

Sveučilište u Zagrebu FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Ana Katalinić Mucalo

REFERENTNI DETERMINISTIČKI MODEL OBOSTRANO USMJERENOG RADIOKANALA

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Radovan Zentner

Zagreb, 2013.

Sadržaj

Sa	žetak		4
Ał	ostract		5
Κļ	jučne r	riječi	6
Ke	eyword	ds	7
U١	/od		1
1.	Obo	ostrano usmjereni radiokanal	
	1.1	Višestazna okolina	
	1.2	Mobilni radiokanal	11
	1.3	Impulsni odziv radiokanala	15
	1.3.	.1 Usmjereni radiokanal	15
	1.3.2	.2 Jakost električnog polja na prijamu	16
	1.4	Osnovne karakteristike MIMO sustava	17
	1.4.	.1 Kapacitet MIMO sustava	
	1.4.2	.2 Obostrano usmjereni radiokanal	24
	1.5	Sažetak poglavlja	
2.	Ref	ferentni modeli radiokanala	
	2.1	Klasifikacija modela radiokanala	
	2.2	3GPP SCM	
	2.3	WINNER	
	2.4	COST modeli	
	2.4.	.1 Klasteri i područja vidljivosti	
	2.4.2	.2 Model za više linkova (COST2100)	
	2.4.3	.3 Parametri	
	2.4.4	.4 Kanalni odziv	
	2.5	IEEE 802.11n standard	
	2.6	IEEE 802.16e / SUI	
	2.7	Sažetak poglavlja	
	2.7	Sažetak poglavlja	4

3.	Met	odologija	49		
3	.1	Metoda slijeđenja zrake	49		
3	.2	Simulator metodom slijeđenja zrake	51		
	3.2.1	Ulazni podaci	52		
	3.2.2	Određivanje vidljivosti zrake	53		
	3.2.3	Izlazni podaci	58		
3	.3	Računalna složenost	61		
3	.4	Sažetak poglavlja	63		
4.	Ana	liza dinamike promjene u višestaznoj okolini	64		
4	.1	Principi modeliranja kretanja u referentnom modelu radiokanala	64		
	4.1.1	Modeliranje kretanja virtualnog izvora	67		
	4.1.2	Modeliranje Dopplerovog efekta u slučaju difrakcije	68		
	4.1.3	Entitet zrake i područje vidljivosti	73		
4	.2	Analiza dinamike u radijskoj okolini pomoću 3D-RT simulatora	78		
	4.2.1	Testni scenarij 1	79		
	4.2.2	Testni scenarij 2	87		
4	.3	Ocjena parametara COST referentnih modela	93		
4	.4	Sažetak poglavlja	94		
5.	Dete	rministički referentni model radiokanala	96		
5	.1	Referentni model radiokanala – stohastički i deterministički pristup	96		
5	.2	Prednosti i izazovi determinističkog modela	99		
5	.3	Koncept rješenja determinističkog modela radiokanala	101		
	5.3.1	Format baze radiokanala	102		
	5.3.2	Postavke za generiranje determinističkog referentnog modela radiokanala	104		
	5.3.3	Izazovi i razvoj predloženog koncepta	109		
5	.4	Sažetak poglavlja	111		
Zak	ljučak	i budući rad	113		
Lite	eratura		115		
Živo	otopis		126		
Рор	Popis radova				
Bio	Biography				

List of Publications	60
----------------------	----

Sažetak

Referentni modeli radiokanala jedan su od ključnih elemenata za razvoj novih bežičnih sustava. Njihova je osnovna svrha dati uvid u svojstva radiokanala za neki specifični scenarij, kako bi se mogli koristiti kao platforma za ispitivanje, usporedbu i provjeru naprednih sustava koji koriste MIMO sučelje. Postojeći referentni modeli uglavnom su stohastički, definirani parametrima dobivenim statističkom obradom izmjerenih ili simuliranih podataka. Zbog svog stohastičkog karaktera, ovako dobiveni radiokanali mogu dati potpuno pogrešnu sliku stvarnog radiokanala u nekom scenariju.

Disertacija predlaže drugačiji pristup i definira koncept determinističkog referentnog modela radiokanala, koji se temelji na izvornim podacima. Format je osmišljen kao baza podataka pohranjenih radiokanala dobivenih rigoroznim trodimenzionalnim simulacijama metodom slijeđenja zrake, uz otvoreno sučelje preko kojeg bi se baza podataka mogla stalno nadograđivati novim radiokanalima dobivenim iz stvarnih terenskih mjerenja ili simulacija stvarnih fizičkih okolina metodom slijeđenja zrake. Kao podloga predloženom konceptu, napravljena je karakterizacija prostorne promjene radiokanala zbog kontinuirane promjene virtualnog izvora u slučaju difrakcije te definiran način modeliranja područja stacionarnosti u kojima su uvjeti u radiokanalu stalni. Osmišljeni koncept temelji se na novom parametru, entitetu zrake, kojim je omogućeno jednostavno praćenje zrake u mobilnom radiokanalu, uz značajno smanjenje računalne složenosti.

ABSTRACT

Reference Deterministic Model of Double Directional Radio Channel

Reference channel models are one of the key elements for the development of new wireless systems. Their main purpose is to give an insight into radio channel properties of a specific scenario, in order for the model to become a platform for testing, comparison and verification of advanced systems with MIMO air interface. Existing reference channel models are mainly stochastic, defined by parameters obtained from statistical processing of original measured or simulated data. Due to their stochastic nature, randomly generated radio channels might give a completely misleading representation of the specific scenario.

The thesis proposes a different approach and defines the concept of deterministic reference channel model based on the raw data, in a form of a large database of previously recorded real radio channels obtained from rigorous 3D ray-tracing simulations, with the possibility for upgrading the database with new measured and/or simulated radio channels through an open-source interface. As the background of the proposed concept, the thesis gives the spatial characterization of the dynamics of multipath due to the continuous virtual source movement in the case of diffraction and defines the stationary regions, where radio channel properties can be considered constant. The proposed concept is based on a new parameter, ray entity, which enables easy ray-tracing in a mobile radio channel, with a significant computational complexity reduction.

KLJUČNE RIJEČI

- referentni model radiokanala
- deterministički referentni model radiokanala
- obostrano usmjereni model radiokanala
- entitet zrake
- područje vidljivosti
- područje stacionarnosti
- metoda slijeđenja zrake
- interpolacija
- urbani scenarij
- difrakcija

Keywords

- Reference Channel Model
- Deterministic Reference Channel Model
- Double Directional Radio Channel
- Ray entity
- Visibility region
- Stationary region
- Ray-tracing
- Interpolation
- Urban scenario
- Diffraction

Popis slika

Slika 1.1 Propagacijski mehanizmi u radijskoj okolini	.4
Slika 1.2 Prikaz refleksije	. 5
Slika 1.3 Model oštrice noža. Visina h je pozitivna ako je iznad LOS linije, odnost	no
negativna ako je ispod	.6
Slika 1.4 Prikaz difrakcije oko ruba zgrade: trodimenzionalni prikaz difrakcije u prosto	ru
(lijevo); tlocrt difrakcije u točki Q _D u x-z ravnini (desno)	.7
Slika 1.5 Difuzno raspršenje	. 8
Slika 1.6 Primjer višestaznog širenja signala	10
Slika 1.7 Primjer Rayleigeve raspodjele polja u ovisnosti o udaljenosti	11
Slika 1.8 Dopplerov efekt	12
Slika1.9 Primjer spektralnog odziva mobilnog kanala	13
Slika 1.10 Autokorelacijska funkcija za radiokanal s Rayleighevim fedingom	13
Slika 1.11 Primjer impulsnog odziva kanala bogatog višestaznim komponentama	14
Slika 1.12 Shema MIMO sustava	17
Slika 1.13 MIMO kanal – prikaz primjene tehnike diverzitija	19
Slika 1.14 MIMO oblikovanje snopa	20
Slika 1.15 Prostorno multipleksiranje u MIMO kanalu	20
Slika 1.16 Distribuirani MIMO sustav	21
Slika 1.17 a) MIMO radijski kanal; b) obostrano usmjereni radijski kanal [49]	24
Slika 2.1 Klasifikacija referentnih modela za MIMO radiokanal	31
Slika 2.2 Područje vidljivosti (engl. Visibility Region)	36
Slika 2.3 Prikaz prijenosne funkcije za prijelaz kroz različite radijske okoline	37
Slika 2.4 Prijelazna funkcija kojom se definira prijelaz iz aktivnog u neaktivni klaster	r i
obrnuto	38
Slika 2.5 Vrste klastera u COST modelima: a) lokalni; b) jednostruki; c) višestruki	38
Slika 2.6 Raspodjela jednostrukih i višestrukih klastera	40
Slika 2.7 Koncept COST2100 modela	42

Slika	2.8 0	COST21	00 scenarij za	n modelira	nje sredine s	više linkova				3
Slika	2.9	Shema	povezivanja	područja	vidljivosti,	zajedničkih	klastera,	baznih	stanica	i
		linkova	۱					•••••	4	5

Slika 3.1	Prikaz identificiranih zraka i vrsta propagacije na digitalnoj mapi
Slika 3.2	Područja vidljivosti i pozicije virtualnog izvora za različite načine propagacije 54
Slika 3.3	Određivanje objekata koji su vidljivi i onih koji nisu
Slika 3.4	Stablo vidljivosti
Slika 3.5	Kellerov stožac za slučaj difrakcije
Slika 3.6	Projekcija difraktirane zrake u difrakcijsku ravninu
Slika 3.7	Praćenje difraktirane zrake unatrag57
Slika 3.8	Pojednostavljenje mape s obzirom na poziciju Tx i prijamnika Rx [83]61
Slika 3.9	Metode pojednostavljenja digitalnih karata: a) preoblikovanje zgrada koje imaju
	puno uglova; b) spajanje zgrada iste visine čiji je razmak malen
Slika 4.1	Pozicija virtualnog izvora u slučaju refleksije67
Slika 4.2	Pozicija virtualnog izvora u slučaju difrakcije klizi po rubu zgrade na kojem se
	difrakcija pojavila, zbog Kellerovog stošca
Slika 4.3	Dva međusobno ortognalna načina kretanja MS te njihov specifični utjecaj na
	pozicije ZTI i VTx
Slika 4.4	Geometrija postavljena za izvod Dopplerovog pomaka, bilo iz VTx ili iz ZTI.
	Deblje linije predstavljaju rubove zgrada i BS s antenama70
Slika 4.5	Jednostavan plan područja vidljivosti entiteta i pozicije VTx u slučaju refleksije 74
Slika 4.6	Jednostavan plan područja vidljivosti entiteta i pozicije VTx u slučaju difrakcije 74
Slika 4.7	Jednostavan plan područja vidljivosti entiteta i pozicije VTx za mješovite
	interakcije
Slika 4.8	Prikaz pozicije VTx u slučaju dvostrukih refleksija75
Slika 4.9	Prikaz pozicije VTx u slučaju dvostrukih refleksija76
Slika 4.10	Geometrijski uvjet pripadnosti istom entitetu, uz uvođenje područja stacionarnosti
	za difrakciju78
Slika 4.11	Digitalni modela Stockholma na kojem je postavljen odašiljač (Tx) i prijamna
	putanja A-B

Slika 4.12	Višestazna okolina u testnom scenariju 80
Slika 4.13	Prikaz dobivene snage po prijamnim lokacijama, za svaku propagacijsku metodu i
	ukupno. Crveni "skok" na grafu posljedica je čiste refleksije koja se pojavila na
	putanji
Slika 4.14	Prikaz snage na svakom prijamniku, prema propagacijskim mehanizmima82
Slika 4.15	Broj detektiranih entiteta specifične duljine za originalne podatke (za duljine
	entiteta <60m)
Slika 4.16	Broj detektiranih entiteta specifične duljine za filtrirane podatke nakon primjene
	granične vrijednosti
Slika 4.17	Pojednostavljeni tlocrt sa slike 39 s podacima za ogledni entitet duljine 82 m: 85
Slika 4.18	Krivulja snage duž dijela putanje u kojem je entitet prisutan. Ovakve se krivulje
lako mogu	aproksimirati polinomima
Slika 4.19	Broj zraka pridruženih svakom entitetu. U obzir su uzete sve zrake
Slika 4.20	Broj zraka pridruženih svakom entitetu, nakon primjene granične vrijednosti . 87
Slika 4.21	Analiza pojava unutar puta od 1m, za dvije različite rute – ravnu liniju duljine 1m
	(1) i rutu oko ugla duljine 2m (2)
Slika 4.22	Višestazna okolina na ruti 1
Slika 4.23	Raspodjela zraka prema duljinama entiteta
Slika 4.24	Prikaz dobivene snage po prijamnim lokacijama, za svaku propagacijsku metodu i
	ukupno
Slika 4.25	Višestazna okolina na ruti 291
Slika 4.26	Prikaz dobivene snage po prijamnim lokacijama, za svaku propagacijsku metodu i
	ukupno
Slika 4.27	Raspodjela zraka prema duljini entiteta92
Slika 4.28	Prikaz najduljeg entiteta – crvena zraka je izvor entiteta, a deblja plava crta
	označava rutu i krajnje točke entiteta
Slika 5.1	a) blok-shema procesa generiranja podataka koji će biti osnova za generiranje
	realizacija radiokanala; b) proces generiranja realizacija radiokanala
Slika 5.2	Shema procesa generiranja realizacija radiokanala u referentnom determinističkom
	modelu
Slika 5.3	Primjer odabranih lokacija baznih stanica (Tx) na mapi Helsinkija 108

Popis tablica

TABLICA I	PROPAGACIJSKI SCENARIJI U MODELU COST259
TABLICA II	EKSTERNI PARAMETRI COST MODELA
TABLICA III	POPIS PODATAKA ZA SVAKU ZRAKU DOBIVENU SIMULACIJAMA
TABLICA IV	USPOREDBA VREMENA SIMULACIJA SA I BEZ POJEDNOSTAVLJENJA MAPE 62
TABLICA V	UKUPAN BROJ ZRAKA DOBIVEN SIMULACIJAMA
TABLICA VI	UKUPAN BROJ ZRAKA DOBIVEN SIMULACIJAMA
TABLICA VII	BROJ I DULJINA IDENTIFICIRANIH ENTITETA ZA TESTNI SCENARIJ 2
TABLICA VIII	BROJ I DULJINE ENTITETA NA RUTI 2
TABLICA IX	PODACI O SVAKOJ ZRACI DOBIVENOJ SIMULACIJAMA
TABLICA X	USPOREDBA BROJA ENTITETA I BROJA ZRAKA NA TESTNOM SCENARIJU TE
	VELIČINE KOJE IH OPISUJU
TABLICA XI	USPOREDBA RAČUNALNE SLOŽENOSTI ZA KLASIČNU METODU SLIJEĐENJA ZRAKE
	I METODU INTERPOLACIJE ENTITETA ZRAKE
TABLICA XII	KLASIFIKACIJA RUTA PREMA KLASIFICIRANIM SCENARIJIMA – URBANA
	MIKROĆELIJA
TABLICA XIII	USPOREDBA DOBIVENIH ZRAKA NA A) TESTNOM SCENARIJU STOCKHOLMA; B)
	POJEDNOSTAVLJENOM SCENARIJU STOCKHOLMA107
TABLICA XIV	FORMAT ZAPISA PODATAKA O ENTITETU ZRAKE

Popis kratica

3rd Generation Partnership Project
Angle of Arrival
Angle of Departure
Bazna stanica
European Cooperation in Science and
Technology
Direction of Arrival
Direction of Departure
Deterministički referentni model radiokanala
Elektromagnetski
Entitet zrake
Geometry-based Stochastic Channel Model
Line of Sight
Multiple Input Multiple Output
Multiple Input Single Output
Mobilna stanica
Over the Rooftop
Power Delay Profile
Područje vidljivosti
Reference Channel Model
Ray Tracing
Receiver
Single Input Multiple Output
Single Input Single Output
Stohastički referentni model radiokanala
Stanford University Interim
Transmitter
Virtual Tx

Uvod

Razvoj referentnog modela koji bi opisivao realistične propagacijske uvjete u radiokanalu što točnije, predstavlja stalni izazov u znanstvenoj (i industrijskoj) zajednici širom svijeta. Danas je u središtu interesa razvoj modela koji bi dobro opisivao stvarna svojstva MIMO radiokanala. Iako su istraživanja na području MIMO sustava intenzivna već 20 godina, u području modeliranja radiokanala i dalje postoji niz otvorenih pitanja i izazova, uglavnom povezanih s procesom parametrizacije.

Parametrizacija, ili proces definiranja parametara, temelji se na "izvlačenju" pravila ili referentne vrijednosti nekog parametra na osnovu velikog broja podataka dobivenih mjerenjima ili nekom vrstom simulacija. No, prihvatljiv model mora zadovoljavati nekoliko kriterija, a među osnovnima su, osim realističnosti, jednostavna implementacija i niska računalna složenost (time i cijena). Da bi postigli kompromis između oprečnih kriterija, većina postojećih modela primjenjuje niz pojednostavljenja u svojim postavkama. Time se minimizira broj parametara u modelu, a parametri se opisuju statističkim razdiobama niske računalne složenosti, čime se osigurava jednostavna implementacija modela.

No, u kontekstu trenutnog razvoja tehnologije, kao i njezine perspektive u budućnosti, treba sagledati neke druge koncepte. Bežične tehnologije posljednjih desetak godina doživljavaju svoje zlatno doba, a za očekivati je da će se takav trend i nastaviti. Neprestan rast korisnika i njihovih zahtjeva otvara vrata daljnjem razvoju tehnologije, kako bi se novi sustavi i mreže mogli akomodirati, a korisnici uslužiti, osiguravajući pri tome visoku propusnost i robusnost same mreže. U tom smislu, referentni modeli radiokanala, koji su osnova za testiranje bilo kojeg novog sustava, moraju biti detaljni, realistični, inovativni i prilagodljivi s obzirom na unesene postavke. Model radiokanala u budućnosti zahtijevat će poznavanje velikog broja parametara i adekvatno manipuliranje njima. Današnja računala imaju kapacitete za implementaciju takvih modela s prihvatljivom složenošću i realnim vremenom izvođenja pa u tome leži potencijal za razvoj novog koncepta – determinističkog referentnog modela radiokanala, koji je predstavljen u sklopu ove doktorske disertacije.

Rad je, uz uvodno, organiziran u pet glavnih poglavlja. Poglavlja 1 i 2 sažimaju istraživačko područje i daju pregled postojeće literature. Prvo poglavlje donosi osnovne

pojmove vezane za svojstva elektromagnetskog vala, načine propagacije te definiciju kanalnog odziva obostrano usmjerenog kanala, koji je temelj za modeliranje MIMO radiokanala. Osim toga, u poglavlju je dan sažetak osnovnih odlika MIMO sustava, s najvažnijim prednostima i izazovima koje donosi. U drugom poglavlju dan je pregled postojećih referentnih modela radiokanala, njihovih osnovnih svojstava te najvažnijih parametara. Posebno detaljno su obrađeni COST modeli, čija je parametrizacija bila ishodište ovog istraživanja. Osim toga, većina rezultata prezentiranih u ovom radu prezentirana je upravo u sklopu sastanaka COST projekata 2100 i IC1004.

Treće poglavlje opisuje metodologiju kojom je provedeno istraživanje, dok četvrto i peto poglavlje donose rezultate i znanstveni doprinos ove disertacije. U četvrtom poglavlju provedena je analiza parametara COST modela, kao nadopuna parametrizaciji COST273 i COST2100 modela, te kao podloga za analizu prostornih promjena višestazne okoline. Posebno su istražena područja vidljivosti, koja su ključan parametar za implementaciju mobilnosti u model. Uvedeni su i definirani pojmovi *entitet zrake*, kao skup zraka koje imaju isto polazište i prolaze na putu do prijamnika kroz iste interakcije istim redoslijedom, te *područja stacionarnosti*, kao područja u kojima sve zrake dolaze s fiksnog virtualnog izvora. Pomoću ovih parametara istražen je životni vijek same zrake, odnosno duljina entiteta, kao parametar za implementaciju mobilnosti u determinističke referentne modele. Također, u poglavlju je analizirana i prostorna geometrija u slučaju difrakcije, koja je dominantan način propagacije u urbanim scenarijima. Istražena je pozicija i kretanje virtualnog izvora u slučaju difrakcije te utjecaj Dopplerovog efekta u ovisnosti o kretanju mobilne stanice.

U posljednjem, petom, poglavlju opisan je novi koncept za referentni model radiokanala – deterministički referentni model radiokanala. Predloženo rješenje sastoji se od baze poznatih obostrano usmjerenih radiokanala, dobivenih rigoroznim trodimenzionalnim simulacijama metodom slijeđenja zrake. Predložen je format same baze te rješenje za implementaciju mobilnosti, na osnovu novih parametara definiranih u poglavlju 4. Sve analize napravljene su na temelju rezultata simulacija metodom slijeđenja zrake. U tu svrhu korišten je alat razvijen na Sveučilištu u Bologni, a dobiven na korištenje u akademske svrhe od prof. V. Degli Esposti.

Poglavlje 1

OBOSTRANO USMJERENI RADIOKANAL

MIMO sustavi danas su standard na kojem se temelji razvoj novih bežičnih tehnologija. Ono što čini puni potencijal MIMO sustava jest činjenica da pružaju više različitih mogućnosti prijenosa u istom radiokanalu, čime se smanjuje vjerojatnost fedinga i gubitka signala, a povećava cjelokupni ostvarivi kapacitet. Za opis svojstava MIMO radiokanala potrebno je poznavati niz parametara koji omogućuju raspoznavanje različitih zraka koje su pristigle na prijamnik, kako bi se postojeći resursi u radiokanalu mogli optimalno koristiti. MIMO se opisuje pomoću tzv. obostrano usmjerenog radiokanala, koji sadrži podatke o odlaznim i dolaznim parametrima te geometrijskim relacijama među njima. Da bi model radiokanala bio što točniji, treba imati uvid u propagacijske uvjete u samom radiokanalu. U ovom poglavlju dan je pregled osnovnih pojmova vezanih za propagaciju elektromagnetskog vala te opisane pojave uzrokovane svojstvima višestazne okoline u kojoj se radiokanal nalazi i pojave uzrokovane kretanjem mobilne stanice kroz radiokanal. Opisane su i osnovne karakteristike MIMO sustava te definiran i pojašnjen koncept obostrano usmjerenog radijskog kanala, na temelju kojeg se modelira MIMO radiokanal.

1.1 Višestazna okolina

Nositelj informacije u bežičnim komunikacijama je elektromagnetski (EM) val, koji se širi kroz medij od odašiljača (Tx) do prijamnika (Rx) [1]-[3]. Tipični načini rasprostiranja elektromagnetskog vala kroz medij u zemaljskim komunikacijama, putem izravne zrake, refleksijom, difrakcijom i raspršenjem, prikazani su na slici 1.1.



Slika 1.1 Propagacijski mehanizmi u radijskoj okolini

Ukoliko na putu od prijamnika do odašiljača ne postoji prepreka, odnosno postoji optička vidljivost, val se širi pute **izravne zrake** (engl. *Line of Sight – LOS*). Širenje elektromagnetskog vala u dalekoj zoni zračenja i uz pretpostavku ravnog vala, opisuje se Friisovom [2] formulom za slobodni prostor:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \tag{1.1}$$

gdje je P_t odašiljačka snaga, P_r snaga na prijamu, G_t i G_r dobici odašiljačke, odnosno prijamne, antene, λ valna duljuna, a *d* udaljenost između odašiljača i prijamnika.

Refleksija je pojava do koje dolazi kada se elektromagnetski val odbije o objekte čija je dimenzija velika, a hrapavost mala u odnosu na valnu duljinu signala (npr. tlo, zidovi, zgrade itd.). Prilikom sudara s objektom, val se može potpuno ili samo djelomično odbiti, ovisno o svojstvima medija, polarizaciji, kutu upada i frekvenciji. Refleksija je prisutna u svim radijskim okolinama, ali je osobito značajna u onima u kojima postoji neki istaknuti objekt (npr. izrazito visoka zgrada, silos ili tvornički dimnjak i sl.) ili ploha većih dimenzija (npr. morska površina ili livada), gdje takva reflektirana zraka sadrži veliki udio ukupne snage signala.

Polje nastalo refleksijom može se izračunati iz relacija prema slici 1.2, kao:

$$\vec{E}_{r}(s) = \vec{E}(Q_{R}) \cdot \mathbf{R}(Q_{R}, \theta_{i}) \cdot \sqrt{\frac{\rho_{1} \cdot \rho_{2}}{(\rho_{1} + s) \cdot (\rho_{2} + s)}} \cdot e^{-j\beta s}$$
(1.2)

gdje je $\vec{E}(Q_R)$ polje u nekoj referentnoj točki, $\mathbf{R}(Q_R, \theta_i)$ koeficijent refleksije [4], $\sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{(\rho_1 + s) \cdot (\rho_2 + s)}}$ faktor gušenja prostora, a $e^{-j\beta s}$ fazni faktor.



Slika 1.2 Prikaz refleksije

U matričnom obliku, jednadžba (1.2) poprima oblik:

$$\vec{E}_{r}(s) = \vec{E}_{r}^{TE}(s) + \vec{E}_{r}^{TM}(s) = \begin{bmatrix} \Gamma_{TE} & 0\\ 0 & \Gamma_{TM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_{i}^{TE}(Q_{R})\\ \vec{E}_{i}^{TM}(Q_{R}) \end{bmatrix} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{1}^{r} \cdot \rho_{2}^{r}}{(\rho_{1}^{r} + s) \cdot (\rho_{2}^{r} + s)}} \cdot e^{-j\beta s}$$
(1.3)

gdje su ρ_1^r i ρ_2^r mini radijusi krivulje koja opisuje reflektirano polje (za generički val). Za ravnu površinu (npr. površina zida) i sferni incidentni val, vrijedi $\rho_1^r = \rho_2^r = s'$ pa slijedi:

$$\vec{E}_{r}(s) = \begin{bmatrix} \Gamma_{TE} & 0\\ 0 & \Gamma_{TM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_{TE}^{0}\\ \vec{E}_{TE}^{0} \end{bmatrix} \cdot \frac{e^{-j\beta s'}}{s'} \sqrt{\frac{(s')^{2}}{(s+s')^{2}}} \cdot e^{-j\beta s} = \vec{E}_{0} \cdot \mathbf{R} \cdot \frac{e^{-j\beta(s+s')}}{s+s'}$$
(1.4)

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_i}}$$
(1.5)

$$\Gamma_{TM} = \frac{\cos\theta_i - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot \sin^2\theta_i}}$$
(1.6)

pri čemu su Γ_{TE} i Γ_{TM} koeficijenti refleksije u smjeru električnog i magnetnog polja (tj. paralelno i okomito na smjer električnog polja). θ_i je kut upada incidentnog vala, a n_1 i n_2 indeksi loma sredine kroz koju val prolazi.

Ogib ili difrakcija nastaje kada se val sudari s preprekom čija površina ima oštre rubove, a val koji nastaje na površini prepreke nastavlja se širiti u prostor, čak i onda kada između odašiljača i prijamnika ne postoji izravna optička vidljivost. Fenomen difrakcije, ne samo za radiovalove, objašnjava se Huygensovim načelom koje kaže da je svaka točka fronte vala zapravo izvor novog vala. U radiokomunikacijama difrakcija se najčešće opisuje modelom oštrice noža (slika 1.3).



Slika 1.3 Model oštrice noža. Visina h je pozitivna ako je iznad LOS linije, odnosno negativna ako je ispod

Prigušenje signala određeno je koeficijentom difrakcije, koji ovisi o geometriji objekata, amplitudi, fazi i polarizaciji vala u točki ogiba. Uzimajući u obzir veličine definirane na slici 1.3, koeficijent difrakcije može se izraziti pomoću:

$$\nu = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$
(1.7)

Difrakcija je dominantan način propagacije u urbanim sredinama (slika 1.4) gdje postoji niz prirodnih i umjetnih prepreka. Difrakcija se u urbanim sredinama pojavljuje u dva tipična oblika: difrakcija oko bočnih rubova zgrada i difrakcija preko krovova zgrada (engl. *over-the-roof-top*, ORT). Potonji tip pojavljuje se u scenarijima u kojima postoji istaknuti objekt, s kojega se reflektirana zraka preko krovova može praktički "spustiti" do prijamnika (pretpostavlja se da je prijamnik mobilna stanica kod pješaka ili u automobilu). Oba tipa difrakcije sadrže znatan udio ukupne energije signala koji dolazi na prijamnik.



Slika 1.4 Prikaz difrakcije oko ruba zgrade: trodimenzionalni prikaz difrakcije u prostoru (lijevo); tlocrt difrakcije u točki **Q**_D u x-z ravnini (desno)

Za difrakciju slijede, prema slici 1.4, sljedeći izrazi:

$$\begin{bmatrix} E_{\beta_0}^d \\ E_{\phi}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\beta'_0}^i(Q_D) \\ E_{\phi'}^i(Q_D) \end{bmatrix} \cdot A(s, \rho^d) \cdot e^{-j\beta s}$$
(1.8)

gdje je $A(s, \rho^d)$ faktor raspršenja za difraktirano polje:

$$A(s,\rho^d) = \sqrt{\frac{\rho^d}{s \cdot (\rho^d + s)}}$$
(1.9)

pri čemu ρ^d ovisi o funkciji ruba zgrade i incidentnog vala te kutu upada.

Za ravne rubove i sferni incidentni val faktor difrakcije postaje:

$$\rho^{d} = s' \Rightarrow A(s, s') = \sqrt{\frac{s'}{s \cdot (s' + s)}}$$
(1.10)

a polje u točki difrakcije iznosi:

$$\vec{E}(Q_D) = \vec{E}^0 \frac{e^{-j\beta s'}}{s'}$$
(1.11)

Konačno, električno polje dobiveno difrakcijom može se izraziti kao:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{\beta_0}^d \\ \vec{E}_{\phi}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{\beta_{\prime_0}}^0 \\ \vec{E}_{\phi_{\prime}}^0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{s \cdot s' \cdot (s' + s)}} \cdot e^{-j\beta(s+s')}$$
(1.12)

Raspršenje je pojava koja nastaje u radiokanalu u kojem postoji veliki broj prepreka, čija je veličina u odnosu na valnu duljinu malena ili istog reda veličine. Raspršeni valovi nastaju na grubim površinama, sitnim objektima i drugim nepravilnostima u kanalu (npr. prometni znakovi, rasvjetni stupovi, stepeništa u zgradama itd.). Iako se na prvi pogled čini kako je utjecaj raspršenja na ukupni signal malen ili čak zanemariv, posljednja su istraživanja [5]-[11] pokazala da energija raspršenog vala može biti vrlo značajna, osobito ako je točka raspršenja u blizini bazne (BS) ili mobilne (MS) stanice [5].

U širokopojasnim razmatranjima sve izobličene komponente signala s dugim vremenom kašnjenja, koje se često ne mogu klasificirati ni kao refleksija ni kao difrakcija, a nastaju kao odbijanja ili disperzije zrake o grube i nepravilne površine (fasade, ukrasni zidni elementi, cijevi, kablovi, nepravilne zgrade itd.), nazivaju se *difuznim raspršenjem* (slika 1.5).



