

Postopki gradnje kart radijskega okolja

Marko Pesko^{1,2}, Tomaž Javornik^{2,3}, Andrej Košir⁴, Mitja Štular¹, Mihael Mohorčič^{2,3}

¹ Telekom Slovenije, d.d., Cigaletova 15, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

³ Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

⁴ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: marko.pesko@telekom.si

Povzetek. Prispevek podaja pregled najpogosteje uporabljenih postopkov za gradnjo kart radijskega okolja iz prostorsko porazdeljenih izmerkov ter nakazuje smer njihovega razvoja v prihodnosti. Pri tem predvidevamo uporabo mobilnih terminalov in drugih naprav z zmožnostjo zajemanja različnih veličin in souporabe informacij za porazdeljeno pridobivanje izmerkov na principu soudeležbe. Tako pridobljene izmerke lahko uporabimo za gradnjo kart radijskega okolja, ki orisujejo radijske razmere na določenem geografskem območju in se uporabljajo v raznolike namene. Da bi ugotovili, kateri postopki gradnje kart radijskega okolja so primerni za uporabo z izmerki, pridobljenimi po principu soudeležbe, smo pregledali in proučili najpogosteje uporabljene obstoječe postopke, primerjali njihovo delovanje s pomočjo računalniške simulacije za oddajnik z neusmerjeno in usmerjeno anteno in identificirali morebitne izboljšave postopkov. Podani pregled najpogosteje uporabljenih postopkov nakazuje, da razvoj poteka v smeri natančnejših posrednih postopkov, za katere predvidevamo, da jih lahko dodatno izboljšamo z upoštevanjem okoljskih parametrov, kot so digitalni model višin terena in rabe tal, in modeliranjem smernega diagrama antene oddajnika.

Ključne besede: REM, KRP, postopki gradnje, izmerki jakosti radijskega signala, princip soudeležbe

Radio environment maps construction methods

This work provides survey of the most frequently used methods for constructing radio environment maps based on spatially distributed measurements and suggests future research directions in this area. We foresee the use of mobile terminals and other devices capable of sensing various phenomena and sharing that information for a distributed spectrum sensing operating in a participatory manner. Participatory measurements can be used for constructing radio environment maps which depict radio conditions in an area of interest and have a broad application range. To find out which methods for constructing the radio environment maps can operate with such measurements, we surveyed the most common methods, evaluated their performance with an omnidirectional and directional transmitter antenna using computer simulations, and identified possible enhancements. The results suggest that recent research activities are directed towards indirect methods, and we believe those could be further enhanced by utilizing characteristics of the operating environment, such as terrain elevations and clutter information, and by modelling the transmitter antenna directivity.

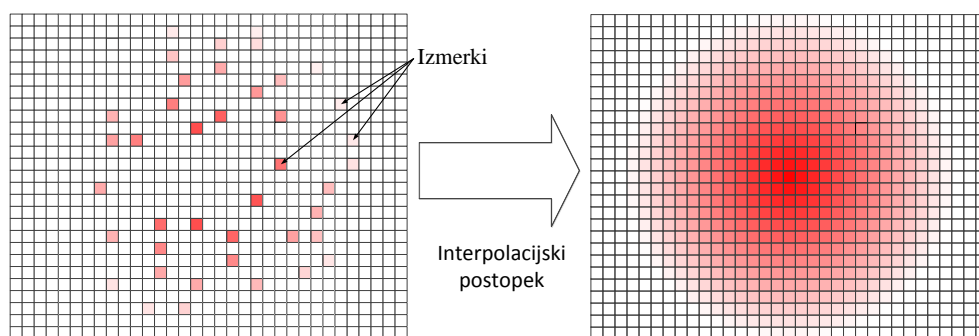
1 KARTE RADIJSKEGA OKOLJA

Karte radijskega okolja (angl. radio environment maps, REM) so integrirana podatkovna baza, ki hrani in posreduje informacije o okolju za potrebe različnih

scenarijev uporabe. Običajno jih sestavljajo naslednje entitete: upravitelj REM, enota za zbiranje in hranjenje podatkov, naprave za izvajanje meritev, vtičniki za povezovanje in različni uporabniški vmesniki [1]. REM so začeli primarno razvijati za podporo delovanja kognitivnega radija. Sekundarnim uporabnikom radijskega spektra, ki nimajo vnaprej rezerviranega spektra, bi omogočile dinamično uporabo prostorsko prostih frekvenc, dodeljenih primarnim uporabnikom, kot so televizijski oddajniki, repetitorji, ojačevalniki, sprejemniki in brezžični mikrofoni [2]. Postopki dinamične uporabe takšnih frekvenc so specificirani v standardu o brezžičnih regionalnih dostopovnih omrežjih IEEE 802.22. Danes se njihova uporaba zaradi univerzalnosti in modularne vsebine predvideva na področjih, kot so hierarhični dostop do spektra licenčnih frekvenčnih pasov, omogočanje souporabe spektra nelicenčnih frekvenčnih pasov, upravljanje radijskih virov brezžičnih omrežij operaterjev in veliko drugih področij, ki vključujejo namensko spremljanje uporabe in zasedenosti radijskega spektra [3, 4].

