frekvenciji titranja čestica vala i brzini širenja elektromagnetskog vala. Ista je obrnuto proporcionalna frekvenciji titranja. Navedeno znači da će povećanje frekvencije elektromagnetskog vala uzrokovati smanjenje valne duljine tog istog vala i obrnuto. Valna duljina se označava grčkim slovom lambda (λ), a definira se kao najmanja udaljenosti između dvije čestice elektromagnetskog vala koje titraju u istoj fazi. Međusobni odnosi opisanih fizikalnih veličina najbolje se manifestiraju u pojavama kao što su refleksija, refrakcija, potpuna refleksija i prigušenje. Refleksija se u fizici opisuje kao odbijanje ravnih valova na površini između dva optička sredstva. U tom slučaju jedan dio elektromagnetskog vala se odbija u sredstvo u kojem se prvotno širio, a preostali dio se lomi i nastavlja se širiti kroz novo sredstvo. Potpuna refleksija predstavlja jedinstveni slučaj kada dolazi do potpunog odbijanja vala koji prelazi iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo. Refrakcija predstavlja lom vala odnosno njegovo skretanje kada prelazi iz jednog sredstva u drugo. Navedena pojava nastaje zbog različitih brzina širenja valova u različitim sredstvima. Prigušenje u stvarnosti predstavlja smanjenje vrijednosti neke fizikalne veličine elektromagnetskog vala. Smanjenje vrijednosti

tijekom prolaska kroz različita sredstva posljedica je pretvorbe dijela energije elektromagnetskog vala u druge oblike energije. Polarizacija je parametar elektromagnetskog vala koji je definiran smjerom titranja vektora električnog polja [2], [3]. Slika 1 prikazuje komponente elektromagnetskog vala, njihov položaj u prostoru i njihove matematičke izraze pri čemu oznaka ω označava kutnu brzinu, a ostale oznake su opisane u prethodnim dijelovima rada.

$$e_x = E_m e^{-\alpha z} [\sin(\omega t - \beta z)] \Rightarrow \text{električno polje (E)}$$

$$h_y = H_m e^{-\alpha z} [\sin(\omega t - \beta z)] = \frac{E_m}{Z} e^{-\alpha z} [\sin(\omega t - \beta z)] \Rightarrow \text{magnetsko polje (H)}$$

- α, β - komponente konstante širenja
 - α - koeficijent prigušenja
 - β - fazna konstanta, $\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = 2\pi f \sqrt{\mu \epsilon}$



Slika 1. Sastavnice elektromagnetskog vala, [3]

2.2. Karakteristike propagacije signala

Propagacija elektromagnetskih valova definira se kao proces širenja elektromagnetskih valova kroz različite medije. Primanje i odašiljanje elektromagnetskih signala ostvaruje se pomoću antena. Postoji mnogo različitih načina, tj. modela propagacije, a ovise o fizičkoj konfiguraciji antene i karakteristikama sredstva kroz koje se val širi. Na propagaciju signala utječe niz čimbenika kao što su frekvencija, medij kroz koji se val širi, prisutnost prepreka, atmosferski uvjeti i karakteristike antene. Prema prirodnim zakonima elektromagnetski valovi se kroz prostor šire kao ravni valovi stoga je za prijenos signala izvan linije vidljivosti (engl. *Line of sight* – LOS) potrebno neko sredstvo koje će reflektirati elektromagnetski val [4], [5]. Elektromagnetski valovi se općenito mogu kategorizirati u sedam skupina kao što je prikazano tablicom 1 [2]. Tablica 1 prikazuje podjelu elektromagnetskog spektra na različite grupe, uz navođenje odgovarajućih frekvencijskih područja i raspona valnih duljina za svaku grupu.

Tablica 1. Podjela elektromagnetskih valova

Valovi	Frekvencija	Valna duljina
gama-zračenje	veća od $1,5 \cdot 10^{19}$ Hz	manja od 0,02 nm
rendgensko zračenje	$3 \cdot 10^{19}$ Hz – $3 \cdot 10^{16}$ Hz	0,01 nm – 10 nm
ultraljubičasto zračenje	$3 \cdot 10^{16}$ Hz – $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz	10 nm – 400 nm
vidljiva svjetlost	$7,7 \cdot 10^{14}$ Hz – $4 \cdot 10^{14}$ Hz	390 nm – 750 nm
infracrveno zračenje	$4 \cdot 10^{14}$ Hz – $3 \cdot 10^{11}$ Hz	750 nm – 1 mm
mikrovalovi	$3 \cdot 10^{11}$ Hz – $3 \cdot 10^8$ Hz	1 mm – 1 m
radiovalovi	$3 \cdot 10^8$ Hz – 0,3 Hz	1 m – 100 000 km

Izvor: [2]

Radiovalovi se prema načinu širenja mogu kategorizirati na prostorne radiovalove, površinske, izravne i reflektirane. Površinski i prostorni radiovalovi čine grupu radiovalova niskih frekvencija, ispod 30-tak MHz. Uzme li se u obzir da je Zemlja sferičnog oblika, praktična udaljenost za komunikaciju sa optičkom vidljivošću iznosi 48 kilometara. Na navedenu udaljenost utječe konfiguracija terena i visina na kojoj je postavljena antena. U svrhu osiguravanja što većeg područja pokrivanja, antene za televizijsko i radijsko emitiranje te bazne stanice mobilnih operatora se postavljaju na višim planinskim dijelovima i visokim tornjevima. U ranijem dijelu rada opisane su pojave koje utječu na parametre elektromagnetskog vala, ali koje istovremeno omogućuju svjetlosti i elektromagnetskim valovima da se prenose oko prepreka ili izvan horizonta. Disperzija je pojava koja nastaje na rubovima prepreka, gdje se dio elektromagnetskog zračenja refraktira i reflektira, što uzrokuje promjenu prvobitnog smjera širenja. Disperzija je posljedica interakcije radiovalova sa čvrstim preprekama i atmosferskim slojevima. Zemaljske komunikacije, osim geometrijske vidljivosti, značajno ovise o kompleksnim procesima širenja radiovalova kroz troposferu i ionosferu [4]-[6]. Podjela radiovalova prikazana je tablicom 2.

Tablica 2. Podjela radiovalova

Kratica	Naziv	Frekvencija
VLF	<i>Very low frequency</i>	3 – 30 kHz
LF	<i>Low frequency</i>	30 – 300 kHz
MF	<i>Medium frequency</i>	300 – 3000 kHz
HF	<i>High frequency</i>	3 – 30 MHz
VHF	<i>Very high frequency</i>	30 – 300 MHz
UHF	<i>Ultrahigh frequency</i>	0,3 – 3 GHz
SHF	<i>Superhigh frequency</i>	3 – 30 GHz
EHF	<i>Extremly high frequency</i>	30 – 300 GHz

Izvor:[4]

Ionosfersko rasprostiranje vala ovisi o frekvenciji, tipu antene i aktivnostima koje se događaju u ionosferi. Tijekom noćnog razdoblja, kad je sunčevo zračenje oslabljeno ili ga nema, elektroni i pozitivni ioni se premještaju, odnosno rekombiniraju i vjerojatnost sudara čestica je veća. Veći broj sudara posljedično izaziva nestajanje nekih slojeva ionosfere. Karakteristični slojevi čiji se sastav mijenja ovisno o količini sunčevog zračenja su E, D i F slojevi. Tijekom noćnog razdoblja slojevi E, F1 i F2 se spajaju u jedan sloj, a D sloj nestaje. Sloj D utječe na odbijanje, odnosno refleksiju vrlo niskih (engl. *Very low frequency* – VLF) i ekstremno niskih frekvencija (engl. *Extremly low frequency* – ELF). Povećanje frekvencije elektromagnetskog vala dovodi do smanjenja apsorpcije u sloju D ionosfere, zbog čega je olakšano prodiranje kroz njega. [5], [6]. Sloj E je postojaniji u odnosu na sloj D i tijekom dana u cijelosti apsorbira srednje frekvencije, dok u noćnom razdoblju omogućuje njihovo reflektiranje. Jako visoke (engl. *Very high frequency* – VHF) i vrlo visoke frekvencije (engl. *Ultra high frequency* – UHF) prolaze slojem E, a valovi visoke frekvencije se reflektiraju. Sloj F se tijekom dana sastoji od dva sloja, F1 i F2, koji se tijekom noći spajaju u jedan sloj F. Za sloj F2 vrijedi pravilo da što je valna duljina valova kraća, potrebna je veća gustoća elektrona kako bi se radiovalovi odbili i vratili na površinu Zemlje. Odbijanje i povratak radiovalova postiže se jednostrukim odbijanjem. Jednostruko odbijanje omogućuje prijam radiovalova na visini od 4000 kilometara. U slučaju da je frekvencija veća u odnosu na najviše uporabljivu frekvenciju, radiovalovi se ne odbijaju niti odlaze u svemir [5], [6]. Radiovalovi jako visokih i vrlo visokih frekvencija prolaze kroz ionosferu uz određenu razinu apsorpcije ili prigušenja. Radiovalovi čije je frekvencija iznad 300 MHz propagiraju linijom vidljivosti budući da ionosfera neće dovoljno saviti radiovalove u tom frekvencijskom području da bi ih reflektirala natrag na Zemlju. Kada je riječ o komunikaciji temeljenoj na radiovalovima, ionosferski sloj je relativno pouzdan. Kako bi se povećala pouzdanost, prijenosa isti radiovalni signal se šalje s različitih lokacija. Slanjem sa različitih lokacija povećava se vjerojatnost da će radioval stići na željeno odredište. Međutim, refleksija radiovalova može uzrokovati višestaznu propagaciju. U slučaju višestazne propagacije istovremeno na odredište može stići signal i njegova zakašnjela verzija što može dovesti do pojave interferencije. [4]-[6]

Troposfera je Zemljin sloj u kojem se formira vrijeme i oblaci, a čije promjene utječu na radiovalove čije je frekvencija iznad 50 MHz. Promjene u troposferi uzrokuju prigušenje ili apsorpciju radiovalova u sastavnicama troposfere. Osim prigušenja i apsorpcije, u troposferi se navedeni radiovalovi mogu raspršiti. U slučajevima kada se naglo promijeni indeks loma, razvijaju se uvjeti koji omogućuju refleksiju i ostvarivanje veze na velikim udaljenostima, budući da se elektromagnetski val savija na način da prati Zemljinu površinu. U tom slučaju su za ostvarivanje komunikacije dovoljne jednostavne antene male snage. U slučaju da se dvije antene postave jedna prema drugoj u vidokrug na određenoj udaljenosti, jedan dio energije vala može se odbiti od površinu Zemlje te će prijamna antena zaprimiti izravni signal i reflektirani signal. Reflektirani signal je zaokrenut za 180° u odnosu na izravni. Navedeno znači da u slučaju da stignu na odredište, izravni i reflektirani signal koji je u protufazi će se poništiti. Prilikom planiranja veza ili mreže uzima se u obzir da ionosfera omogućuje signalima koji su ispod maksimalne uporabljive razine propagaciju na velike udaljenosti izvan linije optičke vidljivosti prilikom čega mogu preskočiti željenu destinaciju. Zbog navedenog je potrebno koristiti frekvencijsku raznolikost (engl. *divesity*) i različite kutove antene kako bi se povećala vjerojatnost da signal stigne do odredišta. Važan naglasak stavlja se na činjenicu da solarne aktivnosti mogu uzrokovati veliku varijaciju maksimalne uporabljive frekvencije. Planiranje propagacije signala izvan linije vidljivosti za frekvencije iznad 30 MHz je nepouzđano. Kada su u pitanju signali iznad 30 MHz, u svrhu omogućavanja pouzdane komunikacije koriste se sateliti. Planeri mreža moraju imati na umu da propagacija izvan linije vidljivosti korištenjem atmosfere kao i drugih objekata nije pouzđana te da može biti uzrok višestazne propagacije. [5], [6]