Slika 1.5 Difuzno raspršenje

Ako se promatra jedan infinitezimalno mali element površine *dS* koji je dio zida (slika 1.5) i uzmu u obzir samo komponente iz daleke zone zračenja vala koji je raspršen na površini *dS*, pretpostavlja se Lambertovog difuzno raspršenje: raspršeni val je nekoherentan, neuniforman sferni val čija je amplituda E_S izražena kao $E_S = E_{SO}\sqrt{cos(\theta_S)}$. Prema slici 1.5, upadni val širine $\Delta\Omega$ dolazi na promatrani element površine, nakon čega se dio snage reflektira u smjeru točke D, također val širine $\Delta\Omega$, dio snage se odašilje dalje, dok se dio raspršuje u gornji poluprostor. S obzirom da je širina raspršene zrake 2π , za raspršenje vrijedi drugačiji zakon opadanja snage s udaljenošću. Ako se snaga koja se nalazi u zraci definira kao umnožak gustoće snage i presjeka zrake, vrijedi:

$$E_{S}^{2} = K_{0}^{2} S^{2} \frac{dS \cos\theta_{i} \cos\theta_{s}}{\pi} \frac{1}{r_{i}^{2} r_{s}^{2}}$$
(1.13)

gdje je E_s je amplituda raspršenog polja, a K_0 koeficijent definiran dobitkom odašiljačke antene G_t i odašiljačkom snagom P_t :

$$K_0 = \sqrt{60G_t P_t} \tag{1.14}$$

Za difuzno raspršenje, raspršeno se polje računa kao funkcija upadnog vala, s nekim koeficijentom raspršenja. S obzirom da difuzno polje opada s umnoškom udaljenosti radijskog terminala od raspršivača, difuzno raspršenje igra važnu ulogu samo ako se pojavi u blizini početka ili kraja interakcijske sekvence.

Izračun ukupnog polja u točki prijama Rx, kao funkcije polja na referentnoj udaljenosti od 1m od Tx (u smjeru *i*-te zrake), $E_i(Tx)$, može se sumirati sljedećom formulom [12]:

$$\mathbf{E}(Rx) = \sum_{i=0}^{Nr} Ei(Rx) = \sum_{i=0}^{Nr} \left\{ \prod_{j=0}^{Nev} \left[F^{\chi(i,j)} \mathbf{A}^{\chi(i,j)} P(i,j) \right] \mathbf{E}_i(T_x) \right\}$$
(1.15)

gdje je N_r broj zraka, N_{ev} maksimalni broj uzastopnih interakcija, χ predstavlja tip interakcije (refleksija, difrakcija, raspršenje), P(i, j) je prostorna točka u kojoj se dogodila *j*-ta interakcija, a sadrži koeficijente gušenja za refleksiju, difrakciju, raspršenje itd., $F^{\chi(i,j)}$ je divergentni faktor interakcije $\chi(i, j)$. S obzirom da nemaju sve zrake maksimalni broj interakcija, pretpostavlja se da neki parovi (i, j) imaju divergentni faktor 0.

Budući da se difuzno raspršenje mora smatrati nekoherentnim, sve se zrake zbrajaju po snazi ili se svim zrakama koje "dožive" barem jedno raspršenje (nekoherentne zrake) dodjeljuje slučajna faza i slučajna polarizacija.

Različiti načini propagacije vala stvaraju tzv. **višestaznu okolinu** (engl. *multipath environment*) [13], [14] . Signal se kroz radijski kanal širi na različite načine, a na prijamnik dolazi zbroj svih komponenti signala ili zraka koje su do prijamnika došle izravno ili nekom interakcijom s objektima u radijskoj okolini (slika 1.6). Kao rezultat toga, a ovisno o tome jesu li komponente signala međusobno u fazi ili ne, ukupni signal na prijamu može biti pojačan (ako se sve višestazne komponente zbroje, odnosno dođe do konstruktivne interferencije), ali i značajno degradiran ukoliko se zrake međusobno ponište (destruktivna interferencija). To predstavlja jedan od najvećih problema u projektiranju komunikacijskih sustava.



Slika 1.6 Primjer višestaznog širenja signala

Kao posljedica višestaznog širenja vala, dolazi do kašnjenja pojedinih komponenti i disperzije odaslanog signala te kolebanja u razini signala, odnosno **fedinga** (engl. *fading*) [15]-[17]. Feding može izazvati vrlo brze, praktički nepredvidive, promjene ili propade, što

otežava planiranje i izvođenje klasičnog komunikacijskog sustava pa se, u najvećem broju slučajeva, kod planiranja Tx-Rx veze uzima određena zalihost, kojom se propadi signala izazvani fedingom kompenziraju.



Slika 1.7 Primjer Rayleigeve raspodjele polja u ovisnosti o udaljenosti

Svojstva višestazne okoline, zbog svoje složenosti i nepredvidivosti, opisuju se stohastičkim razdiobama, najčešće pomoću Rayleigheve razdiobe [18] ilustrirane na slici 1.7 i opisane izrazom:

$$P(A_{pq}) = \frac{A_{pq}}{\Omega} e^{\frac{-A^2}{2\Omega}}, \quad A_{pq} > 0$$
(1.16)

pri čemu je A_{pq} amplituda signala između odašiljača p i prijamnika q.

1.2 Mobilni radiokanal

Svojstva radijskog kanala postaju još složenija ako se MS (i/ili BS) kreće, što je slučaj u mobilnom radiokanalu. U slučaju kretanja MS, brzina promjene signala odrazit će se i na spektar signala, uz neizbježan Dopplerov efekt [1], [19]. Zbog relativnog kretanja MS i BS,

prijamnik neće primiti točnu frekvenciju izvora već će ona biti promijenjena za Dopplerov frekvencijski pomak f_m : ako se prijamnik približava izvoru, prijamnik će primiti frekvenciju izvora uvećanu za f_m ; ako se udaljava od izvora, na prijamu će biti frekvencija izvora umanjena za f_m .



Slika 1.8 Dopplerov efekt

Dopplerov frekvencijski pomak, f_m , prema slici 1.8, definiran je formulom:

$$f_m = f_c \frac{v}{c} \tag{1.17}$$

gdje je f_c frekvencija nositelja signala, v brzina kretanja objekta, a c brzina svjetlosti. Općenitija definicija, ako se uzme u obzir da zrake mogu doći na objekt pod različitim upadnim kutovima, dana je izrazom:

$$f_{\mathbf{m}} = f_c \frac{v}{c} \cos\theta \tag{1.18}$$

Kao posljedica Dopplerovog pomaka više komponenti signala u mobilnom radiokanalu dolazi do proširenja spektra (engl. *Doppler (frequency) spread spectrum*). Na prijamniku se, osim same frekvencije za svaki smjer dolaska, pojavljuju i dvije dodatne komponente, koje su posljedice Dopplerovog efekta: komponente $f_c + f_m$ i $f_c - f_m$ (slika 1.9).



Slika 1.9 Primjer spektralnog odziva mobilnog kanala

Dopplerov efekt može se promatrati i u vremenskoj domeni preko autokorelacijske funkcije i vremena koherencije [1]. *Autokorelacijska funkcija*, $\rho(\tau)$, predstavlja odraz Dopplerovog efekta u vremenskoj domeni. Kod slučajnih procesa, autokorelacijska funkcija je inverzna Fourierova transformacija spektralne gustoće snage, a prikazuje korelaciju između signala u nekom zadanom vremenu i vrijednosti tog signala nakon nekog vremena kašnjenja τ . Za Rayleighev model koji najbolje opisuje realni radiokanal, autokorelacijska funkcija (slika 1.10) dana je jednadžbom:

$$\rho(t) = J_0(2\pi f_m t) \tag{1.19}$$

gdje je J_0 Besselova funkcija prve vrste, nultog reda, a f_m Dopplerov pomak.



Slika 1.10 Autokorelacijska funkcija za radiokanal s Rayleighevim fedingom

Vrijeme koherencije T_c je vrijeme za koje se kanal može smatrati konstantnim (autokorelacijska funkcija je blizu jedinice). To znači da, ako je signal koji prolazi kroz kanal kraći od vremena koherencije, na njega neće djelovati Dopplerov efekt i kanal će imati konstantnu prijenosnu funkciju. Vrijeme koherencije obrnuto je proporcionalno Dopplerovom pomaku f_m , a za klasični spektar, dobro se aproksimira s faktorom $(9/16)\pi$. U vremenskoj domeni, dolazi do tzv. rasipanja kašnjenja (engl. *delay spread*) pa će impulsni odziv kanala u ovisnosti o vremenu izgledati kao na slici 1.11.



Slika 1.11 Primjer impulsnog odziva kanala bogatog višestaznim komponentama

U frekvencijskoj domeni, uz rasipanje kašnjenja vežu se moment drugog reda i koherencijski frekvencijski pojas [1]. Koherencijski frekvencijski pojas definiran je kao maksimalni razmak između dviju frekvencije čije su amplitude još uvijek dovoljno korelirane i podložne istom fedingu. Moment drugog reda, τ_{RMS} , je veličina koja uzima u obzir relativnu snagu komponenti signala i njihovog kašnjenja, a definiran je kao:

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^{n} P_i \tau_i^2 - \tau_0^2}$$
(1.20)

gdje je P_T ukupna snaga signala, P_i snaga *i*-te komponente, τ_i kašnjenje *i*-te komponente, a τ_0 ukupno srednje kašnjenje. Ako se promatra korelacija među dvama signalima jednakog kašnjenja, $\Delta t = 0$, tada je frekvencijski razmak Δf za koji je korelacija $\rho = 0.5$ zapravo koherencijski frekvencijski pojas, B_c :

$$B_C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau_{RMS}} \tag{1.21}$$

1.3 Impulsni odziv radiokanala

1.3.1 Usmjereni radiokanal

Za svaku prijamnu točku u trodimenzionalnoj okolini možemo reći da je radiokanal do nje zapravo linearni filtar s impulsnim odzivom h(t). Na prijamnik dolaze zrake različitih amplituda i iz različitih smjerova, s različitim fazama i vremenima kašnjenja, a kanalni odziv za odaslani signal $\delta(t)$ može se pisati kao [20]:

$$h(t) = \sum_{n=1}^{N} A_n \delta(t - \tau_n) e^{-j\varphi_n}$$
(1.22)

Dakle, kanalni odziv čini ukupno N impulsa ili zraka različitog vremena kašnjenja, od kojih je svaki neka verzija originalnog signala, s određenim gušenjem A_n , vremenom kašnjenja τ i pomakom u fazi φ_n .

U širokopojasnim razmatranjima svojstva mobilnog kanala u uvjetima višestazne propagacije često se promatraju preko tzv. PDP profila kanala (engl. *Power Delay Profile*, PDP) [1], odnosno dijagrama snaga-kašnjenje koji daje indikaciju raspodjele odaslane snage različitim stazama. Izračunava se kao prosječna vrijednost $|h(t)|^2$ na nekom području.

Glavni parametri PDP-a su srednje vrijeme kašnjenja signala $\tau_0 = \frac{1}{P_t} \sum_{i=1}^n P_i \tau_i$, ukupna snaga signala $P_t = \sum P_i$ i ranije definirani moment drugog reda $\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^n P_i \tau_i^2 - \tau_0^2}$. P_i je snaga, a τ_i kašnjenje pojedine komponente signala.

Moment drugog reda određen je relativnim snagama i kašnjenjima pojedinih komponenti signala pa je puno bolji pokazatelj kvalitete od ukupne snage ili apsolutnog kašnjenja. Služi kao dobro mjerilo za usporedbu, klasifikaciju i standardizaciju.

Iz PDP-a se mogu izvesti mnogi parametri višestaznog kanala. PDP se dobiva mjerenjem pomoću kanalnih ispitivača (engl. *channel sounder*) ili iz rigoroznih simulacija, a prikazuju se kao prijamna snaga u funkciji dodatnog kašnjenja između vremena odašiljanja i vremena prijama zbog konačne brzine propagacije elektromagnetskog vala, ali i dodatnog kašnjenja koje može unijeti i sam medij. U mobilnom kanalu, u kojemu su promjene svojstava višestazne okoline konstantne, PDP se može izraziti kao funkcija gustoće snage:

$$P(\tau) = \frac{|h(t)|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt}$$
(1.23)

1.3.2 Jakost električnog polja na prijamu

Ako se zanemari utjecaj raspršenja, ukupni signal na prijamu može se izraziti kao [21]:

$$\overrightarrow{E_R} = \sum_i \overrightarrow{E_i}$$
(1.24)

gdje je E_i snaga polja *i*-te komponente (zrake) izražena kao:

$$E_{i} = E_{0}\delta_{T,i}\delta_{R,i}L_{i}(d)\prod_{j}\Gamma(\phi_{ji})\prod_{p}T(\phi_{pi})e^{-jkd}$$
(1.25)

 E_0 je amplituda referentnog incidentnog vala u V/m, $\delta_{T,i}$ i $\delta_{R,i}$ su dijagrami zračenja antenskog sustava u željenom smjeru za *i*-tu komponentu, $L_i(d)$ predstavlja slabljenje zbog rasprostiranja *i*-te komponente, $\Gamma(\phi_{ji})$ je koeficijent refleksije za *j*-tu refleksiju *i*-te višestazne komponente, $T(\phi_{pi})$ je koeficijent *p*-te transmisije *i*-te komponente, e^{-jkd} je faza vala, u ovisnosti o duljini staze ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$, gdje je λ valna duljina) a *d* je duljina staze u metrima.

Za izračun polja dobivenog raspršenjem, svakom zidu dodjeljuje se koeficijent raspršenja *S* i faktor reflektivnih gubitaka *R*. Raspršni koeficijent *S* sličan je koeficijentima za difrakciju i refleksiju, a definiran je kao:

$$S = \frac{E_s(P)}{E_i(P)}$$
(1.26)

gdje je E_s amplituda raspršenog polja, E_i amplituda incidentnog polja, a P točka u kojoj se dogodilo raspršenje. Faktor reflektivnih gubitaka *R* uključuje gubitak snage reflektiranog vala i poznat je iz teorije o raspršenju [22]: ako je Γ Fresnelov refleksijski koeficijent o glatku površinu, (ΓR) je stvarni koeficijent dobiven refleksijom o grubu površinu, s vrijednošću 0 < R < 1.

Utjecaj raspršenja na ukupni PDP može se izraziti analitičkom formulom:

$$E_{S}^{2} = K_{0}^{2} S^{2} \frac{Hx'(t)}{\pi} \frac{y_{i} y_{s}}{\left[(x(t) + x_{s} \gamma)^{2} + y_{i}^{2}\right]^{3} / 2 \left[(x_{s} - x(t))^{2} + y_{s}^{2}\right]^{3} / 2}$$
(1.27)

izvedenom iz slike 1.5, prema [5]. E_S je amplituda raspršenog polja, a K_0 koeficijent definiran dobitkom odašiljačke antene G_t i odašiljačkom snagom P_t :

$$K_0 = \sqrt{60G_t P_t}$$

H je visina zida, a iz slike proizlazi da je $\gamma = \frac{y_i}{y_s}$.

1.4 Osnovne karakteristike MIMO sustava



Slika 1.12 Shema MIMO sustava

MIMO (engl. *Multiple Input Multiple Output*) [23]-[27] sustav je danas standard na kojem se temelji razvoj bežičnih sustava budućih generacija. Za razliku od konvencionalnih ili SISO (engl. *Single Input Single Output*) sustava koji koriste jednu antenu na svakom kraju radiokanala, MIMO sustavi za odašiljanje i prijam signala koriste više antenskih elemenata, odnosno antenske nizove (slika1.12).

MIMO sustavi mogu se opisati jednadžbom:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{v} \tag{1.28}$$

pri čemu je $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{n,1} & \dots & h_{n,n} \end{bmatrix}$ prijenosna matrica sustava, \mathbf{r} transponirani vektor

prijamnog signala, $\mathbf{r} = [r^1 r^2 ... r^n]^T$, s transponirani vektor odaslanog signala, $\mathbf{s} = [s^1 s^2 ... s^n]^T$, a v predstavlja aditivni Gaussov bijeli šum koji se dodaje prenesenom signalu.

Ovakav koncept omogućuje veliki broj mogućih načina prijenosa, a time i bolju iskoristivost radijskog kanala, uz otpornost sustava na feding. Najveći doprinos MIMO sustava leži u činjenici da višestazna okolina za MIMO predstavlja potencijal, a ne smetnju. Naime, višestaznu okolinu čine zrake ili potkanali koji različitim načinima propagacije kroz isti radiokanal nose originalno odaslanu informaciju ili njezin dio. Antenski elementi omogućavaju raspoznavanje različitih potkanala, a time i prijenos informacije na različite načine, kroz isti radiokanal. Na ovaj način, koristeći adaptivne antene, moguće je eksploatirati fizička svojstva višestazne okoline te optimizirati prijenos, kako bi se ostvarili veći kapaciteti, bolja spektralna učinkovitost i veća pouzdanost sustava.

MIMO sustav se može promatrati i kao općeniti prikaz bilo kojeg komunikacijskog sustava s NxM antena na odašiljaču i prijamniku. U slučaju da je N = M = 1, riječ je o klasičnom Tx-Rx sustavu (SISO), a u slučaju Nx1 ili Mx1, govorimo o međusobno recipročnim MISO (engl. *Multiple Input Single Output*) i SIMO (engl. *Single Input Multiple Output*) sustavima.

U tradicionalnom smislu MIMO sustav se može primijeniti na tri načina: kroz tehnike diverzitija, kroz prostorno multipleksiranje ili kroz oblikovanja snopa (engl. *beamforming*).

(1, 00)

Svaka od navedenih tehnika ima neke prednosti i općenito nije moguće iskoristiti sve prednosti istovremeno.

Tehnika diverzitija [28] (slika 1.13) može značajno smanjiti kolebanje signala zbog višestaznog fedinga. Glavni princip diverzitija je odaslati i/ili primiti **istu** informaciju iz različitih potkanala, uz pretpostavku da je vjerojatnost da su svi kanali u fedingu puno manja od vjerojatnosti da je samo jedan kanal u fedingu. Ukoliko se diverziti koristi samo na prijamnoj strani (SIMO), vjerojatnost dubokih propada signala može se smanjiti kombiniranjem signala primljenih na različitim antenskim elementima (prijamni diverziti), čime se popravlja prosječni odnos signal/šum. U slučajevima kada je antenski niz samo na odašiljaču (MISO), ako je informacija o kanalu poznata, signal se sa svake pojedine odašiljačke antene može slati s različitim težinskim faktorom (ovisno o stanju u radiokanalu), a svaka pojedina replika originalnog signala, koja na prijam dolazi s različitim fazama, zbroji koherentno.



Slika 1.13 MIMO kanal – prikaz primjene tehnike diverzitija

Oblikovanje snopa ili *beamforming* [29], [30] je tehnika usmjeravanja antenskog niza u željenom smjeru prilagođavanjem faza signala koji se dovode na antenske ulaze (slika 1.14). Ovaj način omogućuje različite primjene. Između ostalog, usmjeravanjem snopa od odašiljača prema prijamniku ostvaruje se prostorna razdvojenost korisnika, a time i smanjenje interferencije.



Slika 1.14 MIMO oblikovanje snopa

Prostorno multipleksiranje [31]-[33] (slika 1.15) se u dijelu literature naziva i pravim MIMO sustavom (engl. *true MIMO*) jer omogućava brojne Tx-Rx kombinacije za ostvarivanje optimalnog prijenosa. Korištenjem paralelnih podatkovnih nizova između različitih odašiljačkih i prijamnih elemenata, količina podataka koja se prenosi kroz isti radiokanal, unutar istog vremena, iste širine kanala i s istom odašiljačkom snagom, može se višestruko povećati. U idealnom slučaju, sustav s N antena na prijamniku i M antena na odašiljaču može povećati mogući kapacitet radiokanala za faktor min(N, M).



Slika 1.15 Prostorno multipleksiranje u MIMO kanalu

Iako je MIMO u posljednjih nekoliko godina implementiran u brojne standarde (3GPP LTE, WLAN 802.11n i WiMAX), i dalje se provode vrlo intenzivna istraživanja kako bi se ostvario njegov puni potencijal. To uključuje istraživanja vezana za karakteristike radiokanala i njegovo modeliranje, dizajn antenskih sustava i primjerene topologije, obradu signala itd. Dio istraživanja usmjeren je na jedan drugi vid realizacije MIMO sustava, tzv. distribuirani MIMO sustav.

Distribuirani (kooperativni ili višekorisnički) MIMO sustav [34]-[36] je komunikacijska tehnika u kojoj više mobilnih stanica dijeli svoje antene kako bi kreirali virtualni MIMO sustav (slika 1.16). Radeći zajedno na ovaj način, mobilna i bazna stanica mogu postići neke od prednosti klasičnog MIMO sustava. Na primjer, odašiljač može s prijamnikom komunicirati ili izravno ili preko druge antene (relejnog čvora), ukoliko je izravni kanal lošije kvalitete, čime se povećava ukupna otpornost sustava. S obzirom da su svojstva kanala na stazi odašiljač-prijamnik i odašiljač-čvor-prijamnik različita, ovakav princip zapravo odgovara prostornom diverzitiju. Prednost koncepta leži u činjenici da na prijamnoj strani nisu potrebni toliko složeni sklopovi da bi se realizirao MIMO, no postoje brojni drugi izazovi. S jedne strane su teoretska pitanja povezana s problemom načina rada kojim bi se maksimizirao protok mreže, a minimizirala ukupna snaga; s druge strane je korelacija među linkovima koja značajno utječe na izvedbu distribuiranog MIMO sustava.



Slika 1.16 Distribuirani MIMO sustav

1.4.1 Kapacitet MIMO sustava

Maksimalni kapacitet [37]-[42] je mjera kojom se često ocjenjuje učinkovitost MIMO sustava. Kapacitet, odnosno brzina prijenosa koja se može ostvariti bez kodnih ograničenja ili dodatne složenosti, definiran je Shannonovom formulom [43]:

$$C = \log_2(1 + \rho |h|^2) \tag{1.29}$$

gdje je ρ odnos signal/šum, a $|h|^2$ normalizirana jednodimenzionalna prijenosna matrica kanala. Naime, izraz 1.29 vrijedi samo za jednodimenzionalni slučaj, tj. riječ je o skalarnoj vrijednosti koja daje kapacitet konvencionalnog komunikacijskog sustava.

Za višeantenske sustave u kojima se antenski nizovi nalaze samo na jednoj strani (SIMO i MISO), ukupni kapacitet ovisi o broju antenskih elemenata [43]:

$$C = \log_2(1 + \rho \mathbf{h} \mathbf{h}^*) \tag{1.30}$$

gdje je $\mathbf{h} = [h_0, h_1, ..., h_{N-1}]$ karakteristična prijenosna matrica s N elemenata koji predstavljaju kanalne amplitude od odašiljača do prijamnika. * označava transponiranu konjugiranu matricu.

Za MIMO sustave ukupni kapacitet može se izraziti nešto složenijom formulom [43]:

$$C = \log_2\left(\det\left(\mathbf{I}_N + \frac{\rho \mathbf{H} \mathbf{H}^*}{M}\right)\right) \tag{1.31}$$

gdje je I_N jedinična matrica, H prijenosna matrica, H^* je konjugirano kompleksna matrica, N je broj elemenata na prijamniku, M broj antenskih elemenata na odašiljaču. Iz 1.31 se vidi da kapacitet raste s porastom broja odašiljačkih elemenata logaritamski. Za veći broj elemenata kapacitet raste linearno s faktorom $\min(N, M)$. U slučaju da je M=N, izraz 1.31 postaje:

$$C \approx M \log_2(1+\rho) \tag{1.32}$$

Shannonovom formulom definiran je teoretski maksimum kapaciteta, no ostvarivi kapacitet izravno ovisi o stvarnim uvjetima višestaznog rasprostiranja u radiokanalu, odnosno
prijenosnoj matrici **H** čiji elementi opisuju radiokanal. Stoga je važno proučavati i razumjeti svojstva obostrano usmjerenog kanala koja se odražavaju na elemente prijenosne matrice **H**.

Najveći kapacitet ostvaruje se za međusobno neovisne potkanale. Ako se primijeni rastavljanje prijenosne matrice na svojstvene vektore (engl. *Single Value Decomposition - SVD*) [44], kanalna matrica može se prikazati kao:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^* \tag{1.33}$$

gdje je U unitarna matrica dimenzije $N \times N$ (N je broj antenskih elemenata na prijamniku), V je unitarna matrica dimenzije $M \times M$ (M je broj antenskih elemenata na odašiljačkoj strani), a S je $M \times N$ matrica čiji su svi elementi nule, osim dijagonale na kojoj su vrijednosti min(M, N) svih svojstvenih vektora matrice **H.** V* predstavlja konjugirano kompleksnu transponiranu matricu matrice V. Svaki pojedini svojstveni vektor predstavlja jedan način prijenosa kroz kanal, ili drugim riječima, radiokanal se može podijeliti na određeni broj potkanala. Svaki od njih ima svoj kapacitet, a ukupni kapacitet cijelog radiokanala može se izraziti kao zbroj kapaciteta svakog potkanala:

$$C = \sum_{k=1}^{n} \log_2\left(1 + \frac{E_k}{\sigma^2}\lambda_k\right)$$
(1.34)

gdje je E_k (k = 1, 2, ..., n) energija odaslana kroz potkanal k, s dobitkom snage λ_k te snagom šuma σ^2 .

Za ostvarivanje optimalnog kapacitet, onog približno jednakog teorijskim vrijednostima, bitno je li stanje kanala CSI (engl. *Channel State Information*) [45], [46] poznato ili ne. Poznavanje CSI je bitno jer omogućuje prijenos podataka potkanalima koji imaju bolja propagacijska svojstva, a ostvaruje se uporabom adaptivnih antenskih nizova i različitih tehnika procesiranja signala. Ako CSI nije poznat, parametri kanala prilikom odašiljanja nisu poznati, no mogu se dobiti slanjem kratke trening sekvence prije odašiljanja samog podataka.

Iako teoretska razmatranja pokazuju značajno povećanje kapaciteta povećanjem broja antenskih elemenata, u stvarnosti postoje brojna ograničenja. Prije svega, pretpostavka je da su svi potkanali međusobno neovisni, odnosno da ne postoji korelacija među Tx-Rx parovima. U praksi obično postoji sprega među antenskim elementima, koja vodi do smanjenog dobitka niza te je ostvarivi kapacitet značajno niži od onog teoretskog [47]. Prema postojećoj literaturi [48], da bi se osigurala međusobna neovisnosti potkanala, antenski elementi moraju biti razmaknuti barem polovicu valne duljine. Zadovoljavanje ovog uvjeta donosi dodatno prostorno ograničenje, osobito na prijamniku (odnosno mobilnoj stanici) jer su dimenzije tako postavljenih antenskih nizova često neprihvatljivo velike. Ovo ne vrijedi za distribuirani MIMO jer su prijamne antene prostorno razmaknute među različitim korisnicima.

1.4.2 Obostrano usmjereni radiokanal

Obostrano usmjereni radiokanal (engl. *Double Directional Radio Channel*) [49]-[51] je složeni model radiokanala, koji služi kako bi se opisala svojstva radijske okoline relevantna za rad MIMO sustava. Obostrani usmjereni radijski kanal sadrži upravo to: odlazne i dolazne kutove svake pojedine zrake te vremena njihova kašnjenja, što ga čini adekvatnim modelom za MIMO sustave. Naime, poznavanje svake pojedine komponente koja je pristigla na prijamnik, omogućuje MIMO sustavu maksimalno korištenje dostupnog radijskog kanala, a na osnovu vremena kašnjenja i kutne razdvojenosti, moguće je detektirati pojedine komponente na različitim antenskim elementima na prijamu.



Slika 1.17 a) MIMO radijski kanal; b) obostrano usmjereni radijski kanal [49]

Postoji razlika između MIMO radijskog i propagacijskog kanala [51]: propagacijski kanal opisuje samo svojstva radio kanala, ne uzimajući u obzir antenske sustave koji se nalaze na odašiljačkoj i prijamnoj strani, dok MIMO radijski kanal uključuje kompletan sustav (slika 1.17). Drugim riječima, propagacijski model daje obostrano usmjereni kanalni odziv, ali konceptualno mora omogućavati sučelje za antenske nizove, kako bi mogao poslužiti kao dio MIMO radiokanala.

Općenito, jedan uobičajen prikaz propagacijskog kanala je pomoću višedimenzionalne funkcije raspršenja, $s(v, \tau, \varphi_T, \varphi_R)$ koja uzima u obzir Doplerov pomak (*v*), vrijeme kašnjenja (τ) i oba azimutalna (dolazna, odnosno odlazna) kuta [49].

Višedimenzionalna funkcija raspršenja povezuje ulazne i izlazne parametre pomoću višedimenzionalne konvolucije. Kada su svojstva ove funkcije poznata, ponašanje sustava s proizvoljnom baznom i mobilnom stanicom, može se precizno predvidjeti. Polarizacija i elevacija ovdje su izostavljene radi jasnoće prikaza, ali su implicitno ugrađeni u model.

Uobičajeni zapis obostrano usmjerenog radijskog kanala je preko vremenski ovisnog kompleksnog kanalnog odziva $h(t, \tau)$ za neusmjeren slučaj (kada je poznat odlazni kut, a na drugoj je strani omnidirekcijska ili sektorska antena), odnosno $h(t, \tau, \varphi_R)$ za usmjereni kanalni odziv. Prijamna antena zbraja sve pristigle komponente, pridjeljuje im težinski faktor ovisno o dijagramu zračenja, $g_R(\varphi_R)$ te integrira sve po kutu [49]:

$$h(t,\tau,\vartheta_r) = \int_{-\pi}^{\pi} h(t,\tau,\varphi_R,\varphi_T) g_T(\varphi_T) d\varphi_T$$
(1.35)

$$h(t,\tau) = \int_{-\pi}^{\pi} h(t,\tau,\varphi_R) g_R(\varphi_R) d\varphi_R$$
(1.36)

odnosno, neusmjereni kanalni odziv $h(t,\tau)$ zapravo je usmjereni odziv $h(t,\tau,\varphi_R)$ integriran po kutu, a usmjereni kanalni odziv $h(t,\tau,\varphi_R)$ je zapravo obostrano usmjereni kanalni odziv $h(t,\tau,\varphi_R,\varphi_T)$ integriran po kutu. Obostrano usmjereni kanal nije ništa drugo nego propagacijski kanal, prema definiciji na početku poglavlja, koji opisuje svojstva radiokanala između odašiljača i prijamnika, ne uzimajući u obzir svojstva antenskog sustava. Obostrano usmjereni radiokanal opisuje sljedeće funkcionalne blokove u radijskom prijenosu:

- odašiljačka antena Tx odašilje energiju signala u željenom odlaznom smjeru (engl. Direction of Departure, DoD). Odgovarajući smjerovi odabrani su iz fizičkih karakteristika obostrano usmjerenog kanala za specifičan propagacijski scenarij;
- obostrano usmjereni radijski kanal uključuje svih N mogućih puteva propagacije između odašiljača i prijamnika. Svaki od putova ima svoje vrijeme kašnjenja, τ_i, kojem je pridružen težinski faktor dobiven iz kompleksne amplitude H_ie^{jφ_i}, a sve odlazne zrake povezane su s pripadnim dolaznim zrakama [49]:

$$h(\tau,\varphi_R,\varphi_T) = \sum_{i=1}^N H_i e^{j\varphi_i} \,\delta(\tau-\tau_i) \delta(\varphi_R-\varphi_{R,i}) \delta(\varphi_T-\varphi_{T,i})$$
(1.37)

Općenito, sve višestazne komponente iz navedene jednadžbe ovisit će o vremenu pa će se i skup komponenti koje doprinose propagaciji varirati: $N \rightarrow N(t)$.

 prijamna antena Rx prima skup komponenti iz smjera dolaska (engl. *Direction of Arrival*, DoA), odnosno njihovu kombinaciju prema težinskim faktorima

Širokopojasni MIMO kanal može se izračunati za bilo koju kombinaciju antena pomoću jednadžbe [49]:

$$h(\tau,\varphi_R,\varphi_T) = \sum_{i=1}^N h(t,\tau,\varphi_{R,i},\varphi_{T,i}) \times g_R(\varphi_R)g_T(\varphi_T)e^{j\langle \vec{k}(\varphi_{R,i})\cdot\vec{x_R}\rangle}e^{j\langle \vec{k}(\varphi_{T,i})\cdot\vec{x_T}\rangle}$$
(1.38)

pri čemu je N ukupni broj višestaznih komponenti, $\vec{x_R}$ i $\vec{x_T}$ vektori određene pozicije, mjereni od proizvoljno odabrane, ali fiksne točke. $\langle \vec{k}(\varphi, \epsilon) \cdot \vec{x} \rangle = \frac{2\pi}{\lambda} (x \cos\varphi \cos\epsilon + y \sin\varphi \sin\epsilon)$ je fazni pomak koji, uz ϵ koji predstavlja elevaciju, odnosno horizontalnu ravninu, daje cjelovitiju i općenitiju sliku.