2 GRADNJA KART RADIJSKEGA OKOLJA

Gradnjo REM opredelimo kot namensko uporabo vseh entitet REMa za pripravo tistih vsebin enote za zbiranje in hranjenje podatkov, ki se uporabljajo za podporo določenega scenarija uporabe. V osnovni obliki je to izračun ocene nivoja jakosti radijskega signala določene



Slika 1: Neposredna gradnja KRP

frekvence in pasovne širine za celotno interesno geografsko območje oziroma gradnja kart radijskega pokritja (KRP) posameznega oddajnika na interesnem geografskem območju.

Osnovni podatki za gradnjo KRP so izmerki jakosti radijskega signala, ki se zajamejo na ustreznih napravah za izvajanje meritev in so shranjeni v enoti za zbiranje in hranjenje podatkov. Ti se uporabijo v postopkih za gradnjo KRP, ki jih razvrščamo na neposredne, posredne in hibridne.

2.1 Neposredni postopki

Neposredni postopki za gradnjo KRP uporabljajo izbrano interpolacijsko metodo nad izmerki, s katerimi izračunajo ocene jakosti radijskega signala v vseh točkah KRP, kot prikazuje slika 1. Obstaja veliko interpolacijskih metod, ki se na splošno delijo na ravninske in prostorske, lokalne in globalne, analitične in statistične, stohastične in deterministične, neprekinjene in prekinjene, točkovne in območne, glede na področje uporabe in strukturo zapisa, glede na uporabo na pravilnih in nepravilnih mrežah točk in glede na matematično geometrijske lastnosti [5].

Za gradnjo KRP se najpogosteje uporabljajo tiste, ki temeljijo na pristopu lokalne bližine in geostatističnem pristopu. Najpogosteje uporabljeni predstavniki pristopa lokalne bližine so metode inverzne utežene razdalje (angl. inverse distance weighted, IDW), najbližjega soseda (angl. nearest neighbour, NN), naravnih sosedov (angl. natural neighbours) in nekatere izpeljanke zadnjih, npr. modificirana Shepardova metoda (angl. modified Shepard's method, MSM) in metoda gradienta in inverzne utežene razdalje (angl. gradient plus inverse distance squared method, GIDS). Predstavniki geostatističnega pristopa so večinoma Kringove metode, ki od vseh naštetih neposrednih metod po navadi, a ne vedno, zgradijo najbolj natančne KRP.

2.1.1 Metoda inverzne utežene razdalje (IDW)

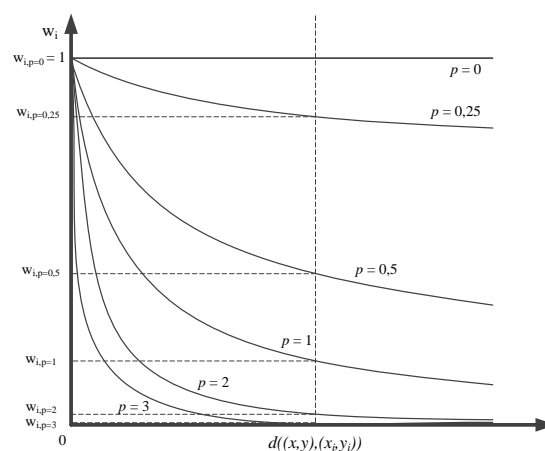
Interpolacijska metoda inverzne utežene razdalje je poznana tudi kot Shepardova metoda [6–11] in predvideva, da imajo izmerki bliže interpolirani točki

KRP 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 KRP izračuna kot uteženo povprečje izmerkov, definirano z enačbo (1). Uteži w_i določajo vpliv posameznega izmerka na interpolirano vrednost in se izračunajo po enačbi (2). Posamezne uteži so sorazmerne inverzu evklidske razdalje d_i med lokacijami (x_i, y_i) in točko interpoliranja (x, y) , na izbrano utežno potenco p . Razdalje d_i se izračunajo v odvisnosti od izbranega koordinatnega sistema, s katerim so definirane točke KRP, medtem ko je potenco p katerokoli pozitivno realno število.