2.3. Modulacija signala

Modulacija je postupak kojim se informacija upisuje u prijenosni signal u svrhu prijenosa poruke na veće udaljenosti. Modulacija predstavlja postupak kojim se obrađuje signal kako bi se prilagodio za prijenos određenim medijem. Ona nije samo vezana za prijenos signala, već se njome povećava otpornost signala na smetnje i omogućava istovremeni prijenos više signala kroz jedan medij. Postupak modulacije izvodi se korištenjem modulatora. Za razumijevanje procesa modulacije potrebno je razlikovati pojmove prijenosni signal, tj. signal nosioc, modulacijski signal i modulirani signal. Prijenosni signal, odnosno signal nosioc, titra određenom frekvencijom i amplitudom koja se lako prenosi kroz određeni medij i ne sadrži informaciju. Modulacijski signal sadrži informaciju koju korisnik želi prenijeti. Navedeni signal uzrokuje promjene jednog od parametara (frekvencije, amplitude ili faze) prijenosnog signala. Modulirani signal je signal koji nastaje postupkom modulacije kada se modulacijski signal koji sadrži informaciju utisne u prijenosni signal [1], [7]. Ovisno o vrsti signala postupak modulacije kategorizira se na analogne i digitalne modulacijske postupke. Grupu analognih modulacijskih postupaka čine modulacija amplitude (engl. *Amplitude modulation* – AM), faze (engl. *Phase modulation* – PM) i frekvencije (engl. *Frequency modulation* – FM). Diskretna modulacija amplitude (engl. *Amplitude shift keying* – ASK), diskretna modulacije frekvencije (*Frequency shift keying* – FSK), diskretna modulacija faze (engl. *Phase shift keying* – PSK) i kvadraturna

amplitudna modulacija (engl. *Quadrature amplitude modulation* – QAM) čine grupu digitalnih modulacijskih postupaka [1], [7]. U radu su opisani analogni modulacijski postupci, budući da se sadržaj radijskih emisija i njihov prijenos temelji na modulaciji frekvencije. Modulacija amplitude (AM) definira se kao modulacija prijenosnog signala čija se amplituda mijenja proporcionalno trenutnoj amplitudi modulacijskog napona. Frekvencija prijenosnog signala, odnosno moduliranog signala znatno je veća u odnosu na modulacijski signal i kreće se u rasponu 300 kHz do 3 MHz. Frekvencija modulacijskog signala kreće se u rasponu od 20 Hz do 20 kHz. Kod ove vrste modulacije važan čimbenik je amplituda modulacijskog i prijenosnog signala koji se naziva indeks modulacije. Radi lakšeg razumijevanja u radu je opisan modulacijski signal koji se sastoji od jedne frekvencijske komponente, iako se u stvarnosti sastoji od velikog broja frekvencijskih komponenti [8]-[10]. Prema [9] modulacijski signal je definiran matematičkim izrazom (4)

$$u_m = U_m \cos(\omega_m t) \quad (4)$$

gdje je: u_m – modulacijski signal, U_m – amplituda modulacijskog signala, ω_m – kružna frekvencija modulacijskog signala, t – vrijeme, dok je prijenosni signal opisan izrazom (5)

$$u_{VF} = U_{VF} \cos(\omega_{VF} t) \quad (5)$$

pri čemu je: u_{VF} – prijenosni signal, U_{VF} – amplituda prijenosnog signala, ω_{VF} – kružna frekvencija prijenosnog signala, t – vrijeme. U postupku modulacije amplitude modulirani signal dobije se korištenjem modulatora. Modulator je uređaj koji izvodi operaciju množenja modulacijskog i prijenosnog signala. Nakon što pomnoži navedene signale, pomoću nelinearnih elemenata, kao što su diode i tranzistori, kreira nelinearne karakteristike na signalu koji je nastao množenjem i izlazi iz uređaja kao modulirani signal [8]-[10].

Modulirani signal prema [9] ima sljedeći izraz:

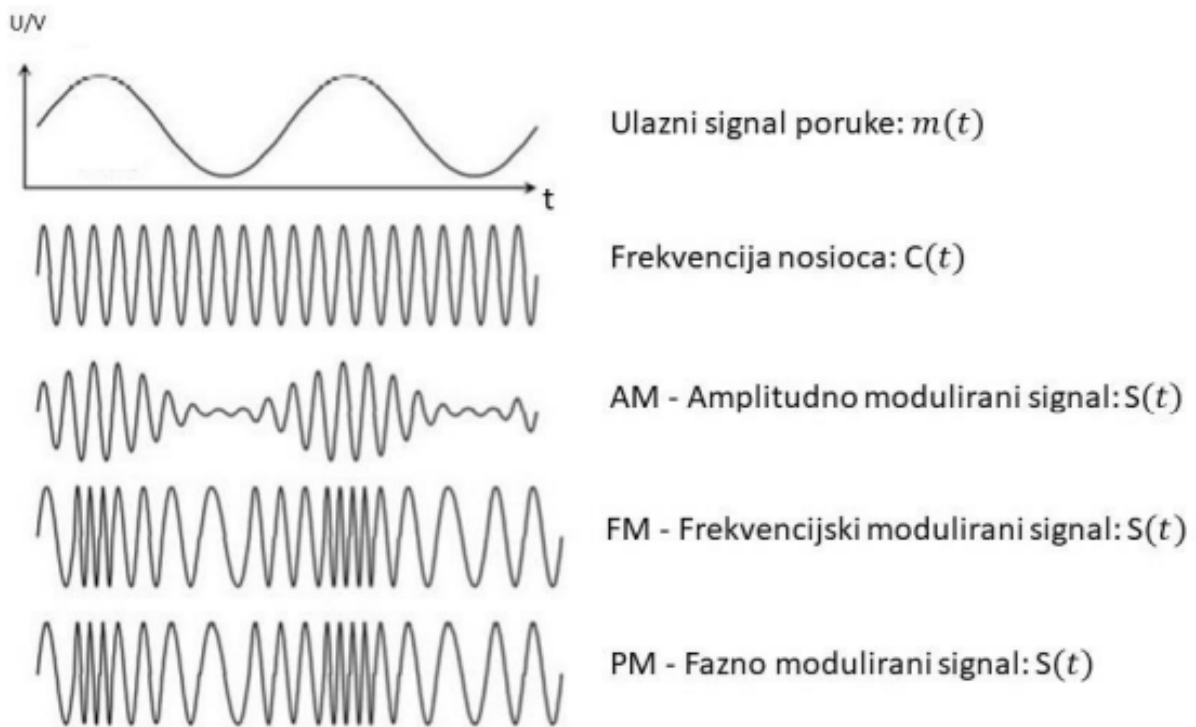
$$u_{mod} = U_{VF} \left[\cos \omega_{VF} t + \frac{m_a}{2} \cos(\omega_{VF} + \omega_m) t + \frac{m_a}{2} \cos(\omega_{VF} - \omega_m) t \right] \quad (6)$$

gdje je: u_{mod} – modulirani signal, a m_a – indeks modulacije. Na temelju izraza (6) može se zaključiti da modulirani signal čine nosiva komponenta i dvije bočne komponente. Dvije bočne komponente su pomaknute za zbroj odnosno razliku frekvencija prijenosnog signala i modulacijskog signala. Treća komponenta je nosiva komponenta čija je frekvencija jednaka frekvenciji prijenosnog signala [9].

Modulacija amplitude rezultat je utjecaja modulacijskog signala na amplitudu prijenosnog signala. Amplituda prijenosnog signala mijenja se ovisno o amplitudi modulacijskog signala što znači da indeks modulacije određuje vrijednost amplitudi bočnih komponenti. U slučaju kada je indeks modulacije jednak 1, amplituda bočnih komponenti je maksimalna. U slučaju kada je indeks modulacije veći od 1, dolazi do izobličenja signala koje se manifestira kao nepravilni zvuk ili slika, ovisno što se prenosi. Kako bi se izbjeglo izobličenje, potrebno je paziti da vrijednost amplitude modulacijskog signala ne bude veća od vrijednosti

amplitude prijenosnog signala [9], [10]. Modulacije amplitude mogu se kategorizirati u tri grupe: AM signal s dva bočna pojasa (engl. *Amplitude modulation dual side band* – AM DSB), AM SSB prijenos (engl. *AM single sideband modulation* – AM SSB) te AM signal s djelomično potisnutim jednim bočnim pojasom (engl. *AM vestigial side band* – AM VSB). Amplitudna modulacija je jednostavna za implementaciju i otporna je na promjene u fazi signala, a njen nedostatak je spektralna učinkovitost [9], [10].

Modulacija frekvencije (FM) i faze (PM) prema izvoru [8] se ubrajaju među modulacije argumenata, odnosno kutne modulacije. Modulacija frekvencijske je vrsta modulacije gdje se trenutna devijacija nedomulirane vrijednosti frekvencije prijenosnog signala mijenja proporcionalno trenutnoj vrijednosti amplitude modulirajućeg signala. Frekvencija prijenosnog signala mijenja se proporcionalno amplitudi signala koji se želi prenijeti, tj. amplitudi modulirajućeg signala. Navedeno znači da povećanje amplitude modulirajućeg signala uzrokuje povećanje frekvencije prijenosnog signala i obratno. Maksimalna frekvencija naziva se devijacija frekvencije i označava se kao Δf . Indeks modulacije frekvencije definira se kao omjer devijacije frekvencije prijenosnog signala i frekvencije modulacijskog signala. Frekvencijski modulirani signal zauzima veću širinu u spektru u odnosu na amplitudno modulirani signal. Tijekom postupka modulacije frekvencije nastaje bočni spektar koji se sastoji od beskonačnog niza diskretnih frekvencijskih komponenti simetrično raspoređenih oko frekvencije nosioca. Amplituda navedenih komponenti brzo opada s udaljenošću od nosioca. Širina pojasa frekvencijski moduliranog signala obično se definira kao udaljenost između najudaljenijih bočnih komponentata čija je amplituda veća od 1% amplitude nosioca [9]-[11]. Modulacija faze je modulacijski postupak u kojem trenutna fazna devijacija prijenosnog signala varira kao funkcija trenutne amplitude modulirajućeg signala od njegove nedomulirane vrijednosti, što znači da je devijacija, odnosno promjena prijenosnog signala, proporcionalna brzini promjene modulirajućeg signala. Gledano iz matematičke perspektive fazna modulacija predstavlja derivaciju frekvencijske modulacije. Referentna faza je faza signala koji se koristi za usporedbu s nekim drugim signalom. Usporedba signala ne mora se obaviti jedino u slučaju kada je referentna faza jednaka 0, [8], [9]. Na slici 2 prikazan je prijenosni signal te izgled moduliranog signala ovisno o vrsti modulacije.



