IZDELAVA KART RADIJSKEGA OKOLJA Z DINAMIČNIMI PROSTORSKO PORAZDELJENIMI IZMERKI

Marko Pesko

Doktorska disertacija
Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana
Ljubljana, Slovenija, maj 2015

Komisija za oceno doktorske disertacije:

doc. dr. Aleš Švigelj, predsednik, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija
prof. dr. Gorazd Kandus, član, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija
prof. dr. Andrej Kos, član, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Slovenija

MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA
JOŽEF STEFAN INTERNATIONAL POSTGRADUATE SCHOOL



Marko Pesko

IZDELAVA KART RADIJSKEGA OKOLJA Z DINAMIČNIMI PROSTORSKO PORAZDELJENIMI IZMERKI

Doktorska disertacija

RADIO ENVIRONMENT MAP CONSTRUCTION USING DYNAMIC SPATIALLY DISTRIBUTED MEASUREMENTS

Doctoral Dissertation

Mentor: doc. dr. Mihael Mohorčič

Somentor: doc. dr. Tomaž Javornik

Ljubljana, Slovenija, maj 2015

Kazalo vsebine

Povzetek ..... **IX**

Abstract ..... **XI**

Seznam kratic ..... **XIII**

Seznam uporabljenih izrazov ..... **XV**

Seznam uporabljenih simbolov ..... **XVII**

1 Uvod **1**
1.1 Opis problema 1
1.2 Hipoteza 2
1.3 Prispevki doktorske disertacije 3
1.4 Organizacija doktorske disertacije 3

2 Karte radijskega okolja **5**
2.1 Struktura kart RO 5
2.2 Področja uporabe kart RO 6
2.3 Vsebina karte RO 8
2.3.1 Karte radijskega pokrivanja 10

3 Izdelava kart radijskega okolja **13**
3.1 Izmerki jakosti radijskega signala 14
3.1.1 Tipi naprav MCD 14
3.1.2 Posebne metrike za predstavitev jakosti izmerkov 14
3.1.3 Porazdelitve izmerkov, načini njihovega pridobivanja in obdelava 15
3.2 Neposredni postopki 16
3.2.1 Metoda inverzne utežene razdalje 17
3.2.2 Metoda najbližjega soseda 18
3.2.3 Metoda naravnih sosedov 19
3.2.4 Spremenjena Shepardova metoda 20
3.2.5 Metoda gradienta in inverzne kvadratno utežene razdalje 22
3.2.6 Metoda zlepkov 22
3.2.7 Krigingova metoda 22
3.3 Posredni postopki 24
3.3.1 Metoda LIvE 25
3.4 Hibridni postopki 26
3.5 Analiza obstoječih postopkov izdelave kart radijskega okolja in možne izboljšave 27
3.6 Ključne ugotovitve 30

4 Samouglaševalna metoda za posredno izdelavo kart RP 31
4.1 Zasnova in delovanje metode STM 31
4.2 Primer izvedbe metode STM 32

5 Testno okolje za izdelavo kart RP 37
5.1 Struktura testnega okolja 37
5.2 Modeli za opis razširjanja radijskega valovanja 40
5.3 Modeli za izračun izgube poti zaradi senčenja na ovirah na poti razširjanja radijskega valovanja 40
5.4 Lokalizacijski postopki 41

6 Preizkus in ovrednotenje metode STM 43
6.1 Metrike za oceno natančnosti kart RP in postopkov njihove izdelave 43
6.2 Preizkus in ovrednotenje metode STM s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki 44
6.2.1 Simulacijski scenarij in referenčna karta RP 44
6.2.2 Vhodni podatki 45
6.2.3 Izvedba postopkov izdelave kart RP 46
6.2.4 Analiza rezultatov in diskusija 48
6.3 Preizkus in ovrednotenje metode STM z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki 53
6.3.1 Simulacijski scenarij in referenčna karta RP 53
6.3.2 Vhodni podatki 54
6.3.3 Izvedba postopkov izdelave kart RP 55
6.3.4 Analiza rezultatov in diskusija 56
6.3.5 Sklepne ugotovitve 60
6.4 Izdelava časovno spremenljivih kart RP z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki 60
6.4.1 Simulacijski scenarij in referenčna karta RP 61
6.4.2 Vhodni podatki 62
6.4.3 Izvedba postopkov izdelave kart RP 62
6.4.4 Analiza rezultatov in diskusija 63

7 Pridobivanje izmerkov prostorsko porazdeljenih naprav MCD po načinu soudeležbe 69
7.1 Problematika pridobivanja izmerkov naprav MCD preko mobilnih omrežij 69
7.2 Izvedene rešitve za pridobivanje izmerkov naprav MCD po načinu soudeležbe 71
7.2.1 Mobilna naprava v vlogi naprave MCD 71
7.2.2 Mobilna naprava v vlogi komunikacijskega prehoda 75
7.2.3 Pridobivanje izmerkov na zahtevo kart RO v zunanjih omrežjih 77

8 Zaključki in smernice za nadaljnje delo 79
8.1 Izvirni znanstveni dosežki 79
8.2 Smernice za nadaljnje delo 80

9 Zahvale 81

10 Literatura in viri 83

Kazalo slik 91

Kazalo tabel **95**

Kazalo algoritmov **97**

Priloge **99**

Povzetek

Hiter razvoj različnih brezžičnih telekomunikacijskih omrežij, naprav in storitev izpostavlja omejitve obstoječe ureditve radijskega spektra. Pri tem postajajo aktualni koncepti povečevanja učinkovitosti rabe radijskega spektra, med katere spadata kognitivni radio in dinamično dodeljevanje frekvenčnega spektra. Oba koncepta temeljita na poznavanju zasedenosti radijskega spektra na brezžičnih napravah. Za tiste naprave, ki ne morejo zaznavati spektra s predpisano občutljivostjo, in naprave z nezmožnostjo zaznavanja radijskega spektra lahko zavedanje radijske okolice temelji na informacijah iz geolokacijske tabele zasedenosti radijskih kanalov in karte radijskega okolja.

Velik praktični potencial imajo zaradi vsestranske uporabnosti zlasti karte radijskega okolja. Med glavne prepreke za njihovo vpeljavo v sodobna komunikacijska omrežja spada izdelava zanesljivih kart radijskega pokritja v kompleksnih radijskih okoljih, ki predstavljajo osnovo za izračun interferenčnih razmer na izbranem geografskem področju. Kljub temu, da je raziskovalno področje izdelave kart radijskega pokritja aktualno že vrsto let, nekatera vprašanja še niso ustrezno raziskana. Na nekatera izmed teh vprašanj odgovarja ta disertacija.

V disertaciji smo najprej pregledali in analizirali obstoječe neposredne, posredne in hibridne postopke za izdelavo kart radijskega pokritja. Njihov pregled in analiza sta razkrila pomanjkanje naprednih rešitev, ki bi upoštevale dodatne sloje informacij za izboljšanje kakovosti izdelanih kart radijskega pokritja. V disertaciji smo predstavili možnosti njihove izboljšave in podali smernice za izdelavo natančnejšega postopka.

Zaradi neobstoja namenskega testnega okolja za izdelavo kart radijskega pokritja smo v programskem okolju Matlab razvili izvirno testno okolje za izdelavo kart radijskega pokritja. To okolje omogoča preučevanje in razumevanje metod lokalizacije oddajnikov ter modelov razširjanja radijskega valovanja in tako modeliranje novih oziroma nadgrajevanje obstoječih postopkov izdelave kart radijskega okolja.

V testnem okolju smo razvili izvirni posredni postopek za natančnejšo izdelavo kart radijskega pokritja, ki za dosego natančnega prileganja ocenjenih vrednosti jakosti radijskega signala na izmerke upošteva karakteristike okolja in oceni parametre oddajnika ter modela za opis razširjanja radijskega valovanja. Zaradi načina delovanja smo ga poimenovali samouglaševalna metoda za posredno izdelavo kart radijskega pokritja.

Razvito metodo smo preizkusili in ovrednotili z računalniško simulacijo ob upoštevanju modela realnega radijskega okolja in naključno porazdeljenih simulacijsko generiranih izmerkov jakosti radijskega signala, ki v različnih referenčnih scenarijih posnemajo pridobivanje izmerkov po načinu soudeležbe. Pokazali smo, da je nova metoda natančnejša od najpogosteje uporabljenih obstoječih postopkov izdelave kart radijskega pokritja. Dodatno smo pokazali, da je natančna izdelava kart radijskega pokritja oddajnikov z usmerjeno anteno pogojena z uporabo sidrnih izmerkov jakosti radijskega signala izven glavnih snopov usmerjenih anten.

V nadaljevanju smo novo metodo preizkusili in ovrednotili še z izmerki obstoječega radijskega omrežja na istem geografskem področju, kot je bilo upoštevano v simulacijah. S tem smo potrdili, da je mogoče z uporabo različnih dodatnih informacij geografskega informacijskega sistema in časovno ter prostorsko porazdeljenih izmerkov tudi v praksi

omogočiti izboljšano natančnost izdelanih kart radijskega pokritja v primerjavi z obstoječimi postopki.

Delovanje samouglaševalne metode smo preverili tudi z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki na primeru izdelave časovno spremenljivih kart radijskega pokritja premikajočega se oddajnika in pokazali, da je izdelavo kart RP možno izboljšati z uporabo izmerkov več časovnih trenutkov. S tem smo v celoti potrdili delovno hipotezo disertacije, da je mogoče z novim postopkom izdelave kart radijskega pokritja, z vključitvijo dinamike, z uporabo različnih dodatnih informacij sistema geografskega informacijskega sistema, časovno in prostorsko porazdeljenih izmerkov, omogočiti enako ali izboljšano natančnost izdelanih kart radijskega pokritja v primerjavi z obstoječimi postopki.

V realnosti vsi postopki izdelave kart radijskega pokritja za natančno delovanje potrebujejo vrsto prostorsko porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala. V okviru disertacije smo zato pregledali, proučili in podali rešitve problematike dostopa do izmerkov naprav zmožnih izvajanja meritev. Poudarek smo dali na pridobivanje njihovih izmerkov preko mobilnih omrežij po načinu soudeležbe. Kot možne rešitve zaznane problematike smo predlagali uporabo mobilnih naprav v vlogi komunikacijskih prehodov za senzorska vozlišča, neposredno uporabo mobilnih naprav kot naprav za izvajanje meritev in uporabo privatnih dostopovnih točk mobilnih omrežij za dostop do izmerkov iz zunanjih omrežij.

Abstract

The rapid development of various telecommunication networks, devices and services is highlighting the limitations imposed by the current spectrum regulation that is calling for some radical improvements. In this respect, new concepts for more efficient spectrum use, including cognitive radio and dynamic spectrum access, are gaining the importance. Both concepts rely on the information about available spectrum on wireless devices. Some devices that cannot fulfil the required sensitivity criteria for a reliable detection of radio signals and devices without spectrum sensing capabilities can rely on geolocation tables and radio environment maps to obtain radio environment awareness.

Due to their versatility radio environment maps are exhibiting particularly great potential. However, the construction of reliable radio coverage maps in complex real life environments that represent the basis for calculation of interference levels is still an active research problem that prevents their immediate introduction into contemporary communication networks. Although the field has been investigated for several years, there are still some unsolved issues, some of them addressed by this thesis.

In the thesis we first surveyed and analysed the existing direct, indirect, and hybrid methods for constructing radio coverage maps. Their critical assessment showed that they do not rely on advanced solutions which could notably enhance the accuracy of constructed radio coverage maps. Consequently, we proposed directions for their improvement and outlined the development of a more accurate method.

Since there is no dedicated testing environment for constructing the radio coverage maps, we developed one in a Matlab programming environment. The testing environment enables studying the operation of localization methods and radio propagation models required for modelling new and enhancing the existing methods for constructing radio environment maps.

In our testing environment, we developed a novel indirect method for constructing more accurate radio coverage maps that takes into account the characteristics of the operating environment and performs estimation of the transmitter parameters as well as the parameters of the propagation model to obtain best match between the available measurements and the predicted signal levels. Due to its principles of operation we named it a self-tuning method for indirect construction of radio coverage maps.

With initial simulations considering the information on a real operating environment and randomly distributed signal measurements in time and space, mimicking the collection of measurements in a participatory manner, we first verified and evaluated the developed method in several reference scenarios. We demonstrated that our approach has higher accuracy compared to the most commonly used existing methods. Furthermore, we showed that in case of transmitters with directional antennas the construction of radio coverage maps demands anchor signal measurements outside the main lobe of the antenna.

Next, we verified and evaluated the developed method by using real signal measurements obtained from the same geographic area as considered in simulations. The results confirmed that the accuracy of constructed radio coverage maps can be in practice enhanced by using distributed temporal and spatial signal measurements in combination

with various information from geographic information systems.

Finally, we used the self-tuning method in a simulation scenario with a mobile transmitter to test the construction of time-varying radio coverage maps by using dynamic spatially distributed measurements and showed that the use of measurements from several time moments can enhance the accuracy of constructed coverage maps. By using the self-tuning method, with the introduction of dynamics, the use of additional information from geographic information system, and the use of distributed temporal and spatial signal measurements we fully confirmed the working hypothesis of the dissertation. Such approach allows to construct similarly accurate or more accurate radio coverage maps in comparison to the existing methods.

In reality a set of spatially distributed signal measurements is needed for an accurate construction of radio coverage maps. Therefore, we surveyed, analysed and proposed several solutions to the problem of practical acquisition of signal measurements from measurements capable devices. In particular, we focused on measurements acquisition via mobile networks in a participatory manner. As possible solutions to the problem we suggested the use of mobile devices as measurements capable devices or as communication gateways for sensor nodes.

Seznam kratic

Kratica		Angleški izraz		Slovenski izraz
AOA	=	angle of arrival	/	kot prejetja radijskega signala
APN	=	access point name	/	ime dostopovne točke
ASU	=	arbitrary strength unit	/	poljubna enota jakosti radijskega signala
CBC	=	content based charging	/	zaračunavanje vsebine
CDF	=	cumulative distribution function	/	porazdelitvena funkcija
DVB-T	=	digital video broadcasting-terrestrial	/	digitalna zemeljska ali prizemna radiodifuzija
EPS	=	connection-oriented transmission network bearer, EPS bearer	/	nosilec povezovalno orientiranega prenosnega omrežja, nosilec EPS
FW	=	firewall	/	požarni zid
GGSN	=	gateway general packet radio service support node	/	podporno vozlišče za prehod splošnih paketnih radijskih storitev
GIDS	=	gradient plus inverse distance squared method	/	metoda gradienta in inverzne utežene razdalje
GIS	=	geographic information system	/	geografski informacijski sistem
GPS	=	global positioning system	/	globalni pozicionirni sistem
IDS	=	intrusion detection system	/	sistem za odkrivanje vdorov
IDW	=	inverse distance weighted	/	inverzna utežena razdalja
IDW2	=	inverse distance squared weighted	/	inverzna kvadratno utežena razdalja
IP	=	internet protocol	/	internetni protokol
IPS	=	intrusion prevention system	/	sistem za preprečevanje vdorov
LTE	=	long term evolution	/	tehnologija dolgoročne evolucije
MAE	=	mean absolute error	/	srednja absolutna napaka
MCD	=	measurement capable device	/	naprava zmožna izvajanja meritev
MSE	=	mean square error	/	srednja kvadratna napaka
MSM	=	modified Shepard’s method	/	spremenjena Shepardova metoda
NN	=	nearest neighbour method	/	metoda najbližjega soseda
NNI	=	natural neighbour method	/	metoda naravnih sosedov
PDP	=	packet data protocol	/	protokol paketnih podatkov
REM	=	radio environment maps	/	karte radijskega okolja
REM-SA	=	radio environment maps storage and acquisition unit	/	enota za zbiranje in hranjenje podatkov

RMAE	=	relative mean absolute error	/	relativna srednja absolutna napaka
RO	=	radio environment	/	radijsko okolje
ROC	=	receiver operating characteristics	/	krivulja karakteristike delovanja sprejemnika
RP	=	radio coverage	/	radijsko pokritje
RSCP	=	received signal code power	/	kodna moč prejetega signala
RSRP	=	reference signal received power	/	referenčni signal prejete moči
RSRQ	=	reference signal received quality	/	referenčni signal prejete kakovosti
RSSI	=	received signal strength indicator	/	indikator moči prejetega signala
RTT	=	round trip time	/	čas obhoda
SGSN	=	serving GPRS support node	/	strežno podporno vozlišče splošne paketne radijske storitve
SN	=	sensor node	/	senzorsko vozlišče
STM	=	self-tuning method	/	samouglaševalna metoda
TA	=	timing advance	/	predučasenje
TDOA	=	time difference of arrival	/	časovna razlika prihodov
TM	=	traffic management	/	upravljanje prometa
TOA	=	time of arrival	/	čas prihoda
USB	=	universal serial bus	/	univerzalno serijsko vodilo
USRP	=	universal software radio peripheral	/	univerzalna programabilna radijska naprava
WLAN	=	wireless local area network	/	brezžično lokalno omrežje
2G	=	2nd generation of mobile networks	/	mobilni sistemi druge generacije
3G	=	3rd generation of mobile networks	/	mobilni sistemi tretje generacije
4G	=	4th generation of mobile networks	/	mobilni sistemi četrte generacije

Seznam uporabljenih izrazov

Angleški izraz	Slovenski izraz
backpropagation	vzvratno razširjanje
cognitive engine	kognitivni stroj
front-to-back ratio	razmerje naprej-nazaj
knowledge base	baza znanja
natural neighbour	naravni sosed
nodal function	vozliščna funkcija
objective function	ciljna funkcija
opportunistic manner	priložnost za skupno sodelovanje
out-of-band cognitive femto-cell	kognitivna femto celica izven pasu
participatory manner	način soudeležbe
radio electric exposure level map	karta električnih nivojev radijskega signala
radio frequency environment map	radio frekvenčna okoljska karta
REM manager	upravitelj karte radijskega okolja
soft frequency reuse	mehka pouporaba frekvenc
spectrum leaser, broker or seller	najemodajalec, posrednik oziroma prodajalec spektra
spectrum refarming	preurejanje uporabe spektra
spline, splines	zlepek, metoda zlepkov

Seznam uporabljenih simbolov

Simbol

N	=	število vseh izmerkov ali naprav, ki so na voljo
P_i	=	vrednost i-tega izmerka jakosti radijskega signala, i-ti izmerek
P_{rx}	=	ocena jakosti radijskega signala v točki sprejema
(x, y)	=	koordinata geografske lokacije
w_i	=	utež i-tega izmerka jakosti radijskega signala
d	=	evklidska razdalja
p	=	utežna potenca
K	=	določeno, izbrano število izmerkov
V_i	=	i-ti Voronoijev poligon
$V_{P_{rx}}$	=	Voronoijev poligon, ki vključuje točko interpoliranja
W_i	=	i-ta lokalna koordinata naravne okolice točke interpoliranja
Q_i	=	vrednost vozliščne funkcije v lokaciji i-tega izmerka
r_w	=	radij vplivnega območja točke interpoliranja
r_ω	=	radij vplivnega območja izmerkov
P_j	=	vrednost j-tega izmerka, uporabljenega za prileganje vozliščne funkcije, j-ti izmerek
ω_j	=	utež j-tega izmerka, uporabljenega za prileganje vozliščne funkcije
D	=	maksimalna evklidska razdalja med izmerki
N_w	=	pričakovano število izmerkov znotraj krožnic z radijem r_w
N_ω	=	pričakovano število izmerkov znotraj krožnic z radijem r_ω
z	=	nadmorska višina točke interpoliranja
z_i	=	nadmorska višina i-tega izmerka
C_x	=	gradient jakosti radijskega signala v smeri x osi koordinatnega sistema
C_y	=	gradient jakosti radijskega signala v smeri y osi koordinatnega sistema
C_z	=	gradient jakosti radijskega signala v smeri z osi koordinatnega sistema
$m(x, y)$	=	povprečna vrednost funkcije naključnega procesa v točki interpoliranja
$m(x_i, y_i)$	=	povprečna vrednost funkcije naključnega procesa v točki i-tega izmerka
P^*_{rx}	=	splošna Krigingova cenilka
$P^*_{rx_{SK}}$	=	cenilka enostavnega Kriginga
$w_{i_{SK}}$	=	utež i-tega izmerka pri enostavnem Krigingu
$P^*_{rx_{OK}}$	=	cenilka splošnega Kriginga
$w_{i_{OK}}$	=	utež i-tega izmerka pri splošnem Krigingu

d_h	=	razdalja zamika pri semivariogramu
γ	=	semivarianca
M_p	=	število parov izmerkov, za katere se izračuna razdalja zamika in semivarianca
μ	=	Lagrangeov parameter
P_{tx}	=	moč, s katero oddaja oddajnik
P_{L0}	=	izguba poti pri referenčni razdalji
α	=	faktor izgube poti
M	=	število točk karte RP, za katere se ocenjuje jakost radijskega signala
O	=	notacija za opis ocene računske kompleksnosti
k	=	število naravnih sosedov posamezne točke interpoliranja pri metodi NNI
p_s	=	red izbrane funkcije zlepka
p	=	število neznank v obravnavanem linearnem sistemu enačb
G_t	=	dobitek oddajne antene
G_r	=	dobitek sprejemne antene
L	=	izguba poti
L_t	=	izguba dovoda oddajnika
L_r	=	izguba dovoda sprejemnika
G_{max}	=	maksimalni dobitek antene
FBR_Θ	=	razmerje naprej-nazaj v horizontalni smeri
Θ_0	=	azimut antene, tj. horizontalni kot glavnega snopa antene glede na geografski sever
Θ_i	=	horizontalni kot med azimutom antene in določeno geografsko lokacijo v prostoru
m	=	koeficient, ki določa širino glavnega snopa antene v horizontalni smeri
FBR_Φ	=	razmerje naprej-nazaj v vertikalni smeri
Φ_0	=	nagib antene, vertikalni kot glavnega snopa antene glede na horizont
Φ_i	=	kot med nagibom antene in določeno geografsko lokacijo v prostoru
n	=	koeficient, ki definira širino glavnega snopa antene v vertikalni smeri
$RMSE$	=	koren srednje kvadratne napake
$\overline{RMSE}$	=	srednja vrednost korena srednje kvadratne napake
$CDZR_1$	=	delež pravilne detekcije področja
$FAZR$	=	delež detekcije področja z lažnim alarmom
λ	=	valovna dolžina signala
L_s	=	izguba poti zaradi strojne opreme
d_0	=	referenčna razdalja
X_σ	=	Gaussova gostota verjetnosti
f	=	frekvenca signala
h_t	=	višina antene oddajnika
h_r	=	višina antene sprejemnika
h_{ef}	=	efektivna višina oziroma višinska razlika med oddajnikom in sprejemnikom
$\delta(h_r)$	=	korekcijski faktor višine modela Hata COST 231

$\vec{A}$	=	vektor kontrolnih parametrov spremenjenega modela Okumura-Hata
K	=	prispevek izgube poti zaradi senčenja na ovirah, na poti razširjanja radijskega valovanja
E	=	prispevek izgube poti zaradi ukrivljenosti površja pri velikih razdaljah
L_{LOS}	=	prispevek izgube poti neoviranega razširjanja radijskega valovanja
L_{NLOS}	=	prispevek izgube poti oviranega razširjanja radijskega valovanja
L_{clut}	=	prispevek izgube poti določenega tipa rabe tal na lokaciji sprejema radijskega signala
L_{KE}	=	izguba poti zaradi senčenja radijskega signala na klinastih ovirah
h_n	=	normalizirana višina najvišje ovire nad osjo prve Fresnelove cone na poti razširjanja radijskega valovanja
E_{Rx}	=	električno polje v točki sprejema
$E_{Rx\,0}$	=	električno polje v točki sprejema v primeru razširjanja radijskega valovanja v praznem prostoru
ν	=	Fresnelov parameter
$F_c(\nu)$	=	Fresnelov integral
$C(\nu)$	=	realni del Fresnelovega integrala
$S(\nu)$	=	imaginarni del Fresnelovega integrala
L_{KE_S}	=	skupna izguba poti zaradi uklona radijskega signala na več klinastih ovirah
d_{ekv}	=	razdalja med oddajnikom in ekvivalentno klinasto oviro pri modelu Bullington
h_{ekv}	=	višina ekvivalentne klinaste ovire pri modelu Bullington
dom	=	oznaka dominantne ovire
h_i	=	višina i-te ovire na poti razširjanja radijskega valovanja
d_j	=	razdalja ovire na poti razširjanja radijskega valovanja od točke oddajanja
d_k	=	razdalja ovire na poti razširjanja radijskega valovanja do točke sprejema
ν_i	=	Fresnelov parameter i-te ovire na poti razširjanja radijskega valovanja
$L_{KE\,i}$	=	prispevek izgube poti zaradi i-te ovire na poti razširjanja radijskega valovanja
Z	=	število ovir, ki jih pri izračunu L_{KE_S} upošteva model Deygout 1996
TC	=	korekcijski faktor v modelu Deygout 1991
m_i	=	oznaka i-te ovire na poti razširjanja radijskega valovanja
m_{gl}	=	oznaka glavne ovire na poti razširjanja radijskega valovanja
m_{dr}	=	oznaka druge ovire na poti razširjanja radijskega valovanja
r	=	radij Fresnelove cone
p_o	=	parameter za izračun korekcijskega faktorja TC v modelu Deygout 1991
q_o	=	parameter za izračun korekcijskega faktorja TC v modelu Deygout 1991
$\vec{\beta}$	=	vektor nastavljivih parametrov modela za opis razširjanja radijskega valovanja v predstavljeni izvedbi metode STM
R	=	množica točk karte RP za katere se ocenjuje jakost radijskega signala

T	=	področje točk karte RP, kjer se lahko nahaja oddajnik
$\vec{\beta}^*$	=	vektor parametrov modela za opis razširjanja radijskega valovanja v predstavljeni izvedbi metode STM
T_j^*	=	ocenjena točka karte RP, kjer se nahaja oddajnik
j^*	=	ocenjen indeks točke karte RP, kjer se nahaja oddajnik
t	=	časovni trenutek
t_0	=	prvi časovni trenutek
N_d	=	želeno število izmerkov za izdelavo karte RP
φ	=	kot izbrane točke na krožnici
Δ_α	=	relativna razlika med faktorjem izgube poti pri lokalizaciji na podlagi vzvratnega razširjanja
ϑ	=	kot prejetja radijskega signala
J	=	oznaka cenovne funkcije pri lokalizaciji na podlagi vzvratnega razširjanja
η	=	korak posodobitve vrednosti faktorjev izgube poti pri lokalizaciji na podlagi vzvratnega razširjanja
TA	=	parameter predučasenja
$\Delta_{d_{GSM}}$	=	korak v razdalji pri lokalizaciji na podlagi predučasenja v primeru tehnologije GSM
$\Delta_{d_{LTE}}$	=	korak v razdalji pri lokalizaciji na podlagi predučasenja v primeru tehnologije LTE
d_{max}	=	maksimalna razdalja med oddajnikom in sprejemnikom pri uporabi predučasenja

1 Uvod

Za radijske komunikacije je značilno, da si naprave delijo skupen prenosni medij, radijski spekter, zaradi česar je bila uvedena njegova regulacija. Tradicionalno je radijski spekter razdeljen na licenčne in nelicenčne frekvenčne pasove. Licenčni pasovi so namenjeni in rezervirani zgolj za licenčne uporabnike, nelicenčni pasovi pa so na voljo vsem. Takšna ureditev se je skozi zgodovino dobro uveljavila, a z naraščanjem potreb po vse več radijskih virih na geografsko omejenih področjih postaja neučinkovita. V praksi so licenčni pasovi v času ali prostoru premalo izkoriščeni, nelicenčni pasovi pa so vse pogosteje zasičeni. Za rešitev tega stanja je treba razviti in uvesti nove koncepte učinkovitejše souporabe radijskega spektra.

Koncept kognitivnega radia in dinamično dodeljevanje frekvenčnega spektra sta nova pristopa za učinkovitejše izkoriščanje radijskega spektra, ki sta se v zadnjih letih razvila v pomembno raziskovalno področje. Začetni predlogi izvedbe kognitivnega radia, ki so temeljili na lastnem zaznavanju radijskega spektra, so se izkazali za neizvedljive, saj večina nizkocenovnih naprav ne more izpolniti zahtev za doseganje zahtevane občutljivosti glede praga detekcije radijskih signalov. Kot alternativa individualnemu zaznavanju radijskega spektra na posameznih napravah se je pojavil koncept uporabe geolokacijskih tabel zasedenosti radijskih kanalov. Slednje se izdela na podlagi podatkov o oddajnikih v podatkovni bazi, ki zaradi dinamike sodobnih radijskih omrežij in pomanjkljivih ter neumerjenih modelov za opis razširjanja radijskega signala pogosto slabo opišejo stanje v radijskem okolju.

Karte radijskega okolja (RO) (angl. radio environment maps, REM), ki so integrirana podatkovna baza, združujejo in nadgrajujejo oba zgoraj omenjena principa. Zaradi modularne nivojske strukture in predvidenega bogatega nabora vsebin so prerasle meje uporabe zgolj dinamičnega dodeljevanja radijskega spektra. Razširile so se na druga področja naprednejšega izkoriščanja in souporabe radijskega spektra in postale splošno orodje, ki naj bi brezžičnim napravam ali celotnim omrežjem omogočilo zavedanja radijskega okolja. Primarno naj bi podajale informacije o radijskem spektru, pokrivanju s signalom in zasedenosti posameznih frekvenčnih področij. Poleg tega naj bi ponujale tudi dodatne informacije o regulativi komunikacij, lastnostih omrežij oziroma posameznih naprav, storitvah, ki jih le-te omogočajo, profilih aktivnosti, zgodovini komuniciranja, geografskih značilnostih področja in drugo.

1.1 Opis problema

Vpeljava kart RO v sodobna komunikacijska omrežja se sooča z vrsto problemov, med katere sodi tudi njihova izdelava. Slednja v splošnem obsega pripravo vsebin, ki so nujno potrebne za omogočanje določenega scenarija uporabe. Med najosnovnejše vsebine za omogočanje zavedanja radijskega okolja v vseh scenarijih uporabe spadajo karte radijskega pokritja (RP) (angl. radio frequency layers of REM, radio coverage maps), ki so pomembne za izračun interferenčnih razmer. Posledično tudi izdelavo kart RO v najosnovnejši obliki predstavlja izdelava kart RP, ki odpira mnogo raziskovalnih možnosti.

Večina znanih postopkov izdelave kart RP temelji zgolj na izmerkih jakosti radijskega

signala na geografsko znanih lokacijah in uporablja različne interpolacijske metode za ugotavljanje jakosti radijskega signala na lokacijah, kjer izmerki niso na voljo. Nekateri postopki izdelave kart RP pa se opirajo na enostavne modele razširjanja radijskega valovanja ali kombinirano uporabo obeh pristopov. Dodatno oviro znanih postopkov izdelave kart RP predstavlja stalno pridobivanje čim večjega števila geografsko ustrezno porazdeljenih izmerkov. V literaturi je namreč moč zaslediti, da določeni postopki izdelave kart RP z naključno pridobljenimi in porazdeljenimi izmerki dajejo slabše rezultate kot tisti s skrbno načrtovanim pridobivanjem in porazdelitvijo, ki je v praksi težko dosegljiva.

Nadalje, obstoječi postopki izdelave kart RP ne uporabljajo naprednih rešitev, kot je sočasna uporaba lokalizacije oddajnikov in dodelanih modelov razširjanja radijskega valovanja, ki bi upoštevali dodatne sloje informacij v kartah RO. Dodatni sloji informacij, ki jih je mogoče že dandanes uporabiti za izdelavo natančnejših kart RP, so npr. relief področja, raba tal, modeli stavb in drugi, ki so na voljo v različnih geografskih informacijskih sistemih (angl. geographic information systems, GIS).

Za izdelavo kart RP se lahko uporabljajo izmerki, pridobljeni iz fiksno postavljenih ali mobilnih naprav. Slednje so lahko zelo občutljivi in natančni spektralni analizatorji ali različni drugi agenti za zaznavanje zasedenosti radijskega spektra oziroma detekcije jakosti posameznih radijskih signalov. Za zagotavljanje kakovostnih kart RP za geografsko obsežna področja je uporaba takšnih naprav praviloma neprimerna ali celo nemogoča, bodisi zaradi njihovega omejenega števila ali cenovne nesprejemljivosti.

Zadnjih nekaj let smo priča hitremu razmahu sicer manj občutljivih, a geografsko močno razširjenih pametnih telefonov in različnih senzorskih mrež, ki lahko poleg svojih osnovnih funkcionalnosti zaznavajo jakosti radijskih signalov različnih tehnologij na različnih frekvenčnih področjih. Posledično se odpira vprašanje, ali je mogoče za izdelavo kart RP uporabiti dinamične in prostorsko naključno porazdeljene izmerke omenjenih naprav in ali je za ustrezno natančnost kart RP treba nabor teh izmerkov dopolniti še z dodatnimi referenčnimi izmerki iz fiksno postavljenih agentov na istem geografskem področju.

1.2 Hipoteza

Osnova kart RP so prostorsko porazdeljeni izmerki radijskega signala. Na njihovo kakovost poleg realnega okolja vplivajo izmerjeni nivoji jakosti radijskih signalov ter število, gostota, dinamika in natančnost izmerkov. Za dejansko izdelavo kart RP so pomembni tudi način pridobivanja izmerkov, pri tem porabljena energija, nastala redundanca in konkreten postopek izdelave, ki vse našteto pogojuje.

Obstoječi postopki izdelave kart RP večinoma ne upoštevajo informacij o realnem okolju, zahtevajo pa veliko število prostorsko ustrezno porazdeljenih lokacij za zajem izmerkov.

Delovna hipoteza doktorske disertacije je, da je z novim postopkom izdelave kart RP, z vključitvijo dinamike, različnih dodatnih informacij iz geografskega informacijskega sistema ter večjega števila manj natančnih, časovno in prostorsko naključno porazdeljenih izmerkov mogoče izboljšati natančnost izdelanih kart RP v primerjavi z obstoječimi postopki. S tem pristopom se omogoči izdelavo bolj kakovostnih kart RO in posledično zagotovi učinkovitejše izkoriščanje oziroma souporabo radijskega spektra v brezžičnih omrežjih prihodnosti.

1.3 Prispevki doktorske disertacije

Doktorska disertacija obravnava problematiko izdelave kart RP, ki so osnovni gradnik kart RO. Naš cilj je bil proučiti možnosti uporabe modelov za opis razširjanja radijskega valovanja, lokalizacije oddajnikov, pridobivanja in uporabe dinamičnih prostorsko ter časovno porazdeljenih izmerkov za izdelavo kart RP, zasnovati natančnejši postopek izdelave kart RP z upoštevanjem parametrov okolja in določitev morebitnih omejitev njihove uporabnosti za podporo natančnejši oceni stanja radijskega okolja in učinkovitejšemu izkoriščanju radijskega spektra.

Doktorska disertacija vsebuje naslednje izvirne prispevke k znanosti:

1. Izvirni postopek za izdelavo kart RP na podlagi prostorsko in časovno naključno porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala, pridobljenih po načinu soudeležbe, ki določi jakosti radijskega signala na geografskih točkah, kjer izmerki niso na voljo (poglavje 4).

2. Testno okolje za izdelavo kart RP, podprto z različnimi modeli razširjanja radijskega valovanja in različnimi vsebinami geografskega informacijskega sistema (poglavje 5).

3. Preizkus in ovrednotenje predlaganega postopka izdelave kart RP s simulacijsko generiranimi in realnimi izmerki jakosti radijskega signala in upoštevanjem modela realnega radijskega okolja (poglavje 6).

Dodatna prispevka disertacije k področju sta:

- Analiza in kritična ocena obstoječih postopkov izdelave kart RP ter predstavitev možnosti njihove uporabe in izboljšave v primeru dinamičnih prostorsko porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala (poglavje 3).

- Pregled, analiza, problematika, obstoječe in lastne rešitve pridobivanja prostorsko porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala po načinu soudeležbe naprav, zmožnih izvajanja meritev (MCD) v in preko mobilnih omrežij (poglavje 7).

Raziskovalno delo in prispevke, predstavljene v disertaciji, smo podprli s številnimi objavami, ki se nanašajo na:
- karte RO, obstoječe postopke izdelave kart RP in njihovo analizo [1-3],
- nov postopek izdelave kart RP [4,5],
- razvoj novega postopka izdelave kart RP [6-8],
- pridobivanje izmerkov iz prostorsko porazdeljenih naprav MCD [9-12].

1.4 Organizacija doktorske disertacije

Doktorska disertacija je organizirana na sledeč način. Poglavje 1 predstavi raziskovalno področje doktorske disertacije, aktualno problematiko področja, delovno hipotezo za njeno reševanje in dosežene prispevke.

V poglavju 2 podamo glavne informacije za razumevanje nadaljnjih poglavij disertacije. Najprej predstavimo karte RO, njihovo strukturo in trenutno najbolj uveljavljeno arhitekturo. Sledi pregled področij uporabe kart RO in njihove vsebine. Kot najpomembnejšo vsebino kart RO izpostavimo in predstavimo karte RP.

Izdelavo kart RO obravnavamo v poglavju 3. Najprej predstavimo osnovni cikel izdelave kart RP, sledi predstavitev izmerkov jakosti radijskega signala in pregled obstoječih neposrednih, posrednih in hibridnih postopkov izdelave kart RP. Ob koncu poglavja je izvedena analiza pregledanih postopkov, ki nas je napeljala k razvoju novega postopka izdelave kart RP.

Zasnovo novega postopka izdelave kart RP in primer njegove izvedbe predstavimo v poglavju 4. Nov posredni postopek izdelave kart RP zaradi samodejnega umerjanja izbranega modela za opis razširjanja radijskega valovanja na prostorsko porazdeljene izmerke radijskega signala imenujemo samouglaševalna metoda za posredno izdelavo kart RP oziroma metoda STM.

V poglavju 5 predstavimo testno okolje, ki smo ga razvili za preizkus in ovrednotenje obstoječih in razvoj novih postopkov izdelave kart RP. Najprej predstavimo njegovo strukturo, načine pridobivanja in generiranja vhodnih podatkov, vgrajene druge relevantne podatke za izdelavo kart RP in vgrajene postopke izdelave kart RP. Predstavimo tudi modele za opis razširjanja radijskega valovanja, modele za izračun izgube poti zaradi senčenja na klinastih ovirah in osnovne primere lokalizacijskih postopkov.

Preizkus in ovrednotenje metode STM ter njena primerjava z najpogosteje uporabljenimi postopki izdelave kart RP, ki so vgrajeni v testno okolje, so opisani v poglavju 6. Metodo STM najprej preizkusimo in ovrednotimo s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki, pridobljenimi po načinu soudeležbe, in nato še z realnimi izmerki obstoječega mobilnega omrežja, pridobljenimi na terenu. Po uspešnem preverjanju in ovrednotenju metodo STM uporabimo za izdelavo časovno spremenljivih kart RP z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki mobilnega oddajnika.

Za prikaz celotnega postopka izdelave kart RP v poglavju 7 preučimo, kako je v praksi mogoče pridobivati prostorsko porazdeljene izmerke jakosti radijskih signalov po načinu soudeležbe. Najprej identificiramo aktualno problematiko in prikažemo obstoječe rešitve pridobivanja izmerkov jakosti radijskega signala preko mobilnih omrežij. Sledi predstavitev izvedenih rešitev za omogočanje pridobivanja izmerkov po načinu soudeležbe s pomočjo mobilnih naprav.

Poglavje 8 zaključi disertacijo, povzame izvirne znanstvene dosežke in poda smernice za nadaljnje delo.

2 Karte radijskega okolja

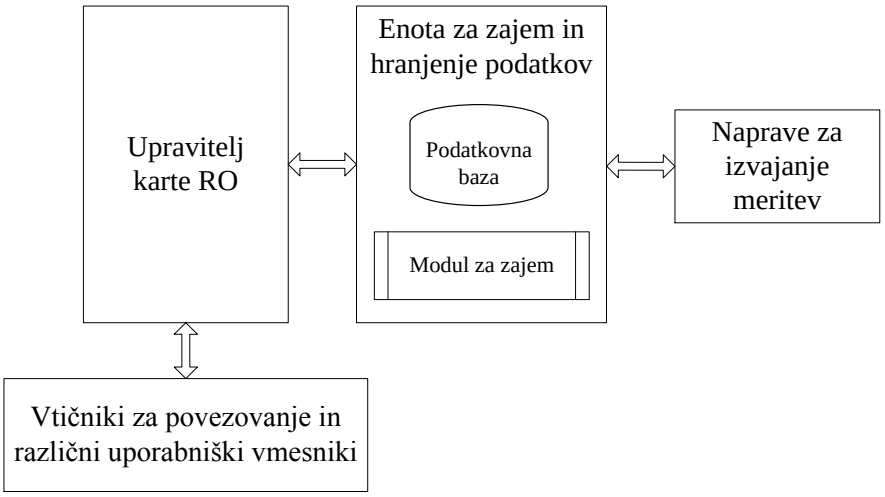
To poglavje predstavlja karte RO, ki se jih v najenostavnejši obliki opiše kot integrirane podatkovne strukture za shranjevanje in posredovanje informacij o radijskih razmerah v okolju. Karte RO so bile primarno namenjene podpori delovanja kognitivnega radija. Sčasoma so prerasle meje prvotnega namena in se razširile na druga področja. V strokovni in znanstveni literaturi ni zaslediti njihove enolične definicije. Posledično poglavje 2.1 opisuje njihovo splošno strukturo, poglavje 2.2 raznolika področja njihove uporabe in poglavje 2.3 njihovo značilno vsebino.

2.1 Struktura kart RO

Z vidika arhitekturne zasnove opredeljujemo karte RO kot centralizirane, distribuirane [13] ali hibridne [14] integrirane informacijske strukture, ki združujejo različne tipe informacij, algoritmov in metod, prvotno namenjenih odločanju kognitivnega stroja (ang. cognitive engine) [15]. Po strukturi so modularne in razširljive, kar jim omogoča zbiranje, procesiranje, sklepanje in hranjenje obsežnih količin večdomenskih informacij, pridobljenih iz različnih virov [16-18]. Nekateri vidijo karte RO kot razširitev oziroma posplošitev kart virov, namenjenih opisovanju radijskih aktivnosti kognitivnih aplikacij [19]. Spet drugi vidijo karte RO kot baze znanja (angl. knowledge base), namenjene hranjenju informacij o radijskem okolju brezžičnih sistemov [20], in kot orodje za oddaljeno konfiguriranje naprav [21].

Zaradi nenehne težnje po zmanjševanju količine signalizacije med napravami, prilagodljive količine shranjenih podatkov in želje po čim večji avtonomnosti kognitivnih omrežij se karte RO razlikujejo glede na hitrost osveževanja podatkov, njihovo količino in vplivno področje. Z ozirom na hitrost osveževanja ločimo dve kategoriji kart RO. Prva kategorija kart RO zajema statične, delno statične in počasi spreminjajoče se informacije. Značilen primer so podatki o televizijskih oddajnikih in baznih postajah mobilnih operaterjev, ki so dandanes na voljo nacionalnim regulatorjem radijskega spektra. V drugo kategorijo kart RO spadajo predvsem hitro spreminjajoči se podatki, ki nastanejo kot posledica mobilnosti oziroma hitro spreminjajočih se aktivnosti brezžičnih naprav. Omenjena delitev je v literaturi pogosto poenostavljena tako, da se karte RO delijo zgolj na tiste s statično in druge z dinamično vsebino [21]. Glede na količino hranjenih podatkov in vplivno področje razlikujemo med lokalnimi kartami RO in globalnimi kartami RO [19,22]. Medtem ko lokalne karte RO neposredno nadzorujejo zbiranje izmerkov radijskega spektra in opisujejo dogajanje na manjšem interesnem področju, globalne karte RO zgolj združujejo informacije več lokalnih kart RO in prikazujejo dogajanje na širšem področju.

V literaturi najbolj uveljavljeno arhitekturo kart RO [16,18,22-25] prikazuje slika 1. Predlagali so jo v okviru evropskega projekta FARAMIR [21,23]. Prikazano arhitekturo tvorijo upravitelj karte RO (angl. REM manager), enota za zajem in hranjenje podatkov (angl. REM storage and acquisition unit, REM-SA), naprave, zmožne izvajanja meritev, vtičniki za povezovanje in različni uporabniški vmesniki.



Slika 1: *Arhitektura karte RO* [21].

Upravitelj karte RO je inteligentni gradnik, namenjen upravljanju in izdelavi karte RO. V njem se izvaja procesiranje informacij in odloča, s katerih lokacij je treba pridobiti izmerke radijskega spektra. V primeru samodejnega zbiranja izmerkov se upravitelj karte RO odloča, kateri izmerki se bodo zavrgli in kateri uporabili za nadaljnjo obdelavo, npr. za izdelavo različnih kart RP, predstavljenih v poglavju 2.3. Naloga upravitelja karte RO je tudi povezovanje ostalih gradnikov karte RO.

MCD so heterogene naprave z zmožnostjo zaznavanja radijskega spektra, ki svoje izmerke posredujejo enoti REM-SA. Glede na cenovni razred in natančnost merjenja se delijo v dve skupini. V prvo skupino uvrščamo visoko zmogljive in dražje naprave, medtem ko druga skupina vključuje cenovno dostopnejše naprave [16]. Naprave MCD so podrobneje predstavljene v poglavju 3.1.1.

Enota REM-SA je sestavljena iz modula za zajem in modula za hranjenje podatkov. Modul za zajem podatkov je namenjen komunikaciji z napravami MCD in se uporablja za njihovo nastavljanje in zajemanje njihovih izmerkov. REM-SA vrši zajem izmerkov iz MCD na zahtevo, v vnaprej določenih časovnih trenutkih, glede na priložnostni način (angl. in opportunistic manner) ali po načinu soudeležbe (angl. in participatory manner) [26]. Drugi del REM-SA predstavlja razširljiva podatkovna baza, namenjena hrambi heterogenih podatkov v surovi ali obdelani obliki.

Povezovalni vtičniki so namenjeni komunikaciji med osnovnimi gradniki karte RO in komunikaciji karte RO z zunanjim svetom. Preko njih uporabniki dostopajo do različnih uporabniških vmesnikov in hranjenih vsebin karte RO.

2.2 Področja uporabe kart RO

Zaradi univerzalnosti koncepta se karte RO uporablja na zelo različnih področjih. Prvotno so karte RO začeli razvijati za podporo delovanju kognitivnega radija. Sekundarnim uporabnikom radijskega spektra, ki nimajo vnaprej rezerviranega spektra, bi omogočili dinamično uporabo prostih frekvenčnih pasov, dodeljenih primarnim uporabnikom, kot so televizijski oddajniki, repetitorji, ojačevalniki, sprejemniki in brezžični mikrofoni [19]. Postopki dinamične uporabe takšnih frekvenčnih pasov so predlagani v standardu IEEE 802.22 o brezžičnih regionalnih dostopovnih omrežjih [27].

Danes se uporaba kart RO zaradi univerzalnosti in modularne vsebine predvideva na področjih, kot so [13,22]:

- hierarhični dostop do spektra licenčnih frekvenčnih pasov,

- omogočanje souporabe spektra nelicenčnih frekvenčnih pasov,
- upravljanje z radijskimi viri znotraj operaterskih omrežij,
- namensko spremljanje uporabe in zasedenosti radijskega spektra.

Pri hierarhičnem dostopu do spektra licenčnih pasov karte RO podpirajo usklajen ali neusklajen dostop primarnih in sekundarnih naprav do spektra. V primeru usklajenega dostopa se v kartah RO zbira in hrani statistične podatke o zahtevah obeh tipov naprav, tako da se omogoči dolgoročno optimizacijo njihovega usklajenega dostopa do spektra. Pri neusklajenem dostopu se v kartah RO zbira in hrani informacije o razširjanju radijskega valovanja, predvsem o interferenci, ki jo sekundarni uporabniki povzročajo primarnim uporabnikom [13,22]. Karte RO so sposobne nuditi podporo najemodajalcu, ponudniku oziroma prodajalcu spektra (angl. spectrum leaser, broker or seller), delovanju kognitivnih femto celic izven pasu (angl. out-of-band cognitive femto-cells), omrežjem v okviru standarda IEEE 802.11af [28] in delovanju tehnologije dolgoročne evolucije (angl. long term evolution, LTE) na sproščenih analognih televizijskih kanalih [13].

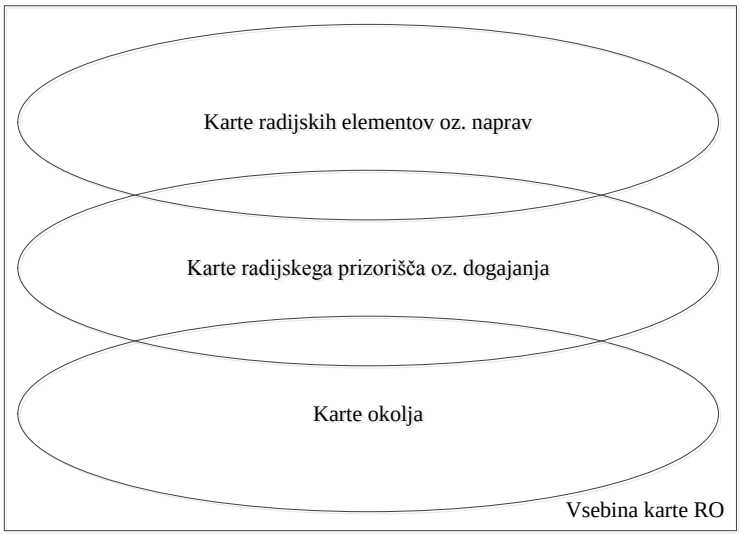
Uporabnost kart RO na nelicenčnih frekvenčnih pasovih se kaže nekoliko drugače, saj tu ni primarnih uporabnikov, dostop sekundarnih uporabnikov do spektra pa je hierarhičen ali nehierarhičen. V tem primeru karte RO lahko podprejo souporabo spektra usklajenih ali neusklajenih, namensko povezujočih se naprav ali omrežij iste ali različnih brezžičnih tehnologij. Poleg tega lahko karte RO hranijo informacije za zmanjševanje signalizacije, upravljanje interference [29], optimizacijo dodeljevanja virov, informacije o motilcih itd. [22].

Pri operaterjih radijskih omrežij se karte RO lahko uporabljajo predvsem za upravljanje z radijskimi viri [15,18,30] za dinamično dodeljevanja spektra, planiranje omrežij, vzdrževanje, kontrolo preobremenjenosti, napovedovanje prometa [31] in optimizacijo porabe virov [15]. V radijskih dostopovnih omrežjih tehnologije LTE-A se lahko karte RO uporabljajo za samodejno odkrivanje področij s slabim signalom in povečanje kapacitete omrežij z optimizacijo postavitve relejnih LTE postaj [22]. Poleg tega se karte RO lahko uporabijo tudi za samodejno vzpostavitev relacije med sosedi, minimizacijo števila merilnih kampanj [23], kontrolo moči celic [32], optimizacijo zmogljivosti omrežij in prikaz pokrivanja z radijskim signalom. Uporablja se jih lahko tudi za zmanjševanje interference, optimizacijo mehke pouporabe frekvenc (angl. soft frequency reuse) [33], optimizacijo izročanja [13,22] in omogočanje sožitja različnih radijskih tehnologij na določenem področju [13,25,29]. Poleg naštetega karte RO s preurejanjem uporabe spektra (angl. spectrum refarming), v okviru upravljanja z radijskimi viri, omogočajo vpeljavo novih tehnologij ter samodejno konfiguracijo in optimizacijo femto celic [13,22].

Poleg naštetega so karte RO primerne tudi za postavitev samoorganizirajočih omrežij, organizacijo porazdeljenega računanja in spremljanje komunikacije na licenčnih in nelicenčnih frekvenčnih pasovih radijskega spektra [29]. Spremljanje radijskega spektra s kartami RO se lahko vrši na nivoju naprav, omrežij in operaterjev. Regulatorji spektra v svojih podatkovnih bazah namreč že hranijo lokacije oddajnikov, njihove oddajne moči, dovoljene in dejanske interferenčne pogoje na posameznih frekvenčnih pasovih, izračunana radijska pokritja in mnoge druge informacije, ki so primerne za shranjevanje, obdelovanje in razširjanje v okviru kart RO. Uporaba kart RO sega na tako različna področja zaradi raznolikih podatkov, hranjenih v REM-SA, ki imajo neposredni vpliv na vse uporabnike kart RO [22].

2.3 Vsebina karte RO

Vsebina karte RO je bila prvotno predstavljena kot integriran skupek podatkov o geografskih značilnostih področja, omrežjih, napravah in storitvah, ki so na njem na voljo, trenutni lokaciji, regulaciji, aktivnosti naprav, politiki komuniciranja in vseh preteklih izkušnjah [19]. Te podatke lahko strnemo v posamezne sklope, nanašajoče se na kognitivne uporabnike oziroma naprave, surove izmerke in rezultate procesiranja upravitelja karte RO, kot so dovoljeni interferenčni nivoji uporabnikov, njihovi vzorci komuniciranja, pasovna širina in značilnosti razširjanja radijskega valovanja [18]. Nedavno so vsebino karte RO sistematično razvrstili v tri prepletajoče se osnovne kategorije podatkov, nanašajoče se na radijske elemente oziroma naprave, radijsko prizorišče oziroma dogajanje in okolje [21], kot prikazuje slika 2.

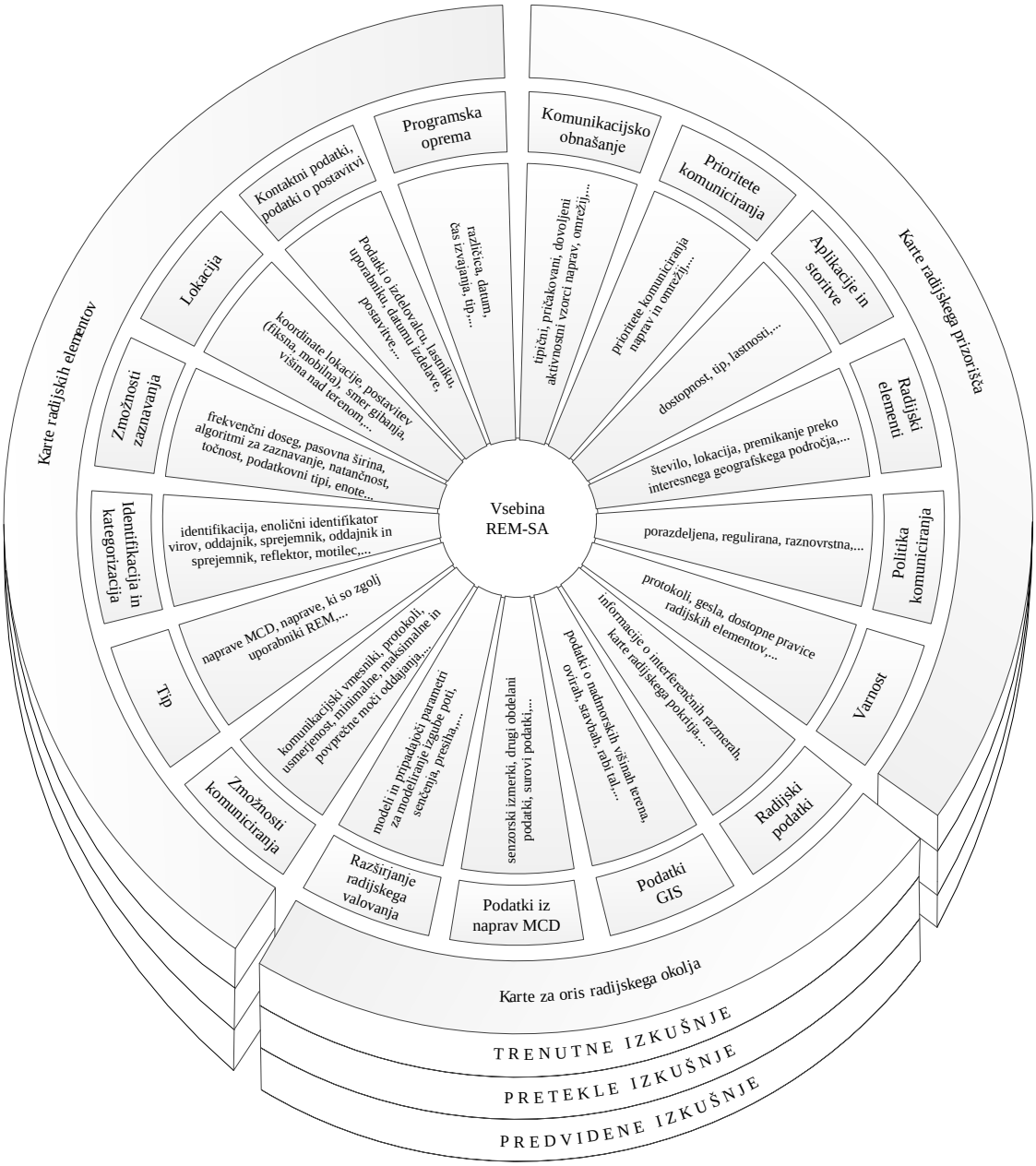


Slika 2: *Vsebina karte RO, sestavljena iz kart radijskih elementov, kart radijskega prizorišča in kart okolja* [21].

V skladu s to razvrstitvijo osnovne kategorije vsebine karte RO predstavljajo oziroma gradijo različne podatkovne strukture, t. i. karte informacij, ki povezujejo po lastnostih podobne in lokacijsko odvisne podatke z lokacijami izbranega področja. Njihova oblika je odvisna od tega, kako se najučinkoviteje predstavi določen sklop podatkov. Ne glede na izbrano kategorijo posamezne karte hranijo zgolj podatke istega tipa, ki se nanašajo bodisi na opis trenutnih, preteklih ali predvidenih izkušenj na izbranem področju.

Kategorijo radijskih elementov sestavljajo karte, ki orisujejo zmožnosti zaznavanja naprav in njihovih komunikacijskih vmesnikov, lokacije, mobilnost in način komuniciranja. Kategorijo radijskega prizorišča sestavljajo karte z informacijami o omrežjih operaterjev za opis storitev in aplikacij, politike komuniciranja, varnosti, pravic komuniciranja in socialno ekonomskih vidikov. Zadnjo kategorijo sestavljajo karte geografskih značilnosti terena, modelov razširjanja radijskega valovanja in interferenčnih razmer.

Vsebina karte RO ni omejena zgolj na našteto, saj se podatke v REM-SA lahko modularno dodaja ali odstranjuje skladno s potrebami področja uporabe. Zaradi prikaza modularnosti, predstavitve dodatnih vsebin in nanašanja nadaljnjih poglavij te disertacije na točno določen del vsebine v REM-SA so na sliki 3 podane osnovne kategorije vsebine karte RO, povzete po [21], nadalje razdeljene na podkategorije.



Slika 3: *Vsebina REM-SA, predstavljena z osnovnimi kategorijami, podkategorijami in kartami.*

Karte radijskih elementov hranijo podatke o radijskih elementih. Radijski elementi so primarni uporabniki radijskega spektra, sekundarni uporabniki radijskega spektra, naprave MCD oziroma vsi ostali radijski oddajniki, npr. motilci, ki jih naprave MCD zaznajo. K njim sodijo informacije o njihovem tipu (oddajniki, sprejemniki, oddajniki in sprejemniki, motilci, reflektorji itd.), identifikaciji, lokaciji, načinu postavitve (mobilna, fiksna), višini nad terenom, sposobnostjo zajemanja radijskega spektra (da, ne), proizvajalcih, lastnikih, pomembnih datumih (izdelave, začetka delovanja, vzdrževanja, itd.), tipu programske opreme in verzije. Poleg naštetih so zelo pomembne informacije, ki opisujejo zmožnosti delovanja radijskih elementov (frekvenca oddajanja, pasovna širina, modulacije, protokoli, minimalne, maksimalne in trenutne oddajne moči, tipi in usmerjenosti anten itd.) in zajemanje radijskega spektra (algoritmi, metode, periode in načini zajema, natančnost, doseg, merske enote itd.) [13,16-18,32].

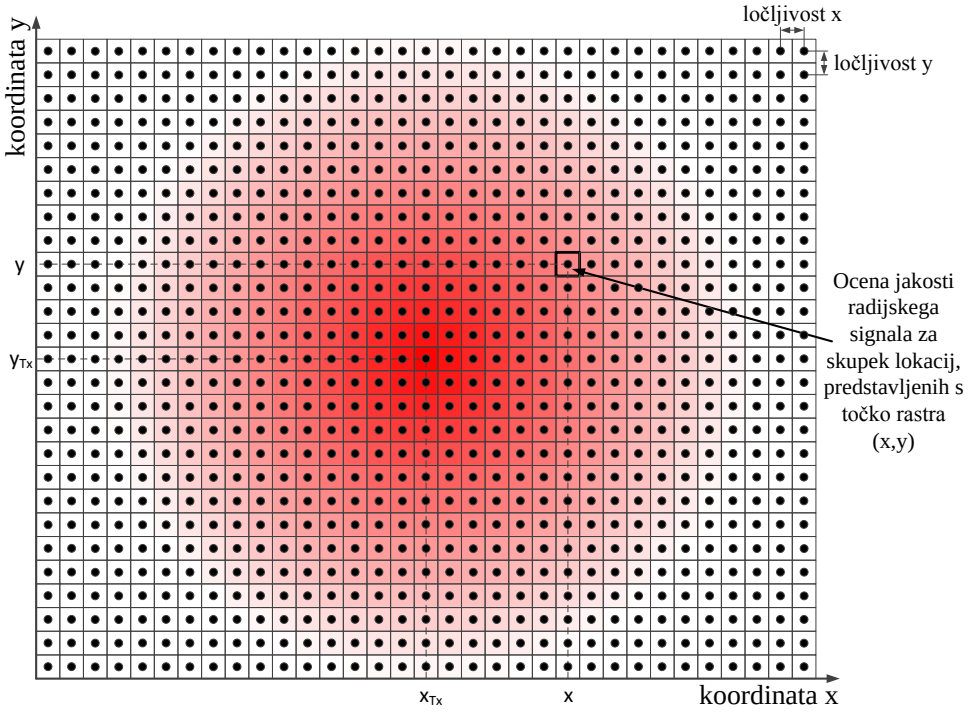
Karte radijskega prizorišča v primerjavi s kartami radijskih elementov hranijo podatke nekoliko višjega nivoja in so namenjene celovitemu opisu dogajanja. Mednje sodi

obnašanje oziroma aktivnosti vseh radijskih elementov in omrežij na področju ter informacije o njihovih lokacijah in mobilnosti. Ker sekundarni uporabniki radijskega spektra nikakor ne smejo motiti licenčnih primarnih uporabnikov, so tu pomembni tudi trenutni, predvideni in dovoljeni profili aktivnosti, prioritete delovanja in informacije o regulaciji spektra [13,16-19,22,25,27,32]. Za nemoteno delovanje in celosten opis področja so prav tako pomembni tudi varnostni protokoli, gesla in pravice dostopa do komunikacijskega medija, aplikacije in storitve, ki so na voljo, ter socialno ekonomski vidiki [21].