1.5 Sažetak poglavlja

Najveći izazov MIMO sustava leži u njihovoj praktičnoj realizaciji [52],[53]. Teorijski rezultati pokazuju znatne prednosti, no stvarna implementacija MIMO sustava u nove mreže ide vrlo postepeno. Glavni razlozi mogu se, ugrubo, svrstati u dvije skupine: problem praktične realizacije sustava, koji uključuje složenost komponenti uređaja, dimenzije antenskog sustava, cijena itd., te problem modeliranja i razumijevanja svojstava radiokanala.

Da bi se u MIMO kanalu ostvarili teoretski mogući kapaciteti (ili barem približni), potrebno je osigurati neovisnost potkanala u MIMO prijenosnoj matrici. To znači da antenski elementi na Tx i Rx strani moraju biti dovoljno razmaknuti kako ne bi bili korelirani. Drugim riječima, svaki antenski element odašilje/prima potpuno zasebno, a ukupni kapacitet kanala jednak je zbroju svakog pojedinog potkanala. U stvarnosti idealnu prostornu razmaknutost antenskih elemenata nije uvijek moguće postići (jednostavno zbog prostornih ograničenja), osobito na prijamnoj ili korisničkoj strani.

Modeliranje MIMO radiokanala je poseban segment istraživanja potreban da bi se svojstva MIMO komunikacijskih sustava u bogatoj višestaznoj sredini mogla opisati i ispitivati. Mjerni uređaji koji se danas koriste ne mogu identificirati sve zrake koje zapravo postoje, pa su rezultati mjerenja vrlo ograničeni. Adekvatan model radiokanala mora omogućiti apliciranje različitih antenskih topologija te njihovu usporedbu i ocjenu.

Propagacijski mehanizmi i svojstva širenja elektromagnetskog vala dobro su poznati i relativno dobro istraženi. Međutim, opis tih svojstava u formi referentnog modela radiokanala na kojem bi se brojni fenomeni komunikacijskih sustava u razvoju mogli ispitivati, stalno se istražuje i dopunjuje. Postojeći modeli, o kojima će više biti riječi u idućem poglavlju, sadrže niz pojednostavljenja i aproksimacija. To se osobito odnosi na mobilni kanal, u kojem se korisnik kreće, pa su i propagacijska svojstva, osim što su po svojoj prirodi stohastička, podložna vrlo brzim dinamičkim promjenama uzrokovanim konstantnim promjenama radijske okoline, Dopplerovim efektom itd. Osobito je zanimljiva difrakcija kao značajan način propagacije u urbanim sredinama, o čemu će više biti riječi u nastavku rada.

Poglavlje 2

REFERENTNI MODELI RADIOKANALA

Referentni model radiokanala služi kao platforma za ispitivanje novih radiokomunikacijskih sustava. Mjerenja sustava su složena, skupa i dugotrajna pa se za projektiranje i testiranje najčešće koriste različiti referentni modeli radiokanala, koji oponašaju stvarnu sliku radijskog kanala u prirodi. Danas postoji veliki broj referentnih modela koji se koriste za ispitivanje novih sustava i raznoraznih tehnika obrade signala. Ovo poglavlje daje pregled trenutnog stanja razvoja referentnih modela za MIMO sustave, pregled najvažnijih pristupa u izradi referentnih modela radiokanala te najvažnije primjere. Posebna pažnja posvećena je COST modelima, koji se mogu smatrati općenitima jer sadrže veliki broj parametara kojima opisuju niz različitih propagacijskih scenarija pa su pogodni za modeliranje MIMO radiokanala. Upravo je parametrizacija COST modela korištena kao podloga u ovom istraživanju.

2.1 Klasifikacija modela radiokanala

Modeli radiokanala mogu se prema namjeni svrstati u dvije skupine – predikcijske i referentne modele radiokanala.

Predikcijski modeli služe za izračun razine signala ili pokrivanja i primjenjuju se (najčešće) na specifičnom području, s točno određenim podacima. To su modeli koji se koriste za planiranje mobilnih mreža i/ili usmjerenih linkova, za što na raspolaganju imaju točne (i detaljne) podatke: geografske podatke, točan 3D prikaz zgrada i ulica, precizne podatke o antenama i uređajima itd. S ovakvim postavkama moguće je dobiti precizna

procjenu razine prijamnog signala te željenu raspoloživost ili pokrivanje, što im je i osnovna namjena.

Referentni modeli radiokanala imaju drugačiju namjenu. Oni služe za testiranje i usporedbu novih modulacijskih postupaka i tehnika kodiranja, verifikaciju novih sustava tijekom njihovog razvoja, dizajn i usporedbu višekorisničkih protokola i slično. Referentni modeli moraju biti realistični i opisivati stvarna propagacijska svojstva u radiokanalu za neki tipični scenarij, no nisu vezani za specifične geografske uvjete pa ne daju precizne vrijednosti, nego uvid u ono što se u danom scenariju može očekivati. Upravo su referentni modeli predmet istraživanja ove disertacije pa će u nastavku biti detaljnije razrađeni.

Postojeći referentni modeli radiokanala mogu se, načelno, grupirati u *fizičke* i *analitičke* [54].

Fizički modeli opisuju okolinu na osnovu svojstava rasprostiranja elektromagnetskog vala, odnosno na temelju obostrane višestazne propagacije između odašiljača i prijamnika. Val je eksplicitno određen kompleksnom amplitudom, smjerom odlaska odašiljačkog vala, smjerom dolaznog vala na prijam i kašnjenjem svake višestazne komponente. U sofisticiranijim modelima uključena je i polarizacija te vremenska promjenjivost. Neovisni su o konfiguraciji antene i širini kanala, ali ovisno o odabranoj kompleksnosti, fizički modeli omogućavaju vjeran opis radiokanala

Fizički modeli mogu se podijeliti na:

- *determinističke* koriste parametre koji su potpuno točno određeni, a dobiveni su iz simulacija praćenjem zrake (engl. *ray tracing*) ili iz podataka dobivenih mjerenjima;
- geometrijsko-stohastičke modele (Geometry Based Stohastic Channel Model GSCM)
 kanalni odziv je elektromagnetski val koji se širi između određenog odašiljača i prijamnika, preko slučajno odabranih raspršivača, poštujući geometrijske veze između Tx, Rx i raspršivača;
- stohastički negeometrijski modeli svi fizički parametri određeni su distribucijom vjerojatnosti, odnosno odabrani stohastički, neovisno o specifičnoj geometriji.

Analitički modeli definiraju kanalni odziv, odnosno prijenosnu funkciju kanala između pojedinog odašiljača i prijamnika, matematički, ne uzimajući u obzir propagaciju vala.

Pojedinačni odzivi su zbrojeni u matrici MIMO kanala, na kojem se onda apliciraju odabrane antene, modulacijski postupci i sl. Ovakvi modeli često se koriste za razvoj i verifikaciju novih algoritama, a mogu se podijeliti na:

- modele motivirane propagacijom za modeliranje kanala koriste parametre propagacije (npr. model raspršenja, maksimalne entropije itd.);
- modele bazirane na korelaciji modeli bazirani na korelaciji koriste statističku vezu između članova prijenosne matrice, odnosno parametara MIMO kanala (npr. Kroneckerov model [55], Weichselbergerov model [56] itd).

S obzirom da se temelje na stvarnim svojstvima radiokanala, fizički modeli su puno vjerodostojniji. No, njihova točnost ovisi o točnosti ulaznih podataka. Pohranjivanje velikog broja podataka dobivenih simulacijama ili mjerenjima zahtijeva značajan prostor za pohranjivanje (memoriju) te velike brzine procesora za baratanje podacima, osobito u slučaju determinističkog modela. Zbog toga su u primjeni puno više zastupljeni geometrijsko-stohastički i stohastički modeli.

Geometrijsko-stohastički modeli [57] su svojevrstan kompromis koji kombinira stvarne fizičke parametre sa stohastičkima, smanjujući time složenost modela, ali i njegovu točnost. Ipak, zbog takvih svojstava GSCM koncept je ugrađen u većinu tzv. **standardiziranih modela**.

Osnovna ideja standardiziranih modela jest sposobnost reproduciranja istih kanalnih uvjeta, kako bi se različiti MIMO sustavi i algoritmi mogli uspoređivati. Kod fizičkih modela to znači da je specificiran model kanala, radijsko okruženje i njegovi parametri. Kod analitičkih modela, moraju se unaprijed odrediti skupovi parametara, odnosno koeficijenti matrice, koji su specifični za određeni scenarij. Standardizirani modeli važan su alat za razvoj novih radijskih sustava jer omogućuju testiranje različitih tehnika (procesiranje signala, višestruki pristupi itd.) za povećanje kapaciteta i poboljšanje izvedbi sustava na način koji je unificiran i prihvaćen s više strana. Najpoznatiji su 3GPP [58], WINNER [59], COST259 [60]-[62] COST273 [63],[64], COST2100 [65],[66], IEEE 802.11n [67] i IEEE 802.16a/e [68]. Slika 2.1 daje pregled najznačajnijih referentnih modela radiokanala.



Slika 2.1 Klasifikacija referentnih modela za MIMO radiokanal

2.2 **3GPP SCM**

3GPP SCM¹ model [58] radiokanala razvijen je kao referentni model za ocjenjivanje MIMO parametara i metoda u otvorenim radijskim okolinama, za sustave koji rade u frekvencijskim područjima 2 GHz, uz širinu kanala od 5 MHz. 3GPP SCM ima dva različita dijela: kalibracijski i simulacijski model.

Kalibracijski model dozvoljava provjeru simulacija, s obzirom na specifikaciju parametara. Za tu svrhu koristi se pojednostavljeni model na kojem se mogu usporediti različite implementacije istih algoritama, razvijenih od strane različitih kompanija. Dakle, kalibracijski model ne ulazi u izvedbu samog algoritma, nego ima svrhu ocijeniti jesu li dvije implementacije ekvivalentne ili ne. Može se implementirati bilo kao fizički, bilo kao analitički model. Fizički model je negeometrijski stohastički, baziran na ITU-R modelima, i opisuje širokopojasne karakteristike radiokanala uvođenjem linije za kašnjenje. Svaka linija, zbog različitog vremena kašnjenja, ima "svoj" feding i fiksne parametre (ovisnost snage i kuta

¹ 3GPP SCM – 3rd Generation Partnership Project Spatial Channel Model

raspršenja, kutno raspršenje, srednje kutove na strani bazne i mobilne stanice). Time je omogućen prikaz stacionarnih uvjeta u radiokanalu. Dopplerov efekt uveden je definiranjem brzine i smjera kretanja MS, čime je omogućeno modeliranje mobilnosti u sustavu. Osim toga, model uključuje i neke antenske konfiguracije.

Simulacijski model ocjenjuje samu izvedbu. To je fizički model koji razlikuje tri osnovne radijske okoline: urbanu makroćeliju, suburbanu makroćeliju i urbanu mikroćeliju. Svaka radijska okolina ima svoje parametre (raspršenje kuta i kašnjenja i slično), ali struktura i metodologija su iste. Na primjer, ako promatramo link između MS i BS, njegova geometrija je izvedena iz lokacije mobilnih stanica, smjera antenskog niza te smjera kretanja, koji su slučajno odabrane varijable. Iz lokacije MS određuju se gubici same staze, a za onda se korist već poznati modeli, Okumura-Hata za makroćelije te Walfish-Ikegami za mikroćelije. Broj linija s različitim kašnjenjem je šest, no njihovo kašnjenje i prosječna snaga su također varijable funkcije gustoće vjerojatnosti. Kutno raspršenje na MS i BS za svaku se komponentu implementira kao skup pod-staza koje imaju isto kašnjenje, ali različite dolazne i odlazne kutove. To znači da svaku stazu predstavlja klaster od 20 raspršivača koji imaju različite smjerove, ali isto vrijeme propagacije. Srednji smjer dolaska i odlaska (DoA, DoD) na jednoj liniji slučajno je odabran po Gaussovoj raspodjeli. Nadalje, svaka podstaza ima različite faze (pomaci $\Delta \phi_i$ definirani su u 3GPP standardu).

Kutno raspršenje rezultira Rayleighovim ili Riceovim fedingom. Također, varijacije u vremenskom impulsnom odzivu kanala posljedica su kretanja MS, što dovodi do razlike u fazama pojedinih podstaza.

Simulacijski model radi na sljedeći način: ponašanje sustava ocjenjuje se na temelju niza simulacija. Jedna simulacija traje određeni period, za koji se pretpostavlja da je vrlo kratak u odnosu na parametre kanala (raspršenje kuta, srednji smjer dolaska, raspršenje kašnjenja, srednji smjer odlaska), uz konstantan feding. Pozicije MS biraju se slučajno na početku svake simulacije, a pozicija BS ostaje fiksna kroz više uzastopnih simulacija. Model ne ovisi o odabiru antenskog sustava pa on može biti proizvoljan. Kada se definiraju svi parametri i antenski efekti, iz fizičkog se modela mogu izvući analitički parametri, koji za svaku simulaciju sadrže matricu s različitim korelacijskim faktorima. Osim toga, u simulacije se

mogu uključiti i dodatne opcije, kao što su polarizacijski model, klasteri od udaljenih raspršivača, LOS komponente u mikroćelijama te modificirane raspodjele kutnog raspršenja na MS, pomoću kojeg se mogu simulirati propagacijski uvjeti u "uličnim kanjonima".

2.3 WINNER

WINNER² [59] model radiokanala razvijen je za bežične komunikacijske sustave u frekvencijskim područjima 2-6 GHz i za širine kanala do 100 MHz. WINNER se, kao i COST modeli, temelji na geometrijsko-stohastičkom principu, s generičkom strukturom za sve scenarije. WINNER definira uvjete u sedam različitih scenarija: zatvoreni prostor, urbana makro i mikroćelija, sub-urbana makroćelija i ruralni uz uvjete postojanja izravne zrake (LOS) i bez nje (NLOS). Zahvaljujući partnerima iz industrije uključenima u ovaj projekt, napravljen je niz mjerenja, čiji su se rezultati koristili u parametrizaciji modela (npr. gubici staze, karakteristike fedinga, odnos snage i kašnjenja, raspršenje kašnjenja i kutova, krospolarizacijski faktor itd.).

Za svaki od scenarija definirana su dva tipa modela radiokanala:

- klasterizirana linija kašnjenja (engl. Clustered Delay Line, CDL)
- generički model radiokanala

Pomoću CDL modela radi se kalibracija i usporedba simulacija. Parametri u CDL modelu su kašnjenje, snaga, AoD, AoA, *K*-faktori iz Riceove raspodjele, brzina MS, broj zraka po klasteru, snaga zraka te raspršenje kuta klastera na BS i MS.

Generički model koristi se za simulacije na razini linka i na razini sustava. Ne ovisi o antenama, skalabilan je i može generirati kanale za simuliranje MIMO sustava.

WINNER model pokriva dva različita smjera. S jedne strane je model radiokanala s ograničenim brojem parametara za brze simulacije u propagacijskim scenarijima većeg prioriteta, za što se koristi 3GPP stohastički model. S druge strane je proširenje modela na scenarije s više linkova, za koje uskopojasni 3GPP model nije pogodan. Stoga je napravljena proširena verzija 3GPP SCM modela - *SCM-Extended* (SCME) model. U njega je uključeno

² WINNER – Wireless World Initiative New Radio

više parametara, uveden je koncept kašnjenja među klasterima, definirana dva nova scenarija (velike zatvorene hale i sub-urbano područje) itd. Pojednostavljena verzija ovog modela usvojena je od strane 3GPP za modeliranje LTE sustava. Iako detaljno parametriziran za pojedine slučajeve, WINNER ipak pokriva samo neke specifične scenarije pa, s obzirom na svoju općenitost i širinu, COST modeli imaju prednost.

2.4 COST modeli

COST³ [60]-[66] modeli razvijeni su u sklopu programa Europske unije kojim se financiraju znanstvena i tehnička istraživanja. Nekoliko višegodišnjih projekata unutar okvira COST programa bavilo se pitanjima bežičnih komunikacija, osobito COST259 "*Flexible personalized wireless communications*" (1996–2000) i COST273 "*Towards mobile broadband multimedia networks*" (2001–2005) unutar kojih je razvijen referentni model koji opisuje svojstva obostrano usmjerenog radijskog kanala pogodnog za simulacije antenskih nizova i MIMO sustava. Posljednja inačica, COST2100, razvijena je u sklopu projekta "*Pervasive and Ambient Wireless Communications*" (2006-2010). U ovom poglavlju napravljen je pregled najvažnijih parametara te otvorenih pitanja na kojima se trenutno radi. Većina osnovnih parametara definirana je u COST259 modelu, a COST273 i COST2100 su samo proširenja, kojima je napravljena dodatna parametrizacija.

COST259 model usmjerenog radijskog kanala je fizički model koji opisuje raspršenje kašnjenja i kuta zrake na baznoj i mobilnoj stanici u različitim radijskim okruženjima. Model je općenit u smislu da je definiran za 13 različitih radijskih okolina, koje opisuju makro, mikro i pikoćelijske scenarije.

COST259 model definira tri vrste ćelija, odnosno područja pokrivanja signalom, koja imaju neka tipična svojstva. *Makroćelija* je definirana kao područje radijusa nekoliko kilometara, u kojem se bazna stanica nalazi visoko iznad svih ostalih objekata. *Mikroćelije* su područja radijusa do 1 km u kojima se bazna stanica nalazi u razini ili malo ispod krovova, odnosno viših objekata. *Pikoćelije* predstavljaju uglavnom zatvorene prostore. Unutar svakog

³ COST – European Cooperation in Science and Technology

od tih područja postoje tipični propagacijski scenariji sa sebi svojstvenim parametrima (Tablica I).

Makroćelija	Mikroćelija	Pikoćelija
- tipično urbano područje (General Typical Urban – GTU),	- urbana mikroćelija (General Urban Microcell – GUM),	- uredi u kojima postoji optička vidljivost (General Office LOS – GOL),
- loše urbano područje (General Bad Urban – GBU)	- loša urbana mikroćelija (General Bad Urban Microcell – GBM),	- uredi u kojima ne postoji optička vidljivost (<i>General Office NLOS – GON</i>),
- ruralno podučje (General Rural Area – GRA)	 otvoreni prostor u kojem postoji optička vidljivost između bazne stanice i korisničkog uređaja (General Open Place – GOP) 	- hodnik u kojem postoji optička vidljivost (General Corridor LOS – GCL),
- brdoviti teren (General Hilly Terrain–GHT).	 otvoreni prostor u kojem ne postoji optička vidljivost između bazne stanice i korisničkog uređaja (<i>General Open</i> <i>Place NLOS – GNP</i>). 	- hodnik u kojem ne postoji optička vidljivost (<i>General Corridor NLOS</i> – GCN)
		- tvorničke hale (General Factory/Hall – GFL).

TABLICA I PROPAGACIJSKI SCENARIJI U MODELU COST259

U COST273 [63],[64] modelu su uvedeni neki novi propagacijski scenarij, osim onih navedenih u Tablici I. COST273 model definira i *ad hoc* mreže, koje se koriste za modeliranje nomadskih sustava u kojima su odašiljač i prijamnik na približno istoj visini. Također su definirani novi scenariji kojima se mogu modelirati nove primjene MIMO sustava (npr. komunikacija iz zatvorenog prema otvorenom prostoru u urbanoj sredini (engl. *indoor-to-outdoor urban*), izravna komunikacija među radijskim stanicama (engl. *peer-to-peer*), komunikacija od bazne stanice u zatvorenom prostoru prema korisniku u otvorenom prostoru (engl. *base station indoor – user outdoor* itd).

2.4.1 Klasteri i područja vidljivosti

Svi parametri definirani u COST259 modelu, a zadržani u kasnijim inačicama, temelje se na konceptu klastera (engl. *cluster*) [67]-[69]. Naime, mjerenja su pokazala da se komponente

signala (zrake) obično pojavljuju u grupama višestaznih komponenti signala s približno jednakim vremenom kašnjenja i bliskim upadnim kutom, odnosno klasterima. Na otvorenim područjima klasteri se pojavljuju zbog interakcije odaslanog signala s preprekama (npr. grupa visokih zgrada u urbanoj sredini), zbog utjecaja klastera lokalnih prepreka (objekata koji su u neposrednoj blizini mobilne stanice) itd. U zatvorenim prostorima klasteri se pojavljuju, na primjer, zbog otvora (vrata ili prozori) ili raspršenja kuta kod propagacije kroz zidove.

Međutim, ne pripadaju sve zrake bliskog upadnog kuta i vremena kašnjenja u isti klaster. Zbog ograničenja rezolucije, postoji opasnost da se skupina višestaznih komponenti koje se na prijamu ne mogu razlikovati, pogrešno svrsta u isti klaster. Klaster se obično sastoji od nekoliko grupa zraka koje imaju slično kašnjenje i kutove, a izvan te grupe, promatrano u "kašnjenje-kut" prostoru, nalazi se područje neznatne snage. Kao rezultat, zrake koje pripadaju klasteru ne mijenjaju se ukoliko se postavi finija rezolucija (za razliku od grupe višestaznih komponenti u kojoj finija rezolucija omogućuje raspoznavanje više zraka).



Slika 2.2 Područje vidljivosti (engl. Visibility Region)

Prilikom kretanja mobilne stanice propagacijska slika radiokanala se mijenja. COST259 model za opisivanje mobilnog kanala uvodi tzv. područje vidljivosti (engl. v*isibility region*) prikazano na slici 2.2.

Područje vidljivosti definirano je kao dio pokrivanja kojim se određuje je li klaster aktivan ili ne: ako se mobilna stanica nalazi u području vidljivosti, klaster je aktivan i sudjeluje u ukupnom kanalnom odzivu; ako je mobilna stanica izvan područja vidljivosti, klaster nije aktivan. No, svojim kretanjem mobilna stanica prolazi kroz nekoliko različitih radijskih okolina (slika 2.3), koje imaju bitno drugačija svojstva pa dolazi do promjena u radiokanalu

koje treba modelirati. Na putanji MS mijenjaju se i aktivni klasteri: mobilna stanica izlazi iz područja vidljivosti čime klaster postaje neaktivan i obrnuto.



Slika 2.3 Prikaz prijenosne funkcije za prijelaz kroz različite radijske okoline

U prirodi je ovaj prijelaz postepen jer klasteri ne postaju odjednom vidljivi, odnosno nevidljivi. U COST259 modelu postepeni prijelaz iz aktivnog u neaktivni klaster postiže se skaliranjem relativne snage s faktorom A_m^2 . Prijenosna funkcija koja se koristi definirana je izrazom 2.1 i prikazana na slici 2.4, a predstavlja aproksimaciju Fresnelovog integrala koji opisuje snagu polja na nekoj udaljenosti od savršeno vodljive "oštrice noža":

$$A_m(\bar{r}_{MS}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{2\sqrt{2}y}{\sqrt{\lambda x}}\right)$$
(2.1)

pri čemu je $y = L_C + |\vec{r}_{MS} - \vec{r}_M| - R_C$, a $x = L_C$; r_m je središte područja vidljivosti, a λ valna duljina. Područja vidljivosti (PV) su uniformo raspodijeljena po ćeliji, a broj klastera N_C definiran je Poissonovom razdiobom. Prosječan broj vidljivih klastera iznosi:

$$\rho_C = \frac{N_C}{\pi (R_C - L_C)^2} [m^{-2}]$$
(2.2)

Dozvoljeno je preklapanje klastera, čime je omogućeno promatranje pojava kada MS vidi više različitih klastera na istoj poziciji.

Modeliranje klastera umjesto svake pojedine višestazne komponente predstavlja značajno pojednostavljenje, najprije radi smanjenja broja zraka koje treba uzeti u obzir (jer se ne promatra svaka pojedina višestazna komponenta nego grupa njih u istom klasteru), a dodatno uvođenjem pojma područja vidljivosti (jer samo aktivni klasteri ulaze u proračun).



Slika 2.4 Prijelazna funkcija kojom se definira prijelaz iz aktivnog u neaktivni klaster i obrnuto

U COST modelima definirane su tri vrste klastera: lokalni, jednostruki i višestruki. Mogu se prikazati kao elipsoidi u prostoru (slika 2.5). Veličina klastera određena je osima elipsoida u različitim smjerovima koji odgovaraju maksimalnom rasipanju kašnjenja klastera (engl. *Cluster Delay Spread*), δ_c , i kutnim raspršenjima klastera (engl. *Cluster Angular Spread*), $\phi_{C,BS}$ i $\phi_{C,MS}$ u azimutnoj ravnini, odnosno $\theta_{C,BS}$ i $\theta_{C,MS}$ u ravnini elevacije.



c) Višestruki klaster (engl. twin cluster)

Slika 2.5 Vrste klastera u COST modelima: a) lokalni; b) jednostruki; c) višestruki

Općenito, pozicija i raspršenje klastera određeni su i na strani BS i na strani MS, no u slučaju jednostrukih i lokalnih klastera, obje su strane identične pa je dovoljno promotriti samo jednu. U nastavku, za opis klastera koristit će se sljedeća notacija:

- Δ_C , $\phi_{C,BS}$, $\phi_{C,MS}$, $\theta_{C,BS}$, $\theta_{C,MS}$ predstavljaju redom kašnjenje, azimut odlaznog kuta (engl. *azimuth of departure AoD*), azimut dolaznog kuta (engl. *azimuth of arrival AoA*), elevacija odlaznog kuta (engl. *elevation of departure EoD*) i elevacija dolaznog kuta (engl. *elevation of arrival EoA*)
- *a_c*, *b_{c,BS}*, *b_{c,MS}*, *h_{c,BS}*, *h_{c,MS}* su odgovarajući produžeci klastera koji odgovaraju kašnjenju, AoD, AoA, EoD i EoA
- $d_{C,BS}$, $d_{C,MS}$ su udaljenosti između klastera i BS te klastera i MS.

1. Lokalni klaster

Lokalni klaster sadrži jednostruko odbijene zrake raspodijeljene po azimutu. Prostorno raspršenje lokalnog klastera određeno je jedino kašnjenjem i raspršenjem elevacije, s jednostavnim geometrijskim relacijama:

$$a_{C,BS} = \frac{1}{2} \Delta_C c_0, \quad b_{C,BS} = a_{C,BS}, \quad h_{C,BS} = d_{C,BS} tan \theta_C$$
 (2.3)

pri čemu je c_0 brzina vala u slobodnom prostoru.

2. Jednostruki klaster

Jednostruki klaster ima neovisno vremensko i prostorno kašnjenje, a prikazuje se kao rotirani elipsoid u odnosu na BS, s kašnjenjem i kutnim raspršenjem vidljivim s BS. Područje vidljivosti određuje se kao slučajni vektor s ishodištem u BS, koji se rotira po kutu ϕ_c po Gaussovoj raspodjeli, relativno na zamišljenu crtu između BS i VR, $\Psi_c \sim \mathcal{N}(\mu_{\Psi_c}, \sigma_{\Psi_c})$. Udaljenost vektora od BS prati neke ne-negativne raspodjele (npr. eksponencijalna raspodjela u makroćeliji i sl.) s minimalnom udaljenošću r_{min} .

3. Višestruki (twin) klaster

Twin klaster sastoji se od dvaju prikaza istog elipsoida iz perspektive BS i MS. Udio ovakvih klastera u ukupnom broju klastera određen je odabirom određenog faktora, K_{sel} .

Metoda kojom se određuje raspodjela twin klastera sastoji se u tom da se metoda za jednostruki klaster ponovi dva puta, jednom sa strane BS, a drugi put sa strane MS. Udaljenost između klastera i MS može se izračunati po sljedećoj formuli:

$$d_{C,BS}tan\phi_{C,BS} = d_{C,VR}tan\phi_{C,MS}$$
(2.4)

da bi se sačuvala konzistentnost kutnog raspršenja viđenog sa strane BS i MS.



Slika 2.6 Raspodjela jednostrukih i višestrukih klastera

Dodatna udaljenost između klastera i linka, d_c , i kašnjenja $\tau_{c,link}$ uvedene su kao kompenzacija neslaganju kašnjenja u twin klasteru. d_c je geometrijska udaljenost između središta twin klastera, a $\tau_{c,link}$ ne-negativna slučajna varijabla s minimalnim kašnjenjem kad se pojavi jednostruko raspršenje. Lokalni i jednostruki klasteri mogu se smatrati specijalnim slučajem s $d_c = 0$ i $\tau_{c,link} = 0$. Kašnjenje klastera definirano je jednadžbom:

$$\tau_{C} = (d_{C,BS} + d_{C,MS} + d_{C})/c_{0} + \tau_{C,link}$$
(2.3)

Varijable Δ_C , $\phi_{C,BS}$, $\theta_{C,BS}$, $\phi_{C,MS}$, $\theta_{C,MS}$ i faktor sjene klastera povezani su s ne-negativnim slučajnim varijablama. Stvarni koeficijenti ovise o pojedinim scenarijima. Pretpostavlja se da je gušenje snage klastera, A_C , eksponencijalno s porastom razlike između kašnjenja klastera i LOS zrake, τ_0 , pa vrijedi [65]:

$$A_{C} = \max(\exp[-k_{\tau}(\tau_{C} - \tau_{0})], \exp[-k_{\tau}(\tau_{B} - \tau_{0})])$$
(2.6)

(25)

gdje je k_{τ} faktor propadanja signala, a τ_B granična vrijednost kašnjenja, kako bi se eliminirali klasteri s preniskom snagom.

Višestazne komponente unutar klastera raspodijeljene su po Gaussovoj razdiobi, uz pretpostavku Rayleighovog fedinga. Kod *twin* klastera raspodjela višestaznih komponenti na BS i MS je identična, kako bi se osigurala konzistentnost u kašnjenju i raspršenjima kutova. Kompleksna amplituda n-te zrake u m-tom klasteru definirana je [65]:

$$a_{m,n} = \sqrt{P} A_{VR,m} A_{MPC,m,n} \sqrt{SF_m A_{C,m}} e^{-2/\pi \tau_{m,n} f_C}$$

$$\tag{2.7}$$

gdje je P gubitak na stazi, a $\tau_{m,n}$ kašnjenje višestazne komponente definirano kao:

$$\tau_{m,n} = (d_{MPC_{m,n},BS} + d_{MPC_{m,n},MS})/c_0 + \tau_{m,C,link}$$
(2.8)

Izravna ili LOS zraka je specijalni klaster koji sadrži samo jednu komponentu, a područje vidljivosti određeno je pomoću granične udaljenosti od BS (na osnovu graničnog kašnjenja). Snaga se za LOS slučaj računa se po log-normalnoj distribuciji faktora snage.

COST259 model temelji se upravo na shemi s jednostrukim raspršivačem. Raspršivači (engl. *scatterers*), odnosno objekti interakcije, raspoređeni su stohastički, a signal se kreće od odašiljača do prijamnika preko jednog raspršivača. Različiti položaji raspršivača utječu na duljinu puta pojedine zrake, čime se postižu različiti smjerovi i kašnjenja dolazne zrake, odnosno višestazno kretanje vala. Kut odlazne i dolazne zrake te vrijeme kašnjenja povezani su geometrijski. U stvarnosti, ovaj model odgovara scenariju u kojem na prijam dolazi zraka koja je prošla kroz samo jednu interakciju (najčešće refleksiju). Opravdanje za ovakvo pojednostavljenje leži u činjenici da je zraka koja je prošla samo jednu interakciju (osobito refleksiju) puno jača od zrake koja je nastala kao rezultat višestrukih interakcija, odnosno sadrži dovoljan udio snage da se ostale zrake mogu zanemariti. Ovo vrijedi za neke radijske scenarije (npr. ruralno područje), no u urbanim sredinama, u kojima postoji veći broj zraka s višestrukim interakcijama, treba uvesti nove modele.