Slika 2. Prijenosni signal i modulirani signal ovisno o vrsti modulacije, [9]

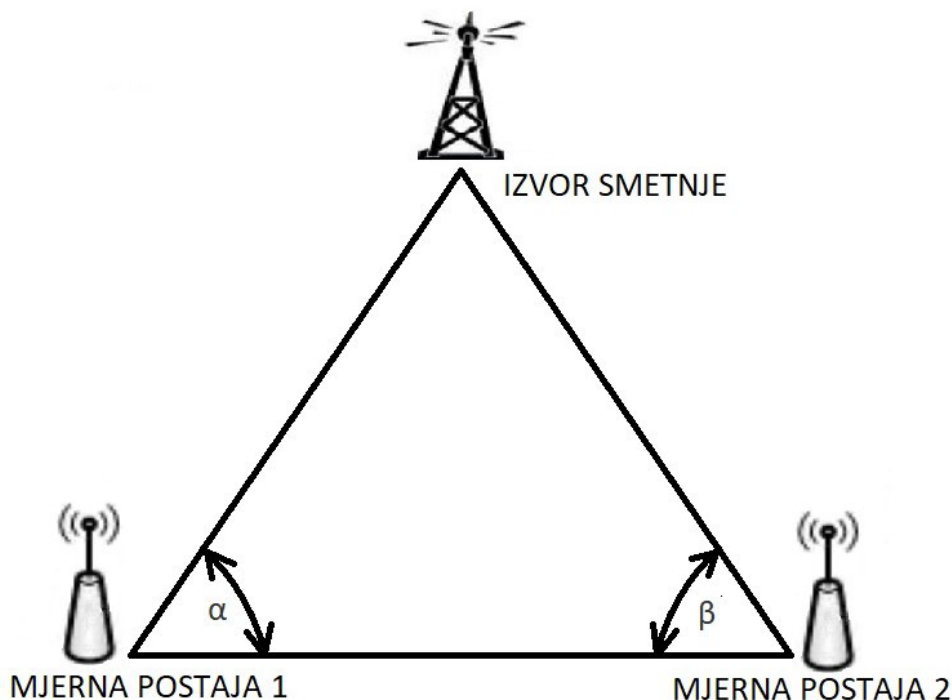
Modulacija faze i frekvencije imaju iste grafičke prikaze, no bitna je razlika u tome što je kod modulacije faze promjena faze proporcionalna promjeni amplitude modulacijskog signala, dok je kod modulacije frekvencije promjena frekvencije veličina koja je proporcionalna promjeni amplitude modulacijskog signala [9], [10].

3. Princip određivanja pozicije signala metodom triangulacije odašiljača i parametri koji utječu na točnost i izvedbu sustava

U prethodnom poglavlju opisana su temeljna svojstva elektromagnetskih signala, njihova podjela i priroda širenja. Svaki oblik komunikacije, žični ili bežični, temelji se na elektromagnetskim valovima. S obzirom na temeljnu ulogu elektromagnetskih valova u svim komunikacijskim sustavima, od ključne je važnosti odabir optimalnih lokacija za postavljanje odašiljača radi osiguranja kvalitetnog pružanja usluga. Posebno su zahtjevne usluge temeljene na lokaciji (engl. *Location based services* – LBS) koje zahtijevaju precizno određivanje pozicije korisnika u realnom vremenu. Određivanje pozicije ostvareno je korištenjem metode triangulacije [12].

3.1. Metoda triangulacije

Triangulacija je metoda koja omogućuje određivanje lokacije nekog objekta ili korisnika. Izvodi se pomoću dvije fiksne lokacije za koje je poznata pozicija odnosno geolokacija. Triangulacija se ubraja među metode određivanja lokacije, a za njeno izvođenje potrebno je poznavati jednu stranicu i dva kuta trokuta. Kada je riječ o određivanju lokacije nekog odašiljača, kao što je u slučaju ovog diplomskog rada FM, odnosno radijskog odašiljača, tada trokut čine dva mjerna prijamnika i radijski odašiljač. Gledano iz matematičke perspektive, poznavanje jedne stranice i dva kuta trokuta dovoljno je za određivanje smjerova preostalih stranica trokuta, odnosno stranice koju čini prijamnik 1 i radijski odašiljač, te stranice čije su krajnje točke određene prijamnikom 2 i radijskim odašiljačem. Sustav određivanja pozicije metodom triangulacije sastoji se od niza povezanih i preklapajućih trokuta u kojima je poznata jedna stranica. Bazna linija je stranica trokuta čija je duljina unaprijed određena udaljenošću između dva prijamnika s poznatim lokacijama. Vrhovi trokuta, odnosno odašiljač i prijamnici koji tvore trokut nazivaju se triangulacijske stanice. Za određivanje lokacije FM odašiljača, odnosno radijskog odašiljača, potrebno je poznavati kutove koje zatvara bazna linija i stranice prijamnika s radijskim odašiljačem. Koristeći usmjerene antene koje se kontinuirano rotiraju oko svoje osi, moguće je odrediti kut pod kojim se nalazi odašiljač, odnosno smjer iz kojeg dolazi najsnažniji radiosignal. Navedena metoda jednostavna je za implementaciju i korištenje budući da ne zahtijeva opremu za mjerenje udaljenosti čija je cijena znatno visoka. Triangulacijska metoda ima svoje nedostatke, a najviše se ističe osjetljivost na smetnje s naglaskom na urbane sredine zbog prisutnosti reflektiranih signala. [12], [13] Na slici 3 prikazana je metoda triangulacije na primjeru lociranja nepoznatog radijskog odašiljača, tj. izvora smetnje.



Slika 3. Postupak triangulacije

3.2. Čimbenici koji utječu na točnost i izvedbu sustava za triangulaciju

Metoda triangulacije precizna je metoda za određivanje lokacije nekog izvora odašiljanja, no njezina preciznost ovisi o velikom broju čimbenika. Čimbenici se mogu kategorizirati u tri skupine. Prva grupa čimbenika vezana je uz opremu i metode mjerenja, a to su propagacijski modeli, algoritmi za obradu izmjerenih vrijednosti, točnost pojedinog prijamnika i njihova međusobna sinkronizacija. Preciznost prijamnika je čimbenik koji utječe na točnost izvedbe, a odnosi se na osjetljivost, selektivnost i umjeravanje prijamnika. Osjetljivost prijamnika definira se kao mogućnost prijamnika da zaprimi, odnosno detektira signal. Navedena je karakteristika važna posebno za područja sa slabom pokrivenosti, odnosno lošim prijamom. Selektivnost predstavlja mogućnost prijamnika da diferencira koristan signal i šum. Kalibracija, tj. umjeravanje ključan je čimbenik koji utječe na točnu izvedbu triangulacije. Kalibracija je postupak u kojem se provjerava i podešava instrument u skladu s propisanim standardima. Međusobna sinkronizacija prijamnika je ključna kako bi se precizno odredilo vrijeme koje je potrebno da prijamnik zaprimi signal, na temelju čega se izračunava udaljenost. Algoritmi koji se koriste za obradu primljenog signala moraju pružiti brzu i kvalitetnu obradu signala. Algoritmi moraju pružiti kvalitetne informacije o vremenu koje je potrebno da se zaprimi signal. U složenim okruženjima veliku ulogu imaju propagacijski modeli jer oni omogućuju izračunavanje udaljenosti između odašiljača i prijamnika [12].

Druga grupa čimbenika su okolišni čimbenici, a njih čine smetnje, topografija okoliša te atmosferski uvjeti. Tijekom mjerenja odnosno izvođenja triangulacije signali drugih odašiljača ili uređaja mogu uzrokovati smetnje, što otežava mjerenje i izvođenje triangulacije. U urbanim područjima posebno se ističe višestazna propagacija. Višestazna propagacija je pojava odbijanja signala od velikog broja prepreka što posljedično dovodi do višestrukog prijama istog signala. Višestruki prijam istog signala komplicira obradu signala što utječe na točnost i vrijeme obrade signala. Među okolišnim čimbenicima posebnu važnost ima topografija, raspored zgrada i vegetacija što može utjecati na propagaciju radiovalova i reducirati stupanj točnosti mjerenja. Uz topografske čimbenike velik utjecaj imaju i atmosferski uvjeti koji utječu na propagaciju. [12]

Treća grupa su čimbenici vezani uz geometriju mreže. Velik broj prijamnih stanica omogućuje visok stupanj preciznosti u postupku određivanja lokacije metodom triangulacije. Osim velikog broja prijamnih stanica, važan je i njihov geometrijski raspored. Pravilan geometrijski raspored osigurava optimalno pokrivanje geografskog područja i utjecaj pogrešaka mjerenja smanjuje na najmanju razinu. Kako bi se poboljšala točnost, preporuča se korištenje više frekvencija i referentnih točaka kako bi se smanjila višestazna propagacija te adaptivni algoritmi i redovita kalibracija sustava. [12]

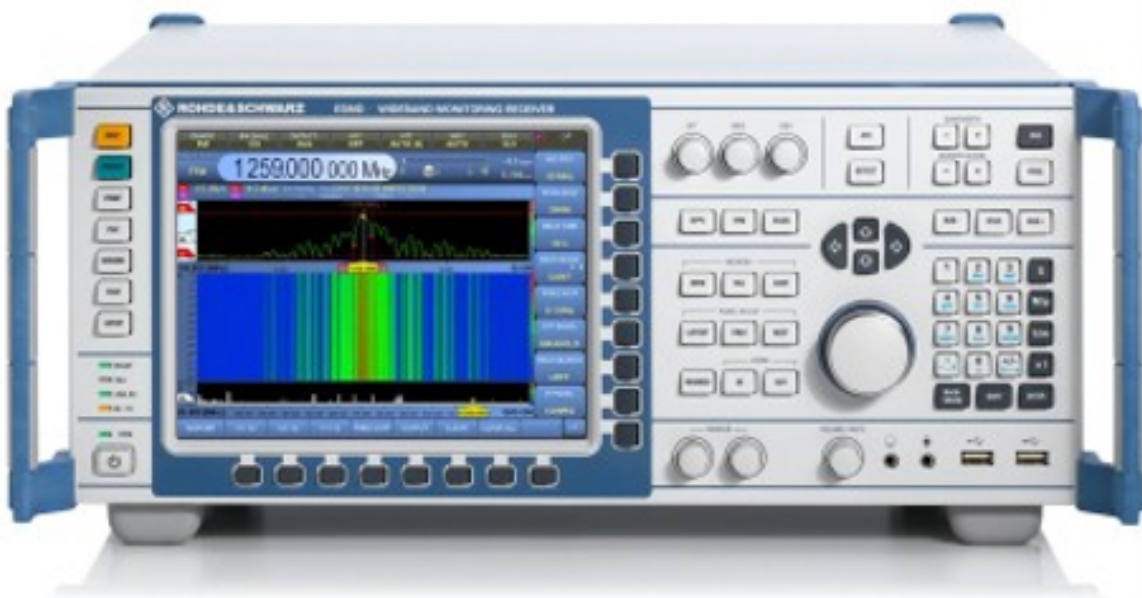
4. Mjerni sustav

U prethodnim poglavljima opisana je priroda elektromagnetskog signala te metoda triangulacije. Metoda triangulacije omogućuje određivanje lokacije nekog odašiljača, što je izuzetno bitno za obavljanje poslova kontrole radiofrekvencijskog spektra. Kontrolu radiofrekvencijskog spektra provode regulatorne agencije pojedine zemlje u cilju podrške procesu upravljanja spektrom. Mjerenja u svrhu određivanja lokacije nekog odašiljača, a s ciljem kontrole parametara ili otklanjanja smetnji, izvode se pomoću kontrolnih mjernih postaja. Kontrolne mjerne postaje mogu, ali i ne moraju imati ljudsku posadu te mogu biti pokretne i nepokretne. Nepokretne kontrolno-mjerne postaje predstavljaju centralni element sustava kontrole radiofrekvencijskog spektra. Svaka postaja opremljena je odgovarajućom infrastrukturom i mjernom opremom, odnosno sustavom. Mjerni sustav sastoji se od sklopovskog dijela (engl. *Hardware*) i programskog dijela (engl. *Software*). [14]