Zadnja kategorija kart je namenjena orisu radijskega okolja in zajema informacije o interesnem področju, radijskih razmerah na njem in vse ostalo, potrebno za izračun oziroma oceno slednjih. Za oris geografskega področja se običajno uporabljajo vsebine GIS [13,17,19,22,25,27], kot so nadmorske višine terena, podatki o ovirah, njihovih višinah, stavbah, rabi tal in podobno. Na voljo so v različnih ločljivostih, bodisi v rastrski ali vektorski obliki. Tu se hranijo vsebine za omogočanje zavedanja radijske okolice vsem uporabnikom karte RO. Te vsebine so npr. karte RP in karte z ocenami interferenčnih razmer. Slednje upravitelj karte RO izračuna na podlagi hranjenih vsebin GIS, izmerkov naprav MCD in pomembnih parametrov razširjanja radijskega valovanja, npr. informacij o izgubi na poti radijskega signala, presiha in shranjenih koeficientov različnih modelov razširjanja radijskega valovanja.

2.3.1 Karte radijskega pokrivanja

Karte RP so namenjene orisu interferenčnih razmer in predstavljajo najpomembnejšo vsebino karte RO [21], saj hranijo ocene jakosti radijskega signala določene frekvence in pasovne širine za izbrano geografsko področje. V literaturi se jih največkrat zasledi pod izrazom karte RO, ki se sicer uporablja za poimenovanje celotne strukture, opisane v poglavju 2.1. Obravnava se jih tudi kot radio-frekvenčne okoljske karte (angl. radio frequency environment maps) [34], karte električnih nivojev radijskega signala (angl. radio electric exposure level maps) [35] in kart gostote spektralne moči [36].

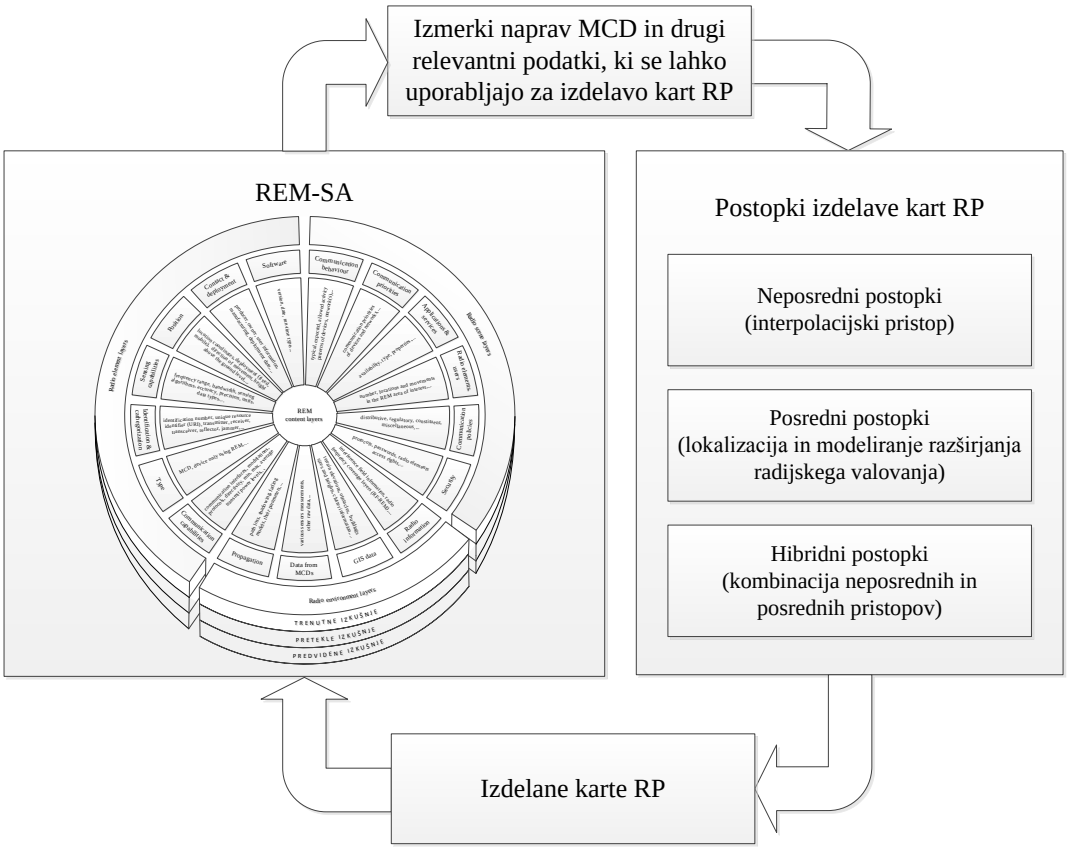


Slika 4: *Primer karte RP.*

Jakost signala določenega radijskega oddajnika pada z naraščanjem razdalje med oddajnikom in točko sprejema ter se dodatno spreminja zaradi odbojev od ovir, uklanjanja na robovih ovir, lomov med dvema prenosnima medijema in sipanj pri odbojih od električno majhnih neravnih ovir [37]. Posledično je jakost signala v vsaki točki prostora drugačna. Njeno ocenjevanje je zaradi računske kompleksnosti zelo zahtevno, količina podatkov za hranjenje pa izjemno velika. Tako se za izračun in hranjenje kart RP uporabljajo rastrske karte, običajno v ločljivosti 100 m, 50 m, 25 m, 10 m ali 5 m. Slika 4 prikazuje primer karte RP, ki velja v primeru, če se predpostavi razširjanje radijskega valovanja v praznem prostoru, torej se zanemari vpliv okolja in predpostavi vsesmerni oddajnik na lokaciji (x_{Tx}, y_{Tx}). Točke rastra v določeni ločljivosti določajo središča enako velikih pravokotnih skupkov bližnjih lokacij. To so osnovni elementi, na katere se nanašajo posamezne ocene jakosti radijskega signala. Za vizualno predstavitev se pripadajočim ocenam jakosti radijskega signala v vseh točkah karte RP priredi pripadajoče barvne odtenke.

3 Izdelava kart radijskega okolja

Izdelava karte RO obsega pripravo tistih vsebin, ki so nujno potrebne za omogočanje določenega scenarija uporabe. V najenostavnejši obliki se jo lahko predstavi kot proces izdelave kart RP, ki so pomembne za izračun interferenčnih razmer. Karte RP so namreč osnova za oris radijskih razmer določene frekvence in pasovne širine na določenem geografskem področju, predstavljenem s skupki lokacij, ki jih določajo točke kart RP. Izdelava kart RP se vrši v upravitelju karte RO in zajema pridobivanje relevantnih podatkov, izračun kart RP in njihovo shranjevanje. Kot je shematsko prikazano na sliki 5, se vhodni podatki za postopke izdelave kart RP pridobijo iz REM-SA. Za izdelavo kart RP se običajno uporablja prostorsko porazdeljene izmerke jakosti radijskega signala, ki so zajeti na napravah MCD. Skladno s potrebami in lastnostmi izbranega postopka izdelave kart RP se dodatno ali samostojno uporablja tudi druge vsebine REM-SA, predstavljene v poglavju 2.3. Za izračun oziroma izdelavo kart RP obstajajo različni neposredni, posredni in hibridni postopki. Po uporabi izbranega postopka se izdelane karte RP shrani v REM-SA med karte, namenjene orisu radijskega okolja. Raznolikost izmerkov jakosti radijskega signala, lastnosti izbranih postopkov izdelave in njihovo kombiniranje v enovit cikel izdelave kart RP se neposredno odražajo na dosegljivi kvaliteti oziroma natančnosti izdelanih kart RP.



Slika 5: *Cikel izdelave kart RP.*

V poglavju 3.1 so predstavljeni izmerki jakosti radijskih signalov, ki se uporabljajo v postopkih izdelave kart RP. Pregled neposrednih postopkov izdelave kart RP je izveden v poglavju 3.2, pregled posrednih postopkov izdelave kart RP v poglavju 3.3 in predstavitev hibridnih postopkov izdelave kart RP v poglavju 3.4. Primerjavo in ovrednotenje predstavljenih obstoječih postopkov izdelave kart RP obravnava poglavje 3.5. Ključne ugotovitve so predstavljene v poglavju 3.6.

3.1 Izmerki jakosti radijskega signala

Naprave MCD na različnih geografskih lokacijah spremljajo radijski spekter in merijo jakosti radijskih signalov. V tej disertaciji za jakost radijskega signala na določeni geografski lokaciji upoštevamo prejeto moč P. Pri izdelavi karte RP je treba oceniti jakosti radijskih signalov na vseh točkah karte RP oziroma čim natančneje modelirati njihovo slabljenje preko celotnega geografskega področja. Ker moč radijskih signalov pada vsaj s kvadratom razdalje, so moči signalov daleč od izvora za nekaj velikostnih razredov nižje kot tiste blizu njega. Zaradi tega moč radijskih signalov izražamo v merski enoti dBm (3.1).

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \frac{P}{1\ \mathrm{mW}} \tag{3.1}$$

3.1.1 Tipi naprav MCD

Naprave MCD se delijo na visoko zmogljive in manj zmogljive naprave. Med visoko zmogljive, natančnejše, dražje in običajno večje naprave sodijo različne izvedbe spektralnih analizatorjev, ki lahko izkoriščajo tudi ozkopasovni način merjenja jakosti radijskih signalov, podajajo informacije o jakosti posameznih frekvenčnih komponent v signalih in lahko izluščijo značilke signalov. Tradicionalni spektralni analizatorji temeljijo na uporabi heterodinskih detektorjev. Za merjenje moči kompleksnejših in moduliranih digitalnih signalov so na voljo vektorski signalni analizatorji, ki kombinirajo uporabo heterodinskih detektorjev in hitre Fouriereve transformacije [38]. Kljub temu, da visoko zmogljive naprave MCD omogočajo zelo natančno merjenje signalov, so zaradi svoje cene in velikosti precej neprimerni za splošno rabo v okviru koncepta kart RO.

Manj zmogljive, natančne, manjše in cenovno ugodnejše naprave MCD, ki v odvisnosti od izvedbe ravno tako podpirajo funkcionalnosti visoko zmogljivih naprav, temeljijo bodisi na tehniki programirljivega radija ali izkoriščanju značilnosti brezžičnih komunikacijskih vmesnikov. Za spremljanje radijskega spektra so zelo razširjene predvsem modularne univerzalne programabilne radijske naprave USRP [39] in platforme vgrajenih sistemov, namenjene gradnji brezžičnih senzorskih omrežij [9]. Senzorske platforme so v primerjavi z ostalimi napravami MCD zelo raznolike in bolj dostopne. Delijo se na (1) namenske vgrajene naprave, sestavljene po komponentah, (2) splošno uporabne računalnike, med katere sodijo različni mobilni terminali, pametni telefoni in tablični računalniki, ter (3) sisteme v enem čipu. Vgrajena senzorska vozlišča in prilagojeni splošno uporabni računalniki lahko za zaznavanje jakosti radijskih signalov izkoriščajo raznolike radijske vmesnike. Poleg tega omogočajo tudi povezovanje z napravami v drugih omrežjih.

3.1.2 Posebne metrike za predstavitev jakosti izmerkov

Vse naprave MCD ne merijo jakosti radijskih signalov neodvisno od brezžičnih tehnologij in podajajo izmerjene jakosti prejetega signala neposredno v dBm. Njihove

merilne sposobnosti so velikokrat omejene na izbrano tehnologijo in pripadajoče metrike za predstavitev jakosti radijskih signalov. Na primer, za prikaz vrednosti moči signalov se pogosto uporablja splošno metriko, ki jo predstavlja indikator moči prejetega signala (angl. received signal strength indicator, RSSI). Vrednost RSSI je običajno odraz vrednosti enosmerne napetosti, ki nastane zaradi sprejetega signala, pred ojačevalnikom na vmesni stopnji heterodinskega sprejemnika ali pred širokopasovnim ojačevalnikom običajnega sprejemnika. Dodatne informacije o meritvi, ki jih podajajo bodisi proizvajalci radijskih sprejemnikov oziroma jih določajo brezžične tehnologije, so pomembne za interpretacijo vrednosti RSSI. Dandanes veliko brezžičnih komunikacijskih tehnologij temelji na časovno porazdeljenem sodostopu in kodno porazdeljenem sodostopu, zaradi česar brezžične tehnologije različno dostopajo do spektra in uporabljajo različne pasovne širine. Posledično se poleg RSSI uporablja tudi metrike, ki so neposredno odvisne od uporabljene brezžične tehnologije.

V primeru mobilnih omrežij in tehnologije GSM ima signal pasovno širino 200 kHz, medtem ko posamezen frekvenčni kanal vsebuje osem časovnih rezin. Naprave MCD izvajajo meritve vrednosti RSSI posamezne časovne rezine, ki odraža moč prejetega signala dotične celice, šuma in interference sosednjih oddajnikov, ki uporabljajo isto nosilno frekvenco ali uporabljajo sosednje kanale. Pri tem mora biti občutljivost sprejemnikov boljša od −102 dBm oziroma −104 dBm [40].

V primeru tehnologije UMTS, naprave MCD običajno merijo štiri metrike moči, in sicer RSSI, kodno moč prejetega signala (angl. received signal code power, RSCP), EcNo in EcIo. RSSI predstavlja prejeto moč celotnega 5 MHz pasu, ki jo sestavljajo prispevki prejetih moči strežne celice in sosednjih celic na isti frekvenci. RSCP je moč pilotnega komunikacijskega kanala, ki ga oddaja posamezna bazna postaja in je izražena v razponu med −25 dBm in −120 dBm. EcNo je razmerje prejete energije na čip (Ec) oz. bit pilotnega kanala in skupne gostote šumne moči (No) zaradi termalnega šuma in interference sosednjih celic. EcIo je razmerje prejete energije na čip in skupne gostote šumne moči na antenskem priključku, ki za razliko od skupne gostote šumne moči vključuje tudi prispevek pilotnega kanala [41].

Na podoben način naprave MCD v primeru LTE merijo RSSI, referenčni signal prejete moči (angl. reference signal received power, RSRP) in referenčni signal prejete kakovosti (angl. reference signal received quality, RSRQ). Odvisno od implementacije, LTE zaseda pasovno širino 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ali 20 MHz, medtem ko je izbrana pasovna širina razdeljena na kanale oziroma podnosilce velikosti 15 kHz. Dvanajst sosednjih nosilcev predstavlja en blok virov. RSSI je povprečna skupna moč celotne pasovne širine, ki vključuje prispevke vseh kanalov, interference in termalnega šuma. RSRP določene celice je povprečna moč zgolj tistih kanalov, ki nosijo referenčne signale dotične celice. RSRQ predstavlja kvaliteto signala in se izračuna kot E kratno razmerje med RSRP in RSSI, pri čemer je E število blokov virov glede na izbrano pasovno širino [42].

3.1.3 Porazdelitve izmerkov, načini njihovega pridobivanja in obdelava

V teoriji je porazdelitev izmerkov naprav MCD lahko enakomerna, mrežasta, prilagodljiva ali gručasta [43]. Enakomerna in mrežna porazdelitev izmerkov zaradi značilnosti geografskega okolja v praksi brez ročne določitve in postavitve naprav MCD na določene lokacije nista dosegljivi ali pa se ju zelo težko izvede. Prilagodljiva porazdelitev izmerkov predvideva več izmerkov na lokacijah, kjer se jakost radijskega signala spreminja bolj, in manj izmerkov tam, kjer se jakost signala spreminja manj. Za njeno izvedbo je torej treba imeti predznanje o porazdelitvi jakosti radijskega signala na geografskem področju. Za hrambo takšnega predznanja so namenjene karte RO oziroma

karte RP. V primeru, da bi znanje o porazdelitvi jakosti radijskega signala obstajalo, ne bi bilo potrebe po izdelavi kart RP. Dodaten argument neprimernosti prilagodljive porazdelitve izmerkov za izdelavo kart RP je tudi ta, da je v primeru lokacijsko mobilnih naprav MCD zelo težko ali celo nemogoče nadzirati njihovo lokacijo oziroma doseči, da se nahajajo na lokacijah, kjer bi želeli imeti izmerke. Posledično je najbolj verjetno, da so za izdelavo kart RP v praksi na voljo naključno, psevdo-naključno ali gručasto porazdeljeni izmerki naprav MCD.

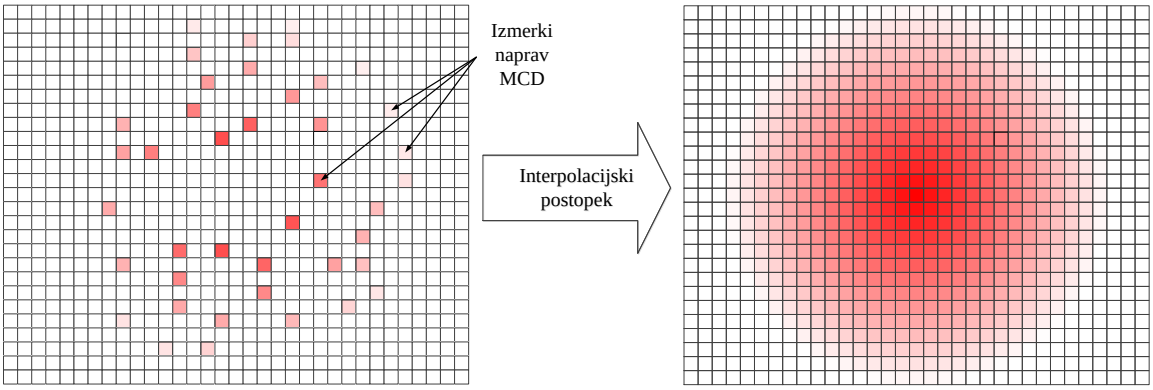
Izmerki za izdelavo kart RP se pridobijo iz obstoječih podatkovnih baz, npr. podatkovnih baz mobilnih operaterjev ali regulatorjev radijskega spektra, ali iz naprav MCD. Pridobivanje izmerkov iz podatkovnih baz je enostavno, medtem ko se izmerki iz naprav MCD pridobijo na neposreden ali posreden način. Za posredno pridobivanje je treba biti ob napravah MCD in iz njih ročno pridobiti izmerke za nadaljnjo uporabo. Tak pristop za izdelavo kart RP ni primeren, saj z njim naenkrat ni mogoče pridobiti velikega števila izmerkov in jih dostaviti do kart RO, kjer poteka izdelava kart RP. Nasprotno se naprave MCD za neposredno pridobivanje izmerkov poveže v eno ali več obstoječih omrežij in omogoči neposreden prenos izmerkov do kart RO. To namreč omogoča napravam MCD priložnostno pošiljanje izmerkov do kart RO, pošiljanje izmerkov do kart RO po načinu soudeležbe [26] ali pošiljanje izmerkov do kart RO na zahtevo upraviteljev kart RO. Problematika takšnega pridobivanja izmerkov in rešitve so podrobneje obravnavane v poglavju 7.

Ko je na voljo želeno oziroma zahtevano število izmerkov v izbrani karti RO, je za posamezno točko karte RP lahko na voljo po več izmerkov, medtem ko je za izdelavo karte RP v vsaki točki potrebna zgolj ena vrednost ocene jakosti radijskega signala. Zaradi tega je treba izmerke pred izdelavo karte RP dodatno filtrirati oziroma obdelati. Osnovni metodi obdelave izmerkov sta izračun povprečja ali mediane. Izračun povprečja je primeren, ko je na voljo veliko število izmerkov, v primeru majhnega števila izmerkov pa lahko privede do napačne ocene vrednosti signala. Zelo raznolike vrednosti izmerkov oziroma osameli izmerki namreč bistveno vplivajo na izračunano povprečno vrednost. Tipičen primer takšne porazdelitve vrednosti izmerkov nastane, ko je npr. nekaj izmerkov določene točke karte RP zajetih na prostem, nekaj pa znotraj stavb. V primeru manjšega števila izmerkov določene točke karte RP je tako za predstavitev njene najverjetnejše jakosti radijskega signala primernejša mediana. Po filtriranju oziroma obdelavi izmerkov se izvede izbran postopek izdelave karte RP. Ker različni postopki izdelave z istimi izmerki izdelajo različno kvalitetne karte RP, so pregled, analiza in kritično ovrednotenje obstoječih postopkov izvedeni v naslednjih podpoglavjih disertacije.

3.2 Neposredni postopki

Neposredni postopki za izdelavo kart RP uporabljajo izbrano interpolacijsko metodo nad zbranimi izmerki naprav MCD, s katerimi izračunajo ocene jakosti radijskega signala v vseh točkah karte RP, kot prikazuje slika 6. Obstaja veliko interpolacijskih metod, ki se delijo na ravninske in prostorske, lokalne in globalne, analitične in statistične, stohastične in deterministične, neprekinjene in prekinjene, točkovne in območne, glede na področje uporabe ter strukturo zapisa, uporabo na pravilnih in nepravilnih mrežah točk in matematično geometrijske lastnosti [44].

Za izdelavo kart RP se največkrat uporabljajo tisti, ki temeljijo na pristopu lokalne bližine, variacijskem in geostatističnem pristopu [45]. Najpogosteje uporabljeni predstavniki pristopa lokalne bližine so metode inverzne utežene razdalje (angl. inverse distance weighted, IDW) [46], najbližjega soseda (angl. nearest neighbour, NN) [47], naravnih sosedov (angl. natural neighbours, NNI) [45] in nekatere izpeljanke zadnjih, npr. spremenjena Shepardova metoda (angl. modified Shepard's method, MSM) [48] in



Slika 6: *Neposredna izdelava karte RP.*

metoda gradienta in inverzne utežene razdalje (angl. gradient plus inverse distance squared method, GIDS) [21]. Najpogosteje uporabljen predstavnik variacijskega pristopa je postopek zlepkov (angl. splines) [49], medtem ko so predstavniki geostatističnega pristopa večinoma Krigingove metode [50].

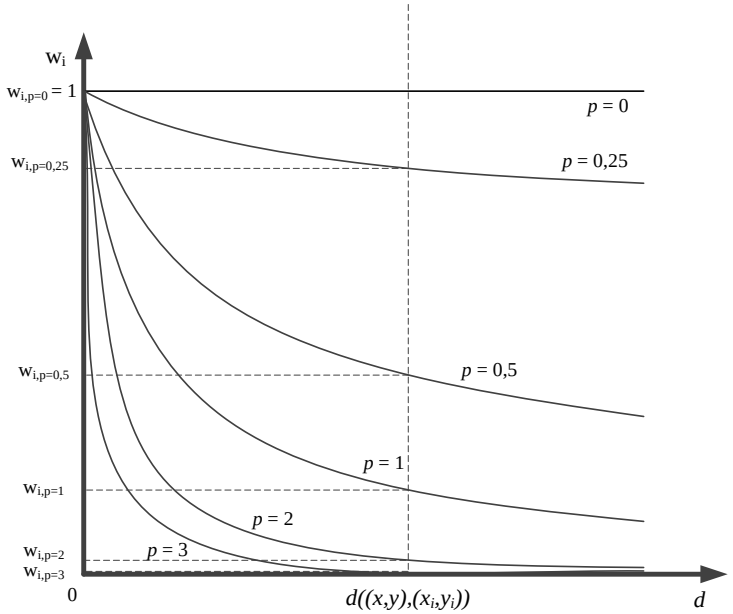
3.2.1 Metoda inverzne utežene razdalje

Interpolacijska metoda inverzne utežene razdalje, poznana tudi kot Shepardova metoda [45,47,51-54], predvideva, da imajo izmerki bliže interpolirani točki karte RP na računano oceno jakosti radijskega signala več vpliva kot bolj oddaljeni izmerki. Ko je na voljo N izmerkov, označenih s P_i, pri čemer je $i = 1, \dots, N$, se ocena jakosti signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP izračuna kot uteženo povprečje izmerkov, določeno z enačbo (3.2). Uteži w_i določajo vpliv posameznega izmerka na interpolirano vrednost in se izračunajo po enačbi (3.3). Posamezne uteži so sorazmerne inverzu evklidske razdalje d_i med lokacijo (x_i, y_i) in točko interpoliranja (x, y), na izbrano utežno potenco p. Potenca p je poljubno pozitivno realno število.

$$P_{rx}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i(x,y) P_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i(x,y)} \tag{3.2}$$

$$w_i(x,y) = \frac{1}{d_i^p} \tag{3.3}$$

Slika 7 prikazuje odvisnost vrednosti uteži w_i od razdalje d in utežne potence p. Uteži w_i zajamejo vrednosti med 0 in 1 in se hitro manjšajo z naraščajočo razdaljo d. Večja kot je vrednost p pri določeni razdalji d_i, manjša je izračunana utež w_i in posledično manjši vpliv pripadajočega izmerka P_i na izračun ocene jakosti radijskega signala v točki (x, y). Izbira p tako vpliva na gladkost interpoliranja. Za izdelavo kart RP se običajno uporabljajo vrednosti $p = 1$ in $p = 2$. Kadar je $p = 1$, govorimo o interpolacijski metodi inverzne utežene razdalje (angl. inverse distance squared weighted, IDW), in ko je $p = 2$ o interpolacijski metodi inverzne kvadratno utežene razdalje (angl. inverse distance squared weighted, IDW2).



Slika 7: *Odvisnost uteži w_i od razdalje d in utežne potence p pri interpolacijskih postopkih inverzne utežene razdalje.*

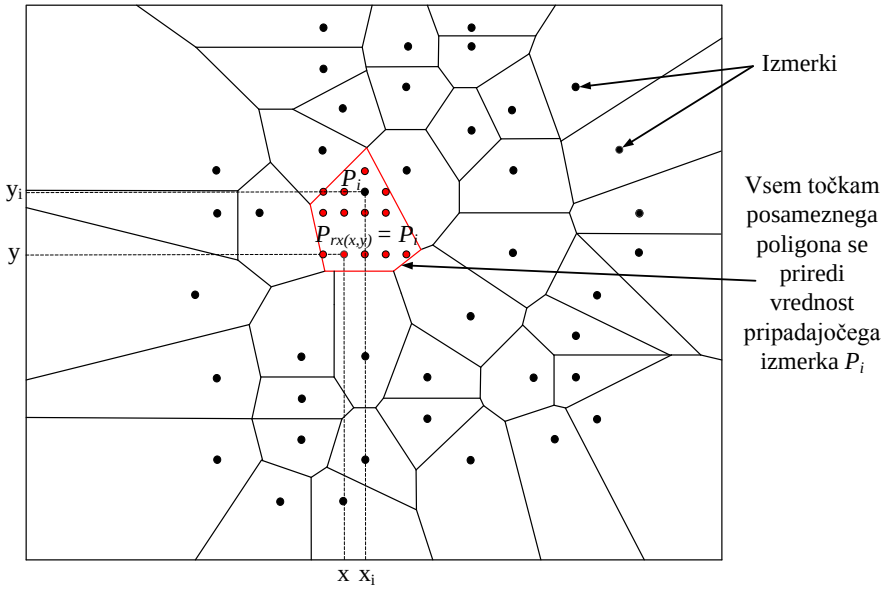
3.2.2 Metoda najbližjega soseda

Metoda najbližjega soseda [47,53,55-57] je ena računsko najučinkovitejših, a tudi najmanj natančnih interpolacijskih postopkov za izdelavo kart RP. Skladno z enačbo (3.4) se ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP določi kot uteženo povprečje N sosednjih izmerkov P_i, $i = 1, \dots, N$. Uteži w_i se določijo glede na evklidske razdalje d_i, med lokacijami izmerkov (x_i, y_i) do točke (x, y). Izmerek z najmanjšo d_i se uteži z utežjo $w_i = 1$, medtem ko se vsi ostali izmerki utežijo z $w_i = 0$. To se poenostavljeno opiše z enačbo (3.5) in pomeni, da se ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP določi tako, da se ji priredi vrednost najbližjega izmerka [58].

$$P_{rx}(x, y) = \sum_{i=1}^{N} w_i(x, y) P_i(x_i, y_i) \tag{3.4}$$

$$P_{rx}(x, y) = \min_{d_i} P_i(x_i, y_i) \tag{3.5}$$

Katerim točkam karte RP se priredi vrednost določenega izmerka, se ugotovi z računanjem vseh kombinacij njihovih razdalj do izmerkov d_i ali s pomočjo algoritmov za izdelavo neprekinjenih mnogokotnikov najbližjega (neposrednega) sosedstva, imenovanih Voronoijevi in Thiessenovi poligoni, poznanih tudi kot Dirichlethove celice. Njihova značilnost je, da vsak poligon oziroma celica vsebuje natanko en izmerek in točke, ki so mu glede na razdaljo bliže kot kateremukoli drugemu izmerku, kar ponazarja slika 8. Po izdelavi Voronoijevih poligonov je prirejanje vrednosti izmerkov znotraj posameznega poligona oziroma celice hitro in preprosto.



Slika 8: *Primer Voronoijevih poligonov, izdelanih na podlagi lokacijsko porazdeljenih izmerkov za potrebe interpolacijske metode najbližjega soseda.*

3.2.3 Metoda naravnih sosedov

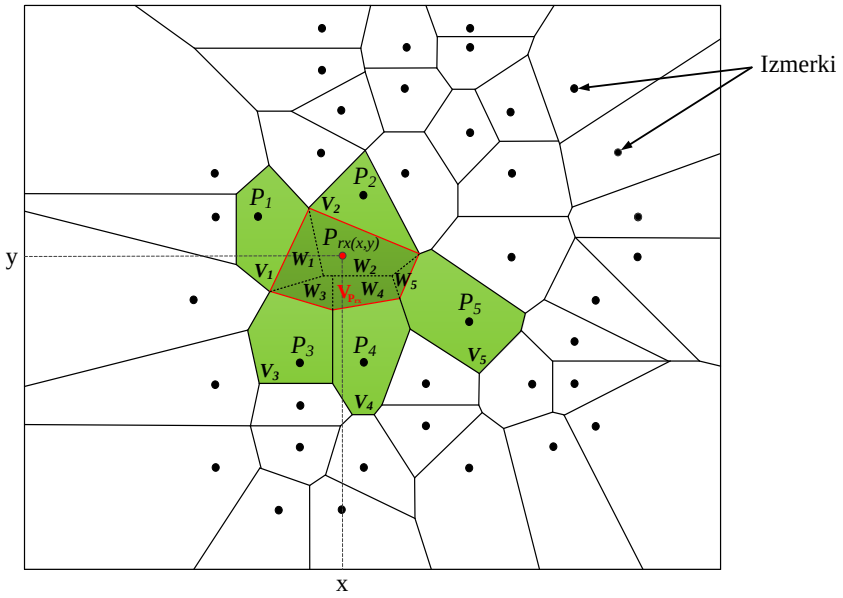
Interpolacijska metoda naravnih sosedov [45,57] je podobna metodi najbližjega soseda, saj se tudi tu ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP določi kot uteženo povprečje izmerkov (3.6).

$$P_{rx}(x, y) = \sum_{i=1}^{K} w_i(x, y) P_i(x_i, y_i) \tag{3.6}$$

Glavna razlika med metodama je, da se tu od N izmerkov, ki so na voljo, upošteva določeno število K izmerkov P_i, $i = 1, \ldots, K$, ki so naravni sosedi točke interpoliranja. Velikosti pripadajočih uteži w_i določajo t. i. lokalne koordinate naravne okolice, ki se določijo s pomočjo Voronoijevih poligonov.

Če se ob enaki porazdelitvi izmerkov kot na sliki 8 na mrežo izdelanih Voronoijevih poligonov doda še poligon $V_{P_{rx}}$, ki vključuje točko interpoliranja (x, y), prekrivanje poligonov prikazuje slika 9. V primeru na sliki 9 poligoni V_i, $i = 1, \ldots, K$, pri čemer je $K = 5$, pomenijo naravno okolico točke interpoliranja (x, y), njene naravne sosede pa pripadajoči izmerki poligonov P_i. Področja, ki so skupna tako poligonom V_i kot tudi poligonu $V_{P_{rx}}$, pomenijo lokalne koordinate naravne okolice in so označena z W_i. Skladno z enačbo (3.7) se vrednosti normaliziranih uteži w_i določijo kot razmerja površin W_i in površine poligona $V_{P_{rx}}$, pri čemer velja, da je $\sum_{i=1}^{K} w_i = 1$.

$$w_i = \frac{S(V_{P_{rx}} \cap V_i)}{S(V_{P_{rx}})} = \frac{S(W_i)}{S(V_{P_{rx}})} \tag{3.7}$$



Slika 9: *Primer Voronoijevih poligonov, izdelanih na podlagi lokacijsko porazdeljenih izmerkov za potrebe interpolacijske metode naravnih sosedov.*

3.2.4 Spremenjena Shepardova metoda

Spremenjena Shepardova metoda [48,51] je izboljšana metoda inverzne utežene razdalje, ki temelji na uporabi vozliščnih funkcij (angl. nodal functions). Te imajo običajno obliko kvadratične forme [48], medtem ko se je za izdelavo kart RP z majhnim naborom izmerkov izkazala primernejša linearna forma [45]. Ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP se določi z enačbo (3.8), kjer je N število izmerkov, ki so na voljo, Q_i so vrednosti pripadajočih vozliščnih funkcij na njihovih lokacijah in w_i vrednosti uteži, izračunane po enačbi (3.9). V (3.9) je r_w izbran radij, ki določa krožnico vplivnega območja točke interpoliranja, d_i pa so evklidske razdalje med točko interpoliranja in točkami izmerkov.

$$P_{rx}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i(x,y) Q_i(x,y)}{\sum_{i=1}^{N} w_i(x,y)} \tag{3.8}$$

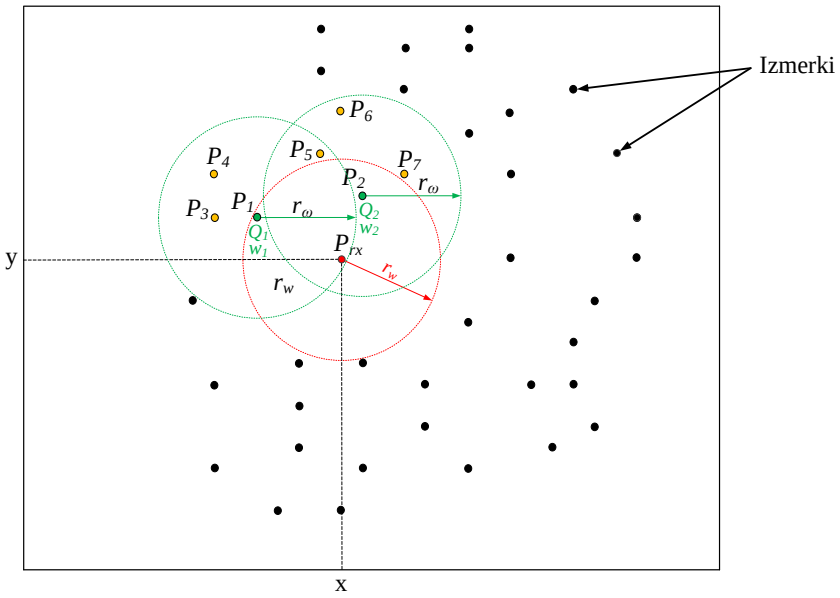
$$w_i(x,y) = \begin{cases} [(r_w - d_i)/r_w d_i]^p & d_i < r_w \\ 0 & d_i \geq r_w \end{cases} \tag{3.9}$$

Postopek določitve Q_i je predstavljen s pomočjo porazdelitve izmerkov na sliki 10. Skladno z enačbo (3.9) se za določanje interpolirane vrednosti v točki (x, y) uporabijo zgolj izmerki znotraj pripadajočega vplivnega območja, določenega z izbranim radijem r_w. V konkretnem primeru to pomeni uporabo izmerkov P_1 in P_2. Za določitev Q_i vsakega izmed njih, tj. vrednosti Q_1 in Q_2, je treba enolično določiti vozliščne funkcije, ki približno ocenijo vrednosti jakosti radijskega signala na njihovih celotnih vplivnih območjih, določenih s krožnicami z radijem r_ω. Vozliščne funkcije oziroma njihovi koeficienti se enolično določijo s prileganjem izbranega splošnega tipa vozliščne funkcije na izmerke z metodo uteženih najmanjših kvadratov tako, da se minimizira vrednost (3.10).

$$\sum_{j=1}^{N} \omega_j(x,y)\left[Q_j(x,y) - P_j(x,y)\right]^2 \tag{3.10}$$

$$\omega_j(x,y) = \begin{cases} \left[(r_\omega - d_j)/r_\omega d_j\right]^p & d_j < r_\omega \\ 0 & d_j \geq r_\omega \end{cases} \tag{3.11}$$

Pri tem P_j pomenijo vrednosti izmerkov, Q_j vrednosti vozliščne funkcije na njihovih lokacijah in ω_j uteži, izračunane po enačbi (3.11), kjer so d_j evklidske razdalje med izmerki in p izbrana utežna potenca.



Slika 10: *Primer lokacijske porazdelitve izmerkov za predstavitev spremenjene Shepardove metode.*

V prikazanem primeru se vozliščna funkcija vplivnega območja izmerka P_1 določi s prileganjem izbranega tipa vozliščne funkcije na izmerke P_1, P_3, P_4 in P_5, pri izmerku P_2 pa na izmerke P_2, P_5, P_6 in P_7. Vrednosti Q_j v točkah izmerkov se kot Q_i uporabijo v enačbi (3.8).

Radija r_w in r_ω sta fiksna ali variabilna. Če sta variabilna, se njuna vrednost po navadi določi po enačbah (3.12) in (3.13), kjer D pomeni maksimalno evklidsko razdaljo med izmerki, N je število vseh razpoložljivih izmerkov, N_w in N_ω pa sta pričakovani števili izmerkov znotraj krožnic z radijema r_w in r_ω [59].

$$r_w = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{N_w}{N}} \tag{3.12}$$

$$r_\omega = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{N_\omega}{N}} \tag{3.13}$$

3.2.5 Metoda gradienta in inverzne kvadratno utežene razdalje

Interpolacijska metoda gradienta in inverzne kvadratno utežene razdalje [21,51,60] temelji na združitvi interpolacijske metode IDW2 in splošne linearne regresije. Za določitev ocene jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP se uporablja spremenjena enačba (3.2) v obliki (3.14), ki upošteva tudi nadmorske višine geografskega področja.

$$P_{rx}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{P_i + C_x(x - x_i) + C_y(y - y_i) + C_z(z - z_i)}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d_i^2}} \tag{3.14}$$

V enačbi (3.14) se podobno kot pri metodi IDW2 za interpolacijo uporabi N izmerkov z vrednostmi P_i in pripadajoče evklidske razdalje d_i med točko interpoliranja (x, y) in njihovimi lokacijami (x_i, y_i). Glavna razlika med metodama je, da se tu dodatno uporabijo še nadmorska višina točke interpoliranja z, nadmorske višine izmerkov z_i in predvsem koeficienti C_x, C_y in C_z, za določitev katerih se uporabi linearna regresija. Koeficienti C_x, C_y in C_z namreč pomenijo gradiente jakosti radijskega signala v smereh neodvisnih osi koordinatnega sistema, ki odražajo lokacijske koordinate in nadmorske višine terena.

3.2.6 Metoda zlepkov

Interpolacijska metoda zlepkov [45,47,49,52] je poznana tudi kot metoda funkcije, odvisne samo od razdalje od izhodišč, oziroma metoda napenjanja raztegljive funkcije skozi referenčne točke. Metoda zlepkov oceni nivo jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP s pomočjo zlepljene funkcije odsekovno določenih polinomov, ki jim pravimo zlepki. Njihovi koeficienti so izračunani tako, da je zagotovljena globalna gladkost spreminjanja jakosti radijskega signala med vsemi izmerki. Kot zlepki se največkrat uporabljajo linearni, kvadratni in kubični polinomi. Linearni zlepki opisujejo spreminjanje jakosti radijskega signala med izmerki s pomočjo daljic. Daljice, ki gredo skozi isti izmerek, imajo isto vrednost. Kvadratni zlepki gredo skozi izmerke tako, da so njihovi prvi odvodi v točkah izmerkov zvezni, medtem ko za kubične zlepke velja, da so zvezni tudi njihovi drugi odvodi.

3.2.7 Krigingova metoda

Krigingova interpolacijska metoda oziroma izpeljanke osnovne ideje [21,47,51-54,61,62] obravnavajo jakosti radijskega signala v kartah RP kot vrednosti funkcije naključnega procesa v prostoru. Ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki karte RP se določi na podlagi statističnega modela za prostorsko interpolacijo naključne spremenljivke. Interpolirana vrednost se izračuna kot uteženo povprečje izmerkov tako, da se minimizira varianca napake splošne linearne Krigingove cenilke (3.15). V enačbi (3.15) so w_i, $i = 1, \ldots, N$ interpolacijske uteži N izmerkov P_i, ki so na voljo na lokacijah (x_i, y_i), medtem ko so $m(x, y)$ in $m(x_i, y_i)$ povprečne vrednosti funkcije naključnega procesa v točki interpoliranja in v točkah izmerkov.

$$P_{rx}^*(x,y) = \sum_{i=1}^{N} w_i(x,y)[P_i(x_i,y_i) - m(x_i,y_i)] + m(x,y) \tag{3.15}$$

Izpeljanke Krigingove osnovne ideje se razlikujejo glede na obravnavanje povprečne vrednosti v (3.15), kar se odraža na vrednostih interpolacijskih uteži. Za izdelavo karte RP se najpogosteje uporabljata enostavni in splošni Krigingov postopek. Cenilko enostavnega Kriginga podaja enačba (3.16), cenilko splošnega Kriginga pa enačba (3.17).

$$P^*_{rx_{SK}}(x,y) = \sum_{i=1}^{N} w_{i_{SK}}(x,y) P_i(x_i,y_i) \tag{3.16}$$

$$P^*_{rx_{OK}}(x,y) = \sum_{i=1}^{K} w_{i_{OK}}(x,y) P_i(x_i,y_i)$$

, kjer je

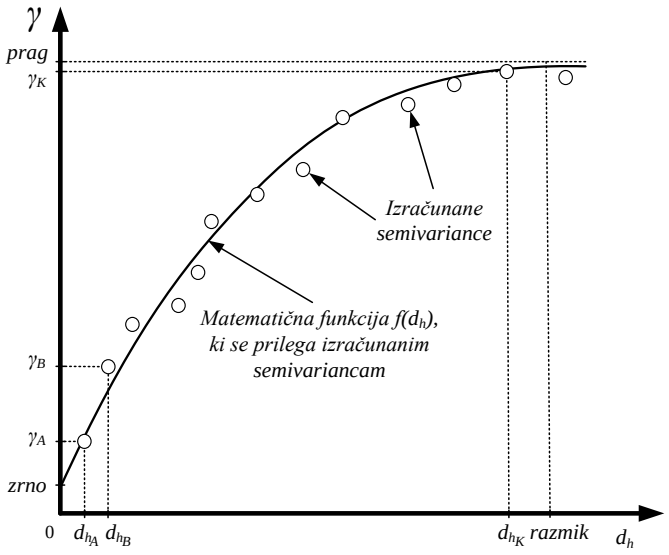
$$\sum_{i=1}^{K} w_{i_{OK}}(x,y) = 1 \tag{3.17}$$

Za določitev uteži v obeh primerih se najprej izrazi stopnja povezanosti med jakostjo radijskega signala na vseh točkah karte RP. Nad vsemi razpoložljivimi izmerki se izvede variogramska analiza [62]. Če je na voljo N izmerkov, se iz njih tvori $M_p = N(N-1)/2$ parov. Za vsak par se izračuna evklidska razdalja, t. i. razdalja zamika d_h med izmerkoma, in semivarianca γ, katere izračun prikazuje enačba (3.18) [62].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2M_p} \sum_{i=1}^{M_p} \left[P_i(x_i,y_i) - P_i\left(x_{i+d_h}, y_{i+d_h}\right) \right]^2 \tag{3.18}$$

Slika 11 prikazuje primer grafa točk γ v odvisnosti od d_h, ki se imenuje empirični semivariogram, in izraža prostorsko avtokorelacijo podatkovnega seta. Kot je prikazano, se takšnemu grafu prilega izbrana zvezna matematična funkcija $f(d_h)$, s pomočjo katere se določijo pomembne točke semivariograma, imenovane prag, zrno in razmik. Prag je vrednost semivariance, pri kateri se semivariogram izravna, zrno pomeni mersko napako oziroma variabilnost na lokalni ravni, medtem ko razmik določa mejo okna lokalne okolice točke interpoliranja. Na podlagi matematične funkcije, ki se prilega empiričnemu semivariogramu, se določijo vrednosti semivariance pri poljubni razdalji d_h. Na primer, če je d_{h_A} razdalja med lokacijo izmerka A (x_A, y_A) in točko interpoliranja (x,y), velja $\gamma_A = f\left(d_{h_A}\right)$, če je h_B razdalja med lokacijo izmerka B (x_B, y_B) do točke interpoliranja (x,y), velja $\gamma_B = f\left(d_{h_B}\right)$, medtem ko za K-ti izmerek velja $\gamma_K = f(d_{h_K})$. Podobno se določijo vrednosti semivariance pri vrednosti razdalj med izmerki, na primer za razdaljo $d_{h_{AK}}$ med izmerkoma A in K je vrednost semivariance $\gamma_{AK} = f(d_{h_{AK}})$.

Enostavni Kriging pri interpolaciji vrednosti v točki (x,y) uporablja vse izmerke, ki so na voljo, splošni Kriging pa zgolj K izmerkov znotraj okna lokalne okolice točke interpoliranja. To so tisti izmerki, katerih razdalja d_h med njihovo lokacijo do točke interpoliranja (x,y) je manjša od razdalje razmika empiričnega semivariograma. Zato je interpolacija z enostavnim Krigingom v primerjavi s splošnim Krigingom pogosto bolj gladka, a manj natančna.



Slika 11: *Primer empiričnega semivariograma s prilegano matematično funkcijo.*

Interpolacijske uteži $w_{i_{SK}}$, ki minimizirajo napako variance enostavne cenilke (3.16), se izračunajo skladno z enačbo (3.19), medtem ko se interpolacijske uteži $w_{i_{OK}}$, ki minimizirajo napako variance splošne cenilke (3.17), izračunajo skladno z enačbo (3.20), kjer μ pomeni Lagrangeov parameter. V obeh primerih se vrednosti semivarianc γ_{ij} pri razdaljah $d_{h_{ij}}$ med izmerki na lokacijah (x_i, y_i) in izmerki na lokacijah (x_j, y_j) izračunajo s pomočjo semivariograma kot $\gamma_{ij} = f(d_{h_{ij}})$, medtem ko so $\gamma_{i0} = f(d_{h_{i0}})$ vrednosti semivarianc pri razdaljah $d_{h_{i0}}$ med posameznim izmerkom na lokaciji (x_i, y_i) in točko interpoliranja (x, y).

$$\begin{bmatrix} w_{1_{SK}} \\ \vdots \\ w_{N_{SK}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \cdots & \gamma_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

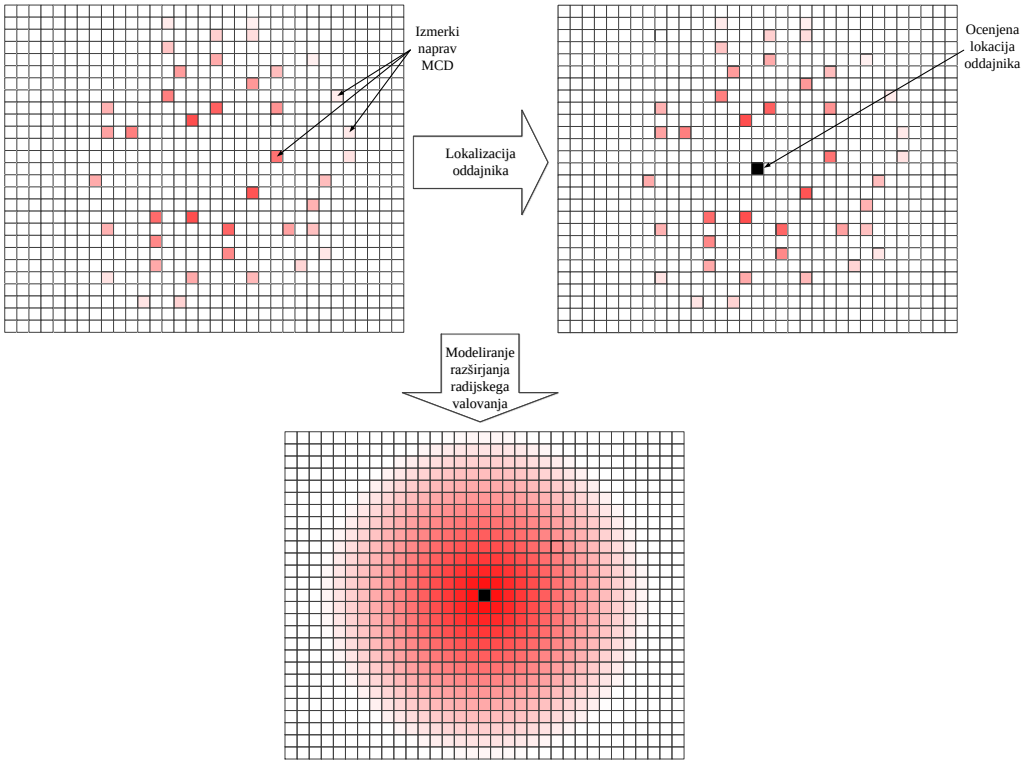
$$\begin{bmatrix} w_{1_{OK}} \\ \vdots \\ w_{K_{OK}} \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1K} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{K1} & \cdots & \gamma_{KK} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{K0} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Ocena jakosti radijskega signala v posamezni točki interpoliranja (x, y) se po določitvi uteži s pomočjo (3.19) ali (3.20) izračuna v matrični obliki z enačbo (3.21).

$$P_{rx}(x, y) = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_K \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} w_{1_{(SK\ ali\ OK)}} \\ \vdots \\ w_{K_{(SK\ ali\ OK)}} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

3.3 Posredni postopki

Slika 12 prikazuje posredno izdelavo kart RP. Pri teh postopkih se izmerke najprej uporabi za določanje lokacije in parametrov oddajnika. V drugem koraku se z modeliranjem razširjanja radijskega valovanja izračuna karte RP. Ločimo tri osnovne primere, in sicer: (a) ko so lokacija in parametri oddajnika znani, (b) ko je znana bodisi



Slika 12: *Posredna izdelava karte RP.*

lokacija bodisi parametri oddajnika in (c) ko niso znani ne lokacija oddajnika in ne njegovi parametri. Pri izdelavi kart RP se večinoma obravnava najbolj splošen primer (c).

V primeru (a) je izdelava karte RP preprosta, saj gre zgolj za izračun pokritja z radijskim signalom z izbranim modelom razširjanja radijskega valovanja in znanimi parametri oddajnika. Ta pristop je dobro raziskan in uveljavljen za načrtovanje brezžičnih omrežij, kjer se uporabijo izbrani, predhodno na izmerke umerjeni, modeli razširjanja radijskega valovanja.

V primeru (b) se s pomočjo izmerkov ob znani oddajni moči oddajnika in približni karakteristiki antene čim natančneje oceni lokacija oddajnika in uporabi izbran model razširjanja radijskega valovanja. Če je znana zgolj lokacija oddajnika, se na podlagi izmerkov ocenjujejo njegovi ostali parametri, predvsem oddajna moč in približen smerni diagram antene. V obeh primerih se lahko izbrani model razširjanja radijskega valovanja tudi umeri na razpoložljive izmerke.

Na prvi in drugi primer posredne izdelave kart RP lahko gledamo tudi kot na poenostavitev primera (c), kjer je treba oceniti tako neznano lokacijo oddajnika kot tudi njegove parametre. Temu načinu sledi metoda LIvE [63].

3.3.1 Metoda LIvE

Posredna metoda LIvE [53,63,64] najprej oceni lokacijo oddajnika in njegovo oddajno moč ob predpostavki log-normalne porazdelitve senčenja, Rayleighovega presiha in znane karakteristike radijskega kanala (referenčni nivo izgube poti P_{L0} pri referenčni razdalji d_0 od oddajnika in faktor izgube poti α). Za izdelavo kart RP predvideva model razširjanja radijskega valovanja, kjer jakost radijskega signala logaritemsko pada z razdaljo. Povprečna jakost radijskega signala $\overline{P_{rx_i}}$ na določeni točki karte RP se, če ni motenj v izmerkih na lokacijah (x_i, y_i), $i = 1, \ldots, N_{MCD}$, določi s pomočjo enačbe (3.22). Po kratki izpeljavi se ta izrazi kot (3.23), pri čemer je P_{tx} oddajna moč oddajnika, $d_{(x_i,y_i)}$

je razdalja med (x_{tx}, y_{tx}) lokacijo oddajnika in (x_i, y_i) lokacijo i-tega izmerka in $D^2 = {x_{tx}}^2 + {y_{tx}}^2$. Enačba (3.23) se zapiše za vse izmerke in predstavi kot sistem enačb $A\theta = b$ v matrični obliki, pri čemer so A, θ in b podane z enačbami (3.24), (3.25) in (3.26).

$$\overline{P_{rx_i}} = P_{tx} - P_{L0} - 10\alpha \log_{10} d_{(x_i,y_i)} \tag{3.22}$$

$$x_i^2 + y_i^2 = 2x_{tx}x_i + 2y_{tx}y_i + 10^{\frac{P_{tx}-P_{L0}-\overline{P_{rx_i}}}{5\alpha}} - D^2 \tag{3.23}$$

$$A = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 10^{\frac{-P_{L0}-\overline{P_{rx_1}}}{5\alpha}} & -1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 10^{\frac{-P_{L0}-\overline{P_{rx_2}}}{5\alpha}} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -1 \\ 2x_{N_{MCD}} & 2y_{N_{MCD}} & 10^{\frac{-P_{L0}-\overline{P_{rx_{N_{MCD}}}}}{5\alpha}} & -1 \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} x_{tx} \\ y_{tx} \\ 10^{\frac{P_{tx}}{5\alpha}} \\ D^2 \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots \\ x_{N_{MCD}}^2 + y_{N_{MCD}}^2 \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

Sistem enačb $A\theta = b$ predstavlja optimizacijski problem, katerega rešitev je $\hat{\theta}$ (3.27). $\hat{\theta}$ se izračuna po metodi najmanjših kvadratov, za kar avtorji LIvE sistem enačb $A\theta = b$ najprej pretvorijo v Lagrangeov dualni problem in ga nato rešijo. Ocena radijskega signala v vsaki posamezni (x, y) točki karte RP se na koncu določi na podlagi enačbe (3.28).

$$\hat{\theta} = \text{argmin}\|A\theta - b\| \tag{3.27}$$

$$P_{rx}(x, y) = \hat{P}_{tx} - P_{L0} - 10\alpha \log_{10} \hat{d}_{(x,y)} \tag{3.28}$$

3.4 Hibridni postopki

Hibridni postopki za izdelavo kart RP kombinirajo pristope neposrednih in posrednih postopkov, pri čemer težijo k čim boljšemu izkoriščanju njihovih prednosti. Na račun kombinirane kompleksnosti lahko izdelajo zelo natančne karte RP. Na primer, hibridna metoda, predstavljena v [57], najprej uporabi metodo najbližjega soseda, linearno interpolacijo v dveh dimenzijah ali metodo naravnih sosedov, da pridobi sliko, ki pri uporabi neposrednih postopkov že pomeni karto RP. V nadaljevanju z uporabo postopkov za obdelavo slik oceni parametre oddajnika in razširjanja radijskega valovanja. Na koncu izvede modeliranje razširjanja radijskega valovanja s pomočjo ocenjenih parametrov in izdela končno karto RP. Ta metoda lahko oceni lokacijo oddajnika, njegov antenski

diagram in koeficiente uporabljenega modela za opis razširjanja radijskega valovanja, vendar vnaša napake v primeru okolja, kjer je prisotno senčenje radijskega signala. Ravno nasproten pristop uporablja hibridna metoda, predstavljena v [35], ki izračuna predhodno karto RP s pomočjo modeliranja razširjanja radijskega valovanja, ki jo nato popravi oziroma izboljša s pomočjo izmerkov in Krigingove metode z zunanjim vplivom [62], tako da izračuna končno karto RP. Ta metoda deluje samo s predhodno znanimi parametri oddajnika. Dodatno se jo izboljša s filtriranjem majhnih sprememb v izmerkih, kljub temu pa ima težave z osamelimi izmerki.

Hibridni postopki izdelave kart RP kombinirajo različne neposredne in posredne postopke, pri čemer prevzamejo tudi njihove lastnosti. Izdelajo natančne karte RP, njihovo računsko kompleksnost pa določa najkompleksnejši izmed uporabljenih postopkov. Iz tega razloga hibridnih postopkov ta disertacija nadalje ne obravnava.

3.5 Analiza obstoječih postopkov izdelave kart radijskega okolja in možne izboljšave

Pregled postopkov izdelave kart RP, predstavljen v poglavjih 3.2, in 3.3, kaže na to, da so obstoječi postopki izdelave zelo različni. Vsak ima svoje prednosti in slabosti, ki poleg kvalitete vhodnih podatkov vplivajo na kvaliteto in ustreznost izdelane karte RP za praktično uporabo. To poglavje primerja predstavljene obstoječe postopke izdelave kart RP po lastnostih in kompleksnosti.

Za teoretično analizo postopkov izdelave kart RP predpostavimo, da imamo v določenem časovnem trenutku na voljo N izmerkov radijskega signala in M lokacij v karti RP, kjer je treba oceniti jakost radijskega signala. Naj velja, da sta N in M zelo velika, tj. $M, N \to \infty$, in da je lokacij za oceno jakosti radijskega signala bistveno več kot izmerkov, tj. $M \gg N$.

Skladno s predpostavkami je neposredna metoda NN med računsko najmanj kompleksnimi postopki za izdelavo kart RP. Njena kompleksnost je reda $O((M + N)\log N)$, ki jo je dodatno mogoče zmanjšati na red $O(M\log N)$ [21]. Ta metoda zelo dobro deluje z enakomerno porazdeljenimi izmerki in je najbolj učinkovita v primeru zapolnjevanja manjših področij kart RP, kjer izmerki niso na voljo. Po drugi strani slabo ekstrapolira jakosti radijskega signala preko območja vrednosti, določenih z izmerki, in predvideva enakomerne lastnosti razširjanja radijskega valovanja. Rezultat tega so ostri prehodi med posameznimi conami ocen jakosti radijskega signala, izdelanih iz različnih izmerkov. Izdelane karte RP po tej metodi so posledično grobe, z veliko šuma na mejnih področjih.

Metoda MSM ter metoda GIDS imata enako kompleksnost kot metoda NN, tj. reda $O(M\log N)$. Vir njune največje kompleksnosti je namreč postopek iskanja NN [21]. Metoda MSM ne izdela natančnejših področij kart RP zgolj v bližnji okolici lokacij izmerkov. V primerjavi z metodo NN ekstrapolira vrednosti preko mej, določenih z vrednostmi izmerkov, vendar slabše deluje v primeru, če so izmerki v nizko dimenzionalnem podprostoru. Metoda GIDS izboljša natančnost izdelane karte RP zaradi upoštevanja nadmorskih višin terena in gradientov jakosti radijskega signala, za kar pa potrebuje tudi informacije o nadmorskih višinah terena. Slabost te metode je, da ob premajhnem polmeru območja lokalne bližine točke interpoliranja ne upošteva pomembnih izmerkov, ob prevelikem polmeru pa v izdelane karte RP vnese šum.

Metoda NNI se zanaša na izračun lokalne bližine posamezne točke interpoliranja. Ima kompleksnost reda $O(M(N + k)\log N)$ [65], pri čemer je k število naravnih sosedov posamezne točke interpoliranja. Ta metoda dobro deluje v primeru nehomogene porazdelitve izmerkov celo takrat, ko je porazdelitev izmerkov na določenih področjih

kart RP gosta in na drugih področjih redka. Njena slabost je, da ne more ekstrapolirati jakosti radijskega signala preko mej, določenih z vrednostmi izmerkov. Ta lastnost je namreč zelo pomembna za natančen opis radijskega signala v okolici ovir ali na višinsko zelo razgibanem geografskem področju.

Metoda IDW s kompleksnostjo reda $O(MN)$ [21] je še vedno razmeroma hitra, dokaj učinkovita in najbolje deluje na enakomerno razporejenih izmerkih. Njena pomanjkljivost je, da se v bližnji geografski okolici lokacij izmerkov izdela bistveno natančnejša področja z ocenami radijskega signala kot drugje na kartah RP. Poleg tega je metoda občutljiva na lokacijsko osamele izmerke in v primeru neenakomerne porazdelitve vseh izmerkov, ki so na voljo, povzroča napake. Po drugi strani je zelo primerna za glajenje kart RP, saj podobno kot metoda NN ne ekstrapolira ocen jakosti radijskega signala preko mej, določenih z vrednostmi izmerkov. Njena glavna slabost je, da vnaprej ni mogoče predvideti, katera vrednost utežne potence razdalje bo izdelala najnatančnejšo karto RP.

Metoda zlepkov ima kompleksnost reda $O(MNp_s^2)$ [66], kjer je p_s red zlepka. Ta metoda zelo dobro izdela gladke karte RP že z zelo majhnim številom izmerkov, a le v primeru rahlo spreminjajoče se jakosti radijskega signala. Sicer lahko zelo dobro opiše trend spreminjanja jakosti radijskega signala v različnih geografskih smereh, ekstrapolira jakosti radijskega signala preko geografskih mej, določenih z lokacijami izmerkov, vendar je občutljiva na osamele izmerke. Ker pri izdelavi kart RP ohranja vrednosti izmerkov v geografskih točkah zajema, metoda zlepkov odpove v primeru, če so izmerki zajeti blizu skupaj in imajo zelo različne vrednosti. To se lahko dogodi zelo pogosto zaradi vplivov okolja na razširjanje radijskega valovanja.

Med vsemi obravnavnimi neposrednimi postopki za izdelavo kart RP je Krigingova metoda s kompleksnostjo reda $O(MN^2)$ [21] med najbolj kompleksnimi in matematično bolj robustnimi metodami. Hkrati je to nepristranska metoda, ki minimizira varianco napake, ki se določi kot del interpolacijskega procesa in predstavlja mero zanesljivosti ocene radijskega signala na različnih območjih kart RP. To uvršča metodo med točne interpolacijske metode, razen v primeru, ko ima semivariogram zrno. Takrat ta metoda ne more dobro oceniti hitrega spreminjanja jakosti radijskega signala, saj podceni ekstreme. V primerjavi z ostalimi neposrednimi postopki izdelave kart RP je Krigingova metoda časovno in računsko najbolj kompleksna, saj zahteva veliko število izmerkov za dosego zelo velike natančnosti. Ostali neposredni postopki običajno delujejo dobro že z manjšim številom izmerkov, vendar se zaradi omejitev samih postopkov to ravno tako kaže v manj natančno izdelanih kartah RP.