Klasteri blizanci (engl. *twin clusters*) definirani su u COST273 modelu. Jedan klaster podijeljen je u dva, jedan kakvog vidi bazna, a drugi kakvog vidi mobilna stanica. Obje realizacije izgledaju jednako (po broju raspršivača), ali im se širina i "dubina", gledano od bazne i mobilne stanice mogu razlikovati. Svaka zraka odaslana s odašiljača odbija se od

prepreke u odgovarajućem klasteru i reemitira preko iste prepreke u klasteru blizancu prema prijamniku. Dva prikaza klastera povezana su preko statističkog kašnjenja linka, τ_{link} , koje je isto za sve raspršivače unutar klastera. Kašnjenje klastera oslikava realistična kašnjenja kakva se dobivaju npr. mjerenjima, dok se postavljanje klastera određuje statistikom kuta klastera viđenog s bazne i mobilne strane. Pomoću *twin* klastera moguće je modelirati višestazno širenje signala nastalo višestrukim refleksijama i difrakcijom. Položaj klastera odabire se na način da oslikava realne odlazne i dolazne kutove te vremena kašnjenja.

Glavna razlika između prikaza pomoću jednostrukog i višestrukog raspršivača jest to što su kod jednostrukog raspršivača odašiljač i prijamnik, odnosno dolazni i odlazni kutovi geometrijski povezani, dok kod *twin* klastera ta veza ne postoji - sve vrijednosti opisane su stohastički i dobivaju se iz neke od funkcija razdiobe. Model višestrukog raspršivača u obzir uzima samo višestruke interakcije, ne praveći razliku između višestrukih interakcija i (vjerojatno) dominantne jednostruke refleksije. U stvarnosti gotovo uvijek postoji kombinacija obaju modela raspršivača [70],[71], što je uvedeno i u COST2100 model.



Slika 2.7 Koncept COST2100 modela

Slika 2.7 prikazuje COST2100 MIMO model za jedan link. Signal putuje od statične BS do MS preko različitih višestaznih komponenti koje se pojavljuju u fizičkom mediju kao rezultat interakcije s raspršivačima. Svaka zraka ima kašnjenje (τ) te kuteve dolaska i odlaska u tri dimenzije, odnosno u azimutu i elevaciji (*Angle of Arrival* – AoA, *Elevation of Arrival* – EoA, *Angle of Departure* – AoD, *Elevation of Departure* – EoD). Zrake sa sličnim kutovima i

vremenima kašnjenja grupiraju se u klastere, što omogućuje modeliranje s manjim brojem parametara, a time i manju složenost samog modela.

2.4.2 Model za više linkova (COST2100)

Brojni sustavi baziraju svoj rad na aktivnoj komunikaciji između različitih čvorova (makrodiverziti, relejne sheme, lokalizacijski sustavi u zatvorenim prostorima i sl.) pa je i takve scenarije potrebno uvrstiti u model. Model za više linkova u sustavu je novitet uveden u COST2100 model [65].

Najjednostavnije rečeno, scenarij s više linkova nije ništa drugo nego scenarij u kojem je postavljeno više baznih i više mobilnih stanica pa se tako može i modelirati. No, treba uzeti u obzir i neka bitna svojstva koja takav scenarij nosi, a to se prije svega odnosi na korelaciju među linkovima, koja treba biti modelirana realistično, uz uvjet da ponašanje pojedinog linka treba ostati jednako kao i u scenariju s jednim linkom. To se može postići modeliranjem pomoći zajedničkih klastera. Slika 2.8 prikazuje primjer scenarija s više BS, gdje linkovi između MS i BS1 ili BS2 imaju po jedan zaseban klaster i jedan zajednički, koji doprinosi oboma linkovima. Korelacija među različitim linkovima ovisi o omjeru snage koja je prisutna na zajedničkom klasteru: što je ona veća, veća je i korelacija među linkovima.



Slika 2.8 COST2100 scenarij za modeliranje sredine s više linkova

Ovakav koncept dobro odgovara geometrijsko-stohastičkim modelima, no potrebno je proširiti definiciju područja vidljivosti. Područje vidljivosti i pripadni klaster moraju se generirati koordinirano tako da dio linkova dijeli isto područje vidljivosti i klastere. Stoga su uvedeni neki novi pojmovi.

1. Zajednički klaster za BS

Kada se promatra scenarij u kojem ima više BS, zajednički klasteri povezuju m BS i jednu MS koja je unutar područja vidljivosti. Primjer strukture prikazan je na slici 2.9 iz koje se vidi da je klaster C1 zajednički BS1 i BS2, a omjer koji označava vjerojatnost postojanja zajedničkog klastera, $P_{m,BS}$, definiran je na način da klasificira svojstva zajedničkog klastera za definiranje područja vidljivosti. Vjerojatnost zajedničkog klastera ima sljedeća svojstva:

$$P_{m,BS} = \frac{L_m}{\sum_{m'=1}^{M} L_{m'}}, \quad \sum_{m'}^{M} P_{m',BS} = 1$$
(2.9)

gdje je M broj BS koje se razmatraju, a L_m broj zajedničkih klastera između m baznih stanica.

2. Skupine područja vidljivosti (SPV)

Na isti način kao za zajedničke klastere BS, različite MS mogu vidjeti isti klaster, čak i ako su međusobno dosta udaljene. Klaster koji bi bio vidljiv više MS uglavnom je posljedica interakcije s velikim zidovima ili zgradama. COST2100 za ovakve klastere uvodi pojam skupine područja vidljivosti: kada se određenom području vidljivosti dodijeli klaster, dozvoljava se da n područja vidljivosti vide isti klaster. Sva ta područja vidljivosti čine jednu skupinu PV, N_{PV} . Područje vidljivosti koje pripada određenoj skupini PV, a podržava m zajedničkih klastera na BS, osznačava se sn - PV m - BS.

Da bi se zadržala konzistentnost s "običnim" područjima vidljivosti, gustoća PV određena je ukupnim brojem linkova između PV i BS:

$$MQ = \sum_{m=1}^{M} mL_m \tag{2.10}$$

gdje je Q broj PV određen generiranjem prvog linka.

Važan aspekt je i raspršenje parametara klastera. Ako više BS i MS dijeli klaster, postoji niz načina za oblikovanje elipsoida klastera kako bi bili zadovoljeni parametri linka. BS i PV pomoću kojih se generira elipsoid, nazivaju se referentnima:

- referentni BS klaster ima najveći broj PV koje su s njim povezane
- referentno PV je jedno od PV povezanih s referentnim BS i najviše ostalih BS.

Referentni BS i PV definiraju se posebno za svaki klaster. Konačno, za sve linkove primjenjuje se isti faktor odabira klastera, K_{sel} , te isti broj PV, Q, čime se smanjuje složenost modela.

3. Određivanje područja vidljivosti

Pripadnost zajedničkom klasteru može se definirati preko tablica za dodjelu PV, odnosno iz prikaza na slici 2.9. Prvo se dodjeljuje prazno PV. Tablica treba biti dovoljno velika da u nju stanu sve veze linkova i PV u okolini. Nakon toga slučajno raspodijeljena PV se označavaju po stupcima, s ukupnim brojem koji je dovoljan za održavanje gustoće PV za pojedinu BS, Q, i omjer snage za zajednički klaster za BS, $P_{m,BS}$. Označena PV pridružuju se u sekvencama m baznih stanica slučajnim povezivanjem PV i m-te BS. Dodjeljivanje završava kada svih m BS dostignu definirani omjer, $1 \le m \le M$. Konačno, klasterima se dodjeljuje n PV, po Poissonovoj raspodjeli, koji su odabrani slučajno u skupine PV. Dodjela završava kada se grupiraju sve PV iz tablice. Konačna tablica prikazuje vezu linkova i klastera.



Slika 2.9 Shema povezivanja područja vidljivosti, zajedničkih klastera, baznih stanica i linkova

2.4.3 Parametri

COST model definira dvije vrste parametara. *Vanjski parametri* opisuju sam sustav (npr. pozicija bazne stanice, frekvencija, prosječna visina bazne i mobilne stanice itd.) i konstantni su u određenom propagacijskom scenariju.

Eksterni parametri		Stohastički parametri
Parametri sustava	Parametri okoline	Izračunati parametri
Frekvencija nositelja, f_c	Visina BS, h_{BS}	Broj klastera, N_C
Širina kanala, <i>B_c</i>	Visina MS, h_{MS}	Područja vidljivosti, R_C
Brzina snimanja radiokanala	Prosječna visina krova, h_{KR}	Broj zraka u klasteru, N_{MPC}
(brzina uzorkovanja), R _{ss}	Širina ulice, <i>w</i> _u	Polarizacijski faktori
Broj simulacija, N _{ss}	Razmak među zgradama, <i>w_r</i>	
Pozicija BS, <i>r_{BS}</i>	Radijus ćelije, r	
Pozicija MS, r_{MS}		
Brzina MS, v_{MS}		

TABLICA II	EKSTERNI PARAMETRI COST MODELA
IADLICATI	LKSTERNITARAMETRI COST MODELA

Globalni parametri su uglavnom statističke funkcije gustoće vjerojatnosti svojstvene za pojedine scenarije, a određeni su dijelom i geometrijom (npr. klasteri raspršivača raspoređeni su geometrijski). Iz globalnih parametara mogu se dobiti i takozvani *lokalni* parametri, koji opisuju trenutno stanje u jednom malom dijelu kanala. Vanjski parametri određuju svojstva kanala, a globalni služe sa dizajniranje sustava u smislu određivanja modulacije, načina kodiranja itd. Tablica II daje pregled najvažnijih parametara.

2.4.4 Kanalni odziv

Kanalni odziv u COST2100 modelu računa se prema izrazu [65]:

$$h(t,\tau,\mathbf{\Omega}^{BS},\mathbf{\Omega}^{MS}) = \sum_{n\in\mathcal{C}}\sum_{p}\alpha_{n,p}\delta(\tau-\tau_{n,p})\delta(\mathbf{\Omega}^{BS}-\mathbf{\Omega}^{BS}_{n,p})\delta(\mathbf{\Omega}^{MS}-\mathbf{\Omega}^{MS}_{n,p})$$
(2.11)

gdje je C skup vidljivih klastera, $\alpha_{n,p}$ kompleksna amplituda p-te zrake u n-tom klasteru, $\Omega_{n,p}^{BS}$ je odlazni smjer (AoD, EoD), a $\Omega_{n,p}^{MS}$ dolazni smjer (AoA, EoA) zrake. Za MIMO sustav koji ima U i V antena na odašiljačkoj, odnosno prijamnoj strani, možemo prikazati UxV MIMO matricu $\mathbf{H}(t, \tau)$, uz pretpostavku planarnog vala i uskopojasnog signala, kao:

$$\mathbf{H}(t,\tau) = \iint h(t,\tau,\mathbf{\Omega}^{BS},\mathbf{\Omega}^{MS}) \boldsymbol{s}_{MS}(\mathbf{\Omega}^{MS}) \boldsymbol{s}_{MT}^{T}(\mathbf{\Omega}^{BS}) d\mathbf{\Omega}^{MS} d\mathbf{\Omega}^{BS}$$
$$= \sum_{n \in \mathcal{C}} \sum_{p} \alpha_{n,p} \boldsymbol{s}_{MS}(\mathbf{\Omega}^{MS}) \boldsymbol{s}_{MT}^{T}(\mathbf{\Omega}^{BS})$$
(2.12)

gdje su s_{MS} i s_{BS} usmjereni vektori prema MS i BS.

2.5 IEEE 802.11n standard

IEEE 802.11n [72] standard za WLAN mreže razvijen za MIMO WLAN-ove u zatvorenim prostorima u frekvencijskim područjima od 2 i 5 GHz. Radiokanal je specificiran za ukupno šest različitih scenarija, od kojih svaki ima svoj skup parametara. Osim toga, ovim su modelom pokriveni prostori poput malih i velikih ureda, obiteljskih kuća i otvorenih prostora, za slučajeve sa i bez izravne zrake.

Osnova IEEE 802.11n standard je fizički model s negeometrijskim stohastičkim pristupom. Usmjereni kanalni odziv karakteriziran je zbrojem klastera, koji se kreće od 2 do 6 (sukladno rezultatima provedenih mjerenja), od kojih svaki sadrži do 18 komponenti s različitim kašnjenjem, razdvojenim barem 10 ns. Svakoj komponenti pridodaje se vrijednost DoA, DoD i određena vrijednost snage dobivena iz Laplaceove raspodjele za kutno raspršenje od 20 do 40°, i za odlazne, i za dolazne kutove. Ukupno RMS kašnjenje za simuliranje neke radijske okoline varira od 0 (jednoliki feding) do 150 ns. Za opis MIMO kanala odabran je Kroneckerov model, koji opisuje Rayleighev feding u kanalu. Korelacijska matrica između Tx i Rx određuje se na temelju veze između snage i raspršenja kuta te geometrije antenskog niza. Model uzima u obzir vremenske varijacije da bi emulirao raspršivače koji se kreću.

2.6 IEEE 802.16e / SUI

SUI⁴ model [73] inicijalno je bio razvijen za modeliranje makroćelijskih nepokretnih sustava na 2.5 GHz, ali se kasnije proširio na WiMAX, odnos uključen je u IEEE 802.16a standard.

Model opisuje scenarije sa sljedećim svojstvima:

⁴ SUI – Stanford University Interim

- radijus ćelije je manji od 10km
- antena na strani korisnika je fiksna i postavljena na krovu ili neposredno ispod, kako bi se osigurali NLOS uvjeti
- visina bazne stanice iznosi 15 do 40m iznad razine krovova
- širina kanala je fleksibilna i kreće se od 2 do 20 MHz

Originalni model ne uključuje MIMO ni izravnu komponentu, no postoji niz nadogradnji u kojima su i te varijante opisane. U originalnom SUI modelu pretpostavlja se da su antene na obje strane omnidirekcionalne, no u modificiranoj verziji, koja je implementirana u IEEE 802.16a standard, usvojene su i usmjerene antene.

2.7 Sažetak poglavlja

Iako je postignut značajan napredak u razvoju propagacijskog modela za MIMO sustave, i dalje postoji niz otvorenih pitanja vezanih za efekte koji su se pokazali u mjerenjima, a nisu uključeni u postojeće modele. Osim toga, razvojem tehnologije konstantno se pojavljuju novi scenariji koje treba uvrstiti u referentne modele radiokanala, pa je ova tema jedan od stalnih pravaca u istraživanju.

Najveći problem kod razvoja radiokanala je parametrizacija koja je složena i dugotrajna, a konačni rezultat često nije u skladu sa stvarnošću. Standardizirani modeli poput COST-a, ali i ostalih opisanih u ovom poglavlju, vrlo su opsežni i sadrže veliki broj parametara, koji često nisu definirani ili dovoljno dobro opisani. Parametri modela moraju biti točni i detaljni, što u praksi znači visoku računalnu složenost i visoku cijenu njihove izvedbe. Zbog toga većina postojećih modela unosi brojna pojednostavljenja, čime se smanjuje točnost modela, ali omogućuje njegova laka implementacija.

Ovaj je problem analiziran u sljedećim poglavljima rada. Napravljena je analiza odabranih parametara COST modela te predložen potpuno novi koncept za razvoj modela MIMO radiokanala. Predloženi koncept zadržava točnost ulaznih podataka, uz prihvatljivu složenost.

Poglavlje 3

METODOLOGIJA

Prethodna dva poglavlja daju pregled područja istraživanja te rezultate koji su dostupni u relevantnoj literaturi. U nastavku disertacije prikazani su rezultati istraživačkog rada, koji obuhvaćaju analizu ključnih parametara i definicija iz postojećih referentnih modela radiokanala te prijedlog i razvoj novog koncepta za stvaranje referentnog modela radiokanala. Istraživanje je provedeno simuliranjem svojstava radiokanala metodom slijeđenja zrake (engl. ray-tracing). Za provođenje simulacija korišten je alat za trodimenzionalno praćenje zrake (3D-RT) razvijen na Sveučilištu u Bologni. U ovom poglavlju opisane su osnovne funkcionalnosti navedenog alata te ostala bitna svojstva metodologije kojom je provedeno istraživanje.

3.1 Metoda slijeđenja zrake

Metoda slijeđenja zrake za simuliranje radijske okoline preuzeta je iz geometrijske optike [74]. Najkraće rečeno, zraka se prati kroz prostor od svog ishodišta do krajnje točke ili više njih, ovisno o vrsti interakcije zrake s postojećim objektima u prostoru. Za radiovalove to znači da se prati širenje elektromagnetskog vala od odašiljača do prijamnika, s tim da se na putanji identificiraju objekti na koje zraka nailazi te način širenja vala koji nastaje kao posljedica interakcije zrake i objekta. Svaka zraka predstavlja jedan od mogućih načina prijenosa signala od odašiljača do prijamnika, a na prijamnik dolazi više njih iz različitih smjerova, ovisno o broju i rasporedu postojećih objekata u prostoru te poziciji Rx i Tx u simuliranom scenariju (slika 3.1).



Slika 3.1 Prikaz identificiranih zraka i vrsta propagacije na digitalnoj mapi

Kao podloga za simuliranje neke radijske okoline koriste se digitalne karte, koje sadrže podatke o zgradama i drugim objektima značajnim za način širenja elektromagnetskog vala (npr. dizalice, stupovi, prometni znakovi itd.). Ti podaci obuhvaćaju vrstu objekta, njegovu lokaciju u prostoru, oblik i visinu. Digitalne karte moraju biti precizne, detaljne i ažurne, kako bi što bolje preslikavale stvarnu radijsku okolinu, jer točnost simulacija ovisi o točnosti ulaznih podataka, odnosno radijskih okolina na kojima se simulira. Putanja kojom se zraka prati kroz prostor određena je koordinatama pozicije Tx i Rx. Podaci o odašiljaču i prijamniku sadrže njihove koordinate te podatke o anteni i, u slučaju odašiljača, snazi uređaja. Dodatna preciznost simulacija može se postići korištenjem usmjerenih antena s realističnim dijagramom i odabranom polarizacijom, jer se tako mogu eliminirati zrake koje teoretski (geometrijski) mogu postojati, ali nisu realne.

Metoda slijeđenja zrake odabrana je iz više razloga. Rigorozne simulacije radiokanala imaju niz prednosti u odnosu na mjerenja. Iako se na prvi pogled čine logičnim izborom, jer daju uvid u stvarne uvjete u radiokanalu, kvalitetna i pouzdana mjerenja teško je provesti. Mjerenja su obično dugotrajna i skupa i vrlo ih je teško ponoviti u potpuno istim uvjetima, jer treba uzeti u obzir sve brze promjene koje se u stvarnom radiokanalu događaju. Osim toga, prilikom izvođenja mjerenja treba paziti da je mjerna oprema adekvatno kalibrirana te uzeti u obzir i mjernu pogrešku, koju unosi svaki uređaj. S druge strane, kod simuliranja radiokanala metodom slijeđenja zrake radijska okolina se ne mijenja, čime je omogućeno neograničeno ponavljanje i/ili usporedba simulacija u potpuno istim uvjetima. Za uspješno simuliranje metodom slijeđenja zrake jedino je potrebno osigurati kvalitetne digitalne karte pa je to svakako je jeftinije i jednostavnije rješenje u odnosu na mjerne kampanje. Doduše, dobivanje i održavanje geolokacijskih baza podataka je zahtjevno, no one se danas koriste svakodnevno i lako se mogu nabaviti, što od specijaliziranih tvrtki koje se time bave, što iz besplatnih izvora (npr. GoogleEarth, GoogleMaps, BingMaps) koji su putem Interneta dostupni svima.

Najveća prednost simulacija u odnosu na mjerenja jest to što simulacije daju puno detaljniji prikaz višestazne okoline u radiokanalu. Kod metode slijeđenja zrake, signal (zraka) je prikazan kao ravna ili izlomljena crta koja povezuje dvije krajnje točke. To je dvodimenzionalna veličina bez "debljine", tako da simulacije u principu omogućuju beskonačnu prostornu rezoluciju, dajući pri tome detaljan uvid u sve teoretski moguće slučajeve širenja signala kroz radijsku okolinu. Mjerenja uglavnom služe za utvrđivanje razine prijamnog signala, no vrlo je teško razlučiti sve komponente dolaznog signala, čak i uporabom sofisticiranih ispitivača kanala i antenskih nizova, koji omogućuju primanje i mjerenje dolaznih signala iz različitih smjerova. Upravo se iz tih razloga simulacije metodom slijeđenja zrake posljednjih godina sve češće primjenjuju kao osnova za modeliranje MIMO radiokanala [75],[76]. Ipak, ne treba zanemariti činjenicu da mjerenja reflektiraju stvarne uvjete u radijskoj okolini pa su svakako važna i potrebna za provjeru bilo kojih simulacija.

Ni simulacije radiokanala metodom slijeđenja zrake nisu savršene i treba imati na umu njihova ograničenja. Prije svega, signal je prikazan dvodimenzionalnom zrakom, što u stvarnosti nije slučaj, pa se mogu pojaviti nerealni slučajevi (vrlo specifični i malo vjerojatni). Danas postoje i nadogradnje metode slijeđenja zrake u kojima je zraka zamijenjena snopom (engl. *ray beam*) [76], zadržavajući pritom ostala svojstva metode.

3.2 Simulator metodom slijeđenja zrake

Simulacije metodom slijeđenja zrake provedene su pomoću alata za trodimenzionalno praćenje zrake (3D-RT) razvijenog na Sveučilištu u Bologni u grupi prof. Vittorija Degli-Espostija. Alat je ustupljene na korištenje u akademske svrhe od strane prof. Degli Espostija, zajedno s ulaznim podacima koji uključuju i digitalne karte Stockholma, Oulua, Helsinkija i

Münchena, napravljene u Ericssonu AB. Simulator omogućuju praćenje signala u tri dimenzije i daje vrlo detaljan opis svake zrake. Osim na FER-u, alat je korišten i u drugim (akademskim) institucijama, osobito onima unutar europskih projekata COST2100 i IC1004. Usporedba rezultata simulacija metodom slijeđenja zrake s dostupnim mjerenja na istim scenarijima pokazuje vrlo dobro slaganje [77].

3.2.1 Ulazni podaci

U ulazne podatke koje koristi 3D-RT simulator spadaju digitalne karte, podaci o odašiljaču i prijamniku te upravljački parametri koji kontroliraju tijek simulacija.

Digitalne karte su podloga na kojoj se provode simulacije, a predstavljaju stvarne radijske okoline i scenarije koji se ispituju. U istraživanju su korišteni digitalni planovi gradova na kojima se mogu simulirati tipična svojstva u urbanom scenariju. Svi objekti na digitalnim kartama modelirani su kao poligonske prizme različitih visina, s definiranim elektromagnetskim svojstvima. Podloge su dostupne u nekoliko slojeva, koji se po potrebi mogu prilagođavati: poligonski, dvodimenzionalni plan grada (*.bld*) u planet [78] formatu, visine svakog objekta na karti (*.atr*), elektromagnetska svojstva objekata (*.elm*) i podaci o visini tla, ako su dostupni (*.bin*). Većina simulacija napravljena je na mapi Stockholma, dok su preostale karte dostupne za validaciju rezultata. Svi objekti na digitalnoj karti Stockholma su zgrade, no alat dozvoljava unos i drugih vrsta objekata (stupovi, spomenici, prometni znakovi i slično) pa se karte jednostavno mogu ažurirati. Elektromagnetska svojstva zgrade izgrađene od betona i stakla pa su za sve zidove stavljena ista elektromagnetska svojstva s tipičnim vrijednostima relativne dielektrične konstante $\varepsilon_r = 5$ i vodljivosti materijala $\rho = 0.01 [S/m]$.

Podaci o odašiljaču i prijamniku sadrže podatke o njihovoj lokaciji i visini, vrsti antene i polarizaciji i, u slučaju odašiljača, izlaznoj snazi. Radi općenitosti, u svim je simulacijama korišten antenski dijagram idealnog izotropnog radijatora, kako bi svi mogući pravci širenja elektromagnetskog vala bili obuhvaćeni. Dio zraka koji je nerealan u stvarnosti odbačen je prilikom obrade dobivenih rezultata.

Simulacije se prilagođavaju i pokreću pomoću tzv. kontrolnog niza, koji određuje koji su načini širenja vala dozvoljeni (refleksija, difrakcija, raspršenje, LOS) i koji je maksimalni broj interakcija koje jedna zraka može proći. Time se s jedne strane odbacuju preslabe zrake koje se mogu zanemariti, a s druge postiže fokusiranje simulacija samo na odabrane fenomene. Kontrolni niz ima sljedeći format [79]:

$$N_{ev}@[set1][set2] \dots [setN_{ev}]@N_{ev}^r N_{ev}^d dN_{ev}^s s$$

gdje je:

- *N_{ev}* broj događaja (engl. *number of events*), odnosno interakcija koje je jedna zraka prošla; podatak je obavezan
- [set1][set2] ... [setN_{ev}] za svaku pojedinu zraku može se definirati set mogućih interakcija zrake i objekta, do kojih može doći; * zamjenjuje sve moguće načine propagacije; podatak je opcionalan
- N^r_{ev}rN^d_{ev}dN^s_{ev}s definira maksimalni broj interakcija određenog tipa (r refleksija, d difrakcija, s raspršenje (engl. *scattering*)); podatak je opcionalan
- @ separator

Na primjer, kontrolni niz 3@ ** [*rs*]@2*d*1*s* znači da svaka zraka može imati maksimalno tri događaja, tj. interakcije, od kojih su prve dvije jednake i mogu biti bilo kojeg tipa, a treća može biti samo refleksija ili raspršenje. Zadnji segment kontrolnog niza definira ograničenja da u svakoj pojedinoj zraci može biti ukupno najviše dvije difrakcije i jedno raspršenje.

3.2.2 Određivanje vidljivosti zrake

Vidljivost između pojedinih čvorova ovisi o načinu širenja elektromagnetskog vala. Uvjeti vidljivosti za pojedine mehanizme propagacije se razlikuju pa, na primjer, objekt koji je vidljiv difuznom raspršenju ne mora nužno biti vidljiv refleksiji itd. Za refleksiju i raspršenje vrijedi da su vidljivi samo objekti koji se nalaze u poluprostoru definiranom normalom na zid na kojem su se ove pojave dogodile, dok za difrakciju vrijedi da su vidljivi objekti koji se nalaze unutar konkavne zone gledano od ruba zgrade na kojoj se difrakcija dogodila. Osim toga, o vrsti propagacijskog mehanizma ovisi i način određivanja pozicije virtualnog izvora (VTx), odnosno točke u kojoj bi bio odašiljač da između odašiljača i prijamnika ne postoji

prepreka. Područja vidljivosti i pozicije VTx-a za svaku vrstu propagacije prikazani su na slici 3.2.



Slika 3.2 Područja vidljivosti i pozicije virtualnog izvora za različite načine propagacije

Određivanje vidljivosti pojedinog objekta temelji se na ispitivanju geometrijskih kriterija, kao što je prikazano na slici 3.3.



Zidovi *i* i *j* međusobno nisu vidljivi ako vrijedi:

$$0 < \operatorname{acos}(\widehat{\mathbf{n}_{\iota}} \cdot \widehat{\mathbf{n}_{j}}) < \frac{\pi}{2} \text{ na desnoj strani, odnosno}$$
$$(-\pi) / 2 < \operatorname{acos}(\widehat{\mathbf{n}_{\iota}} \cdot \widehat{\mathbf{n}_{j}}) < 0 \text{ na lijevoj strani}$$

Prema primjeru sa slike, zidovi 3 i 4 nisu vidljivi sa zidova 1, 2 i 5; zid broj 2 je vidljiv izravno s Tx (n_{Tx} je dobiven povezivanjem Tx i središta zida br. 2).

Određivanje vidljivosti zrake za cilj ima izgradnju tzv. *stabla vidljivosti* (slika 3.4), koje je okosnica 3D-RT simulatora. Stablo vidljivosti ima slojevitu strukturu, a sastoji se od čvorova i grana, koji povezuju objekt na kojem je došlo da interakcije sa zrakom i vrstu propagacijskog mehanizma do kojeg je došlo. Svaki čvor predstavlja jedan objekt u danom scenariju (npr. zid zgrade, rub zgrade i slično), dok grane stabla predstavljaju komponentu zrake između dviju točaka (dva čvora) među kojim postoji optička vidljivost (LOS). Stablo vidljivosti gradi se rekurzivno počevši od korijena stabla, u kojem se nalazi Tx. Čvorovi u prvom sloju sadrže sve objekte koji se mogu vidjeti izravno od odašiljača, čvorovi u drugom sloju objekte koji se vide iz pozicije objekata u prvom sloju itd. Procedura se nastavlja do dozvoljene dubine koja je definirana maksimalnim brojem dozvoljenih uzastopnih interakcija, N_{EV} . Stablo završava listom, odnosno prijamnikom Rx do kojeg je došla praćena zraka.



Slika 3.4 Stablo vidljivosti

Vidljivost objekata u dvije dimenzije može se jednostavno odrediti, no u 3D procedura je znatno složenija, osobito ako se radi o difrakciji. U slučaju difrakcije o rubove zgrada, zbog efekta Kellerovog stošca [80],[81], virtualni izvor se vertikalno giba i moguće ga je precizno odrediti tek nakon što je utvrđena putanja (tj. vidljivost) između odašiljača i prijamnika. Stoga se izgradnja stabla vidljivosti u korištenom 3D-RT alatu odvija u dva koraka [79]. U prvom koraku se određuje vidljivost zrake: zraka se slijedi od odašiljača do prijamnika, utvrđuju se svi objekti na putanji i načini širenja vala koje uzrokuju interakcije objekata sa zrakom. Kada je utvrđena vidljivost i poznata putanja, slijedi drugi korak u kojem se zraka prati unatrag od prijamnika do odašiljača (engl. *backtracking*), kako bi se napravile korekcije, ako su potrebne. U slučaju LOS, refleksije i raspršenja točna putanja je poznata već u prvom koraku jer je VTx zrake fiksna točka. U slučaju difrakcije ili mješovitih zraka koje su prošle barem jednu difrakciju, zraku je potrebno korigirati. U prvom se koraku kao točka difrakcije uzima točka na sredini ruba zgrade, a stvarne točke difrakcije utvrđuju se tijekom *backtracking* procedure. Pronalazak stvarne točke interakcije proizlazi iz sljedeće slike:



Slika 3.5 Kellerov stožac za slučaj difrakcije

Dakle, incidentna zraka se u točki difrakcije rasipa u nekoliko smjerova, u obliku stošca. Za određivanje pozicije P mora biti zadovoljen uvjet:

$$\beta_d = \beta_i$$



Drugim riječima, zraka se projicira iz incidentne u difraktiranu ravninu (slika 3.6):

Slika 3.6 Projekcija difraktirane zrake u difrakcijsku ravninu

Za virtualno praćenje zrake kroz prostor zraku je potrebno "odmotati", odnosno pronaći njezin virtualni izvor. Dvodimenzionalni prikaz "odmotane" zrake koja je prošla više difrakcija, nalazi se na slici 3.7.



Slika 3.7 Praćenje difraktirane zrake unatrag

3D-RT simulator omogućuje i simuliranje propagacije preko krovova (engl. *over the rooftop* - ORT). U slučaju difrakcije preko krovova u trodimenzionalnoj okolini, propagacija nije ograničena najkraćim putem nego treba uzeti u obzir sve moguće refleksije i raspršenja o visoke zgrade i druge objekte, koje se preko krovova, mogu pojaviti u nekoj ulici. Kada se izgradi stablo vidljivosti, svi objekti vidljivi s barem jednog radijskog terminala uzimaju se u obzir za ORT propagaciju. Zato je za izračun ove vrste propagacije nužno iznimno dugo vrijeme računanja.