4.1. Sklopovski dio sustava

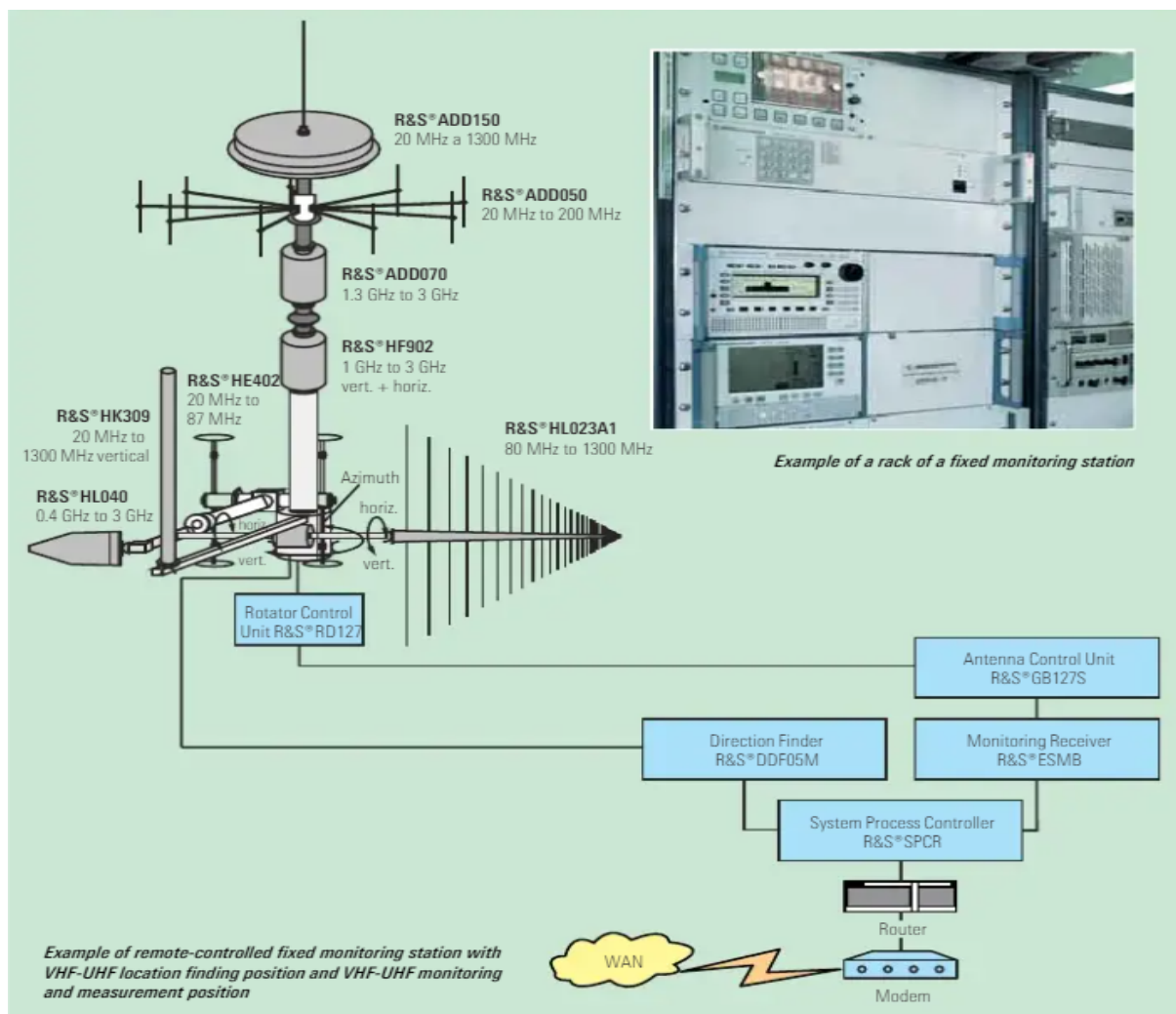
Nepokretna kontrolna mjerna postaja, na kojoj se provode mjerenja u svrhu učinkovite kontrole radiofrekvencijskog spektra, mora imati postavljenu mjernu opremu na način da zadovoljava tehničke standarde koji su propisani za pojedinu vrstu mjerenja te zadovoljavati uvjete koji moraju biti ispunjeni kako bi se dobili točni mjerni rezultati. Nabavka opreme, njena ugradnja i upotreba propisana je preporukama Međunarodne telekomunikacijske unije, odnosno njenog radiokomunikacijskog sektora (engl. *International telecommunication union – Radiocommunication sector – ITU-R*). ITU propisuje da nepokretna kontrolna mjerna postaja treba sadržavati mjerni prijamnik i antenski sustav. Navedeno predstavlja minimalni skup opreme. Svrha mjernog prijamnika je izdvajanje promatranog signala zaprimljenog putem antenskog sustava. Mjerni prijamnik u obliku mjernih rezultata mjeritelju daje povratnu informaciju o karakteristikama promatranog signala i mora biti usklađen sa relevantnim ITU-R preporukama. Mjerni prijamnik, u nepokretnim kontrolnim postajama, karakterizira dinamički raspon, selektivnost, linearnost, stabilnost, fleksibilnost, točnost i brzina mjerenja, budući da prijamnik mora biti u mogućnosti u vrlo kratkom vremenu skenirati široki frekvencijski opseg. Skeniranje spektra u kratkom vremenskom intervalu izvodi se u svrhu praćenja promjena u dinamičnom okruženju radiofrekvencijskog spektra. Dinamički raspon prijamnika odnosi se na frekvencijski opseg koji mora obuhvatiti kako bi mogao otkriti niske i visoke razine signala u istom frekvencijskom području. Na taj način omogućeno je otkrivanje signala niske razine u jakom polju odnosno u prisutnosti jakih signala, što je od velike važnosti u slučajevima otkrivanja uzročnika smetnje. Najčešće mjerni prijamnici obuhvaćaju raspon od 20 MHz do 3 GHz ili 9 kHz do 3 GHz, zbog čega je njihova cijena izuzetno visoka. Selektivnost kao karakteristika mjernog prijamnika odnosi se na mogućnost izdvajanja promatranog signala od šuma i okolnih signala. Kako bi se izdvojio kvalitetno promatrani signal, potrebno mjerni prijamnik mora sadržavati kvalitetne i odgovarajuće filtere sa uskim propusnim opsegom. Takav prijamnik mora imati nisku razinu šuma kako bi mjeritelj što preciznije mogao mjeriti signale

niske razine. Linearnost mjernog prijamnika odnosi se na demodulaciju signala, budući da mjerni prijamnik zaprima modulirani signal te iz njega izdvaja željenu informaciju. Linearnost u suštini predstavlja zahtjev da snage izlaznog signala prijamnika i ulaznog signala moraju biti proporcionalne. Karakteristike mjernog prijamnika moraju biti stabilne u različitim vremenskim uvjetima, a posebno u uvjetima jakog elektromagnetskog polja ili buke kako bi se osiguralo pouzdano mjerenje. Osim toga, mjerni prijamnik treba biti otporan na intermodulacijske produkte. Mjerenja provedena mjernim prijamnikom moraju biti točna i unutar određenih granica tolerancije, kako je definirano prema preporukama ITU-a za pojedinu vrstu mjerenja. Razina točnosti mjerenja ovisi o kalibraciji, odnosno umjeravanju te korištenim metodama. Mjerni prijamnik mora biti u mogućnosti brzo skenirati široki frekventijski opseg u cilju praćenja promjena koje se događaju u radiofrekventijskom spektru, čime se postiže određeni stupanj fleksibilnosti. Fleksibilnost mjernog prijamnika očituje se u različitim načinima rada, kao što su kontinuirano praćenje, skeniranje određenog frekventijskog područja ili mjerenje snage pojedinačnih signala. Sve navedeno su metode rada koje prijamnik nudi mjeritelju prilikom izvođenja mjerenja. Sučelje mjernog prijamnika mora biti intuitivno te prikladno za prikaz rezultata mjerenja, te se preporuča da sam prijamnik ima mogućnost snimanja podataka o mjerenjima. Među reprezentativnijim primjercima takvog mjernog prijamnika ističe se ESMD uređaj koji je proizvod kompanije Rode & Schwarz prikazan slikom 4. ESMD uređaj postoji u dvije varijante. Jedna varijanta obuhvaća frekventijski raspon od 9 kHz do 3 GHz, dok najnoviji modeli obuhvaćaju raspon do 26 GHz. ESMD uređaj nema u sebi ugrađene fizičke filtre, već na temelju Fourierove transformacije propušta signal i filtrira ulazne signale. [14], [15]



Slika 4. Mjerni prijamnik ESMD, [14]

Drugi dio sklopovlja mjernog sustava nepokretnih kontrolnih mjernih postaja koji se povezuje s mjernim prijamnikom je antenski sustav. Antenski sustav sastavljen je od usmjerenih, neusmjerenih, aktivnih i pasivnih antena. Aktivna antena je ona koja u sebi ima aktivni element, primjerice pojačalo. Usmjerene antene sustava izvedene su u vertikalnoj i horizontalnoj polarizaciji uz mogućnost rotiranja oko svoje osi u rasponu od 0 do 359°. Rotiranje usmjerenih antena omogućuje mjerenje signala točno iz izvora odašiljanja i njegovo izoliranje u odnosu na signale koji dolaze iz drugih smjerova. Korištenjem više usmjerenih antena na različitim lokacijama te pronalaženjem točke sjecišta dolaznog signala može se odrediti lokacija odašiljača koji uzrokuje smetnje. Neusmjerene, odnosno svesmjerne antene su prikladne za širokopolasna mjerenja u njihovoj horizontalnoj ravnini. Prednost svesmjernih antena je to što omogućuju pregled radiofrekvencijskog spektra u kratkom vremenskom intervalu prilikom čega nije potrebno rotirati cijeli antenski sustav [14]. Opisani mjerni sustav prikazan je slikom 5, zajedno s frekvencijskim karakteristikama i nazivima pojedinog elementa antenskog sustava.