Posredni postopki za izdelavo kart RP so podobno kompleksni ali kompleksnejši kot neposredni postopki. Metoda LIvE ima kompleksnost reda $O(MN^3)$ oziroma $O(MN^{2.376})$, če se jo optimizira s Coppersmith-Winograd-ovim algoritmom [53]. Temelji na izkustvenem (tj. empiričnem) modelu za opis razširjanja radijskega valovanja. Slednji je pridobljen na podlagi statistične analize velikega števila izmerkov, zaradi česar je metoda LIvE zelo odvisna od njegove prilagoditve na specifično geografsko področje. Po drugi strani metoda predvideva, da so ravno podatki o prilagoditvi, tj. koeficienti izbranega modela razširjanja radijskega valovanja, na okolje znani. Statistično določeni koeficienti modela razširjanja radijskega valovanja, ki naj bi veljali za izbran tip geografskega področja, v praksi veljajo zgolj približno. Pravzaprav se lahko razlikujejo med posameznimi področji, kljub temu da so istega tipa. Zaradi tega se za njihovo natančnejšo določitev običajno uporabljajo različne optimizacijske metode za prilagajanje modelov razširjanja valovanja [67]. Ob predpostavki, da je prilagoditev modela za opis razširjanja radijskega valovanja na okolje izvedena, je glavna značilnost metode LIvE, da izdela natančnejše karte RP kot metoda inverzne utežene razdalje, metoda inverzne kvadratno utežene razdalje in metoda Kriging. Dodatna značilnost metode LIvE je, da deluje dobro le v okolju z log-normalnim senčenjem in Rayleighevim presihom [63].

Tabela 1: *Značilnosti pregledanih postopkov za izdelavo kart RP.*

Metoda	Prednosti	Slabosti	Asimptotična kompleksnost*
IDW IDW2	- relativno hitra in učinkovita - dobra za glajenje kart RP	- povzroča, da so karte RP v bližnji geografski okolici lokacij izmerkov bistveno natančnejše kot drugje - občutljivost na osamele izmerke - ima težave z neenakomerno porazdeljenimi izmerki - ne omogoča ekstrapolacije jakosti signalov preko mej, določenih z vrednostmi izmerkov - ni mogoče vnaprej ugotoviti, katera utež razdalje bo izdelala najnatančnejšo karto RP	$O(MN)$
NN	- hitra - primerna za zapolnjevanje manjšega števila manjkajočih vrednosti jakosti radijskega signala	- slabo ekstrapolira jakosti signalov preko mej, določenih z vrednostmi izmerkov - povzroča ostre prehode med posameznimi vrednostmi jakosti signala v kartah RP	$O(M\log N)$
Metoda zlepkov	- dobra za glajenje kart RP - sledi trendom spreminjanja jakosti signala - dobra ekstrapolacija preko mej, določenih z vrednostmi izmerkov	- občutljiva na osamele izmerke - odpove, ko so izmerki z veliko razliko v vrednoti razporejeni zelo blizu skupaj	$O(MNp_s{}^2)$
NNI	- hitra - deluje z nehomogeno porazdeljenimi izmerki	- ne more oceniti vrednosti signala izven konveksnega področja, ki ga določajo lokacije izmerkov	$O(M(N+k)logN)$
MSM	- hitra - omeji pojav, da so vrednosti karte RP v bližnji okolici izmerkov bistveno natančnejše kot drugje - lahko ekstrapolira vrednosti signala preko mej, določenih z vrednostmi izmerkov	- slabo deluje v primeru, če so izmerki v nizkodimenzionalnem podprostoru	$O(M\log N)$
GIDS	- upošteva gradient spreminjanja radijskega signala in nadmorsko višino, kjer so bili zajeti izmerki	- potrebna ročna izbira lokalne okolice točk interpoliranja - pri interpoliranju lahko izpusti pomembne izmerke, če je izbrana lokalna okolica točk interpoliranja premajhna - vnaša šum v karte RP, če je izbrana lokalna okolica točk interpoliranja prevelika	$O(M\log N)$
Kriging	- minimizira varianco napake - izdela natančnejše karte RP kot druge neposredne metode, če je na voljo veliko število izmerkov	- lahko ima težave s hitro spreminjajočimi vrednostmi jakosti radijskega signala - kompleksnejša od drugih neposrednih postopkov	$O(MN^2)$
LIvE	- za okolja z log-normalnim senčenjem signala izdela natančnejše karte RP kot postopki IDW, IDW2 in Kriging	- predpostavlja, da so parametri izbranega modela za opis razširjanja radijskega valovanja vnaprej znani - uporablja empirični model za opis razširjanja radijskega valovanja in tako eksplicitno ne upošteva parametrov okolja - ne upošteva smernosti oddajnika - dobro deluje zgolj v relativno nerazgibanem okolju z log-normalnim senčenjem signala in Rayleigh-ovim presihom	$O(MN^{2.376})$

* $M, N \to \infty, M > N$
M – št. točk karte RP, na katerih se ocenjuje jakost radijskega signala
N – št. izmerkov, ki so na voljo za izdelavo karte RP
p_s – red izbrane funkcije zlepka

Poleg tega metoda LIvE ne upošteva vpliva oddajne antene v primeru usmerjenega oddajnika, njen model razširjanja radijskega valovanja pa je v praksi redko uporabljen, saj ni med najprimernejšimi za razgibana geografska področja. Največkrat se uporablja deterministične in semiempirične oziroma semideterministične modele [37,68]. Če so ti modeli izbrani pravilno, so običajno bolj natančni od empiričnih modelov.

Kot je bilo prikazano, so obstoječi postopki za izdelavo kart RP zelo raznoliki. Zaradi lažjega pregleda so značilnosti pregledanih postopkov zbrane v tabeli 1.

3.6 Ključne ugotovitve

Pregled obstoječih postopkov za izdelavo kart RP, njihova primerjava in ovrednotenje so pokazali, da je izdelava kart RP zelo odvisna od geografske porazdelitve izmerkov radijskega signala in da obstoječi postopki večinoma ne upoštevajo informacij o realnem okolju. Za dobro delovanje zahtevajo veliko število prostorsko ustrezno in v nekaterih primerih celo načrtovano porazdeljenih izmerkov. Enakomerna in mrežasta porazdelitev izmerkov sta v praksi bodisi težko dosegljivi ali popolnoma nedosegljivi zaradi omejitev okolja. Prilagodljiva porazdelitev izmerkov zahteva vnaprejšnje poznavanje razširjanja radijskega valovanja in je pri izdelavi kart RP neuporabna. Natančen postopek mora torej podpirati izdelavo kart RP predvsem iz naključnih, psevdo-naključnih in gručasto porazdeljenih izmerkov. Lokacijsko osameli izmerki ne smejo bistveno vplivati na njegovo delovanje. Postopek mora s sprejemljivo računsko zahtevnostjo dobro oceniti jakosti radijskega signala na vseh točkah kart RP in ne zgolj v bližnji okolici izmerkov. Neposredni postopki večinoma nimajo naštetih značilnosti, hibridni postopki pa so računsko zahtevni.

Dandanes razvoj računsko zmogljivejših naprav odpira mnogo raziskovalnih možnosti v smeri posrednih in hibridnih postopkov izdelave kart RP. Predvidevamo, da bodo glavni raziskovalni doprinosi na področju izdelave kart RP izvedeni v smeri naprednih in natančnejših posrednih postopkov izdelave kart RP, ki bodo temeljili na uporabi neempiričnih modelov za opis razširjanja radijskega valovanja. Slednji se namreč lahko uporabijo tudi v hibridnih postopkih. Predvsem posredni postopki, ki bi upoštevali parametre okolja ter oddajnikov, imajo velik potencial, kar so ugotovili že v [53]. Pri tem se lahko izbira med uporabo determinističnih ali semiempiričnih modelov za opis razširjanja radijskega valovanja [68]. Medtem ko deterministični modeli zahtevajo zelo podrobno poznavanje geometrije okolja in so računsko zelo kompleksni, se semiempirčini modeli s sprejemljivo kompleksnostjo že lahko uporabijo za izdelavo kart RP.

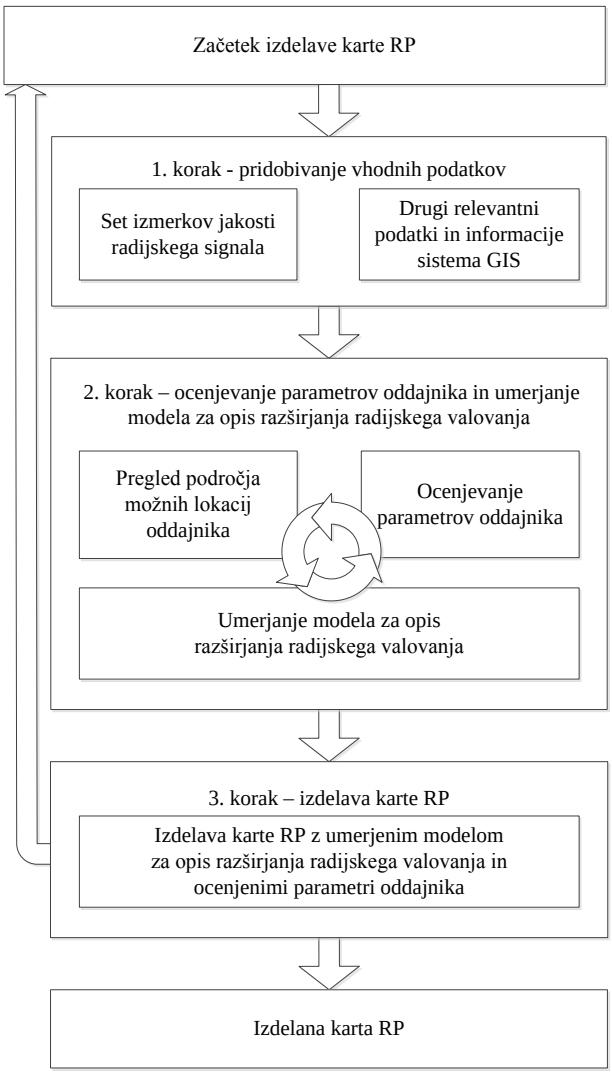
Vse te ugotovitve so nas privedle do razvoja novega posrednega postopka izdelave kart RP, ki vključuje naštete lastnosti in je podrobneje predstavljen v poglavju 4. Poleg tega upošteva še mobilnost oddajnika, karakteristike okolja in deluje z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki, ki jih uporablja za umerjanje izbranega modela razširjanja radijskega valovanja.

4 Samouglaševalna metoda za posredno izdelavo kart RP

Poglavje obravnava nov posredni postopek izdelave kart RP, ki izdela natančnejše karte RP kot obstoječi postopki. Zaradi samodejnega umerjanja izbranega modela za opis razširjanja radijskega valovanja na prostorsko porazdeljene izmerke smo postopek poimenovali samouglaševalna metoda (angl. self-tuning method, STM) za posredno izdelavo kart RP. Splošni koraki metode STM so predstavljeni v poglavju 4.1, konkretni primer izvedbe metode STM pa je predstavljen v poglavju 4.2.

4.1 Zasnova in delovanje metode STM

Slika 13 shematsko prikazuje zasnovo in delovanje metode STM, ki izdela karto RP v treh zaporednih ponavljajočih se korakih [5]. V nadaljevanju sledi splošni opis vsakega izmed njih.



Slika 13: *Koraki metode STM.*

1. Korak
V prvem koraku metoda STM zbere množico izmerkov jakosti radijskega signala in pridobi ustrezne GIS podatke iz REM-SA. Nabor GIS podatkov je odvisen od izbire modela razširjanja radijskega valovanja, uporabljenega v drugem in tretjem koraku metode.

2. Korak
V drugem koraku metoda STM oceni neznane parametre oddajnika in umeri izbran model razširjanja radijskega valovanja na prostorsko porazdeljene izmerke jakosti radijskega signala.

V kolikor lokacija oddajnika ali področje možnih lokacij oddajnika T ni znano, ga oceni z uporabo izbranega lokalizacijskega postopka. Sodobni lokalizacijski postopki določijo področje T, kjer se oddajnik nahaja z neko predpisano verjetnostjo.

Za vsako možno točko v področju T z uporabo ustreznega optimizacijskega postopka metoda nato določi parametre modela razširjanja valovanja ter neznane lastnosti oddajnika tako, da je odstopanje med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi jakosti radijskega signala najmanjše. Izbira optimizacijske metode je odvisna od števila neznanih parametrov in matematičnih povezav med njimi, tj. predvsem od izbranega modela razširjanja radijskega valovanja in parametrov oddajnika.

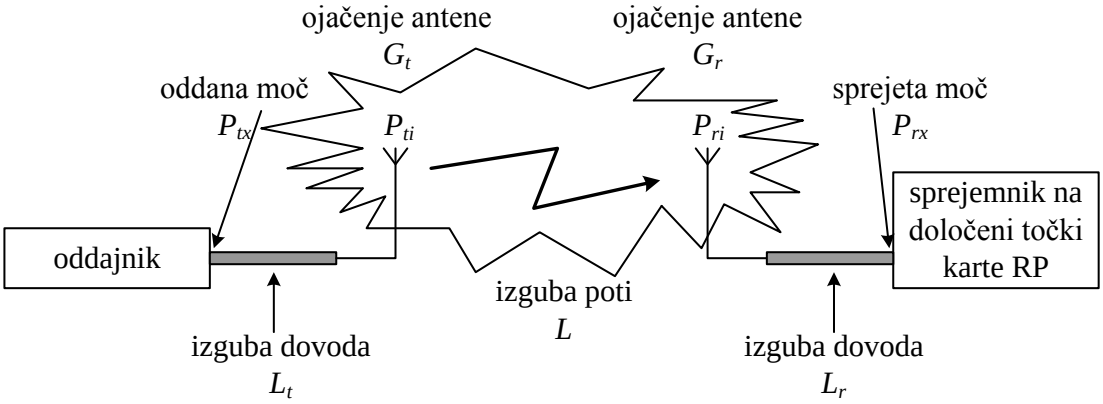
Rezultat drugega koraka metode STM je kombinacija parametrov oddajnika in modela razširjanja radijskega valovanja ter lokacija iz področja možnih lokacij oddajnika T, v kateri je prileganje modela za razširjanje radijskega valovanja na izmerke najboljše.

3. Korak
V zadnjem koraku metode STM se s pomočjo znane ali ocenjene lokacije oddajnika, umerjenim modelom za opis razširjanja radijskega valovanja in ocenjenimi parametri oddajnika izdela karto RP.

4.2 Primer izvedbe metode STM

Zgoraj opisana zasnova metode STM je precej splošna in ponuja vrsto konkretnih izvedb glede na izbiro koordinatnega sistema, modela razširjanja radijskega valovanja, modela antenskega diagrama antene na oddajniku, itd. V tem podpoglavju podajamo eno izmed možnih izvedb, primernih za radijska mobilna celična omrežja. Temu primerno smo izbrali kartezični koordinatni sistem in izvedbo modela razširjanja radijskega valovanja Okumura-Hata, ki upošteva konfiguracijo terena ter model usmerjenih oddajnih anten na bazni postaji.

Za izračun prejete moči signalov radijskih oddajnikov upoštevamo model preproste brezžične povezave, ki ga prikazuje slika 14. Prejeta moč signala se izrazi kot produkt izgube poti L med oddajnikom in sprejemnikom ter oddane moči. Izguba poti je razmerje med oddano in sprejeto močjo radijskega signala. Vključuje vse elemente izgube, ki so posledica vplivov različnih ovir na razširjanje radijskega valovanja na poti med oddajnikom in sprejemnikom. S poznavanjem oddajne moči P_{tx} oddajnika in izgube poti L se prejeta moč $P_{rx_{[W]}}$ izrazi z enačbo (4.1). V enačbi (4.1) G_t in G_r predstavljata dobitka oddajne in sprejemne antene, izražena glede na izotropno anteno, L_t in L_r pa izgube dovoda oddajnika in sprejemnika [37].



Slika 14: *Elementi preproste brezžične povezave* [37].

$$P_{rx_{[W]}} = \frac{P_{tx} G_t G_r}{L_t L L_r} \tag{4.1}$$

V kolikor predpostavimo kartezični koordinatni sistem, v katerem imamo na voljo digitalni model terena in digitalni model rabe tal, lahko označimo geografske koordinate lokacij z (x, y). Karto RP predstavimo z M točkami, kjer je treba oceniti jakost radijskega signala, ki jih označimo z $R = \{R_i = (x_i, y_i,), i\}$, pri čemer je $i = 1, \ldots, M$. Podobno s $T = \{T_j = (x_j, y_j), j\}$ označimo področje možnih lokacij, kjer se lahko nahaja oddajnik. Področje T je znano vnaprej ali izračunano z uporabo ustreznih postopkov za lokalizacijo oddajnikov. Izhod lokalizacijskih postopkov je namreč ocenjena lokacija oddajnika ali skupek lokacij, kjer se oddajnik nahaja z določeno verjetnostjo. Prejeto moč P_{rx_i} radijskega signala v i-ti točki karte RP ocenimo s pomočjo enačbe (4.2), kjer je P_{tx} oddajna moč oddajnika in L_{rx_i} izguba poti v izbranem frekvenčnem pasu.

$$P_{rx_i} = P_{tx} - L_{rx_i} = P_{tx} - (L_i + L_{NLOS_i} + L_{clut_i} - G_{ant_i}) \tag{4.2}$$

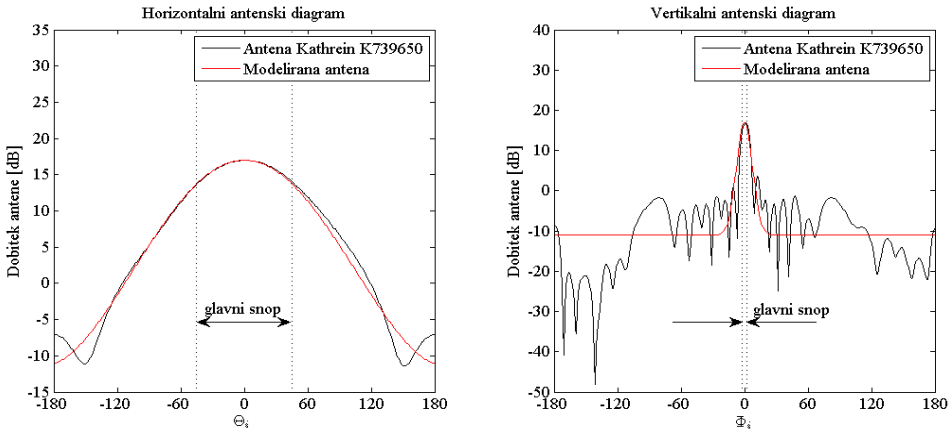
Za modeliranje izgube poti L_{rx_i} smo izbrali semiempirični spremenjeni model Okumura-Hata, ki je opisan v prilogi A, ga nekoliko poenostavili in dodelali. L_{rx_i} izračunamo kot vsoto prispevkov empiričnega modela kanala L_i, izgube L_{NLOS_i} zaradi senčenja radijskega signala na ovirah, izgube L_{clutt_i} zaradi rabe tal in izgube G_{ant_i} zaradi usmerjenosti antene oddajnika.

L_i zapišemo z enačbo (A.8). Če predvidimo izdelavo kart RP manjših geografskih področij, lahko zanemarimo vpliv ukrivljenosti zemlje. Tako L_{NLOS_i} namesto po enačbi (A.9) izračunamo z modelom za izračun uklona na maksimalni oviri, opisanem v prilogi B. Pri velikih razdaljah (večjih od nekaj 10 km) bi bilo za večjo natančnost treba upoštevati originalno enačbo. Izgube poti L_{clutt_i} zaradi rabe tal se pridobijo iz digitalnega model rabe tal, ki smo ga vključili v testno okolje in opisali v poglavju 5.1. G_{ant_i} se lahko modelira s splošnim modelom za izdelavo enostavnih antenskih diagramov, ki ga prikazuje enačba (4.3).

$$\begin{aligned} G_{ant_i} &= G_{max} - FBR_\Theta + FBR_\Theta \left| \cos^m \left(\frac{\Theta_0 - \Theta_i}{2} \right) \right| \\ &- FBR_\phi + FBR_\phi \left| \cos^n \left(\frac{\phi_0 - \phi_i}{2} \right) \right| \end{aligned} \tag{4.3}$$

Parametri modela v enačbi (4.3) so:

- G_{max} [dB] maksimalni dobitek antene,
- FBR_{Θ} [dB] razmerje naprej-nazaj (angl. front-to-back ratio) v horizontalni smeri,
- Θ_0 [°] azimut antene, tj. horizontalni kot glavnega snopa antene glede na geografski sever,
- Θ_i [°] horizontalni kot med azimutom antene in določeno geografsko lokacijo v prostoru,
- m koeficient, ki določa širino glavnega snopa antene v horizontalni smeri,
- FBR_{ϕ} [dB] razmerje naprej-nazaj v vertikalni smeri,
- ϕ_0 [°] nagib antene, tj. vertikalni kot glavnega snopa antene glede na horizont,
- ϕ_i [°] kot med nagibom antene in določeno geografsko lokacijo v prostoru,
- n koeficient, ki določa širino glavnega snopa antene v vertikalni smeri.



Slika 15: *Horizontalni in vertikalni diagram običajne antene mobilnega omrežja Kathrein K739650* [69] *in diagram modelirane antene.*

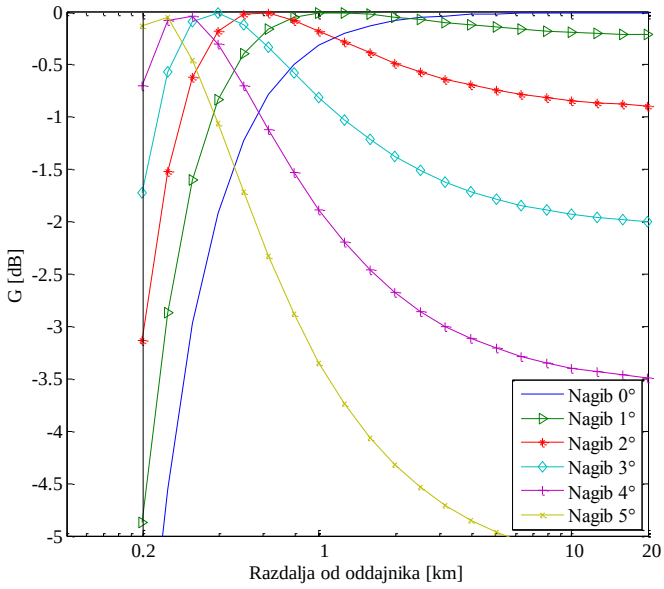
Modelirani antenski diagrami s pravilno izbranimi parametri v enačbi (4.3) se v glavnem snopu zelo dobro prilegajo vsesmernim ali usmerjenim realnim antenskim diagramom. Primer takšnega prileganja prikazuje slika 15, za usmerjeno anteno mobilnega omrežja Kathrein K739650. V enačbi (4.4) določimo vektor $\vec{\beta}$, ki ga sestavljajo parametri zgoraj prikazanega modela za opis razširjanja radijskega valovanja.

$$\vec{\beta} = \left[A_0, A_1, A_2, A_3, G_{max}, FBR_{\Theta}, \Theta_0, m, FBR_{\phi}, \phi_0, n\right]^T \tag{4.4}$$

V prizemnih mobilnih celičnih komunikacijah se večino mobilnih terminalov nahaja v glavnem snopu vertikalnega antenskega diagrama. Zaradi tega v modelu za izdelavo enostavnih antenskih diagramov (4.3) lahko zanemarimo prispevek vertikalnega dela diagrama in poenostavljen model zapišemo z enačbo (4.5).

$$G_{ant_i} = G_{max} - FBR_{\Theta} + FBR_{\Theta} \left|\cos^{\mathrm{m}}\left(\frac{\Theta_0 - \Theta_i}{2}\right)\right| \tag{4.5}$$

Ob predpostavki, da so izmerki v glavnem snopu vertikalnega antenskega diagrama in v območju veljavnosti modela razširjanja radijskega valovanja, tj. med 200 m do 100 km od oddajnika, takšna poenostavitev zmanjša kompleksnost optimizacijskega problema in izboljša konvergenco optimizacijskega postopka. Vpliv zanemaritve vertikalnega dela antenskega diagrama v enačbi (4.3) je odvisen od višine antene, širine glavnega snopa antene v vertikalni smeri in njenega nagiba. Slika 16 prikazuje dobitek antene v vertikalni



Slika 16: *Dobitek vertikalnega dela antenskega diagram v odvisnosti od razdalje od oddajnika pri različnih nagibih anten.*

smeri v odvisnosti od razdalje od oddajnika, če je na višini 20 m, za običajne nagibe anten v mobilnih omrežjih med 0° in 5°. Izkaže se, da so v praksi najpogostejši nagibi anten oddajnikov mobilnih omrežij do 3°, kjer je vpliv izvedene poenostavitve manjši od ~1,5 dB. To je zanemarljivo v primerjavi s standardno deviacijo napake zelo dobro umerjenih modelov razširjanja radijskega valovanja (tj. približno 8 dB). Zaradi zanemaritve vertikalnega dela antenskega diagrama se tudi vektor $\vec{\beta}$ (4.4) lahko poenostavljeno zapiše v obliki (4.6).

$$\vec{\beta} = [A_0, A_1, A_2, A_3, G_{max}, FBR_\Theta, \Theta_0, m]^T \tag{4.6}$$

Metoda STM poišče tak indeks j (tj. T_j iz področja možnih lokacij oddajnika T) in $\vec{\beta}$, ki minimizirata srednjo kvadratno napako med izmerjenimi in ocenjenimi jakostmi radijskega signala v točkah izmerkov (4.7). V enačbi (4.7) je N število izmerkov, ki so na voljo za izdelavo karte RP. P_i je izmerjena moč radijskega signala, L_{rx_i} pa je izračunana izguba poti v i-ti točki karte RP, ocenjena na podlagi uporabljenega modela za opis razširjanja radijskega valovanja, z oddajnikom na lokaciji T_j in z oddajno močjo P_{tx}. Nelinearni optimizacijski problem lahko rešimo v smislu $(\vec{\beta}^*, j^*) = \min_{\vec{\beta}, j} F(\vec{\beta}, j)$ s postopkom, ki temelji na Trust Region Reflective algoritmu.

$$F(\vec{\beta}, j) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - (P_{tx} - L_{rx_i}(\vec{\beta}(T_j)))\right)^2 \tag{4.7}$$

V kolikor pa je na oddajniku Tx vsesmerna oddajna antena, se $\vec{\beta}$ lahko še dodatno poenostavi in zapiše v obliki (4.8). Optimizacijski problem v enačbi (4.7) v tem primeru postane linearen in se lahko reši z metodo najmanjših kvadratov.

$$\vec{\beta} = [\, A_0, A_1, A_2, A_3, G_{max}]^T \tag{4.8}$$

Po rešitvi optimizacijskega problema so za izdelavo karte RP na voljo ocenjeni parametri oddajnika in modela za opis razširjanja radijskega valovanja, tj. P_{tx}, T_j^* in $\vec{\beta}^*$. Ti se v enačbi (4.2) uporabijo za izračun jakosti radijskega signala v vseh M točkah karte RP.

5 Testno okolje za izdelavo kart RP

Za razvoj novega postopka izdelave kart RP smo potrebovali primerno testno orodje. Slednje mora podpirati delovanje predstavljenih postopkov za izdelavo kart RP. To vključuje uvoz in tvorjenje različnih vhodnih podatkov, izvajanje različnih interpolacijskih postopkov, ocenjevanje lokacij in parametrov oddajnikov, modeliranje razširjanja radijskega valovanja in njihovo poljubno kombiniranje.

Namenska testna okolja, ki bi omogočala razvoj, preučevanje in razumevanje metod lokalizacije oddajnikov in istočasno modeliranje novih oziroma nadgrajevanje obstoječih modelov razširjanja radijskega valovanja za potrebe dinamične izdelave kart RO, ne obstajajo. Za analizo delovanja obstoječih in za razvoj novega posrednega postopka izdelave kart RP smo zasnovali lastno testno okolje za izdelavo kart RP. Implementirali smo ga v okviru interaktivnega programskega okolja Matlab, ki z vrsto vgrajenih funkcij podpira visokonivojsko in nizkonivojsko programiranje, numerično računanje, optimizacijo in vizualizacijo.

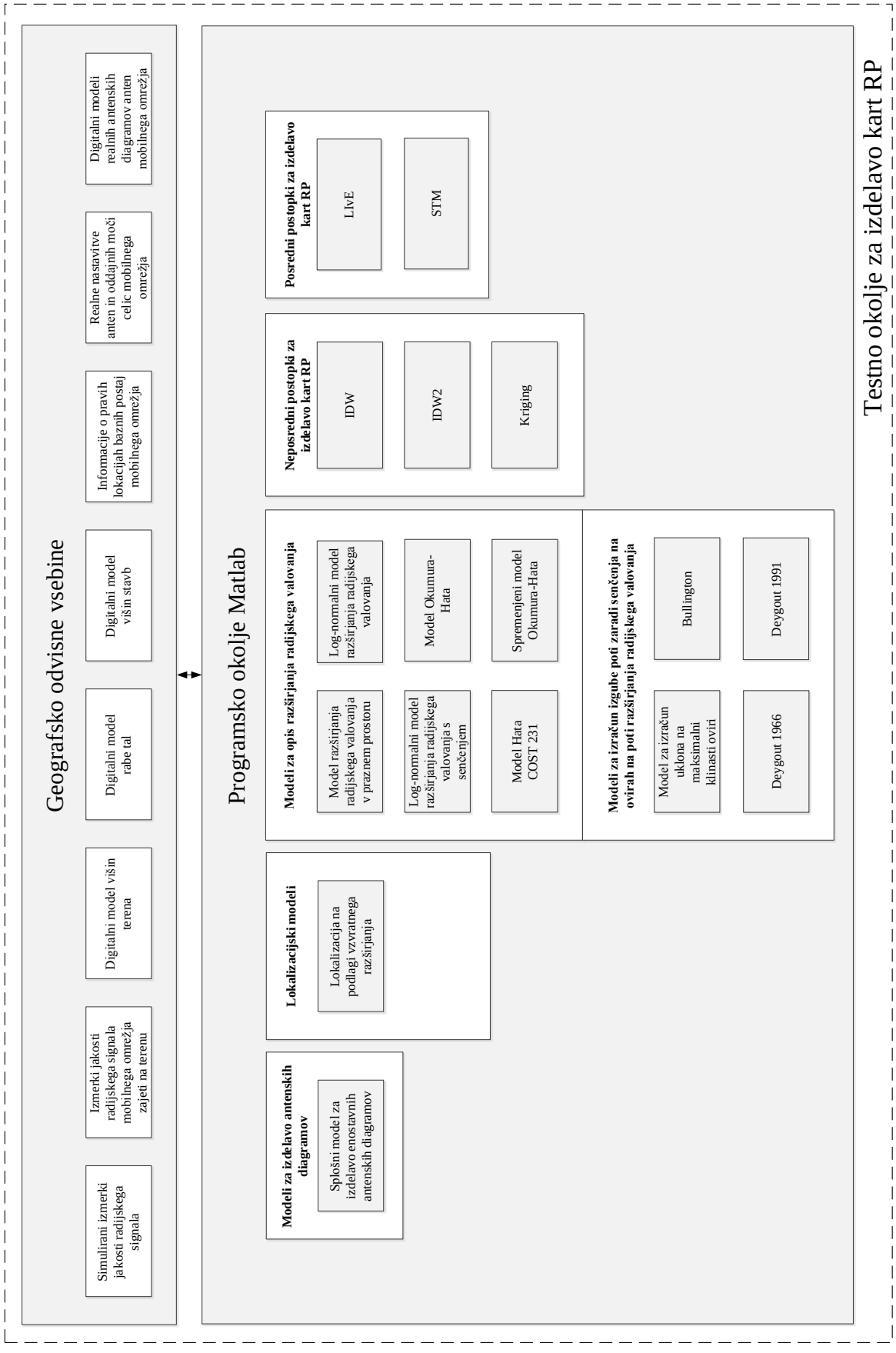
Struktura testnega okolja, vhodni podatki in izvedeni obstoječi postopki izdelave kart RP so predstavljeni v poglavju 5.1. Podprti modeli za opis razširjanja radijskega valovanja so predstavljeni v poglavju 5.2, modele za izračun izgube poti zaradi uklona na klinastih ovirah zajema poglavje 5.3, postopki za lokalizacijo oddajnikov so predstavljeni v poglavju 5.4.

5.1 Struktura testnega okolja

Razvito testno okolje ima strukturo oziroma komponente, ki so prikazane na sliki 17. Podpira uvoz in generiranje različnih vhodnih podatkov za postopke izdelave kart RP, ki so skladno s sliko 5 razdeljeni na izmerke naprav MCD in druge relevantne podatke, ki se dodatno uporabijo za izdelavo kart RP.

V testno okolje se uvozi prave izmerke naprav MCD, simulacijsko generirane izmerke iz drugih virov in različne modele za izračun kart RP v več korakih. Za generiranje izmerkov MCD v okviru testnega okolja se z vgrajenimi modeli lahko vzorči referenčne (ref.) karte RP, ki se jih pridobi iz zunanjih virov, npr. iz načrtovalskega orodja GRASS-RaPlaT [70], ali izdela z uporabo modelov za opis razširjanja radijskega valovanja, predstavljenih v poglavju 5.2. Za generiranje različnih porazdelitev in števila izmerkov naprav MCD smo v testno okolje vgradili modele za:

- vzorčenje v mrežasti porazdelitvi,
- naključno vzorčenje preko celotnega geografskega področja,
- naključno vzorčenje preko celotnega geografskega področja glede na želeno razmerje izmerkov znotraj in zunaj glavnega antenskega snopa oddajnika,
- naključno vzorčenje v želenem kolobarju lokacij glede na razdaljo od oddajnika,
- vzorčenje na istih lokacijah, kjer so na voljo realni izmerki,
- naključno vzorčenje glede na rabo tal geografskega področja in želeno število izmerkov iz lokacij posameznega tipa rabe tal,
- naključno vzorčenje glede na rabo tal geografskega področja in želeno porazdelitev izmerkov po lokacijah posameznega tipa rabe tal, izraženo v odstotkih.



Slika 17: *Struktura testnega okolja za izdelavo kart RP.*

Za izvedbo naključnega vzorčenja referenčnih kart RP glede na rabo tal pripadajočega geografskega področja in želeno porazdelitev izmerkov po lokacijah posameznega tipa rabe tal, izraženo v odstotkih, smo vgradili algoritem 1. Ta predstavlja posplošitev algoritma ruletne proporcionalne selekcije [71] za delovanje v dvodimenzionalnem prostoru. Pred njegovo uporabo je treba generirati dvodimenzionalno porazdelitveno funkcijo slučajne spremenljivke (angl. cumulative distribution function, CDF). Ta odraža verjetnosti, da se naprave MCD ob vzorčenju radijskega signala nahajajo na lokacijah določenega tipa rabe tal. Za vzorčenje referenčne karte RP, tj. pridobitev vrednosti jakosti radijskega signala iz naključnega polja v matriki, ki hrani referenčne vrednosti jakosti radijskih signalov, se najprej uporabi Matlabov generator naključnih števil z enakomerno porazdelitvijo. Na podlagi naključnega števila z intervala $(0,1)$ in CDF se pridobi naključno polje matrike (ii, jj), iz katerega se zajame vrednost, ki predstavlja izmerek MCD.

Algoritem 1: *Algoritem za naključno vzorčenje referenčnih kart RP, glede na rabo tal geografskega področja in želeno relativno porazdelitev izmerkov po lokacijah posameznih tipov rabe tal.*

```
unR = rand();                          % pridobi se naključno število
ii = 1;                                % začetni stolpec iskanja polja v matriki ref. karte RP
jj = 1;                                % začetna vrstica iskanja polja v matriki ref. karte RP
while(ii<xN)                           % xN je št. stolpcev in yN št. vrstic matrike ref. karte RP
 while(jj<yN && cdf(ii,jj) < unR)      % cdf(ii, jj) je vrednost matrike CDF v polju (ii, jj)
    jj = jj + 1;                       % določanje vrstice polja vzorčenja matrike ref. karte RP
 end
 if (cdf(ii,jj) < unR)
  ii = ii + 1;                         % določanje stolpca polja vzorčenja matrike ref. karte RP
  jj = 1;                              % določanje vrstice polja vzorčenja matrike ref. karte RP
 else
  break;                               % prekinitev ob določitvi polja vzorčenja matrike ref. karte RP
 end
end
```

Preko slovenskega nacionalnega telekomunikacijskega operaterja smo pridobili tudi druge podatke, ki se uporabljajo za izdelavo kart RP. V testno okolje smo vključili podatke GIS, ki zajemajo rastrski digitalni model višin terena Slovenije v ločljivosti 25 m in 5 m, digitalni model višin stavb nad terenom in digitalni model rabe tal. Digitalni model rabe tal je predstavljen s kategorijami:

- urbano področje brez pozidave,
- predmestje,
- urbano področje,
- gosto urbano področje,
- kmetijska površina,
- gozd,
- močvirje,
- suha odprta zemljišča s posebnim rastlinskim pokrovom,
- odprta zemljišča brez ali z nepomembnim rastlinskim pokrovom,
- voda,
- industrijsko območje,
- park.

Posamezna kategorija rabe tal odraža pripadajočo izgubo poti radijskega valovanja, ki

se pridobi iz priložene šifrirne tabele. Dodali smo informacije o realnih nastavitvah oddajnikov operaterjevega mobilnega omrežja, tj. realne nastavitve azimutov in elevacij oddajnih anten celic, pripadajoče digitalne modele antenskih diagramov in dejansko nastavljene oddajne moči.

Za izdelavo kart RP usmerjenih oddajnikov smo v testno okolje vgradili poenostavljen splošni model za izdelavo enostavnih antenskih diagramov, ki ga predstavlja enačba (4.5).

V testno okolje smo vgradili tudi v literaturi najpogosteje uporabljene obstoječe postopke izdelave kart RP, in sicer metode IDW, IDW2, Krigingovo metodo in posredno metodo LIvE. Omenjene postopke smo podrobneje predstavili v poglavjih 3.2 in 3.3.

5.2 Modeli za opis razširjanja radijskega valovanja

Za opis razširjanja radijskega valovanja se uporabljajo različni modeli radijskih kanalov, s katerimi je mogoče razmeroma dobro napovedati jakost signala na izbrani lokaciji oziroma izbranem področju. To so zbirke matematičnih izrazov in algoritmov, ki se delijo na izkustvene modele, deterministične modele in semiempirične modele, ki so kombinacija prvih dveh tipov modelov [37,68]. Za razvoj izvirnega posrednega postopka izdelave kart RP smo v testno okolje vgradili različno kompleksne modele za opis razširjanja radijskega valovanja, in sicer:

- model razširjanja radijskega valovanja v praznem prostoru,
- log-normalni model razširjanja radijskega valovanja,
- log-normalni model razširjanja radijskega valovanja s senčenjem,
- model Okumura-Hata,
- model Hata COST 231,
- spremenjeni model Okumura-Hata.

Njihovi podrobnejši opisi so v prilogi A.

5.3 Modeli za izračun izgube poti zaradi senčenja na ovirah na poti razširjanja radijskega valovanja

Razširjanje radijskega valovanja med točkama oddaje in sprejema je zaradi ovir velikokrat moteno oziroma senčeno. To se zgodi, ko teren zastira več kot 60 % prve Fresnelove cone [72]. Izguba poti L_{KE} zaradi senčenja na klinastih ovirah, npr. prispevek $L_{NLOS}\left(d_{(x,y)}\right)$ v enačbi (A.10), se določi z različnimi modeli za izračun uklona na eni ali več klinastih ovirah. Za izračun uklona na eni klinasti oviri se običajno uporabi oviro oziroma del terena, ki maksimalno zastira prvo Fresnelovo cono. Najbolj znani enostavni modeli za izračun uklona na več klinastih ovirah so: Bullington, Epstein-Peterson, Deygout (1966), Deygout (1991), Causerbrook, Edwards-Durkin, Giovanelli, Millington, ITU-R P.526 in Vogler [73,74]. Podrobnejši pregled modelov za izračun uklonov na več klinastih ovirah je na voljo v [75].

V testno okolje smo vgradili model za izračun uklona na maksimalni klinasti oviri ter modele za izračun uklonov na več klinastih ovirah Bullington, Deygout (1966) in Deygout (1991). Model za izračun uklona na maksimalni klinasti oviri predstavlja osnovo vsem drugim modelom. Model Bullington je bil izbran, ker je najenostavnejši izmed modelov za izračun uklonov na več klinastih ovirah, model Deygout pa daje dobre rezultate v primerjavi z izmerki [76]. Podrobnejši opis vgrajenih modelov je v prilogi B.

5.4 Lokalizacijski postopki

Za karte RO in izdelavo kart RP je pomembno, da so postopki lokalizacije oddajnikov oziroma postopki pridobivanja njihove znane lokacije prilagojeni scenariju uporabe, posrednim postopkom izdelave kart RP, radijskim tehnologijam, strojni opremi in programski opremi naprav MCD. Lokalizacijski postopki se delijo na tiste, ki temeljijo na radiofrekvenčnih odtisih, in tiste, ki temeljijo na geometrijskem pristopu [77,78].

Pri uporabi radiofrekvenčnih odtisov gre v osnovi za uporabo različnih podatkovnih baz, med katere sodijo tudi karte RO. V njih so zbrani podatki o tem, na katerih lokacijah se nahajajo oddajniki z določenimi radiofrekvenčnimi odtisi. V kolikor naprave MCD iz prejetih radijskih signalov izluščijo odtis pripadajočega radijskega oddajnika, lahko na podlagi slednjega preko primerne podatkovne baze pridobijo tudi njegovo lokacijo.

Geometrijski postopki ocenijo lokacijo določenega oddajnika na podlagi izmerkov prejetih moči radijskih signalov na različnih lokacijah naprav MCD. Najbolj poznani geometrijski lokalizacijski postopki temeljijo na prejeti moči radijskega signala, metriki RSSI, tehniki lociranja na osnovi kota prejetja radijskega signala (angl. angle of arrival, AOA), času prihoda signala (angl. time of arrival, TOA) in časovni razliki prihodov signala (angl. time difference of arrival, TDOA). V primeru naprav MCD v mobilnih omrežjih in brezžičnih senzorskih omrežjih se za lokalizacijo oddajnikov uporabljajo še druge metrike oziroma postopki.

Za osnovni prikaz posredne izdelave kart RP smo v testno okolje vgradili postopek lokalizacije, ki temelji na vzvratnem razširjanju (angl. backpropagation) [77]. Ta algoritem je bil razvit z namenom reševanja problematike skritih vozlišč v kognitivnih omrežjih, zaradi česar se ga lahko neposredno uporabi za posredno izdelavo kart RP. Ker smo se pri razvoju novega postopka izdelave kart RP nadalje omejili na scenarij pridobivanja izmerkov naprav MCD v mobilnem omrežju, smo v testno okolje vgradili še lokalizacijski postopek, ki temelji na predučasenju (angl. timing advance, TA). Sodobni pametni telefoni v vlogi naprav MCD poleg merjenja moči oddajnikov namreč podpirajo tudi dostop do metrik, kot je parameter predučasenja [79]. Podrobnejša opisa obeh vgrajenih lokalizacijskih postopkov sta v prilogi C.

6 Preizkus in ovrednotenje metode STM

V tem poglavju metodo STM preizkusimo in ovrednotimo na podlagi različnih testnih scenarijev ter jo primerjamo z najpogosteje uporabljenimi obstoječimi postopki izdelave kart RP, ki so vgrajeni v testno okolje. Vsem testnim scenarijem je skupna metrika za oceno natančnosti izdelanih kart RP, katere izbira je predstavljena v poglavju 6.1. Preizkus in ovrednotenje metode STM s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki, ki bi bili v realnem primeru pridobljeni po načinu soudeležbe, sta predstavljena v poglavju 6.2, preizkus in ovrednotenje z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki pa v poglavju 6.3. Natančnost metod v primeru izdelave časovno spremenljivih kart RP z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki obravnava poglavje 6.4.

6.1 Metrike za oceno natančnosti kart RP in postopkov njihove izdelave

Natančnost izdelane karte RP neposredno odraža kvaliteto uporabljenega postopka izdelave in uporabljenih vhodnih podatkov. Ob predpostavki, da imajo različni postopki izdelave kart RP za izdelavo na voljo iste izmerke jakosti radijskega signala, se jih lahko medsebojno primerja na podlagi metrik za oceno natančnosti izdelanih kart RP. V literaturi največkrat uporabljene metrike za oceno natančnosti kart RP so:

- srednja kvadratna napaka (angl. mean square error, MSE) [14],
- srednja absolutna napaka (angl. mean absolute error, MAE) [45],
- relativna srednja absolutna napaka (angl. relative mean absolute error, RMAE) [51],
- koren srednje kvadratne napake (angl. root mean square error, $RMSE$) [53,63,64],
- krivulja karakteristike delovanja sprejemnika (angl. receiver operating characteristics, ROC) izračunana na podlagi deleža detekcije področja z lažnim alarmom (angl. false alarm zone ratio, $FAZR$) in deleža pravilne detekcije področja (angl. correct detection zone ratio, $CDZR_1$) [53,63,64].

Prikazane metrike se izračuna tako, da se ocenjene jakosti radijskega signala [dBm] na vseh točkah kart RP primerja z vrednostmi jakosti radijskega signala [dBm] na istoležnih točkah referenčne karte RP. Natančnost postopkov izdelave kart RP je odvisna od števila izmerkov in njihove prostorske porazdelitve. Pogosto nastane situacija, da je glede na izbrano metriko in želeno število radijskih izmerkov določen postopek izdelave kart RP natančnejši od drugega postopka, medtem ko je zgolj pri drugačni prostorski porazdelitvi istega števila izmerkov lahko tudi obratno. Za prikaz takšnih situacij je smiselno karte RP izdelati z različnimi seti prostorsko porazdeljenih izmerkov in dodatno izračunati še srednjo vrednost in interval zaupanja izbrane metrike. Za preizkus, ovrednotenje in primerjavo natančnosti postopkov izdelave kart RP v vseh testnih scenarijih smo izbrali metriko srednje vrednosti korena srednje kvadratne napake $\overline{RMSE}$ in pripadajoč 95-odstotni interval zaupanja. V primeru scenarija s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki smo poleg izbrane metrike izračunali še $CDZR_1$ in $FAZR$, za vizualno primerjavo natančnosti izdelanih kart RP v drugem in tretjem scenariju pa smo

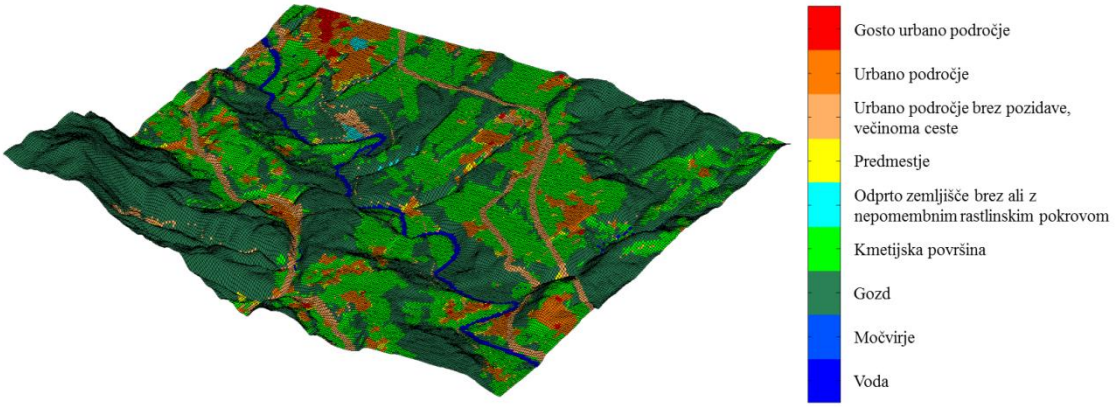
dodatno izračunali absolutne napake med izdelanimi kartami RP in referenčno karto RP.

6.2 Preizkus in ovrednotenje metode STM s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki

Metodo STM smo najprej preizkusili, ovrednotili ter primerjali z najpogosteje uporabljenimi obstoječimi postopki za izdelavo kart RP na simulacijsko generiranih prostorsko porazdeljenih izmerkih.

6.2.1 Simulacijski scenarij in referenčna karta RP

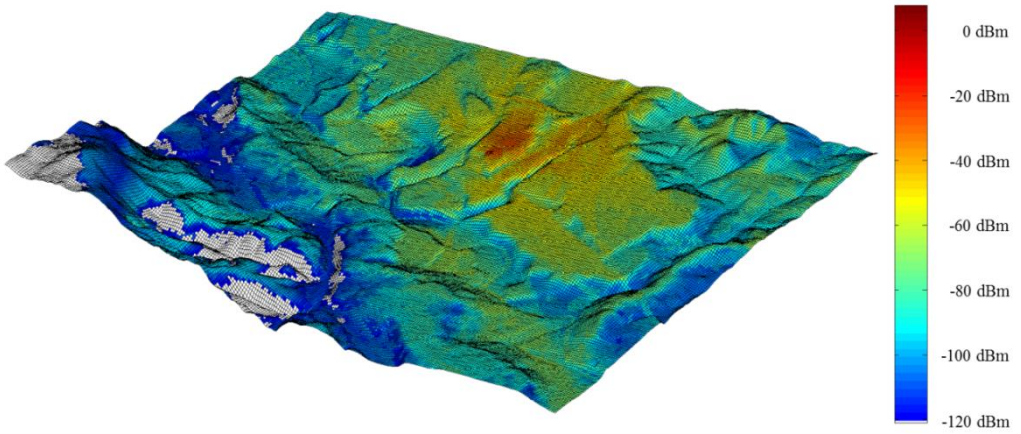
Predpostavili smo scenarij z različnimi prostorskimi porazdelitvami izmerkov naprav MCD glede na lokacijo usmerjenega oddajnika. Pri tem smo se osredotočili na del geografskega področja Slovenije v velikosti 5,16 x 6,75 km z ločljivostjo 25 m in z devetimi različnimi tipi rabe tal, kot prikazuje slika 18. Podobno kot v [63] smo predvideli oddajnik, ki oddaja na eni nosilni frekvenci. Za razliko od teoretičnega vsesmernega scenarija iz [63] smo uporabili usmerjen oddajnik na lokaciji bazne postaje obstoječega mobilnega omrežja, ki deluje v 900 MHz frekvenčnem pasu. Izbrana celica bazne postaje oddaja z močjo 39 dBm in uporablja anteno Kathrein K739650 [69], ki je v smeri azimuta 35° z mehanskim nagibom usmerjena 2° navzdol.



Slika 18: *Referenčno geografsko področje z devetimi tipi rabe tal za preizkus in ovrednotenje metode STM s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki.*

Za izračun jakosti radijskega signala v vseh točkah referenčne karte RP smo uporabili okolje GRASS-RaPlaT [70], ki se uporablja za načrtovanje mobilnih omrežij. Da bi se pri izdelavi referenčne karte RP čim bolj približali realnemu stanju, smo v načrtovalskem okolju GRASS-RaPlaT za opis razširjanja radijskega valovanja izbrali spremenjeni model Okumura-Hata. Z uporabo metahevrističnega optimizacijskega postopka smo ga po posameznih celicah mobilnega omrežja umerili na terenske izmerke mobilnega operaterja [7]. Z dodatno optimizacijo kodne tabele, ki posamezen tip rabe tal v digitalnem modelu rabe tal preslika v pripadajočo vrednost izgube poti, je mogoče popolnoma izničiti napako srednje vrednosti modela za opis razširjanja radijskega valovanja in še dodatno zmanjšati njegovo standardno deviacijo.

Za izbrano celico smo dosegli prileganje spremenjenega modela Okumura-Hata na terenske izmerke s srednjo vrednostjo 0 in standardno deviacijo ~8 dB. Referenčno karto RP, ki smo jo uporabili za preizkus postopkov izdelave kart RP smo izračunali do meje −120 dBm. Na podlagi digitalnega modela višin terena jo prikazuje slika 19.



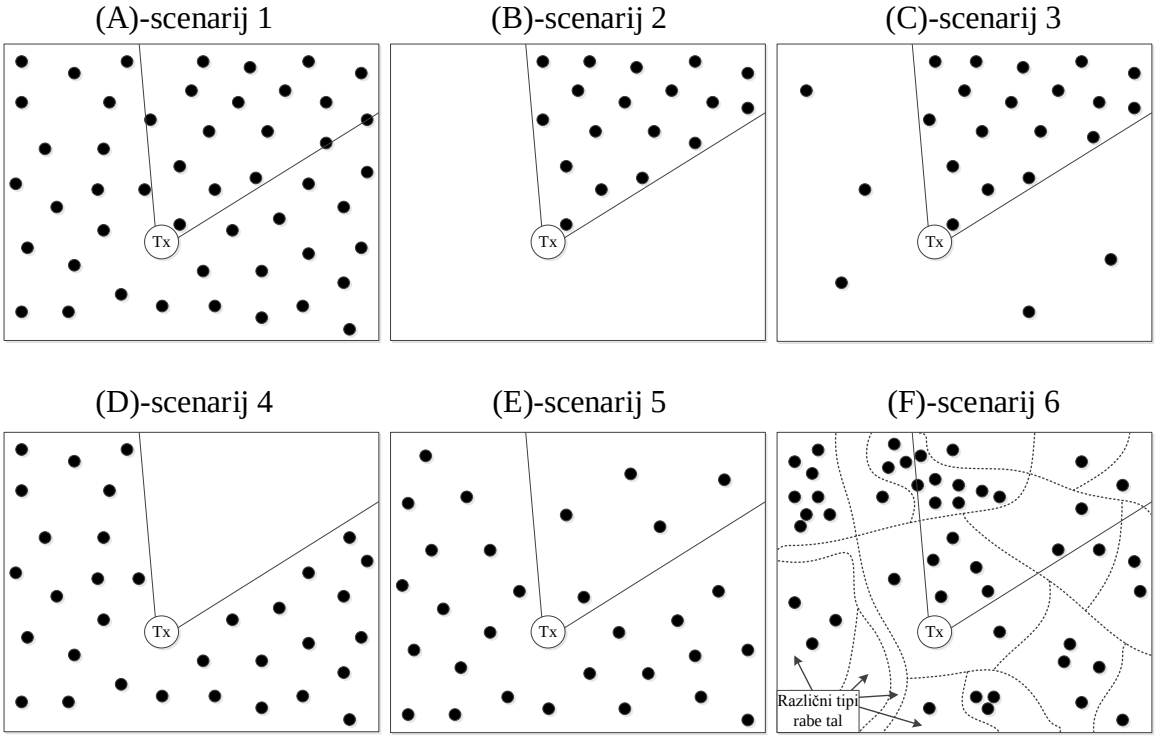
Slika 19: *Referenčna karta RP, izdelana za namen preizkusa in ovrednotenja metode STM s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki.*

6.2.2 Vhodni podatki

Referenčno karto RP smo v naslednjem koraku uvozili v testno okolje za izdelavo kart RP. Referenčna karta RP hrani modelirane srednje vrednosti prejetih moči radijskega signala oddajnika, zato smo pred vzorčenjem prostorsko porazdeljenih izmerkov vsem točkam referenčne karte RP prišteli slučajne vrednosti glede na normalno porazdelitev s srednjo vrednostjo 0 in standardno deviacijo 8 dB.

Za izdelavo kart RP iz izmerkov, pridobljenih po načinu soudeležbe, so v različnih časovnih trenutkih na voljo različno veliki seti izmerkov jakosti radijskega signala, ki imajo različne prostorske porazdelitve. Za nepristranski preizkus in ovrednotenje metod za izdelavo kart RP je zato treba upoštevati različne porazdelitve izmerkov. Izmerki so lahko naključno porazdeljeni po celotnem področju ali zgolj po njegovih podpodročjih. Iz tega razloga smo za preučevanje različnega števila in prostorskih porazdelitev izmerkov predvideli 6 scenarijev. Za njihovo pripravo smo po dodajanju slučajnih vrednosti na različne načine naključno vzorčili referenčno karto RP. Za vsako prostorsko porazdelitev izmerkov in vsako velikost seta izmerkov smo pripravili 100 različnih setov. Najmanjše število izmerkov v setu je bilo 10 in največje 1000.

V prvem oziroma referenčnem scenariju smo izmerke naključno razporedili preko celotnega področja, kot prikazuje slika 20(A). Izmerki v drugem scenariju so naključno porazdeljeni zgolj po lokacijah, ki padejo v področje glavnega snopa antene, kar je razvidno iz slike 20(B). V tretjem scenariju smo predvideli večino (90 %) izmerkov znotraj glavnega snopa oddajne antene, kot prikazuje slika 20(C). Namen teh scenarijev je preveriti hipotezo, ali je pri izdelavi kart RP usmerjenih oddajnikov treba določiti pozicijo referenčnih oziroma sidrnih izmerkov. Četrti in peti scenarij na slikah 20(D) in 20(E) sta ravno obratna, a najmanj verjetna. Predvidevata vse oziroma večino izmerkov razporejenih izven glavnega snopa antene usmerjenega oddajnika. Kljub temu, da so porazdelitve izmerkov od prvega do petega scenarija mogoče, v primeru pridobivanja izmerkov po načinu soudeležbe niso pričakovane. Na porazdelitev izmerkov naprav MCD v veliki meri vplivajo omejitve okolja. Posledično je verjetneje, da se več izmerkov nahaja na lokacijah enega tipa rabe tal kot na področju lokacij drugega tipa rabe tal. Iz tega razloga smo v šestem scenariju, prikazanem na sliki 20(F), izmerke naključno porazdelili glede na različne tipe rabe tal geografskega področja. Namen tega scenarija ni simulirati realno porazdelitev izmerkov preko različnih tipov rabe tal, temveč preučiti vpliv njihovega gručenja na izdelavo kart RP. Za vzorčenje referenčne karte RP v šestem scenariju smo uporabili algoritem 1 za naključno vzorčenje referenčnih kart RP glede na



Slika 20: *Shematski prikaz šestih scenarijev porazdelitev izmerkov jakosti radijskega signala glede na lokacijo in usmeritev glavnega snopa antene usmerjenega oddajnika (Tx).*

rabo tal geografskega področja in želeno porazdelitev izmerkov po lokacijah posameznega tipa rabe tal, izraženo v odstotkih. Predvideli smo, da je izmerkov:

- 30 % iz gostih urbanih področij,
- 25 % iz urbanih področij,
- 20 % iz urbanih področij brez pozidave (tj. večinoma cest),
- 10 % iz predmestij,
- 7 % iz odprtih zemljišč brez ali z nepomembnim rastlinskim pokrovom,
- 5 % iz kmetijskih površin,
- 3 % iz gozdov,
- 0 % iz področij voda, jezer in močvirij.

6.2.3 Izvedba postopkov izdelave kart RP

Metode IDW in IDW2, Krigingovo metodo in metodo LIvE smo izvedli, kot so opisane v poglavju 3. Metodo STM smo izvedli v dveh različicah. V prvi izvedbi metode STM (STM-vsesmerno, oziroma STM-v) smo predvideli uporabo vsesmerne oddajne antene, saj smo se želeli približati simulacijskemu scenariju metode LIvE [63]. Splošni nelinearni optimizacijski problem iz enačbe (4.7) smo poenostavili v linearnega in ga rešili z metodo najmanjših kvadratov z uporabo Matlabove vgrajene funkcije *mldivide()*. V drugi izvedbi metode STM (STM-usmerjeno oziroma STM-u) smo predvideli uporabo usmerjene antene in reševali nelinearni optimizacijski problem. Za to smo uporabili Matlabovo vgrajeno funkcijo *lsqnonlin()* in neenake zgornje in spodnje optimizacijske meje parametrov, prikazane v tabeli 2.

Parametre funkcije *lsqnonlin()* smo nastavili za uporabo Trust-Region-Reflective algoritma, ki deluje z neenakimi zgornjimi in spodnjimi optimizacijskimi pogoji. Ta algoritem smo izbrali, saj z njegovo uporabo narava ciljne funkcije (angl. objective function), tj. vsota uteženih členov logaritmiranih izrazov, omogoča učinkovito iskanje

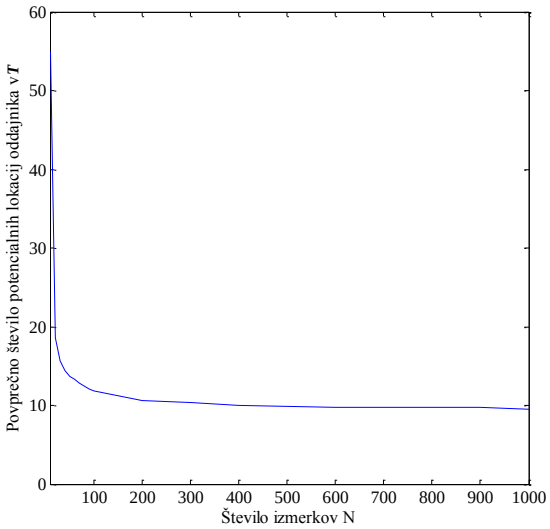
Tabela 2: *Spodnje in zgornje meje za reševanje optimizacijskega problema metode STM.*

	A_0	A_1	A_2	A_3	G_{max} [dBi]	FBR_Θ [dB]	Θ_0 [°]	m
Spodnja meja	20	40	-20	-10	2,15	0	0	0
Zgornja meja	80	50	0	0	24,4	77,58	360	100

optimuma. Predhodno smo poznali tudi dobre začetne približke in zgornje ter spodnje pogoje optimizacijskega problema. Poleg tega se je izkazalo, da uporaba Trust-Region-Reflective algoritma v primeru nelinearnega optimizacijskega problema metode STM v sprejemljivem času pripelje do stabilnih rezultatov.

Spodnje in zgornje meje nelinearnega optimizacijskega problema metode STM smo pridobili iz [80]. Meje Θ_0 zajemajo vse mogoče usmeritve modelirane antene po azimutu, medtem ko smo meje G_{max}, FBR_Θ in m pridobili s pregledom vseh modelov realnih antenskih diagramov mobilnega operaterja. Določili smo jih tako, da model antene, določen z enačbo (4.5), dobro modelira večino običajnih horizontalnih diagramov anten obstoječega mobilnega omrežja, ki so približno simetrični na os glavnega snopa antene. Začetne optimizacijske približke funkcije *lsqnonlin()* smo nastavili skladno z običajnimi vrednostmi, uporabljenimi za planiranje mobilnega omrežja.