3.2.3 Izlazni podaci

Kada je izgrađeno stablo vidljivosti, mogu se izračunati vrijednosti električnog polja, snage i drugih parametara svake pojedine zrake. Rezultati simulacija sadrže podatke o svakoj pojedinoj zraci koja se pojavila tijekom simulacija. Ti podaci obuhvaćaju njezine geometrijske karakteristike (dolazne i odlazne kutove u tri dimenzije, duljinu zrake, kašnjenje), vrstu propagacije (LOS, refleksija, difrakcija, raspršenje) te elektromagnetska svojstva (snaga EM vala, električno polje u tri dimenzije, polarizacija vala itd).

Rezultati simulacija za svaku zraku sadrže sljedeće podatke:

Veličina		Opis	
X _{RX}	Y _{RX} Z _{RX}	Koordinate prijamnika	
X_1 Y_1 Z_1			
X _i	$\begin{array}{c} Y_i \\ Z_i \end{array}$	Koordinate i-te interakcije do koje je došlo	
X _{TX}	Y _{TX} Z _{TX}	Koordinate odašiljača	
ORT	_flag	Označava je li došlo do propagacije preko krovova ili ne ("over-the-rooftop", ORT)	
TX_id	, RX_id	Indeksi Tx i Rx	
AoA_phi	AoA_theta	Dolazni kutovi u azimutu i elevaciji	
AoD_phi	AoD_theta	Odlazni kutovi u azimutu i elevaciji	
Delay	(µsec)	Kašnjenje zrake	
Ray_Powe	r (dB-unit)	Snaga zrake	
G _R (Ao	A)	Dobitak prijamne antene u smjeru dolaznog vala	
τ		Polarizacijski faktor	
Re{ I _C }, In	n{ I _C }	Jakost struje inducirane na prijamniku; kompleksna veličina	
Re{ E_x }	Im{		
E _x }			
$Re\{ E_y \}$	Im{ E_y	Jakost električnog polja, u tri dimenzije; kompleksna veličina	
}			
Re{ E _z }	Im{ E _z		
}			
		Broj refleksija (N Refl), difrakcija (N Diffr) i raspršenja (N Scat) kroz koja je	
N Refl, N Diffr, N Scat		prošla zraka	

TABLICA III POPIS PODATAKA ZA SVAKU ZRAKU DOBIVENU SIMULACIJAMA
Izlazni podaci sumirani su u četiri izlazna dokumenta:

- *.rays* dokument sadrži sve geometrijske podatke za svaku zraku i/ili njezin segment te oznaku objekta na kojem je došlo do interakcije sa zrakom (oznake zidova ili rubova zraka)
- *.mr* dokument sadrži elektromagnetska svojstva svake pojedine zrake te vrstu propagacije koja se dogodila. U ovom su dokumentu zapravo filtrirani podaci koji sadrže samo fizikalna svojstva svake zrake
- .pdp sadrži iste podatke kao i .mr, ali u nešto drugačijem formatu
- *.pow* sadrži vrijednosti o električnom polju (u tri dimenzije), strujnom vektoru i polarizaciji

Radijski signal na prijamniku Rx može se modelirati kao skup zraka, od kojih svaka *i*-ta zraka ima svoju kompleksnu vektorsku amplitudu E_i izračunatu s točnim faktorom slabljenja koji se razlikuje za različite načine propagacije [78],[82]. U slučaju LOS koristi se formula za propagaciju kroz slobodni prostor, dok se za refleksiju, raspršenje i difrakciju o vertikalne rubove zgrada polje se množi s odgovarajućim faktorom. Za slobodni prostor, odnosno LOS komponentu, daleko polje emitirano u nekoj generičkoj točki $P(r, \theta, \varphi)$ od odašiljačke antene može se izračunati iz ulaznog signala (ne samo snage) [78]:

$$\vec{E}_{T}(r,\theta_{T},\varphi_{T}) = I_{T} \cdot \sqrt{\frac{Z_{T} \cdot \eta \cdot g_{T}(\theta_{T},\varphi_{T})}{16\pi}} \cdot \frac{e^{-j\beta r}}{r} \cdot \hat{p}_{T}(\theta_{T},\varphi_{T})$$

$$= \vec{E}_{T0}(\theta_{T},\varphi_{T}) \cdot \frac{e^{-j\beta r}}{r} \qquad (3.1)$$

gdje je Z_T impedancija antene, I_T fazor struje koja napaja antenu, g_T funkcija dobitka antene, η intrinsična impedancija medija, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ valni broj, a p_T antenski polarizacijski vektor. Komponente električnog polja nastale kao posljedica refleksije, difrakcije i raspršenja računaju se prema formulama iz poglavlja 2. Alat za propagaciju uzima u obzir i difuzno raspršenje dobiveno zbog hrapavosti površine na koju nailazi zraka [81],[82].

Fazor struje koju je inducirala k-ta zraka na prijamnoj strani može se izračunati (prema teoremu recipročnosti) kao [78]:

$$I_R^k = -j\lambda \sqrt{\frac{\Re e(Y_R)g_R(\theta_R^k, \phi_R^k)}{\pi\eta}} \{ \vec{p}_R(\theta_R^k, \phi_R^k) \cdot \vec{E}_R^k \}$$
(3.2)

gdje je $Y_R = 1/Z_R$, index *R* se odnosi na prijamnik, (θ_R^k, ϕ_R^k) su dolazni kut u azimutu i elevaciji (s obzirom na lokalni koordinatni sustav s ishodištem u Rx). Ukupna koherentna snaga na prijamniku dana je izrazom [78]:

$$P_{R} = \frac{|I_{R}^{TOT}|^{2}}{8 \cdot \Re e(Y_{R})} = \frac{\left|\sum_{k=1}^{N} I_{R}^{k}\right|^{2}}{8 \cdot \Re e(Y_{R})} = \frac{-j\lambda \sqrt{\frac{\Re e(Y_{R})g_{R}(\theta_{R}^{k}, \phi_{R}^{k})}{\pi \eta}} \{\vec{p}_{R}(\theta_{R}^{k}, \phi_{R}^{k}) \cdot \vec{E}_{R}^{k}\}}{8 \cdot \Re e(Y_{R})}$$
(3.3)

pri čemu g_R predstavlja dobitak antene, a \vec{p}_R polarizacijski vektor na prijamnoj anteni, u odnosu na smjer dolaska pojedine zrake. U slučaju da je prisutna samo LOS komponenta, vrijedi:

$$P_R = \frac{\left|\vec{E}\right|^2}{2\eta} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} g(\theta_R, \phi_R) = \frac{\left|\vec{E}\right|^2}{2\eta} \cdot A_{eff}(\theta_R, \phi_R)$$
(3.4)

pri čemu je A_{eff} efektivna površina antene. η je otpor slobodnog prostora, a λ valna duljina.

Kod difrakcije preko krovova i difuznog raspršenja, zbog njihovih nekoherentnih svojstava, zrake koje su imale neki od ova dva fenomena, zbrajaju se nekoherentno, odnosno po snazi:

$$P_{nekoherentno} = \sum_{k=1}^{N_{nekoh}} \frac{\left|E_{nekoh}^{k}(\theta_{R}^{k}, \phi_{R}^{k})\right|^{2}}{2\eta} A_{eff}(\theta_{R}^{k}, \phi_{R}^{k})$$
(3.5)

Ukupna snaga zapravo je zbroj koherentne i nekoherentne komponente:

$$P_R^{TOT} = P_R + P_{nekoherentno}$$
(3.6)

3.3 Računalna složenost

Simulacije praćenjem zrake procesorski su vrlo zahtjevne i traju dugo, što je ujedno i najveća mana ove metode te glavni razlog zašto simulacije praćenjem zrake nisu dominantan alat za modeliranje propagacije u radiokanalu. Najzahtjevniji dio simulacija je izgradnja stabla vidljivosti, čije trajanje izravno ovisi o broju interakcija, broju prijamnika i broju objekata, odnosno zgrada, u samoj mapi. U dostupnoj literaturi mogu se pronaći različiti prijedlozi za ubrzavanje simulacija, koji između ostalog uključuju pojednostavljenje karata, čime se značajno smanjuje vrijeme trajanja simulacija. Jedan od algoritama za pojednostavljenje digitalnih podloga razvijen je također na Sveučilištu u Bologni, a detaljno je opisan u [83],[84]. Princip algoritma prikazan je na slikama 3.8 i 3.9.



Slika 3.8 Pojednostavljenje mape s obzirom na poziciju Tx i prijamnika Rx [83]



Slika 3.9 Metode pojednostavljenja digitalnih karata: a) preoblikovanje zgrada koje imaju puno uglova;b) spajanje zgrada iste visine čiji je razmak malen

Algoritam za pojednostavljenje karte koristi dva kriterija. Prvi uzima u obzir položaj Tx-Rx staze u prostoru te odbacuje zgrade koje sigurno ne utječu na propagaciju, smanjujući time ukupni broj objekata (slika 3.8). Drugi kriterij u obzir uzima oblik zgrade jer se preoblikovanjem zgrada koje imaju puno uglova (slika 3.9a) ili spajanjem zgrada iste visine s malim razmakom između (slika 3.9b) može postići značajno pojednostavljenje, uz neznatno smanjenje točnosti.

Pojednostavljenjem karata vrijeme simulacije značajno se smanjuje, a rezultati simulacija daju približno iste rezultate za većinu fenomena, uz izuzetak nekih specifičnih i malo vjerojatnih scenarija. U ovom istraživanju simulacije su provedene za oba slučaja – za originalne digitalne karte i pojednostavljene digitalne karte. Usporedba vremena trajanja simulacija za primjer jednog scenarija dana je u Tablici IV.

Digitalna karta Stockholma				
	Prije pojednostavljenja	Nakon pojednostavljenja		
Broj zgrada	4241	569		
Trajanje simulacije	5 dana	18 sati		

TABLICA IV USPOREDBA VREMENA SIMULACIJA SA I BEZ POJEDNOSTAVLJENJA MAPE

Iz tablice se vidi da je vrijeme trajanja simulacija u slučaju pojednostavljene digitalne karte značajno smanjeno, ali je i simulirana okolina manje detaljna. Broj zgrada koje su uzete u

obzir znatno je manji od onog u originalnoj mapi, no zahvaljujući algoritmu koji uzima u obzir samo zrake koje su relevantne za zadani odašiljač i prijamnik, većina preostalih (u primjeru iz tablice IV više od 3500 zgrada) zapravo je zanemariva.

Preoblikovanje zgrada kao na slici 3.9 u nekim specifičnim scenarijima može utjecati na ukupnu sliku radijske okoline, no za razmatranja u ovoj disertaciji, dio potencijalnih zraka koje su mogle nastati na nepravilnim rubovima zgrada, može se zanemariti.

3.4 Sažetak poglavlja

U ovom poglavlju ukratko je opisana metodologija kojom je provedeno istraživanje. Na samom početku, opisana je metoda slijeđenja zrake te elaborirane prednosti simulacija korištenjem ove metode u odnosu na mjerenja. Također, u poglavlju je detaljnije opisan 3D-RT alat kojim su provedene simulacije, njegov princip rada te format ulaznih i izlaznih podataka. Na kraju, dotaknuto je pitanje računalne složenosti simulatora zraka te opisan algoritam pojednostavljenja digitalnih mapa, kojim se može znatno smanjiti broj ulaznih podataka.

Pomoću 3D-RT alata dobiveni su svi testni scenariji na kojima je provedena analiza višestazne okoline i fenomena uzrokovanih kretanjem mobilne stanice, kako je objašnjeno u iduća dva poglavlja.

Poglavlje 4

ANALIZA DINAMIKE PROMJENE U VIŠESTAZNOJ OKOLINI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati proučavanja specifičnih fenomena rasprostiranja elektromagnetskog vala u urbanoj sredini te analiza dinamike promjene radijske okoline uzrokovane kretanjem mobilne stanice kroz prostor. Istraživanje je ograničeno na analizu fenomena povezanih s difrakcijom, koja je dominantan način širenja vala u urbanoj sredini. Poglavlje sadrži dva dijela: prvi opisuje relevantne parametre, a drugi sadrži rezultate simulacija, koji daju uvid u referentne vrijednosti pojedinih parametara. Uveden je novi pojam, entitet zrake, kao skup istovrsnih zraka, čiji se virtualni izvor kontinuirano mijenja s promjenom pozicije mobilne stanice. Ustanovljavanjem područja vidljivosti pojedinog entiteta zraka, ustanovljena su područja stacionarnosti elektromagnetskog okruženja za mobilnu stanicu. Pomoću entiteta zraka ostvareno je svrsishodno objedinjavanje zraka u skupine, koje omogućuje interpoliranje rezultata rasprostiranja metodom slijeđenja zrake, a time modeliranje po želji brzih promjena u mobilnom radiokanalu. Poglavlje završava ocjenom postojećih parametara COST modela te usporedbom dobivenih rezultata s vrijednostima u dostupnoj literaturi.

4.1 Principi modeliranja kretanja u referentnom modelu radiokanala

Kretanje mobilne stanice kroz prostor uzrokuje stalne promjene radijske okoline, a time i promjene uvjeta u pojedinom radiokanalu. U stvarnosti se te promjene ne primjećuju jer korisnik postepeno prelazi iz jedne radijske okoline u drugu, ne prekidajući pri tome, osim u

iznimnim slučajevima, već ostvarenu vezu s (nekom) baznom stanicom. Međutim, da bi se ovakvi uvjeti u radiokanalu modelirali, potrebno je omogućiti kontinuirano praćenje mobilne stanice kroz prostor, što predstavlja izazov.

Prije svega, za implementaciju mobilnosti u referentni model radiokanala potrebno je dobro poznavanje dinamike promjena u višestaznoj okolini, kao i poznavanje specifičnih fenomena vezanih za rasprostiranje elektromagnetskog vala u takvoj radijskoj okolini. To se posebno odnosi na scenarije u kojima mobilna stanica prelazi iz jedne radijske okoline u drugu (npr. kretanje oko ugla), pri čemu dolazi do vrlo brzih i naglih promjena svojstava u radiokanalu. Za signal u mobilnom kanalu karakteristično je raspršenje spektra te raspršenja kašnjenja i dolaznih kutova na prijamu, sve zahvaljujući brzim promjenama višestazne okoline i Dopplerovom pomaku, koji ovise o vrsti propagacije i brzini kretanja mobilne stanice.

Da bi se istražile promjene u višestaznoj okolini, potrebno je istražiti ponašanje svake pojedine višestazne komponente. Općenito, u simulacijama metodom slijeđenja zrake svaka zraka (višestazna komponenta) ima svoj virtualni izvor, koji prijamnik vidi kao stvarni izvor vala (osim u slučaju LOS, gdje je izvor zrake stvarni odašiljač), a kako o relativnoj brzini između izvora vala i kretanja mobilne stanice ovise propagacijska svojstva u (mobilnom) radiokanalu, potrebno je točno modelirati kretanje virtualnog izvora i povezati to kretanje s kretanjem mobilne stanice.

Nadalje, da bi se omogućilo virtualno kontinuirano praćenje mobilne stanice, potrebno je ulazne podatke "proširiti" tako da vrijede za sve točke u prostoru. Naime, referentni modeli radiokanala generiraju se na temelju diskretnih ulaznih podataka dobivenih mjerenjima ili simulacijama i zapravo daju stvarnu sliku radiokanala samo u tim točkama. U postojećim referentnim modelima radiokanala uvriježen je stohastički pristup, u kojem se na temelju skupa poznatih (izmjerenih ili simuliranih) podataka generira funkcija koja ih najbolje opisuje, a onda se pomoću tako dobivene stohastičke razdiobe, generiraju potrebni parametri. Iako nije prvi izbor, za opisivanje radiokanala puno je primjereniji deterministički pristup, koji se temelji na stvarnim podacima i podrazumijeva točan i detaljan opis svojstava radijske okoline, o čemu će više riječi biti u sljedećem poglavlju.

Simulacije metodom slijeđenja zrake omogućuju praktički beskonačnu prostornu rezoluciju, no to nije realno u praksi jer zahtijeva ogromne računalne resurse i vrijeme. Ipak, simulacije moraju prikazivati sve fenomene koji se pojavljuju u radiokanalu pa je potrebno pronaći razumnu rezoluciju. Za određivanje adekvatne gustoće simulacija, kojom će se zabilježiti sve pojave u radijskoj okolini, ključno je poznavanje dinamike promjena višestazne okoline. Uvjet za adekvatnu rezoluciju je nepromjenjivost elektromagnetskih svojstava između dviju simuliranih vrijednosti jer se tada vrijednosti u točkama koje nisu iz originalnog skupa ulaznih podataka mogu jednostavno interpolirati, uz zadržavanje točnosti ulaznih podataka. Na ovaj način ostvarilo bi se kontinuirano praćenje mobilne stanice kroz sve točke u radijskoj okolini.

Područja u kojima se svojstva u radijskoj okolini ne mijenjaju nazivaju **se područjima stacionarnosti**. U stvarnosti prave stacionarnost ne postoji, osobito u slučaju difrakcije, no za modeliranje radiokanala se koriste različite metode kojima se opisuje stacionarnost pojedinih fenomena.

Ukratko, pojave koje su ključne za implementaciju mobilnosti u referentni model radiokanala mogu se sumirati na sljedeći način:

- Modeliranje kretanja virtualnih izvora virtualni izvori su karakteristični za zrake dobivene simulacijama metodom slijeđenja zrake, a već su ranije definirani kao pozicije na kojima bi se nalazio izvor da je zraka "razmotana" od Rx do Tx bez prepreka. Pozicija VTx ovisi o vrsti propagacije, a ključno je povezati kretanje VTx s kretanjem MS.
- Modeliranje Dopplerovog pomaka pravilno modeliranje Dopplerovog pomaka je obavezan dio implementacije mobilnosti u referentni model radiokanala. Dopplerov pomak je izravno povezan s brzinom kretanja mobilne stanice, što će utjecati na preostale parametre jer je brzina kretanja korisnika jedan od faktora koji izravno utječe na dinamiku promjene radijske okoline te raspršenje dolaznih kutova i kašnjenja na mjestu prijama.
- Modeliranje prelaska iz jedne radijske okoline u drugu da bi se osiguralo kontinuirano praćenje mobilne stanice u modelu, potrebno je definirati način na koji će se modelirati promjena radijske okoline ili prespajanje s jedne na drugu baznu stanicu, što se u stvarnosti odvija kontinuirano. Za to je potrebno istražiti svojstva na granici različitih radijskih okolina, što je moguće pomoću simuliranih podataka radiokanala u

vrlo finoj prostornoj rezoluciji, odnosno s velikom brzinom uzorkovanja.

U urbanom scenariju difrakcija je dominantan način rasprostiranja elektromagnetskog vala, dok se refleksija i izravna zraka pojavljuju rijetko pa je istraživanje ograničeno na pojave povezane uz difrakciju. Difuzno raspršenje se također pojavljuje u urbanim scenarijima i može biti značajno ako se nalazi u blizini mobilne stanice, no u ovom istraživanju nije uzeto u obzir.

4.1.1 Modeliranje kretanja virtualnog izvora

Pozicija virtualnog izvora razlikuje za različite načine rasprostiranja elektromagnetskog vala. U slučaju refleksije i raspršenja pozicija virtualnog izvora u prostoru je fiksna. Za raspršenje se kao točka interakcije i virtualni izvor se uzima središte zida zgrade, dok je za reflektirane zrake, bilo da je riječ o jednostrukim ili dvostrukim refleksijama, virtualni izvor zapravo zrcalna slika stvarnog izvora i ne mijenja se kretanjem mobilne stanice (slika 4.1).



Slika 4.1 Pozicija virtualnog izvora u slučaju refleksije

Međutim, u slučaju difrakcije, zraka se u točki interakcije raspršuje u (Kellerov) stožac, a točna pozicija interakcije kliže niz rub objekta na kojem je došlo do difrakcije, i to ovisno o kretanju Rx (slika 4.2). Ako se mobilna stanica kreće tangencijalno po rubu konusa (točka C

na slici), točka difrakcije se ne mijenja. Ako se Rx kreće radijalno, odnosno ako siječe rub Kellerovog stošca, kao u točkama A, B i D, lokacija točke difrakcije se mijenja i različita je za svaku od spomenutih točaka prijama. U stvarnosti je radijalno kretanje u odnosu na stožac puno vjerojatnije od tangencijalnog i može izazvati vrlo brze promjene u radiokanalu.

Kod simulacija metodom slijeđenja zrake, u slučaju difrakcije o rubove poznato je da točka interakcije leži negdje na rubu zgrade pa je njezina pozicija u x-y ravnini poznata (uz pretpostavku da su rubovi zgrade okomiti na ravninu x-y), no z-koordinata se mijenja ovisno o poziciji prijamnika i može se točno utvrditi tek kada je poznata lokacija prijamnika. Zato se tijekom *backtracking* procedure u korištenom 3D-RT alatu putanja zrake korigira, kako bi se ustanovila točna pozicija točaka difrakcije te, u konačnici, virtualnog izvora difraktirane zrake.



Slika 4.2 Pozicija virtualnog izvora u slučaju difrakcije klizi po rubu zgrade na kojem se difrakcija pojavila, zbog Kellerovog stošca

4.1.2 Modeliranje Dopplerovog efekta u slučaju difrakcije

Općenito, za modeliranje Dopplerovog efekta potrebno je promotriti cijelu zraku, od njezinog (virtualnog) izvora do točke prijama. No, prijamnik kao izvor vala zapravo vidi samo

zadnju točku interakcije, što za modeliranje predstavlja značajno pojednostavljenje, osobito u slučaju višestrukih interakcija. Za refleksiju se ovakvo pojednostavljenje može primijeniti jer je zadnja točka interakcije uvijek leži na pravcu koji povezuje VTx i prijamnik, pa se relacija za izračun Dopplerovog efekta ne mijenja, a može se izračunati iz izraza (1.17) i (1.18).

Međutim, u slučaju difrakcije VTx se kreće pa je potrebno ispitati može li se primijeniti isto pojednostavljenje za modeliranje Dopplerovog efekta ili ne. To se može učiniti usporedbom formule za izračun Dopplerovog pomaka u oba slučaja, kako je opisano u nastavku.

Za izvod formule za izračun Dopplerovog efekta [85]-[88] promatramo dva međusobno ortogonalna slučaja kretanja mobilne stanice (slika 4.3). U prvom slučaju MS se kreće prema rubu zgrade (a), a u drugom oko zgrade (b). Ovakvi smjerovi kretanja međusobno su ortogonalni zato što se njihovom linearnom kombinacijom mogu prikazati sva moguća kretanja. Na slici 4.3a) jasno se vidi da je, osim dolaznog kuta, geometrija zraka kada se korisnik kreće iz 1 u 2 ili iz 1' u 2' identična.



Slika 4.3 Dva međusobno ortogonalna načina kretanja MS te njihov specifični utjecaj na pozicije ZTI i VTx.

Kao što se može vidjeti sa slike 4.3, u slučaju (a) radijalnog kretanja prema zadnjoj točki interakcije (ZTI), virtualni izvor je statičan, a ZTI se kliže, dok u slučaju (b) u kojem MS kruži oko ruba zgrade, ZTI ostaje statičan, a VTx kruži istom kutnom brzinom kao i korisnik. Očito je da je u slučaju (a) Dopplerov frekvencijski pomak najveći, dok je u slučaju (b)

minimalan, odnosno nula. Zbog toga je modeliranje situacije prikazane na slici 4.3b) trivijalno jer relativna brzina između korisnika i virtualnog izvora ili zadnje interakcije, projicirana na liniju koja povezuje korisnika i neku od ove dvije točke, iznosi nula, odnosno nema Dopplerovog pomaka niti u jednom od ta dva slučaja.

Za izvod situacije (a) u dva slučaja, uzimajući VTx kao izvor vala i uzimajući ZTI kao izvor vala, bez smanjenja općenitosti, ali radi jednostavnosti, promatramo jedan specifičan slučaj u kojem je korisnik točno na granici sjene, a ZTI i virtualni izvor su koplanarni s korisnikom i rubom zgrade na kojem je nastala difrakcija, kao što je prikazano na slici 4.4. Dopplerov frekvencijski pomak može se izračunati iz formule:

$$f_d = f_0 \frac{v_0}{c} \tag{4.1}$$

gdje je v_0 relativna brzina između korisnika i izvora (bazne stanice), f_d Dopplerov frekvencijski pomak, a f_0 frekvencija nositelja. Najlakši načini za formiranje izraza za relativnu brzinu između izvora i korisnika je diferencijacija njihove udaljenosti, u ovom slučaju kao funkcije kretanja korisnika.

Za izračunavanje Dopplerovog pomaka pretpostavlja se da se korisnik kreće radijalno prema uglu zgrade i da se nalazi na granici sjene radi pojednostavljene geometrije, no isti principi vrijede i za područje unutar sjene, kao što je objašnjeno na slici 4.3a).



Slika 4.4 Geometrija postavljena za izvod Dopplerovog pomaka, bilo iz VTx ili iz ZTI. Deblje linije predstavljaju rubove zgrada i BS s antenama

Najprije ćemo razmotriti slučaj u kojem je izvor ujedno i virtualni izvor (VTx), što u stvarnosti odgovara stvarnom izvoru vala kada je korisnik na granici sjene. Dopplerov pomak koji uzrokuje relativna brzina v_0 je pozitivan u slučaju kada se korisnik približava izvoru, odnosno njihova se međusobna udaljenost smanjuje pa vrijedi:

$$v_{0VTx} = -\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \tag{4.2}$$

gdje se, gledajući iz perspektive na slici 4.3a), udaljenost *r* između korisnika i virtualnog izvora može izraziti kao:

$$r = \sqrt{(x+d)^2 + h^2}$$
(4.3)

gdje je d fiksna udaljenost između ruba zgrade i bazne stanice, a h je visina antene bazne stanice. Iz (4.3) slijedi:

$$\mathrm{d}r = \frac{x+d}{r}\mathrm{d}x\tag{4.4}$$

Kako se korisnik kreće prema uglu, koordinata x se smanjuje pa je brzina korisnika:

$$v_k = -\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{4.5}$$

Iz (4.2) Dopplerov pomak uzrokuje relativnu brzinu virtualnog izvora:

$$v_{0VTx} = -\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = -\frac{x+d}{r}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v_k\frac{x+d}{r}$$
(4.6)

U drugom slučaju, kada se kao izvor vala uzme ZTI, koja je pozicionirana u smjeru dolaska vala, za izvod iznosa Dopplerovog pomaka u situaciji na slici 4.3a), izračun počinjemo s vremenskom diferencijacijom udaljenosti između korisnika i ZTI:

$$v_{0ZTI} = -\frac{\mathrm{d}r_{ZTI}}{\mathrm{d}t} \tag{4.7}$$

gdje je r_{ZTI} udaljenosti između korisnika i ZTI-a, prema slici 4.4. Iz sličnosti trokuta dobiva se:

$$r_{ZTI} = \frac{x}{x+d}r = \left(1 - \frac{d}{x+d}\right)r \tag{4.8}$$

U ovom slučaju Dopplerov pomak uzrokuje relativnu brzinu:

$$v_{0ZTI} = -\frac{\mathrm{d}r_{ZTI}}{\mathrm{d}t} = -\frac{x}{x+d}\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} - \frac{d\cdot r}{(x+d)^2}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$$
(4.9)

Ako pomoću (4.6) eliminiramo dr dobiva se:

$$v_{0ZTI} = \frac{x}{x+d} \cdot v_k \cdot \frac{x+d}{r} + \frac{d \cdot r}{(x+d)^2} \cdot v_k = \frac{v_k}{r} \left[x + \frac{r^2 d}{(x+d)^2} \right]$$
(4.10)

Konačno, v_{0ZTI} možemo izraziti preko izraza za v_{0VTx} (4.6) da bismo dobili točnu razliku u dobivenim relativnim brzinama:

$$v_{0ZTI} = \frac{v_k}{r}(x+d) + \frac{v_k}{r}d\left[\frac{r^2}{(x+d)^2} - 1\right] = v_{0VTx} + v_k\frac{d}{r}\left[\frac{r^2}{(x+d)^2} - 1\right]$$

= $v_{0VTx} + v_k\frac{d\cdot h^2}{r(x+d)^2}$ (4.11)

Usporedbom izraza 4.6 i 4.11 može se vidjeti da se izračun Dopplerovog pomaka razlikuje u slučaju da se računa s obzirom na ZTI i točku u kojoj se nalazi VTx, i to za vrijednost pogreške, v_{err} :

$$v_{err} = v_U \frac{d \cdot h^2}{r(x+d)^2} \tag{4.12}$$

Dakle, za točno modeliranje Dopplerovog efekta, virtualni izvor treba staviti isključivo na lokaciju koju, gledano sa strane kašnjenja i dolaznog kuta, mobilna stanica vidi kao virtualni izvor jer ZTI daje netočnu vrijednost Dopplerovog pomaka.

Može se zaključiti da difrakcija oko ruba zgrade ima sljedeća svojstva:

- a) kada se korisnik kreće radijalno, izravno prema uglu, odnosno ZTI, vrijedi:
 - virtualni izvor je stacionaran
 - ZTI klizi niz rub

- postoji Dopplerov pomak, koji se izračunava iz relativne brzine između korisnika i virtualnog izvora, a ne iz relativne brzine između korisnika i zadnje točke interakcije
- b) kada korisnik kruži oko ugla, odnosno ZTI, vrijedi:
 - ZTI se ne mijenja, odnosno ne klizi po rubu zgrade
 - virtualni izvor kruži jednakom kutnom brzinom kao i korisnik
 - nema Dopplerovog pomaka

4.1.3 Entitet zrake i područje vidljivosti

Svaku višestaznu komponentu, odnosno zraku, karakteriziraju njezin izvor, duljina, kut dolaska na prijamnik, lokacija prijamnika, vrijeme kašnjenja i snaga zrake. Gledano sa strane prijamnika, svaka zraka ima i svoj vijek trajanja, od trenutka kad je identificirana u prostoru i počinje se slijediti do trenutka kada, zbog svojstava radijske okoline, ne nestane. Dio zraka koje su vidljive prijamniku koji se kreće, imaju izvor u istoj točki i posljedica su istog fenomena, pa se prema tome mogu grupirati.

U postojećim referentnim modelima radiokanala uobičajeno je grupiranje zraka u klastere prema dolaznom kutu i kašnjenju (vidi poglavlje 2), no kriteriji za svrstavanje pojedine zrake u neki klaster najčešće nisu dovoljno precizni već se klaster modelira odabranom stohastičkom razdiobom (npr. u COST modelima riječ je o Poissonovoj razdiobi). Stoga je u provedenom istraživanju uveden novi pojam [85]-[87] **entitet zrake**, koji omogućuje objedinjavanje zraka u skupine. Entitet zrake (EZ) je skup zraka koje prolaze kroz iste interakcije i istom vrstom propagacije. Može se objasniti posebno za refleksiju i difrakciju pomoću jednostavnog scenarija prikazanog na slici 4.5.



Slika 4.5 Jednostavan plan područja vidljivosti entiteta i pozicije VTx u slučaju refleksije

Scenarij se sastoji od jednog odašiljača, tri zgrade i prijamne ruta koja se nalazi u području pokrivanja. Uz pretpostavku da je antenski stup dovoljno visok, zrake koje se reflektiraju o zid će zbog geometrije biti prisutne samo na dijelu prijamne rute, npr. od Rx1 do Rx2 kao što je prikazano na slici za primjer jednostruke refleksije.