Slika 5. Sustav za provođenje mjerenja, [17]

Usmjerenu antenu, kao što je log-periodska antena HL023, karakterizira dobra usmjerenost, što je najbolje vidljivo u omjeru prednjeg i stražnjeg dijela antene koji iznosi 14 decibela (dB). Navedeni omjer definira usmjerenost jer, što je veći omjer prednje i stražnje strane antene, to je stupanj usmjerenosti veći. Veći stupanj usmjerenosti znači da antena usmjerava većinu svoje energije u jednom smjeru. Dobitak log-periodske antene u slobodnom prostoru iznosi 7,5 dBi. Log-periodska antena ima ujednačen obrazac u rasponu frekvencija do omjera 10:1, što znači da ima relativan konstantan obrazac u zraku kada je riječ o širokom frekvencijskom rasponu. Zračni elementi u log-periodskoj anteni su povezani sa centralnom linijom za prijenos signala. Razmak između pojedinih elemenata povećava se proporcionalno frekvencijskom logaritmu. Zbog toga log-periodska antena karakterizira se kao antena kod koje se individualni elementi pojavljuju u intervalima konstantnim s logaritmom frekvencije. Osim navedenog antenskog sustava, na mjerni prijamnik se povezuje i drugi antenski sustav koji koristi drugi tip antene, odnosno njega čine antene ADD 150 i ADD 050, a također se koristi pronalazanje izvora odašiljanja signala, tj. goniometriranje. Sustav za goniometriranje karakterizira visok stupanj osjetljivosti i preciznosti. Preciznost određivanja lokacije u odnosu na stvarnu lokaciju kreće se u rasponu od 1 do 3 stupnja. Osim toga, sustav za određivanje lokacije, tj. goniometriranje mora biti otporan na višestaznu propagaciju, pogreške u polarizaciji i imati dovoljnu razinu otpornosti na jake susjedne signale.

Mjernim prijamnikom i antenskim sustavom upravlja se putem računala i programskog softvera R&S Argus, koji je također proizvod tvrtke Rode & Schwarz. Navedeni program također se koristi za prikupljanje podataka i rezultata mjerenja. Mjerna računala moraju zadovoljavati nekoliko uvjeta, među kojima se najviše ističu neprekidan kontinuirani rad i ne izazivanje smetnji u radu mjernog sustava. Mjerne antene povezuju se na radiofrekvencijski razdjelnik koji je povezan na mjerni prijamnik. Svaki mjerni prijamnik povezan je na kontrolno računalo putem kojeg se izvode mjerenja. Rezultati mjerenja se odgovarajućim medijima prenose do terminalnih računala. Povezivanjem mjernog prijamnika, antenskog sustava i računala koji upravljaju radom mjernog instrumenta stvara se cjeloviti sustav. Navedenim sustavom može se upravljati direktno preko kontrolnog računala ili udaljenim putem [14], [17].

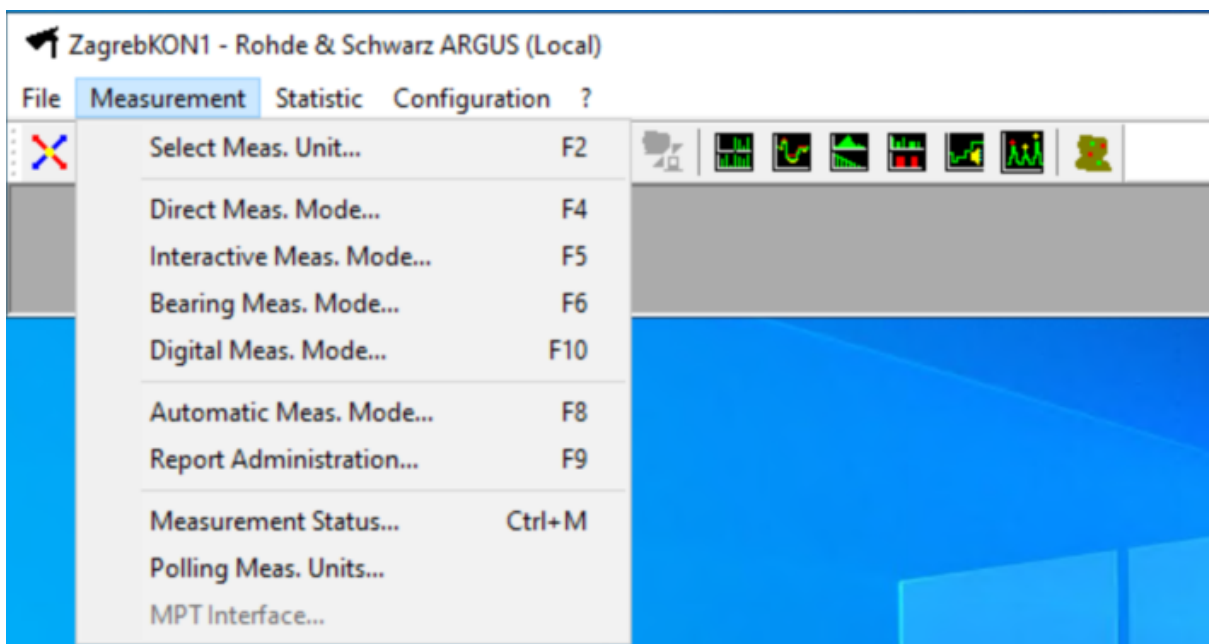
4.2. Programski dio sustava

R&S Argus predstavlja programski dio mjernog sustava koji je instaliran na mjerni prijamnik i računala, a proizvod je tvrtke Rode & Schwartz. Navedeni softver korišten je u velikom broju industrija kao što su telekomunikacije, vojna i civilna zaštita, a ponajviše u analizi signala u radiofrekvencijskom spektru. Pogodan je alat kojeg koriste regulatorne agencije, budući da omogućuje mjerenja i analizu radiofrekvencijskog spektra sukladno međunarodnim standardima i propisima. Program R&S Argus koristeći različite tehnike poput kuta dolaska (engl. *Angle of arrival* – AOA), razlika u vremenu dolaska (engl. *Time difference of arrival* – TDOA) i hibridnih tehnika za precizno lociranje izvora odašiljanja radio signala. Hibridne tehnike predstavljaju kombinaciju AOA i TODA metode [17].

Sučelje programa je intuitivno i nudi opciju prikaza geografske karte što čini vizualizaciju jednostavnijom, a samim time i promatranje radio okruženja znatno kvalitetnijim. Promjene u spektru tijekom određenog vremena te sami prikaz spektra u realnom vremenu kroz ilustrativni prikaz su glavne odlike sučelja R&S Argus programa. Na taj način korisnici mogu brzo identificirati aktivne signale te analizirati okruženje u radiofrekvencijskom spektru. Promatranje spektra jedan je od poslova regulatornih agencije čija je svrha identifikacija i analiza radio signala u određenom frekvencijskom pojasu, kao što su mikrovalne veze, određene mobilne tehnologije i mnogi drugi pojasevi. Praćenjem spektra regulatori osiguravaju učinkovito korištenje radiofrekvencijskog spektra i provjeru je li korištenje u skladu sa dozvolama. Budući da radiofrekvencijski spektar u određenim pojasevima, poput pojasa za zrakoplovnu komunikaciju, mora biti bez smetnji kako bi se osigurala sigurnost leta, program R&S Argus koristi se za precizno lociranje i identifikaciju svih štetnih emisija koje mogu uzrokovati interferenciju s ovom kritičnom komunikacijskom uslugom. Osim što olakšava i omogućava pregled radiofrekvencijskog spektra, R&S Argus nudi mogućnost kreiranja alarma i upozorenja u slučajevima pojave nepoznatog ili neželjenog signala te prekoračenja snage određenog signala. Posebno se ističe značajka generiranje izvješća. Navedena značajka pruža detaljna izvješća o rezultatima određenog mjerenja [17].

Modularna arhitektura i otvoreno sučelje su također su opcije koju ovaj program nudi korisnicima. Modularna arhitektura znači da se jednostavno proširuju funkcionalnosti ukoliko to korisnik zahtijeva, a otvorena sučelja je značajka koja omogućuje jednostavno integriranje u postojeću infrastrukturu te razmjenu podataka s drugim sustavima. Tvrtka Rode&Schwartz ima izuzetno kvalitetnu korisničku podršku koja uključuje velik broj vodiča za korištenje programa i mjerenja. Korištenjem navedenog softvera korisniku je omogućeno kreiranje automatskih procesa, odnosno mjerenja čime se smanjuje vjerojatnost ljudske pogreške uz pretpostavku da su dobro definirani parametri mjerenja poput vremenske definicije (engl. *Timing definition*), definicije mjerenja (engl. *Measurment definition*) i drugi parametri. Proces automatizacije sam po sebi štedi vrijeme i povećava učinkovitost. Unutar programa korisnicima je ponuđeno nekoliko načina rada. Izravni način mjerenja (engl. *Direct measurment mode*) je način koji omogućuje kontroliranje mjerne opreme direktno ili putem virtualnih kontrolnih panela, tj. prozora. Izravna kontrola opreme omogućuje korisniku, tj. mjeritelju brz i jednostavan način uočavanja, lociranja i identifikacije izvora smetnje. Interaktivni način mjerenja (engl. *Interactive measurment mode*) mjeritelju nudi nekoliko opcija, odnosno načina mjerenja, a to je otkrivanje nepoznatih signala (engl. *Detection of unknow frequency*), analiza signala (engl. *Signal analysis*) odnosno analiza spektra (engl. *Spectrum*), analiza antene (engl. *Antenna analysis*), područje pokrivanja (engl. *Coverage measurment*) te analiza intermodulacijskih produkata (engl. *Intermodulation analysis*).

Interaktivni način mjerenja osigurava pregled i analizu radiofrekvencijskog spektra, identifikaciju elektromagnetskih emisija te određivanje područja pokrivanja. Drugi način mjerenja, odnosno rada je određivanje smjera (engl. *Bearing mode*) koji omogućuje lociranje izvora odašiljanja. Za određivanje izvora odašiljanja moguće u ovom načinu rada istovremeno koristiti četiri nepokretne kontrolne mjerne postaje. Navedeni način rada karakterizira visoka preciznost, brzi rezultati, fleksibilnost te integracija s kartama što olakšava vizualizaciju i interpretaciju podataka. Za određivanje izvora odašiljanja koristi se tehnika mjerenja kuta dolaska. Automatski mjerni način rada (engl. *Automatic measurement mode*) omogućuje kontroliranje i upravljanje mjernom opremom prema unaprijed definiranom rasporedu mjerenja. Mjeritelj definira vrijeme mjerenja i parametre mjerenja prije samog pokretanja. Rezultati mjerenja mogu se promatrati za vrijeme trajanja mjerenja ili nakon što je mjerenje završeno. Navedeni način sadrži dodatak koji se naziva mjerenje razlike, a omogućuje istovremeno izvršavanje mjerenja pomoću dva prijarnika iste vrste. Procjeniteljski način rada (engl. *Evaluation mode*) prikuplja podatke iz svih načina mjerenja i obrađuje ih. Procjeniteljski način rada omogućuje sveobuhvatnu procjenu rezultata mjerenja sukladno preporukama ITU-a. Također nudi opciju dodavanja u izvješće rezultate mjerenja i postavke mjerenja [17]. Opisani načini rada prikazani su slikom 6.