Izgube poti L_{clut_i} zaradi različne rabe tal smo pridobili na podlagi uporabe digitalnega modela rabe tal. Izgube poti L_{NLOS_i} zaradi senčenja na ovirah na poti razširjanja radijskega valovanja smo izračunali z modelom za izračun uklona na maksimalni klinasti oviri, opisanim v prilogi B. Višino oddajnika smo nastavili na povprečno višino baznih postaj mobilnega omrežja, tj. 20 m, višino virtualnih sprejemnikov pa na 1,5 m nad terenom. Metoda STM deluje na podlagi poznavanja ožjega področja lokacij T, kjer se potencialno nahaja oddajnik. Za določitev T se lahko uporabi različne lokalizacijske algoritme. Ker smo se pri izbiri scenarija omejili na lokalizacijo oddajnika mobilnega



Slika 21: *Povprečno število možnih lokacij oddajnika v T glede na število izmerkov, uporabljenih za lokalizacijo na podlagi parametra TA s korakom 553,5 m in karto RP v ločljivosti 25 m.*

omrežja, smo uporabili lokalizacijski postopek na podlagi parametra TA s korakom 553,5 m. Kot prikazuje slika 21 mora pri ločljivosti karte RP 25 m metoda STM v primeru lokalizacije oddajnika na podlagi več kot 10 naključno porazdeljenih naprav MCD oziroma njihovih izmerkov v T povprečno pregledati manj kot 20 možnih lokacij.

6.2.4 Analiza rezultatov in diskusija

V poglavju 6.2.2 smo generirali 100 različnih prostorskih porazdelitev izmerkov za vse sete v velikostih od 10 do 1000 izmerkov. V naslednjem koraku smo iste sete izmerkov uporabili kot vhodne podatke za postopke izdelave kart RP in izdelali karte RP. Na podlagi njihove primerjave z referenčno karto RP smo izračunali pripadajoče vrednosti $RMSE$. Na koncu smo za set določenega števila izmerkov na podlagi 100 $RMSE$ vrednosti izračunali še $\overline{RMSE}$ in 95-odstotni interval zaupanja. Izračunali smo tudi $CDZR_1$ in $FAZR$ za reprezentativni set $N = 200$ izmerkov.

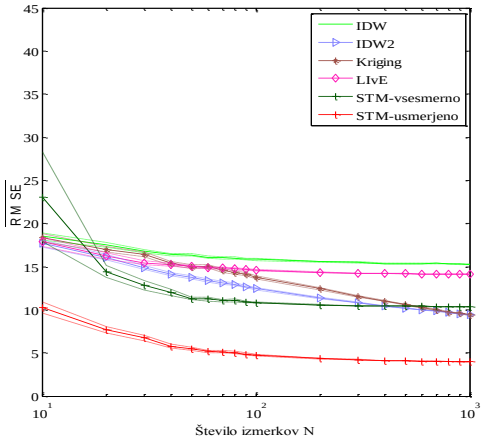
Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP so zbrani na sliki 22 in sliki 23. Rezultati scenarija 1, kjer so vsi izmerki naprav MCD naključno porazdeljeni preko celotnega področja, so prikazani na sliki 22(A) in sliki 23(A). Izkaže se, da sta glede na $\overline{RMSE}$ in 95-odstotni interval zaupanja metodi IDW in LIvE podobno uspešni, medtem ko je metoda IDW2 boljša od obeh. Do 1000 izmerkov podobne rezultate dosega Krigingova metoda. Metoda STM-v je boljša od naštetih metod do približno 400 izmerkov. Ko je na voljo več izmerkov, pa postaneta boljši Krigingova metoda in metoda IDW2. Metoda STM-u je bistveno natančnejša od vseh ostalih metod ne glede na število predvidenih izmerkov.

Posredni postopki izdelave kart RP, ki ne upoštevajo usmerjenosti oddajnika, tj. STM-v in metoda LIvE, imajo bodisi opazno širok interval zaupanja ali se zgolj počasi izboljšujejo z večanjem števila izmerkov. Podoben pojav je opaziti pri neposrednih postopkih, ki v fizikalnem smislu ne morejo natančno modelirati padanja moči radijskega signala z razdaljo, tj. pri metodi IDW. Nasprotno metoda STM-u, Krigingova metoda in metoda IDW2 kažejo nenehno izboljševanje natančnosti z večanjem števila izmerkov. Podobno je razvidno iz rezultatov krivulj ROC na sliki 23(A). V kolikor postopke izdelave kart RP primerjamo pri vrednosti $CDZR_1 = 0{,}9$ [63], tj. ko pravilno identificirajo 90 % področja kart RP, ki niso bele lise, je metoda STM-u zopet najboljša. Doseže najnižjo vrednost $FAZR = 0{,}0047$. Med vsemi točkami, ki so bele lise, jih 0,47 % opredeli, kot da niso bele lise. Višje vrednosti $FAZR$, in sicer 0,0654, 0,1394, 0,1641, 0,1848 in 0,595, dosežejo metoda STM-v, metoda IDW2, Krigingova metoda, metoda IDW in metoda LIvE. Slabo natančnost neposrednih postopkov izdelave kart RP se lahko razloži z relativno majhnim številom izmerkov v primerjavi z velikostjo celotne karte RP, medtem ko je za nenatančnost metode LIvE krivo predvsem njeno neupoštevanje usmerjenosti oddajnika in izbira nenatančnega modela za opis razširjanja radijskega valovanja.

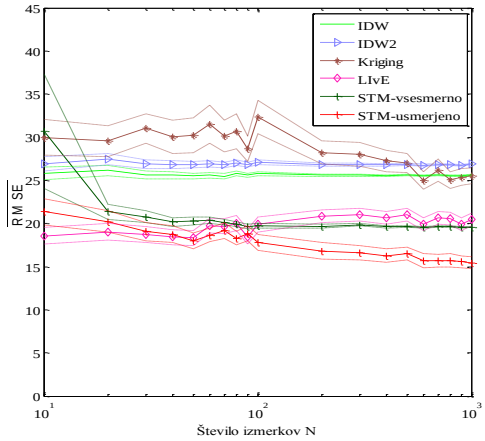
Slika 22(B) in slika 23(B) prikazujeta rezultate scenarija 2, ko so vsi izmerki naključno razporejeni v glavnem snopu usmerjene antene oddajnika. V primerjavi z rezultati scenarija 1 je tu opaziti znatno poslabšanje in zasičenje vseh obravnavanih postopkov izdelave kart RP. Metoda Kriging dosega najslabše rezultate, vendar z večanjem števila izmerkov proti 1000 postaja primerljiva z metodama IDW2 in IDW. Nekoliko boljše rezultate dosega metoda LIvE in obe izvedbi metode STM, ki so podobno natančne do približno 90 izmerkov. Ko je na voljo več kot 90 izmerkov, je metoda STM-u natančnejša od ostalih metod. Vrednosti $CDZR_1$ v odvisnosti od $FAZR$ prikazujejo, da je najboljša metoda STM-v. Pri $CDZR_1 = 0{,}9$ doseže $FAZR = 0{,}0156$. Sledijo ji metoda STM-u, ki zaradi pomanjkanja prostorske porazdelitve izmerkov slabo oceni diagram antene, in metoda LIvE, ki dosežeta $FAZR$ 0,1227 in 0,6772, ter metode IDW, IDW2 in

Krigingova metoda s $FAZR = 1$. Slednje pomeni, da vse točke, ki v resnici so bele lise, opredelijo kot da to niso.

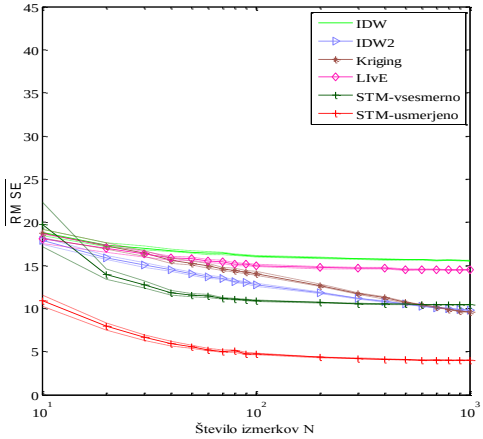
(A)-scenarij 1



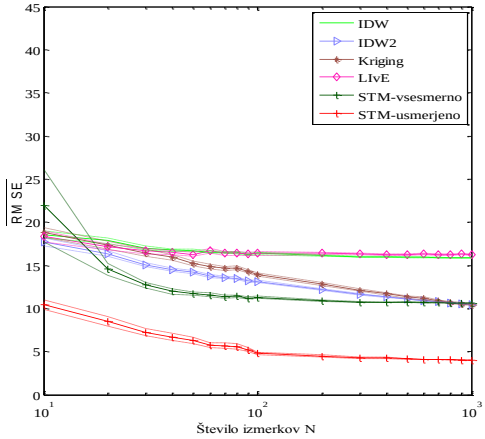
(B)-scenarij 2



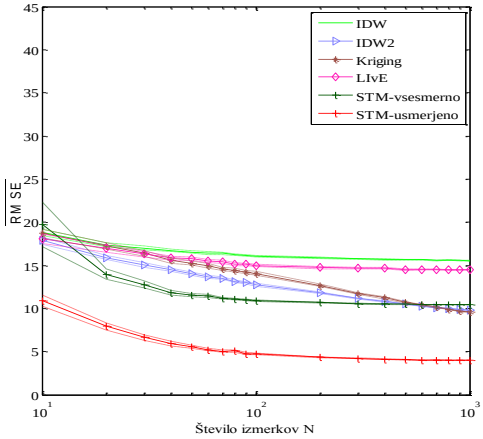
(C) – scenarij 3



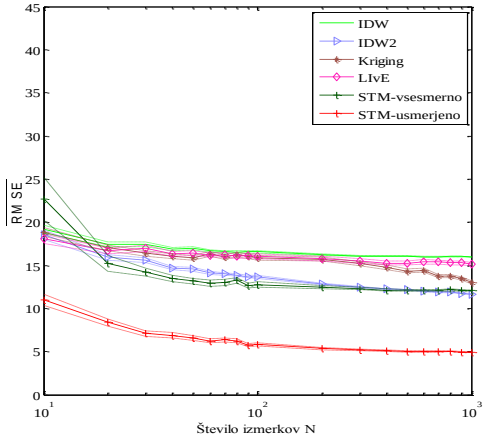
(D)-scenarij 4



(E)-scenarij 5

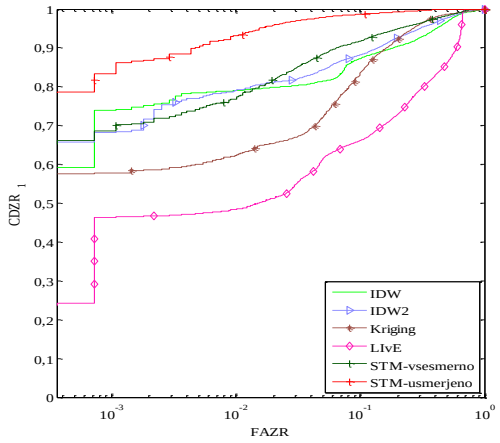


(F)-scenarij 6

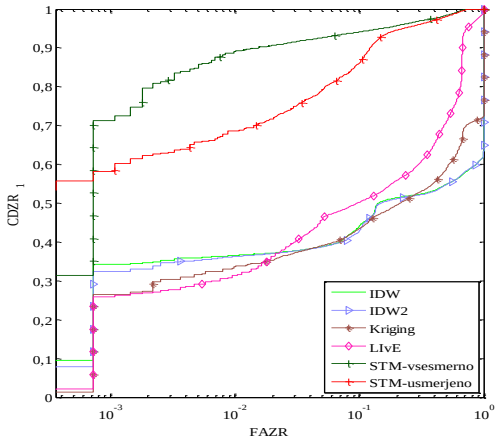


Slika 22: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu* $\overline{RMSE}$ *in 95-odstotnih CI, doseženi z uporabo simulacijsko generiranih izmerkov.*

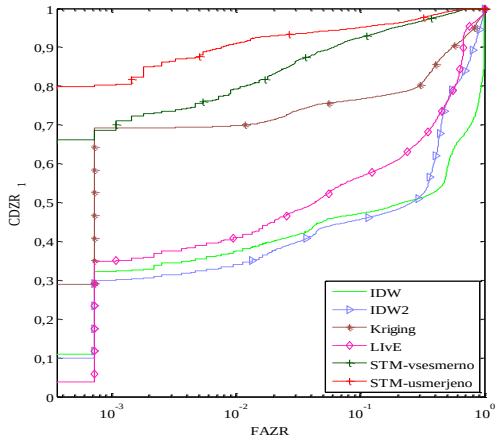
(A)-scenarij 1



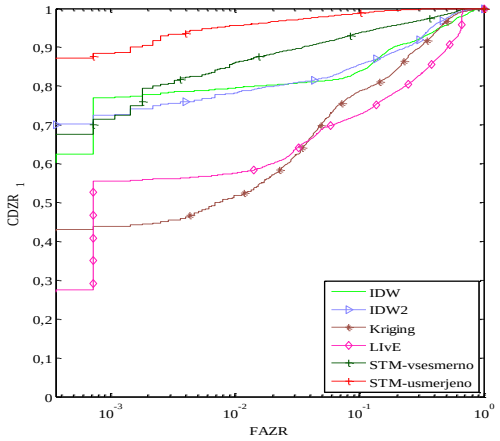
(B)-scenarij 2



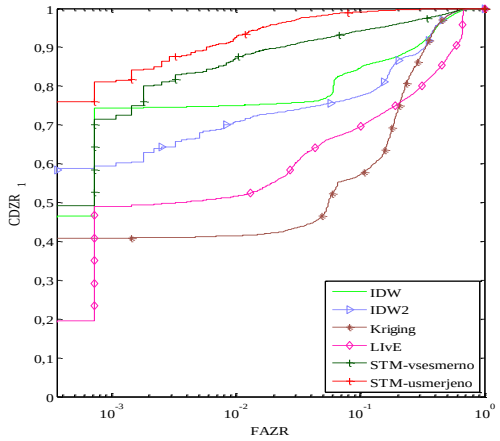
(C) – scenarij 3



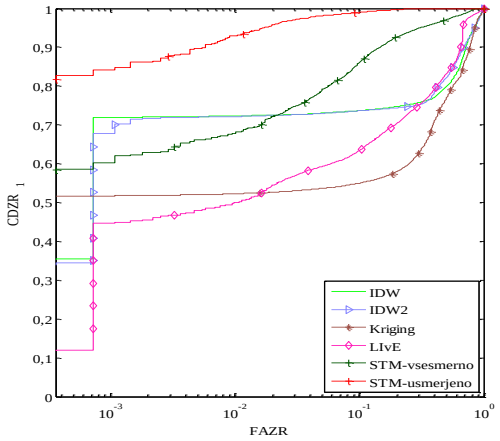
(D)-scenarij 4



(E)-scenarij 5



(F)-scenarij 6



Slika 23: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu krivulj ROC na podlagi vrednosti* $CDZR_1$ *v odvisnosti od* $FAZR$.

Nekoliko boljšo natančnost obravnavane metode dosežejo v primeru scenarija 3, ko je poleg večine izmerkov v glavnem snopu antene oddajnika na voljo tudi nekaj izmerkov razporejenih drugje po področju. Pri tem je glede na rezultate s slike 22(C) najmanj natančna metoda IDW. Pri majhnem številu izmerkov je metoda LIvE primerljiva ali

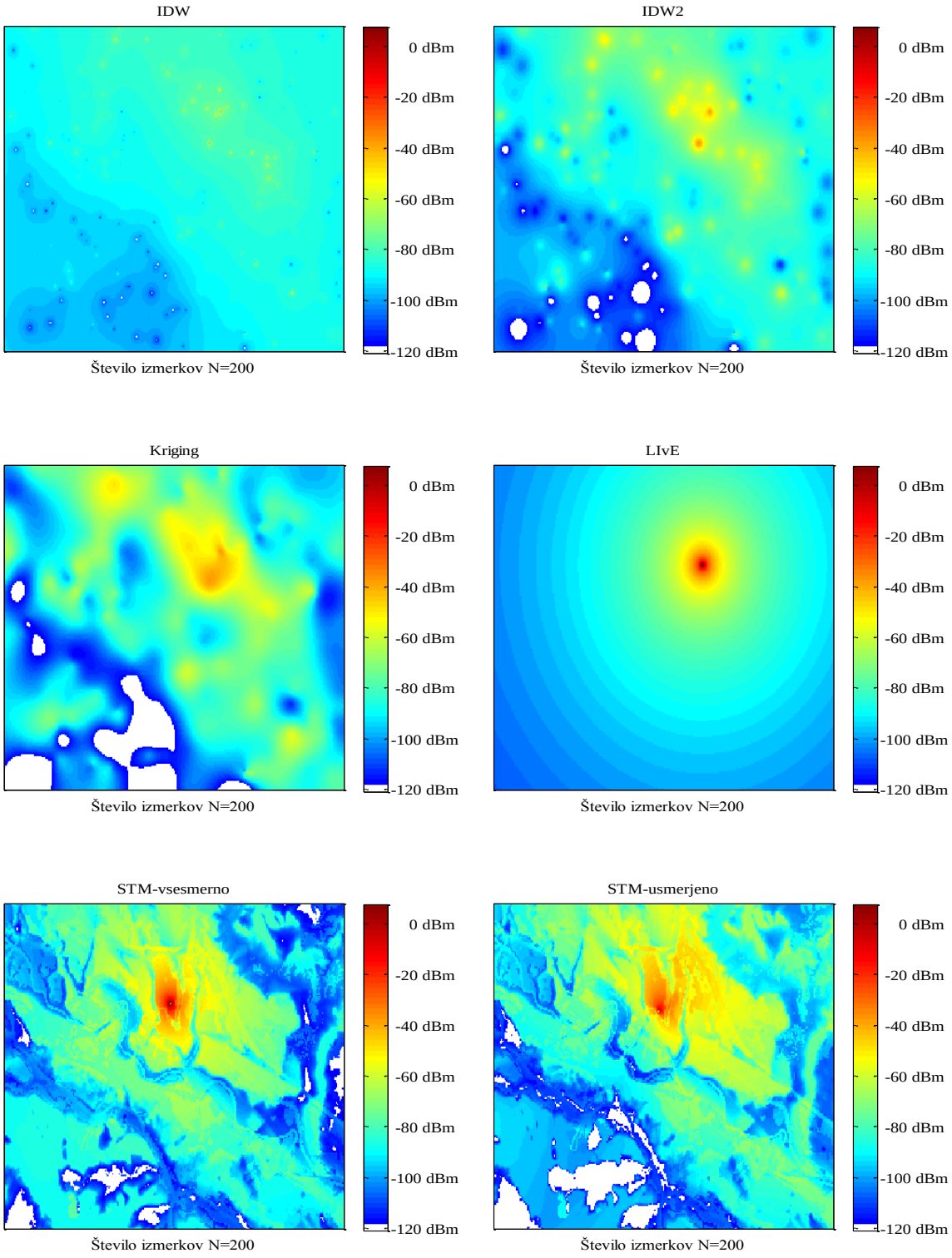
boljša od metode STM-v in do približno 40 izmerkov natančnejša od metod IDW in Kriging. Ko je na voljo več izmerkov, Krigingova metoda začne izdelovati natančnejše karte RP, vendar kljub temu za vse velikosti izmerkov dosega nekoliko slabše rezultate kot metoda IDW2. Z izjemo metode STM-u, ki na celotnem intervalu izmerkov kaže najboljšo natančnost, je od ostalih metod med 20 in 500 izmerki boljša tudi metoda STM-v. Glede na sliko 23(C) metoda STM z upoštevanjem usmerjenosti oddajnika pri $CDZR_1 = 0{,}9$ doseže $FAZR = 0{,}0076$, ki mu sledijo vrednosti 0,0614, 0,5527, 0,6783, 0,8214 in 0,9996 za metodo STM-v, Krigingovo metodo ter metode LIvE, IDW2 in IDW. Slika 22(D) in slika 23(D) prikazujeta rezultate scenarija 4, ko so vsi izmerki zunaj glavnega snopa usmerjene antene oddajnika, medtem ko slika 22(E) in slika 23(E) prikazujeta rezultate scenarija 5, ko je večina izmerkov zunaj, nekaj pa tudi znotraj glavnega snopa antene oddajnika. Ti $\overline{RMSE}$ rezultati so zelo podobni rezultatom scenarija 1, ko so izmerki naključno razporejeni po celotnem področju. Metodi LIvE in IDW dosegata najslabšo natančnost, nekoliko boljši sta Krigingova metoda ter metoda IDW2. V primeru scenarija 4 je metoda STM-v boljša od naštetih metod med 20 in približno 300 izmerki, v primeru scenarija 5 pa med 20 in 500 izmerki. V obeh primerih je metoda STM-u najboljša ne glede na število uporabljenih izmerkov za izdelavo kart RP. V scenariju 4 metoda STM-u, metoda STM-v ter metode IDW, IDW2, Kriging in LIvE pri $CDZR_1 = 0{,}9$ dosegajo $FAZR$ vrednosti 0,0015, 0,0352, 0,1899, 0,2375, 0,3090 in 0,5131. V primeru scenarija 5 v istem vrstnem redu dosegajo $FAZR$ vrednosti 0,0058, 0,0232, 0,2821, 0,3319, 0,3366 in 0,5777.

Ko so izmerki v scenariju 6 po področju naključno porazdeljeni glede na različne tipe rabe tal, postopki izdelave kart RP dosegajo rezultate, prikazane na sliki 22(F) in sliki 23(F). Metoda IDW, metoda LIvE in Krigingova metoda dosegajo podobne vrednosti $\overline{RMSE}$ do 200 izmerkov. Nato začne Krigingova metoda pridobivati na natančnosti in proti 1000 izmerkov postaja primerljiva z metodo IDW2 in metodo STM-v. Ponovno se izkaže, da je metoda STM-u najbolj natančna, neodvisno od števila izmerkov. To velja tudi v primeru krivulj ROC, ko pri $CDZR_1 = 0{,}9$ doseže $FAZR = 0{,}0058$. Po uspešnosti ji s $FAZR = 0{,}1478$ sledi metoda STM-v ter metode LIvE, IDW2, IDW in Krigingova metoda s $FAZR$ 0,6521, 0,6932, 0,7186 in 0,7720.

Za predstavitev natančnosti obravnavanih postopkov izdelave kart RP v primeru scenarija 1 so na sliki 24 prikazane izdelane karte RP za referenčni primer, ko je na voljo $N = 200$ izmerkov. Referenčna karta RP je prikazana na sliki 25, vizualne predstavitve natančnosti postopkov izdelave kart RP za ostale scenarije so za isti referenčni primer prikazane v prilogi D.

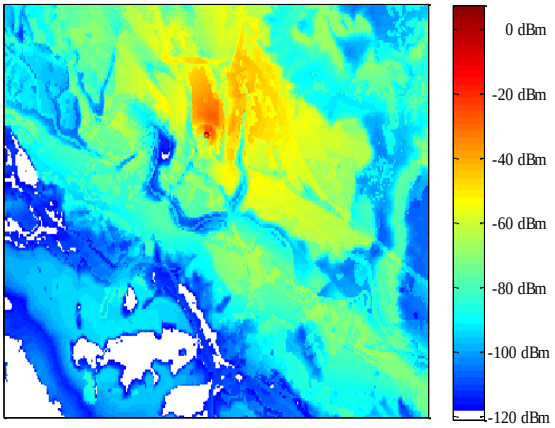
Iz prikazanih rezultatov je razvidno, da je izdelava kart RP zelo odvisna od prostorske porazdelitve izmerkov, števila izmerkov in da neupoštevanje usmerjenosti oddajne antene zelo vpliva na natančnost izdelanih kart RP. Metoda STM-u je bistveno natančnejša od ostalih metod. To potrjuje naše preliminarne rezultate [4] in del hipoteze disertacije. Natančnost kart RP se bistveno izboljša z uporabo posrednih postopkov, ki temeljijo na uporabi semiempiričnih modelov za opis razširjanja radijskega valovanja, zaradi česar lahko upoštevajo tudi karakteristike okolja in oddajnika. Pri izboljšavi natančnosti kart RP gre za kompromis med povečano računsko kompleksnostjo v primerjavi z ostalimi obstoječimi postopki izdelave kart RP. Kljub temu se problematiko velike kompleksnosti lahko rešuje z učinkovito implementacijo obstoječih in novih postopkov izdelave kart RP na platformah za paralelno procesiranje, kot so večjedrne centralne procesne enote, digitalni signalni procesorji, programirljiva logična vezja ali grafične procesne enote.

Posredni postopki so primernejši za izdelavo kart RP, ko je na voljo malo in srednje veliko izmerkov, neposredni pa v primeru zelo velikega števila izmerkov. Gručenje večine izmerkov v glavnem snopu usmerjene antene oddajnika v primerjavi z izmerki, ki



Slika 24: *Karte RP, izdelane z obravnavanimi postopki v primeru scenarija 1, za reprezentativni primer, ko je pridobljenih 200 izmerkov jakosti radijskega signala.*

so porazdeljeni preko celotnega področja, opazno vpliva na poslabšanje natančnosti izdelanih kart RP. Po drugi strani se izkaže, da natančnost izdelanih kart RP začne naraščati takoj, ko so poleg večine izmerkov v glavnem snopu usmerjene antene oddajnika na voljo tudi izmerki izven njega. To se lahko razloži, da glavni snop antene oddajnika pokriva zgolj majhen delež celotnega geografskega področja. Po drugi strani gručenje izmerkov v točkah različnih tipov rabe tal ponuja podobne rezultate kot v primeru, ko so izmerki naključno porazdeljeni preko celotnega geografskega področja. To



Slika 25: *Referenčna karta RP, izračunana s pomočjo načrtovalskega orodja GRASS-RaPlaT in uvožena v razvito testno okolje za izdelavo kart RP.*

kaže na to, da bi se v primeru realne prostorske porazdelitve mobilnih terminalov in senzorskih vozlišč njihove izmerke lahko uporabljalo za posredno izdelavo kart RP mobilnih omrežij. Da bi to z gotovostjo potrdili, bi bile potrebne nadaljnje raziskave v smeri natančnejšega in bolj realnega modeliranja prostorske porazdelitve izmerkov preko različnih tipov rabe tal. Uporaba metrike $\overline{RMSE}$ in 95-odstotnih intervalov zaupanja kaže na to, da so vsi obravnavani postopki izdelave kart RP pri majhnem številu izmerkov zelo občutljivi na njihovo prostorsko porazdelitev.

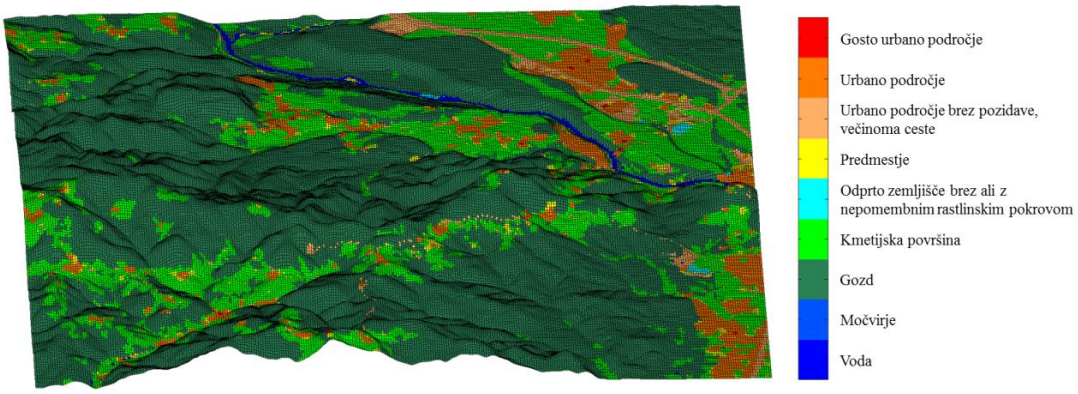
Na podlagi rezultatov in predstavljenih ugotovitev lahko povzamemo, da je natančna izdelava kart RP usmerjenih oddajnikov pogojena z uporabo sidrnih izmerkov jakosti radijskega signala izven glavnih snopov usmerjenih anten oddajnikov in da je razvita metoda STM natančnejša od obstoječih postopkov izdelave kart RP v primeru usmerjenih oddajnih anten.

6.3 Preizkus in ovrednotenje metode STM z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki

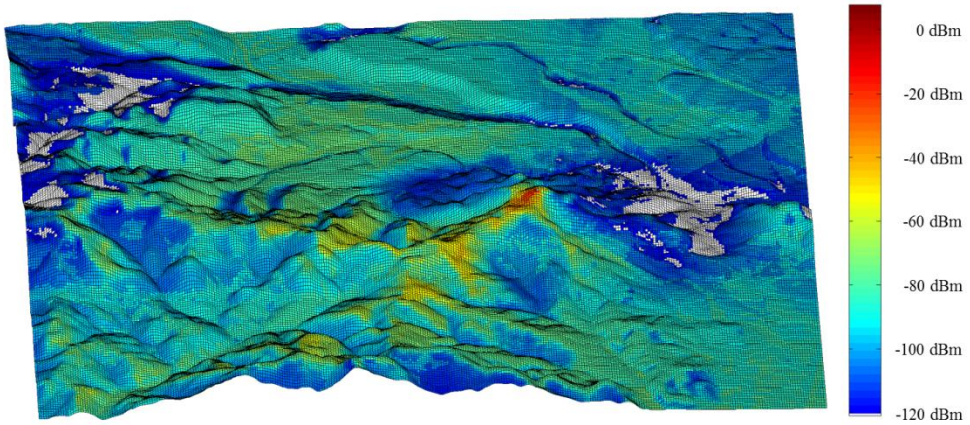
Metodo STM smo po uspešnem preizkusu in ovrednotenju s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki preizkusili in ovrednotili še s pomočjo izmerkov obstoječega radijskega omrežja, ki smo jih pridobili z meritvami na terenu.

6.3.1 Simulacijski scenarij in referenčna karta RP

Predpostavili smo scenarij, kjer smo se osredotočili na izbrano bazno postajo realnega mobilnega omrežja. Okoli nje smo določili področje v velikosti 8 x 8 km, ki je v ločljivosti 25 m in z devetimi različnimi tipi rabe tal prikazano na sliki 26. Bazna postaja deluje v frekvenčnem pasu 900 MHz. Pri tem oddaja z močjo 39 dBm in uporablja anteno CommScope Andrew DB844H35E-SY [81], ki je brez nagiba usmerjena v smeri azimuta 240°. Za izračun referenčne karte RP do meje −120 dBm, ki je prikazana na sliki 27, smo ponovno uporabili načrtovalsko okolje GRASS-RaPlaT in umerjen spremenjeni model Okumura-Hata.



Slika 26: *Referenčno geografsko področje z devetimi tipi rabe tal za preizkus in ovrednotenje metode STM z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki obstoječega radijskega omrežja.*

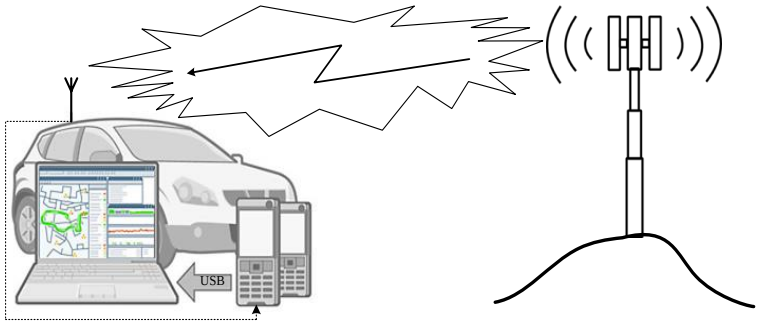


Slika 27: *Referenčna karta RP, izdelana za namen preizkusa in ovrednotenja metode STM z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki obstoječega radijskega omrežja.*

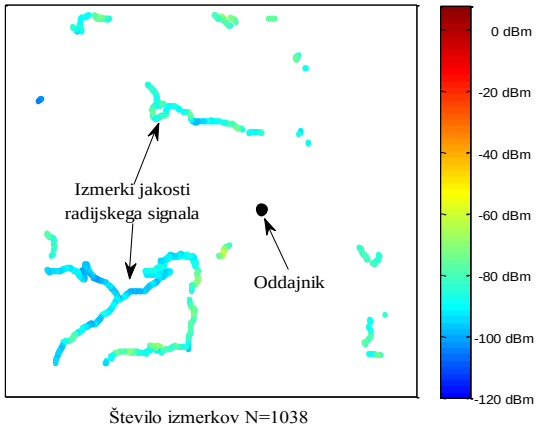
6.3.2 Vhodni podatki

Pripravo vhodnih podatkov za postopke izdelave kart RP smo izvedli v več korakih. Najprej smo zagotovili, da se nobena izmed nastavitev izbrane bazne postaje tekom dneva izvajanja meritev ni spremenila. Nato smo v istem dnevu na geografskem področju, predstavljenem na sliki 26, izvedli meritve radijskega signala izbrane bazne postaje obstoječega mobilnega omrežja. Kot prikazuje shema na sliki 28, smo v avtomobil namestili primerno merilno opremo in po različnih poteh prevozili geografsko področje. Cilj meritev radijskega signala na področju je bilo ovrednotenje in preizkus metode STM na podlagi prostorsko porazdeljenih izmerkov naprav MCD, ki bi jih predstavljali mobilni terminali. Iz tega razloga smo za merilno opremo izbrali prenosni računalnik s programsko opremo TEMS Investigation [82], prirejen mobilni terminal za izvajanje meritev mobilnega omrežja Sony Ericsson K800i ter zunanji anteni za sprejem signala GPS in signalov mobilnega omrežja.

Merili smo prejeto moč signala kot RSSI [dBm] in zajeli 19724 prostorsko porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala izbrane bazne postaje. Za posamezno točko karte RP je bilo v nekaterih primerih na voljo po več izmerkov, medtem ko je za izdelavo kart RP potrebna zgolj ena vrednost. Posledično smo, skladno s postopki



Slika 28*: Shema merjenja jakosti radijskega signala izbrane bazne postaje obstoječega radijskega omrežja na terenu* [82].



Slika 29: *Prostorska porazdelitev na terenu zajetih in filtriranih izmerkov jakosti radijskega signala izbrane bazne postaje obstoječega mobilnega omrežja.*

obdelave izmerkov iz poglavja 3.1.3, nad več izmerki določene točke karte RP izvedli izračun mediane. Po filtraciji nam je ostalo 1038 točk karte RP z vrednostmi jakosti radijskega signala, ki so prikazane na sliki 29.

Za namen modeliranja merjenja signala različnega števila naprav MCD smo 1038 točk karte RP razvrstili v vektor. Vrstni red točk v vektorju smo določili tako, da smo poiskali najkrajšo pot med njimi [83]. Z naključnim vzorčenjem tako izdelanega vektorja smo simulirali prostorsko gibanje želenega števila naprav MCD in njihovo naključno soudeležbo pri izdelavi kart RP. Na primer, za ovrednotenje izdelave kart RP z N realnimi izmerki v t različnih časovnih trenutkih smo z generatorjem naključnih števil določili N naključnih indeksov vektorja. Za izdelavo kart RP v prvem časovnem trenutku t_0 smo uporabili vrednosti izmerkov, hranjene na pripadajočih lokacijah v vektorju. Za vsak naslednji časovni trenutek $t > t_0$ smo obstoječim indeksom vektorja prišteli vrednost 1 in za izdelavo kart RP uporabili vrednosti izmerkov z novih zaporednih lokacij v vektorju. Na ta način smo dosegli, da so bile lokacije izmerkov v zaporednih časovnih trenutkih korelirane, kot bi bile v realnem primeru.

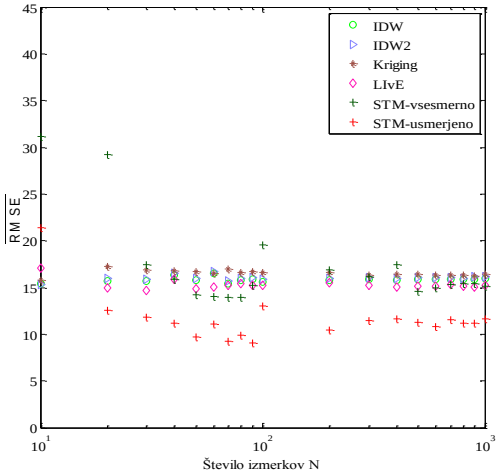
6.3.3 Izvedba postopkov izdelave kart RP

Za preizkus in ovrednotenje postopkov izdelave kart RP z izmerki obstoječega radijskega omrežja, pridobljenimi na terenu, smo izvedli vzorčenje predhodno procesiranega vektorja realnih vrednosti radijskega signala tako, da smo simulirali od 10 do 1000 naključno porazdeljenih naprav MCD in njihove sete prostorsko porazdeljenih realnih izmerkov v 100 zaporednih časovnih trenutkih t. V naslednjem koraku smo sete izmerkov

uporabili v testno okolje vključenih postopkih izdelave kart RP. Z njimi smo izdelali karte RP in na podlagi njihove primerjave z referenčno karto RP izračunali pripadajoče vrednosti $RMSE$. Na koncu smo za vsak set naprav MCD na podlagi 100 $RMSE$ vrednosti zaporednih časovnih trenutkov izračunali $\overline{RMSE}$.

6.3.4 Analiza rezultatov in diskusija

Rezultate izdelave kart RP z izmerki obstoječega radijskega omrežja, ki smo jih pridobili na terenu, filtrirali in uporabili za simuliranje premikanja določenega števila premikajočih se naprav MCD, prikazuje slika 30.



Slika 30: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu $\overline{RMSE}$, doseženi z uporabo izmerkov obstoječega radijskega omrežja, pridobljenih na terenu.*

Metode Kriging, IDW2, IDW in LIvE, ne glede na število izmerkov, dosegajo podobno natančnost med 15 dBm in 18 dBm napake $\overline{RMSE}$. Za razliko od njih se natančnost obeh izvedb metod STM bistveno spreminja z naraščanjem števila izmerkov. Metoda STM-v je najslabša, dokler ni na voljo več kot 30 izmerkov. Z naraščanjem števila izmerkov hitro pridobiva na natančnosti in postane primerljiva s Krigingovo metodo in metodami IDW2, IDW in LIvE. Pri 50 izmerkih izdela natančnejše karte RP od njih, a pri 100 izmerkih zopet postane najslabša. Kljub temu spet začne pridobivati na natančnosti in pri več kot 400 izmerkih postane primerljiva oziroma boljša od naštetih metod. Podobno naraščanje in padanje natančnosti z naraščanjem števila izmerkov je vidno pri metodi STM-u. Kljub temu zaradi hitre konvergence z uporabo več kot 20 izmerkov izdela natančnejše karte RP od vseh ostalih metod.

Za interpretacijo doseženih rezultatov so na sliki 31 prikazane prostorske porazdelitve različnega števila naprav MCD in vrednosti pripadajočih realnih izmerkov jakosti radijskega signala, uporabljenih za izdelavo kart RP v izbranem časovnem trenutku. Z njimi izdelane karte RP in dosežene absolutne napake glede na referenčno karto RP so za metodo STM-u prikazane na sliki 32. Izdelane karte RP in pripadajoče absolutne napake ostalih obravnavanih metod so na voljo v prilogi E.

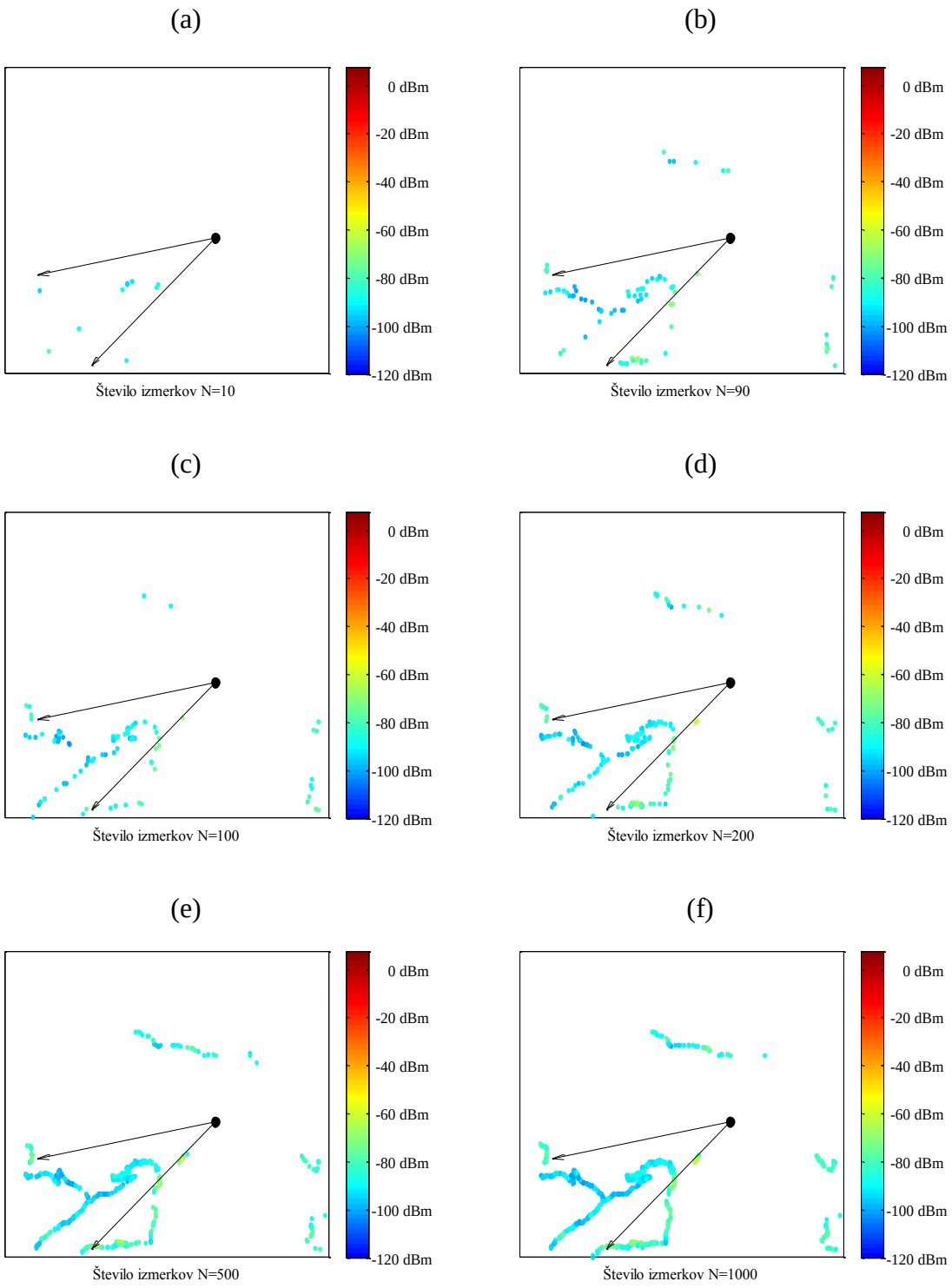
Iz slike 31 je razvidno, da se v danem primeru gostota prostorske porazdelitve izmerkov po geografskem področju ne veča z večanjem števila simuliranih naprav MCD. V poglavju 6.2.2 je pri različnih scenarijih porazdelitve izmerkov predvsem naraščajoča razpršenost glavni razlog monotonega padanja vrednosti $\overline{RMSE}$ z naraščanjem števila izmerkov. Ne glede na število naprav MCD je sedaj večina izmerkov v glavnem snopu

usmerjene antene oddajnika ali tik ob njem. Zgolj manjše število sidrnih izmerkov je na voljo iz drugih delov geografskega področja in ti bistveno vplivajo na natančnost postopkov izdelave kart RP. To je razlog očitnega poslabšanja natančnosti obeh izvedb metode STM pri 100 izmerkih. Ob primerjavi slike 31(b), ko je na voljo 90 izmerkov, in slike 31(c), ko je na voljo 100 izmerkov, je namreč opaziti, da večina ključnih sidrnih izmerkov, ki vplivajo na izračun ocene jakosti radijskega signala, na zgornjem delu geografskega področja kart RP izgine.

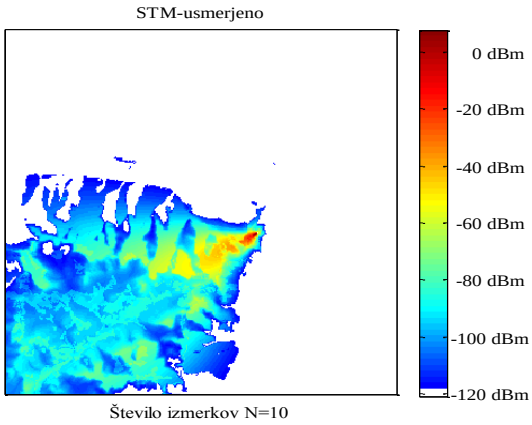
Rezultati kažejo, da vse metode zelo natančno izdelajo karte RP na področjih, kjer so na voljo izmerki, a se po natančnosti bistveno razlikujejo tam, kjer izmerki niso na voljo. Metoda STM-u z 10 izmerki po pričakovanjih zelo natančno oceni področje glavnega snopa oddajnika, metoda STM-v pa tudi širše področje okoli njega. Ravno zaradi pomanjkanja prostorske porazdelitve izmerkov zelo slabo oceni širino glavnega snopa in razmerje antenskega diagrama naprej-nazaj (FBR_θ). Posledično zelo slabo oceni jakosti radijskega signala na področjih kart RP brez meritev, tj. izven glavnega snopa usmerjenega oddajnika in na področjih za oddajnikom in dosega temu primerno $\overline{RMSE}$. Neposredne metode razumljivo dosežejo manjšo $\overline{RMSE}$, saj v točkah kart RP med lokacijami izmerkov ocenijo jakost radijskega signala kot uteženo povprečje njihovih vrednosti. Takoj ko so z večanjem števila izmerkov na voljo sidrna vozlišča, po pričakovanjih postane metoda STM-u izjemno natančna na veliki večini geografskega področja. Metoda STM-v pa je natančna na približno polovici področja. Na drugi polovici je zelo slaba, saj tako kot LIvE ni prilagojena za izdelavo kart RP usmerjenih oddajnih anten. Ravno to vpliva na zvišanja njene $\overline{RMSE}$ nad nivo posrednih metod in metode LIvE, dokler ni na voljo večjega števila prostorsko bolj enakomerno porazdeljenih izmerkov. Ker je v danem scenariju na voljo izredno malo izmerkov z vlogo sider in še obstoječi so zelo skupaj, je obravnavan scenarij z realnimi izmerki zelo podoben scenariju 2 iz poglavja 6.2.2. To potrjujejo rezultati, saj so neposredne metode tudi tu zasičene in ne pridobivajo na natančnosti z naraščanjem števila izmerkov, medtem ko je metoda LIvE natančnejša od njih. Razlika med scenarijema je predvsem, da nekaj prostorsko porazdeljenih sidrnih izmerkov bistveno izboljša neposredne metode, zaradi česar so po natančnosti bolj primerljive z metodo LIvE.

Glede na dosežene rezultate lahko povzamemo, da preizkus in ovrednotenje postopkov izdelave kart RP z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki obstoječega radijskega omrežja potrjuje rezultate ovrednotenja postopkov izdelave kart RP s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki. Pri tem se je treba zavedati, da večanje števila izmerkov ob njihovi relativno nespremenjeni prostorski porazdelitvi ne pomeni nujno izboljšanja natančnosti izdelanih kart RP. V izračun kart RP se namreč na ta način vnaša nepotreben šum, ki bi ga bilo treba v okviru nadaljnjega dela dodatno raziskati.

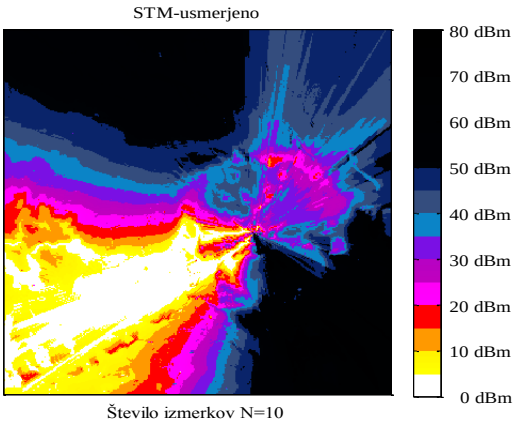
Iz porazdelitev izmerkov na sliki 31 je razvidno, da so vsi seti izmerkov večinoma razporejeni znotraj glavnega snopa usmerjene antene oddajnika. Če upoštevamo še njihovo prostorsko korelacijo skozi 100 časovnih trenutkov, opazimo, da pri določenem številu izmerkov izdelajo opazno natančnejše karte RP, kot bi jih z uporabo večjega števila izmerkov. Omenjeno pomanjkljivost jasno prikazujejo rezultati metode STM na slikah 30, 31 in 32 s primerjavo rezultatov pri $N = 500$ in $N = 1000$. Po drugi strani smo uporabljeno porazdelitev izmerkov obravnavali ravno zaradi tega, ker so bili izmerki na terenu pridobljeni v okviru merilne kampanje z avtomobilom. Zelo malo je verjetno, da bi naprave MCD vse izmerke za izdelavo kart RP posredovale iz področja cest. Glede na rabo tal, ki jo prikazuje slika 26, je na obravnavanem geografskem področju (tudi za oddajnikom) veliko področij drugega tipa rabe tal, kjer bi se zagotovo nahajali uporabniki mobilnih terminalov v vlogi naprav MCD.



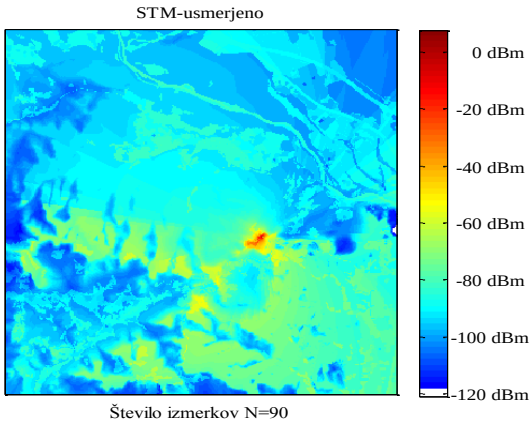
Slika 31: *Prostorske porazdelitve različnega števila naprav MCD in vrednosti pripadajočih izmerkov glede na usmerjen oddajnik v izbranem časovnem trenutku.*



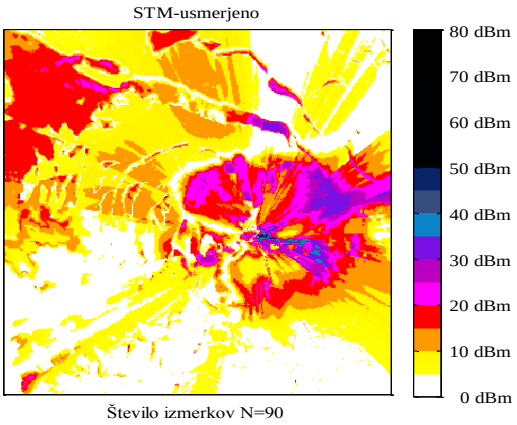
Število izmerkov N=10



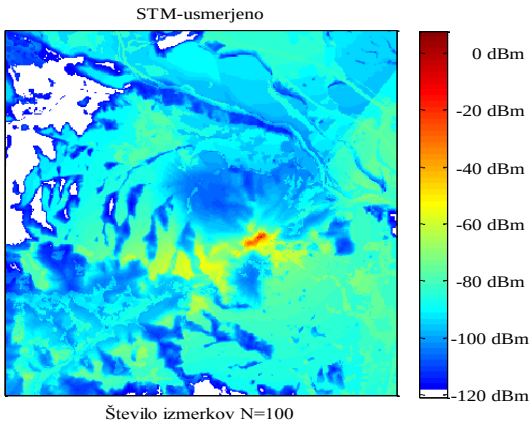
Število izmerkov N=10



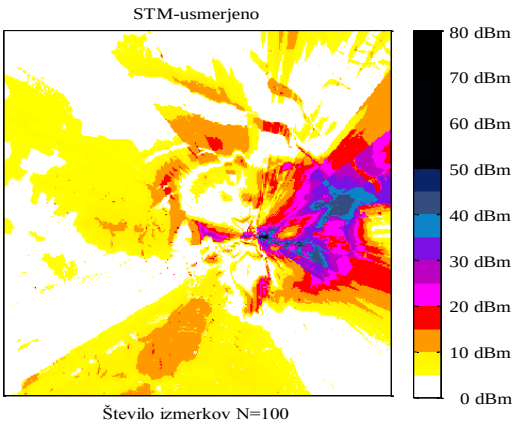
Število izmerkov N=90



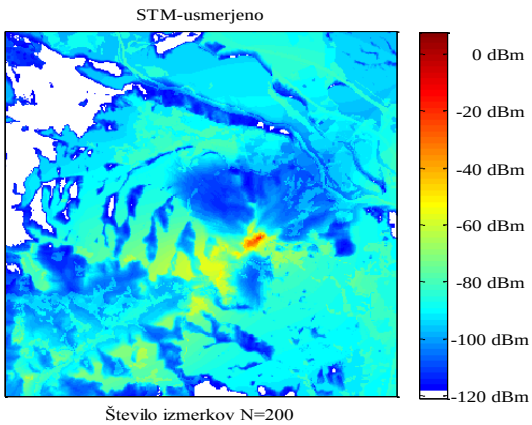
Število izmerkov N=90



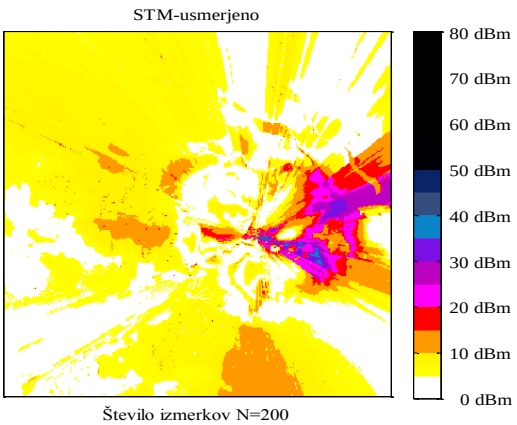
Število izmerkov N=100



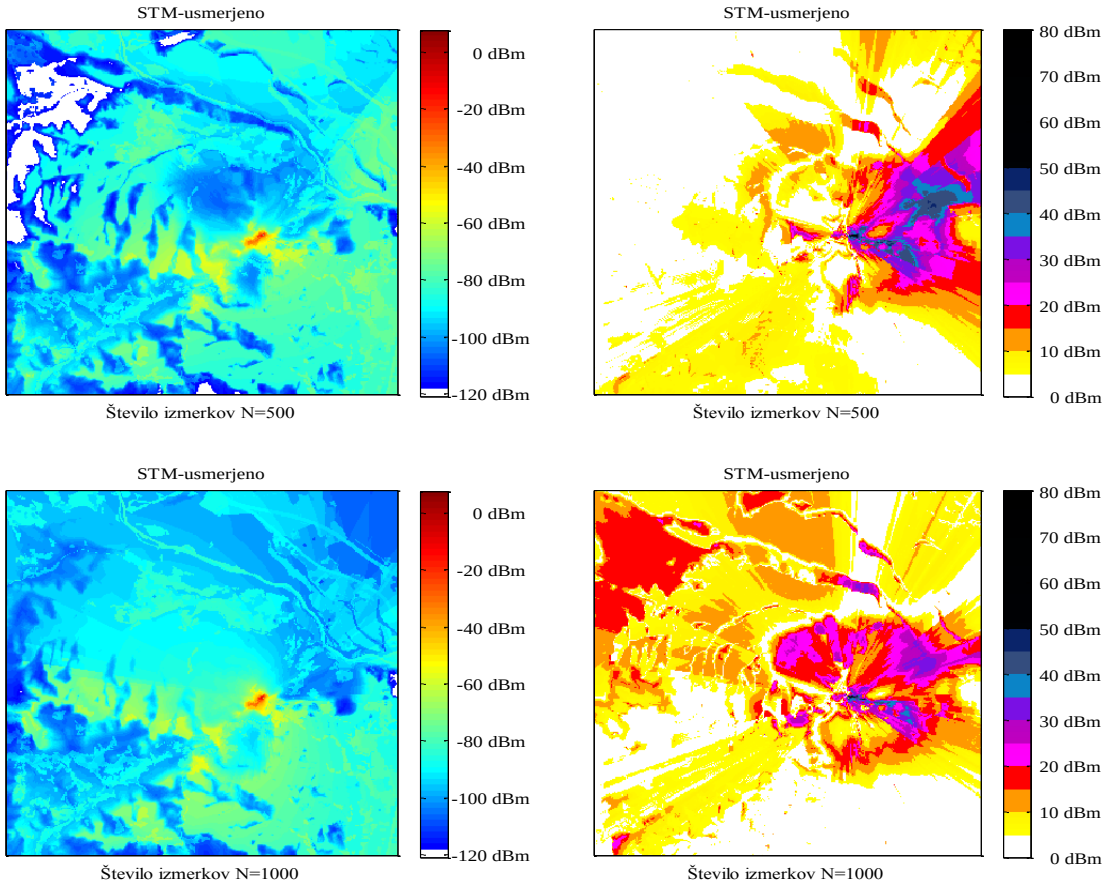
Število izmerkov N=100



Število izmerkov N=200



Število izmerkov N=200



Slika 32: *Karte RP, izdelane z metodo STM, (levo) in njihove absolutne napake v primerjavi z referenčno karto RP (desno), v izbranem časovnem trenutku.*

6.3.5 Sklepne ugotovitve

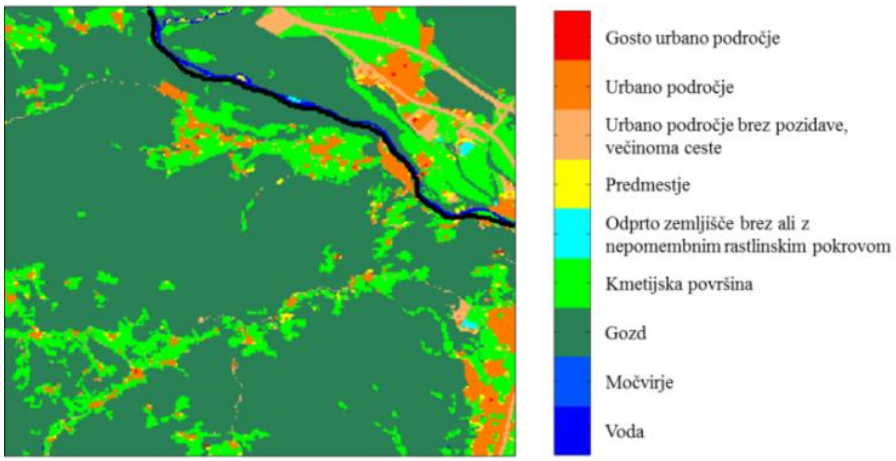
Na podlagi vseh ugotovitev lahko potrdimo del hipoteze, da je mogoče z novim postopkom izdelave kart RP, z uporabo različnih dodatnih informacij sistema GIS, časovno in prostorsko naključno porazdeljenih izmerkov omogočiti enako ali izboljšano natančnost izdelanih kart RP kot z obstoječimi postopki. Posredni postopki, ki temeljijo na semiempiričnih modelih za opis razširjanja radijskega valovanja, lahko izdelajo natančnejše karte RP kot največkrat uporabljeni obstoječi postopki izdelave kart RP, pri čemer so pri izdelavi kart RP usmerjenih oddajnih anten nujno potrebni prostorsko porazdeljeni referenčni izmerki iz istega geografskega področja. Ti namreč bistveno vplivajo na oceno širine glavnega snopa in razmerje antenskega diagrama naprej-nazaj (FBR_θ). Da bi našo hipotezo potrdili v celoti, naslednje poglavje obravnava še izdelavo časovno spremenljivih kart RP z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki.

6.4 Izdelava časovno spremenljivih kart RP z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki

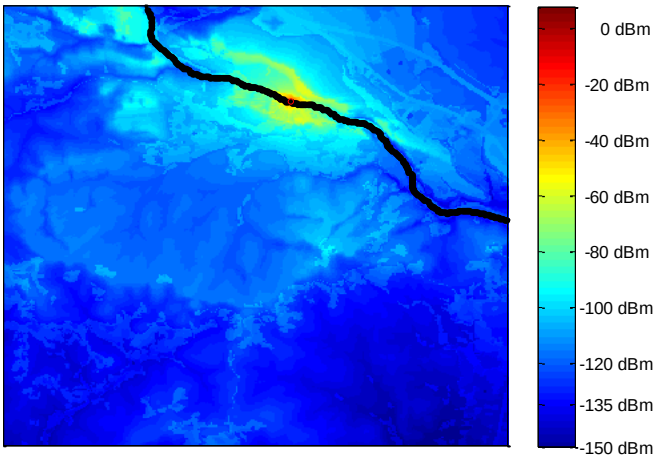
To poglavje prikazuje izdelavo kart RP mobilnega oddajnika in proučuje, če je za prostorsko porazdeljenim izmerkom dotičnega časovnega trenutka mogoče dinamično dodajati tudi prostorsko porazdeljene izmerke iz preteklih časovnih trenutkov.

6.4.1 Simulacijski scenarij in referenčna karta RP

Za izdelavo kart RP z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki smo predpostavili diskretne časovne trenutke, pri čemer smo za korak med dvema časovnima trenutkoma izbrali 1 sekundo. Pri tem smo predvideli oddajnik na istem geografskem področju, kot je bilo obravnavano v poglavju 6.3.1. V velikosti 8 x 8 km, z ločljivostjo 25 m in z devetimi različnimi tipi rabe tal je prikazano na sliki 26. Kot dodatno prikazuje slika 33 se na področju nahaja tudi železniška proga. Zaradi zagotavljanja sodobnih komunikacijskih storitev na vlakih je potrebno preučiti, ali je mogoče izdelati karte RP oddajnika na premikajočem se vlaku. V ta namen smo predvideli oddajnik z vsesmerno anteno na 3 m visokem vlaku, ki se po železniški progi od severozahoda proti jugovzhodu premika enakomerno s hitrostjo 40 km/h, 90 km/h ali 140 km/h. Če je ločljivost karte RP 25 m, to pomeni, da se pri hitrosti 40 km/h mobilni oddajnik premika s približno 11 m/s in je v isti točki ločljivosti karte RP 2 do 3 sekunde. Pri 90 km/h se premika s 25 m/s in se na sekundo premakne za približno eno točko ločljivosti karte RP, medtem ko se pri hitrosti 140 km/h na sekundo premakne za približno 1,5 točke ločljivosti karte RP. Podobno kot v prejšnjih scenarijih smo predvideli, da oddajnik deluje v 900 MHz frekvenčnemu pasu in oddaja z močjo 39 dBm.