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

$$w_i(x, y) = \frac{1}{d_i^p} \quad (2)$$

Slika 2 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 ko je vrednost p pri določeni razdalji d_i , manjša je izračunana utež w_i in posledično manjši

Slika 2: Odvisnost vrednosti uteži w_i od razdalje d in utežne potence p pri interpolacijski metodi inverzne utežene razdalje

vpliv pripadajočega izmerka P_i na izračun ocene jakosti radijskega signala v točki (x, y) . Izbira p tako vpliva na gladkost interpoliranja. Za gradnjo KRP se tipično uporabljajo vrednosti $p = 1$ in $p = 2$. Kadar je $p = 1$, govorimo o interpolacijski metodi inverzne utežene razdalje (IDW) in ko je $p = 2$ o interpolacijski metodi inverzne kvadratno utežene razdalje (angl. inverse distance squared weighted, IDW2).

2.1.2 Metoda najbližjega soseda

Metoda najbližjega soseda [6, 11–14] je ena računsko najučinkovitejših, a tudi najmanj natančnih interpolacijskih metod za gradnjo KRP. Skladno z enačbo (3) se ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x,y) točki KRP določi tako, da se ji priredi vrednost najbližjega izmerka.

$$P_{rx}(x, y) = \min_{d_i} P_i(x_i, y_i) \quad (3)$$

Katerim točkam KRP se priredi vrednost določenega izmerka, se ugotovi z računanjem vseh kombinacij njihovih razdalj do izmerkov 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 izmerk in točke, ki so mu glede na razdaljo bliže kot kateremukoli drugemu izmerku, kar prikazuje tudi slika 3. Po izdelavi Voronoijevih poligonov je prirejanje vrednosti izmerkov znotraj posameznega poligona oziroma celice hitro in preprosto.

2.1.3 Metoda naravnih sosedov

Interpolacijska metoda naravnih sosedov [8, 13] je podobna metodi najbližjega soseda. Tu se ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x,y) točki KRP določi kot uteženo povprečje izmerkov (4).

$$P_{rx}(x, y) = \sum_{i=1}^K w_i(x, y)P_i(x_i, y_i) \quad (4)$$

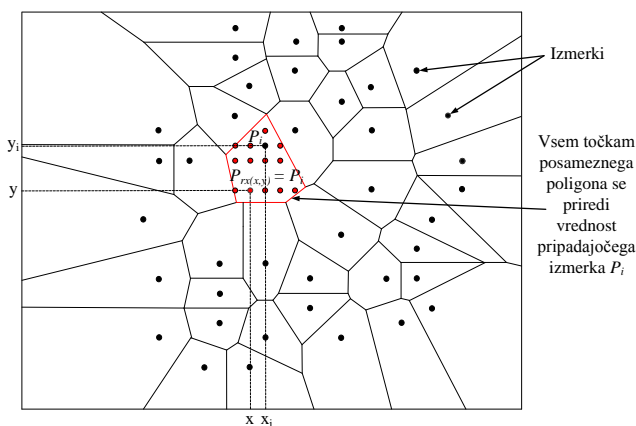
Glavna razlika med metodama je, da se tu od N izmerkov, ki so na voljo, upošteva določeno število K izmerkov P_i , $i = 1, \dots, K$, ki so naravni sosedi točke interpoliranja. Velikosti pripadajočih uteži w_i definirajo t. i. lokalne koordinate naravne okolice, ki se določijo s pomočjo Voronoijevih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

Če se ob enaki porazdelitvi izmerkov kot na sliki 3 na mrežo izdelanih Voronoijevih poligonov doda še poligon $V_{P_{rx}}$, ki vključuje točko interpoliranja (x, y) , prekrivanje poligonov za potrebe metode naravnih sosedov predstavlja slika 4. V predstavljenem primeru poligoni V_i , $i = 1, \dots, K$, 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 (5) se vrednosti normaliziranih uteži w_i določijo kot razmerja površin W_i in površine poligona $V_{P_{rx}}$, pri čemer velja, da je $\sum_{i=1}^K w_i = 1$.