Na slici 4.6 prikazan je entitet zrake koji je posljedica jednostruke difrakcije o vertikalni rub A. Zbog zasjenjenja iza rubova B i C, ovaj entitet zrake prisutan je na prijamnoj ruti od Rx3 do Rx4 (zelena linija).



Slika 4.6 Jednostavan plan područja vidljivosti entiteta i pozicije VTx u slučaju difrakcije

Entiteti dobiveni grupiranjem zraka koje su prošle više interakcije, mogu se dobiti na jednak način, kao što je prikazano na slici 4.7 za mješovite interakcije.



Slika 4.7 Jednostavan plan područja vidljivosti entiteta i pozicije VTx za mješovite interakcije Dodatno svojstvo EZ je to da sve zrake imaju isti virtualni izvor, koji međutim može kontinuirano mijenjati lokaciju uz kontinuirano variranje položaja prijamnika. Na primjer, u slučaju difrakcije, virtualni izvor nije jedna točka za cijeli entitet nego dio kruga od VTx_{D3} do VTx_{D4} i kreće se kružno u ovisnosti o kretanju prijamnika po dijelu rute u kojem su prisutni entiteti [89],[90].



Slika 4.8 Prikaz pozicije VTx u slučaju dvostrukih refleksija

Kod višestrukih zraka situacija je složenija jer svaka komponenta zrake ima svoj virtualni izvor (slike 4.8 i 4.9). Može se zaključiti da će virtualni izvor kod čistih refleksija (isto vrijedi za raspršenje) uvijek biti fiksan, određen geometrijski prema poziciji odašiljača, objekta na kojem je došlo do refleksije i mobilne stanice. Slika 4.8. prikazuje dvostruku refleksiju, ali isto vrijedi i za višestruke čiste refleksije i raspršenja.

U slučaju čiste difrakcije ili mješovitih zraka koje sadrže barem jednu difrakciju, kretanje virtualnog izvora modelirat će se definiranjem kružnice, čije će središte i radijus ovisiti o putanji kretanja mobilne stanice i parametrima Kellerovog stošca. Općenito, u zrakama u kojima postoji barem jedna difrakcija virtualni izvor neće biti fiksan nego će se kretati po dijelu kružnice koja je paralelna s tlom, na visini odašiljača (slika 4.9).



Slika 4.9 Prikaz pozicije VTx u slučaju dvostrukih refleksija

Da bi se zrake dobivene simulacijama (ili mjerenjima) grupirale u entitete, razvijen je algoritam za obradu podataka koji dobivene zrake međusobno uspoređuje prema točkama interakcije i načinu propagacije te grupira u entitete sastavljene od onih zraka koje su prošle iste načine propagacije, imaju interakcije u istim točkama i s istim redoslijedom. Geometrijski uvjet kojim se ispituje pripadaju li dvije zrake istom entitetu ili ne može se vidjeti iz prikaza na slikama 4.5 - 4.9. Slike 4.5 i 4.6 su trivijalne jer prikazuju jednostruku interakciju, u kojem slučaju su relacije poznate.

Na slici 4.8 može se vidjeti da su obje zrake označene plavom bojom dvostruko reflektirane (prva refleksija o zid 1 na zgradi 1, a druga o zid zgrade 2) te da imaju isti virtualni izvor. Također, poštujući geometriju odabranog scenarija, između točaka Rx_{RR1} i Rx_{RR2} će se pojaviti "preostale" dvostruko reflektirane zrake, koje dolaze od istih virtualnih izvora. Ako se mobilna stanica kreće dijelom putanje između točaka Rx_{RR1} i Rx_{RR2} , na prijamu će dobivati dvostruke refleksije, odnosno vidjet će entitet zraka koji sadrži dvostruke refleksije s virtualnim izvorom VTx_{R2} .

Slika 4.9 prikazuje dvostruku refleksiju koja se pojavljuje na prijamnoj ruti između točaka Rx_{DD1} i Rx_{DD2} . Sve zrake na tom dijelu putanje posljedica su dviju difrakcija koje su se dogodile od odašiljača Tx do prijamnika – prva u točki A, a druga u točki C. Za usporedbu, zelenom bojom je označen drugi entitet, koji je također posljedica dvostruke difrakcije, ali ne u istim točkama – prva difrakcija također se dogodila u točki A, no druga u točki B.

U stvarnosti, radijska okolina nije homogena prema vrstama radijskih entiteta, odnosno na istom području mogu biti prisutni različiti fenomeni, što se u pojednostavljenom obliku prikazuje i slika 4.7. Stoga je ponašanje entiteta zrake svojevrsna mjera uvjeta u radijskoj okolini, koja daje uvid u specifična svojstva višestazne okoline izazvana kretanjem mobilne stanice i samom prirodom rasprostiranja EM vala. Duljina entiteta ujedno govori i o životnom vijeku pojedine, zrake, odnosno duljini "trajanja" zrake. Naime, početak i kraj entiteta, kao i sve točke između, čini jedna te ista zraka, koja kroz prostor prati MS koja se kreće. Dokle god je zraka vidljiva MS, postojat će i entitet. Stoga možemo reći da zrake unutar istog entiteta određuju **područje vidljivosti (PV)** i tako definirati novi parametar, kao dio rute kojom se kreće mobilna stanica, u kojem je određeni entitet vidljiv. Drugim riječima, algoritam grupiranja zraka u entitete prati zraku od njezinog postanka do njezinog nestanka iz područja vidljivosti mobilne stanice.

Veza između područja stacionarnosti i područja vidljivosti prikazana je slikom 4.10 na primjeru jednostruke refleksije i jednostruke difrakcije. U slučaju jednostruke refleksije virtualni je izvor nepomičan tijekom cijelog područja vidljivosti entiteta, pa je područje stacionarnosti jednako području vidljivosti. U slučaju difrakcije, virtualni izvor se kontinuirano giba te je područje stacionarnosti veličine nula i kad su područja vidljivosti eniteta duga. Konačno područje stacionarnosti može se dobiti jedino uvođenjem tolerancije promjene virtualnog izvora putem radijusa tolerancije, čija se veličina može primjereno odrediti kao zanemariv dio (npr. 1/10) valne duljine razmatranog sustava, te je time frekvencijski ovisan.



Slika 4.10 Geometrijski uvjet pripadnosti istom entitetu, uz uvođenje područja stacionarnosti za difrakciju

Koncept grupiranja zraka u entitete ima višestruke prednosti, o kojima će nešto više riječi biti kasnije. Već je na prvi pogled jasno da se grupiranjem zraka u skupine može značajno smanjiti broj ulaznih podataka kojima treba baratati, no pri tome treba paziti da se, slučajno ili namjerno, ne zanemari neki od fenomena koji se u radiokanalu pojavljuju. Stoga je posebno važno dobiti uvid u vijek trajanja svake višestazne komponente, odnosno duljinu entiteta zrake, te veličinu područja vidljivosti, kako bi se na adekvatan način mogla opisati dinamika promjene u radiokanalu na nekom području.

4.2 Analiza dinamike u radijskoj okolini pomoću 3D-RT simulatora

Kako bi se odredile vrijednosti definiranih parametara, napravljena ja analiza dinamike promjena u višestaznoj okolini pomoću simulacija metodom slijeđenja zrake. Budući da su fenomeni vezani za refleksiju, zbog fiksnog virtualnog izvora, puno jednostavniji za opisivanje, analiza je fokusirana na pojave vezane uz difrakciju. Stoga su za simulacije korišteni urbani scenariji, u kojima je difrakcija dominantna. Podaci dobiveni 3D-RT simulatorom [85]-[87] na dva testna scenarija opisana u nastavku, daju detaljan uvid u ponašanje svih detektiranih višestaznih komponenti. Koristeći algoritam za detekciju entiteta zraka, dobiveni rezultati svrstani su u entitete, pomoću kojih su određene vrijednosti parametara definiranih u prethodnom potpoglavlju.

4.2.1 Testni scenarij 1

Simulacije su provedene na digitalnom modelu Stockholma, na putanji duljine 200m kroz jednu od tipičnih ulica (slika 4.11). Putanja je ravna crta, ali se radijska okolina mijenja, s obzirom da putanja prolazi kroz raskrižja. Odašiljač snage 1W postavljen je iznad ostalih krovova, tako da parametri odgovaraju urbanoj makroćeliji, prema definiciji u COST modelima. Radi općenitosti, na odašiljaču i prijamniku su korištene omnidirekcijske antene, tako da su obuhvaćeni svi smjerovi zračenja. Nerealni smjerovi, odnosno sve zrake zanemarive snage, odbačeni su tijekom obrade podataka, uvodeći minimalnu prijamnu razinu od -150 dBW.



Slika 4.11 Digitalni modela Stockholma na kojem je postavljen odašiljač (Tx) i prijamna putanja A-B

Simulacije su napravljene za svaki metar putanje (tj. Rx pozicije), a zabilježeni su svi potrebni parametri: dolazni kutovi, vrijeme kašnjenja pojedine zrake, duljina zrake i interakcije koje je prošla te ukupna snaga (potpuni podaci o zraci nalaze se u tablici III).



Slika 4.12 Višestazna okolina u testnom scenariju

Na ovaj je način zapravo simulirano kretanje mobilne stanice duž ravne linije duljine 200m, a svakih 1m zabilježeni su propagacijski uvjeti koji su u tom trenutku prisutni. U postavkama za simulacije u obzir su uzeta najviše dva moguća uzastopna događaja uzduž zrake, od kojih svaki može biti refleksija ili difrakcija (raspršenje nije razmotreno zbog ograničenosti vremena i računalnih resursa). Dakle, moguće zrake su bile LOS, jednostruke i dvostruke refleksije, jednostruke i dvostruke difrakcije te mješovite zrake (refleksija+difrakcija i obrnuto). Iz opisanih simulacija dobiveno je ukupno oko 15000 zraka (slika 4.12).

S obzirom da je za simulacije odabran urbani scenarij u kojem je difrakcija dominantan način propagacije, gotovo u svakoj je zraci bila prisutna barem jedna difrakcija. Na cijeloj ruti je uočena samo jedna čista refleksija, i to na 92. metru putanje. Na svakoj pojedinoj lokacije detektirano je 25 do 311 zraka. U prosjeku, na svakoj je prijamnoj poziciji detektirano 76.91 zraka, uz disperziju od 58.71 zraka. Uvođenjem minimalne prijamne razine od -150 dBW, broj zraka značajno je smanjen, uz zanemarivo smanjenje ukupne snage prisutne na pojedinom prijamniku. Maksimalno smanjenje iznosilo je 0.76 dB, no u prosjeku, snaga je smanjena za zanemarivih 0.03 dB, uz disperziju od 0.067 dB. Rezultati su sumirani u tablici V.

	Ukupan # zraka	# zraka na pojedinom RX	Prosječan broj zraka na Rx	Disperzija # zraka
Neobrađeni podaci	15382	25 - 311	76.91	58.71
Broj zraka iznad minimalne prijamne razine	2243	1 - 39	11.21	9.88

TABLICA V UKUPAN BROJ ZRAKA DOBIVEN SIMULACIJAMA

Slika 4.13 pokazuje snagu svih zraka pristiglih na svaki pojedini prijamnik, prema vrsti propagacije kojom je zraka nastala. Prikaz uključuju samo zrake kojima je snaga veća od -150 dBW. Iz slike se može vidjeti da je gotovo sva snaga sadržana u zrakama koje su imale barem jednu difrakciju, uz izuzetak ukupne snage na 92. prijamniku, koja je znatno viša od preostalih točaka zbog čiste refleksije koja se u toj točki pojavila.



Slika 4.13 Prikaz dobivene snage po prijamnim lokacijama, za svaku propagacijsku metodu i ukupno. Crveni "skok" na grafu posljedica je čiste refleksije koja se pojavila na putanji

Za usporedbu, na istom su scenariju napravljene dodatne simulacije na pojednostavljenoj mapi Stockholma, koja sadrži značajno manji broj zgrada pa su simulacije znatno brže (kao što se može vidjeti u tablici IV). Iako je broj objekata u radijskoj okolini simplifikacijom mape značajno smanjen (gotovo 8 puta), broj simuliranih zraka iznosi 12951, odnosno 15,8% manje od originalnih 15382. Nakon primjene minimalne prijamne razine od -150 dBW, broj zraka smanjen je na 1933, odnosno 13,8% u odnosu na originalnih 2243. Rezultati su sumirani u tablici VI.

	Ukupan # zraka	# zraka na pojedinom RX	Prosječan broj zraka na Rx	Disperzija # zraka
Neobrađeni podaci	12951	23 - 165	64.74	50.55
Broj zraka iznad minimalne prijamne razine	1933	1 - 33	9.67	8.85

TABLICA VI UKUPAN BROJ ZRAKA DOBIVEN SIMULACIJAMA

Ovakav rezultat ide u prilog algoritmu za pojednostavljenje mape, s obzirom da su zrake koje su relevantne za odabrani scenarij, zadržane. Raspored snage tako dobivenih zraka na prijamniku prikazan je na slici 4.14. Kao i u prethodnom slučaju u obzir su uzete samo zrake čija je snaga veća od -150 dBW.



Slika 4.14 Prikaz snage na svakom prijamniku, prema propagacijskim mehanizmima

Iako je u pojednostavljenom modelu prisutno manje zraka, iz slika 4.13 i 4.14 može se vidjeti da je raspodjela na snage na prijamnicima gotovo ista, tako da se za razmatranja može koristiti skup podataka iz pojednostavljene mape, uz zanemarivu pogrešku. To uvelike ubrzava i pojednostavnjuje i simulacije i proces obrade podataka.

Primjenom algoritma za detekciju entiteta zrake, dobiveni rezultati iz tablice VI svrstani su u entitete. Raspodjela broja i duljine entiteta, prikazana je na slikama 4.15 i 4.16. Slika 4.15 prikazuje entitete dobivene iz originalne vrijednosti, obradom svih 12951 zrake. Na slici 4.16 u obzir su uzete samo zrake čija je snaga bila veća od -150 dBW. U prvom slučaju uočeno je 1229 entiteta, a u drugom 305.

Duljina entiteta varirala je od samo jednog do više desetaka metara. Većina entiteta duljih od 60m ima zanemariv utjecaj pa zbog jednostavnijeg prikaza podataka nije uvrštena u prikaz na slici 4.15. Najdulji identificirani entitet duljine je 82m.



Slika 4.15 Broj detektiranih entiteta specifične duljine za originalne podatke (za duljine entiteta <60m)



Slika 4.16 Broj detektiranih entiteta specifične duljine za filtrirane podatke nakon primjene granične vrijednosti

Tipična veza između trenutnog izvora, točaka interakcije, vidljivosti entiteta i virtualnih izvora prikazana je na primjeru najduljeg entiteta (82m), detektiranog u skupu originalnih podataka. Slika 4.17 prikazuje tlocrt scenarija sa slike 4.7, ali sa smanjenim brojem elemenata pa su uključeni samo oni koji su bitni za entitet: lokacija odašiljača (crveni trokut), stvarna staza zrake (crveno), područje vidljivosti (zeleno) i lokacija virtualnog izvora za entitet (dio kružnice). Siva linija označava testnu rutu duljine 199m, a zelena crta vidljivi entitet. Plava crta prikazuje poziciju virtualnog izvora. Tanke plave crte povezuju krajnje točke vidljivog dijela staze s pripadnim virtualnim izvorom, dok markeri na plavoj liniji (dijelu kružnice) označavaju virtualne izvore za prijamne lokacije semplirane svakih 1m duž prijamne rute. Zadnja točka interakcija E je konstantna, ali samo u dvije dimenzije – ne i u visini. Točka E nalazi se na rubu zgrade na kojem se dogodila zadnja difrakcija, no zbog kretanja mobilne stanice, točna pozicija interakcije kliže rubom.



Slika 4.17 Pojednostavljeni tlocrt sa slike 39 s podacima za ogledni entitet duljine 82 m

Slika 4.18 prikazuje snagu zrake na prijamnoj lokaciji duž dijela rute na kojem je entitet vidljiv. Ovakve krivulje u pravilu su glatke i mogu se opisati polinomima s manje elemenata.



Slika 4.18 Krivulja snage duž dijela putanje u kojem je entitet prisutan. Ovakve se krivulje lako mogu aproksimirati polinomima

Slike 4.19 i 4.20 prikazuju koliko je bilo zraka u svakom entitetu, odnosno koliko je ukupno zraka doprinijelo duljini svakog pojedinog entiteta. Iz rezultata prikazanih na slikama 4.15 i 4.16 se vidi da duljina entiteta varira, no većina njih je, zbog brzih promjena uzrokovanih difrakcijom, duljine svega nekoliko metara. S druge strane, iz prikaza na slikama 4.19 i 4.20, može se vidjeti da je u entitetima duljine 1m sudjelovao manji broj zraka, dok je većina zraka pridružena entitetima duljim od 1m. Drugim riječima, većina entiteta je bila dulja od 1m, što je još jedna potvrda da je odabrana rezolucija od 1m adekvatna.

Međutim, ne treba zanemariti činjenicu da su brojni entiteti (njih 102 od ukupno 305 ili 33,4%) duljine 1m, odnosno jednaki rezoluciji kojom su provedene simulacije. Prikazani rezultati zapravo oslikavaju brze promjene u višestaznoj okolini tipične za sredinu bogatu difrakcijom. Ipak, zbog činjenice da su najkraći entiteti veličine odabrane rezolucije, a da bi se metodom slijeđenja zrake mogli modelirati što realističniji uvjeti, potrebno je znati koliko su zaista brze te promjene, što je ispitano na testnom scenariju 2.



Slika 4.19 Broj zraka pridruženih svakom entitetu. U obzir su uzete sve zrake



Slika 4.20 Broj zraka pridruženih svakom entitetu, nakon primjene granične vrijednosti

4.2.2 Testni scenarij 2

Za ispitivanje dinamike promjena u vrlo finoj rezoluciji (<1m) napravljene su dodatne simulacije na "mikroskopskom nivou" (slika 4.21) [85]. Korišten je isti urbani scenarij (mapa Stockholma), isti načini propagacije (LOS, jednostruka i dvostruka refleksija, jednostruka i dvostruka difrakcija te miješane zrake) te ista odašiljačka snaga i vrste antena. Razmotrena su dva scenarija: ruta 1 je ravna linija duljine 1m (dio "originalne" rute sa slike 4.7), a ruta 2 je "L" ruta duljine 2 m, koja prikazuje kretanje MS oko ugla. Razina prijama praćena je svakih 5cm za rutu 1, odnosno svakih 10cm za rutu 2 (u 21 točki u oba slučaja). Praćene su sve višestazne komponente, koje su pridružene pripadnim entitetima zrake, koristeći isti algoritam kao u prethodnom primjeru. Prijamna snaga je limitirana na -150 dBW, kako bi se eliminirale zrake čija je snaga zanemariva.



Slika 4.21 Analiza pojava unutar puta od 1m, za dvije različite rute – ravnu liniju duljine 1m (1) i rutu oko ugla duljine 2m (2)

U prvom scenariju (ruta 1) ukupno je broj detektiran 208 zraka, s tim da je na svakoj prijamnoj poziciji bilo detektirano 10 ili 11 zraka (slika 4.22).



Slika 4.22 Višestazna okolina na ruti 1

Dominantan način propagacije bila je difrakcija, kao i u prethodnom slučaju, a primjenom istog algoritma, sve su zrake svrstane u entitete. Sve zajedno, uočeno je 12 entiteta zraka različitih duljina (tablica VII). Većina zraka pripadala je najdužim entitetima (slika 4.23).

Redni broj entiteta	Duljina entiteta [m]
1	1
2	1
3	0,4
4	1
5	1
6	1
7	0,5
8	1
9	1
10	1
11	1
12	0,7

TABLICA VII BROJ I DULJINA IDENTIFICIRANIH ENTITETA ZA TESTNI SCENARIJ $\mathbf 2$



Slika 4.23 Raspodjela zraka prema duljinama entiteta

Duž cijele testne rute snaga pristigla na prijamnike je gotovo konstantna, što se može vidjeti slici 4.24, koja prikazuje snagu i vrstu svake zrake koja je stigla na prijamnu rutu. Takav je rezultat očekivan, s obzirom da se ruta nalazi u okolini koja ima konstantna svojstva (ulica između dviju zgrada).



redni broj prijamne pozicije (Rx)

Slika 4.24 Prikaz dobivene snage po prijamnim lokacijama, za svaku propagacijsku metodu i ukupno

Kao i u makroskopskom slučaju, više od 99% ukupne snage došlo je upravo iz difraktiranih zraka (jednostrukih i dvostrukih), dok je samo 1% sadržan u mješovitim reflektiranim i difraktiranim zrakama. Iako je difrakcija na testiranoj ruti dominantan način propagacije, virtualni izvori svih entiteta su konstantni u x-y ravnini, dok u z ravnini variraju, i to najviše u najduljem entitetu (20m), u kojem visina varira oko 20cm.

U drugom scenariju mobilna je stanica praćena duž L-rute duge 2m (po jedan u svakom smjeru), i to svakih 10cm. U ovom primjeru uočeno je ukupno 132 zrake, s po 4-7 zraka na svakoj prijamnoj poziciji (slika 4.25). Ruta 2 je scenarij koji opisuje promjenu okoline kada se mobilna stanica kreće oko ugla ili prelazi iz jednog propagacijskog scenarija u drugi. Rezultati pokazuju da čak i na ovako sitnom nivou promjene u okolini mogu biti značajne. Na prvom dijelu rute (od Rx #1 do ugla) načini propagacije su refleksija, difrakcija i njihova kombinacija. Iako je sredina bogata difraktiranim zrakama, pojavljuje se i čista refleksija (započinje na #1 Rx, a nestaje negdje oko ugla, na #9 Rx) koja sadrži značajan dio ukupne

snage koja je stigla na taj prijamnik (više od 99%). Drugi dio rute, od ugla do zadnjeg prijamnog mjesta, obilježen je difrakcijom kao dominantnim načinom propagacije.



Slika 4.25 Višestazna okolina na ruti 2

Na uglu, gdje mobilna stranica skreće u drugom smjeru, reflektirana zraka nestaje, a putanja ulazi u zonu u kojoj vrijede pojave vezane za difrakciju. Raspodjela prijamne snage s obzirom na način propagacije prikazana je na slici 4.26. Na grafu se jasno vidi "obilazak" ugla, koji se događa na prijamnim pozicijama #9-13.



Slika 4.26 Prikaz dobivene snage po prijamnim lokacijama, za svaku propagacijsku metodu i ukupno

U ovom scenariju uočeno je 7 entiteta (uzete su u obzir samo zrake čija je snaga veća od -150 dBW), čije su duljine prikazane u tablici VII.

Redni broj entiteta	Duljina entiteta [m]
1	0.9
2	2.2
3	2.1
4	1.6
5	1.6
6	1.5
7	0.8

TABLICA VIII BROJ I DULJINE ENTITETA NA RUTI $\mathbf{2}$

Kao i u prethodnim primjerima, većina zraka dodijeljena je duljim entitetima (slika 4.27).



Slika 4.27 Raspodjela zraka prema duljini entiteta

Svakako je najinteresantniji entitet zraka koji postoji duž cijele rute - riječ je o difrakciji i koja se dogodila točno na rubu zgrade oko koje se kretao korisnik (slika 4.28). No, iz primjera za kretanje korisnika oko ugla, gdje dolazi do nagle promjene višestaznih svojstava, može se vidjeti da je dinamika promjene višestazne okoline izrazito brza te da postoje scenariji u kojima je svaka pojedina višestazna komponenta bitna. Upravo u toj činjenici leži najveći

problem određivanja područja vidljivosti koja, osim same veličine, moraju definirati i način prelaska iz jednog propagacijskog scenarija u drugi, što se u stvarnosti odvija kontinuirano.



Slika 4.28 Prikaz najduljeg entiteta – crvena zraka je izvor entiteta, a deblja plava crta označava rutu i krajnje točke entiteta

Iz grafova na slikama 4.24 i 4.26 može se vidjeti da se snaga prisutna na prijamnim lokacijama unutar 1m vrlo malo mijenja, odnosno gotovo je konstantna pa možemo reći da je 1m dovoljno fina rezolucija za simuliranje radijske okoline. Osim toga, virtualni su izvori na detektiranim entitetima gotovo konstantni pa možemo definirati **područje nepromjenjivosti** kao entitet zrake duljine do 1m, u kojem su uvjeti radiokanala stacionarni, odnosno nepromjenjivi. Čak i kada dolazi do nagle promjene propagacijskog scenarija, kao u primjeru rute 2, pripadnost zrake entitetu osigurat će kontinuiranu promjenu radijske okoline.

4.3 Ocjena parametara COST referentnih modela

Iako su kao temelj i referenca u provedenom istraživanju uzeti COST modeli, pristup se u ovoj analizi razlikuje jer se COST modeli temelje na konceptu klastera, a provedeno istraživanje ne konceptu entiteta zraka.

Klasteri su definirani kao grupe zraka sa sličnim dolaznim kutom i kašnjenjem. Njihovo uvođenje omogućuje lakšu implementaciju modela jer je jednostavnim grupiranjem zraka u klastere smanjen broj zraka, odnosno podataka koje treba procesirati. Zrake unutar klastera imaju slično vrijeme kašnjenja i upadni kut, iako kriteriji grupiranja nisu precizno definirani. Također, izvor zrake i vrsta propagacije za grupiranje u klastere nisu bitni, iako će u određenom broju slučajeva klaster biti jednak entitetu zrake. Za razliku od klastera, entitet zrake zapravo prati svaku pojedinu zraku od njezinog nastanka do nestanka, odnosno prati višestazne komponente u radijskoj okolini. Na taj način, uzimajući u obzir usvojenu vrijednost rezolucije od 1m, u obzir ulaze sve višestazne komponente. Osim navedenog, klasteri se u COST modelima generiraju stohastički na osnovu nekog od modela raspršivača, kao i višestazne komponente ili zrake koje se u klasteru nalaze, dok se EZ detektira iz determinističkih podataka dobivenih simulacijama metodom slijeđenja zrake.

Područja vidljivosti u COST modelima definirana su kao dio pokrivanja u kojem je neki klaster aktivan ili ne. Ta je veličina također stohastička i definira se Poissonovom razdiobom, uz referentne vrijednosti od oko 100m u urbanoj i 300m u ruralnoj sredini [61]. U slučajevima kada je promjena uvjeta u radijskoj okolini vrlo brza, kao i za sve atipične scenarije općenito, potpuno stohastički pristup iz COST modela nije adekvatan. Područje vidljivosti ovdje je definirano kao entitet zrake koji je prisutan na dijelu rute. Drugim riječima, područje vidljivosti ujedno je duljina/veličina entiteta zrake. Veličine dobivene u testnim simulacijama značajno se razlikuju od predloženih referentnih vrijednosti za COST modele, no s obzirom na razliku u definiciji, to je očekivano.

Područje nepromjenjivosti ili minimalna veličina entiteta je parametar koji potreban kako bi se mogli jasnije odrediti uvjeti ili postavke simulacija, tako da se zadrži što realističnija slika radiokanala, ali i izbjegne nepotrebno trošenje računalnih resursa i vremena. U COST modelima područje stacionarnosti je područje u kojem su višestazni uvjeti konstantni. Ista definicija vrijedi za područje nepromjenjivosti, za koje je u ovom radu usvojena referentna vrijednost od 1m.

4.4 Sažetak poglavlja

Poglavlje analizira fenomene u višestaznoj okolini bogatoj difraktiranim zrakama
uzrokovane kretanjem mobilne stanice, fokusirajući se na modeliranje mobilnosti, što uključuje modeliranje kretanja virtualnih izvora, modeliranje Dopplerovog pomaka i modeliranje kontinuiranog prelaska iz jedne radijske okoline u drugu. Analiza je provedena metodom slijeđenja zrake pomoću 3D-RT simulatora na dva testna scenarija i tri testne rute. Definiran je pojam eniteta zrake, pomoću kojeg su opisana područja vidljivosti i područje nepromjenjivosti. Elaborirane su prednosti predloženog pristupa u odnosu na modeliranje pomoću klastera koje se koristi u COST modelima. Dobiveni rezultati uspoređeni su s vrijednostima u literaturi, a koristit će se kao podloga za definiranje koncepta determinističkog referentnog modela radiokanala opisanog u poglavlju 5.

Poglavlje 5

DETERMINISTIČKI REFERENTNI MODEL RADIOKANALA

U ovom je poglavlju predstavljen koncept determinističkog referentnog modela radiokanala kao alternativa stohastičkom referentnom modelu. Glavna prednost determinističkog modela u usporedbi sa stohastičkim je to što se temelji na točnim podacima dobivenim simulacijama ili mjerenjima, dok je glavna prepreka za realizaciju ovakvih modela visoka računalna složenost. Predloženo je idejno rješenje za realizaciju determinističkog referentnog modela radiokanala u vidu baze podataka poznatih obostrano usmjerenih radiokanala dobivenih simulacijama metodom slijeđenja zrake, uzimajući u obzir rezultate analize postojećih referentnih modela u poglavlju 2 te analize parametara radiokanala i procesa parametrizacije u poglavlju 4. Predloženo rješenje temelji se na opisivanju parametara entiteta zrake, kojim je omogućeno kontinuirano praćenje mobilne stanice u radiokanalu. Osim toga, istražena je mogućnost korištenja interpolacije kako bi se osigurala proizvoljna rezolucija rezultata uz neznatno povećanje računalne složenosti.

5.1 Referentni model radiokanala – stohastički i deterministički pristup

Iz pregleda referentnih modela radiokanala u poglavlju 2, može se vidjeti da su postojeći referentni modeli radiokanala (RMRK) uglavnom generatori slučajnih realizacija radiokanala

baziranih na prethodno izračunatim parametrima. Parametri su uglavnom dobiveni statističkom analizom iz ograničenog skupa mjerenja provedenih na nekom tipičnom scenariju (područjima sličnih zemljopisnih karakteristika) pa se referentni modeli često, i opravdano, nazivaju i stohastičkima [91]-[93].

Stohastički proces u referentnim modelima kontroliran je parametrima koji opisuju svojstva reprezentativnih kanala, odnosno klasificiranih radijskih okolina (npr. COST modeli definiraju mikro, makro ili pikoćelije te nekoliko tipičnih propagacijskih scenarija za svaku od njih, kao što je opisano u poglavlju 2). Proces stvaranja stohastičkog referentnog modela radiokanala prikazan je shematski na slici 5.1. Gornji dio sheme prikazuje tijek dobivanja podataka o reprezentativnim kanalima. Da bi bili reprezentativni, podaci moraju sadržavati statistički dovoljan broj realizacija određenog radiokanala, dobivenih bilo numerički (na slici označeno plavom bojom) ili mjerenjima (na slici označeno crvenom bojom). Donji dio je shema formiranja referentnog modela radiokanala, koje se obično može provesti na dva načina: pomoću skupa vektora radiokanala dobivenih izravnim korištenjem determinističkih podataka (u shemi označeno zelenom bojom) ili pomoću stohastičkog modela dobivenog procesom parametrizacije (narančasti dio sheme).



Slika 5.1 a) blok-shema procesa generiranja podataka koji će biti osnova za generiranje realizacija radiokanala; b) proces generiranja realizacija radiokanala

Stohastički referentni modeli radiokanala (SRMRK) obično su prvi izbor jer su opisani (relativno) malim brojem parametara i vrlo ih je lako implementirati čak i na računalima skromnijih mogućnosti. Međutim, razvojem računala, povećanjem brzina procesora i raspoložive memorije, stvorili su se preduvjeti za razmatranje alternative u obliku determinističkog referentnog modela radiokanala (DRMRK). Činjenica je da se mjerenjima i simulacijama dobiva veliki broj podataka kojima je vrlo teško baratati, a njihovo pohranjivanje zahtijeva velike memorijske kapacitete, no moderna računala i internetski resursi (računalstvo i podaci u oblaku) to omogućavaju. Postavlja se pitanje zašto, nakon trošenja ogromnih sredstava (i novca i vremena) na dobivanje podataka mjerenjima ili intenzivnim simulacijama metodom slijeđenja zrake, provoditi vrlo složeni proces parametrizacije?