Slika 33: *Referenčno geografsko področje z devetimi tipi rabe tal in železniško progo za simuliranje premikanja mobilnega oddajnika.*



Slika 34: *Referenčna karta RP mobilnega oddajnika na vlaku, v časovnem trenutku izdelave kart RP.*

Za opis razširjanja radijskega valovanja iz vsake lokacije, kjer se nahaja mobilni oddajnik, smo pripravili pripadajočo referenčno karto RP. Za izračun jakosti radijskega signala smo uporabili načrtovalsko okolje GRASS-RaPlaT in za razliko od scenarijev v poglavjih 6.2 in 6.3 s spremenjenim modelom Okumura-Hata izračunali razširjanje radijskega valovanja do meje −150 dBm. Ob pridobivanju izmerkov po načinu soudeležbe je namreč za izdelavo kart RP mogoče pričakovati tudi izmerke spektralnih analizatorjev. V časovnem trenutku t, ko smo izdelovali karte RP, je bil mobilni oddajnik na izbrani točki železniške proge, za katero pripadajočo referenčno karto RP prikazuje slika 34.

6.4.2 Vhodni podatki

Vsako referenčno karto RP, uvoženo v testno okolje, smo vzorčili kot v poglavju 6.2.2 v primeru scenarija 6. Ob shranjevanju vseh prejetih izmerkov v REM-SA so v trenutku izdelave kart RP poleg N izmerkov dotičnega časovnega trenutka lahko na voljo tudi izmerki iz preteklih časovnih trenutkov. Ti so še posebej pomembni v primeru izdelave kart RP mobilnih oddajnikov. Ko je v trenutku t na voljo zelo malo prostorsko porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala, je glede na rezultate iz poglavij 6.2.4 in 6.3.4 izdelana karta RP najverjetneje zelo slaba. Posledično je treba preučiti in analizirati, če je mogoče prostorsko porazdeljenim izmerkom jakosti radijskega signala dotičnega trenutka dinamično dodajati tudi prostorsko porazdeljene izmerke iz preteklih časovnih trenutkov. To bi namreč ob statičnemu ali počasi se premikajočem oddajniku lahko bistveno izboljšalo natančnost izdelane karte RP.

6.4.3 Izvedba postopkov izdelave kart RP

Za preizkus in ovrednotenje hipoteze smo metodi IDW in IDW2, Krigingovo metodo ter metodo LIvE izvedli kot v prejšnjih scenarijih. Metodo STM smo zaradi prilagoditve na scenarij implementirali zgolj v izvedbi STM-v. Pripravljene sete izmerkov jakosti radijskega signala smo uporabili na dva načina. Najprej smo želeli pridobiti referenčne rezultate, za kar smo v časovnem trenutku t upoštevali N prostorsko porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala, ki se nanašajo zgolj na dotični časovni trenutek. Na podlagi setov izmerkov jakosti radijskega signala v velikostih od 10 do 1000 izmerkov, v 100 različnih prostorskih porazdelitvah, smo izdelali karte RP. Z njihovo primerjavo z referenčno karto RP smo izračunali pripadajoče vrednosti $RMSE$ in nato $\overline{RMSE}$ in 95-odstotne intervale zaupanja. Nadalje smo predpostavili, da se za izdelavo kart RP v trenutku t lahko uporabi tudi izmerke jakosti radijskega signala iz preteklih časovnih trenutkov. Ker hitrost mobilnega oddajnika, lastnosti razširjanja radijskega valovanja in občutljivost sprejemnikov naprav MCD bistveno vplivajo na zaznavanje radijskega signala na lokacijah, kjer se naprave MCD nahajajo, različne naprave MCD zaznajo radijski signal mobilnega oddajnika v različnih časovnih trenutkih. Iz tega razloga smo pri generiranju kombiniranih setov izmerkov predvideli, da so za vsak časovni trenutek na voljo izmerki drugega nabora prostorsko porazdeljenih naprav MCD. Glede na rezultate iz poglavij 6.2.4 in 6.3.4 se natančnost metode STM-v preneha opazno izboljševati pri približno $N = 200$ izmerkih. Iz tega razloga smo predvideli, da mora biti za natančnejšo izdelavo kart RP vedno na voljo vsaj $N_d = 200$ izmerkov. Za pripravo setov želenega števila izmerkov smo uporabili algoritem 2. Število izmerkov v setih za izdelavo kart RP glede na časovne trenutke in N izmerkov na voljo v trenutku t prikazuje tabela 3.

Z uporabo pripravljenih setov izmerkov jakosti radijskega signala smo z vsemi obravnavanimi postopki izdelali karte RP. Bistvena razlika v primerjavi z ostalimi scenariji je, da smo zaradi dinamičnega dodajanja izmerkov iz prejšnjih časovnih

Algoritem 2: *Algoritem za pripravo setov želenega števila izmerkov na podlagi izmerkov danega časovnega trenutka in izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov.*

```
measurements_set = [];                    % inicializacija seta izmerkov za izdelavo karte RP
% spremeljivki začasno izbranega trenutka se dodeli vrednost, ki kaže na dani časovni trenutek izdelave karte RP
timemoment_tmp = timemoment_REMconstruction;
loadTimeMoment(timemoment_tmp);           % naloži nov začasno izbrani časovni trenutek
% če je v danem trenutku na voljo več ali enako število izmerkov kot je trenutno število želenih izmerkov
if(N >= Nd_tmp)
  % vzemi vse izmerke danega trenutka in jih dodaj v set za izdelavo karte RP
  measurements_set ← addMeasurements(N, timemoment_tmp);
else                                      % v nasprotnem primeru
  while(1)                                % sestavljaj kombinirani set izmerkov
    % v primeru, da je želeno število izmerkov večje, kot jih je na voljo v danem trenutku
    if(Nd_tmp > N)
      % nastavi trenutno število izmerkov, ki jih je še treba zajeti, na število izmerkov, ki so na voljo v danem
      % trenutku
      noOfMeasurementsToBeSelected = N;
    else                                  % v nasprotnem primeru
      % nastavi trenutno število izmerkov, ki jih je še treba zajeti, na trenutno število želenih izmerkov
      noOfMeasurementsToBeSelected = Nd_tmp;
    end
    % vzemi število izmerkov, ki jih je treba zajeti iz začasno izbranega časovnega trenutka in jih dodaj v set za
    % izdelavo karte RP
    measurements_set←addMeasurements(noOfMeasurementsToBeSelected,
                                      timemoment_tmp);
    % zmanjšaj število želenih izmerkov za število izmerkov danega časovnega trenutka
    Nd_tmp=Nd_tmp - N;
    if(Nd_tmp > 0)     % če je še vedno treba jemati izmerke iz preteklih trenutkov
      % se spremenljivki začasno izbranega trenutka dodeli vrednost, da kaže na pretekli časovni trenutek
      timemoment_tmp = timemoment_tmp-1;
      if(timemoment_tmp >= 1)             % če pretekli časovni trenutek obstaja
        loadTimeMoment(timemoment_tmp);   % naloži nov začasno izbrani časovni trenutek
      else                                % če pretekli časovni trenutek ne obstaja
        break;                            % prekini zajemanje izmerkov
      end
    else                                  % če so zbrani vsi želeni izmerki
      break;                              % prekini zajemanje izmerkov
    end
  end
end
```

trenutkov v času t vedno imeli na voljo vsaj 200 izmerkov. Simulacijo smo izvedli pri vseh predvidenih hitrosti mobilnega oddajnika in vsakokrat izračunali vrednosti $\overline{RMSE}$ in 95-odstotne intervale zaupanja.

6.4.4 Analiza rezultatov in diskusija

Rezultati izdelave kart RP so prikazani na sliki 35. Slike 35(a), 35(c) in 35(e) prikazujejo referenčne statične rezultate, pridobljene z izračunom kart RP zgolj iz izmerkov na voljo v časovnem trenutku t, slike 35(b), 35(d) in 35(f) pa prikazujejo rezultate izdelave kart RP z dodatno uporabo izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov. Iz referenčnih rezultatov je razvidno, da hitrost mobilnega oddajnika nima vpliva na izdelavo kart RP, v kolikor se uporabi izmerke istega časovnega trenutka. Ne glede na število izmerkov najslabšo natančnost dosega metoda LIvE. Krigingova metoda in metoda IDW so si po natančnosti zelo podobne do 30 izmerkov, kjer začne metoda IDW kazati znake zasičenja. Za razliko od Krigingove metode ne pridobiva več na natančnosti z naraščanjem števila izmerkov. Metoda IDW2 je druga najnatančnejša metoda, ko je za izdelavo kart RP na voljo malo izmerkov, medtem ko zaradi hitrega izboljševanja natančnosti z naraščanjem števila

Tabela 3: *Število izbranih izmerkov v setih za izdelavo kart RP v primeru dinamičnega dodajanja izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov za N_d = 200 izmerkov.*

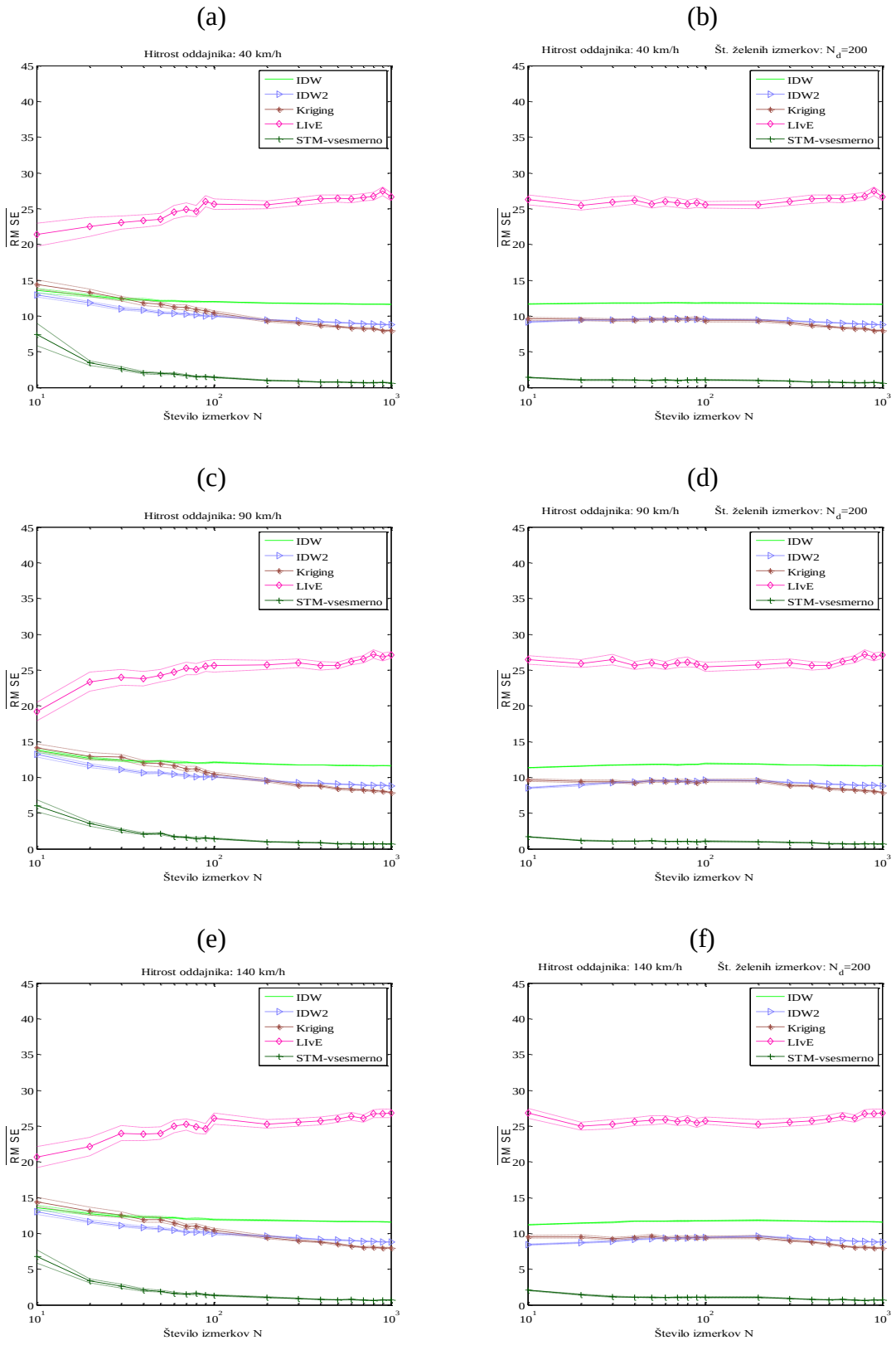
Časovni trenutek	Število izbranih izmerkov v setih za izdelavo kart RP glede na časovne trenutke																		
	Število izmerkov na voljo N																		
t	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	Število izbranih izmerkov iz prejšnjih časovnih trenutkov																		
t-1 s	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-2 s	10	20	30	40	50	60	60	40	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-3 s	10	20	30	40	50	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-4 s	10	20	30	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-5 s	10	20	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-6 s	10	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-7 s	10	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-8 s	10	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-9 s	10	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-10 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-11 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-12 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-13 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-14 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-15 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-16 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-17 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-18 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t-19 s	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Skupaj	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

izmerkov pri 200 izmerkih premaga Krigingovo metodo. Kot najbolj natančna se je izkazala metoda STM-v, ki izdela najnatančnejše karte RP ne glede na število izmerkov.

Iz rezultatov na slikah 35(b), 35(d) in 35(f) je razvidno, da lahko dodatna uporaba prostorsko porazdeljenih izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov izboljša natančnost izdelanih kart RP. V primeru, ko je za izdelavo kart RP na voljo manj kot 100 izmerkov, je izboljšanje natančnosti opazno pri vseh metodah, razen pri metodi LIvE.

Metoda LIvE z uporabo izmerkov iz prejšnjih časovnih trenutkov dosega slabše rezultate kot v referenčnem primeru, saj slabše oceni lokacijo oddajnika. Krigingova metoda je natančnejša od metode IDW ne glede na število izmerkov, vendar še vedno nekoliko slabša od metode IDW2 do približno 50 izmerkov. Podobno kot v referenčnem primeru začne pri 200 izmerkih hitro pridobivati na natančnosti in premaga metodo IDW2, medtem ko je metoda STM-v najnatančnejša.

Za interpretacijo doseženih rezultatov postopkov izdelave kart RP je treba poznati, v katerih točkah se je glede na lokacijo v časovnem trenutku t nahajal mobilni oddajnik v preteklih časovnih trenutkih in kolikšna je bila pri tem razlika v razdalji. Te informacije so v tabeli 4 zbrane za različne hitrosti mobilnega oddajnika in obravnavane časovne trenutke. Pri hitrosti 40 km/h se je mobilni oddajnik dlje časa nahajal v istih točkah področja, kjer je bil med 2 in 3 sekunde. Zaradi tega se ob jemanju izmerkov iz prejšnjih časovnih trenutkov v izdelavo kart RP ni vnašalo bistvene napake. Ko je bilo v časovnem trenutku t na voljo $N = 10$ izmerkov, je bil glede na tabelo 3 najbolj oddaljen časovni



Slika 35: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu* $\overline{RMSE}$ *in 95-odstotnih CI, doseženih, z uporabo dinamičnih prostorsko porazdeljenih izmerkov.*

trenutek, iz katerega so se upoštevali izmerki, 19 sekund nazaj. Takrat je bil oddajnik 190 m oziroma 7 točk ločljivosti karte RP stran od točke, v kateri je bil v trenutku t. Pri hitrosti 90 km/h se je v istih točkah nahajal med 1 in 2 sekundi. V najbolj oddaljenem

Tabela 4: *Lokacija mobilnega oddajnika glede na zaporedne točke železniške proge, v različnih časovnih trenutkih, ter takratne razlike v razdalji do točke na železniški progi, kjer se nahaja mobilni oddajnik v trenutku* t.

	40 km/h		90 km/h		140 km/h	
Časovni trenutek	Točka na žel. progi	Razlika v razdalji [m]	Točka na žel. progi	Razlika v razdalji [m]	Točka na žel. progi	Razlika v razdalji [m]
t	105	0	105	0	105	0
t-1 s	105	0	104	25	103	50
t-2 s	105	0	103	50	102	75
t-3 s	104	25	102	75	101	103
t-4 s	104	25	101	103	100	135
t-5 s	103	50	101	103	98	190
t-6 s	103	50	100	135	97	224
t-7 s	102	75	99	158	96	246
t-8 s	102	75	98	190	95	280
t-9 s	102	75	98	190	94	313
t-10 s	101	103	97	224	92	369
t-11 s	101	103	96	246	91	391
t-12 s	101	103	95	280	90	425
t-13 s	100	135	95	280	88	447
t-14 s	100	135	94	313	87	481
t-15 s	100	135	93	335	86	537
t-16 s	99	158	92	369	84	581
t-17 s	99	158	91	391	83	615
t-18 s	99	158	90	425	82	637
t-19 s	98	190	90	425	80	683

časovnem trenutku je bil 425 m oziroma 15 točk ločljivosti karte RP stran. Pri hitrosti 140 km/h se je oddajnik premikal po eno oziroma dve točki karte RP naenkrat in je bil 637 m oziroma 20 točk ločljivosti karte RP stran od svoje lokacije v trenutku t. Glede na to, da je karte RP sestavljalo 103041 točk, so razlike v razdaljah med lokacijami oddajnika v obravnavanih 20 časovnih trenutkih v primerjavi z velikostjo celotnega geografskega področja relativno majhne. Poleg tega so se z večanjem N zgolj še zmanjševale. Ko je bilo na voljo $N = 20$ izmerkov, so se izmerki preteklih časovnih trenutkov jemali do 9 časovnih trenutkov nazaj. Takrat so bile glede na hitrosti oddajnika razlike v lokaciji že 75 m, 190 m in 313 m, pri $N = 50$ pa so se zmanjšale na 25 m, 75 m in 103 m oziroma na 1, 3 ter 4 točke ločljivosti karte RP.

Kot je razvidno iz rezultatov na slikah 35(b), 35(d) in 35(f), takšne razlike v razdaljah oziroma hitrostih mobilnega oddajnika pri uporabi izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov na tako velikem geografskem področju nimajo bistvenega vpliva na izdelavo kart RP oddajnika z vsesmerno anteno. Iz tega razloga je ob počasi se premikajočih ali statičnih oddajnikih z vsesmerno anteno za izboljšavo natančnosti kart RP smiselno uporabljati izmerke iz prejšnjih časovnih trenutkov.

Da bi podrobneje razložili dosežene rezultate obravnavanih postopkov izdelave kart RP, so v prilogi priloge F prikazane absolutne napake z njimi izdelanih kart RP v primerjavi z referenčno karto RP. Iz slik 35(a), 35(c) in 35(e), absolutnih napak izdelanih kart RP z izmerki časovnega trenutka t in absolutnih napak izdelanih kart RP, ko je v časovnem trenutku izdelave kart RP na voljo enako ali večje število izmerkov od želenega

števila izmerkov, je razvidno, da se z naraščanjem števila izmerkov ob sočasnem naraščanju njihove prostorske porazdelitve natančnost izdelanih kart RP izboljšuje pri vseh postopkih, razen pri metodi LIvE. Na poslabšanje metode LIvE v največji meri vpliva naraščanje števila izmerkov, ki v ocenjevanje parametrov oddajnika vnašajo šum zaradi vplivov okolja, ki jih metoda ne more upoštevati. Ta ob napačno ocenjeni lokaciji in oddajni moči oddajnika privede do nenatančno izdelanih kart RP. Če se pri izdelavi kart RP z metodo LIvE dodatno uporabi izmerke preteklih časovnih trenutkov, se v postopek njenega delovanja vnese dodatne napake, zaradi česar je metoda še slabša. To potrjujejo tudi dosežene absolutne napake izdelanih kart RP z izmerki časovnega trenutka t in izmerki preteklih časovnih trenutkov, ki so prikazane v prilogi F.

Ravno obratno je pri ostalih obravnavanih postopkih izdelave kart RP. Kot smo opisali v poglavju 3.2, so metode IDW, IDW2 in Krigingova metoda interpolacijski postopki, za katere je značilno, da se njihovo delovanje bistveno izboljšuje z naraščanjem števila izmerkov. Za njihovo natančno delovanje je glede na rezultate na slikah 35(a), 35(c) in 35(e) treba veliko več kot 200 prostorsko porazdeljenih izmerkov. V primeru uporabe izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov se v točkah kart RP, kjer so na voljo izmerki, res naredi večjo napako, kot če bi se izmerki nanašali na časovni trenutek t, vendar je zaradi njihovega večjega števila in prostorske porazdelitve izdelana karta RP natančnejša. Ta pojav je mogoče pojasniti na sledeč način. Če se uporabi izmerke iz prejšnjih časovnih trenutkov, se pri tako velikem geografskem področju v primerjavi s številom izmerkov pri določanju uteži za izračun vrednosti jakosti radijskega signala na večini točk karte RP naredi bistveno manjšo napako, kot če se karto RP izdela iz zelo majhnega števila izmerkov časovnega trenutka t. Z uporabo natančnejših uteži je izdelana karta RP po pričakovanjih natančnejša. Pri metodi STM-v izboljšanje rezultatov izhaja predvsem iz sprotnega umerjanja modela za opis radijskega signala na izmerke in uporabi prilagojenega lokalizacijskega postopka na scenarij izdelave karte RP. Ker izvedba metode STM-v uporablja lokalizacijski postopek na podlagi parametra TA s korakom 553,5 m, zgolj pri velikih hitrostih mobilnega oddajnika v najbolj oddaljenih časovnih trenutkih vnaša opazne napake. Zaradi uporabe linearne metode najmanjših kvadratov za umerjanje modela za opis razširjanja radijskega valovanja se ves čas umerja na izmerke, tako da se kar najbolje prilega večini izmerkov ne glede na časovne trenutke. Na ta način se umeri, kot da izdeluje povprečno karto RP več časovnih trenutkov. Takšne karte RP so zaradi večje prostorske porazdeljenosti izmerkov uporabljenih za izdelavo bolj natančne, kot če bi metoda STM-v izdelala karte RP z uporabo zelo majhnega števila izmerkov.

7 Pridobivanje izmerkov prostorsko porazdeljenih naprav MCD po načinu soudeležbe

Pridobivanje izmerkov prostorsko porazdeljenih naprav MCD po načinu soudeležbe je pri izdelavi kart RP zelo pomembno. Izvede se lahko preko žičnih, brezžičnih in mešanih povezav. Pri tem mobilna omrežja predstavljajo pomemben povezovalni člen, saj z radijskim signalom pokrivajo prostrana področja. V določenih primerih značilnosti naprav MCD in mobilnih omrežij predstavljajo komunikacijske prepreke, ki jih je treba primerno obiti. Iz tega razloga poglavje 7.1 obravnava problematiko pridobivanja izmerkov naprav MCD preko mobilnih omrežij. Izvedene rešitve za pridobivanje izmerkov naprav MCD po načinu soudeležbe in na zahtevo kart RO v zunanjih omrežjih zajema poglavje 7.2.

7.1 Problematika pridobivanja izmerkov naprav MCD preko mobilnih omrežij

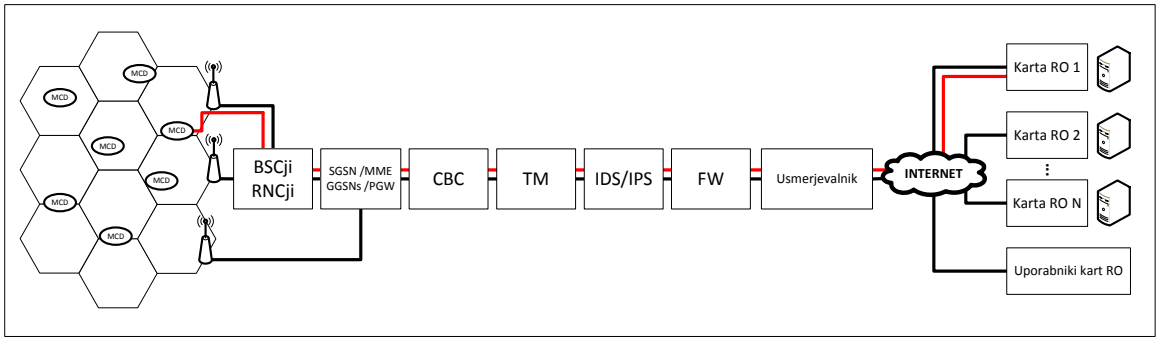
Vse naprave MCD nimajo možnosti neposrednega povezovanja v mobilna omrežja in morajo za prenos izmerkov do kart RO preko mobilnih omrežij uporabiti primerne komunikacijske prehode. Povezovanje naprav MCD s komunikacijskimi prehodi predstavlja eno izmed omejitev v prenosu izmerkov do kart RO. Ta omejitev pride še posebej do izraza pri povezovanju senzorskih vozlišč z mobilnimi napravami v vlogi komunikacijskih prehodov. Sodobni mobilni terminali imajo lahko poleg raznolikih senzorjev in komunikacijskih vmesnikov za povezovanje z mobilnimi omrežji tudi komunikacijske vmesnike za povezovanje s senzorskimi vozlišči [84-86]. Takšni vmesniki so neuporabni za iskanje, odkrivanje in komunikacijo s senzorskimi vozlišči v bližini, v kolikor mobilne naprave v svoji programski opremi ne podpirajo tudi njihovih komunikacijskih protokolov. Zaradi raznolikosti komunikacijskih protokolov, konstantnega pojavljanja novih mobilnih naprav in senzorskih vozlišč ter njihove strojne in programske opreme obstajajo mnoge kombinacije njihovega povezovanja. Univerzalne naprave, ki bi podprle vse kombinacije, ne obstajajo. Posledično problematiko pri prenosu izmerkov naprav MCD do kart RO predstavljajo predvsem omejitve strojne in programske opreme.

Naprave MCD za komunikacijo s kartami RO potrebujejo primerno programsko opremo, vendar vse naprave MCD ne morejo uporabljati iste programske opreme. V praksi se velikokrat uporablja centralizirano ali distribuirano vmesno programsko opremo, ki je izvedena bodisi v okviru mobilnih omrežij ali izven njih. Za mobilne operaterje, ki želijo ponujati napredne storitve na podlagi izmerkov naprav MCD, je primernejša centralizirana izvedba vmesne programske opreme, saj imajo na takšen način nad njimi popolno kontrolo. Drugim ponudnikom ali konkurenčnim operaterjem lahko potencialno omogočijo ali onemogočijo dostop do izmerkov in zlahka zaobidejo vse težave na prenosni poti preko mobilnega omrežja. V kolikor se vmesna programska oprema izvede izven mobilnih omrežij, pride do izraza problematika prenosa izmerkov preko mobilnih omrežij, ki jo je treba primerno obiti.

Na uspešno vzpostavitev komunikacijskih povezav med napravami MCD in kartami

RO v veliki meri vplivajo lastnosti mobilnih omrežij. Mobilna omrežja sestavljajo stacionarni omrežni elementi in mobilne naprave, povezane v vodovno in paketno komutirani del jedrnega omrežja. Mobilna omrežja so bila prvotno zasnovana za prenos govora in ne za podatkovni prenos velike količine manjših podatkov, ki jih proizvajajo sodobne mobilne naprave. Zaradi tega v podatkovni prenos izmerkov naprav MCD do kart RO vnašajo zakasnitev in povzročajo številne težave s komunikacijskim dostopom do izmerkov naprav MCD iz zunanjih omrežij. Poleg tega mobilna omrežja zaradi varnostnih mehanizmov izvajajo številne komunikacijske omejitve na prenosni poti, njihovi jedrni elementi pa so omejeni z licencami, ki določajo dejansko število povezav, ki jih hkrati lahko omogočajo. Kljub temu se njihova primerno konfigurirana splošna paketna radijska storitev GPRS, s paketno orientirano prenosno infrastrukturo, lahko uporablja za učinkovit dostop do izmerkov naprav MCD in njihov prenos do kart RO. Za uporabo GPRS mora vsaka naprava MCD, povezana v mobilno omrežje GSM ali UMTS, biti pripeta v paketno omrežje in vzpostaviti vsaj eno namensko podatkovno sejo oziroma kontekst protokola paketnih podatkov (angl. packet data protocol, PDP). V primeru povezave v omrežje LTE mora biti pripeta v paketno omrežje in vzpostaviti vsaj en nosilec povezovalno orientiranega prenosnega omrežja (angl. connection-oriented transmission network bearer, EPS). Na ta način naprava MCD pridobi statičen ali dinamičen naslov IP, določijo se značilnosti podatkovnega pretoka preko mobilnega omrežja in kvaliteta storitev. Usmerjanje prometa preko mobilnega omrežja do privatnih ali javnih zunanjih omrežij se določi glede na izbrano dostopovno točko (angl. access point name, APN) ob vzpostavljanju kontekstov [87]. Eno izmed omejitev v komunikaciji med napravami MCD povezanih v mobilna omrežja in kartami RO v zunanjih omrežjih predstavlja dodeljevanje naslovov IP v mobilnih omrežjih, ki se v operaterskem okolju izvaja na različne načine. Napravam MCD, ki vzpostavijo kontekste podatkovnih povezav v mobilno omrežje, se različne tipe IP naslovov lahko dodeli v različnih napravah mobilnega omrežja, npr. v podpornem vozlišču za prehod GPRS (angl. gateway GPRS support node, GGSN), v registru domačih naročnikov, s strežnikom protokola za dinamično konfiguriranje gostiteljev DHCP in strežnikom za komutirane uporabniške storitve z oddaljeno avtentikacijo RADIUS. Pri tem veliko operaterjev uporablja prevajanje omrežnih naslovov NAT, ki v omejenem času dinamično prevajajo vire komunikacijskih sej med več mobilnimi napravami. Napravam MCD se tako dodelijo začasni privatni naslovi IP, zaradi česar naprave niso ves čas vidne iz zunanjih omrežij.

Poleg uporabe NAT mobilna omrežja zaradi varnosti, neželenih sporočil in drugih razlogov izvajajo komunikacijske restrikcije na različnih nivojih in s tem onemogočajo povezovanje proti napravam MCD iz zunanjih omrežij. Za boljše razumevanje problematike slika 36 prikazuje običajno komunikacijsko pot med napravami MCD, povezanimi v mobilno omrežje, in kartami RO v zunanjih omrežjih. V primeru



Slika 36: *Običajna komunikacijska pot med kartami RO v zunanjih omrežjih in napravami MCD, povezanimi v mobilno omrežje.*

tehnologije GSM se naprave MCD za izvajanje paketnega prenosa v mobilno omrežje povezujejo preko baznih postaj, krmilnikov baznih postaj, strežnega podpornega vozlišča GPRS (angl. serving GPRS support node, SGSN) in vozlišča GGSN. Pri UMTS se naprave MCD do SGSN in GGSN povezujejo preko baznih postaj NodeB in krmilnikov radijskega omrežja RNC, medtem ko se v primeru LTE do SGSN in GGSN povežejo preko postaj eNodeB, entitete uporabljanja mobilnosti MME in prehoda paketnega podatkovnega omrežja PGW. Od SGSN in MME ter GGSN in PGW naprej podatkovni prenos prečka različne strojne in programske elemente za zaračunavanje vsebine (angl. content based charging, CBC), upravljanje prometa (angl. traffic management, TM), sistema za odkrivanje vdorov (angl. intrusion detection system, IDS), sistema za preprečevanje vdorov (angl. intrusion prevention system, IPS), različnih požarnih zidov (angl. firewall, FW) in usmerjevalnikov. Predvsem elementi za izvajanje IDS, IPS in požarni zidovi predstavljajo glavno problematiko, da karte RO v zunanjih omrežjih ne morejo zahtevati pridobivanja izmerkov iz naprav MCD na zahtevo, kadar le-te potrebujejo. Iz tega razloga se komunikacijske seje večinoma vzpostavljajo zgolj iz smeri naprav MCD proti kartam RO. Tudi v tem primeru se lahko zgodi, da mobilna omrežja zaradi deljenja resursov in zagotavljanja varnosti nepričakovano zaprejo uspešno vzpostavljene seje, npr. po izteku časovnih števcev podatkovnih povezav.

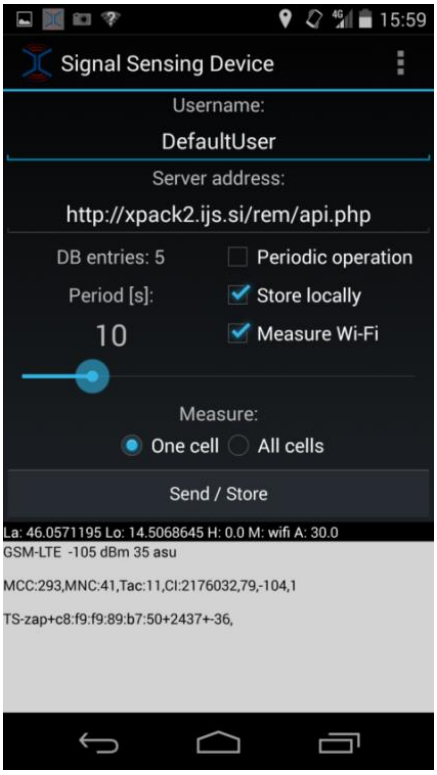
7.2 Izvedene rešitve za pridobivanje izmerkov naprav MCD po načinu soudeležbe

Mobilne naprave in senzorska vozlišča so zaradi razširjenosti, prostorske razpršenosti in raznolikih komunikacijskih vmesnikov zelo primerne za pridobivanje izmerkov jakosti radijskih signalov po načinu soudeležbe. Obstoječe rešitve na področju pridobivanja izmerkov prostorsko porazdeljenih mobilnih naprav in senzorskih vozlišč, ki imajo lahko vlogo naprav MCD, razdelimo v dva sklopa. Prvi sklop rešitev se nanaša na pridobivanje senzorskih izmerkov mobilnih naprav oziroma mobilnih senzorskih omrežij [88-93], medtem ko se drugi sklop rešitev nanaša na pridobivanje izmerkov senzorskih vozlišč preko komunikacijskih povezav z mobilnimi napravami [94-100].

Čeprav mobilne naprave še ne omogočajo merjenja jakosti signalov neodvisno od brezžične tehnologije in se njihove obstoječe komunikacijske rešitve ne morejo enostavno implementirati v omrežja senzorskih vozlišč, lahko pomanjkljivosti v strojni in programski opremi že danes premostimo. V nadaljevanju prikazujemo lastne rešitve uporabe mobilnih naprav za omogočanje pridobivanja izmerkov jakosti radijskega signala po načinu soudeležbe. V prvem primeru ima mobilna naprava vlogo naprave MCD, v drugem primeru pa vlogo komunikacijskega prehoda za senzorska vozlišča v vlogi naprav MCD. Na koncu prikažemo še rešitev za enostavno pridobivanje izmerkov na zahtevo kart RO v zunanjih omrežjih.

7.2.1 Mobilna naprava v vlogi naprave MCD

Za prikaz pridobivanja izmerkov jakosti radijskega signala po načinu soudeležbe mobilnih naprav v vlogi naprav MCD smo za operacijski sistem Android razvili aplikacijo za zajem jakosti signala brezžičnih tehnologij mobilnih in WLAN omrežij. Uporabniški vmesnik razvite aplikacije je prikazan na sliki 37. Za pravilno delovanje omogoča vpis uporabniškega imena oziroma identifikacije naprave MCD in vpis naslova strežnika, kamor naj se izmerki pošiljajo. Poleg tega omogoča izbiro, ali naj se zajemajo in pošiljajo informacije o vseh vidnih celicah mobilnega omrežja in dostopovnih točkah omrežij WLAN ali zgolj strežna celica mobilnega omrežja in dostopovna točka omrežja WLAN, na katerega je naprava povezana. Ne glede na izbrano, ročno ali periodično



Slika 37: *Uporabniški vmesnik aplikacije, razvite za pridobivanje izmerkov za izdelavo kart RP po načinu soudeležbe mobilnih naprav.*

zajemanje in pošiljanje izmerkov na strežnik, aplikacija omogoča tudi njihovo shranjevanje v lokalno podatkovno bazo SQLite. V primeru izpada podatkovne povezave z mobilnim omrežjem se izmerki do kart RO lahko dostavijo naknadno.

V času delovanja aplikacije se izvaja periodično pridobivanje najnatančnejše lokacije mobilne naprave, ki jo operacijski sistem Android lahko vrne na podlagi informacij senzorja GPS, vidnih celic mobilnega omrežja in omrežij WLAN. Za zajem vseh parametrov strežne celice in vseh parametrov sosednjih celic se uporablja metoda *getAllCellInfo()* objekta tipa *TelephonyManager*, ki naj bi vračala raznolike informacije o strežni celici in zaznanih sosednjih celicah mobilnega omrežja. Pri tem velikokrat pride do izraza problematika Android plasti za delo z radijem RIL [89], zaradi katere različni parametri o zaznanih celicah niso na voljo. Ugotovili smo, da je dostopnost posameznih parametrov celic zelo odvisna od RIL, ki predstavljata abstrakcijo med komunikacijskimi storitvami in radijskimi vmesniki in je na eni izmed podplasti prilagojena proizvajalcem mobilnih naprav. V kolikor proizvajalci v RIL in nižje ležečih plasteh ne omogočijo zajema in prenosa parametrov iz komunikacijskih vmesnikov, je do slednjih nemogoče dostopati tudi preko vmesnika za aplikacijsko programiranje. Med testom aplikacije je problematika RIL prišla do izraza predvsem pri mobilnih napravah proizvajalca Samsung, medtem ko težav nismo zaznali na napravah proizvajalcev HTC, Sony Ericsson in LG. Ker metoda *getAllCellInfo()* ne vrača jakosti radijskega signala v metriki ASU (angl. arbitrary strength unit), ki se pogosto uporablja za prikaz jakosti signala na mobilnih napravah in v izogib izpostavljeni problematiki, se za izračun jakosti signala strežne celice uporablja algoritem 3. Ta temelji na uporabi asinhrone metode *onSignalStrengthsChanged()*, ki se izvaja ob zaznanih spremembah jakosti radijskih signalov.

Podobno kot z metodo *getAllCellInfo()* v primeru zaznavanja celic mobilnih omrežij se z metodo *getScanResults()* objekta tipa *WifiManager* izvede zajem informacij o zaznanih omrežij WLAN v bližini mobilne naprave. Za vsako dostopovno točko so na

Algoritem 3: *Algoritem za izračun jakosti radijskega signala strežne celice v odvisnosti od tipa mobilnega omrežja, v katerega je povezana mobilna naprava.*

```
public void onSignalStrengthsChanged(SignalStrength signalStrength){
% objekt tipa SignalStrength hrani informacije o izmerjenih jakostih radijskih signalov
private TelephonyManager tManager;
private List<CellInfo> cellinoflist;
private int networkType;          % tip mobilnega omrežja
private int Prx_dBm;              % jakost signala celice v dBm
private int asu;                  % jakost signala celice v ASU

% pridobi se objekt, ki hrani raznolike informacije o zaznanih celicah mobilnega omrežja
tManager = (TelephonyManager)getSystemService(Context.TELEPHONY_SERVICE);
% pridobi se informacija o tipu mobilnega omrežja, v katerega je povezana mobilna naprava
networkType = tManager.getNetworkType();
% pridobi se lista objektov zaznanih celic mobilnega omrežja, v kateri so na voljo tako preostali parametri strežne
celice, kot tudi vse informacije o parametrih sosednjih celic
cellinoflist = tManager.getAllCellInfo();

% izračun jakosti radijskega signala strežne celice, glede na tip mobilnega omrežja
switch(networkType) {
case 1: % če je mobilna naprava povezana v GPRS
   asu = signalStrength.getGsmSignalStrength();          % izračun jakosti v ASU
   Prx_dBm = -113 + 2*asu;                               % izračun jakosti v dBm
case 2: % če je mobilna naprava povezana v EDGE
   asu = signalStrength.getGsmSignalStrength();          % izračun jakosti v ASU
   Prx_dBm = -113 + 2*signalStrength.getGsmSignalStrength();  % izračun jakosti
case 3: % če je mobilna naprava povezana v omrežje UMTS                          v dBm
   asu = signalStrength.getGsmSignalStrength();          % izračun jakosti v ASU
   Prx_dBm = -113 + 2*asu;                               % izračun jakosti v dBm
case 8: % če je mobilna naprava povezana v omrežje HSDPA
   asu = signalStrength.getGsmSignalStrength();   % izračun jakosti v ASU
   Prx_dBm = -113 + 2*asu;                        % izračun jakosti v dBm
case 9: % če je mobilna naprava povezana v omrežje HSUPA
   asu = signalStrength.getGsmSignalStrength();   % izračun jakosti v ASU
   Prx_dBm = -113 + 2*asu;                        % izračun jakosti v dBm
case 10: % če je mobilna naprava povezana v omrežje HSPA
   asu = signalStrength.getGsmSignalStrength();   % izračun jakosti v ASU
   Prx_dBm = -113 + 2*asu;                        % izračun jakosti v dBm
case 13: % če je mobilna naprava povezana v omrežje LTE
   ltestr = signalStrength.toString();
   parts = ltestr.split(" ");
   Prx_dBm = Integer.parseInt(parts[9]);          % izračun jakosti v dBm
   asu = Prx_dBm + 140;                           % izračun jakosti v ASU
case 15: % če je mobilna naprava povezana v omrežje HSPA+
   asu = signalStrength.getGsmSignalStrength();   % izračun jakosti v ASU
   Prx_dBm = -113 + 2*asu;                        % izračun jakosti v dBm
}
}
```

voljo:

- naslov dostopovne točke,
- ime dostopovne točke SSID,
- informacije o uporabljeni avtentifikaciji in enkripciji,
- frekvenca, na kateri dostopovna točka oddaja,
- izmerjena jakost signala v dBm.

Aplikacija za pošiljanje izmerkov do strežnika v zunanjem omrežju uporablja protokol HTTP in metodo POST. Zaradi optimizacije števila znakov se izmerki in ostale podporne informacije pred pošiljanjem na strežnik pretvorijo v tekstovni niz, ločen z vejico. Uporabljena splošna oblika niza za pošiljanje izmerkov proti kartam RO vključuje naslednje informacije:

- *timestamp:* časovni žig zajetja izmerka v obliki,
  - (‘dan v tednu’ ‘mesec’ ‘dan’, ‘ura:minuta:sekunda’ ‘časovni pas’ ‘leto’)
  - Primer: `Tue Aug 26 15:58:47 CEST 2014`
- *longitude:* zemljepisna dolžina lokacije zajetja izmerka v stopinjah koordinatnega sistema WGS84,
  - (`NaN, 14.5068645`)
  - Primer: `14.5068645`
- *latitude:* zemljepisna širina lokacije zajetja izmerka v stopinjah koordinatnega sistema WGS84,
  - (`NaN, 46.0571195`)
  - Primer: `46.0571195`
- *height:* nadmorska višina lokacije zajetja izmerka v metrih,
  - (`NaN, 230.0`)
  - Primer: `230.0`
- *loc_method:* tip lokalizacijske metode,
  - (`NaN, GPS, NetworkBased`,…)
  - Primer: `GPS`
- *loc_accuracy:* natančnost lokalizacije v metrih,
  - (`NaN, 10.0`)
  - Primer: `10.0`
- *tcSystem:* tip naprave MCD,
  - (`smartphone`, `sensornode`, ...)
  - Primer: `SmartPhone`
- *rxID:* identifikacija naprave MCD, npr. mednarodna identiteta mobilne naprave, identifikacijska številka platforme VESNA itd.,
  - (`NaN, 353490062179144`)
  - Primer: `353490062179144`
- *measuredSystem:* komunikacijska tehnologija, na katero se nanaša izmerek,
  - (`2G`, `3G`, `4G`, `WLAN`, `DVB-T`, ...)
  - Primer: `4G`
- *measuredValue:* vrednost izmerka jakosti radijskega signala v dBm ali dB,
  - (`NaN, -109`)
  - Primer: `-109`
- *measuredValueType:* metrika za predstavitev jakosti izmerka,
  - (`NaN, RSSI, RSRP, RSCP, EcNo, RSRQ`,...)
  - Primer: `RSRP`

- *frequencyMHz:* nosilna frekvenca v MHz,
  - (`NaN, 900.000`)
  - Primer: `NaN`
- *bandwidthMHz:* pasovna širina sistema v MHz,
  - (`NaN, 5.000`)
  - Primer: `NaN`
- *operatorID:* unikatna identifikacijska koda operaterja,
  - (mobilna deželna koda + koda mobilnega omrežja)
  - Primer: `293+41`
- *cellID:* identifikacija merjene celice oziroma oddajnika,
  - (NaN, Cell ID v primeru 2G/3G/4G omrežij, WLAN SSID v primeru WLAN omrežij)
  - Primer: `20125`

Pri tem v vseh poljih niza vrednost NaN pomeni, da informacija ni na voljo. Primer celotnega podatkovnega niza s protokolom HTTP, poslanega iz mobilne aplikacije na strežnik, je sledeč:

```
String podatkovni_niz = "Tue Aug 26 15:58:47 CEST 2014, 14.5068645,
46.0571195, 0.0, GPS, 30.0, smartphone, 353490062179144, 4G, -109, RSRP,
NaN, NaN, 293+41, 20125";
```

7.2.2 Mobilna naprava v vlogi komunikacijskega prehoda

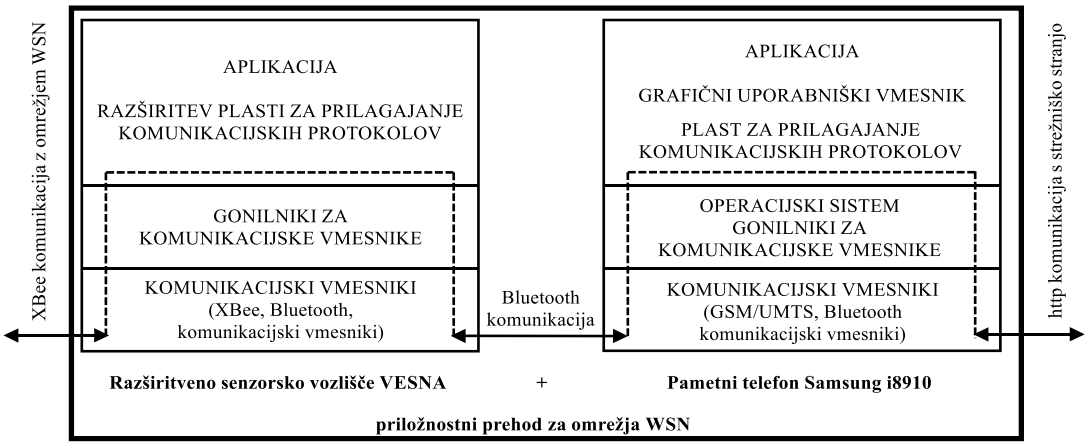
Mobilno napravo smo uporabili za izvedbo komunikacijskega prehoda za senzorska omrežja, ki ga za pošiljanje izmerkov kartam RO uporabljajo senzorska vozlišča v vlogi naprav MCD. Značilen predstavnik takšnih senzorskih vozlišč je modularna senzorska platforma VESNA, ki z osnovnimi radijskimi vmesniki omogoča zajem RSSI na frekvencah 868 MHz in 2,4 GHz, medtem ko se razširitev njenega senzorskega dela lahko uporablja za spremljanje radijskega spektra neodvisno od brezžične tehnologije. Širokopasovni sprejemnik na razširitveni plošči omogoča zajem jakosti radijskega signala na frekvencah med 470 MHz in 870 MHz, ozkopasovni sprejemnik pa na frekvencah med 780 MHz in 930 MHz ter na frekvencah med 2,40 GHz in 2,44 GHz [101,102].

Zasnovo in značilnosti prehodov za senzorska vozlišča smo podrobno obravnavali v [12], kjer smo predstavili, da se fiksne in priložnostne prehode najlaže izvede na splošnih, pogosto uporabljenih napravah, skladnih s strukturo na sliki 38. Med takšne naprave sodijo tudi mobilne naprave, ki na eni strani lahko vsebujejo vmesnike za komunikacijo s senzorskimi vozlišči, na drugi strani pa vmesnike za povezovanje v zunanja omrežja.

Ker večina mobilnih naprav dandanes še nima vgrajenih komunikacijskih vmesnikov, prilagojenih za komunikacijo s senzorskimi vozlišči, lahko problematiko rešimo na več načinov. Kompatibilne komunikacijske vmesnike se lahko izvede na vezjih, ki se v mobilnih napravah uporabljajo namesto kartic SD oziroma se priključijo v reže univerzalnega serijskega vodila USB. Veliko raziskav poteka tudi v smeri uporabe okrnjenih verzij protokola IP na senzorskih vozliščih, npr. protokolov uIP in 6LoWPAN [103], da bo v prihodnosti komunikacija med senzorskimi vozlišči in mobilnimi napravami v vlogi prehodov oziroma med napravami MCD in kartami RO v celoti bazirala na različnih izvedbah protokola IP.



Slika 38: *Splošna struktura komunikacijskega prehoda za senzorska omrežja.*



Slika 39: *Praktična izvedba komunikacijskega prehoda za senzorska omrežja na podlagi uporabe pametnega telefona in platforme VESNA.*

Za prikaz, da je kljub pomanjkanju prilagojenih komunikacijskih vmesnikov že dandanes mogoče uporabljati mobilne naprave kot prehode za senzorska vozlišča, smo izbrali pametni telefon Samsung i8910 in ga s pomočjo senzorskega vozlišča VESNA s funkcionalnostjo prehoda navidezno razširili, da deluje kot priložnostni prehod za senzorska omrežja. Kot prikazuje slika 39, smo za izvedbo komunikacije med izbranima napravama uporabili tehnologijo Bluetooth in razširili plast za prilagajanje komunikacijskih protokolov, ki bi bila sicer v celoti izvedena na pametnem telefonu.

Glede funkcionalnosti izvedenega prehoda smo se omejili na pridobivanje izmerkov in metapodatkov senzorskih vozlišč, njihovo obogatitev, shranjevanje in pošiljanje v podatkovno bazo na strežniški strani. Za komunikacijo s testnimi senzorskimi vozlišči v bližini izvedenega prehoda smo predvideli uporabo XBee radijskih vmesnikov z namensko razvitim omrežnim protokolom, za povezovanje na strežnik pa uporabo protokola HTTP, preko GPRS, EDGE ali 3G povezave z mobilnim omrežjem.

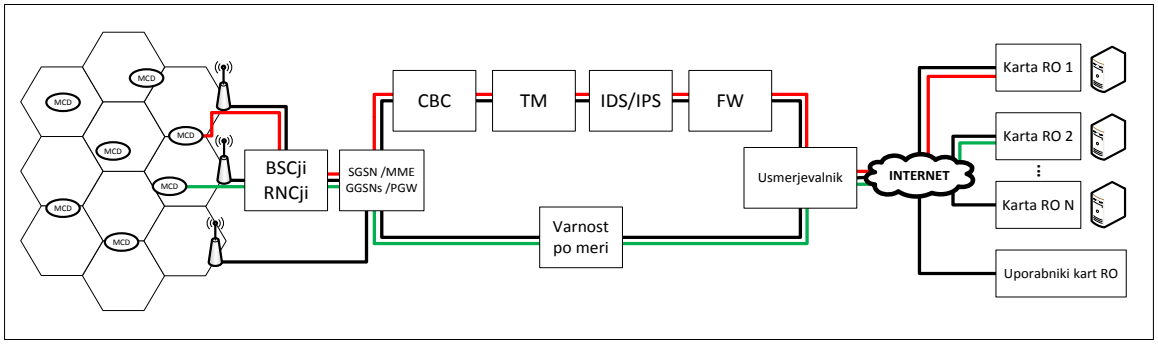
Programska oprema izvedenega prehoda sestoji iz treh delov, realiziranih na aplikacijskem nivoju. Prvi in drugi del programske opreme skupaj tvorita plast za prilagajanje komunikacijskih protokolov. Prvi del se na pametnem telefonu izvaja kot Midlet (J2Me aplikacija) in skrbi za pretvorbo med sporočili HTTP in Bluetooth. Drugi del se kot aplikacija programskega jezika C izvaja na platformi VESNA in v primeru komunikacije s senzorskimi vozlišči skrbi za pretvorbo med Bluetooh in XBee sporočili.

Tretji del programske opreme predstavlja uporabniški vmesnik pametnega telefona.

Za prenos izmerkov in metapodatkov senzorskih vozlišč do strežnikov v zunanjih omrežjih se je izvedba prehoda izkazala kot sprejemljiva rešitev, vse dokler mobilne naprave ne bodo same po sebi imele vgrajenih kompatibilnih komunikacijskih vmesnikov za komunikacijo s senzorskimi vozlišči [12].

7.2.3 Pridobivanje izmerkov na zahtevo kart RO v zunanjih omrežjih

Problem vzpostavljanja komunikacijskih sej iz zunanjih omrežij proti napravam MCD lahko rešimo v dogovoru z mobilnimi operaterji. Ti lahko namensko prilagodijo varnostna pravila za komuniciranje preko običajne komunikacijske poti mobilnega omrežja, kar je na sliki 40 prikazano z rdečo barvo. Še enostavnejšo rešitev predstavlja uporaba privatnih dostopovnih točk APN, kar je na sliki 40 prikazano z zeleno barvo. Privatne APN sicer niso namenjene povezovanju naprav MCD v internet, temveč za povezovanje in vzpostavljanje različnih privatnih omrežij, kjer se nadzor varnosti prepusti uporabnikom ali skrbnikom omrežij. To je idealno za omogočanje neoviranega dostopa do izmerkov naprav MCD na zahtevo kart RO, ko so le-te v zunanjih omrežjih ali povezane v isto mobilno omrežje kot naprave MCD.



Slika 40: *Uporaba običajne poti in privatne APN za usmerjanje komunikacije za prenos izmerkov preko mobilnega omrežja.*

8 Zaključki in smernice za nadaljnje delo

Za optimizacijo izrabe radijskega spektra sodobnih brezžičnih komunikacijskih sistemov s pomočjo konceptov kognitivnega radia in dinamičnega dodeljevanja frekvenčnega spektra je poznavanje radijskega okolja brezžičnih naprav zelo pomembno. Na napravah, ki same niso sposobne zajema jakosti radijskega spektra s predpisano ločljivostjo, lahko temelji na uporabi geolokacijskih tabel zasedenosti radijskih kanalov ali uporabi kart RO. Pričujoča disertacija preko kart RO in izdelave kart RP z inovativnim posrednim postopkom obravnava del problematike tega področja.

Za celovit prikaz in razumevanje problematike smo najprej podali glavne informacije za razumevanje disertacije. Preko navezave na aktualno literaturo smo predstavili karte RO, njihovo vsestransko uporabno strukturo in trenutno najbolj uveljavljeno arhitekturo. Sledil je pregled področij uporabe kart RO in njihove vsebine. Kot najpomembnejšo vsebino smo izpostavili in predstavili karte RP iz kategorije kart za oris radijskega okolja. Analiza pregledanih obstoječih postopkov za izdelavo kart RP in njihova kritična ocena sta nas napeljali k razvoju novega posrednega postopka izdelave kart RP. Zaradi samodejnega umerjanja izbranega modela za opis razširjanja radijskega valovanja na prostorsko porazdeljene izmerke radijskega signala smo ga poimenovali samouglaševalna metoda za posredno izdelavo kart RP oziroma metoda STM. Ker je metodo STM mogoče izvesti z vrsto modelov za opis razširjanja radijskega valovanja, optimizacijskih in lokalizacijskih algoritmov, le-ta predstavlja okvirno rešitev, primerno za različne telekomunikacijske sisteme in frekvenčna področja. Obstoječe postopke izdelave kart RP in metodo STM smo preizkusili, ovrednotili in primerjali v namensko razvitem testnem okolju. Pri tem smo najprej uporabili simulacijsko generirane prostorsko porazdeljene izmerke. V drugem koraku smo uporabili prostorsko porazdeljene realne izmerke obstoječega mobilnega omrežja. Po uspešnem preizkusu in ovrednotenju smo metodo STM uporabili za izdelavo časovno spremenljivih kart RP z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki mobilnega oddajnika. Za prikaz, kako je že danes mogoče pridobivati izmerke po načinu soudeležbe, smo na koncu disertacije predstavili problematiko in izvedene rešitve pridobivanja izmerkov naprav MCD preko mobilnih omrežij.

S tem smo v celoti dokazali delovno hipotezo disertacije, da je mogoče z novim postopkom izdelave kart RP, z uporabo različnih dodatnih informacij sistema GIS, časovno in prostorsko naključno porazdeljenih izmerkov naprav MCD omogočiti enako ali izboljšano natančnost izdelanih kart RP kot z obstoječimi postopki. Pokazali smo, da je z metodo STM mogoče izdelati precej natančnejše karte RP kot z obstoječimi postopki, tako v primeru oddajnikov z usmerjenimi kot tudi vsesmernimi antenami.

8.1 Izvirni znanstveni dosežki

V okviru te disertacije smo dosegli naslednje izvirne prispevke k znanosti:

1. Razvili in zasnovali smo izvirni postopek, ki omogoča izdelavo kart RP na podlagi prostorsko in časovno naključno porazdeljenih izmerkov jakosti radijskega signala kot tudi uporabo izmerkov, pridobljenih po načinu soudeležbe. Postopek upošteva

mobilnost oddajnika, karakteristike okolja in dinamične prostorsko porazdeljene izmerke (poglavje 4).

2. Razvili smo izvirno testno okolje za izdelavo kart RP, podprto z modeli razširjanja radijskega valovanja in različnimi vsebinami geografskega informacijskega sistema (poglavje 5).

3. Predlagan postopek izdelave kart RP smo ob upoštevanju modela realnega radijskega okolja preizkusili in ovrednotili s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki ter z izmerki obstoječega radijskega omrežja na istem geografskem področju, ki je bilo upoštevano v simulacijah (poglavje 6).

8.2 Smernice za nadaljnje delo

V povezavi s kognitivnimi komunikacijami se je večina dosedanjih raziskav na področju kart RO osredotočala na učinkovitejšo rabo radijskega spektra v sproščenih televizijskih pasovih. Kljub temu smo v poglavju 2.2 prikazali, da imajo karte RO velik potencial tudi na številnih drugih področjih uporabe. Preden jih bodo v praksi lahko podprle, je treba rešiti še vrsto raziskovalnih izzivov.

Naše delo, predstavljeno v tej disertaciji, se je osredotočalo predvsem na natančnejšo izdelavo kart RP, kot je to mogoče z obstoječimi postopki. Raziskave v smeri posrednih postopkov izdelave kart RP, ki bi temeljili na natančnejših modelih za opis razširjanja radijskega delovanja in delovali z dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki, ter raziskave glede pridobivanja takšnih izmerkov nikakor niso izčrpane. Predstavljajo zgolj temelj za nadaljnje raziskovanje področja, pri čemer med neposredne nadaljnje raziskovalne izzive spadajo:

- izdelava kart RP radijskih omrežij velikega števila oddajnikov in sprejemnikov, ki komunicirajo na istih frekvencah,
- dinamična izdelava kart RP v zelo hitro se spreminjajočih radijskih okoljih,
- izdelava kart RP s pravimi izmerki heterogenih naprav MCD, pridobljenih po načinu soudeležbe,
- učinkovita implementacija obstoječih in novih postopkov izdelave kart RP na platformah za paralelno procesiranje, kot so večjedrne centralne procesne enote, digitalni signalni procesorji, programirljiva logična vezja ali grafične procesne enote.

9 Zahvale

Pot do doktorske disertacije vodi skozi vso preteklo izobraževanje, je plod trdega dela, vztrajnosti, naporov in veliko odrekanj. Rad bi se iskreno zahvalil vsem, ki so mi na njej pomagali, me učili, vzpodbujali, mi jo olajšali in polepšali.

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju doc. dr. Mihaelu Mohorčiču, somentorju doc. dr. Tomažu Javorniku in prof. dr. Andreju Koširju s Fakultete za elektrotehniko za vso strokovno pomoč in usmerjanje vzdolž celotne poti podiplomskega študija, pomoč pri delu, dajanje mnogih nasvetov, razumevanje in spodbujanje.

Zahvala je namenjena podjetju Mobitel, d.d., in Odseku za komunikacijske sisteme Instituta "Jožef Stefan", ki sta mi omogočila začetek izvajanja podiplomskega študija v okviru programa "Mladi raziskovalci iz gospodarstva – generacija 2009", Telekomu Slovenije, d.d., ki mi je omogočil nadaljnjo pot za njegovo uspešno dokončanje, in mentorju v obeh podjetjih dr. Mitji Štularju. Podiplomski študij, moje raziskovalno delo in doktorska disertacija so bili delno financirani s strani obeh podjetij, delno pa jih je financirala Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada.

Še posebej bi se rad zahvalil sodelavcem dr. Niku Gamulinu, dr. Tomažu Lovrenčiču, dr. Urošu Droftini, Luki Vidmarju, dr. Lucasu Benedičiču, dr. Blažu Peternelu in doc. dr. Alešu Šviglju, ki so mi tekom podiplomskega študija in ostalega skupno preživetega časa v teh letih nudili vso potrebno pomoč, me bodrili in mi v skupnih pisarnah pomagali vzdrževati prijetno delovno vzdušje.

Zahvala gre tudi vsem ostalim iz podjetij Mobitel, d.d., Telekoma Slovenije, d.d., Instituta "Jožef Stefan" in Mednarodne podiplomske šole Jožefa Stefana, ki so mi kakorkoli pomagali, mi omogočili dostop do računalniške opreme, programskih orodij, podatkov in informacij, brez katerih bi bila izdelava te disertacije nemogoča.

Navsezadnje pa gre največja zahvala za uspešno zaključeno pot do doktorske disertacije mojim najbližjim, Andreji in Klari, ostalim članom družine ter prijateljem.

Brez vas mi ne bi uspelo…

Hvala vsem!

10 Literatura in viri

[1] Pesko M, Javornik T, Košir A, Štular M, Mohorčič M. Radio environment maps: The survey of construction methods. *KSII Transactions on Internet and Information Systems.* 2014;8(11):3789-3809.

[2] Pesko M, Javornik T, Košir A, Štular M, Mohorčič M. Postopki gradnje kart radijskega okolja. *Elektrotehniški vestnik.* 2014;81(1/2):123-130.

[3] Javornik T, Hrovat A, Vilhar A, Pesko M. Radio environment map (REM). The 1st IEEE International Workshop on Cognitive Cellular Systems; 2.-4. september, 2014; na reki Ren, Nemčija.

[4] Pesko M, Javornik T, Stular M, Mohorcic M. The comparison of methods for constructing the radio frequency layer of radio environment map using participatory measurements. Predstavljeno na: 4th Workshop of COST Action IC0902: Cognitive Radio and Networking for Cooperative Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks; 9.-11. oktober, 2013; Rim, Italija.

[5] Pesko M, Javornik T, Vidmar L, Košir A, Štular M, Mohorčič M. The indirect self-tuning method for constructing radio environment map using omnidirectional or directional transmitter antenna. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.* 2015;2015(50).