Slika 6. Metode mjerenja programa R&S Argus

5. Postupak mjerenja i otkrivanja lokacije i snage odašiljanja uzročnika istokanalne smetnje

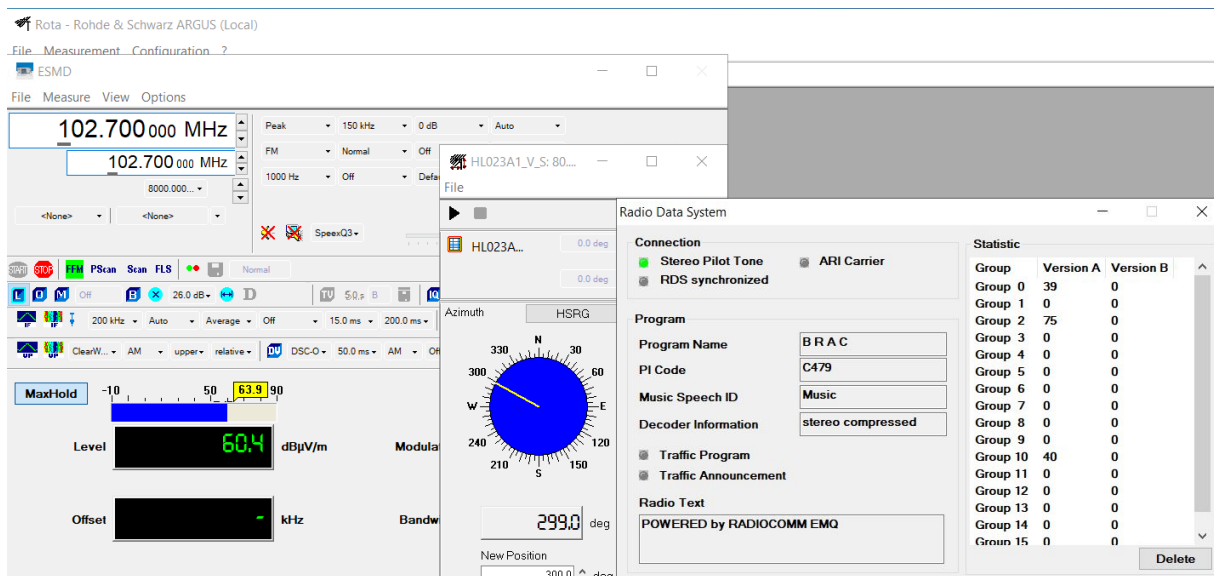
Istokanalna smetnja je pojava neželjenog signala koji interferira s korisnim signalom na istom frekvencijskom kanalu, što rezultira smanjenjem razumljivosti govora, povećanjem pogreške pri prijenosu podataka ili drugim problemima u kvaliteti usluge. Istokanalna smetnja nastaje u slučaju kada dva ili više odašiljača emitiraju na istoj frekvenciji. Kako bi se ista uklonila, potrebno je na temelju izmjerene snage precizno locirati i identificirati izvor smetnje te putem međunarodnih dogovora i propisa istu prijaviti nadležnoj regulatornoj agenciji. Prema izvoru [17], za pronalaženje izvora radio signala odnosno njegove geolokacije koriste se sljedeće metode razlika u vremenu dolaska, mjerenje snage signala (engl. *Received signal strength* – RSS), mjerenje smjera dolaska (engl. *Direction of arrival* – DOA), mjerenje kuta dolaska signala te hibridne metode. U radu će se opisati određivanje geolokacije uzročnika smetnje pomoću metode triangulacije. Za izvođenje metode triangulacije kombinirati će se više metoda koje su prethodno navedene prema [15], [17].

5.1. Određivanje smjera uzročnika smetnje

Prvi korak u postupku geolociranja uzročnika smetnje je odrediti smjer iz kojeg dolazi signal provođenjem mjerenja s poznatih lokacija. Svi idući postupci provode se koristeći mjerni sustav definiran u poglavlju četiri i putem programskog alata R&S Argus. Mjerenja su provedena s dvije mjerene postaje. Jedna postaja s koje su provedena mjerenja locirana je na planini Rota (mjerna postaja 1), dok je druga mjerna postaja locirana na brdu Ozljak (mjerna postaja 2). Kako bi se odredio smjer odašiljanja, potrebno je skenirati spektar i usporediti trenutno stanje sa prethodnim te uočiti koje su se promjene dogodile u odnosu na prethodno razdoblje. Mjeritelj unutar programa prvo odabire izravni način mjerenja nakon čega slijedi odabir antene s kojom će se vršiti mjerenja. Za preliminarno skeniranje koristi se svesmjerna antena kako bi se skenirao spektar i kako bi se usporedilo trenutno stanja s prethodnim [15], [17].

Mjeritelj upisuje frekvenciju za koju je prijavljena štetna smetnja te postavlja parametre mjerenja. Budući da je riječ o radijskim odašiljačima, širina intermodulacijskog filtera treba biti minimalno 150 kHz kako bi se mogla izvršiti demodulacija. Navedenom širinom istovremeno se obuhvaća cjelokupni radijski kanal. Vrijeme mjerenja podešeno je na automatsko, što znači da mjerni prijamnik sam sebe podešava sukladno uvjetima mjerenja. Budući da radijski odašiljači emitiraju frekvencijsko moduliran signal za opciju demodulacije zaprimljenog signala, na mjernom prijammiku odabrana je frekvencijska modulacija. Atenuacija, odnosno prigušenje koje uređaj može dodati postavljeno je na 0 dB. Atenuacija u kontekstu mjerenja i otkrivanja smetnji predstavlja smanjenje snage signala na putu od izvora odašiljanja do prijammnika. Smanjenje snage može biti uzrokovano prevelikom udaljenošću, sredstvom širenja, preprekama te frekvencijom koja se promatra. Prigušenje se prvotno postavlja na vrijednost od 0 dB kako bi se utvrdilo stvarno stanje spektra, uključujući šum i intermodulacijske produkte.

Nakon određenog vremena i utvrđivanja neželjene emisije mjeritelj povećava prigušenje na iznos od 5 dB. Povećanje prigušenja djeluje kao filter koji smanjuje jačinu svih signala, uključujući i one željene. Međutim, ovaj postupak istovremeno omogućuje bolje razlikovanje jakih signala od slabijih, kao i detekciju neželjenih smetnji poput intermodulacijskih produkata. Naime, više frekvencije imaju veće gubitke u jačini signala nego što je to u slučaju sa nižim frekvencijama, a uzrok tomu je valna duljina, kao što je opisano u ranijem dijelu rada. Nakon što je utvrđeno postojanje smetnje i njene posljedice, mjeritelj tada odabire drugu vrstu antene kako bi preciznije odredio smjer iz kojeg dolazi signal, a samim time i približnu lokaciju uzročnika smetnje [15], [17], [18]. Slikom 7 prikazani su uvjeti mjerenja prethodno opisani i provedeni na mjernoj postaji 1 te PI kod i pozivna oznaka radijskog nakladnika kojem je dodijeljena navedena frekvencija, a na kojoj je uočena smetnja. Pi kod predstavlja jedinstveni identifikator svakog radijskog nakladnika

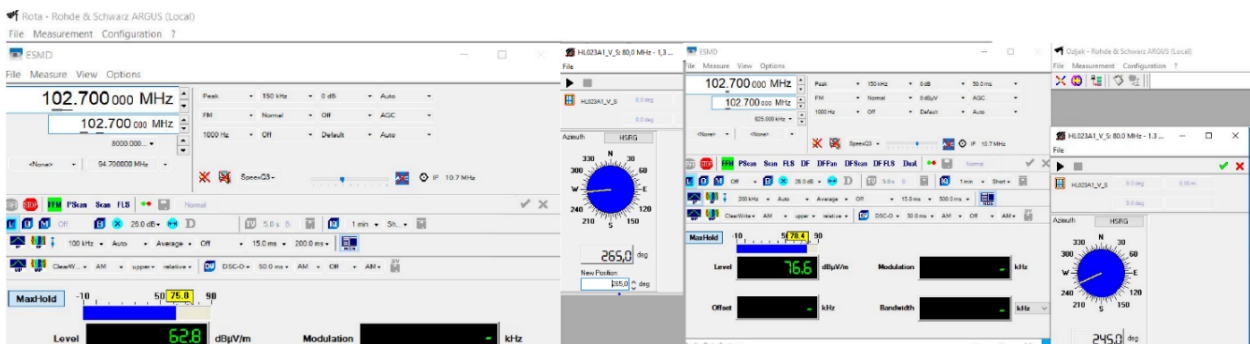


Slika 7. Uvjeti mjerenja radijskog odašiljača hrvatskog nakladnika

Za preciznije određivanje lokacije koristi se log-periodska antena, čije su karakteristike objašnjene u poglavlju četiri. Mjeritelj prvo odabire horizontalno usmjerenu antenu na mjernoj postaji koja je locirana na planini Rota, budući da mjeritelj ne zna kako je polarizirana antena na izvoru odašiljanja. Antenu zatim usmjeri u sjever, odnosno 0 stupnjeva geografske širine. Istovremeno, unutar programa R&S Argus odabire mjerni prijamnik ESMD i pokreće mjerenje na prethodno unesenoj frekvenciji s uvjetima prikazanim na slici 7. Nakon što je pokrenuto mjerenje, mjeritelj u polje za unos novog smjera antene unosi 359° i potvrđuje klikom na gumb „Pokreni“ u gornjem lijevom kutu. Klikom na gumb „Pokreni“ antena se okreće, odnosno rotira u novi smjer 359° prilikom čega mjeri razine zaprimljenih signala. Mjeritelj istovremeno promatra smjer u kojem se nalazi antena i razinu signala. Nakon što antena stigne u položaj 359 stupnjeva, mjeritelj bilježi u kojem smjeru je razina signala najveća. Tijekom opisanog procesa isključuje se smjer 300 stupnjeva kao smjer iz kojeg je najveća razina zračenja jer je to smjer koji odgovara radijskom odašiljaču hrvatskog radijskoga nakladnika. Isti postupak

ponavlja se za antenu sa vertikalno polariziranom antenom, uzimajući opet u obzir položaj radijskog odašiljača hrvatskog nakladnika [15], [17], [18].