Slika 5.2 Shema procesa generiranja realizacija radiokanala u referentnom determinističkom modelu

Koncept DRMRK kao takav nije novost, no u literaturi se uglavnom samo spominje, kao složena i neizvediva opcija ili u formi hibridnih modela [65],[94]-[99], koji su svojevrstan kompromis jer se temelje na determinističkom pristupu kod definiranja radijske okoline i propagacijskih uvjeta, a koriste statistiku za definiranje parametara koji nisu definirani ili se ne mogu opisati determinističkim modelom. Referentni modela temeljan isključivo na determinističkom principu omogućio bi izravno korištenje izvornih podataka dobivenih simulacijama metodom slijeđenja zrake ili mjerenjima, koji se inače koriste kao podloga za parametrizaciju i formiranje SRMRK. Na taj način bi se iz sheme stvaranja RMRK potpuno

eliminirao proces parametrizacije, kao što je prikazano na slici 5.2.

Glavna hipoteza ovog rada jest da je moguće (i razumno) bazirati referentni model upravo na tim "sirovim" podacima dobivenim na stvarnim digitalnim modelima na specifičnim zemljopisnim područjima. U nastavku su elaborirani prednosti i potencijal DRMRK, ali i izazovi za praktičnu realizaciju modela. Predloženo je izvedivo rješenje s prihvatljivom računalnom složenošću i vremenom procesiranja podataka, koje se temelji na ranije uvedenom parametru – entitetu zrake.

5.2 Prednosti i izazovi determinističkog modela

Najveća prednost DRMRK u odnosu na SRMRK jest realističnost. SRMRK se definira pomoću određenog broja parametara, iz kojeg se kasnije može generirati proizvoljan broj slučajnih realizacija radiokanala. Parametrizacija je složen i dugotrajan proces u kojem se statistički obrađuju "sirovi" podaci dobiveni mjerenjima i/ili simulacijama te pronalaze razdiobe koje najbolje odgovaraju originalnom skupu podataka. Iako SRMRK daju uvid u različite zemljopisne situacije iz stvarnosti, jer su temeljeni na stvarnim podacima, ne moraju nužno oslikavati nijednu realističnu situaciju. Dapače, zbog stohastičke prirode procesa generiranja radiokanala, neke realizacije mogu biti vrlo nerealistične, čak "čudne" za zadano zemljopisno područje. Razlog tome leži u činjenici da se statističkom obradom gubi dio izvornih podataka, što s obzirom na brzinu promjena u višestaznoj okolini, za neke propagacijske scenarije može biti ključno (otud nerealne ili čudne realizacije). Drugim riječima, proces parametrizacije, bez obzira na to koliko je genijalan ili složen, unosi neko odstupanje od stvarnosti zbog stohastičke prirode kojom klasificira skup ulaznih podataka. Osim toga, implementacija slučajnim postupkom prouzrokovat će gubitak kontrole nad realizacijama radiokanala s mogućnošću dobivanja realizacija sa značajnim odstupanjem od stvarnosti (nesigurnost).

DRMRK s druge strane omogućuje testiranje bežičnih tehnologija baziranih na MIMO antenskim sustavima na prethodno pohranjenim realizacijama obostrano usmjerenih radiokanala. Svaka realizacija radiokanala sadrži realistične podatke o radiokanalu, koje deterministički model treba sistematizirati u nekom pristupačnom formatu i s preciznim bazama, kako bi se dalje mogli koristiti. Ovakav pristup ne samo da premošćuje proces parametrizacije nužan za dobivanje stohastičkog modela, nego osigurava i testiranje modela na točnim i stvarnim podacima. DRMRK time nadilazi glavni nedostatak stohastičkog modela koji se često zanemaruje, odnosno pretpostavlja nebitnim bez dodatnog provjeravanja: nevjerodostojnost modela zbog parametrizacije i stohastičkog karaktera generiranja parametara. Sve realizacije DRMRK su realistične, s točnošću provedenih mjerenja ili preciznosti ulaznih podataka kod primjene metode slijeđenja zrake, a izbjegnuti su gore navedeni uzroci netočnosti i nesigurnosti. Uporaba SRMK čini se atraktivnom opcijom s argumentom da je moguće generirati puno više kanalnih realizacija od onog koji je inicijalno dobiven (mjerenjima ili simulacijama). Međutim, cijena dobivanja novih realizacija iz potencijalno netočnih podataka je previsoka.

Međutim, DRMRK ima svoje izazove. Prije svega, potrebno je osmisliti i definirati adekvatan format baze, u koju će se pohranjivati egzaktno poznati obostrano usmjereni radiokanali. Baza treba sadržavati veliki broj zapisa o mjerenim ili simuliranim putanjama koje su klasificirane prema specifičnim radijskim okolinama, odnosno scenarijima. Za svaku poznatu točku putanje to uključuje podatke o smjeru odlaska i dolaska pojedine zrake (azimut i elevacija), gušenju, kašnjenju, polarizaciji itd., koji su potrebni za izračun MIMO prijenosne matrice, razina električnog polja i snage, Dopplerovog efekta itd. Nadalje, implementacija mobilnosti u DRMRK je posebno složena, s obzirom da je potrebno omogućiti kontinuirano praćenje mobilne stanice kroz diskretni prostor, zadržavajući pri tome što je moguće više deterministički pristup.

Drugi problem razvoja DRMRK je računalna složenost. Baza podataka sadrži veliki broj parametara, što zahtijeva poprilične memorijske kapacitete, a potrebni su i procesori adekvatne brzine, kako bi se omogućilo brzo izvođenje računalnih operacija te učinkovito baratanje podacima. Međutim, argument o računalnoj i vremenskoj zahtjevnosti DRMRK samo je donekle prihvatljiv, jer je proces parametrizacije za SRMRK također zahtjevan. Dodatno, da bi se osigurala valjana usporedba više bežičnih sustava, potrebno je osigurati jednake realizacije radiokanala na kojima se može provesti testiranje. Čak ni u slučaju da se radi o stohastičkom modelu ne bi trebalo dozvoliti pokretanje različitog slučajno generiranog skupa realizacija radiokanala, što zahtijeva gotovo jednako truda kao i izravna implementacija DRMRK, odnosno izrada baza podataka i programiranje potrebnih operacija za njihovo

korištenje. Osim toga, današnja računala, čak i ona prosječna, omogućuju implementaciju jednostavnijih varijanti DRMRK.

Kao izvedivo rješenje, predložen je koncept DRMRK u formi baze prethodno snimljenih radiokanala dobivenih simulacijama metodom slijeđenja zrake, koji je opisan u nastavku.

5.3 Koncept rješenja determinističkog modela radiokanala

Idejno rješenje DRMRK je zapravo baza prethodno pohranjenih stvarnih i točnih obostrano usmjerenih radiokanala dobivenih intenzivnim 3D-RT simulacijama ili mjerenjima. Iako se mjerenja čine adekvatnima jer su provedena u stvarnim situacijama, postoji nekoliko nedostataka (vidi poglavlje 3), koji se mogu sažeti u dva osnovna: (1) mjerenjima se uglavnom dobiva razina signala, ali ne i podaci o uvjetima u radijskom kanalu, pa je vrlo teško detektirati sve višestazne komponente i njihove parametre poput kutova odlaska i dolaska, vrstu propagacije itd.; (2) mjerne kampanje su vrlo skupe i dugotrajne, a da bi mjerni rezultati bili prihvatljivi u smislu standardne devijacije i dozvoljene pogreške, mjerenja se moraju ponavljati, zbog čega postaju još skuplja i još dugotrajnija.

Metoda praćenjem zrake omogućuje modeliranje radiokanala u beskonačnoj rezoluciji i to joj je najveća prednost, no njezina "uspješnost" ovisi o tome koliko su točne i detaljne digitalne mape određenih zemljopisnih područja (gradovi, suburbana i ruralna područja itd.) i druge digitalne podloge (npr. tlocrti zgrada). Ipak, DRMRK baziran na podacima dobivenim pomoću 3D-RT simulatora je izvediva opcija, kojom se na jednostavan način mogu generirati podaci o nekom radiokanalu, zadržavajući pri tome realističan prikaz stvarnog radiokanala. Model bi osim toga omogućavao i dodavanje novih izmjerenih ili simuliranih podataka, čime bi se postigla kontinuirana nadogradnja modela s novim i točnijim podacima, a time, u konačnici, i njihova verifikacija. Ono što predstavlja izazov jest učinkovito korištenje pohranjenih podataka te adekvatan opis fenomena u višestaznoj okolini.

Predloženo idejno rješenje omogućuje jednostavnu, intuitivnu realizaciju DRMRK, koja znatno smanjuje vrijeme trajanja simulacija, uz prihvatljivu računalnu složenost. Podaci se temelji se na pohranjivanju i procesiranju entiteta zrake, uz mogućnost dodatnog poboljšanja

primjenom interpolacije. Klasifikacija radijskih okolina i propagacijskih scenarija preuzeta je iz COST modela.

5.3.1 Format baze radiokanala

Format DRMRK mora biti jednostavan za primjenu za testiranje novih sustava, validaciju tehnologija i slično. U predloženom rješenju početna baza podataka generirat će se metodom slijeđenja zrake pomoću 3D-RT simulatora, a zatim pohraniti u vidu zapisa o identificiranim entitetima zrake. Podaci iz 3D-RT simulatora sadrže detaljne informacije o svakoj pojedinoj višestaznoj komponenti, prema tablici III, no mogu se prikazati i u matričnom obliku kojim je lakše baratati, pomoću strukture prikazane u tablici IX.

Veličina	Format	Opis	
n	integer	broj interakcija koje su se dogodile	
Rx_id	integer	oznaka Rx	
interactions	struktura [1xn]	podaci o VTx, vrsti propagacije i objektu na kojem je došlo do interakcije	
Tx_id	integer	oznaka Tx	
Tx_dist	float	duljine zrake od Tx do Rx (zbroj svih komponenti koje čine trajektoriju)	
Ray_id	integer	oznaka zrake	
power	float	snaga zrake	
trajectory	matrica [n+2,3]	koordinate svih komponenti zrake: tx, 1. Interakcija,, n-ta interakcija, rx	

TABLICA IX PODACI O SVAKOJ ZRACI DOBIVENOJ SIMULACIJAMA

Prezentacija simulacija praćenjem zrake pomoću entiteta zrake ima višestruke prednosti. Prvo, pohranjivanjem entiteta zraka smanjuje se potrebna količina memorije u odnosu na pojedinačne višestazne komponente, a drugo, primjena entiteta zrake omogućuje interpolaciju zraka svrstanih u entitete, čime se omogućava dobivanje rezultata finije rezolucije uz vrlo malo dodatno računanje.

Tablici X uspoređuje potrebnu količinu memorije za pohranjivanje podataka u formi entiteta ili za svaku zraku pojedinačno, za dva primjera testnog scenarija 1 - sa i bez minimalne prijamne razine.

	Broj zraka	Broj entiteta		
Bez granične	12951	1229		
vrijednosti				
S graničnom				
vrijednosti (>-150	2389	305		
dBW)				
	• Duljina zrake i vrijeme	Početak entiteta (indeks prijamnika, cjelobrojna		
	kašnjenja	vrijednost)		
	• Kut elevacije	• Kraj entiteta (indeks prijamnika, cjelobrojna		
Veličine notrehne za	• Azimut	vrijednost)		
opis entiteta zraka i	 Lokacija dolaska zrake 	• Odmak kašnjenja entiteta (npr. radijus lokacije		
opis chuicta ziake i	(indeks prijamnika,	virtualnog Tx)		
ZIAKC	cjelobrojna vrijednost)	• x-y koordinate zadnje interakcija (rub zgrade, točka		
	• Snaga zrake	E na slici 45), kako bi se osiguralo izračunavanje		
		točnog VTx na krugu za svaki Rx		
		• Snaga entiteta		
Veličine ukupno	Za zraku:	Za entitet:		
veneme ukupno	4 realna broja + 1 cijeli broj	3 realna broja + 2 cijela broja		

TABLICA X USPOREDBA BROJA ENTITETA I BROJA ZRAKA NA TESTNOM SCENARIJU TE VELIČINE KOJE IH

OPISUIU

Upravo4 realna broja + 1 cijeli broj3 realna broja + 2 cijela brojaUpravojemogućnostinterpolacijeono štoovakavkonceptčiniizvedivomvarijantomdeterminističkogreferentnogmodelaradiokanala.Sobziromdasusvezrakeunutarentitetaposljedicaistihdogađaja,možesepretpostavitida ćeitočkeizmeđutihzrakaimatiistiizvor,odnosnopripadatiistomentitetu.EntitetsezapravomožeprikazatisamoprvomizadnjomzrakomteVTx-om.SobziromdaseVTxkoddifrakcijekrećepodijelukružnice,potrebnojeznatiix-ykoordinatezadnjeinterakcije,kaoštojenavedenoutabliciIX.IZtablicesetakođervididaprezentacijamodelapomoćuentitetazahtijevavišeoddvaputamanjememorijezaprocesiranjeentitetananjememorijezaprocesiranjeočekujeseprimjeru,smanjenjeyeseprimjeru,smanjenjeyeseseseprimjeru,smanjenjeyeseseprimjeru,smanjenjeyesesesesesesesese

Također, entiteti zraka omogućuju višestruko smanjenje vremena simulacija. Kao što je u ovom radu više puta naglašeno, 3D simulacije su izrazito dugotrajne. Za ilustraciju, testni scenarij 1 simulirao se gotovo 5 dana (na pojednostavljenoj mapi 18 sati), dok su simulacije testnog scenarija 2, s vrlo kratkim rutama, trajale gotovo 20 sati. Dobiveni rezultati su vrlo

detaljni i precizni, ali samo u simuliranim točkama. Interpolacija pak omogućuje dobivanje proizvoljne rezolucije, koja se može, nakon inicijalne simulacije, ponavljati neograničeno, ovisno o potrebama korisnika. Usporedba računalne složenosti metode slijeđenja višestaznih komponenti i entiteta interpoliranih zraka sažeta je u tablici XI.

TABLICA XI USPOREDBA RAČUNALNE SLOŽENOSTI ZA KLASIČNU METODU SLIJEĐENJA ZRAKE I METODU INTERPOLACIJE ENTITETA ZRAKE

	Praćenje zrake	Entitet interpoliranih zraka		
Upotreba memorije	Viša (4-5 puta)	Niža (4-5 puta)		
Rezolucija prijamnika (broj prijamnika	Fiksno nakon	Neograničeno – može se povećati		
na određenom području)	inicijalnih	proizvoljno nakon inicijalnih simulacija		
	simulacija			
Opterećenje računala zbog povećanja	Značajno	Zanemarivo povećanje		
rezolucije prijamnika	povećanje			
Mogućnost uključivanja različitih	DA	DA s jednostavnim prilagodbama za		
fenomena (ORT, raspršenje)		svaki efekt		

Dakle, uvođenje entiteta zraka omogućuje simulaciju radiokanala s proizvoljnim kretanjem mobilne stanice, s proizvoljno odabranom modulacijom i kodnom shemom, u širokom frekvencijskom opsegu i s dovoljnom prostornom rezolucijom. Zbog tih svojstava, entitet zraka može se koristiti za determinističke referentne modele radiokanala s računalnom složenošću usporedivom sa stohastičkim modelima, ali s mnogo realističnijim i standardiziranim realizacijama.

5.3.2 Postavke za generiranje determinističkog referentnog modela radiokanala

5.3.2.1 Klasifikacija scenarija i ruta

Da bi se u referentnom modelu radiokanala pokrili svi relevantni slučajevi, tipične radijske okoline klasificiraju se u reprezentativne scenarije. Iako način klasifikacije za izvedbu modela nije ključan, za referencu se može preuzeti klasifikacija iz COST modela (poglavlje 2), odnosno podjela na makro, mikro i pikoćelije, te pripadni ruralni, urbani i zatvoreni scenarij. Definirajući tipične parametre za svaki pojedini scenarij, mogu se dobiti propagacijski uvjeti

za stacionarni kanal, odnosno generirati višestazna okolina kakvu vidi fiksni prijamnik u nekoj točki.

Također, u model je potrebno uključiti neke tipične rute kojima se mobilna stanica može kretati, sukladno klasifikaciji scenarija, kao u primjeru u tablici XII za urbani scenarij. Zbog kretanje mobilne stanice svojstva radiokanala postaju dinamička, a promjene u korelaciji s kretanjem mobilne stanice, kao što je već objašnjeno u prethodnom poglavlju. Propagacijski uvjeti se mijenjaju, a pojedini fenomeni tipični su samo za neke scenarije.

Mikroćelija	Tipične rute	
	Pravocrtno gibanje ulicom	
Urbana mikroćelija	Pravocrtno gibanje kroz raskrižje	
	Gibanje oko ugla	
	Pravocrtno gibanje ulicom	
Loša urbana mikroćelija	Pravocrtno gibanje kroz raskrižje	
	Gibanje oko ugla	
Otvoreni prostor u kojem	Pravocrtno kretanje kroz otvorene	
postoji optička vidljivost	prostore (npr. park)	
Otvoreni prostor u kojem ne	Pravocrtno kretanje kroz otvorene	
postoji optička vidljivost	prostore (npr. park) u "sjeni"	

TABLICA XII KLASIFIKACIJA RUTA PREMA KLASIFICIRANIM SCENARIJIMA – URBANA MIKROĆELIJA

5.3.2.2 Implementacija mobilnosti

Mobilnost se može implementirati "snimanjem" niza stacionarnih radiokanala u kojima se mobilna stanica svaki put pomiče za određeni inkrement (na isti način je simuliran radiokanal na testnom scenariju iz poglavlja 4), ali takvo je praćenje mobilne stanice diskretno i ne obuhvaća sve točke na promatranoj ruti (očito nisu obuhvaćene točke unutar usvojene 1metarske rezolucije, koje se nalaze između dva "snimka" radiokanala). Osim toga, za implementaciju mobilnosti treba osigurati kontinuirani prelazak iz jednog scenarija u drugi, što je dodatni problem u područjima na granici između dva propagacijska scenarija, u kojima dolazi do vrlo brzih promjena i u kojima svaka pojedina višestazna komponenta može činiti veliku razliku. Primjenom koncepta entiteta zraka, omogućeno je kontinuirano praćenje mobilne stanice:

- entitet zraka prati zraku od postanka do nestanka tako da osigurava kontinuiranu promjenu propagacijskih scenarija (npr. u mikroscenariju rute oko ugla sa slike 4.21, na samom uglu dolazi do nagle promjene uvjeta u višestaznoj okolini, no entitet to "prepoznaje" i prati difraktiranu zraku koja ide oko ugla)
- na svakom se prijamniku zna koje su zrake na njega došle tako da se nijedna višestazna komponenta ne zanemaruje (u slučaju klastera zrake se grupiraju po kutu i vremenu kašnjenja, najčešće stohastički, čime dio zraka može biti izgubljen)
- postojanje entiteta zraka i uvid u njihovu prirodu, kao što je dinamika snage, kut dolaska
 i područje vidljivosti, može poboljšati razumijevanje urbanih višestaznih sredina i
 inspirirati usvajanje novih aspekata radio sustava. Na primjer, adaptivno usmjeravanje
 snopa ili prostorno multipleksiranje u MIMO sustavu može se dizajnirati imajući na
 umu činjenice o konstantnoj promjeni dolaznih svojstava svake zrake, kako se korisnik
 kreće duž entiteta;
- interpolacijom rezultata simulacija dobivenih iz dovoljno bliskih prijamnih točaka (1m) moguće je dobiti zraka proizvoljno visoke rezolucije, tako da se mobilna stanica može pratiti kroz sve točke u prostoru.

5.3.2.3 Ulazni i izlazni podaci

Osnovni ulazni podaci obuhvaćaju digitalne podloge (planove gradova ili digitalne karte zemljopisnih područja), podatke o antenskom sustavu i uređajima te podatke o lokaciji odašiljača i prijamnika. Za ovo idejno rješenje ulazni podaci su podaci koji su inače potrebni za pokretanje 3D-RT simulacija, a opisani su u poglavlju 4.

Podaci o određenoj radijskoj okolini sadržani su u digitalnim mapama, o kojima ovisi točnost generiranih radiokanala – što su dostupne mape detaljnije, precizniji će biti model radiokanala. No, s obzirom da detaljne podloge znače i veću računalnu složenost, mogu se koristiti i pojednostavljene mape, napravljene pomoću adekvatnih algoritama. Tablica XII daje usporedbu testnog scenarija 1 kada je primijenjena simplifikacija algoritmom opisanim u poglavlju 3 i u slučaju kada su korišteni originalni podaci (točnije, tablica uspoređuje podatke dane u tablicama V i VI).

		Ukupan #	# zraka na	Prosječan broj	Disperzija
		zraka	pojedinom RX	zraka na Rx	# zraka
	Neobrađeni podaci	15382	25 - 311	76.91	58.71
Testni scenarij	Broj zraka iznad minimalne prijamne razine	2243	1 - 39	11.21	9.88
Pojednostavljen i scenarij	Neobrađeni podaci	12951	23 - 165	64.74	50.55
	Broj zraka iznad minimalne prijamne razine	1933	1 - 33	9.67	8.85

TABLICA XIII USPOREDBA DOBIVENIH ZRAKA NA A) TESTNOM SCENARIJU STOCKHOLMA; B) POJEDNOSTAVLJENOM SCENARIJU STOCKHOLMA

Podaci o antenskom sustavu i uređajima preuzeti su iz ulaznih podataka za 3D-RT simulator, kako je opisano u poglavlju 3. Lokacije prijamnika određene su pozicijom klasificiranih ruta i odabrane su proizvoljno. Propagacijski uvjeti snimani su u prijamnim točkama koje su međusobno razmaknute 1m.

Lokacije odašiljača također se mogu odabrati proizvoljno, ali i pomoću alata za automatski odabir tipičnih lokacija bazne stanice. Automatski algoritmi za odabir lokacije odašiljača obuhvaćaju niz uvjeta (visina zgrada, maksimalno pokrivanje, gustoća korisnika, zasjenjena područja, lokacijske dozvole i sl.), s čijim brojem raste i računalna složenost algoritma, osobito ako se radi optimizacijskom algoritmu.

Za potrebe razvoja DRMRK napravljen je jedan jednostavan algoritam za odabir lokacija odašiljača, koji iz dostupnog digitalnog modela grada ekstrahira najviše zgrade u segmentima dimenzija 500x500m. Drugim riječima, digitalna mapa je podijeljena na segmente 500x500 unutar kojih su odabrane najviše zgrade. U slučaju da su dvije zgrade vrlo bliske (tako da je propagacijska slika s obje lokacije slična), odabrana je viša zgrada. Algoritam, dakle, kao kriterij za odabir lokacija uzima samo maksimalno pokrivanje, no za ovo istraživanje je sasvim dovoljan jer je primarni cilj generirati višestaznu okolinu na području cijelog grada i prikupiti što više realizacija radiokanala.

Primjer odabranih lokacija može se vidjeti na mapi Helsinkija na slici 5.3. Lokacije odašiljača označene su crvenim točkicama.



Slika 5.3 Primjer odabranih lokacija baznih stanica (Tx) na mapi Helsinkija

Izlazni podaci sadržani su u bazi pripadnih entiteta zraka, koji su za svaki radiokanal dobiveni primjenom algoritma za svrstavanje zraka u entitete iz originalnih podataka u formatu 3D-RT alata. Na isti način mogu se pohraniti rezultati mjerenja. Entiteti zraka sadrže sljedeće podatke, a mogu se pohraniti u obliku matrice, s kojom je lako baratati:

Veličina	Dimenzija	Opis	
		Indeks zrake, iz originalnih	
Ent_start	integer	simulacija, kojom započinje entitet	
		(prvi stupac u matrici)	
		Indeks zrake, iz originalnih	
Ent_end	integer	simulacija, kojom završava entitet	
		(ent_len stupac)	
Ent lon	floot	Duljina entiteta – (Ent_end -	
Ent_ien	noat	Ent_start)*inkrement	
Boy ID	integen	Indeks zraka koje se nalaze u	
Kay_ID	integer	entitetu	
VTx	matrica (1x3)	Koordinate VTx za svaku zraku	

TABLICA XIVFORMAT ZAPISA PODATAKA O ENTITETU ZRAKE

5.3.3 Izazovi i razvoj predloženog koncepta

Predloženi koncept DRMRK baziran na entitetima zraka ima dva vrlo važna znanstvena doprinosa, koja ga čine atraktivnim izborom za razvoj DRMRK. Prvi je značajno smanjenje računalnih resursa i vremena potrebnog za generiranje radiokanala, zbog jednostavnosti formata za pohranjivanje podataka, a drugi je mogućnost interpolacije podataka, što omogućava implementiranje kontinuiranog praćenja mobilne stanice kroz prostor. Razvoj cjelovitog i funkcionalnog DRMRK na temelju opisanog koncepta uključuje definiciju i programiranje odgovarajućeg korisničkog sučelja te izgradnju odgovarajućih baza podataka.

Odgovarajuće ugrađene baze podataka trebaju sadržavati:

- bazu obostrano usmjerenih radiokanala, koja sadrži što je moguće više različitih radijskih okolina i propagacijskih scenarija, generiranih simulacijama ili mjerenjima. Kontinuirano održavanje baza podataka može se osigurati pomoću otvorenog pristupa bazi, koji svima omogućuje dodavanje novih realizacija radiokanala. Na isti način osigurava se i verifikacija podataka;
- baza MIMO antenskih nizova, koja sadrži podatke o antenskim nizovima (broj antenskih elemenata, dijagram zračenja, dobitak niza) dobivene katalogiziranjem poznatih uređaja i unosom novih. Podaci će biti na raspolaganju za testiranje ili verifikaciju različitih sustava;
- baza vrsta uređaja, koja sadrži podatke o vezane za uređaje (raspon snage, osjetljivost prijamnika, filtarska maska, vrste modulacije, kodne tehnike itd.), također dobivene bilo prikupljanjem podataka o poznatim uređajima, bilo dodavanjem novih.

Sučelje treba korisniku omogućiti pristup postojećim podacima o radiokanalu te unos parametara koje želi testirati (npr. vrste MIMO antenskih nizova, vrste uređaja, modulacijski postupci, kodne tehnike itd.). Baza DRMRK sadrži samo elektromagnetska i geometrijska svojstva radiokanala, ali ne i podatke o antenama, koje se mogu odabrati ili posebno unijeti i primijeniti na definiranom radiokanalu. Sučelje mora osigurati i unos novih realizacija obostrano usmjerenog radiokanala, koje će se automatski upisati u bazu DRMRK. Osim dohvata podataka prema zadanim parametrima, sučelje treba osigurati i kontinuirani dohvat radiokanala, kako bi se u model implementirala mobilnost. Mogućnost interpolacije zraka

unutar entiteta omogućuje dobivanje podataka o radiokanalu u svakoj točki u prostoru, a sučelje definira način kontinuiranog izvlačenja podataka.

Na slici 5.4. prikazan je pojednostavljeni shematski prikaz idejnog sučelja za realizaciju DRMRK. Preko sučelja za unos podataka za pokretanje simulacije unose se parametri koji upravljaju simulacijama. Ako se koriste samo ugrađeni podaci o antenama i uređajima, može se napraviti testiranje i usporedba tih antena i uređaja na odabranom radiokanalu u bazi podataka. Lokacije odašiljača i prijamnika mogu se odabrati ručno ili automatski. Automatski odabir lokacija odašiljača je naprednija verzija, koja omogućuje i optimiziranje testirane mreže, dok odabir putanje Rx-a, bilo ručno ili automatski, omogućuje modeliranje kretanja kroz prostor. Preko posebnog se sučelja baza poznatih obostrano usmjerenih radiokanala konstantno ažurira.

Inicijalna verzija determinističkog modela radiokanala temeljenog na entitetima zrake, kao potvrda koncepta, sastoji se od prethodno simuliranih obostrano usmjerenih radiokanala koji su nastali refleksijom i/ili difrakcijom, no u model je potrebno ugraditi i difuzno raspršenje, koje u disertaciji nije obrađeno. Također, u model treba ugraditi i zrake koje su prošle i više od dvije interakcije, kako bi se pokrilo što više mogućih scenarija.

Nadogradnja modela obuhvaća, između ostalog, implementaciju interferencije, automatski odabir lokacija prema (što više) korisničkih uvjeta te optimizaciju samog modela. Osim toga, treba osigurati i provjeru unosa novih realizacija radiokanala, jer o tim podacima izravno ovisi i točnost modela.



Slika 5.4 Shematski prikaz DRMRK u formi baze prethodno snimljenih radiokanala

5.4 Sažetak poglavlja

U poglavlju je opisan koncept determinističkog referentnog modela radiokanala i idejno rješenje njegove izvedbe u formi baze podataka prethodno snimljenih obostrano usmjerenih radiokanala. Dodatno je opisan format navedene baze koji se temelji na opisu entiteta zraka, čime je omogućeno kontinuirano praćenje mobilne stanice kroz radiokanal uz prihvatljivu računalnu složenost. Koncept se temelji na bazi podataka dobivenih simulacijama metodom

slijeđenja zrake, no s mogućnošću nadogradnje modela s novim podacima, bilo simuliranim, bilo izmjerenim.

Iako je potrebno dodatno istražiti ovu hipotezu, intuitivno je jasno da će vrijeme trajanja simulacija biti smanjeno, osim u slučajevima kad postoji veliki broj kratkih entiteta, što je u stvarnosti teško za očekivati. S obzirom da su u primjerima radiokanali bogati difraktiranim zrakama, još se veća smanjenja potrebe za memorijom i brzim procesorima mogu očekivati za refleksiju u kojoj je virtualni izvor za cijeli entitet isti pa je jednostavnije za simulirati.

Za ugrađivanje mjernih rezultata u model problem je format dobivenih podataka, jer je obično nemoguće detektirati točan izvor zrake i svojstva višestazne okoline kao takve. Na mjestu prijama dobivene su vrijednosti za grupu zraka koje su na njega došle, a moguće ih je razlučiti samo u slučaju mjerenja višekanalnim uređajima. No, i tada je rezolucija rezultata puno lošija od one koju je moguće dobiti simulacijama. Ipak, mjerenja se mogu koristiti za korekciju i verifikaciju rezultata na nekom specifičnom scenariju (npr. rekonstrukcijom izmjerenog dolaznog signala usporedbom sa simulacijama na digitalnom modelu na istom području te stavljanja mjernih rezultata u format entiteta zrake). Upravo je iz tog razloga u predloženom idejnom rješenju za izvedbu DRMRK predviđena mogućnost dodavanja novih izmjerenih ili simuliranih modela radiokanala, kako bi se osigurala stalna nadogradnja baze podataka,

Poglavlje 6

ZAKLJUČAK I BUDUĆI RAD

Koncept determinističkog referentnog modela radiokanala središnji je dio ove disertacije, iako je nastao kao nusprodukt analize postojećih parametara i rada na parametrizaciji COST modela. Disertacija ima dva glavna dijela. Prvi dio daje pregled područja istraživanja, počevši od onih osnovnih pojmova vezanih za prirodu širenja elektromagnetskog vala i kratke prezentacije MIMO sustava, do detaljnog pregleda postojećih modela, njihove usporedbe i kritičkog osvrta na sve prednosti i mane. Iz danog pregleda jasno je da je većina istraživanja usmjerena na definiranje stohastičkih modela koji su jednostavni za implementaciju i ne zahtijevaju posebno sofisticirana računala. Upravo zato veliki broj istraživača radi na parametrizaciji modela, pokušavajući pronaći funkciju, odnosno statističku razdiobu koja najbolje odgovara rezultatima mjerenja ili simulacija. Pri tome se često zaboravlja da su ulazni podaci obično "količinski" ograničeni, neprecizni, ponekad i nepouzdani pa je i statistika dobiveni iz njih zapravo nepouzdana.