[6] Vidmar L, Pesko M, Štular M, Blaž P, Kos A, Pogačnik M. Accuracy of mobile positioning methods from the erspective of location-based services. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.* 2014;V pregledu od julija 2014.

[7] Benedičič L, Pesko M, Javornik T, Korošec P. A metaheuristic approach for propagation-model tuning in LTE networks. *Informatica.* 2014;81(1):123-130.

[8] Vidmar L, Pesko M, Štular M, Pogačnik M. Precision of mobile positioning methods from the perspective of location-based services. Predstavljeno na: Mobile Tartu 2012; 22.-25. avgust, 2012; Tartu, Estonija.

[9] Pesko M. *Uporaba tehnologije Bluetooth za brezžična senzorska vozlišča* [Diplomsko delo], Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko; 2009.

[10] Pesko M. Integracija mobilnih in brezžičnih senzorskih omrežij. Predstavljeno na: Petindvajseta delavnica o telekomunikacijah; 12.-13. maj, 2011; Brdo pri Kranju, Slovenija.

[11] Pesko M, Vidmar L, Štular M, Mohorčič M. Mobile terminal as opportunistic sensor network device for research on cognitive radio networks. Predstavljeno na: 4th Jožef Stefan International Postgraduate School Students Conference; 25. maj, 2012; Ljubljana, Slovenija.

[12] Pesko M, Smolnikar M, Vučnik M, Javornik T, Pejanović-Djurišić M, Mohorčič M. Smartphone with augmented gateway functionality as opportunistic WSN gateway device. *Wireless Personal Communications.* 2014;78(3):1811-1826.

[13] Sayrac B, Jemaa SB, Cordier P. Radio Environmental Maps (REMs): A Cognitive Tool for Environmental Awareness. 9. februar, 2011; Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), Castelldefels, Španija.

[14] Grimoud S, Sayrac B, Ben Jemaa S, Moulines E. Best Sensor Selection for an Iterative REM Construction. Predstavljeno na: IEEE Vehicular Technology

Conference (VTC Fall); 5.-8. september, 2011; San Francisco, Kalifornija, ZDA.
[15] Zhao Y, Reed JH. Radio Environment Map (REM)-Enabled Cognitive Radios. 16th Annual Wireless Personal Symposium and 2nd Annual Wireless Summer School; 7.-9. junij, 2006; Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginija, ZDA.
[16] Atanasovski V, van de Beek J, Dejonghe A, Denkovski D, Gavrilovska L, Grimoud S, Mahonen P, et al. Constructing radio environment maps with heterogeneous spectrum sensors. Predstavljeno na: 2011 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2011); 3.-6. maj, 2011; Aachen, Nemčija.
[17] Zhang L, Zheng G. Reliable Information Transmission: A Chaotic Sequence-Based Authentication Scheme for Radio Environment Maps Enabled Cognitive Radio Networks. *JDCTA: International Journal of Digital Content Technology and its Applications.* 2010;4(4):48-57.
[18] Vizziello A, Perez-Romero J. System architecture in cognitive radio networks using a radio environment map. Predstavljeno na: 4th International Conference on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART '11); 26.-29 oktober, 2011; Barcelona, Španija.
[19] Zhao Y, Morales L, Gaeddert J, Bae KK, Jung-Sun U, Reed JH. Applying radio environment maps to cognitive wireless regional area networks. Predstavljeno na: 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007); 17.-20. april, 2007; Dublin, Irska.
[20] van de Beek J, Tao C, Grimoud S, Sayrac B, Mahonen P, Nasreddine J, Riihijarvi J. How a layered rem architecture brings cognition to today's mobile networks. *IEEE Wireless Communications.* 2012;19(4):17-24.
[21] European FP-7 project Flexible and Spectrum Aware Radio Access through Measurements and Modelling in Cognitive Radio Systems (FARAMIR). http://www.ict-faramir.eu/index.php?id=deliverables. Dostop dne 17. oktober, 2014.
[22] Subramani S, Riihijarvi J, Sayrac B, Gavrilovska L, Sooriyabandara M, Farnham T, Mahonen P. Towards Practical REM-based Radio Resource Management. Predstavljeno na: Future Network & Mobile Summit; 15.-17. junij, 2011; Varšava, Poljska.
[23] Tao C, van de Beek J, Sayrac B, Grimoud S, Nasreddine J, Riihijarvi J, Mahonen P. Design of layered radio environment maps for RAN optimization in heterogeneous LTE systems. Predstavljeno na: 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2011); 11.-14. september, 2011; Toronto, Ontario, Kanada.
[24] Zhao Y, Reed JH, Mao S, Bae KK. Overhead Analysis for Radio Environment Map enabled Cognitive Radio Networks. Predstavljeno na: 1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks (SDR '06); 25. september, 2006; Reston, Virginija, ZDA
[25] Iacobelli L, Fouillot P, Le Martret CJ. Radio environment map based architecture and protocols for mobile ad hoc networks. Predstavljeno na: 11th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net); 19.-22. junij, 2012; Ayia Napa, Ciper.
[26] Lane ND, Eisenman SB, Musolesi M, Miluzzo E, Campbell AT. Urban sensing systems: opportunistic or participatory? Predstavljeno na: 9th workshop on Mobile computing systems and applications; 25.-26. februar, 2008; Napa Valley, Kalifornija, ZDA.
[27] Zhang J-w, Zhao Q, Zou J-y. The IEEE 802.22 WRAN System Based on Radio

Environment Map (REM). First International Workshop on Education Technology and Computer Science (ETCS '09); 7.-8. marec, 2009; Wuhan, Hubei, Kitajska.

[28] IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Television White Spaces (TVWS) Operation. *IEEE Std 802.11af-2013 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012, IEEE Std 802.11aa-2012, IEEE Std 802.11ad-2012, and IEEE Std 802.11ac-2013)*2014:1-198.

[29] Pucker L. "State of the Art" in Spectrum Sharing. 2010 International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART); 27.-30. julij, 2010; Boulder, Kolorado, ZDA.

[30] Meshkova E, Ansari J, Denkovski D, Riihijarvi J, Nasreddine J, Pavloski M, Gavrilovska L, et al. Experimental Spectrum Sensor Testbed for Constructing Indoor Radio Environmental Maps. Predstavljeno na: 2011 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2011); 3.-6. maj, 2011; Aachen, Nemčija.

[31] Riihijarvi J, Mahonen P, Petrova M, Kolar V. Enhancing cognitive radios with spatial statistics: from radio environment maps to topology engine. Predstavljeno na: 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM 2009); 22.-24. junij, 2009; Hannover, Nemčija.

[32] Zalonis A, Dimitriou N, Polydoros A, Nasreddine J, Mahonen P. Femtocell downlink power control based on radio environment maps. Predstavljeno na: 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC); 1.-4. april, 2012; Šanghaj, Kitajska.

[33] Grimoud S, Ben Jemaa S, Sayrac B, Moulines E. A REM Enabled Soft Frequency Reuse Scheme. Predstavljeno na: 2010 IEEE Global communications conference (GLOBECOM 2010); 6.-10. december, 2010; Miami, Florida, ZDA.

[34] Spooner CM, Khambekar NV. Spectrum sensing for cognitive radio: A signal-processing perspective on signal-statistics exploitation. Predstavljeno na: 2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2012); 30. januar-2. februar, 2012; Maui, Havaji, ZDA.

[35] Ould Isselmou Y, Wackernagel H, Tabbara W, Wiart J. Geostatistical interpolation for mapping radio-electric exposure levels. Predstavljeno na: First European Conference on Antennas and Propagation Conference (EuCAP 2006); 6.-10. november, 2006; Nica, Francija.

[36] Kim S-J, Dall'Anese E, Giannakis GB. Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radios Using Kriged Kalman Filtering. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing.* 2011;5(1):24-36.

[37] Hrovat A. *Radio wave propagation in special environments* [Doktorska disertacija], Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana; 2011.

[38] *Modern RF and Microwave Measurement Techniques.* Cambridge University Press; 2013.

[39] Ettus Research, A National Instruments Company. https://www.ettus.com/. Dostop dne 18. oktober, 2014.

[40] ETSI-TC. Recommendation GSM 05.05: Radio Transmission and Reception. 1993. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0505/03.16.00_60/gsmts_0505sv031600p.pdf. Dostop dne 29. oktober, 2014.

[41] 3GPP-TS25.225. Technical Specification Group Radio Access Network; Physical

layer; Measurements (TDD). 2007; http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v9_20/5_Appendix/Rel6/25/25225-630.pdf. Dostop dne 28. oktober, 2014.

[42] ETSI-TS136214. Technical Specification: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer - Measurements. 2010; http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136214/09.01.00_60/ts_136214v090100p.pdf. Dostop dne 29. oktober, 2014.

[43] Gumus K, Sen A. Comparison of spatial interpolation methods and multi-layer neural networks for different point distributions on a digital elevation model. *Geodetski vestnik.* 2013;57(3):523-543.

[44] Podobnikar T. *Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti* [Doktorska disertacija], Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; 2001.

[45] Denkovski D, Atanasovski V, Gavrilovska L, Riihijärvi J, Mähönen P. Reliability of a Radio Environment Map: Case of Spatial Interpolation Techniques. Predstavljeno na: 7th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CROWNCOM 2012); 18.-20. junij, 2012; Stockholm, Švedska.

[46] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Predstavljeno na: 23rd ACM National Conference; 27.-29. avgust, 1968; Las Vegas, Nevada, ZDA.

[47] Alaya-Feki ABH, Ben Jemaa S, Sayrac B, Houze P, Moulines E. Informed spectrum usage in cognitive radio networks: interference cartography. Predstavljeno na: 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008); 15.-18. september, 2008; Palais des Festivals, Cannes, Francija.

[48] Renka RJ. Multivariate interpolation of large sets of scattered data. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS).* 1988;14(2):139-148.

[49] Mateos G, Bazerque J-A, Giannakis GB. Spline-based spectrum cartography for cognitive radios. 43rd Asilomar conference on Signals, systems and computers (Asilomar'09); 1.-4. november, 2009; Pacific Grove, Kalifornija, ZDA.

[50] Isaaks EH, Srivastava RM. *An Introduction to Applied Geostatistics.* New York: Oxford University Press; 1989.

[51] Angjelicinoski M, Atanasovski V, Gavrilovska L. Comparative analysis of spatial interpolation methods for creating radio environment maps. Predstavljeno na: 19th Telecommunications Forum (TELFOR); 22.-24. november, 2011; Beograd, Srbija.

[52] Azpurua MA, Ramos KD. A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude. *Progress In Electromagnetics Research M (PIER M).* 2010;14:135-145.

[53] Yılmaz HB. *Cooperative spectrum sensing and radio environment map construction in cognitive radio networks* [Doktorska disertacija]: Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Bogazici University; 2012.

[54] Phillips C, Ton M, Sicker D, Grunwald D. Practical Radio Environment Mapping with Geostatistics. Predstavljeno na: 2012 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2012); 16.-19. oktober, 2012; Bellevue, Washington, ZDA.

[55] Bolea L, Perez-Romero J, Agusti R, Sallent O. Context Discovery Mechanisms for Cognitive Radio. Predstavljeno na: IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC2011 Spring); 15.-18. maj, 2011; Budimpešta, Madžarska.

[56] Bolea L, Perez-Romero J, Agusti R, Sallent O. Image Processing Techniques as a Support to Transmitter Positioning Determination in Cognitive Radio Networks. Predstavljeno na: Sixth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2010); 9.-15. maj, 2010; Barcelona, Španija.

[57] Bolea L, Perez-Romero J, Agusti R. Received signal interpolation for context discovery in Cognitive Radio. Predstavljeno na: 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC); 3.-7. oktober, 2011; Brest, Francija.

[58] Li J, Heap AD. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics.* 2011;6(3-4):228-241.

[59] Franke R, Nielson G. Smooth interpolation of large sets of scattered data. *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* 1980;15(11):1691-1704.

[60] Nalder IA, Wein RW. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology.* 1998;92(4):211-225.

[61] Mahapatra R, Strinati EC. Interference-aware dynamic spectrum access in cognitive radio network. Predstavljeno na: 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2011); 11.-14. september, 2011; Toronto, Ontario, Kanada.

[62] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation.* Oxford University Press; 1997.

[63] Yılmaz HB, Tugcu T. Location estimation-based radio environment map construction in fading channels. *Wireless communications and mobile computing.* 2013;15(3):561-570.

[64] Yılmaz HB, Tugcu T, Alagöz F, Bayhan S. Radio environment map as enabler for practical cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine.* 2013;51(12):162-169.

[65] Fan Q, Efrat A, Koltun V, Krishnan S, Venkatasubramanian S. Hardware-Assisted Natural Neighbor Interpolation. Predstavljeno na: The Seventh Workshop on Algorithm Engineering and Experiments and the Second Workshop on Analytic Algorithmics and Combinatorics (ALENEX/ANALCO 2005); 22. januar, 2005; Vancouver, Britanska Kolumbija, Kanada.

[66] Kazuo T, Kazuki K, Iwao S, Ryoichi M. Computational complexity of spline interpolation. *International Journal of Systems Science.* 1987;18:945-954.

[67] Benedičič L. *Optimization and parallelization methods for the design of next-generation radio networks* [Doktorska disertacija], Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana; 2013.

[68] Fleury BH, Leuthold PE. Radiowave propagation in mobile communications: an overview of European research. *IEEE Communications Magazine.* 1996;34(2):70-81.

[69] Kathrein. K739650 antenna, A-Panel Dual Polarization Half-power Beam Width. http://www.alancom.ru/midlandru/products/kathrein/pdf/XPol739650-739662.pdf. Dostop dne 29. oktober, 2014.

[70] Hrovat A, Ozimek I, Vilhar A, Celcer T, Saje I, Javornik T. Radio coverage calculations of terrestrial wireless networks using an open-source GRASS system. *WSEAS Transactions on Communications.* 2010;9(10):646-657.

[71] Goldberg DE. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.; 1989.

[72] Anderson HR. *Fixed Broadband Wireless System Design.* John Wiley & Sons

Ltd.; 2003.
[73] Graham A, Kirkman NC, Paul PM. *Mobile Radio Network Design in the VHF and UHF Bands: A Practical Approach.* John Wiley & Sons Ltd.; 2006.
[74] Molisch AF. *Wireless Communications.* 2nd ed. Appendix 7.1 http://www.wiley.com/legacy/wileychi/molisch/supp2/appendices/c07_Appendices.pdf: John Wiley & Sons Ltd.; 2010.
[75] Kizer G. *Digital Microwave Communication: Engineering Point-to-Point Microwave Systems.* Wiley-IEEE Press; 2013.
[76] Deygout J. Multiple knife-edge diffraction of microwaves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 1966;14(4):480-489.
[77] Liu L, Li Z, Zhou C. Backpropagation-Based Cooperative Localization of Primary User for Avoiding Hidden-Node Problem in Cognitive Networks. *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting.* 2010;2010(905321).
[78] Mao G, Fidan B, Anderson BDO. Wireless sensor network localization techniques. *Computer Networks.* 2007;51(10):2529-2553.
[79] Android developers: Get the timing advance value for LTE. http://developer.android.com/reference/android/telephony/CellSignalStrengthLte.html#getTimingAdvance%28%29. Dostop dne 19. oktober, 2014.
[80] Aarnaes E, Holm S. Tuning of Empirical Radio Propagation Models Effect of Location Accuracy. *Wireless Personal Communications.* 2004;30(2-4):267-281.
[81] CommScope. Andrew DB844H35E-SY antenna, 870–960 MHz, 35° horizontal beamwidth, fixed electrical tilt. http://www.commscope.com/catalog/wireless/159/product_details.aspx?id=15525. Dostop dne 29. oktober, 2014.
[82] Ascom. TEMS Investigation, a tool for troubleshooting, verification, optimization and maintenance of wireless networks. http://www.ascom.com. Dostop dne 30. oktober, 2014.
[83] Schrijver A. On the history of combinatorial optimization (till 1960). *Handbook of Discrete Optimization*. Amsterdam: Elsevier; 2005:1-68.
[84] Motorola looking to deploy NFC in smartphones. http://www.techradar.com/news/phone-and-communications/mobile-phones/motorola-looking-to-deploy-nfc-in-smartphones-929169. Dostop dne 18. september, 2011.
[85] More than 50 billion connected devices – taking connected devices to mass market and profitability. http://www1.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-50-billions.pdf. Dostop dne 18. september, 2011.
[86] Sony Ericsson First Smartphone to Integrate Ant+ Technology. http://se-xperia.com/sony-ericsson-first-smartphone-to-integrate-ant-technology/. Dostop dne 18. september, 2011.
[87] Olsson M, Sultana S, Rommer S, Frid L, Mulligan C. *EPC and 4G Packet Networks: Driving the Mobile Broadband Revolution.* 2nd ed: Elsevier; 2013.
[88] Turner H, White J, Thompson C, Zienkiewicz K, Campbell S, Schmidt DC. Building mobile sensor networks using smartphones and web services: ramification and development challenges. In: Cruz-Cunha MM, Moreira F, eds. *Handbook of Research on Mobility and Computing: Evolving Technologies and Ubiquitous Impacts*: IGI Global; 2011:502-521.
[89] Molina AF, Štern A, Kos A. Mobile network measurements using Android. Predstavljeno na: 22nd International Electrotechnical and Computer Science Conference (ERK 2013); 16.-18. september, 2013; Portorož, Slovenija.
[90] Musolesi M, Piraccini M, Fodor K, Corradi A, Campbell AT. Supporting Energy-Efficient Uploading Strategies for Continuous Sensing Applications on Mobile

Phones. Predstavljeno na: 8th International Conference on Pervasive Computing; 17.-20. maj, 2010; Helsinki, Finska.

[91] Thompson C, White J, Dougherty B, Albright A, C D. Using Smartphones andWireless Mobile Sensor Networks to Detect Car Accidents and Provide Situational Awareness to Emergency Responders. 3rd International ICST Conference on MOBILe Wireless MiddleWARE, Operating Systems, and Applications (Mobilware 2010); 30. junij-2 julij, 2010; Chicago, ZDA.

[92] Kansal A, Goraczko M, Zhao F. Building a sensor network of mobile phones. Predstavljeno na: 6th international conference on Information processing in sensor networks (IPSN '07); 25.-27. april, 2007; Cambridge, Massachusetts, ZDA.

[93] Turner H, White J. Verification and Validation of Smartphone Sensor Networks. 4th International ICST Conference on MOBILe Wireless MiddleWARE, Operating Systems, and Applications (Mobilware 2011); 22.-24. junij, 2011; London, Združeno kraljestvo.

[94] Grauballe A, Perrucci GP, Fitzek F. Introducing Contextual Information to Mobile Phones by External and Embedded Sensors. International Workshop on Mobile Device and Urban Sensing (MODUS08); 21. april, 2008; Saint Louis, Missouri, ZDA.

[95] Fitzek FHP, Reichert F. *Mobile Phone Programming and its Application to Wireless Networking.* Springer; 2007.

[96] Takeshi K, Hiromitsu S, Norihiro I. R&D Toward a Connecting Service Between Mobile Terminals and Sensor Networks. *NTT DoCoMo Tech J.* 2006;8(3):32-39.

[97] Delsing J, Lindgren P, Östmark Å. Mobile internet enabled sensors using mobile phones as access network. *Journal of Information Technology in Construction.* 2004;9:381-388.

[98] Plitsis ZK, Fudos I, Pitoura E, Apostolos. On Accessing GSM-enabled Mobile Sensors. Predstavljeno na: 2nd IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP'05); 5.-8. december, 2005; Melbourne, Avstralija.

[99] Wang S, Chen C, Ma J. A Framework for Wireless Sensor Network Based Mobile Mashup Applications. Predstavljeno na: 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering; 31. marec-2. april, 2009; Los Angeles, Kalifornija, ZDA.

[100] Jayaraman PP, Zaslavsky A, Delsing J. Sensor Data Collection Using Heterogeneous Mobile Devices. Predstavljeno na: IEEE International Conference on Pervasive Services; 15.-20. julij, 2007; Istanbul, Turčija.

[101] Šolc T. SNE-ISMTV: VESNA wireless sensor node expansion for cognitive radio experiments. The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems; 27.-30. avgust, 2013; Ilmenau, Nemčija.

[102] Smolnikar M, Mihelin M, Berke G, Kandus G, Mohorcic M. ISM bands spectrum sensing based on versatile sensor node platform. 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL); 7.-10. november, 2010; Rim, Italija.

[103] Vasseur J-P, Dunkels A. *Interconnecting Smart Objects with IP: The Next Internet.* Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 2010.

[104] Cho YS, Kim J, Yang WY, Kang CG. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB.* John Wiley & Sons, Ltd.; 2010.

[105] Hatay M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 1980;29(3):317-325.

[106] Cichon DJ, Kurner T. Propagation models, COST 231 final report. 1996; http://www.lx.it.pt/cost231/. Dostop dne 24. oktober, 2014.

[107] Ericsson. TEMS CellPlanner Universal Common Features, *Reference Manual*. 2006. Dostop dne 29. oktober.
[108] Cerovac N, Blazevic Z, Sekelja M. Computer simulation of knife-edge based approximate methods for multiple diffraction estimation. *International Journal of Intelligent Defence Support Systems (IJIDSS).* 2010;3(1/2):37-51.
[109] Salous S. *Radio Propagation Measurement and Channel Modelling.* John Wiley & Sons Ltd.; 2013.
[110] Goldsmith A. *Wireless Communications.* Cambridge University Press; 2005.
[111] Bullington K. Radio propagation for vehicular communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 1977;26(4):295-308.
[112] Deygout J. Correction factor for multiple knife-edge diffraction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 1991;39(8):1256-1258.
[113] Sauter M. *From GSM to LTE-advanced: An introduction to mobile networks and mobile broadband.* John Wiley & Sons Ltd.; 2014.

Kazalo slik

Slika 1: *Arhitektura karte RO* [21].....6
Slika 2: *Vsebina karte RO, sestavljena iz kart radijskih elementov, kart radijskega prizorišča in kart okolja* [21].....8
Slika 3: *Vsebina REM-SA, predstavljena z osnovnimi kategorijami, podkategorijami in kartami*.....9
Slika 4: *Primer karte RP.* 10
Slika 5: *Cikel izdelave kart RP.* 13
Slika 6: *Neposredna izdelava karte RP.*.....17
Slika 7: *Odvisnost uteži* wi *od razdalje* d *in utežne potence* p *pri interpolacijskih postopkih inverzne utežene razdalje.* 18
Slika 8: *Primer Voronoijevih poligonov, izdelanih na podlagi lokacijsko porazdeljenih izmerkov za potrebe interpolacijske metode najbližjega soseda.* 19
Slika 9: *Primer Voronoijevih poligonov, izdelanih na podlagi lokacijsko porazdeljenih izmerkov za potrebe interpolacijske metode naravnih sosedov.* 20
Slika 10: *Primer lokacijske porazdelitve izmerkov za predstavitev spremenjene Shepardove metode.* 21
Slika 11: *Primer empiričnega semivariograma s prilegano matematično funkcijo.* 24
Slika 12: *Posredna izdelava karte RP.*.....25
Slika 13: *Koraki metode STM.*.....31
Slika 14: *Elementi preproste brezžične povezave* [37]. 33
Slika 15: *Horizontalni in vertikalni diagram običajne antene mobilnega omrežja Kathrein K739650* [69] *in diagram modelirane antene.*.....34
Slika 16: *Dobitek vertikalnega dela antenskega diagram v odvisnosti od razdalje od oddajnika pri različnih nagibih anten.*.....35
Slika 17: *Struktura testnega okolja za izdelavo kart RP.*.....38
Slika 18: *Referenčno geografsko področje z devetimi tipi rabe tal za preizkus in ovrednotenje metode STM s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki.* 44
Slika 19: *Referenčna karta RP, izdelana za namen preizkusa in ovrednotenja metode STM s simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki.*.....45
Slika 20: *Shematski prikaz šestih scenarijev porazdelitev izmerkov jakosti radijskega signala glede na lokacijo in usmeritev glavnega snopa antene usmerjenega oddajnika (Tx).* 46
Slika 21: *Povprečno število možnih lokacij oddajnika v* T *glede na število izmerkov, uporabljenih za lokalizacijo na podlagi parametra TA s korakom 553,5 m in karto RP v ločljivosti 25 m.* 47

Slika 22: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu RMSE in 95-odstotnih CI, doseženi z uporabo simulacijsko generiranih izmerkov.* 49
Slika 23: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu krivulj ROC na podlagi vrednosti CDZR1 v odvisnosti od FAZR.* 50
Slika 24: *Karte RP, izdelane z obravnavanimi postopki v primeru scenarija 1, za reprezentativni primer, ko je pridobljenih 200 izmerkov jakosti radijskega signala.* 52
Slika 25: *Referenčna karta RP, izračunana s pomočjo načrtovalskega orodja GRASS-RaPlaT in uvožena v razvito testno okolje za izdelavo kart RP.* 53
Slika 26: *Referenčno geografsko področje z devetimi tipi rabe tal za preizkus in ovrednotenje metode STM z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki obstoječega radijskega omrežja.* 54
Slika 27: *Referenčna karta RP, izdelana za namen preizkusa in ovrednotenja metode STM z realnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki obstoječega radijskega omrežja.* 54
Slika 28*: Shema merjenja jakosti radijskega signala izbrane bazne postaje obstoječega radijskega omrežja na terenu* [82]. 55
Slika 29: *Prostorska porazdelitev na terenu zajetih in filtriranih izmerkov jakosti radijskega signala izbrane bazne postaje obstoječega mobilnega omrežja.* 55
Slika 30: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu RMSE, doseženi z uporabo izmerkov obstoječega radijskega omrežja, pridobljenih na terenu.* 56
Slika 31: *Prostorske porazdelitve različnega števila naprav MCD in vrednosti pripadajočih izmerkov glede na usmerjen oddajnik v izbranem časovnem trenutku.* 58
Slika 32: *Karte RP, izdelane z metodo STM, (levo) in njihove absolutne napake v primerjavi z referenčno karto RP (desno), v izbranem časovnem trenutku.* 60
Slika 33: *Referenčno geografsko področje z devetimi tipi rabe tal in železniško progo za simuliranje premikanja mobilnega oddajnika.* 61
Slika 34: *Referenčna karta RP mobilnega oddajnika na vlaku, v časovnem trenutku izdelave kart RP.* 61
Slika 35: *Rezultati primerjave izdelanih kart RP z referenčno karto RP v smislu RMSE in 95-odstotnih CI, doseženih, z uporabo dinamičnih prostorsko porazdeljenih izmerkov.* 65
Slika 36: *Običajna komunikacijska pot med kartami RO v zunanjih omrežjih in napravami MCD, povezanimi v mobilno omrežje.* 70
Slika 37: *Uporabniški vmesnik aplikacije, razvite za pridobivanje izmerkov za izdelavo kart RP po načinu soudeležbe mobilnih naprav.* 72
Slika 38: *Splošna struktura komunikacijskega prehoda za senzorska omrežja.* 76
Slika 39: *Praktična izvedba komunikacijskega prehoda za senzorska omrežja na podlagi uporabe pametnega telefona in platforme VESNA.* 76
Slika 40: *Uporaba običajne poti in privatne APN za usmerjanje komunikacije za prenos izmerkov preko mobilnega omrežja.* 77
Slika 41: *Primer scenarija za izračun izgube poti zaradi uklona na maksimalni oviri.* 105

Slika 42: *Scenarij za razlago Bullingtonovega modela za izračun uklona na več klinastih ovirah.* 106
Slika 43: *Scenarij za razlago modela Deygout 1966, za izračun uklona na več klinastih ovirah.* 107
Slika 44: *Primer scenarija za prikaz delovanja modela Deygout 1991, ko je glavna ovira* $m1$. 109
Slika 45: *Primer scenarija za prikaz delovanja modela Deygout 1991, ko je glavna ovira* $m2$. 109

Kazalo tabel

Tabela 1: *Značilnosti pregledanih postopkov za izdelavo kart RP.* 29
Tabela 2: *Spodnje in zgornje meje za reševanje optimizacijskega problema metode STM.* 47
Tabela 3: *Število izbranih izmerkov v setih za izdelavo kart RP v primeru dinamičnega dodajanja izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov za* $Nd = 200$ *izmerkov.* 64
Tabela 4: *Lokacija mobilnega oddajnika glede na zaporedne točke železniške proge, v različnih časovnih trenutkih, ter takratne razlike v razdalji do točke na železniški progi, kjer se nahaja mobilni oddajnik v trenutku* t. 66

Kazalo algoritmov

Algoritem 1: *Algoritem za naključno vzorčenje referenčnih kart RP, glede na rabo tal geografskega področja in želeno relativno porazdelitev izmerkov po lokacijah posameznih tipov rabe tal.* 39

Algoritem 2: *Algoritem za pripravo setov želenega števila izmerkov na podlagi izmerkov danega časovnega trenutka in izmerkov iz preteklih časovnih trenutkov.* 63

Algoritem 3: *Algoritem za izračun jakosti radijskega signala strežne celice v odvisnosti od tipa mobilnega omrežja, v katerega je povezana mobilna naprava.* 73

Priloge

Priloga A: Modeli za opis razširjanja radijskega valovanja

Model razširjanja radijskega valovanja v praznem prostoru

Razširjanje radijskega valovanja v praznem prostoru je osnova za razumevanje posredne izdelave kart RP. Skladno s scenarijem na sliki 14, predvideno uporabo neizotropne oddajne antene z dobitkom G_t [dB] in neizotropne sprejemne antene z dobitkom G_r [dB], razdalje d [m] med oddajnikom in sprejemnikom, oddajne moči P_{tx} [W] ter valovne dolžine signala λ [m] se jakost signala določenega oddajnika v poljubni točki karte RP namesto z enačbo (4.1) izrazi z enačbo (A.1). V njej L_s predstavlja faktor izgube sistema strojne opreme oddajnika in sprejemnika, ki je neodvisen od okolja razširjanja radijskega valovanja. V kolikor se izgube L_s zanemari, se z nadaljnjo izpeljavo iz enačbe (A.1) izrazi enačba (A.2), ki predstavlja izgubo poti L [dB] razširjanja radijskega valovanja v praznem prostoru [104].

$$P_{rx_{[W]}} = \frac{P_{tx} G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L_s} \tag{A.1}$$

$$L(d) = -10 \log\left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}\right) \tag{A.2}$$

Log-normalni model razširjanja radijskega valovanja

V realnosti prenosni medij razširjanja radijskega valovanja ni prazen prostor, zaradi česar povprečna moč radijskega signala ne pada s kvadratom razdalje d, temveč s faktorjem izgube poti α. To opisuje splošni log-normalni model za razširjanje radijskega valovanja oziroma enačba (A.3). Celotna izguba poti L [dB] se pri poljubni razdalji d [m] izračuna kot seštevek prispevka izgube poti pri referenčni razdalji d_0, do katere se upošteva slabljenje signala v praznem prostoru in prispevka izgube poti, ki upošteva eksponentno naraščanje izgub s koeficientom α. Ta je odvisen od dejanskega okolja razširjanja radijskega valovanja [104].

$$L(d) = L(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{A.3}$$

Log-normalni model razširjanja radijskega valovanja s senčenjem

V okolju brez ovir in na enaki razdalji od oddajnika se lahko v primeru log-normalnega razširjanja radijskega valovanja izmeri različne moči radijskega signala. Izkaže se, da se prejete moči spreminjajo skladno s slučajnim senčenjem, ki se ga opiše z zvezno naključno spremenljivko Gaussove gostote verjetnosti X_σ s srednjo vrednostjo 0 in standardno deviacijo σ. Če slednjo dodamo log-normalnemu modelu, prikazanem z

enačbo (A.3), dobimo natančnejši, log-normalni model s senčenjem, ki ga prikazuje enačba (A.4) [104].

$$L(d) = L(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \tag{A.4}$$

Model Okumura-Hata

Slabost log-normalnega modela in log-normalnega modela s senčenjem je, da kljub prilagoditvam na določen tip okolja v izračunu izgube poti ne upoštevata različnih višin, na katerih se nahajajo oddajniki in sprejemniki. Zaradi tega smo v testno okolje vgradili model Okumura-Hata, ki je eden najbolj razširjenih modelov za opis razširjanja radijskega valovanja. Temelji na zakonitostih, ugotovljenih na podlagi empiričnih podatkov [105], in velja za frekvence signalov f [MHz] med 150 MHz in 1,5 GHz, višine anten oddajnikov h_t [m] med 30 m in 200 m, višine anten sprejemnikov h_r [m] med 1 m in 10 m ter razdalje d [km] med njimi, ki so lahko med 1 km do 20 km. Izgubo poti tega modela se lahko predstavi s splošno enačbo (A.5), ki je zelo podobna enačbi (A.4) log-normalnega modela. Prispevki izgube poti A, B in C so odvisni od frekvence in višine anten in so različni za mestna, primestna in podeželska področja. A narašča s frekvenco in pada z naraščanjem višine h_t oddajne antene in višine h_r sprejemne antene. Z naraščanjem h_t pada tudi prispevek B, ki podobno kot α v enačbi (A.4) predstavlja koeficient eksponentnega naraščanja izgub. Podrobna predstavitev modela Okumura-Hata s poudarkom na definicijah prispevkov A, B, in C je podana v [74]. Podobno kot log-normalni model in log-normalni model s senčenjem tudi model Okumura-Hata ne upošteva konfiguracije terena. V primeru večjih geografskih ovir, kot so gore, hribi in globoke doline, za ovirami predvidi takšno moč signala, kot da ovir tam ne bi bilo.

$$L(d) = A + B\log(d) + C \tag{A.5}$$

Model Hata COST 231

Model Okumura-Hata so za primestna okolja v okviru evropskega projekta COST 231 (Cooperation of Science and Technology) razširili za uporabo z višjimi frekvencami in poimenovali kot model Hata COST 231 [106]. Prikazuje ga enačba (A.6), kjer je $C = 0$ za srednje velika mestna in primetna okolja in $C = 3$ za središča velikih mest. V enačbi (A.6) je d [km] razdalja, f [MHz] je nosilna frekvenca, h_{ef} [m] je efektivna višina oziroma višinska razlika med oddajnikom in sprejemnikom, h_r [m] je višina sprejemnika nad terenom. $\delta(h_r)$ [m] je korekcijski faktor višine, podan z enačbo (A.7).

$$\begin{aligned} L = 46{,}33 + 33{,}9\log(f) - 13{,}82\log\left(h_{ef}\right) - \delta(h_r) \\ + \left(4{,}99 - 6{,}55\log\left(h_{ef}\right)\right)\log(d) + C \end{aligned} \tag{A.6}$$

$$\delta(h_r) = (1{,}1\log(f) - 0{,}7)h_r - (1{,}56\log(f) - 0{,}8) \tag{A.7}$$

Spremenjeni model Okumura-Hata

Pred izbiro in konfiguracijo modela za razširjanje radijskega valovanja je treba pretehtati številne parametre. Med pomembnejše sodijo želeno frekvenčno območje, radijsko

okolje, višine anten, namen uporabe, razdalje, do katerih je model veljaven, in razpoložljivost podatkov, ki so na voljo za njegovo izvedbo [37]. Z upoštevanjem naštetega smo v testno okolje vključili spremenjeni model Okumura-Hata [67,107]. Ta model ločuje med računanjem izgube poti, ko se signal do točke sprejema širi neovirano preko odprtega področja in ko so na njegovi poti ovire. V primeru neoviranega širjenja radijskega valovanja se za izračun izgube poti L_{LOS} v enačbi (A.8) uporabi vektor koeficientov $\vec{A} = (A_0, A_1, A_2, A_3)$, ki predstavlja kontrolne parametre modela. A_0 je koeficient odmika, A_1, A_2, A_3 pa so koeficienti nagiba modela izgube poti. d [m] je razdalja med oddajnikom in sprejemnikom, f [MHz] je nosilna frekvenca in h_{ef} [m] efektivna višina antene, tj. razlika v višini antene oddajnika nad terenom in višino antene sprejemnika h_r [m] nad terenom.

$$\begin{aligned} L_{LOS}\left(d_{(x,y)}, \vec{A}\right) \\ &= A_0 + A_1 \log_{10}\left(d_{(x,y)}\right) + A_2 \log_{10}\left(h_{ef}\right) \\ &+ A_3 \log_{10}\left(d_{(x,y)}\right) \log_{10}\left(h_{ef}\right) - 3.2[\log_{10}(11.75h_r)]^2 \\ &+ 44.49 \log_{10}(f) - 4.78[\log_{10}(f)]^2 \end{aligned} \tag{A.8}$$

V primeru oviranega širjenja radijskega valovanja se dodatno uporabi člen, predstavljen z enačbo (A.9), kjer je κ kontrolni parameter izgube poti $K\left(d_{(x,y)}\right)$ [dB] zaradi senčenja na ovirah na poti razširjanja radijskega valovanja in $E(d_{(x,y)})$ [dB] prispevek zaradi ukrivljenosti površja pri velikih razdaljah d. Vsi trije parametri se izračunajo na podlagi digitalnega modela višin terena, ki smo ga uvozili v testno okolje.

$$L_{NLOS}\left(d_{(x,y)}\right) = \sqrt{\left[\kappa K\left(d_{(x,y)}\right)\right]^2 + E\left(d_{(x,y)}\right)^2} \tag{A.9}$$

Skupno izgubo poti $L(d_{(x,y)})$ spremenjenega modela Okumura-Hata prikazuje enačba (A.10). Izračuna se kot seštevek prispevkov L_{LOS}, L_{NLOS} in L_{clut}, ki je prispevek izgube poti zaradi tipa rabe tal na lokaciji (x, y) sprejema radijskega signala. Pridobi se ga iz digitalnega modela rabe tal, ki smo ga dodali v testno okolje.

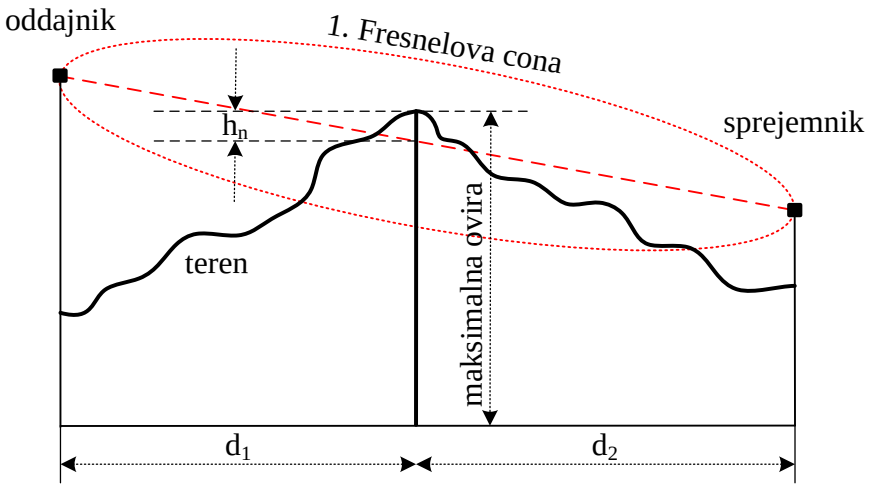
$$L(d_{(x,y)}) = L_{LOS}\left(d_{(x,y)}, \vec{\beta}\right) + L_{NLOS}\left(d_{(x,y)}\right) + L_{clut}(x, y) \tag{A.10}$$

Priloga B: Modeli za izračun izgube poti zaradi senčenja na ovirah na poti razširjanja radijskega valovanja

Model za izračun uklona na maksimalni oviri

Model za izračun uklona na maksimalni oviri, ki zastira pot razširjanja radijskega valovanja, je najenostavnejši. V kolikor predvidimo scenarij, prikazan na sliki 41, je d_1 razdalja med oddajnikom in maksimalno oviro, d_2 pa razdalja med sprejemnikom in maksimalno oviro. h_n je normalizirana višina maksimalne ovire nad osjo prve Fresnelove cone.

V primeru radijskega valovanja z valovno dolžino λ se električno polje v točki sprejema E_{Rx} relativno na polje E_{Rx_0}, ki bi bilo tam v primeru razširjanja valovanja v praznem prostoru. To ponazarja enačba (B.1), kjer je ν Fresnelov parameter določen z enačbo (B.2). Z nadaljnjo izpeljavo [108] se izpelje enačbo (B.3), ki ponazarja Fresnelov integral, in enačbo (B.4), ki natančno izraža izgubo poti $L_{KE}(\nu)$ [dB] zaradi uklona na maksimalni oviri, ki zastira razširjanje radijskega valovanja.



Slika 41: *Primer scenarija za izračun izgube poti zaradi uklona na maksimalni oviri.*

$$\frac{E_{Rx}}{E_{Rx_0}} = \frac{1+j}{2}\int_{\nu}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}t^2}\,dt \tag{B.1}$$

$$\nu = h_n\sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \tag{B.2}$$

$$F_c(\nu) = \int_0^{\nu} e^{j\frac{\pi}{2}t^2}\,dt = C(\nu) + jS(\nu) = \int_0^{\nu} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right)dt + j\int_0^{\nu} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right)dt \tag{B.3}$$

$$L_{KE}(\nu) = -10\log\left(\frac{\left(1 - C(\nu) - S(\nu)\right)^2 + \left(C(\nu) - S(\nu)\right)^2}{4}\right) \tag{B.4}$$

Ker je natančen izračun enačbe (B.4) relativno kompleksen, se za hiter izračun L_{KE} v primeru izdelave kart RP uporablja njene približke, ki jih predstavljajo enačbe (B.5), (B.6), (B.7) oziroma Leejeve približke v enačbi (B.8) [109,110].

$$L_{KE}(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\nu}, \qquad \nu > 1 \tag{B.5}$$

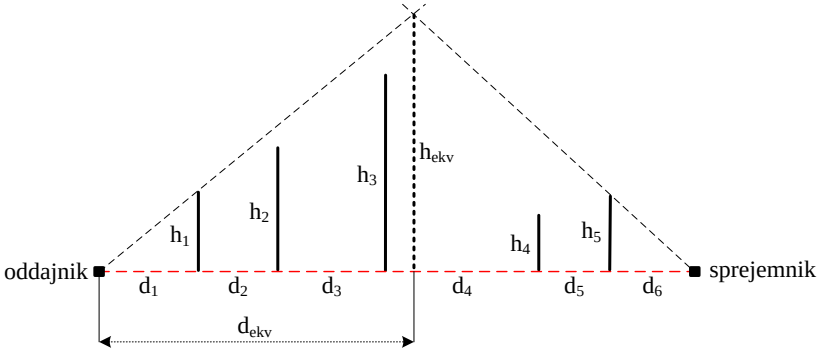
$$L_{KE}(\nu) = 6{,}9 + 20\log\left(\sqrt{1+\nu^2} + \nu\right), \qquad \nu > -0{,}7 \text{ in 0 drugače} \tag{B.6}$$

$$L_{KE}(\nu) = 6{,}9 + 20\log\left(\sqrt{1{,}01 + \nu^2 - 0{,}2\nu} + \nu - 1\right), \qquad \nu = -0{,}7 \text{ in 0 drugače} \tag{B.7}$$

$$L_{KE}(\nu) = \begin{cases} 20\log(0{,}5 - 0{,}62\nu), & -0{,}8 < \nu < 0 \\ 20\log(0{,}5e^{-0{,}95\nu}), & 0 < \nu < 1 \\ 20\log\left(0{,}4 - \sqrt{0{,}1184 - (0{,}38 - 0{,}1\nu)^2}\right), & 1 < \nu < 2{,}4 \\ 20\log(0{,}225/\nu), & \nu > 2{,}4 \end{cases} \tag{B.8}$$

Model Bullington

Bullingtonov model [111] je najenostavnejši in hkrati najmanj natančen model za izračun skupne L_{KE} na podlagi uklona radijskega valovanja na več klinastih ovirah. Vse ovire na poti razširjanja radijskega valovanja najprej nadomesti z ekvivalentno oviro in na njej izračuna izgubo poti zaradi uklona na njej. Ekvivalentno klinasto oviro dobimo kot presečišče dveh premic, ki potekata skozi najvišje vrhove terena, vidne iz točk oddaje in



Slika 42: *Scenarij za razlago Bullingtonovega modela za izračun uklona na več klinastih ovirah.*

sprejema, kot prikazuje slika 42. Izračun izgube skupne poti L_{KE_S} prikazuje enačba (B.9), kjer je d_{ekv} razdalja med oddajnikom in ekvivalentno klinasto oviro in h_{ekv} višina ekvivalentne ovire.

$$L_{KE_S} = L_{KE}(d_{ekv}, h_{ekv}) \tag{B.9}$$

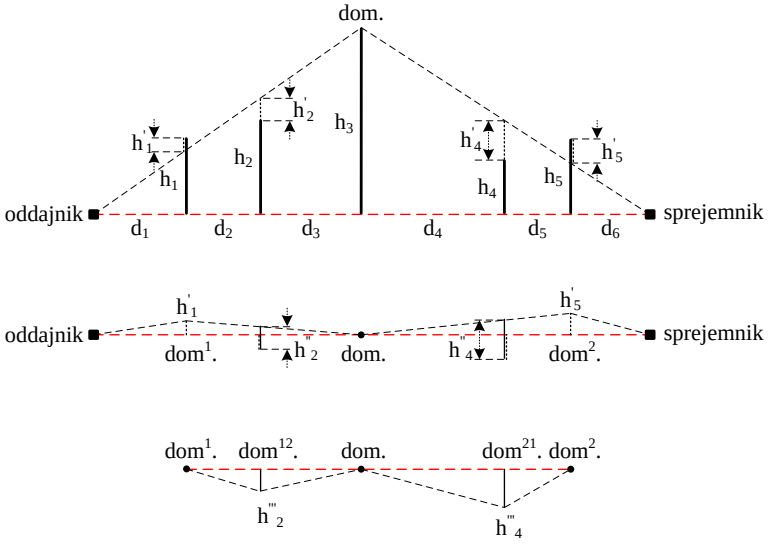
Model Deygout 1966

Model Deygout 1966 [76] je kompleksnejši od modela Bullington in upošteva, da vse ovire na poti razširjanja radijskega valovanja nimajo enakega prispevka k skupni izgubi poti L_{KE_S}. Tista ovira, ki ima največji Fresnelov koeficient ν_i, doprinese največji prispevek L_{KE_i}, zato je dominantna ovira. V kolikor predpostavimo scenarij na sliki 43, je prispevek L_{KE_i} i-te dominantne ($dom.$) ovire določen z enačbo (B.10), kjer h_i predstavlja njeno višino, d_j njeno razdaljo do točke oddajanja in d_k njeno razdaljo do točke sprejema. Skupna izguba poti L_{KE_S} zaradi uklonov na vseh ovirah se izračuna skladno z enačbo (B.11).

$$L_{KE_i} = h_i \sqrt{\frac{d_j + d_k}{\lambda d_j d_k}} = \frac{\nu_i}{\sqrt{2}} \tag{B.10}$$

$$\begin{aligned} L_{KE_S} &= L_{KE}(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6) \\ &= L_{KE_3}(d_1 + d_2 + d_3, d_4 + d_5 + d_6, h_3) \\ &+ L_{KE_1}(d_1, d_2 + d_3, h_1') + L_{KE_5}(d_4 + d_5, d_6, h_5') \\ &+ L_{KE_2}(d_2, d_3, h_2'') + L_{KE_4}(d_4, d_5, h_4'') \end{aligned} \tag{B.11}$$

V prvem koraku se poišče dominantna ovira na celotni poti med oddajnikom in sprejemnikom in izračuna prispevek izgube poti L_{KE_3} zaradi uklona na njej. Nato se poišče dominantne ovire drugega reda, kjer je dom^1. dominantna ovira med prvotno



Slika 43: *Scenarij za razlago modela Deygout 1966, za izračun uklona na več klinastih ovirah.*

dominantno oviro $dom.$ in oddajnikom in dom^2 dominantna ovira med dominantno oviro $dom.$ ter točko sprejema. Na njiju se izračunata prispevka izgube poti L_{KE_1} in L_{KE_5}. V zadnjem koraku so dominantne ovire dom^{12} in dom^{21}, na katerih se izračunata prispevka izgube poti L_{KE_2} in L_{KE_4}.V kolikor se postopek posploši na Z ovir, se predstavljeni koraki ponavljajo, dokler se ne upoštevajo prispevki L_{KE_i}vseh $i = 1, \dots, Z$ ovir.

Model Deygout 1991

Model Deygout 1966 je bil leta 1991 nadgrajen s korekcijskim faktorjem TC za popravljanje izračuna izgube poti in implementiran rekurzivno [112]. V primeru ovir s podobno vrednostjo L_{KE} zelo blizu skupaj je izračunana skupna izguba poti L_{KE_S} modela Deygout 1966 prevelika. Korekcijski faktor TC upošteva razdaljo med takšnima ovirama in njune relativne višine. Za predstavitev modela Deygout 1991 predpostavimo scenarija na slikah 44 in 45. Slika 44 prikazuje scenarij, ko glavno oviro predstavlja ovira m_1, in drugo oviro ovira m_2 ($m_1 = m_{gl}$ in $m_2 = m_{dr}$). Obraten scenarij prikazuje slika 45, kjer je $m_2 = m_{gl}$ in $m_1 = m_{dr}$. Razdalja med ovirama m_1 in m_2 se izrazi z Millingtonovo notacijo razdalje s pomočjo kota ϵ, kot je določeno z enačbo (B.12). Višine ovir v posameznem scenariju se izrazi relativno glede na velikosti prve Fresnelove cone, tj. glede na radija r_1 in r_2, ki sta za valovno dolžino λ izražena z enačbo (B.13) in enačbo (B.14). Nato se izračuna parametra p_o in q_o, kjer se p_o vedno nanaša na oviro m_{gl}. Za scenarij s slike 44 se p_o in q_o izračunata po enačbi (B.15), za scenarij s slike 45 pa po enačbi (B.16).

$$\tan(\epsilon) = \sqrt{\frac{d_2(d_1 + d_2 + d_3)}{d_1 d_3}} \tag{B.12}$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1(d_2 + d_3)}{d_1 + d_2 + d_3}} \tag{B.13}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{\lambda d_3(d_1 + d_2)}{d_1 + d_2 + d_3}} \tag{B.14}$$

$$p_o = \frac{h_1}{r_1}\sqrt{2} \qquad q_o = \frac{h_2}{r_2}\sqrt{2} \tag{B.15}$$

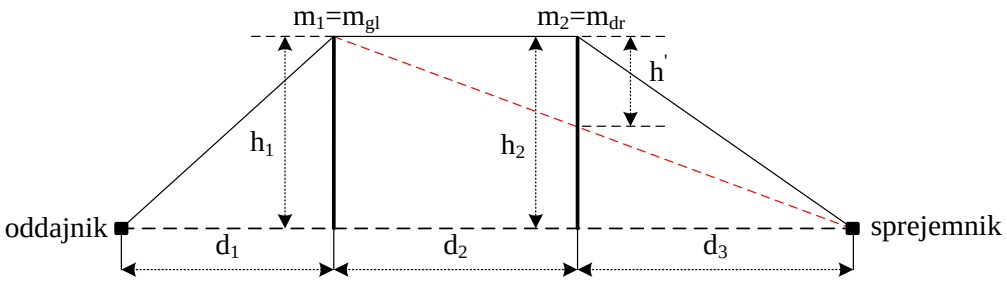
$$p_o = \frac{h_2}{r_2}\sqrt{2} \qquad q_o = \frac{h_1}{r_1}\sqrt{2} \tag{B.16}$$

Z nadaljnjo izpeljavo [112] se izrazi končna enačba korekcijskega faktorja TC, modela Deygout 1966, ki jo prikazuje enačba (B.17).

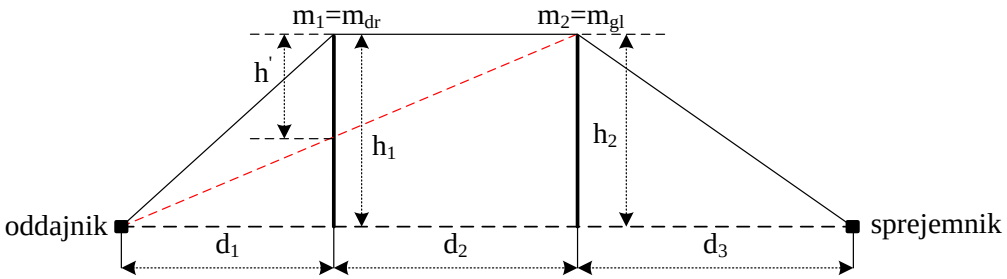
$$TC = \left(12 - 20\log_{10}\left(\frac{2}{1 - \epsilon/\pi}\right)\right)\left(\frac{q_o}{p_o}\right)^{2p_o} \tag{B.17}$$

TC se na koncu uporabi za izračun skupne izgube poti L_{KE_S} po enačbi (B.18), pri čemer je h' normalizirana višina druge ovire nad osjo prve Fresnelove cone.

$$L_{KE_S} = L_{KE_{gl}} + L_{KE_{dr}} - TC \tag{B.18}$$



Slika 44: *Primer scenarija za prikaz delovanja modela Deygout 1991, ko je glavna ovira* m_1.



Slika 45: *Primer scenarija za prikaz delovanja modela Deygout 1991, ko je glavna ovira* m_2.

Priloga C: Modeli za lokalizacijo oddajnikov

Lokalizacija na podlagi vzvratnega razširjanja

Lokalizacijski model na podlagi vzvratnega razširjanja [77] obstaja v dveh izvedbah. Prva izvedba modela se uporabi ob predpostavki, da je faktor izgube poti α enak na celotnem geografskem področju, druga izvedba pa ob predpostavki, da se α preko področja spreminja. Obe izvedbi temeljita na uporabi log-normalnega modela razširjanja radijskega valovanja s senčenjem, ki ga prikazuje enačba (A.4). Enačba (A.4) se v smislu prejete moči lahko zapiše v obliki (C.1), kjer je $P_{rx}(d)$ prejeta moč na razdalji d od oddajnika, $P_0(d_0)$ je prejeta moč na referenčni razdalji d_0 od oddajnika in X_σ naključna spremenljivka Gaussove gostote verjetnosti.

$$P_{rx}(d) = P_0(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d_0}{d}\right) + X_\sigma \tag{C.1}$$

1. Izvedba:
V kolikor so naprave MCD zelo blizu oddajnika, se neovirano razširjanje radijskega valovanja do njihove lokacije lahko poenostavljeno opiše kot razširjanje radijskega valovanja v praznem prostoru. Ker se pri uporabi modela (C.1) referenčna razdalja d_0 običajno izbere blizu oddajnika, se $P_0(d_0)$ lahko izračuna na isti način.

1. Korak
N naprav MCD se glede na izmerjene jakosti radijskega signala oddajnika uredi v padajočem vrstnem redu in označi z vrednostmi od 0 do $N-1$.

2. Korak
V kolikor je vrednost izmerka naprave MCD z oznako 0 nad izbranim pragom, le-ta pridobi status referenčne naprave. Pripadajočo referenčno razdaljo od oddajnika d_0 se izračuna z enačbo (C.2), kjer je G_t dobitek oddajne antene, G_r je dobitek sprejemne oddajne, P_{tx} je oddajna moč oddajnika, λ je valovna dolžina signala in $P_0(d_0)$ izmerek jakosti radijskega signala. Produkt $P_{tx}G_t$, je mogoče oceniti, saj je maksimalna oddajna moč brezžičnih naprav regulirana [77].

$$d_0 = \sqrt{\frac{P_{tx}G_tG_r\lambda^2}{P_0(d_0)(4\pi)^2}} \tag{C.2}$$

V kolikor vrednost izmerka nobene izmed naprav MCD ni nad izbranim pragom, se 1. in 2. korak ponavljata, dokler se naprava s takšnim izmerkom ne pojavi.

3. Korak
S predpostavko, da se radijski signal od oddajnika do referenčne naprave MCD na lokaciji (x_0, y_0) razširja neovirano, se na lokaciji (x_0, y_0) nariše krožnico z radijem d_0 in predvidi, da se oddajnik nahaja nekje na njej.

4. Korak

Iz nabora naprav MCD se izbere želeno število naprav, npr. tiste z oznakami 1, 2, in 3. Glede na kote φ med 0° do 359° se z vsake lokacije krožnice do lokacij izbranih naprav MCD modelira razširjanje radijskega valovanja z enačbo (C.1). Pri tem se v odvisnosti od φ za vsako napravo MCD izračuna faktor izgube poti $\alpha(\varphi)$ [77].

5. Korak

Nadalje se z enačbo (C.3) izračuna vse mogoče kombinacije relativnih razlik Δ_α med faktorji izgube poti, z enačbo (C.4) se izračuna $\bar{\varphi}$ in z enačbo (C.5) se izračuna $\bar{\alpha}$.

$$\begin{aligned} \Delta_{\alpha_{12}} &= |\alpha_1(\varphi) - \alpha_2(\varphi)| \\ \Delta_{\alpha_{13}} &= |\alpha_1(\varphi) - \alpha_3(\varphi)| \\ \Delta_{\alpha_{32}} &= |\alpha_3(\varphi) - \alpha_2(\varphi)| \end{aligned} \tag{C.3}$$

$$\bar{\varphi} = arg\min(\Delta_{\alpha_{12}} + \Delta_{\alpha_{13}} + \Delta_{\alpha_{32}}) \tag{C.4}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1(\bar{\varphi}) + \alpha_2(\bar{\varphi}) + \alpha_3(\bar{\varphi})}{3} \tag{C.5}$$

Na koncu se z enačbo (C.6) oceni koordinato lokacije oddajnika $(\hat{x}, \hat{y})$.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x_0 + d_0 \cos(\bar{\varphi}) \\ \hat{y} &= y_0 + d_0 \sin(\bar{\varphi}) \end{aligned} \tag{C.6}$$

2. Izvedba:

Prvi in drugi korak se izvedeta enako kot v primeru prve izvedbe lokalizacijskega modela.

3. Korak

Z naprave MCD z oznako 0 se pridobi kot prejetja radijskega signala ϑ in z enačbo (C.7) oceni približna lokacija oddajnika.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x_0 + d_0 cos(\vartheta) \\ \hat{y} &= y_0 + d_0 sin(\vartheta) \end{aligned} \tag{C.7}$$

4. Korak

Z iteracijskim algoritmom vzvratnega razširjanja [77] se na lokacijah naprav MCD oceni vrednosti koeficienta α. Za to se uporabi cenovno funkcijo (C.8), kjer je d_i razdalja i-te naprave MCD od oddajnika, P_i vrednost njenega izmerka in $f(\alpha_i, d_i)$ ocenjena jakost radijskega signala na njeni lokaciji, ki se izračuna po enačbi (C.1).

$$J(\alpha_1, \dots \alpha_N) = \frac{1}{N}(f(\alpha_i, d_i) - P_i)^2 \tag{C.8}$$

V prvi iteraciji algoritma se za izračun začetnih približkov α_i uporabi psevdonaključni proces. V ostalih iteracijah se za izračun cenovne funkcije uporabi njihove posodobljene vrednosti. Za izračun posodobljenih vrednosti koeficientov α_i se najprej izračuna druge parcialne odvode izraza (C.8) po α_i in za korak posodobitve η izbere vrednosti, pri

katerih je izraz (C.9) minimalen.

$$\eta = \min\left(\frac{\partial J^2(\alpha_1, \dots, \alpha_N)}{\partial \alpha_1^2}, \frac{\partial J^2(\alpha_1, \dots, \alpha_N)}{\partial \alpha_2^2}, \dots, \frac{\partial J^2(\alpha_1, \dots, \alpha_N)}{\partial \alpha_N^2}\right) \tag{C.9}$$

Posodobljene vrednosti koeficientov α_i v L-ti iteraciji algoritma se izračuna z enačbo (C.10).

$$\alpha_i^{\mathrm{L}+1} = \alpha_i^{\mathrm{L}} + \eta \frac{\partial J(\alpha_1, \dots, \alpha_N)}{\partial \alpha_i} \tag{C.10}$$

Za dosego zadovoljive natančnosti ocenjenih koeficientov $\hat{\alpha}_i$ je običajno treba izvesti vsaj 70 iteracij algoritma.

5. Korak
Po izračunu $\hat{\alpha}_i$ se z enačbo (C.11) oceni razdalje med napravami MCD in oddajnikom.

$$d_i = \frac{d_0}{10^{\frac{P_i - P_0(d_0)}{10\hat{\alpha}_i}}} \tag{C.11}$$

6. Korak
Na koncu se izračuna področje potencialnih lokacij oddajnika, ki ga predstavlja presečišče krožnic z izračunanimi radiji d_i in središči na lokacijah naprav MCD.

Lokalizacija na podlagi predučasenja

Predučasenje se v osnovi uporablja za časovno usklajevanje oziroma sinhronizacijo v komunikaciji med mobilnimi terminali in baznimi postajami pri tehnologijah GSM in LTE [113]. Dodatno se predučasenje lahko uporabi za lokalizacijo mobilnih terminalov ali baznih postaj, za kar je treba poznati njegove osnovne značilnosti.