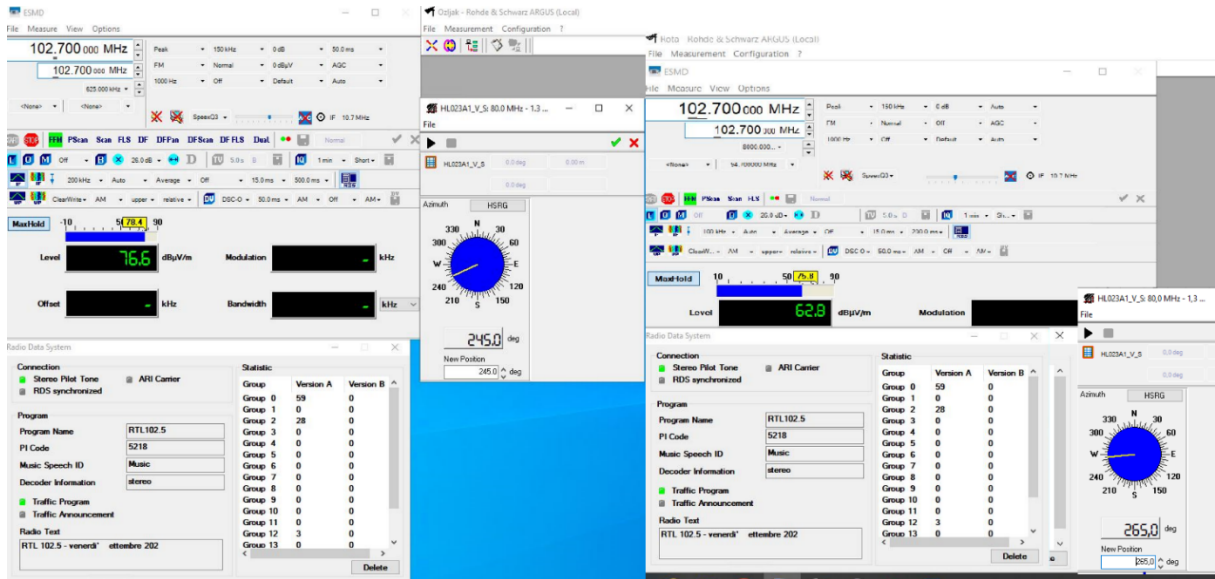
Nakon prethodno opisanih postupaka mjerenja u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, mjeritelj određuje smjer iz kojega je zabilježena najveća razina signala i u kojoj polarizaciji je antena zabilježila navedenu jačinu. Mjerenjima sa mjerne postaje na vrhu Rota utvrđeno je da je najveća razina signala, isključujući smjer radijskog odašiljača hrvatskog nakladnika, u vertikalnoj polarizaciji u smjeru 265 stupnjeva sjeverne geografske širine. Isti postupak ponavlja se na drugoj mjernoj postaji koja se nalazi na brdu Ozljak. Na mjernoj postaji na brdu Ozljak najveća razina signala zabilježena je u vertikalnoj polarizaciji u smjeru 245 stupnjeva sjeverne geografske širine u [15], [17], [18]. Određivanjem navedenih smjerova poznati su kutovi koji zatvaraju baznu liniju i stranice trokuta koje čini nepoznati odašiljač sa mjernim postajama, kao što je to opisano u poglavlju četiri. Slika 8. prikazuje opisani postupak te smjer iz kojega je zaprimljena najveća razina signala na pojedinoj postaji



Slika 8. Smjer zaprimanja najvećih signala s pojedine postaje

5.2. Identificiranje uzročnika smetnje

Nakon što su određeni smjerovi u kojima je razina signala najveća traži se sjecište navedenih pravaca odnosa smjerova. Sjecište pravaca predstavlja približnu lokaciju nepoznatog izvora odašiljanja. Usmjerena antena na mjernoj postaji 1 na vrhu planine Rota okrenuta je u smjeru 270 stupnjeva sjeverne geografske širine. Pokreće se mjerenje frekvencije 102,7 MHz s istim uvjetima kao na slici 8. Pokretanjem opcije sustava radijskih podataka utvrđeno je da se radi o talijanskom radiju RTL102.5 pozivne oznake RTL 102.5 – venerdì' ettembre 202 i PI koda 5218. Zabilježena razina snage signala je 76,6 dBµV/m Na drugoj mjernoj postaji na brdu Ozljak usmjerena antena okrenuta je u smjeru 245 stupnjeva sjeverne geografske širine. Kao i u slučaju kod prve mjerne postaje, pokrenuto je mjerenje frekvencije 102,7 u izravnom načinu mjerenja kao i opcija sustava radijskih podataka. Mjerenjem je utvrđeno da je uzrok istokanalne smetnje talijanski radio RTL 102.5 čija je pozivna oznaka RTL 102.5 – venerdì' ettembre 202 i PI kod 5218. Zabilježena razina snage signala je 62,8 dBµV/m. Opisano je prikazano slikom 9.



Slika 9. Identifikacija uzročnika istokanalne smetnje

6. Evaluacija rezultata mjerenja te usporedba sa stvarnim lokacijama odašiljača

Nakon što su definirani kutovi između bazne linije i stranica trokuta koju čine mjerni prijamnici i nepoznati odašiljač, stvoreni su uvjeti za određivanje lokacije nepoznatog izvora odašiljanja metodom triangulacije. Nepoznati odašiljač zapravo predstavlja točku sjecišta smjerova iz kojih je zaprimljena najveća razina signala. Udaljenost, odnosno dužina bazne linije iznosi 110 kilometara i 440 metra, a kutovi u trokutu između bazne linije i stranica koje su omeđene mjernom postajom 1 (vrh Rota) i nepoznatim radijskim odašiljačem te mjernom postajom 2 (brdo Ozljak) i nepoznatim radijskim odašiljačem iznose $42^{\circ}50'24''$ i $116^{\circ}27'$. Kako bi se odredila udaljenost nepoznatog izvora odašiljanja, potrebno je odrediti treći kut, odnosno kut sjecišta smjerova u kojima je zabilježena najveća razina signala. Budući da je zbroj kutova u trokutu 180° , treći kut se dobije tako što se od 180° oduzme zbroj kutova 42° i 116° , odnosno $180^{\circ} - (42^{\circ}50'24'' + 116^{\circ}27')$. Treći kut iznosi $20^{\circ}42'48''$.

U sljedećem koraku potrebno je primijeniti sinusov ili kosinusov poučak kako bi se izračunale duljine stranica, odnosno udaljenost između mjerne postaje 1 i nepoznatog radijskog odašiljača te mjerne postaje 2 i nepoznatog radijskog odašiljača. Sinusov poučak prikladan je s obzirom na to da povezuje duljinu stranice s nasuprotnim kutom što je prikazano izrazom (7).

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} \quad (7)$$

pri čemu je: α – kut nasuprot stranice a , β – kut nasuprot stranice b , γ – kut nasuprot stranice c . Budući da su poznati kutovi nasuprot stranica između nepoznatog radijskog odašiljača i mjernih postaja, primjenom sinusovog poučka izvedeni su izrazi (8) i (9) za izračunavanje udaljenosti pojedine mjerne postaje i nepoznatog odašiljača. Kosinusov poučak također je primjenjiv za izračun udaljenosti između mjerne postaje 1 i nepoznatog radijskog odašiljača, no za njegovu primjenu je potrebno poznavati kosinus jednog od kutova u trokutu i duljinu jedne stranice trokuta.

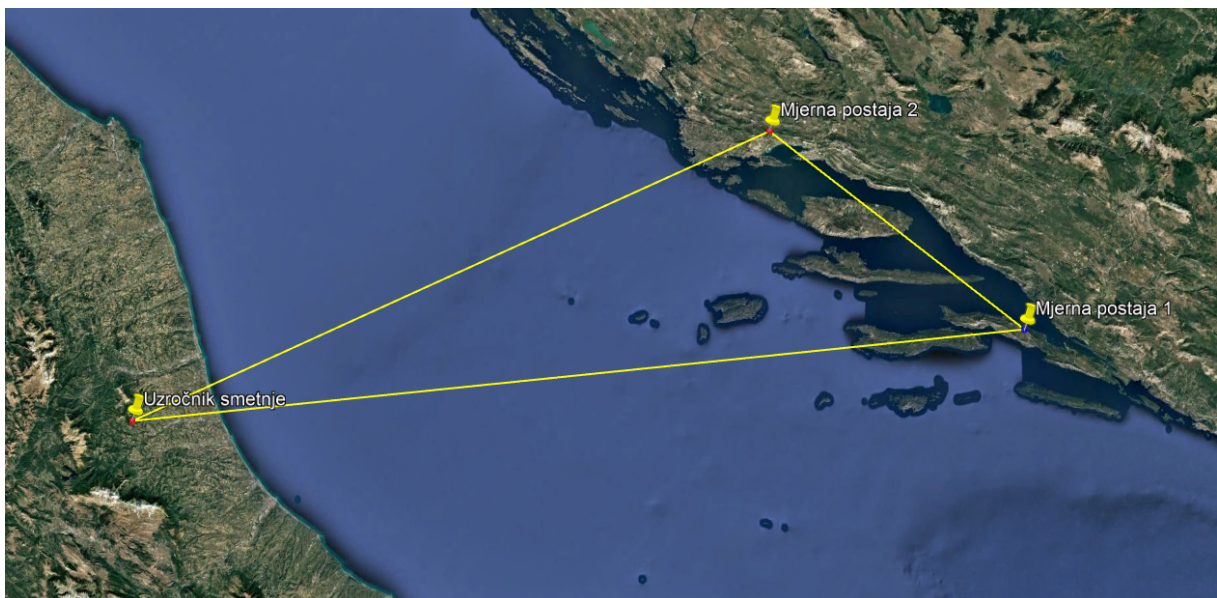
$$a = c * \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\gamma)} \quad (8)$$

gdje je: a – stranica omeđena nepoznatim radijskim odašiljačem i mjernom postajom 1, c – bazna linija, tj. udaljenost između mjernih postaja, β – kut između bazne linije i stranice a , α između bazne linije i stranice b .

$$b = c * \frac{\sin(\beta)}{\sin(\gamma)} \quad (9)$$

gdje je: b – stranica omeđena nepoznatim radijskim odašiljačem i mjernom postajom 2, c – bazna linija, tj. udaljenost između mjernih postaja, γ – kut između stranice a i stranice b , β – između bazne linije i stranice b .

Izračunate udaljenosti do nepoznatog izvora radijskog odašiljača, temeljene na formulama (8) i (9), iznose približno 293 kilometra za stranicu a i 230,17 kilometara za stranicu b . Međutim, zbog tolerancija mjernih instrumenata i neizbježnih pogrešaka u mjerenju kutova i duljina, stvarne udaljenosti mogu se razlikovati od izračunatih vrijednosti. Unatoč tim ograničenjima, koordinate nepoznatog izvora radijskog odašiljanja u odnosu na mjernu postaju 2 iznose $42^{\circ}41'41''$ sjeverne geografske širine i $13^{\circ}37'19''$ zapadne geografske duljine [12], [13]. Slika 10. prikazuje trokut koji čine mjerne stanice i nepoznati radijski odašiljač.



Slika 10. Trokut koji čine mjerne postaje i nepoznati radijski odašiljač

Nakon detektiranja izvora smetnje regulator šalje prijavu štetne smetnje (engl. *Report of harmful interference*). Dodatak 10 je prema Međunarodnoj telekomunikacijskoj uniji definiran kao prijava štetne smetnje. Dodatak 10 šalje se regulatoru koji je nadležan za područje na kojem se nalazi identificirani izvor odašiljanja koji je uzrok istokanalne smetnje. Na slici 11 prikazan je Dodatak 10 [19]. Mjeritelj u dijelu a upisuje identifikacijsku oznaku uzročnika smetnje. Identifikacijska oznaka može biti PI kod, pozivna oznaka ili neki drugi način identifikacije. U dijelu b upisuje se frekvencija na kojoj je izmjerena smetnja te datum i vrijeme kada je zabilježena. U dijelu c upisuje se klasa emisije definirana sukladno propisima Međunarodne telekomunikacijske unije prema. Zatim u dijelu d mjeritelj unosi procijenjenu širinu kanala uzročnika smetnje. U dijelu e mjeritelj unosi najveću izmjerenu razinu signala te datum i vrijeme kada je ista zabilježena. Polarizacija antene uzročnika smetnje unosi se u dio f . U dijelu g prijave štetne smetnje mjeritelj unosi namjenu odašiljača koji je uzročnik smetnje. U dijelu h mjeritelj unosi smjer u kojem je izmjerena najveća razina signala, a u dijelu h unosi

lokaciju na kojoj je zabilježena smetnja. Koordinate lokacije sa koje su obavljena mjerena unose se u dio *i* [20]. Primjer prijave štetne smetnje za smetnju koja je obrađena u radu prikazana je na slici 11.