Upravo su to argumenti na čijim je temeljima nastala hipoteza o determinističkim referentnim modelima, koji koriste stvarne, neobrađene podatke te čine platformu za testiranje sustava. Disertacija sadrži nekoliko znanstvenih doprinosa. Prvo, analizirana je dinamika promjena u višestaznoj okolini bogatoj difrakcijom, uzrokovana konstantnim kretanjem virtualnog izvora. Istražen je i definiran način na koji je potrebno modelirati Dopplerov efekt, kako bi se osiguralo točno praćenje zrake, odnosno pozicije korisnika u mobilnom radiokanalu. Drugo, definiran je parametar entitet zrake koji grupira zrake koje su prošle iste interakcije te na taj način osigurava praćenje zrake kroz radiokanal od njezina izvora do nestanka. Duljina entiteta zrake zapravo je područje vidljivosti pojedine zrake na nekom

dijelu promatrane rute. Osim toga, na temelju rezultata provedenih simulacija, definirano je i područje stacionarnosti. Najkraći entiteti bili su duljine oko 1m, pa se može zaključiti da je upravo to dovoljno fina rezolucija za uzorkovanja prilikom pokretanja simulacija metodom slijeđenja zrake. Pomoću ova tri parametra moguće je osigurati implementaciju mobilnosti u deterministički referentni model te osigurati kontinuirano praćenje prijamnika kroz radiokanal. Također, omogućena je i primjena interpolacije, čime se osigurava proizvoljno fina rezolucija radiokanala uz zanemarivo povećanje računalne složenosti. Napravljena je i usporedba dobivenih vrijednosti s onima koji su dostupni u literaturi. Konceptualno, parametri definirani u ovom radu razlikuju se od onih u COST modelima, no imaju svoje prednosti. Entitet zraka je parametar dobiven iz determinističkih podataka (primjenom algoritma za grupiranje zraka koji je također razvijen u sklopu istraživanja) i potpuno je u skladu s realnim podacima.

Na kraju, predložen je i razrađen koncept determinističkog modela radiokanala u formatu baze podataka unaprijed snimljenih radiokanala. Kao metoda je odabrano simuliranje metodom slijeđenja zrake, što je puno dostupnije od mjerenja, a osigurava vrlo preciznu prostornu rezoluciju. Naravno, ovdje je definiran samo koncept – sama izvedba ovakvog modela poseban je izazov. Upravo je to i prvi korak u nastavku istraživanja, kako bi se uspostavila alternativa stohastičkim modelima.

LITERATURA

- [1] S. R. Saunders, A. Aragon-Zavala: *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Wiley, West Sussex, Engleska, 2007. (drugo izdanje)
- [2] E. Zentner: Antene i radiosustavi, Graphis, Zagreb, 2001.
- [3] T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall PTR Upper Saddle River, New Jersey, SAD, 2001.
- [4] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [5] V. Degli-Esposti: A diffuse scattering model for urban propagation prediction, Antennas and Propagation, IEEE Transactions on , vol.49, no.7, pp. 1111-1113, 2001.
- [6] V. Degli-Esposti, H. L. Bertoni, *Evaluation of the role of diffuse scattering in urban microcellular propagation*, Vehicular Technology Conference (VTC 1999), zbornik radova, pp. 1392-1396, 1999.
- [7] V. Degli-Esposti, D. Guiducci, A. de'Marsi, P. Azzi, F. Fuschini, An advanced field prediction model including diffuse scattering, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.52, no.7, pp. 1717-1728, 2004.
- [8] V. Degli-Esposti, F. Fuschini, E. Vitucci, A fast model for distributed scattering from buildings, 3rd European Conference Antennas and Propagation (EuCAP 2009), zbornik radova, pp. 1932-1936, 2009.
- [9] E. M. Vitucci, F. Mani, V. Degli-Esposti, C. Oestges, *Study of a polarimetric model for diffuse scattering in urban environment*, 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2012), zbornik radova, pp. 39-43, 2012.
- [10] G. Gougeon, Y. Lostanlen, L. Maviel, Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells, 5th European Conference Antennas and Propagation (EUCAP 2011), zbornik radova, pp. 3448-3452, 2011.

- [11] F. Mani, C. Oestges, *Ray-tracing evaluation of diffuse scattering in an outdoor scenario*, 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2011), zbornik radova, pp. 3439-3443, 2011.
- [12] Yu Zhang, Zhong Ji, K. Kim, A. Medouri, M. Salazar-Palma, A survey of various propagation models for mobile communication, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.45, no.3, pp.51-82, 2003.
- [13] D. Gesbert, Multipath: Curse or blessing? A system performance analysis of MIMO wireless systems, pozvani članak, International Zurich Seminar on Communications (IZS), zbornik radova, Zurich, Switzerland, 2004.
- [14] E. Biglieri et al., *MIMO Wireless Communications*, Cambrige University Press, Cambrige, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2007., str. 344
- [15] G. J. Foschini, M. J. Gans, On Limits of wireless Communications in a Fading Environment, Wireless Personal Communications, no. 6, pp. 311-335, 1998.
- [16] F. D. Cardoso, L. M. Correia, Fading depth dependence on system bandwidth in mobile communications - an analytical approximation, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.52, br..3, pp. 587-594, 2003.
- B. Sklar, Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems I: Characterization, IEEE Communications Magazine, vol.35, br. 9, pp.136-146, 1997.
- [18] Z. Chengshan Xiao, R. Yahong, N. C. Beaulieu, *Statistical simulation models for Rayleigh and Rician fading*, IEEE International Conference on Communications (ICC '03), zbornik radova, pp. 3524-3529, 2003.
- [19] R. H. Clarke, Wee Lin Khoo, 3-D mobile radio channel statistics, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.46, br.3, pp. 798-799, 1997.
- [20] A. Burr, *MIMO Wireless: Principles, Potential, Problems and Prospects,* radionica COST 273, Helsinki, Finska, 2002.
- [21] L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, From antenna spacings to theoretical capacities - guidelines for simulating MIMO systems, 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications,

zbornik radova, pp. 587-592, 2002.

- [22] M. Shafi, D. Gesbert, Da-shan Shiu, P. J. Smith, W. H., *Guest editorial MIMO systems and applications II*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.21, br.5, pp. 681-683, 2003.
- [23] M. Shafi, D. Gesbert, Da-shan Shiu, P. J. Smith, W. H. Tranter, *Guest editorial: MIMO systems and applications - I*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.21, br.3, pp.277-280, 2003.
- [24] A. Katalinic, R. Nagy, R. Zentner, Benefits of MIMO Systems in Practice: Increased Capacity, Reliability and Spectrum Efficiency, 48th International Symposium focused on Multimedia Signal Processing and Communications (ELMAR-2006), zbornik radova, pp. 263-266, 2006.
- [25] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, LTE The Long Term Evolution: From Theory to Practice, John Wiley & Sons, West Susex, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2009.
- [26] Chenzi Jiang, L. J. Cimini, *Energy-efficient multiuser MIMO beamforming*, 45th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), zbornik radova, pp.1-5, 2011.
- [27] Yongzhao Li, Lu Zhang, L. J. Cimini, Hailin Zhang, Statistical Analysis of MIMO Beamforming With Co-Channel Unequal-Power MIMO Interferers Under Path-Loss and Rayleigh Fading, IEEE Transactions on Signal Processing, vol.59, br.8, pp.3738-3748, 2011.
- [28] Y. Ogawa, H. P. Bui, H. Nishimoto, T. Nishimura, T. Ohgane, *Performance Considerations on MIMO Spatial Multiplexing from the Viewpoint of Antennas and Propagation*, 2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), zbornik radova, pp.1-11, 2007.
- [29] Ui-Kun Kwon, Gi-Hong Im, Jong-Bu Lim, MIMO Spatial Multiplexing Technique With Transmit Diversity, IEEE Signal Processing Letters, vol.16, br.7, pp. 620-623, 2009.
- [30] A. Mukherjee, A. L. Swindlehurst, Modified Waterfilling Algorithms for MIMO Spatial Multiplexing with Asymmetric CSI, IEEE Wireless Communications Letters, vol.1, br. 2, pp. 89-92, 2012.

- [31] Hao Yu, Shunqing Zhang, V. K. N. Lau, Game Theoretical Power Control for Open-Loop Overlaid Network MIMO Systems with Partial Cooperation, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.10, br.1, pp. 135-141, 2011.
- [32] A. Boukerche, Xin Fei, Energy-Efficient Multi-hop Virtual MIMO Wireless Sensor Network, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007), zbornik radova, pp. 4301-4306, 2007.
- [33] Jong-Moon Chung, Joonhyung Kim, Donghyuk Han, Multihop Hybrid Virtual MIMO Scheme for Wireless Sensor Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, br.9, pp. 4069-4078, 2012.
- [34] D. Gesbert, H. Bolcskei, D. Gore, A. Paulraj, *MIMO wireless channels: capacity and performance prediction*, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '00), zbornik radova, pp. 1083-1088, 2000
- [35] D. W. Bliss, K. W. Forsythe, A. O. Hero, A. L. Swindlehurst, *MIMO* environmental capacity sensitivity, Conference Record of the Thirty-Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, zbornik radova, pp.764-768, 2000.
- [36] M. Kassouf, H. Leib, Shannon capacity and eigen-beamforming for space dispersive multipath MIMO channels, Wireless Communications and Networking (WCNC 2003) pp. 156-161, 2003.
- [37] Dian-Wu Yue, Guang-jian Wang, On the Approximation of MIMO Shannon Capacity Over Spatially Correlated Ricean Fading Channels, First International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCom '06), pp. 1-4, 2006
- [38] P. Chambers, C. Downing, H. Baher, Lower Bound on the Shannon Capacity of MIMO Space-Time Communications Systems Based on the Leakage Level, Antennas and Propagation Conference (LAPC 2007), zbornik radova, pp. 273-276, Loughborough, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2007.
- [39] P. F. Driessen, G. J. Foschini, On the capacity formula for multiple input-multiple output wireless channels: a geometric interpretation, IEEE Transactions on Communications, vol.47, no.2, pp.173,176, 1999.

- [40] D. Gesbert, J. Akhtar, Breaking the barriers of Shannon's capacity: An overview of MIMO wireless system, Telektronikk Telenor Journal, siječanj 2002.
- [41] F. Rosas, C. Oberli, *Energy-efficient MIMO SVD communications*, IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2012), zbornik radova, pp.1588-1593, 2012.
- [42] M. Helin, MIMO Measurements on Indoor Nakagami-m Fading Channels, magistarski rad, Uppsala University, Švedska, 2002.
- [43] S. A. Goldsmith, N. Jafar, S. Jindal, S. Vishwanath: *Capacity Limits of MIMO Channels*, IEEE Journal on Selected Areas in communications, vol. 21, no. 5, pp. 684-702, 2003.
- [44] R. Zentner, A. Katalinić, R. Nagy, Geometry based stochastic analysis of MIMO channel performance when using stacked microstrip antennas, 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009), pp. 3282-3286, 2009.
- [45] S. Loyka, G. Tsoulos, Estimating MIMO System Performance Using the Correlation Matrix approach, IEEE Communication Letters, vol. 6, br. 1, pp. 19-21, 2002.
- [46] U. Martin, M. Grigat, A statistical simulation model for the directional mobile radio channel and its configuration, IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, zbornik radova, pp. 86-90, 1996.
- [47] M. Steinbauer, A. F. Molisch, E. Bonek, *The double-directional radio channel*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.43, br. 4, pp.51-63, 2001.
- [48] R. Bhagavatula, C. Oestges, R. W. Heath, A New Double-Directional Channel Model Including Antenna Patterns, Array Orientation, and Depolarization, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, br. 5, pp. 2219-2231, 2010.
- [49] Jun-ichi Takada, Ichirou Ida, Double-directional channel modeling approach for MIMO mobile communication systems, Japan Society for Simulation Technology Technical Report, JSST-MM2005-10, 2005.
- [50] W. S. Ament, Toward a Theory of Reflection by a Rough Surface, Zbornik radova

IRE, vol.41, br.1, pp. 142-146, 1953.

- [51] J. Soler-Garrido, D. Milford, M. Sandell, H. Vetter, *Implementation and evaluation of a high-performance MIMO detector for wireless LAN systems*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol.57, br. 4, pp. 1519-1527, 2011.
- [52] A. Katalinic, R. Nagy, R. Zentner, Open issues for practical implementation of MIMO systems, 49th International Symposium focused on Multimedia Signal Processing and Communications (ELMAR-2007), zbornik radova, pp. 255-258, 2007.
- [53] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-Esposti, V. Hofstetter, P. Kyosti, D. Laurenson, G. Matz, A.F. Molisch, C. Oestges, H. Ozcelik, *Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2007, ID 19070, 19 str., 2007.
- [54] J. P. Kermoal, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and F. Frederiksen, *A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 20, br. 6, pp. 1211–1226, 2002.
- [55] W. Weichselberger, M. Herdin, H. Ozcelik, E. Bonek, A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, br. 1, pp. 90–99, 2006.
- [56] A. F. Molisch, A. Kuchar, J. Laurila, K. Hugl, R. Schmalenberger, Geometrybased directional model for mobile radio channels—principles and implementation, European Transactions on Telecommunications, vol. 14, br. 4, pp. 351–359, 2003.
- [57] 3GPP 3GPP2 Spatial Channel Model Ad-hoc Group 3GPP TR 25.996, Spatial Channel Model for Multiple Input Mul-tiple Output (MIMO) Simulations, release 11 (2012-09)
- [58] Wireless World Initiative: WINNER model, www.ist-winner.org, 28.3.2013.
- [59] L. Coreia, Wireless Flexible Personalized Communications, Wiley, 2001., 482 str.

- [60] A. F. Molisch, R. Heddergott, M. Steinbauer, T. Zwick, *The COST259 Directional Channel Model Part I: Overview and Methodology*, IEEE Transactions On Wireless Communications, vol. 5, br. 12, 2006.
- [61] H. Asplund, A. Alayon, A. F. Molisch, K. I. Pederson, M. Steinbauer, *The COST259 Directional Channel Model Part I: Macrocells*, IEEE Transactions On Wireless Communications, vol. 5, br. 12, 2006.
- [62] L. Correia, (Ed.), *Mobile Broadband Multimedia Networks*, COST273 final report, Elsevier Science Publishers B.V., 2006.
- [63] I. Sirkova, Overview of COST 273 Part I: propagation modeling and channel characterization, XLI International Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), zbornik radova, pp. 29-32, 2006.
- [64] R. Verdone, A. Zanella, *Pervasive Mobile and Ambient Wireless Communications: COST Action 2100 (Signals and Communications Technology)*, Springer, 2012.
- [65] J. Poutanen, K. Haneda, Liu Lingfeng, C. Oesteges, F. Tufvwsson, P. Vainikainen, *Parameterization of the COST 2100 MIMO channel model in indoor scenarios*, 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2011), zbornik radova, pp. 3606-3610, 2011
- [66] N. Czink, C. Oestges, *The COST 273 MIMO Channel Model: Three Kinds of Clusters*, IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA 2008), pp. 282-286, 2008.
- [67] Hofstetter, H.; Molisch, A.F.; Czink, N., "A twin-cluster MIMO channel model," Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on , vol., no., pp.1,8, 6-10 Nov. 2006
- [68] Czink, N.; Bonek, E.; Hentila, L.; Kyosti, P.; Nuutinen, J. -P; Ylitalo, J., "The interdependence of cluster parameters in MIMO channel modeling," *Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on*, vol., no., pp.1,6, 6-10 Nov. 2006
- [69] L. S. Pedrotti, *Fundamentals of Photonics: Basic Geometry Optics*, on-line predavanja dostupna na www.spie.org, 27.3.2013.

- [70] F. Fuschini, H. El-Sallabi, V. Degli-Esposti, L. Vuokko, D. Guiducci, P. Vainikainen, Analysis of Multipath Propagation in Urban Environment Through Multidimensional Measurements and Advanced Ray Tracing Simulation, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.56, br.3, pp. 848-857, 2008.
- [71] N. Blaunstein, N. Yarkoni, Capacity and spectral efficiency of MIMO wireless systems in multipath urban environments with fading, First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006), zbornik radova, pp.1-5, 2006.
- [72] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 1: Multihop Relay Specification, IEEE Std 802.16j-2009 (dodatak standardu IEEE Std 802.16-2009), pp.1-290, 2009.
- [73] IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, IEEE Std 802.11n-2009 (dodatak standardu IEEE Std 802.11-2007), pp.1-565, 2009.
- [74] E. M. Vitucci, V. Degli-Esposti, F. Fuschini, *MIMO channel characterization through ray tracing simulation*, First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006), zbornik radova, pp.1-6, 2006.
- [75] P. Vainikainen, E. Vitucci, V. Degli-Esposti, T. Laitinen, V. Kolmonen, J. Poutanen, Use of realistic propagation channel information in MIMO antenna system evaluation, 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2011), zbornik radova, pp. 2565-2568, 2011.
- [76] A. Schmitz, T. Rick, T. Karolski, L. Kobbelt, T. Kuhlen, *Beam tracing for multipath propagation in urban environments*," 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009)., zbornik radova, pp. 2631-2635, 2009.
- [77] V. Degli Esposti, "Ray Tracing Techniques", skripta za kolegij, 2009.
- [78] MSI Planet Antenna Format, dostupan na: <u>www.comsitesoftware.com</u>, lipanj 2013.

- [79] B. Keller, *Geometrical Theory of Diffraction*, Journal of the Optical Society of America, vol. 52, br. 2, pp. 116-130, 1962.
- [80] D.A. McNamara, C.W.I. Pistorius, J.A.G. Malherbe, *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, Artech House, Boston London, 1990.
- [81] E. M. Vitucci, F. Mani, V. Degli-Esposti, C. Oestges, Polarimetric Properties of Diffuse Scattering From Building Walls: Experimental Parameterization of a Ray-Tracing Model, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, , vol.60, br. 6, pp.2961-2969, 2012.
- [82] V. Degli-Esposti, V. Kolmonen, E. M. Vitucci, F. Fuschini, P. Vainikainen, Analysis and Ray Tracing Modelling of Co- and Cross-Polarization Radio Propagation in Urban Environment, 2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), zbornik radova, pp.1-4, 2007.
- [83] V. Degli-Esposti, F. Fuschini, E. M. Vitucci, G. Falciasecca, Speed-Up Techniques for Ray Tracing Field Prediction Models, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, br. 5, pp. 1469-1480, 2009.
- [84] V. Degli-Esposti, F. Fuschini, M. Amorini, Database simplification for field prediction in urban environment [radiowave propagation],IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, zbornik radova, pp. 1619-1622, 2004.
- [85] A. Katalinić Mucalo, R. Zentner, T. Delač, Virtual Source Modeling for Diffraction in Reference Channel Models, EuCAP 2013, Gothenburg, Švedska, travanj 2013. (prihvaćen)
- [86] R. Zentner, A. Katalinić, T. Delač, *Diffraction in Urban Scenarios: Where is the (virtual) Source?*, IC1004 TD(12)05028, Bristol, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2012.
- [87] R. Zentner, A. Katalinic, Dynamics of Multipath Variations in Urban Environment, 3rd European Wireless Technology Conference 2010 (EuWiT 2010), zbornik radova, pp. 125-128, 2010.
- [88] A. Katalinic, R. Zentner, *Ray-Tracing Study of Visibility Region Size in Urban Environment*, COST2100 TD(10)12071, Bologna, Italija 2010.

- [89] A. Katalinić, R. Zentner, *Microscopic Level of Visibility Regions for Urban Environment Scenarios*, 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2011), zbornik radova, pp. 2042-4046, 2011.
- [90] R. Zentner, A. Katalinic Mucalo, Ray-Tracing Interpolation for Continuous Modeling of Double Directional Radio Channel, IC004 TD(13)06052, Malaga, Španjolska, 2013.
- [91] R. Zentner, A. Katalinić Mucalo, Ray Tracing Interpolation for Continuous Modeling of Double Directional Radio Channel, Eurocon 2013, Zagreb, Croatia, srpanj 2013. (prihvaćen)
- [92] F. Fuschini et al., Analysis of Multipath Propagation in Urban Environment Through Multidimensional Measurements and Advanced Ray tracing Simulation, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 3, pp. 848–857, 2008
- [93] R. Zentner, A. Katalinić, R. Nagy, A Study of Differencesin Calculated Capacity when Using Single-, Mixed- or Multiple-Bounce GSCM Schemes, COST2100 TD(09)726, Braunschweig, Njemačka 2009
- [94] R. Zentner, A. Katalinic, R. Nagy, *Qualitative comparison of GSCMs with single-, mixed- and multiple-bounce schemes*, International Symposium ELMAR 2009, zbornik radova, pp. 279-284, 2009.
- [95] A. A. M. Saleh, R. A. Valenzuela, A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 5, br. 2, 1987.
- [96] Q. H. Spencer, B. D. Jeffs, M. A. Jensen, A. L. Swindlehurst, Modeling the Statistical Time and Angle of Arrival Characteristics of an Indoor Multipath Channel, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, br. 3, 2000.
- [97] R. Zentner, *Reference Channel Models: Classification and Implementation Challenges*, COST2100 TD(09)997, Beč, Austrija, 2009.
- [98] A. Katalinic, R. Zentner, R., *Reference channel models: Classification and implementation challenges*, ICECom 2010, zbornik radova, pp.1-4, 2010.

- [99] A. Katalinić Mucalo, R. Zentner, N. Mataga, *Benefits and Challenges of Deterministic Channel Model, Automatika*, vol. 53, br. 1, travanj 2012., pp. 80-87
- [100] S. M. Ali, S. Qu, F. Kohandani, P. Lusina, *Deterministic and Statistical-Based Channel Models in the MIMO Link Evaluation*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.8, pp. 927-930, 2009.
- [101] S. Soni, P. S. Chauhan, Y. Shanker, *Improved deterministic model for the characterization of wireless channel*, International Conference on Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies (IMPACT 2011), zbornik radova pp. 20-23, 2011.
- [102] Hu Kai, Cui Chen, Second Order of an Improved Deterministic Model for Rayleigh Fading Channels, 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC), zbornik radova, pp.135-139, 2010.
- [103] Peng Guo; A. R. van Dommele, M. H A J Herben, Method to match waves of raytracing simulations with 3-D high-resolution propagation measurements, 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2012), zbornik radova, pp. 3351-3355, 2012.
- [104] O. Stabler, R. Hoppe, *MIMO channel capacity computed with 3D ray tracing model*, 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009), zbornik radova, pp. 2271-2275, 2009.
- [105] A. Emami-Forooshani, S. Noghanian, Semi-deterministic channel model for multiple input multiple output systems. Part 1: Model development and validation, Microwaves, Antennas & Propagation, IET, vol.4, br.1, pp.17-25, 2010.

ŽIVOTOPIS

Ana Katalinić Mucalo rođena je u Sarajevu 1980. Osnovnu školu pohađala je u Sarajevu i Korčuli, a maturirala je u Općoj gimnaziji u Korčuli 1999. godine. Iste godine upisuje studij na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Diplomirala je 2005. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, smjer radiokomunikacije i profesionalna elektronika. Također na FER-u, 2006. godine upisuje poslijediplomski doktorski studij.

Od 2005. godine radi u Hrvatskoj agenciji za poštu i elektroničke komunikacije u odsjeku za mikrovalne i satelitske mreže, koji se bavi frekvencijskim planiranjem i analizom interferencija nepokretnih usmjerenih veza i satelitskih linkova te međunardnom koordinacijom nepokretnih veza. Također, aktivno sudjeluje u radu međunarodne radne grupe WGSE (*Working Group Spectrum Engineering*), koja djeluje unutar CEPT-a (Europske konferencije poštanskih i telekomunikacijskih uprava), a čiji su zadatak studije kompatibilnosti između postojećih i novih tehnologija, razvoj kriterija za koegzistenciju različitih radiokomunikacijskih sustava koji dijele isto frekvencijsko područje te tehnička analiza CEPT-ovih odluka i preporuka.

U sklopu znanstveno-istraživačkog rada na poslijediplomskom studiju, objavila je 15ak znanstvenih radova te sudjelovala u radu europskih projekata COST2100 i IC1004. Članica je IEEE-a. Bila je voditeljica GOLD skupine Hrvatske sekcije IEEE-a od 2010. do 2012. godine, a trenutno obnaša fumkciju tajnice Sekcije.

POPIS RADOVA

Časopis s međunarodnom recenzijom:

1. A. Katalinić Mucalo, R. Zentner, N. Mataga, *Benefits and Challenges of Deterministic Channel Model, Automatika*, vol. 53, br. 1, travanj 2012., pp. 80-87

Znanstveni skupovi s međunarodnom recenzijom

- A. Katalinić, R. Nagy, R. Zentner: "Benefits of MIMO Systems in Practice: Increased Capacity, Reliability and Spectrum Efficiency", 48. Međunarodni simpozij Croatian Society Electronics in Marine – ELMAR, Zadar, lipanj 2006.
- A. Katalinić, R. Nagy, R. Zentner: "Open Issues for Practical Implementation of MIMO Systems", 49. Međunarodni simpozij Croatian Society Electronics in Marine – ELMAR, Zadar, lipanj 2007.
- R. Zentner, A. Katalinic, R. Nagy: "Geometry Based Stochastic Analysis of MIMO channel performance when using Stacked Microstrip Antennas", 3. European Conference on Antennas and Propagation - EuCAP, Berlin, Njemačka, ožujak 2009.
- R. Zentner, A. Katalinic, R. Nagy: "Qualitative Comparison of GSCMs with Single-, Mixed- and Multiple-Bounce Schemes", 51. Međunarodni simpozij Croatian Society Electronics in Marine – ELMAR, Zadar, rujan 2009.
- A. Katalinić, R. Zentner: "Reference Channel Models: Classification and Implementation Challenges", 20. Međunarodni simpozij ICECom, Dubrovnik, rujan 2010.
- 6. R. Zentner, A. Katalinic: "Dynamics of Multipath Variations in Urban Environment", European Microwave Week, EuWiT, Pariz, Francuska, rujan 2010.
- A. Katalinić, R. Zentner: "Microscopic Level of Visibility Regions for Urban Environment Scenarios", 5. European Conference on Antennas and Propagation -EuCAP, Rim, Italija, travanj 2011.

- R. Zentner, A. Katalinić Mucalo, *Ray Tracing Interpolation for Continuous Modeling* of Double Directional Radio Channel, Eurocon 2013, Zagreb, Croatia, srpanj 2013. (prihvaćen)
- A. Katalinić Mucalo, R. Zentner, T. Delač, Virtual Source Modeling for Diffraction in Reference Channel Models, EuCAP 2013, Gothenburg, Švedska, travanj 2013. (prihvaćen)

Izvješća/znanstveni skupovi:

- R. Zentner, A. Katalinic, R. Nagy: "A Study of Differences in Calculated Capacity when using Single-, Mixedor Multiple-Bounce GSCM Schemes, COST2100, Braunschweig, Njemačka, veljača 2009.
- 2. A. Katalinić, R. Nagy, R. Zentner: "Reference Channel Models: Classification and Implementation Challenges", COST2100, Beč, Austrija, rujan 2009.
- 3. A. Katalinic, R. Zentner: "Ray-tracing Study of Visibility Region Size in Urban Environment", COST2100, Bologna, Italija, studeni 2010.
- R. Zentner, A. Katalinic Mucalo, *Ray-Tracing Interpolation for Continuous Modeling* of Double Directional Radio Channel, IC004 TD(13)06052, Malaga, Španjolska, 2013.
- 5. R. Zentner, A. Katalinić, T. Delač, *Diffraction in Urban Scenarios: Where is the* (*virtual*) *Source?*, IC1004 TD(12)05028, Bristol, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2012.

BIOGRAPHY

Ana Katalinić Mucalo was born in 1980 in Sarajevo. She attended elementary school in Sarajevo and Korčula, where she graduated from high school in 1999. The same year she started studies at the Faculty of electrical engineering and computing at University of Zagreb She graduated in 2005.

Since graduation she has been with Radiocommunications Department at Croatian Post and Electronic Communications Agency (HAKOM) as an Expert for Microwave and Satellite Networks, dealing mostly with frequency planning and interference analysis of fixed point-topoint and satellite links, as well as with cross-border coordination for fixed networks. She is also engaged in work of CEPT working group SE (Spectrum Engineering), which deals with compatibility studies and development of sharing criteria between different radiocommunications services and provides technical background for ECC decisions and recommendations. She has published more than 15 scientific papers in conference proceedings and participated in European Union funded project for wireless communications COST2100. She is IEEE member. She has served as a Croatia Section GOLD AG Chair 2010-2012 and currently serves as the Croatia Section secretary.

LIST OF PUBLICATIONS

Internationa Journal Paper:

1. A. Katalinić Mucalo, R. Zentner, N. Mataga, *Benefits and Challenges of Deterministic Channel Model, Automatika*, vol. 53, br. 1, travanj 2012., pp. 80-87

Scientific Conference Papers with international peer-review

- A. Katalinić, R. Nagy, R. Zentner: "Benefits of MIMO Systems in Practice: Increased Capacity, Reliability and Spectrum Efficiency", 48th International Symposium Croatian Society Electronics in Marine – ELMAR, Zadar, Croatia, June 2006
- A. Katalinić, R. Nagy, R. Zentner: "Open Issues for Practical Implementation of MIMO Systems", 49th International Symposium Croatian Society Electronics in Marine – ELMAR, Zadar, Croatia, June 2007
- R. Zentner, A. Katalinic, R. Nagy: "Geometry Based Stochastic Analysis of MIMO channel performance when using Stacked Microstrip Antennas", 3rd European Conference on Antennas and Propagation - EuCAP, Berlin, Germany, March 2009
- R. Zentner, A. Katalinic, R. Nagy: "Qualitative Comparison of GSCMs with Single-, Mixed- and Multiple-Bounce Schemes", 51st International Symposium Croatian Society Electronics in Marine – ELMAR, Zadar, Croatia, September 2009
- A. Katalinić, R. Zentner: "Reference Channel Models: Classification and Implementation Challenges", 20th International Symposium ICECom, Dubrovnik, Croatia, September 2010
- 6. R. Zentner, A. Katalinic: "Dynamics of Multipath Variations in Urban Environment", European Microwave Week, EuWiT, Pariz, France, September 2010.
- A. Katalinić, R. Zentner: "Microscopic Level of Visibility Regions for Urban Environment Scenarios", 5th European Conference on Antennas and Propagation -EuCAP, Rome, Italy, April 2011.
- R. Zentner, A. Katalinić Mucalo, *Ray Tracing Interpolation for Continuous Modeling* of *Double Directional Radio Channel*, Eurocon 2013, Zagreb, Croatia, July 2013 (accepted)
- A. Katalinić Mucalo, R. Zentner, T. Delač, Virtual Source Modeling for Diffraction in Reference Channel Models, EuCAP 2013, Gothenburg, Sweden, April 2013 (accepted)

Reports / other symposiums:

- R. Zentner, A. Katalinic, R. Nagy: "A Study of Differences in Calculated Capacity when using Single-, Mixedor Multiple-Bounce GSCM Schemes, COST2100, Braunschweig, Germany, February 2009
- A. Katalinić, R. Nagy, R. Zentner: "Reference Channel Models: Classification and Implementation Challenges", COST2100, Vienna, Austria, September 2009
- 8. A. Katalinic, R. Zentner: "Ray-tracing Study of Visibility Region Size in Urban Environment", COST2100, Bologna, Italy, November 2010
- 9. R. Zentner, A. Katalinic Mucalo, *Ray-Tracing Interpolation for Continuous Modeling* of Double Directional Radio Channel, IC004 TD(13)06052, Malaga, Spain, 2013
- 10. R. Zentner, A. Katalinić, T. Delač, *Diffraction in Urban Scenarios: Where is the* (virtual) Source?, IC1004 TD(12)05028, Bristol, UK, 2012