V primeru tehnologije GSM se parameter predučasenja TA prenaša kot kodirana vrednost med 0 in 63 in ponazarja zakasnitev radijskega signala med 0 in 233 μs. Sprememba ene vrednosti TA pomeni razliko v časovnem zamiku (C.12), kar ob razširjanju radijskega valovanja s hitrostjo svetlobe c pomeni korak v razdalji $\Delta_{d_{GSM}}$ (C.13).

$$\frac{233\ \mu s}{63} = 3{,}69\ \mu\mathrm{s} \tag{C.12}$$

$$\Delta_{d_{GSM}} = c\frac{1}{2}3{,}69\ \mu s = 553{,}5\ \mathrm{m} \tag{C.13}$$

Predučasenje tako omogoča sinhronizacijo mobilnih terminalov in baznih postaj do maksimalne razdalje $d_{max} \approx 35$ km, kot prikazuje enačba (C.14).

$$d_{max} = 63\Delta_{d_{GSM}} \approx 35\ \mathrm{km} \tag{C.14}$$

V primeru tehnologije LTE se TA prenaša kot kodirana vrednost med 0 in 1282 in ponazarja zakasnitev radijskega signala med 0 in 667,66 μs. Sprememba ene vrednosti TA pomeni razliko v časovnem zamiku (C.15), kar ob razširjanju radijskega valovanja s hitrostjo svetlobe c pomeni korak v razdalji $\Delta_{d_{LTE}}$ (C.16).

$$\frac{667{,}66\ \mu s}{1282} = 0{,}5208\ \mu\text{s} \tag{C.15}$$

$$\Delta_{d_{LTE}} = c\frac{1}{2}0{,}5208\ \mu s = 78{,}12\ \text{m} \tag{C.16}$$

Predučasenje tako omogoča sinhronizacijo mobilnih terminalov in baznih postaj do maksimalne razdalje $d_{max} \approx 100$ km, kot prikazuje enačba (C.17).

$$d_{max} = 1282\Delta_{d_{LTE}} \approx 100\ \text{km} \tag{C.17}$$

Ker se vrednosti TA pri izračunu zaokrožijo na najbližje celo število, se razdalje d med mobilnimi terminali in baznimi postajami pri GSM nahajajo v območju (C.18) in pri LTE v območju (C.19).

$$\begin{aligned} &\Delta_{d_{GSM}}(TA - 0{,}5) \le d < \Delta_{d_{GSM}}(TA + 0{,}5), \quad TA > 0 \\ &0 \le d < 0{,}5\Delta_{d_{GSM}}, \quad TA = 0 \end{aligned} \tag{C.18}$$

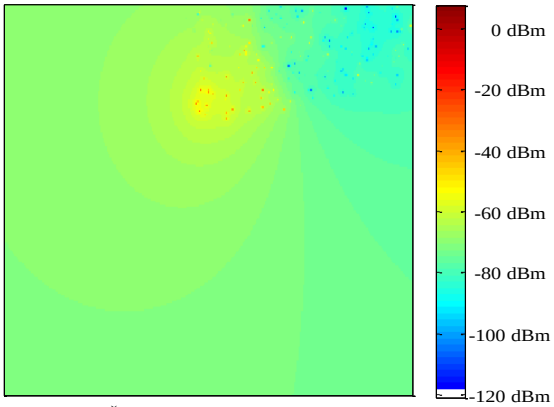
$$\begin{aligned} &\Delta_{d_{LTE}}(TA - 0{,}5) \le d < \Delta_{d_{LTE}}(TA + 0{,}5), \quad TA > 0 \\ &0 \le d < 0{,}5\Delta_{d_{LTE}}, \quad TA = 0 \end{aligned} \tag{C.19}$$

V primeru lokalizacije izbrane bazne postaje na podlagi vrednosti TA več mobilnih terminalov področje potencialnih lokacij predstavlja presečišče kolobarjev s središči na lokacijah mobilnih terminalov in radiji, ki se izračunajo z enačbo (C.18) ali (C.19).

Priloga D: Karte RP, izdelane za preizkus in ovrednotenje metode STM z $N = 200$ simulacijsko generiranimi prostorsko porazdeljenimi izmerki

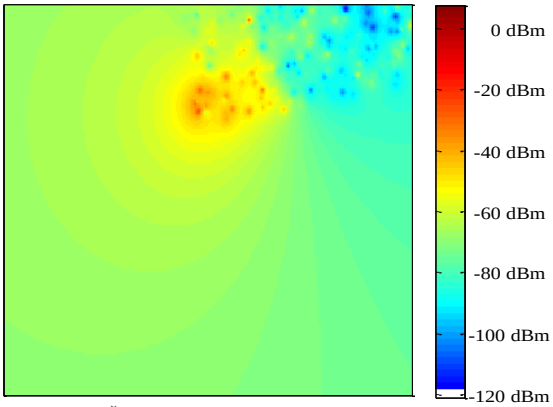
Scenarij porazdelitve izmerkov 2:

IDW



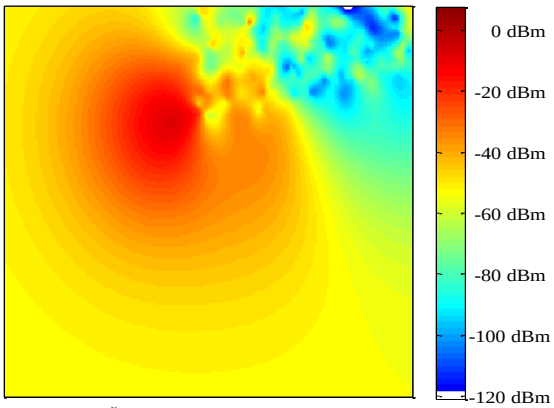
Število izmerkov N=200

IDW2



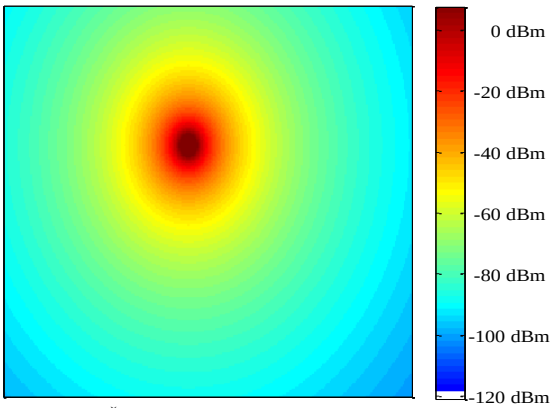
Število izmerkov N=200

Kriging



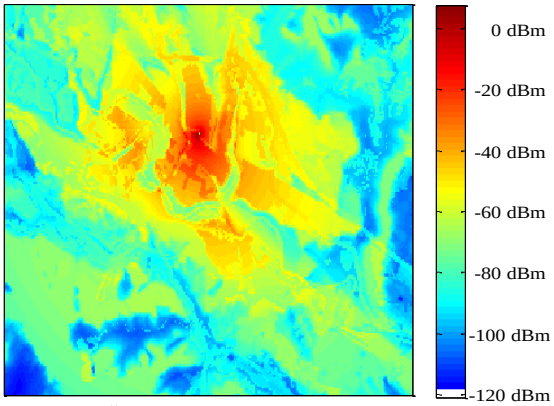
Število izmerkov N=200

LIvE



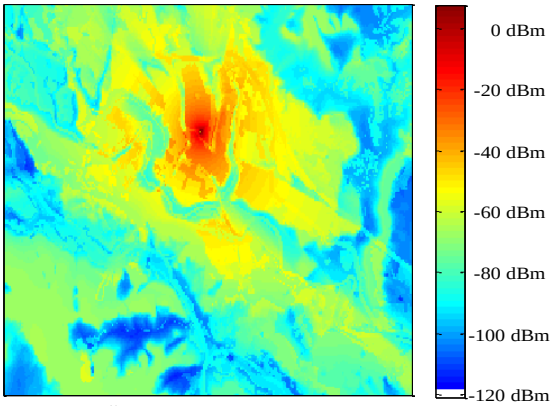
Število izmerkov N=200

STM-vsesmerno



Število izmerkov N=200

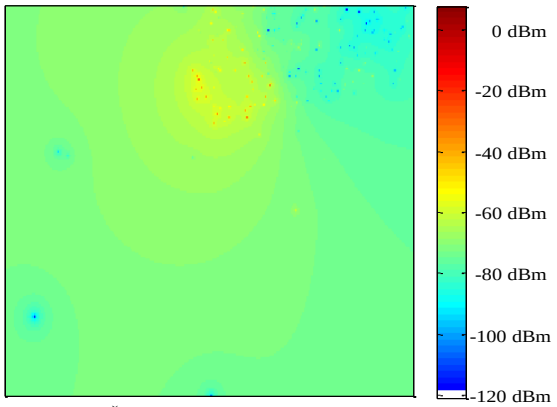
STM-usmerjeno



Število izmerkov N=200

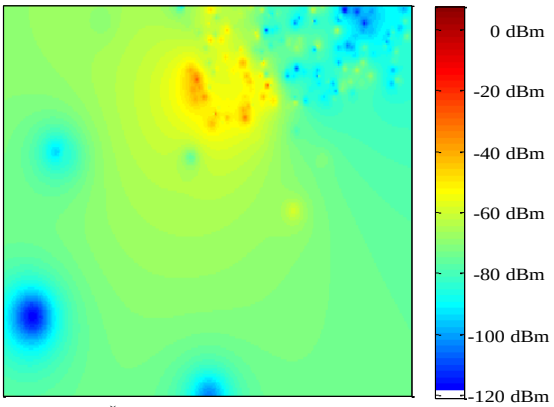
Scenarij porazdelitve izmerkov 3:

IDW



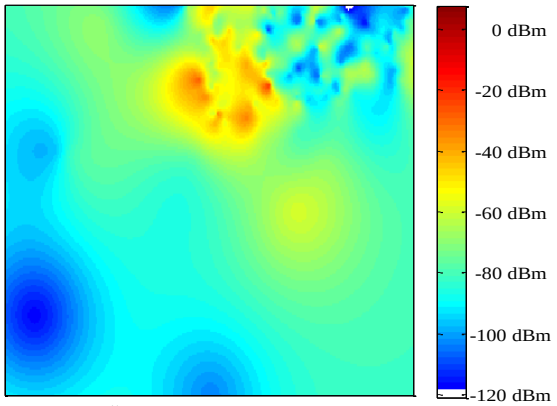
Število izmerkov N=200

IDW2



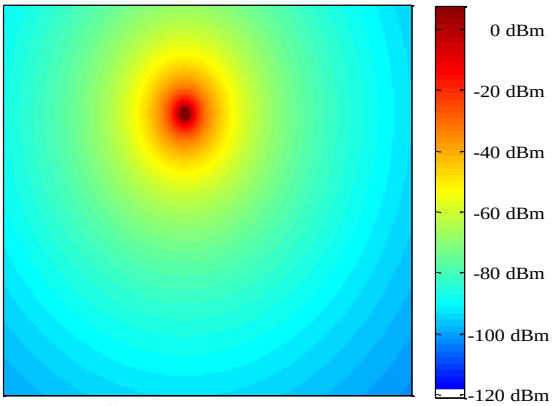
Število izmerkov N=200

Kriging



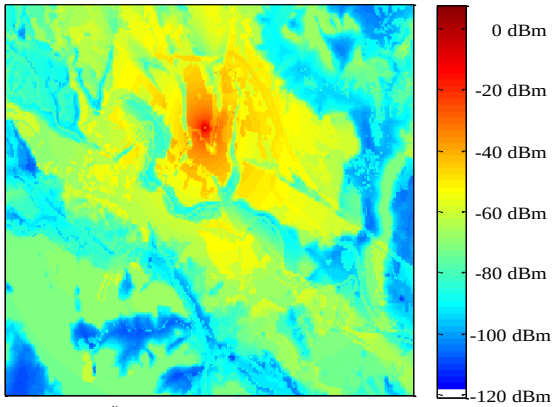
Število izmerkov N=200

LIvE



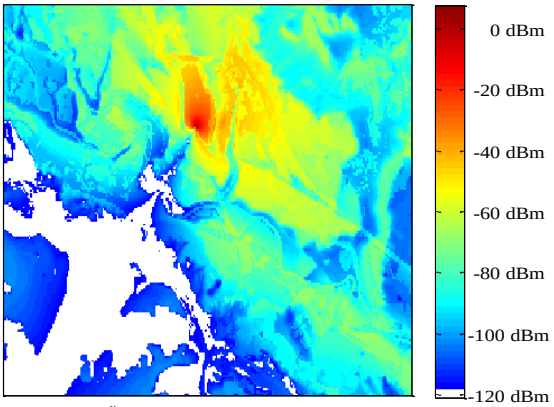
Število izmerkov N=200

STM-vsesmerno



Število izmerkov N=200

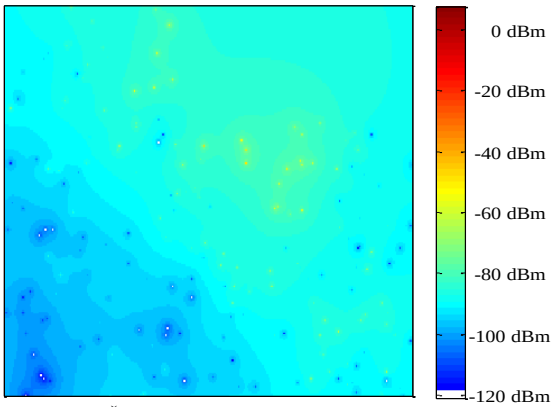
STM-usmerjeno



Število izmerkov N=200

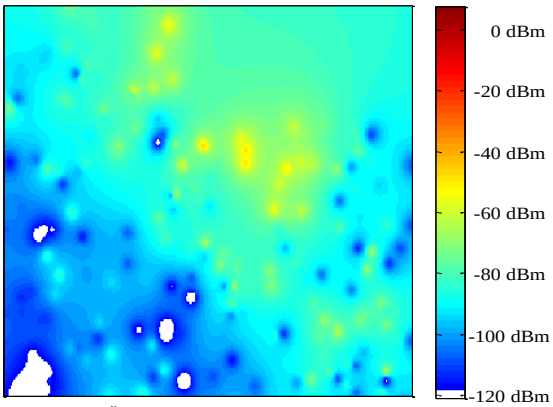
Scenarij porazdelitve izmerkov 4:

IDW



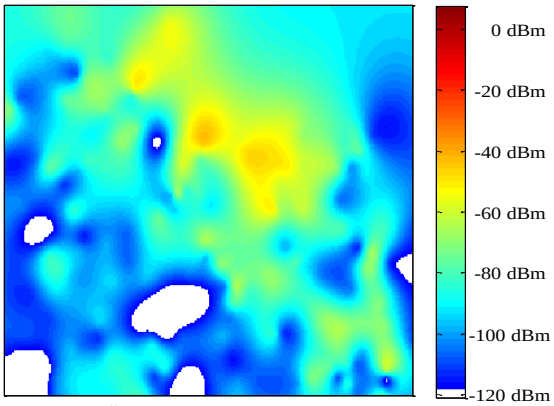
Število izmerkov N=200

IDW2



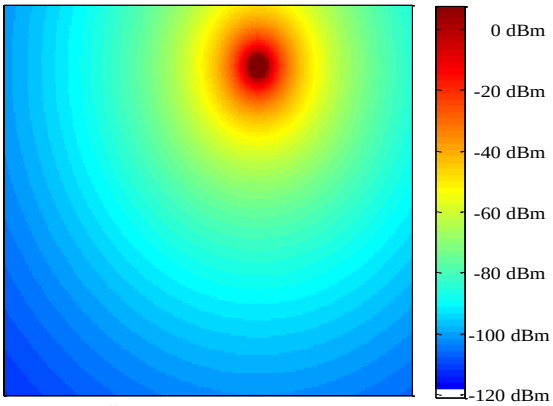
Število izmerkov N=200

Kriging



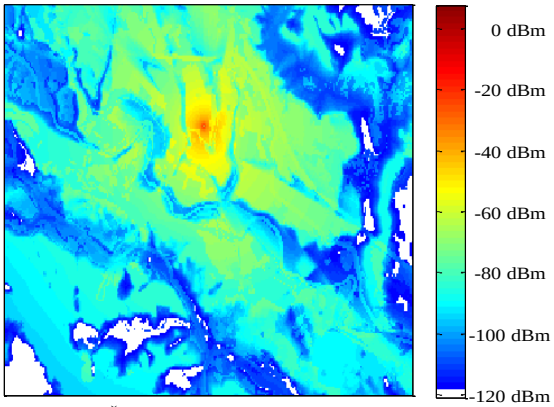
Število izmerkov N=200

LIvE



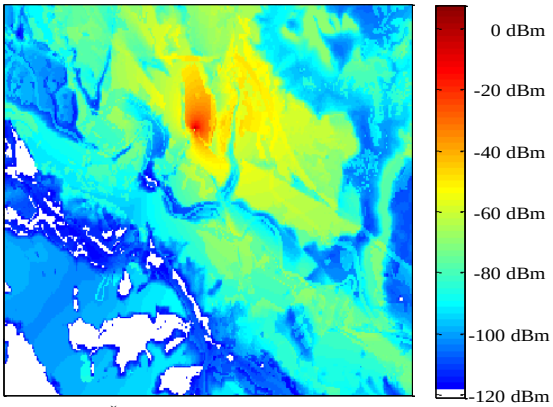
Število izmerkov N=200

STM-vsesmerno



Število izmerkov N=200

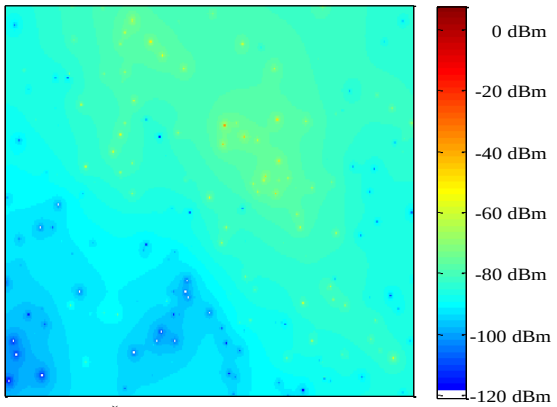
STM-usmerjeno



Število izmerkov N=200

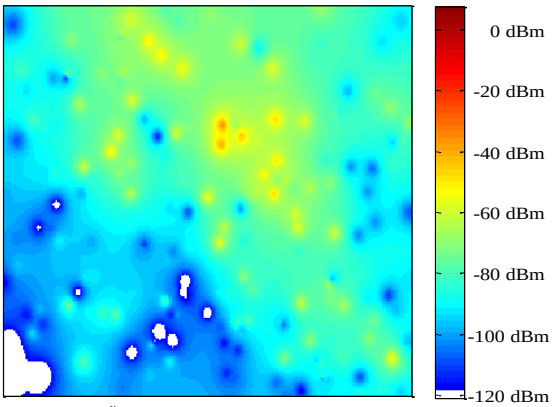
Scenarij porazdelitve izmerkov 5:

IDW



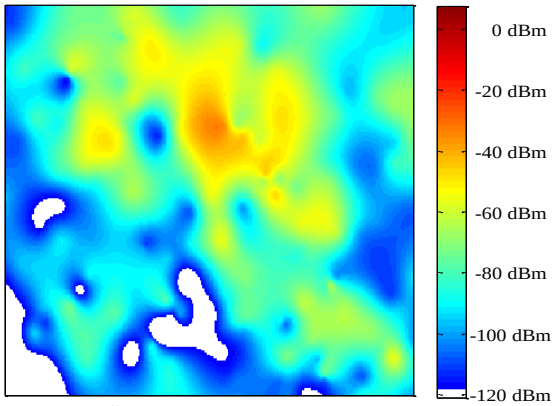
Število izmerkov N=200

IDW2



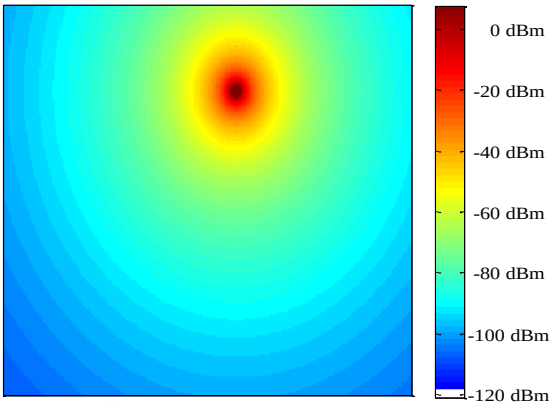
Število izmerkov N=200

Kriging



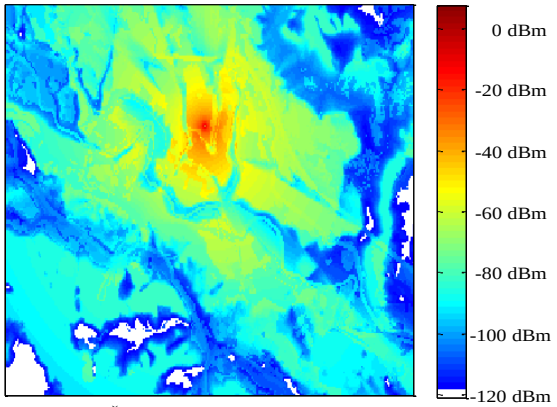
Število izmerkov N=200

LIvE



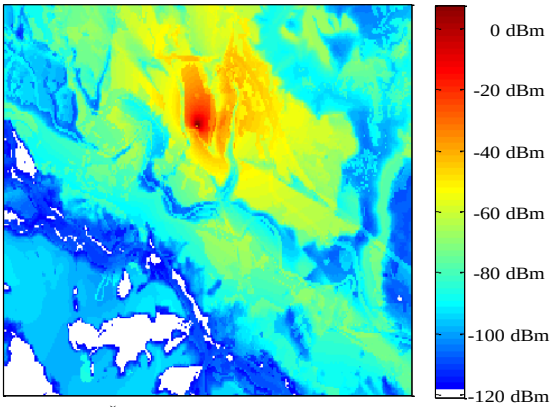
Število izmerkov N=200

STM-vsesmerno



Število izmerkov N=200

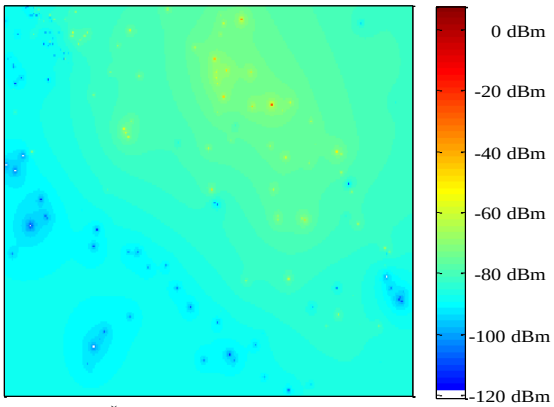
STM-usmerjeno



Število izmerkov N=200

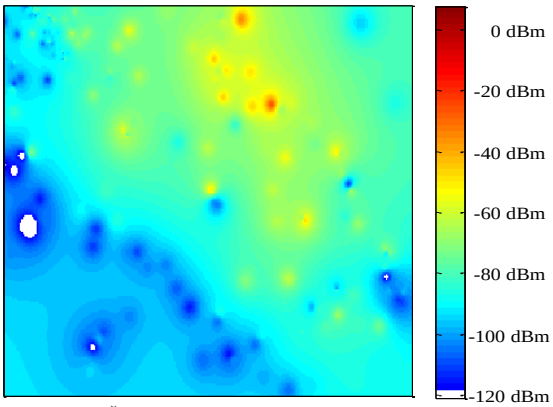
Scenarij porazdelitve izmerkov 6:

IDW



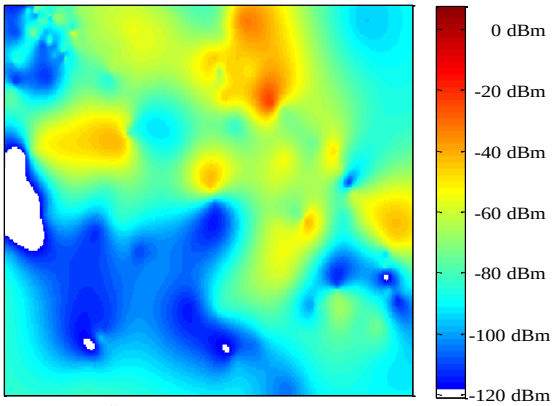
Število izmerkov N=200

IDW2



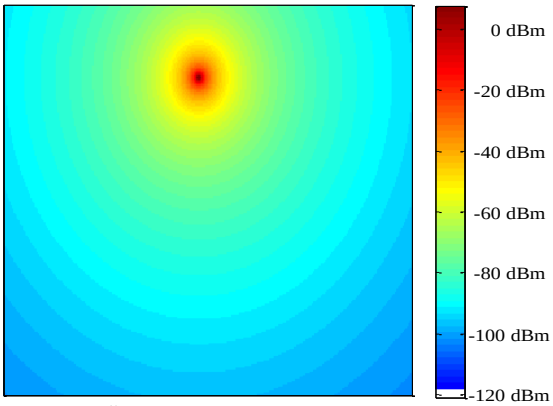
Število izmerkov N=200

Kriging



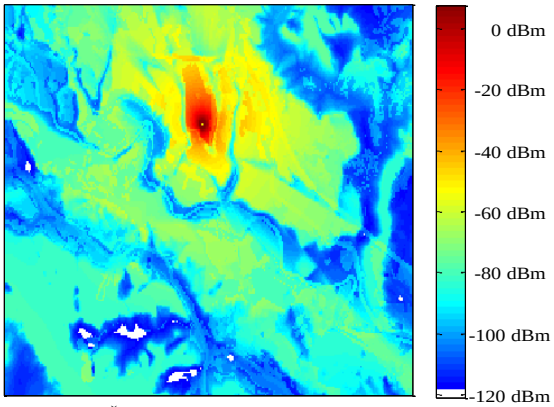
Število izmerkov N=200

LIvE



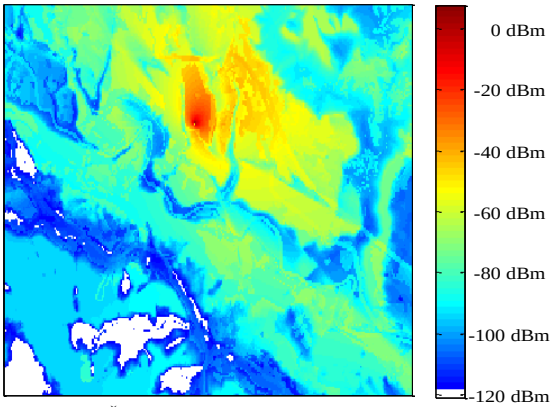
Število izmerkov N=200

STM-vsesmerno



Število izmerkov N=200

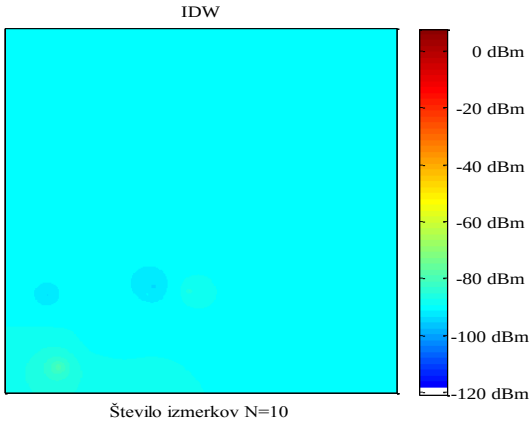
STM-usmerjeno

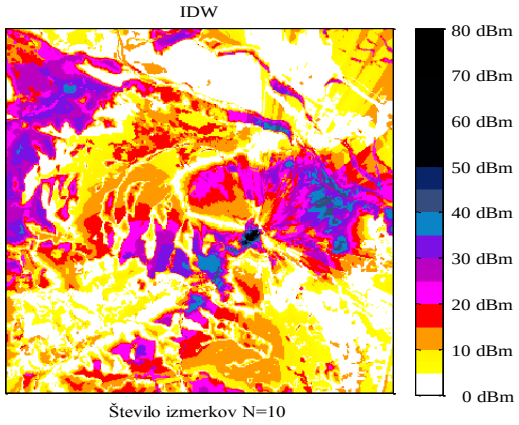


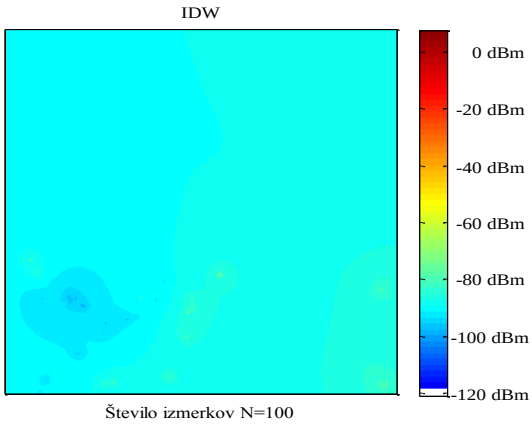
Število izmerkov N=200

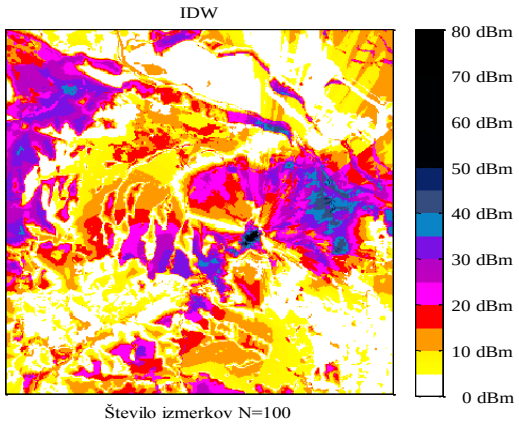
Priloga E: Izdelane karte RP (levo) in njihove absolutne napake [dBm] v primerjavi z referenčno karto RP (desno) za preizkus in ovrednotenje metode STM z različnim številom realnih izmerkov

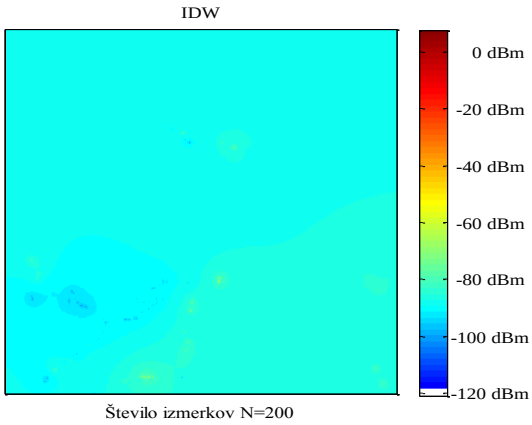
Metoda IDW:

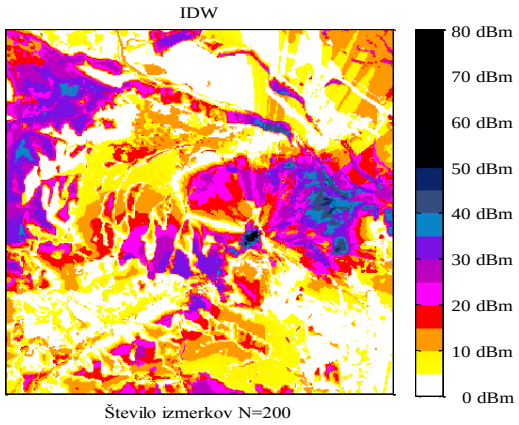


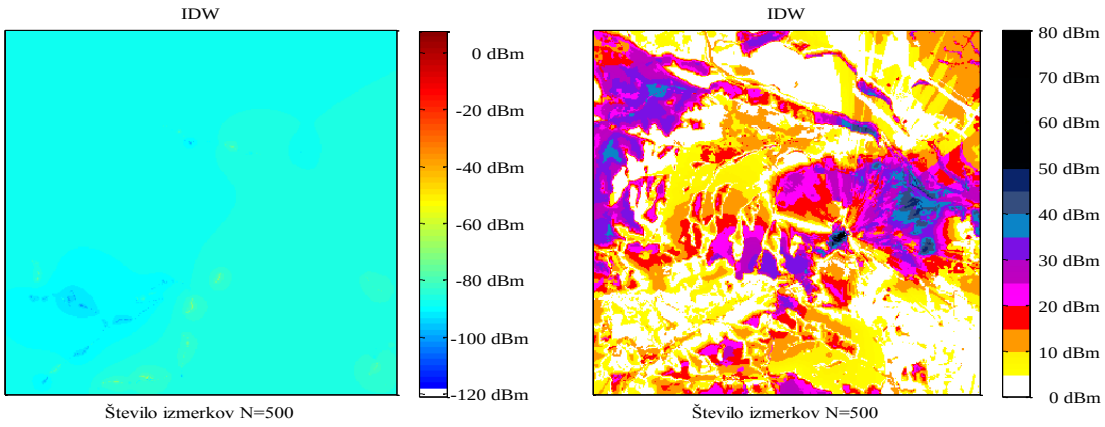


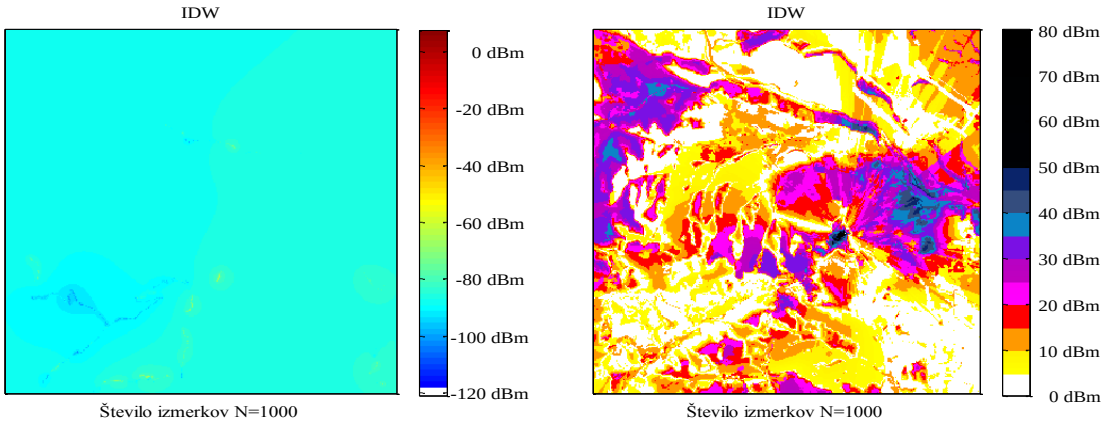




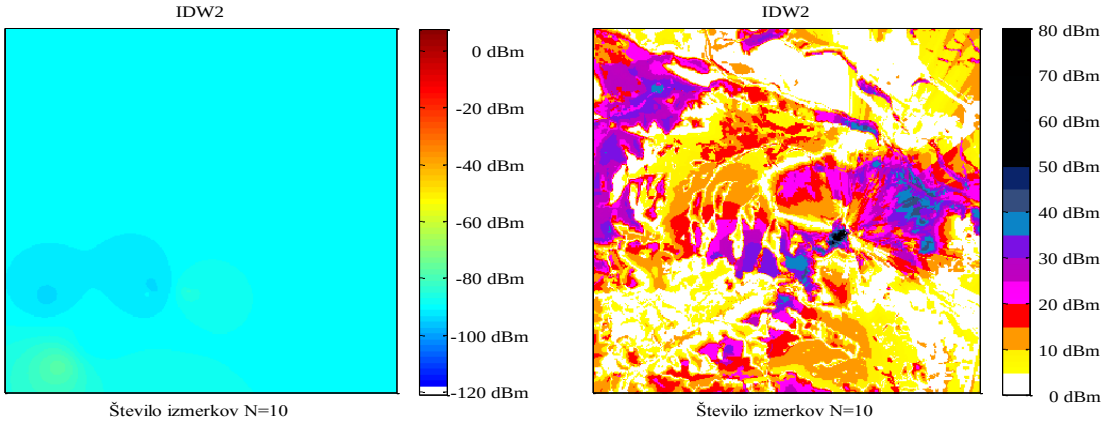


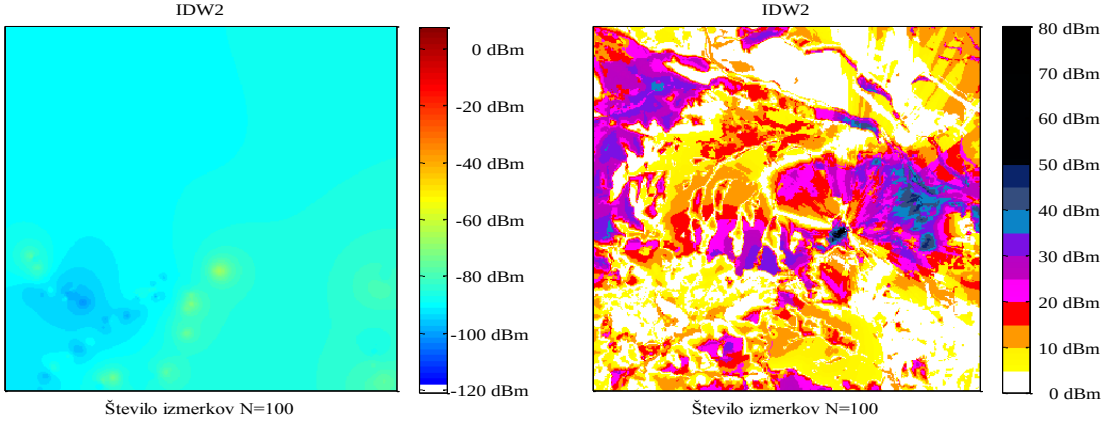


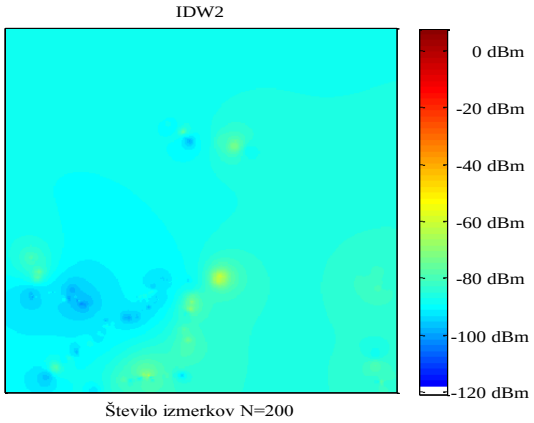

IDW
0 dBm
-20 dBm
-40 dBm
-60 dBm
-80 dBm
-100 dBm
-120 dBm
Število izmerkov N=500
IDW
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov N=500

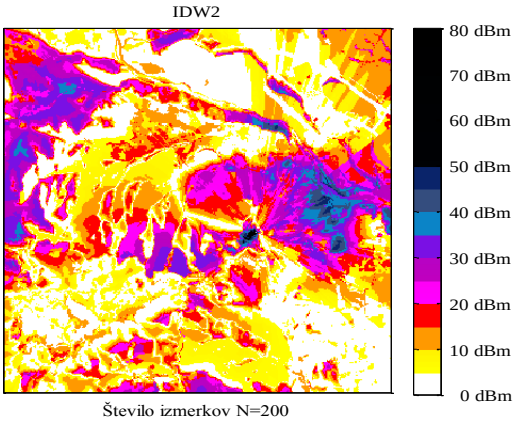

IDW
0 dBm
-20 dBm
-40 dBm
-60 dBm
-80 dBm
-100 dBm
-120 dBm
Število izmerkov N=1000
IDW
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov N=1000

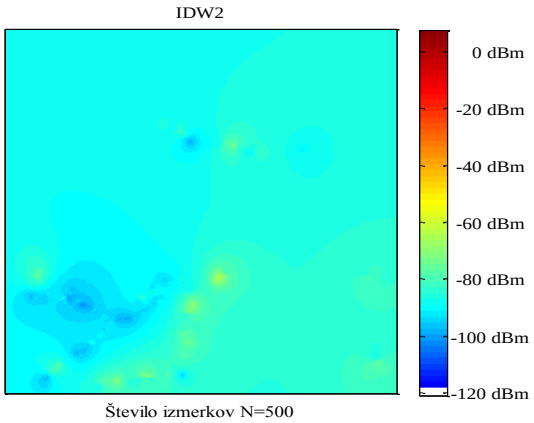
Metoda IDW2:

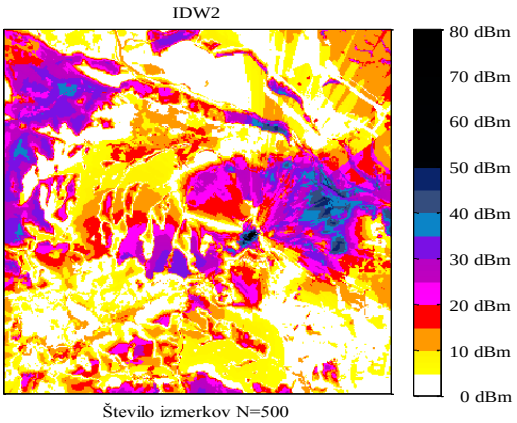

IDW2
0 dBm
-20 dBm
-40 dBm
-60 dBm
-80 dBm
-100 dBm
-120 dBm
Število izmerkov N=10
IDW2
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov N=10

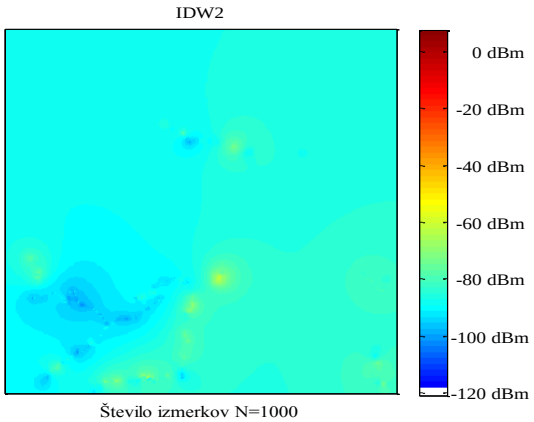

IDW2
0 dBm
-20 dBm
-40 dBm
-60 dBm
-80 dBm
-100 dBm
-120 dBm
Število izmerkov N=100
IDW2
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov N=100

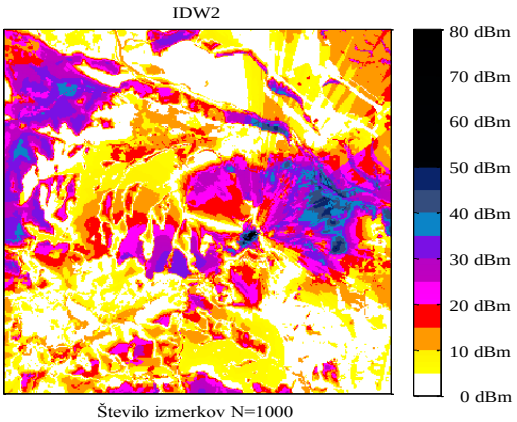




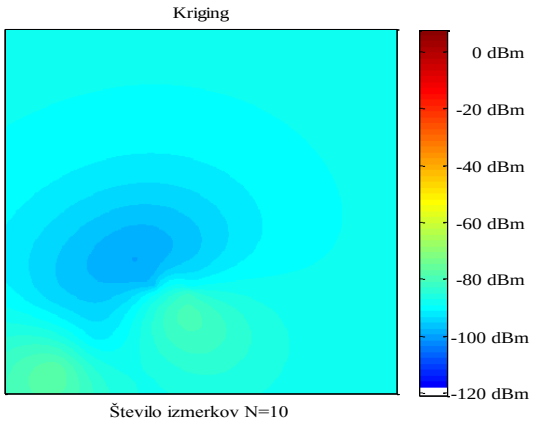


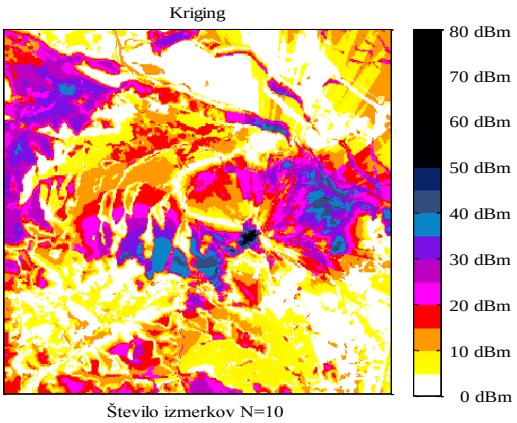




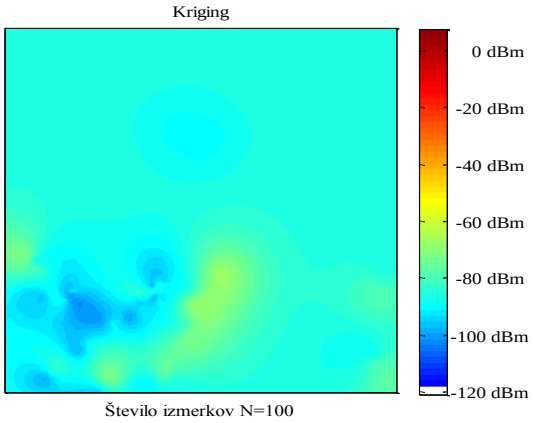


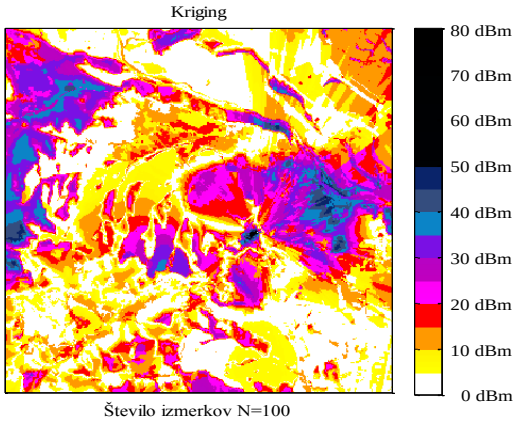
Krigingova metoda:

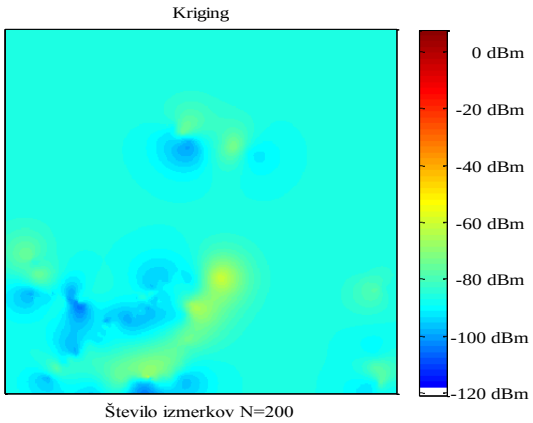


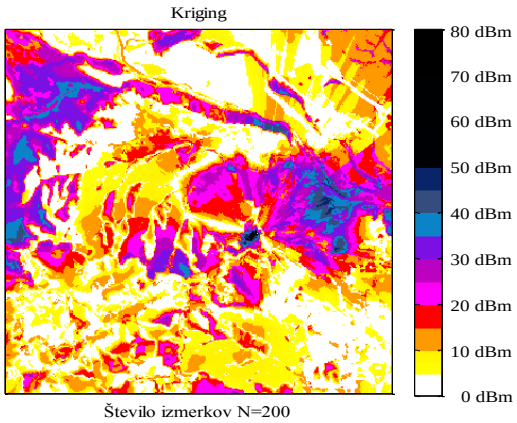


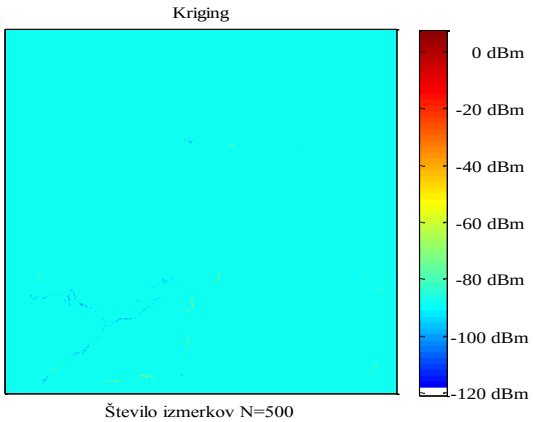
Priloga E: Izdelane karte RP (levo) in njihove absolutne napake [dBm] v primerjavi z referenčno karto RP (desno) za preizkus in ovrednotenje metode STM z različnim številom realnih izmerkov

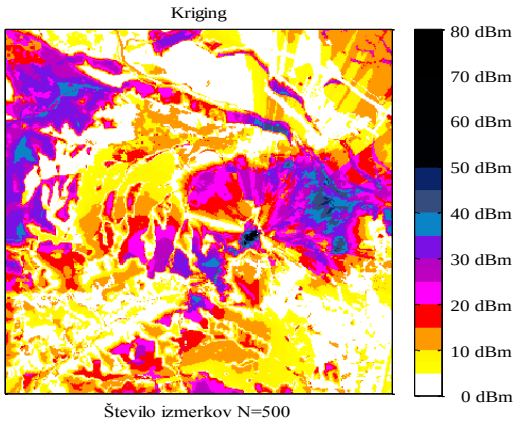


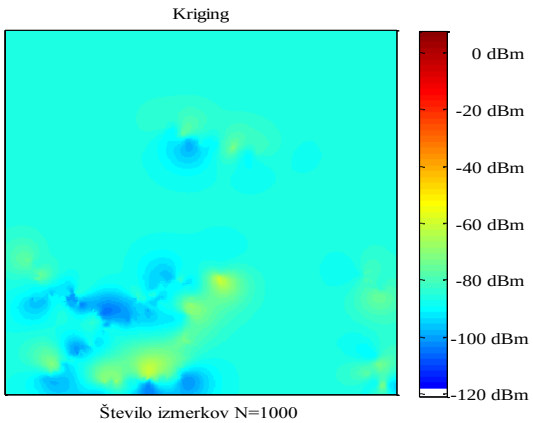


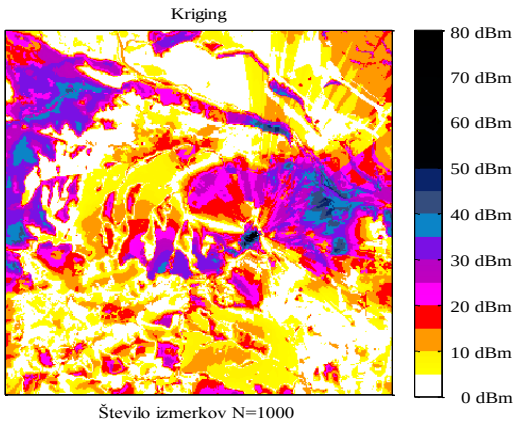




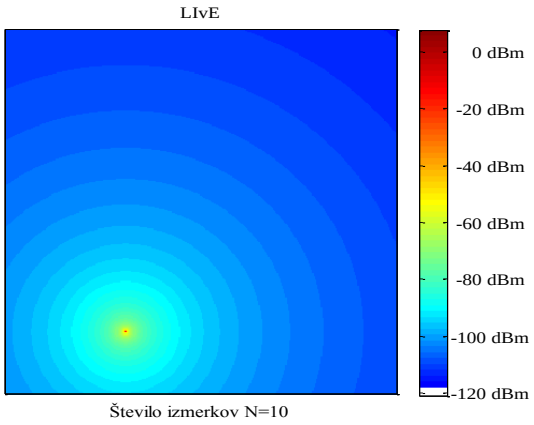




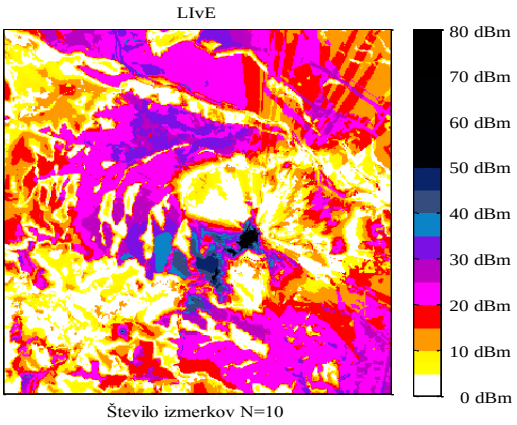




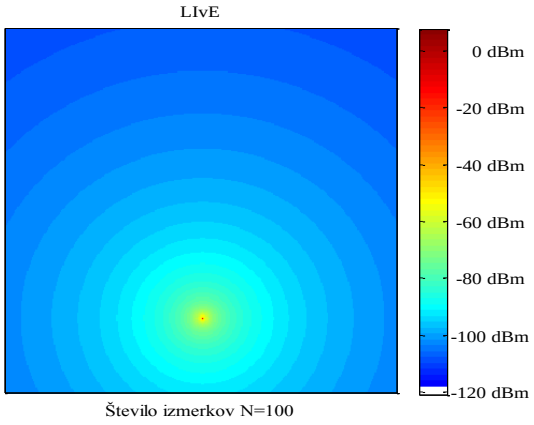
Metoda LIvE:



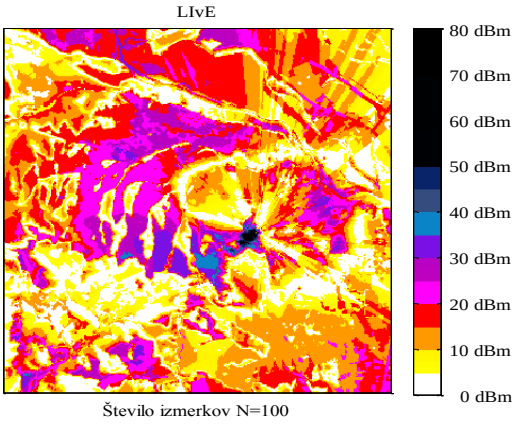
Število izmerkov N=10



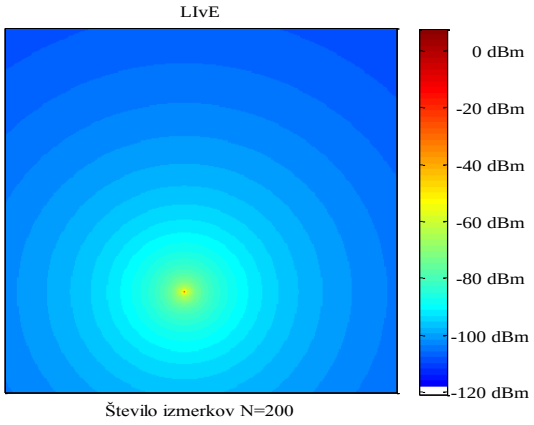
Število izmerkov N=10



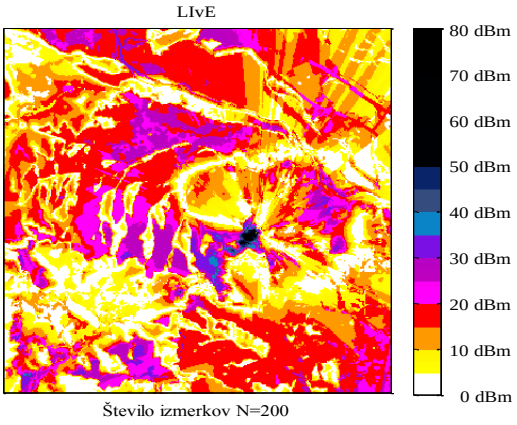
Število izmerkov N=100



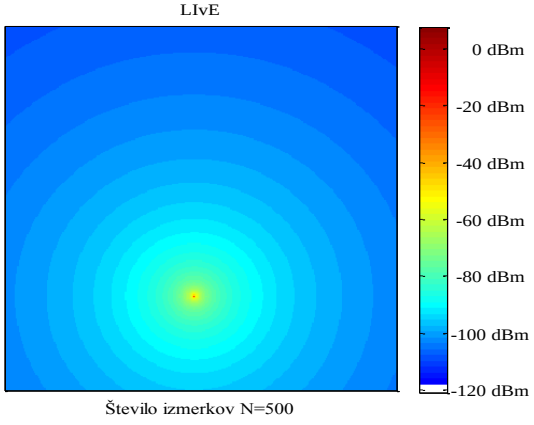
Število izmerkov N=100



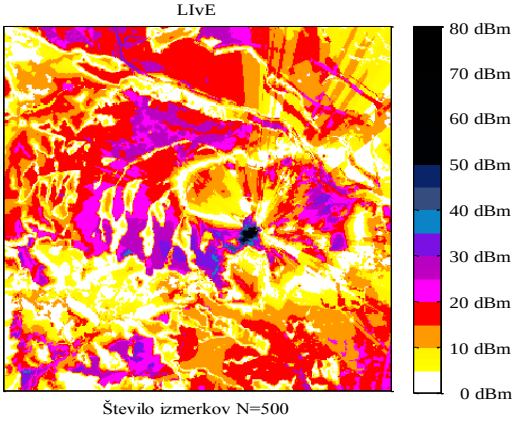
Število izmerkov N=200



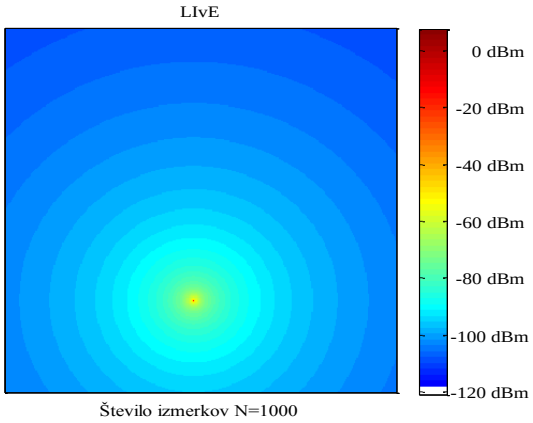
Število izmerkov N=200

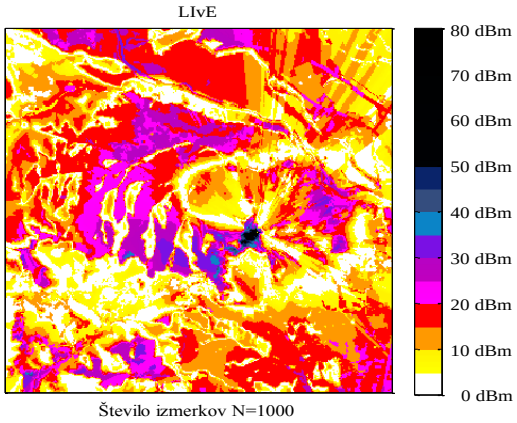


Število izmerkov N=500

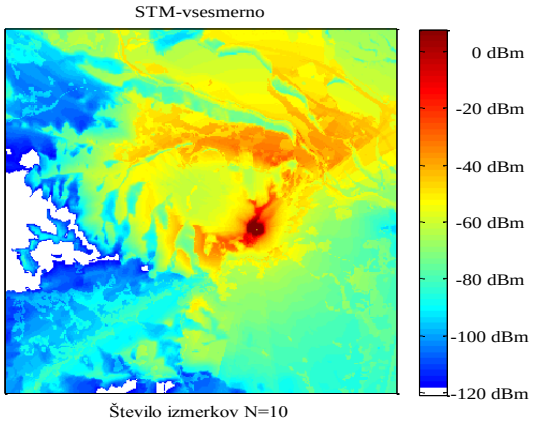


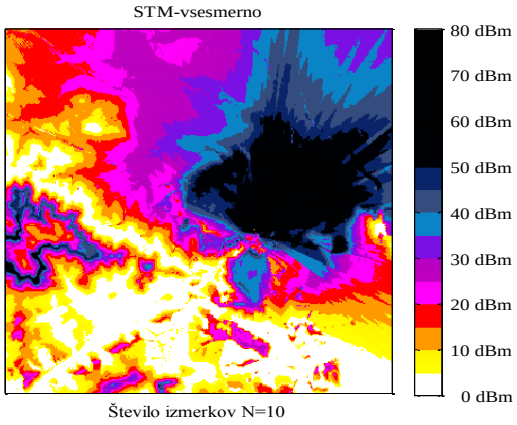
Število izmerkov N=500

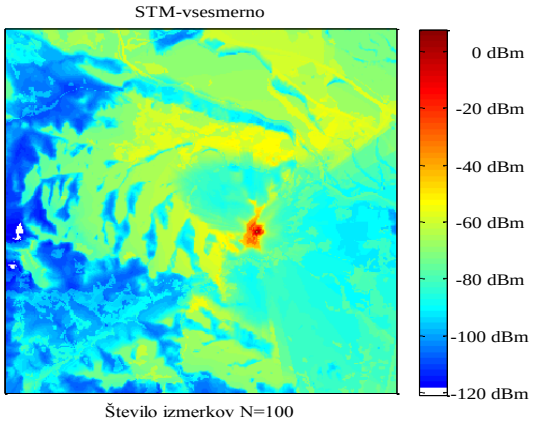


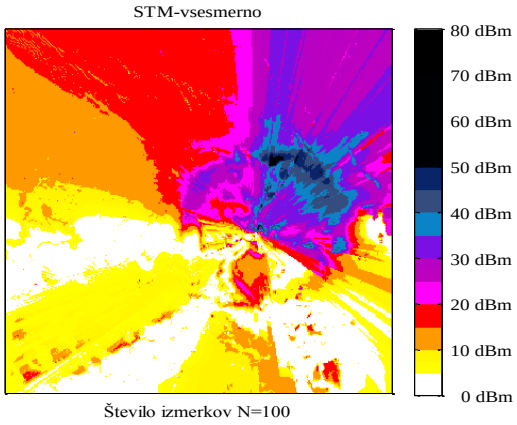


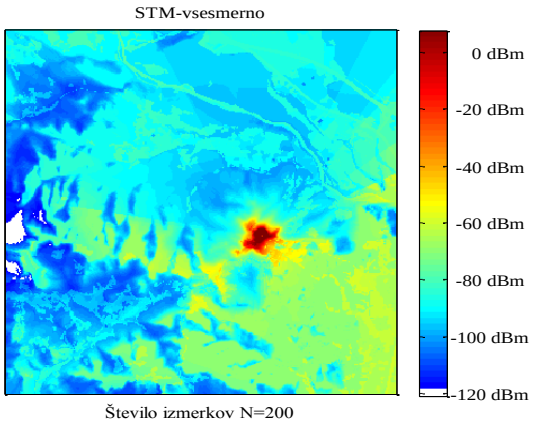
Metoda STM, ki predvideva vsesmerni oddajnik:

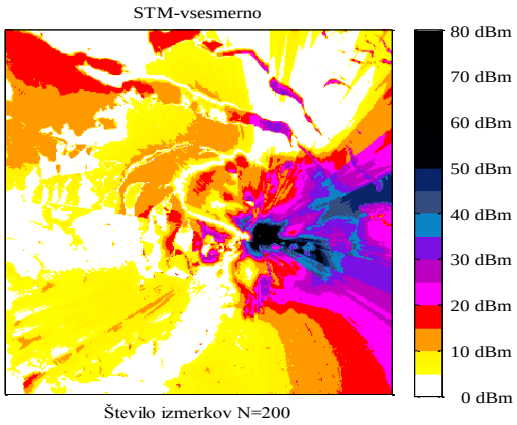


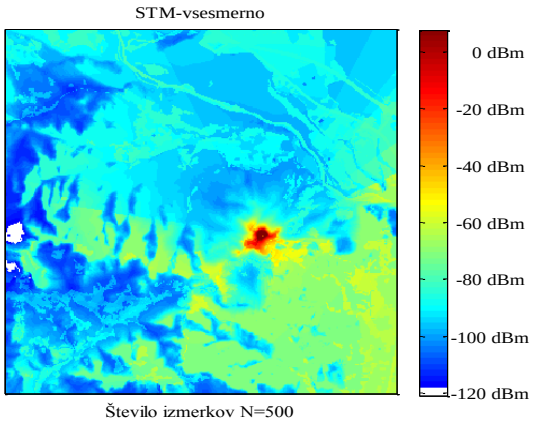


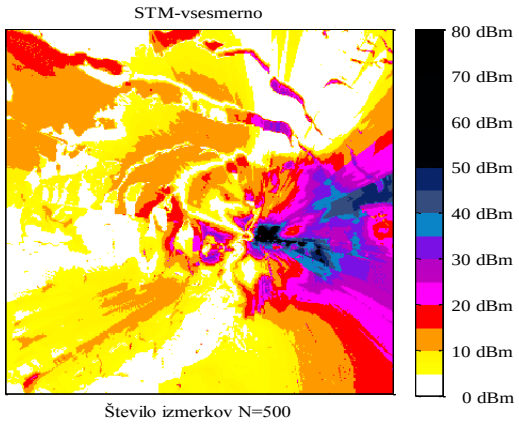


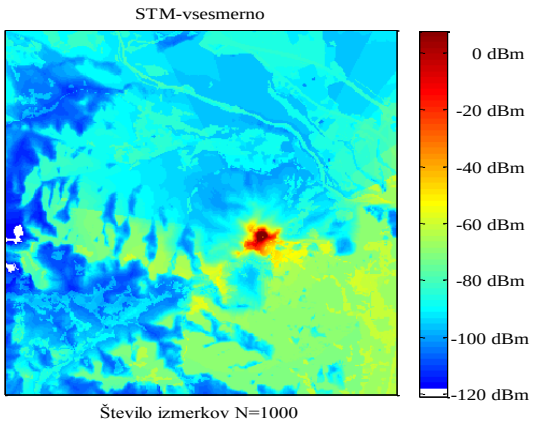


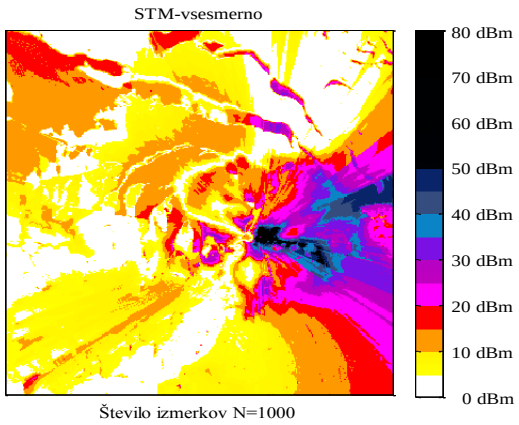





STM-vsesmerno
0 dBm
-20 dBm
-40 dBm
-60 dBm
-80 dBm
-100 dBm
-120 dBm
Število izmerkov N=500