APPENDIX 10 (REV.WRC-07)
Report of harmful interference
 (See Article 15, Section VI)

Particulars concerning the station causing the interference:

<i>a</i> Name, call sign or other means of identification	(I)" RTL 102,5" , PI: 5218
<i>b</i> Frequency measured	102,7 MHz
Date:	06.9.2024.
Time (UTC):	00:00-24:00
<i>c</i> Class of emission	F8E
<i>d</i> Bandwidth (indicate whether measured or estimated)	250KHz
<i>e</i> Measured field strength or power flux-density	76,6 dB μ V/m
Date:	06.9.2024.
Time (UTC):	13:45
<i>f</i> Observed polarization	V
<i>g</i> Class of station and nature of service	BC
<i>h</i> Location/position/area/bearing (QTE)	245°
<i>i</i> Location of the facility which made the above measurements	MS Ozljak

Particulars concerning the transmitting station interfered with:

<i>j</i> Name, call sign or other means of identification	(GE84 ID: 084006059, MIFR ID: 094004569)
	BRAC LOK
<i>k</i> Frequency assigned	102,7 MHz
<i>l</i> Frequency measured	102,7 MHz
Date:	
Time (UTC):	00:00-24:00
<i>m</i> Class of emission	F8E
<i>n</i> Bandwidth (indicate whether measured or estimated, or indicate the necessary bandwidth notified to the Radiocommunication Bureau)	250 kHz
<i>o</i> Location/position/area	Coverage are of BRAC LOK
<i>p</i> Location of the facility which made the above measurements	

Particulars furnished by the receiving station experiencing the interference:

<i>q</i> Name of station	KMP Ozljak (fixed)
<i>r</i> Location/position/area	Ozljak 016E1907 43N3450
<i>s</i> Dates and times (UTC) of occurrence of harmful interference	
<i>t</i> Bearings (QTE) or other particulars	145° (BRAC LOK) 245° ("RTL 102,5")
<i>u</i> Nature of interference	unacceptable reception
<i>v</i> Field strength or power flux-density of the wanted emission at the receiving station experiencing the interference	78,4 dB μ V/m
Date:	05.9.2024.
Time (UTC):	13:40
<i>w</i> Polarization of the receiving antenna or observed polarization	V
<i>x</i> Action requested	to stop this harmful interference

Slika 11. Prijava štetne smetnje

7. Zaključak

Metoda triangulacije predstavlja neizostavni alat za precizno određivanje lokacije izvora radijskih smetnji. Određivanje geografske pozicije radijskih, odnosno FM odašiljača, metodom triangulacije predstavlja temelj za učinkovito upravljanje radiofrekvencijskim spektrom. U sve složenijem elektromagnetskom okruženju, pri čemu se svakodnevno povećava broj uređaja koji se natječu za ograničeni radiofrekvencijski spektar, točnost i brzina lociranja izvora smetnji postaju ključne. Uklanjanje smetnji može se ostvariti različitim tehničkim mjerama, kao što su promjena frekvencije, smanjenje snage odašiljača ili usmjeravanje antena. Sve navedene mjere zahtijevaju blisku suradnju regulatornih tijela i operatora radiodifuznih usluga. Provedene mjere moraju biti u skladu sa preporukama Međunarodne telekomunikacijske unije te iste moraju posljedično djelovati na smanjenje smetnji i osigurati kvalitetu radio komunikacija za sve korisnike, a samim time i učinkovito korištenje ograničenog radiofrekvencijskog spektra. Provedena mjerenja metodom triangulacije, koristeći dvije mjerne postaje, nedvosmisleno su pokazala da je talijanski FM odašiljač smješten na koordinatama $42^{\circ}41'41''$ sjeverne geografske širine i $13^{\circ}37'19''$ zapadne geografske duljine uzrok istokanalnih smetnji na frekvenciji 102,7 MHz. Mjerenja su pokazala da je razina smetnji, kao i sama razina signala, povećana u dnevnim satima u razdoblju bez većeg broja padalina i s visokim temperaturama zraka, što ukazuje na mogući utjecaj ionosferske propagacije. Svi navedeni uvjeti uzrokovali su pojavu smetnji i štetnih emisija na hrvatskim radijskim programima. Dobiveni rezultati naglašavaju važnost kontinuiranog praćenja radijskog spektra, kako bi se na vrijeme otkrili i uklonili izvori smetnji. Buduća istraživanja trebala bi se usredotočiti na razvoj sofisticiranijih algoritama za obradu podataka kako bi se povećala točnost određivanja položaja odašiljača te je posebno važno graditi što bolje odnose s talijanskim regulatorom.

LITERATURA

- [1] Jelušić N. *Autorizirana predavanja* Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu 2023. Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2022-2023/course/view.php?id=140072> [Pristupljeno: svibanj 2024.]
- [2] Hrvatska enciklopedija: *Elektromagnetski valovi*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013.–2024. Preuzeto s: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektromagnetski-valovi> [Pristupljeno: svibanj 2024.]
- [3] Muštra M. *Radiovalovi i radiofrekvencijski spektar*, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2021-2022/> [Pristupljeno: svibanj 2024.]
- [4] Ziemer, R. E., Tranter, W.H., *Principles of Communications*, 7th edition, Wiley, 2014.
- [5] Carlson B.A., Crilly P.B. *Communication systems An itroduction to Signals and Noise in Electrical Communication*, 5th edition, McGraw-Hill Preuzeto s: https://research.iaun.ac.ir/pd/naghsh/pdfs/UploadFile_9495.pdf [Pristupljeno: lipanj 2024.]
- [6] Kezić D. *Osnove radiotehnike za pomorske nautičare*, Pomorski fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu, 2008. Preuzeto s: <https://qrz.com.hr/wp-content/uploads/2011/01/orpn.pdf> [Pristupljeno: lipanj 2024.]
- [7] Muštra M. *Modulacija signala, šum i propagacija*, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2021-2022/> [Pristupljeno: lipanj 2024.]
- [8] Hioki W.: *Telecommunications*, Prentice Hall, 1998.
- [9] Zavod za elektroakustiku, *AM modulacija i prijamnici*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Preuzeto s: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/V01-PRIZVU.pdf [Pristupljeno: lipanj 2024.]
- [10] Galešić M. *Amplitudna modulacija*, Veleučilište u Karlovcu, 2022., Preuzeto s: <urn:nbn:hr:128:105492> [Pristupljeno: srpanj 2024]
- [11] Toš Z. *Obrada signala i multipleksni sustavi*, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu 2023, Preuzeto s: <https://www.fpz.unizg.hr/ztos/PRSUS/Modulacija.pdf> [Pristupljeno: srpanj 2024.]
- [12] Akram M., Hayat Khiyaal S., Ahmad M., Aqeel Abbas S., *Decision Tree for Selection Appropriate Location Estimation Technique of GSM Cellular Network*, Superior University, Lahore, Pakistan Preuzeto s: <https://www.researchgate.net/publication/264128575>,
- [13] Prasad B. Devkota *Triangulation and trilateration*, Preuzeto s: <https://lecengineers.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/03/8-0-triangulation-and-trilateration-notes.pdf> [Pristupljeno: srpanj 2024.]
- [14] Pasković I. *Učinkovita kontrola radiofrekvencijskog spektra*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu.

- [15] ITU *Spectrum Monitoring*, ITU 2011 Preuzeto s: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-E.pdf [Pristupljeno: srpanj 2024]
- [16] Rode & Schwarz Spectrum Monitoring and Management System R&S ARGUS, Preuzeto s: <https://www.scribd.com/document/50422214/argus-en>
- [17] ITU *Direction Finding*, ITU academy Preuzeto s: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-E.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024]
- [18] ITU *Transmission standards for FM sound broadcasting at VHF*, ITU, Preuzeto s: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.450-4-201910-I!!PDF-E.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [19] Radio regulation *Article 15*, 2020, Preuzeto s: <https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/tpr/Documents/Article15-RR2020.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2024]
- [20] Radio regulation *Apendix 10*, 2020 Preuzeto s: <https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/tpr/Documents/Appendix10-RR2020.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2024]

POPIS KRATICA

AM (Amplitude modulation) modulacija amplitude

AM DSB (Amplitude modulation dual side band) AM signal s dva bočna pojasa

AM SSB (AM single sideband modulation) AM SSB prijenos

AM VSB (AM vestigial side band) AM signal s djelomično potisnutim jednim bočnim pojasom

AOA (Angle of arrival) tehnika mjerenja kuta dolaska

ASK (Amplitude shift keying) diskretna modulacija amplitude

DOA (Direction of arrival) tehnika mjerenja smjera dolaska

FM (Frequency modulation) modulacija frekvencije

FSK (Frequency shift keying) diskretna modulacija frekvencije

ICT (Information and communication system) informacijsko-komunikacijski sustavi

ITU (International telecommunication union) Međunarodna telekomunikacijska unija

LBS (Location based services) usluge temeljene na lokaciji

LOS (Line of sight) linija vidljivosti

PM (Phase modulation) modulacija faze

QAM (Quadrature amplitude modulation) kvadratura amplitudna modulacija

TODA (Time difference of arrival) razlika u vremenu dolaska

RSS (Received signal strength) tehnika mjerenja snage signala

POPIS SLIKA

Slika 1. Sastavnice elektromagnetskog vala, [3]	5
Slika 2. Prijenosni signal i modulirani signal ovisno o vrsti modulacije, [9].....	11
Slika 3. Postupak triangulacije.....	13
Slika 4. Mjerni prijamnik ESMD, [14]	16
Slika 5. Sustav za provođenje mjerenja, [17]	17
Slika 6. Metode mjerenja programa R&S Argus.....	20
Slika 7. Uvjeti mjerenja radijskog odašiljača hrvatskog nakladnika.....	22
Slika 8. Smjer zaprimanja najvećih signala s pojedine postaje.....	23
Slika 9. Identifikacija uzročnika istokanalne smetnje	24
Slika 10. Trokut koji čine mjerne postaje i nepoznati radijski odašiljač.....	26
Slika 11. Prijava štetne smetnje.....	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela elektromagnetski valova	6
Tablica 2. Podjela radiovalova	7

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ **diplomski rad** _____
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega 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 diplomskog rada pod naslovom Određivanje geografskih pozicija FM odašiljača metodom triangulacije, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student:

Matej Kovač



(ime i prezime, potpis)

U Zagrebu, 16. rujna 2024.