STM-vsesmerno
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov N=500

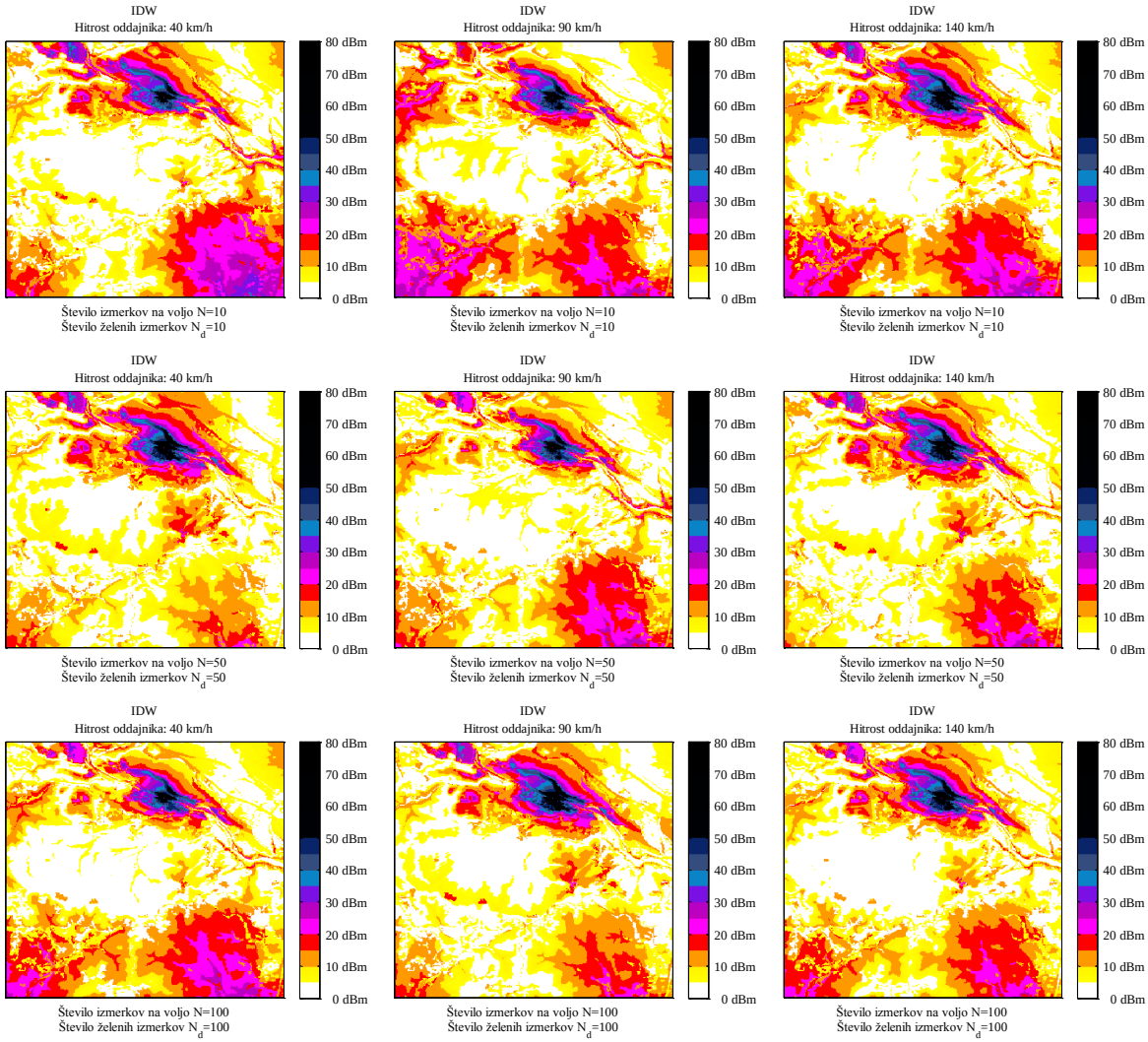

STM-vsesmerno
0 dBm
-20 dBm
-40 dBm
-60 dBm
-80 dBm
-100 dBm
-120 dBm
Število izmerkov N=1000


STM-vsesmerno
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov N=1000

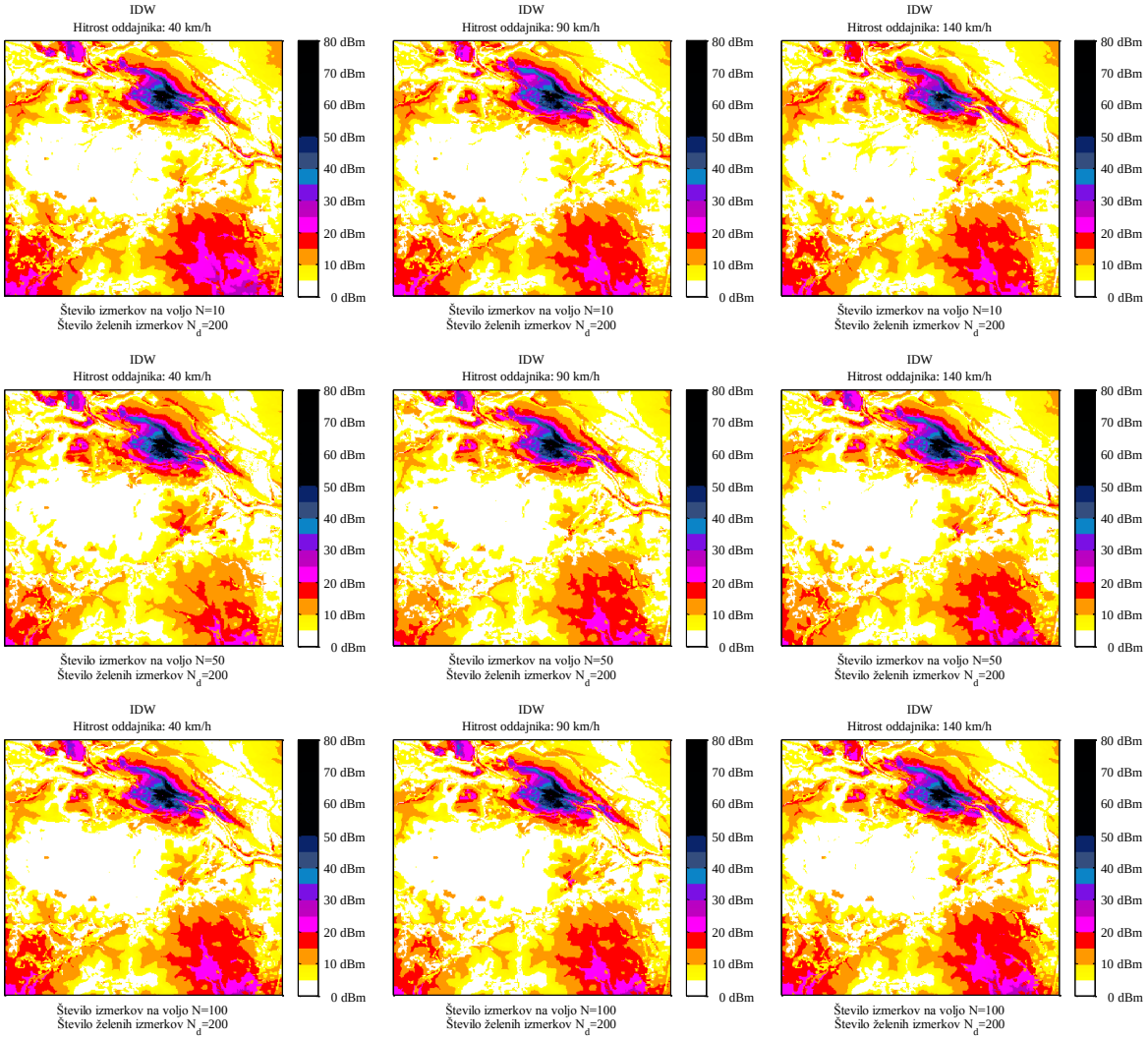
Priloga E: Izdelane karte RP (levo) in njihove absolutne napake [dBm] v primerjavi z referenčno karto RP (desno) za preizkus in ovrednotenje metode STM z različnim številom realnih izmerkov

Priloga F: Absolutne napake [dBm] primerov izdelanih kart RP z uporabo obravnavanih postopkov izdelave kart RP in dinamičnimi prostorsko porazdeljenimi izmerki pri različnih hitrostih mobilnega oddajnika

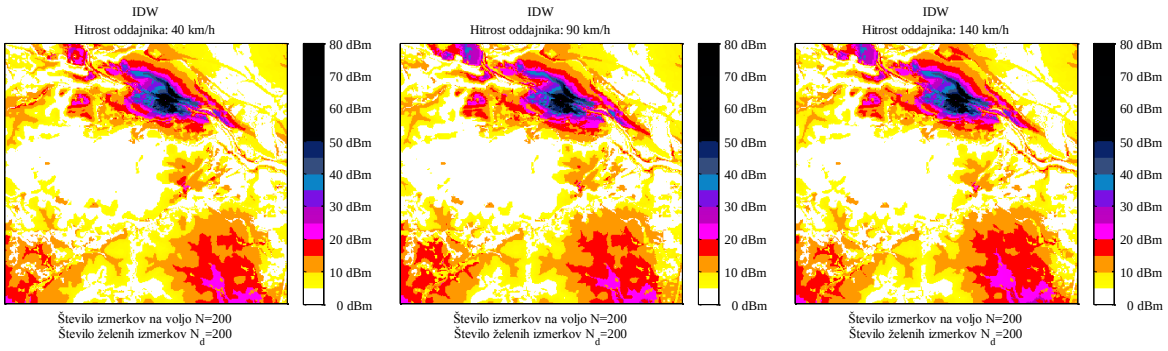
Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo IDW in izmerki časovnega trenutka t:

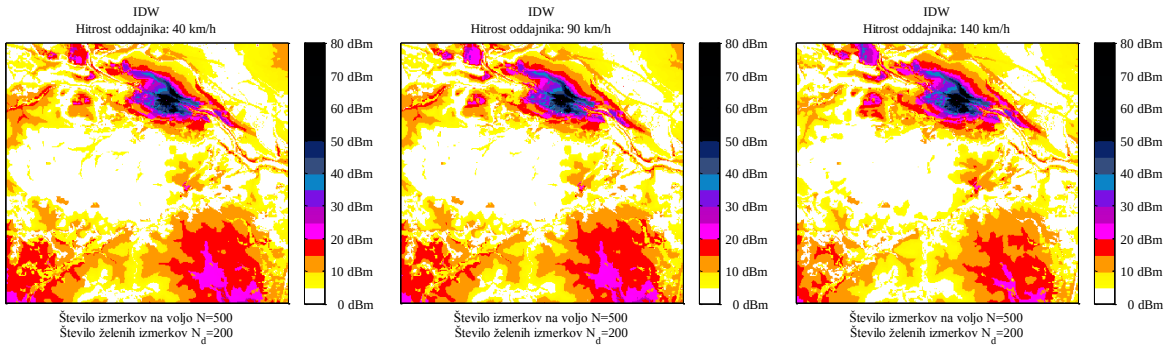


Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo IDW, izmerki časovnega trenutka *t* in izmerki preteklih časovnih trenutkov:

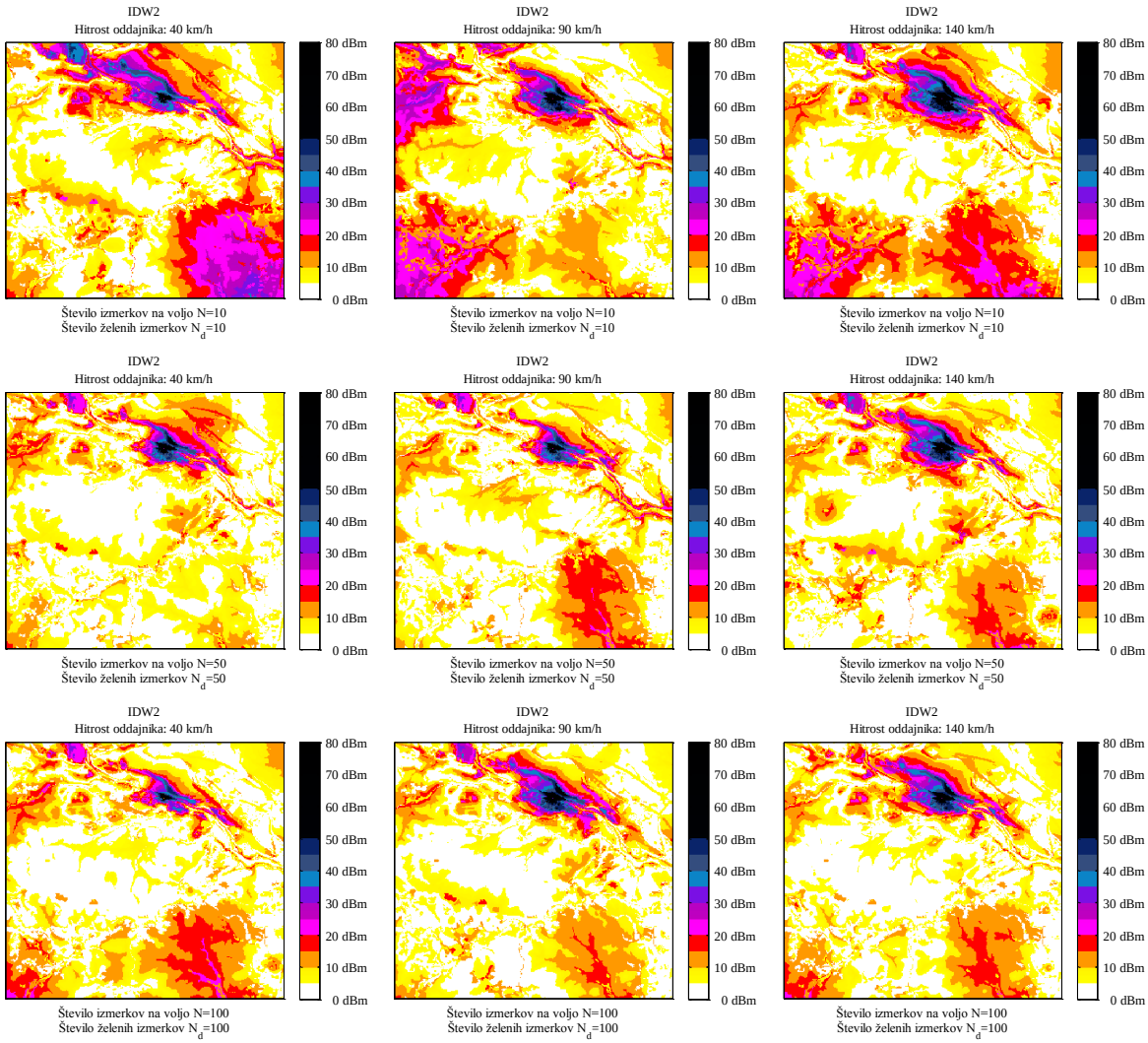


Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo IDW, ko je v časovnem trenutku izdelave kart RP na voljo enako ali večje število izmerkov od želenega števila izmerkov:

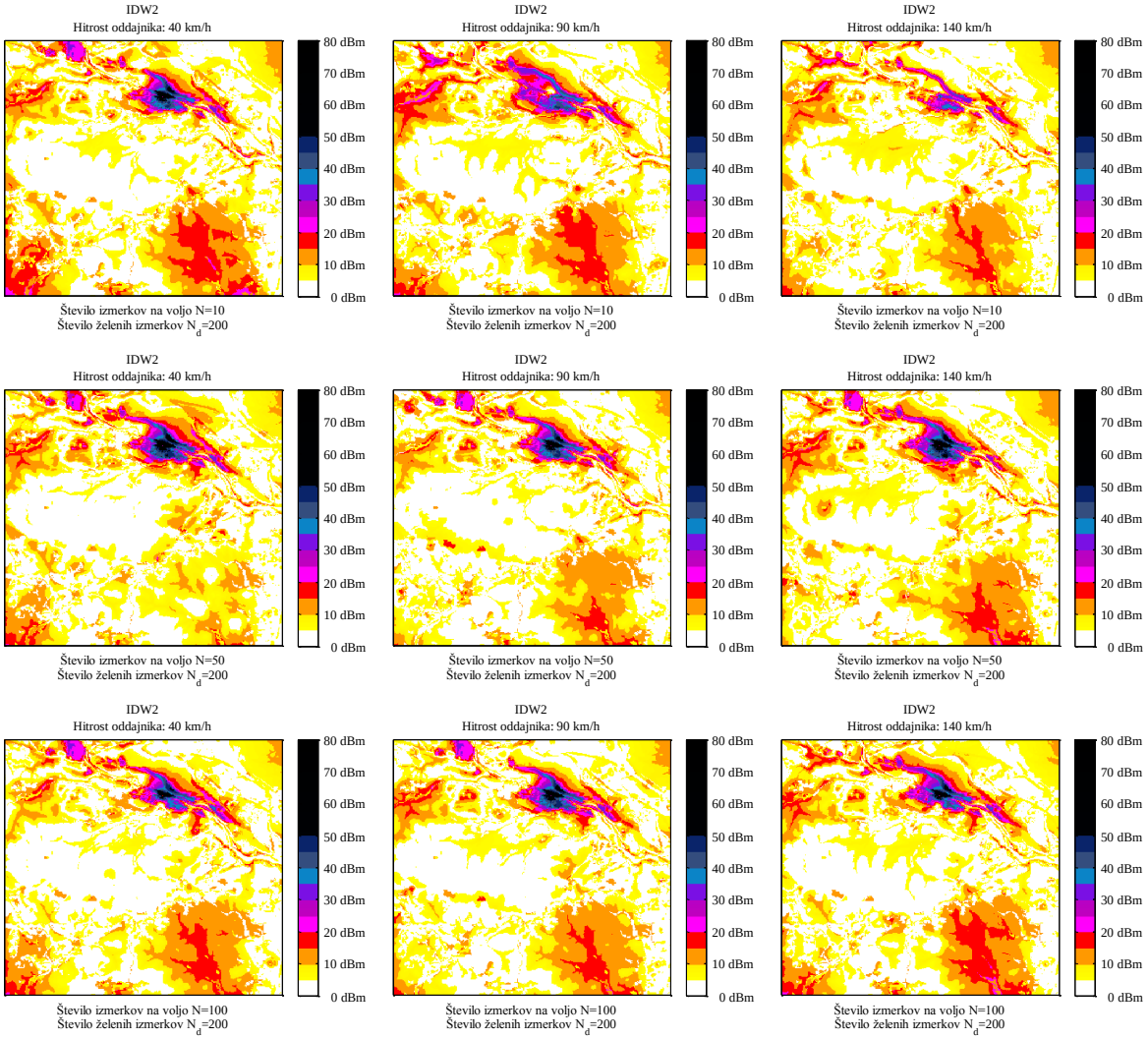




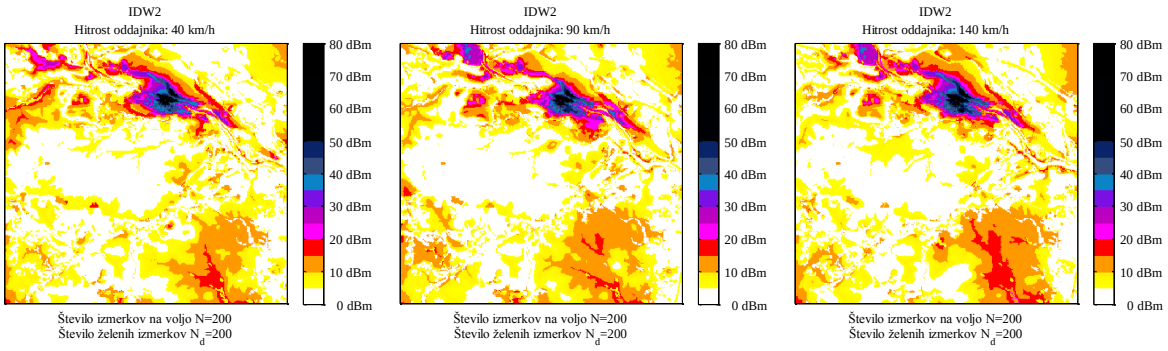
Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo IDW2 in izmerki časovnega trenutka *t*:

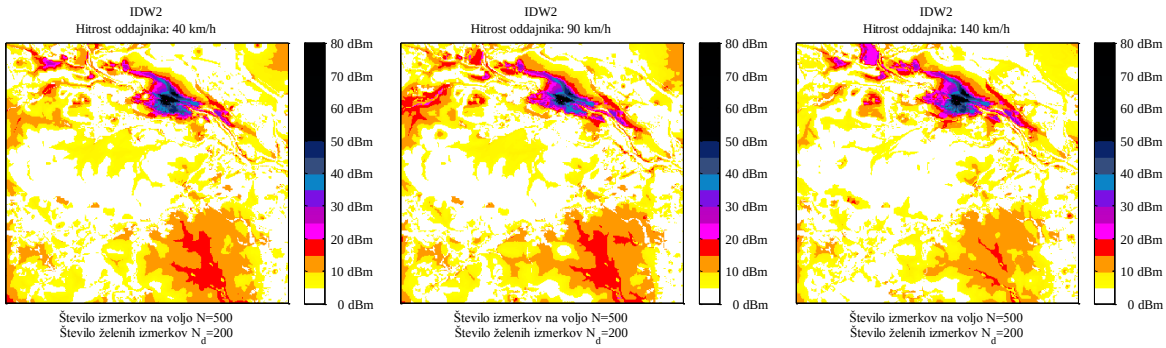


Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo IDW2, izmerki časovnega trenutka *t* in izmerki preteklih časovnih trenutkov:

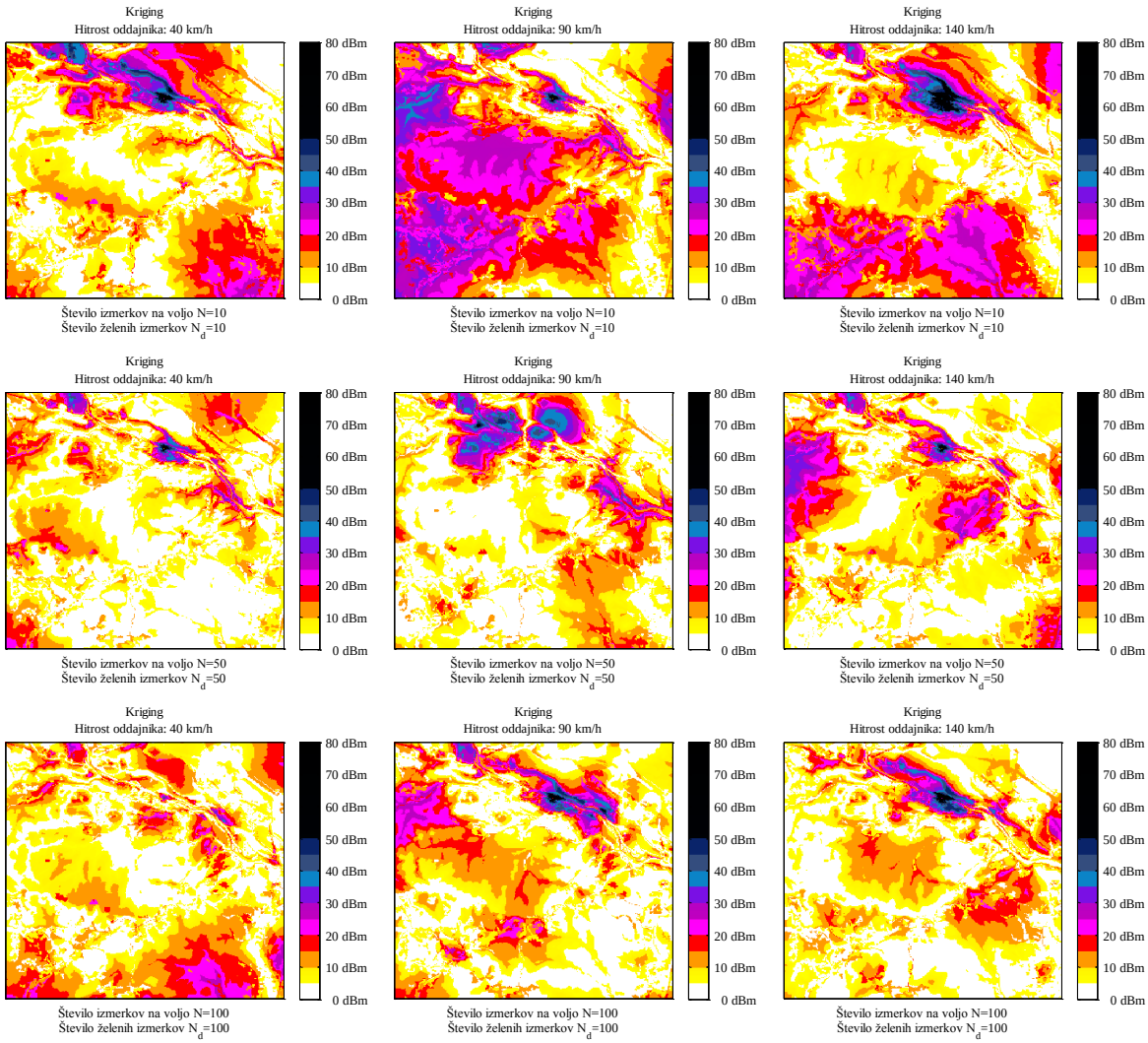


Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo IDW2, ko je v časovnem trenutku izdelave kart RP na voljo enako ali večje število izmerkov od želenega števila izmerkov:

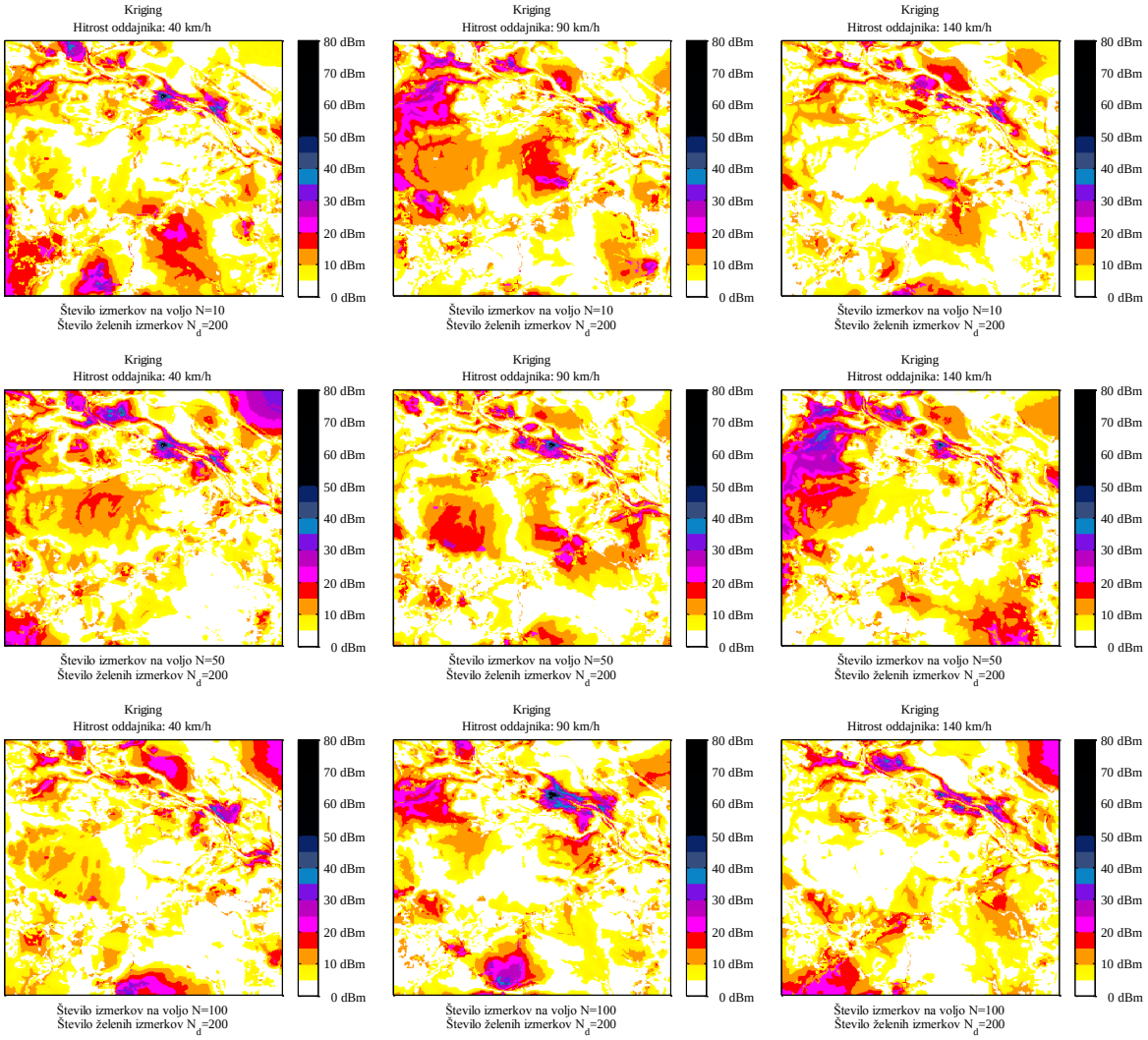




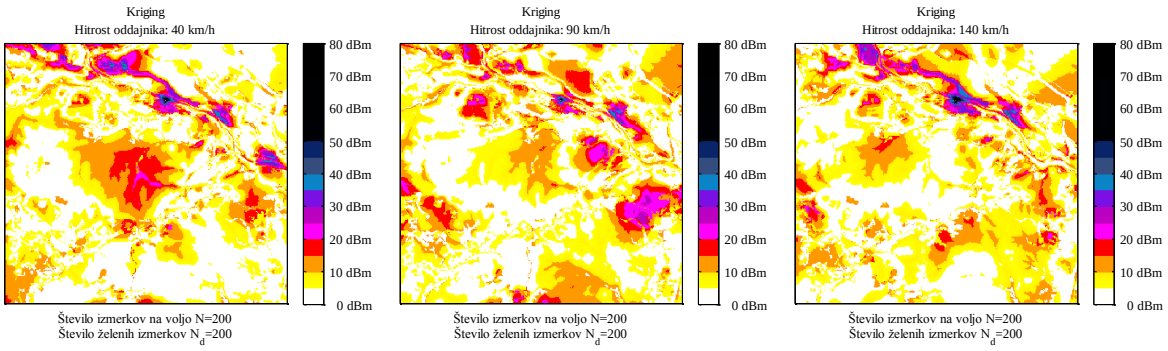
Absolutne napake izdelanih kart RP s Krigingovo metodo in izmerki časovnega trenutka *t*:

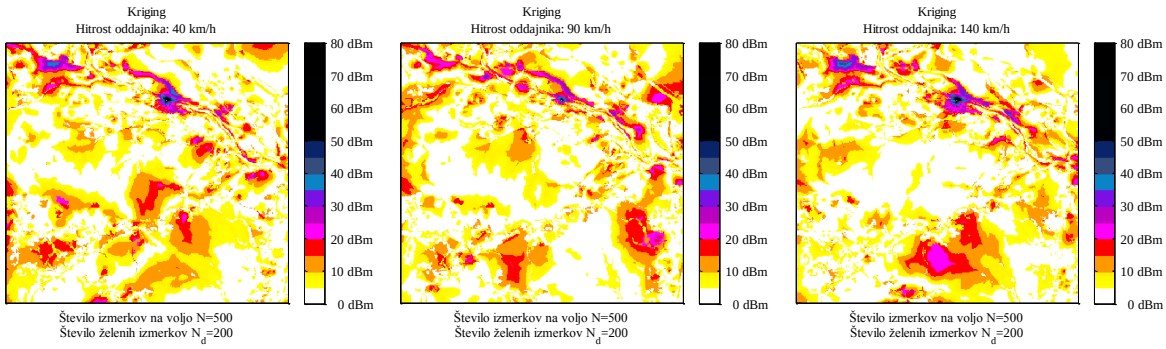


Absolutne napake izdelanih kart RP s Krigingovo metodo, izmerki časovnega trenutka *t* in izmerki preteklih časovnih trenutkov:

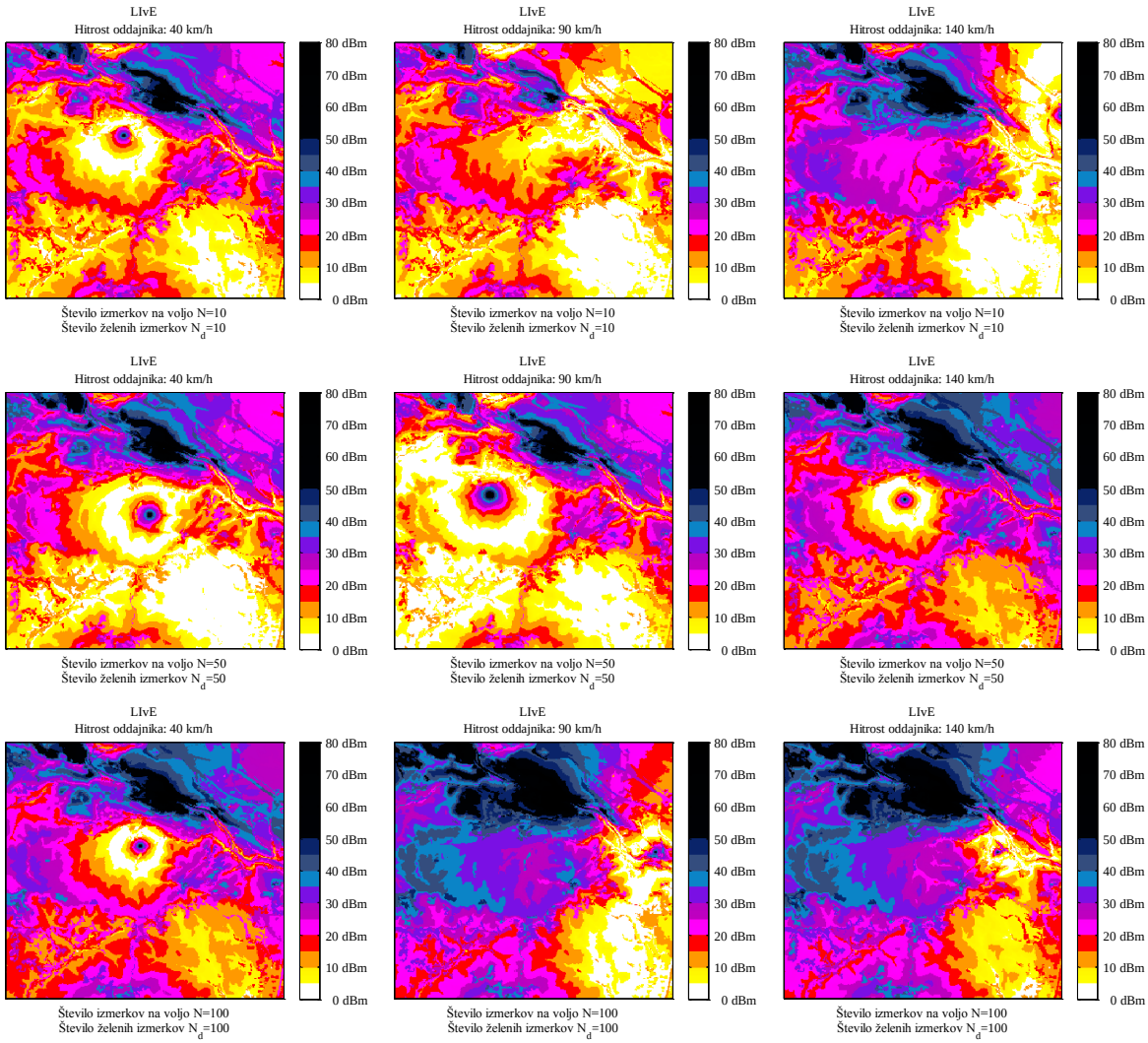


Absolutne napake izdelanih kart RP s Krigingovo metodo, ko je v časovnem trenutku izdelave kart RP na voljo enako ali večje število izmerkov od želenega števila izmerkov:

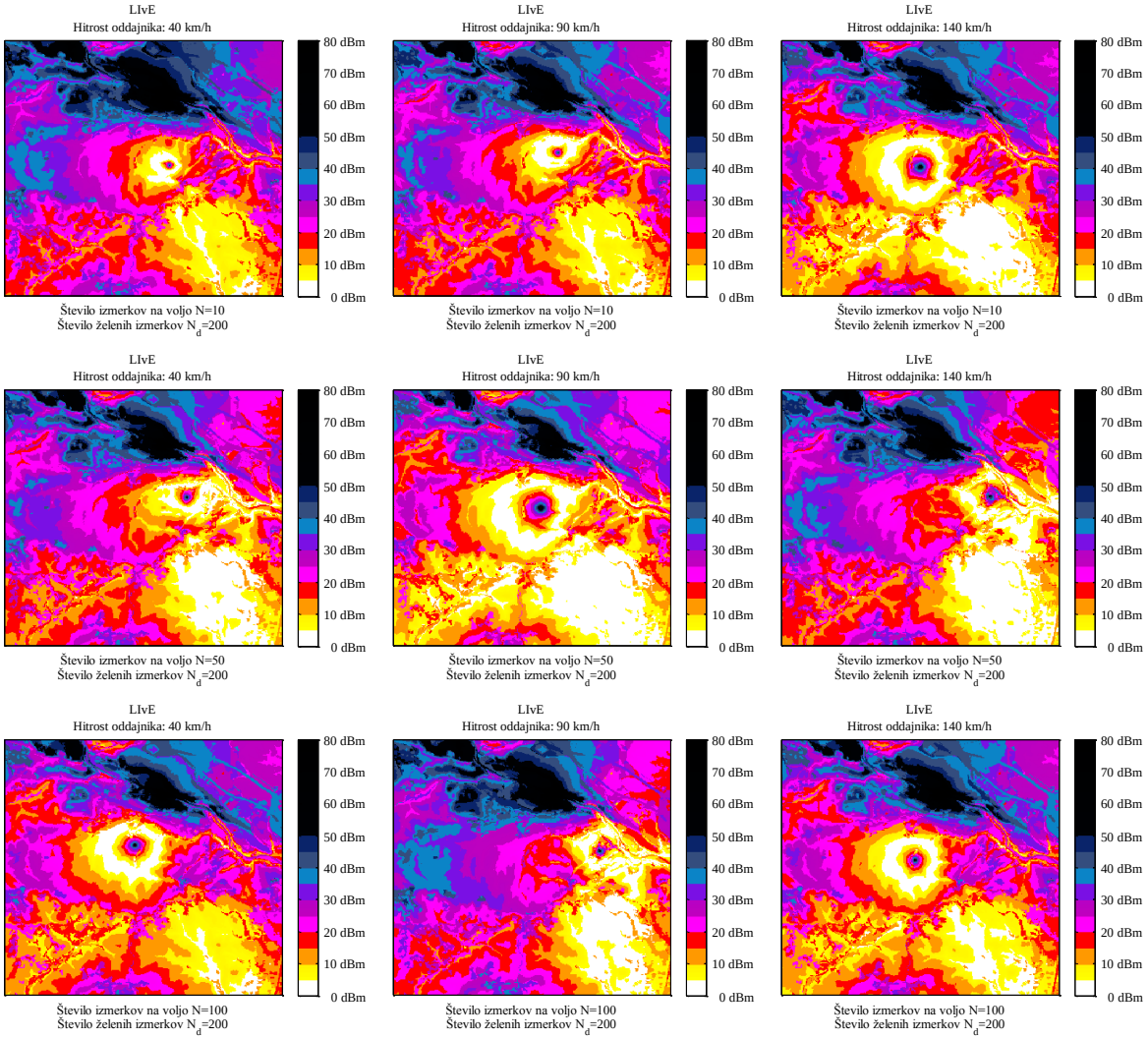




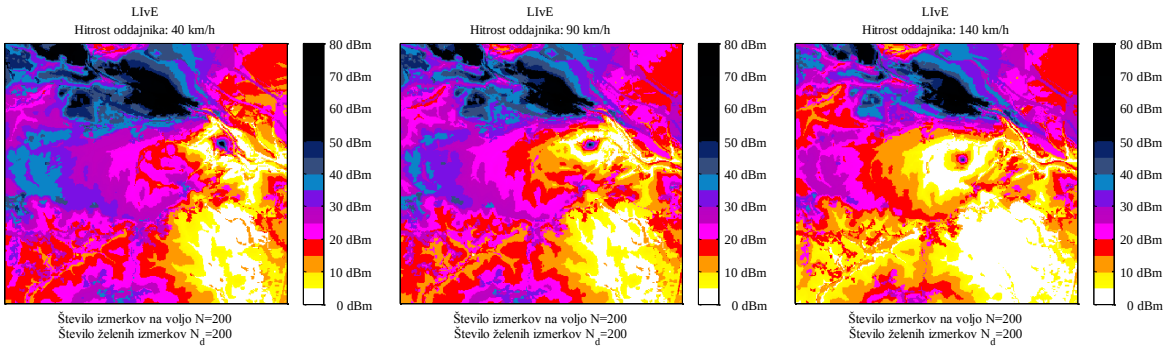
Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo LIvE in izmerki časovnega trenutka *t*:

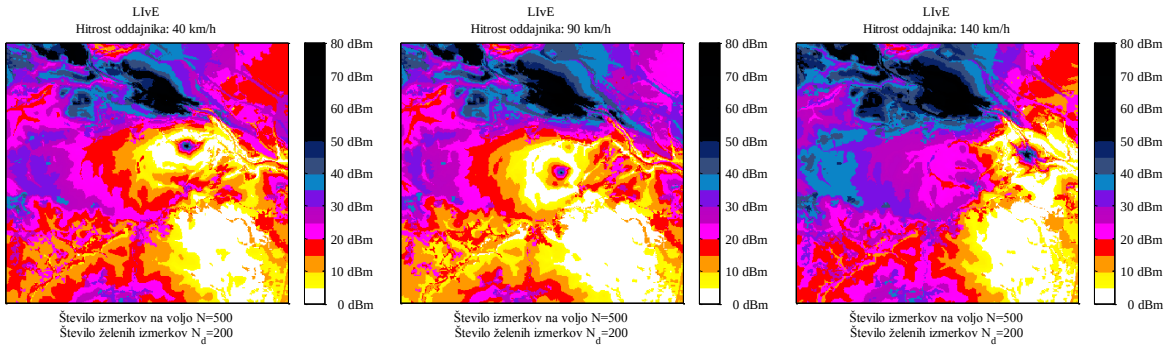


Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo LIvE, izmerki časovnega trenutka *t* in izmerki preteklih časovnih trenutkov:

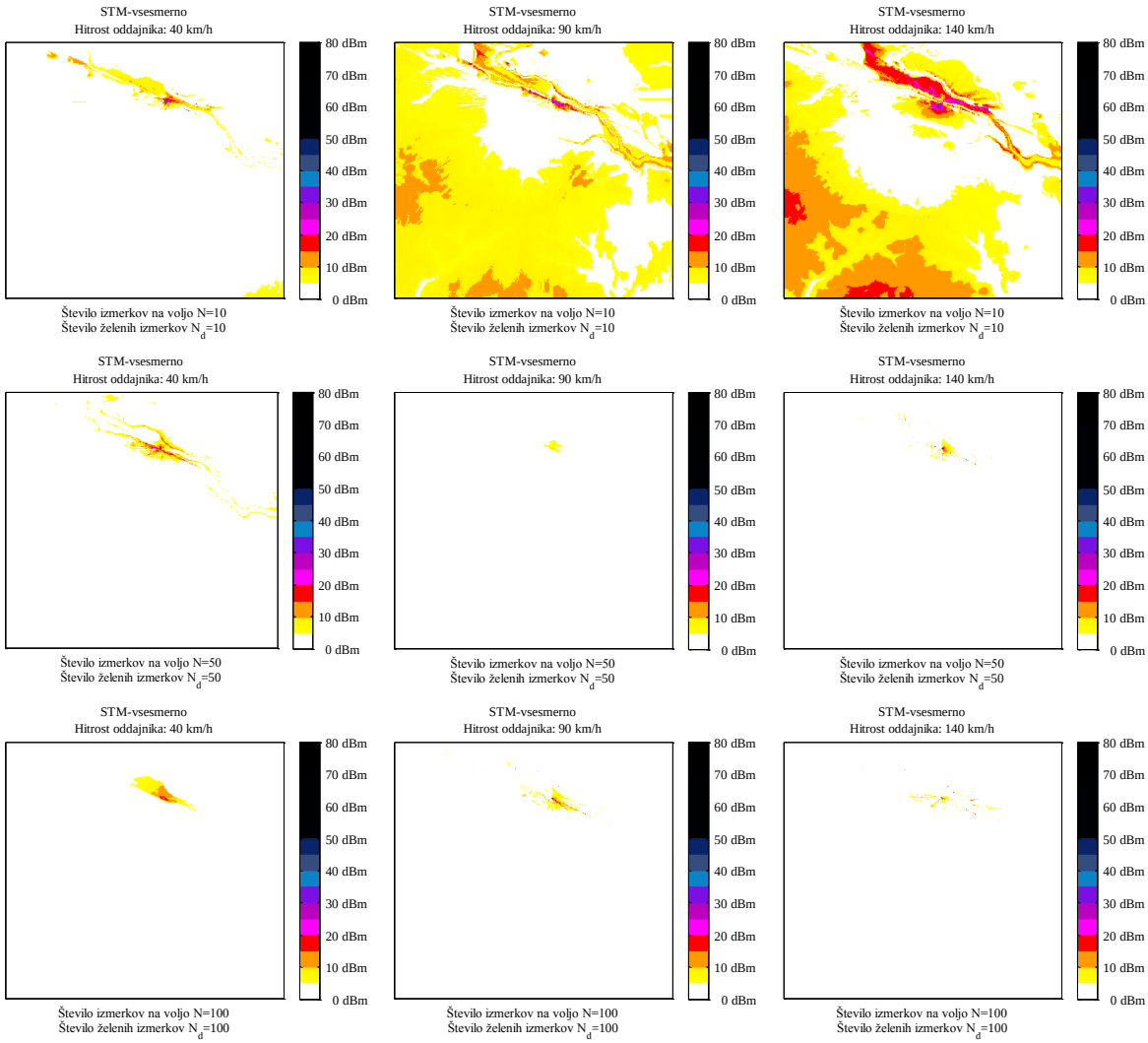


Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo LIvE, ko je v časovnem trenutku izdelave kart RP na voljo enako ali večje število izmerkov od želenega števila izmerkov:

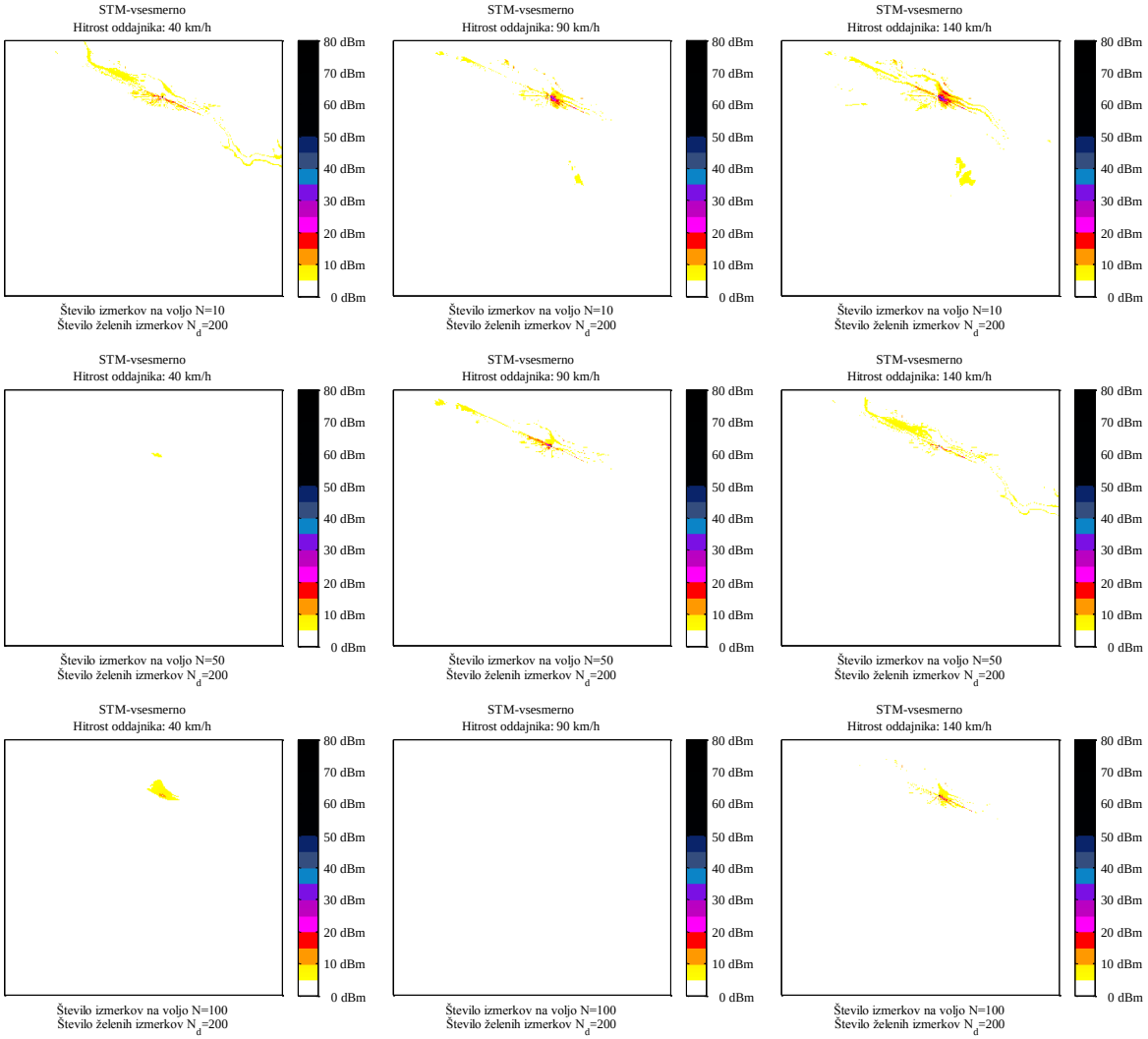




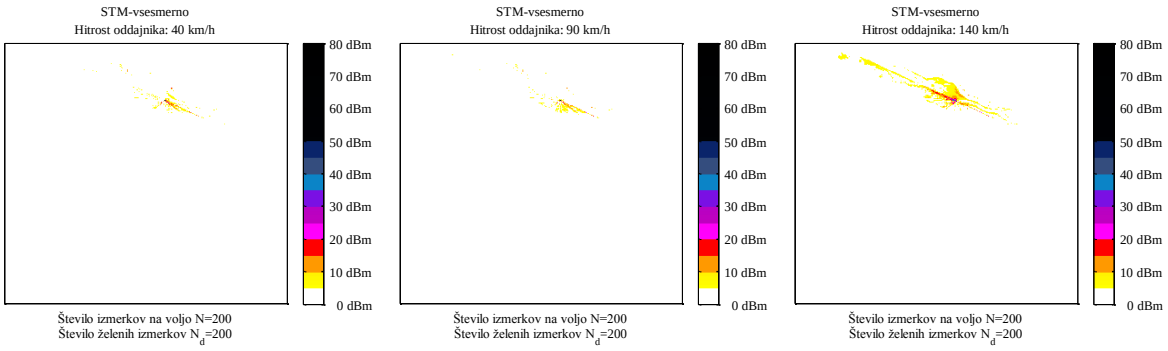
Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo STM in izmerki časovnega trenutka *t*:

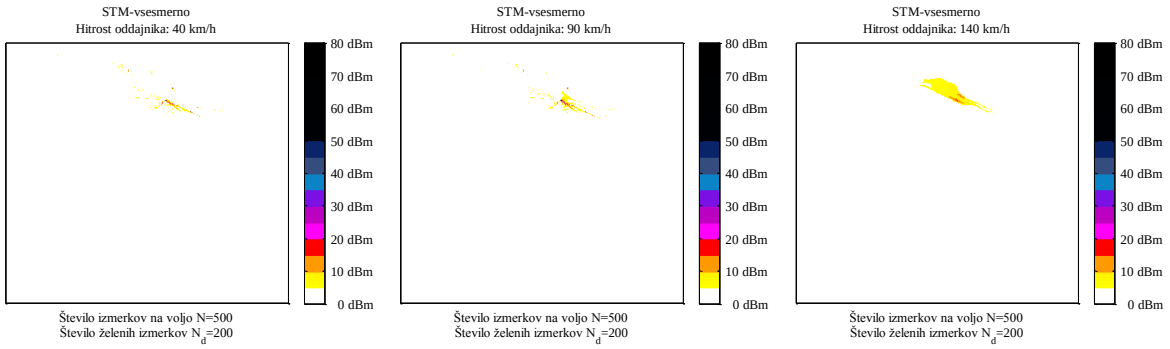


Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo STM, izmerki časovnega trenutka *t* in izmerki preteklih časovnih trenutkov:



Absolutne napake izdelanih kart RP z metodo STM, ko je v časovnem trenutku izdelave kart RP na voljo enako ali večje število izmerkov od želenega števila izmerkov:




STM-vsesmerno
Hitrost oddajnika: 40 km/h
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov na voljo N=500
Število želenih izmerkov N_d=200
STM-vsesmerno
Hitrost oddajnika: 90 km/h
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov na voljo N=500
Število želenih izmerkov N_d=200
STM-vsesmerno
Hitrost oddajnika: 140 km/h
80 dBm
70 dBm
60 dBm
50 dBm
40 dBm
30 dBm
20 dBm
10 dBm
0 dBm
Število izmerkov na voljo N=500
Število želenih izmerkov N_d=200

Priloga G: Bibliografija

ČLANKI IN DRUGI SESTAVNI DELI

Izvirni znanstveni članki

1. Pesko M, Javornik T, Vidmar L, Košir A, Štular M, Mohorčič M. The indirect self-tuning method for constructing radio environment map using omnidirectional or directional transmitter antenna. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.* 2015;2015(50).

2. Pesko M, Javornik T, Košir A, Štular M, Mohorčič M. Postopki gradnje kart radijskega okolja. *Elektrotehniški vestnik.* 2014;81(1/2):123-130.

3. Benedičič L, Pesko M, Javornik T, Korošec P. A metaheuristic approach for propagation-model tuning in LTE networks. *Informatica.* 2014;81(1):123-130.

4. Pesko M, Javornik T, Košir A, Štular M, Mohorčič M. Radio environment maps: The survey of construction methods. *KSII Transactions on Internet and Information Systems.* 2014;8(11):3789-3809.

5. Pesko M, Smolnikar M, Vučnik M, Javornik T, Pejanović-Djurišić M, Mohorčič M. Smartphone with augmented gateway functionality as opportunistic WSN gateway device. *Wireless Personal Communications.* 2014;78(3):1811-1826.

6. Moraru A, Pesko M, Porcius M, Fortuna C, Mladenić D. Using machine learning on sensor data. Predstavljeno na: 2010 32nd International Conference on Information Technology Interfaces (ITI); 21.-24. junij, 2010; Cavcat, Dubrovnik, Hrvaška.

Objavljeni znanstveni prispevki na konferencah

7. Javornik T, Hrovat A, Vilhar A, Pesko M. Radio environment map (REM). The 1st IEEE International Workshop on Cognitive Cellular Systems; 2.-4. september, 2014; na reki Ren, Nemčija.

8. Pesko M, Vidmar L, Štular M, Mohorčič M. Mobile terminal as opportunistic sensor network device for research on cognitive radio networks. Predstavljeno na: 4th Jožef Stefan International Postgraduate School Students Conference; 25. maj, 2012; Ljubljana, Slovenija.

9. Pesko M. Integracija mobilnih in brezžičnih senzorskih omrežij. Predstavljeno na: Petindvajseta delavnica o telekomunikacijah; 12.-13. maj, 2011; Brdo pri Kranju, Slovenija.

10. Pesko M, Štular M, Vučnik M, Smolnikar M, Mohorčič M. Bluetooth-based mobile

gateway for wireless sensor network. The Second International Workshop on Sensing Technologies in Agriculture, Forestry and Environment (EcoSense 2011); 6.-7. april, 2011; Beograd, Srbija.

11. Moraru A, Pesko M, Porcius M, Fortuna C, Mladenić D. Learning to predict crowdedness from sensor data. First International Workshop on Networks of Cooperating Objects (CONET 2010); 12. april, 2010; Štokholm, Švedska.

12. Pesko M, Švigelj A, Mohorčič M, Štular M. Izbira primernega orodja za simulacijo VSN senzorskih omrežij. Predstavljeno na: Devetnajsta mednarodna elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2010); 20.-22. september, 2010; Portorož, Slovenija.

13. Pesko M, Mohorčič M, Smolnikar M, Kandus G. Bluetooth-based wireless sensor node for environmental data monitoring. The First International Workshop on Sensing Technologies in Agriculture, Forestry and Environment (AgroSense 2009); 14.-15. oktober, 2009; Novi Sad, Srbija.

14. Pesko M, Mohorčič M, Smolnikar M, Zajc M. Izvedba Bluetooth brezžičnega senzorskega vozlišča. Predstavljeno na: Osemnajsta mednarodna elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2009); 21.-23. september, 2009; Portorož, Slovenija.

Objavljeni povzetki znanstvenih prispevkov na konferencah

15. Vidmar L, Pesko M, Štular M, Pogačnik M. Precision of mobile positioning methods from the perspective of location-based services. Predstavljeno na: Mobile Tartu 2012; 22.-25. avgust, 2012; Tartu, Estonija.

MONOGRAFIJE IN DRUGA ZAKLJUČENA DELA

Diplomsko delo

16. Pesko M. Uporaba tehnologije Bluetooth za brezžična senzorska vozlišča [Diplomsko delo], Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko; 2009.

Elaborati, predštudije, študije

17. Jiang W, Javornik T, Ozimek I, Pesko M, Vučnik M. *Performance of spectrum awareness techniques,* (Absolute, FP7-ICT-2011-8-318632-ABSOLUTE/D3.1.3). Ljubljana: Institut Jožef Stefan, 2014.

18. Cao H, Kandeepan S, Senthuran S, Javornik T, Ozimek I, Pesko M. *Requirements and specification for spectrum awareness,* (Absolute, FP7-ICT-2011-8-318632-ABSOLUTE/D3.1.1). Ljubljana: Institut Jožef Stefan, 2014.

19. Pesko M, Javornik T, Stular M, Mohorcic M. The comparison of methods for constructing the radio frequency layer of radio environment map using participatory measurements. Predstavljeno na: 4th Workshop of COST Action IC0902: Cognitive Radio and Networking for Cooperative Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks; 9.-11. oktober, 2013; Rim, Italija.

Priloga H: Biografija

Marko Pesko se je rodil 18.01.1986 v Ljubljani in mladost preživel v Trbovljah. Po končanem izobraževanju na osnovni šoli Ivana Cankarja Trbovlje se je vpisal v Gimnazijo Trbovlje in jo leta 2004 uspešno zaključil z maturo. Istega leta se je vpisal na Fakulteto za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in se v tretjem letniku odločil za študijsko smer Telekomunikacije. Kot absolvent se je pridružil Odseku za komunikacijske sisteme E6 na Institutu »Jožef Stefan«, kjer je pod mentorstvom doc. dr. Mateja Zajca in somentorstvom doc. dr. Mihaela Mohorčiča pripravil diplomsko delo z naslovom Uporaba tehnologije Bluetooth za brezžična senzorska vozlišča. Leta 2009 je kot prvi izmed svoje generacije na smeri Telekomunikacije na Fakulteti za elektrotehniko uspešno diplomiral in na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana (MPŠ) vpisal bolonjski študij tretje stopnje Informacijskih in komunikacijskih tehnologij.

Po uspešnem izboru na razpisu Mladi raziskovalci iz gospodarstva – generacija 2009 Javne agencije za tehnološki razvoj Republike Slovenije (TIA) se je z začetkom leta 2010 zaposlil v podjetju Mobitel, telekomunikacijske storitve, d.d.. Svojo raziskovalno dejavnost v okviru programa Mladi raziskovalci iz gospodarstva je izvajal pod okriljem Raziskovalne skupine Mobitel in Odseka za komunikacijske sisteme E6 na Institutu »Jožef Stefan«. Od združitve Mobitela, telekomunikacijske storitve, d.d. in Telekoma Slovenije d.d. leta 2011 je kandidat zaposlen pri združenem podjetju Telekom Slovenije d.d.

Raziskovalno področje Marka Peska zajema integracijo konceptov brezžičnih senzorskih omrežij v mobilna omrežja naslednje generacije, s poudarkom na izpopolnjevanju uporabe dosedanjih ter prihajajočih komunikacijskih in senzorskih zmogljivosti sodobnih mobilnih terminalov. Pri tem v njegov ožji interes sodi raziskovanje:

- dostopnosti in načinov uporabe senzorjev sodobnih mobilnih terminalov,
- uporabe mobilnih terminalov kot priložnostnih brezžičnih senzorskih naprav, sposobnih povezovanja z brezžičnimi senzorskimi vozlišči, in zagotavljanje komunikacije M2M,
- lokalizacije mobilnih terminalov in njihove zmožnosti zajemanja radijske okolice,
- postopkov izdelave kart radijskega okolja na podlagi senzorskih izmerkov radijskih signalov.