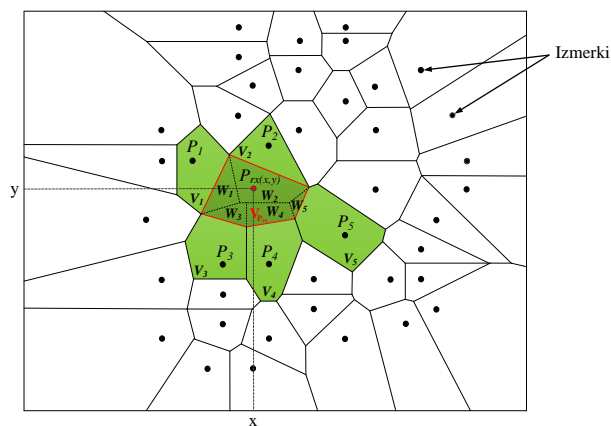
$$w_i = \frac{S(V_{P_{rx}} \cap V_i)}{S(V_{P_{rx}})} = \frac{S(W_i)}{S(V_{P_{rx}})} \quad (5)$$

2.1.4 Modificirana Shepardova metoda

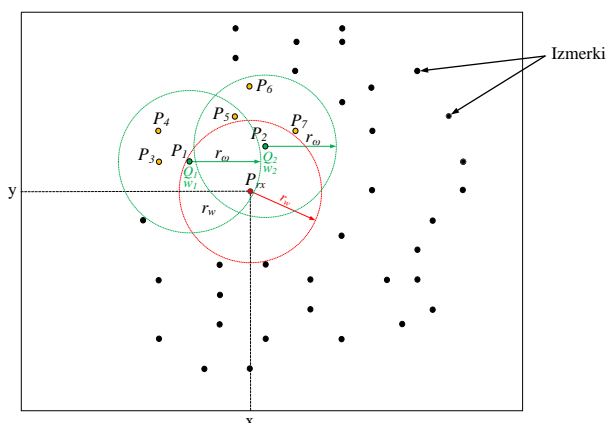
Modificirana Shepardova metoda [7, 15] je izboljšana metoda inverzne utežene razdalje, ki temelji na uporabi vozliščnih funkcij (angl. nodal functions). Te imajo po navadi obliko kvadratične forme [15], medtem ko se je za gradnjo KRP z majhnim naborom izmerkov izkazala primernejša linearna forma [8]. Ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x,y) točki KRP se določi z enačbo (6), kjer je N število izmerkov, ki so na voljo, Q_i so vrednosti pripadajočih vozliščnih funkcij na njihovih



Slika 4: Primer Voronoijevih poligonov izdelanih na podlagi lokacijsko porazdeljenih izmerkov za potrebe interpolacijske metode najbližjega soseda



Slika 3: Primer Voronoijevih poligonov izdelanih na podlagi lokacijsko porazdeljenih izmerkov za potrebe interpolacijske metode naravnih sosedov



Slika 5: Primer lokacijske porazdelitve izmerkov za predstavitev Modificirane Shepardove metode

lokacijah in w_i vrednosti uteži, izračunane po enačbi (7).

$$P_{rx}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x, y) Q_i(x, y)}{\sum_{i=1}^N w_i(x, y)} \quad (6)$$

$$w_i(x, y) = \begin{cases} [(r_w - d_i)/(r_w d_i)]^p & d_i < r_w \\ 0 & d_i \geq r_w \end{cases} \quad (7)$$

V (7) je r_w izbran radij, ki določa krožnico vplivnega območja točke interpoliranja, d_i pa so evklidske razdalje med točko interpoliranja in točkami izmerkov. Postopek določitve Q_i je predstavljen s pomočjo porazdelitve izmerkov na sliki 5. Glede na (7) 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_w . 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 (8). Pri tem P_j pomenijo vrednosti izmerkov, Q_j vrednosti vozliščne funkcije na njihovih lokacijah in ω_j uteži, izračunane po enačbi (9), kjer so d_j evklidske razdalje med izmerki in p izbrana utežna potenca.

$$\sum_{j=1}^N \omega_j(x, y) [Q_j(x, y) - P_j(x, y)]^2 \quad (8)$$

$$\omega_j(x, y) = \begin{cases} [(r_w - d_j)/(r_w d_j)]^p & d_j < r_w \\ 0 & d_j \geq r_w \end{cases} \quad (9)$$

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 (6).

Radija r_w in r_w sta fiksna ali variabilna. Če sta variabilna, se njuna vrednost po navadi določi po enačbi (10), 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_w [16].

$$r_w = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_w}{N}} \quad r_w = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_\omega}{N}} \quad (10)$$

Če sta radija r_w in r_w fiksna, se ju izbere skladno z zeleno gladkostjo interpolacije.

2.1.5 Metoda gradienta in inverzne kvadratno utežene razdalje

Interpolacijska metoda gradienta in inverzne kvadratno utežene razdalje [1, 7, 17] temelji na združitvi interpolacijske metode IDW2 in splošne linearne regresije. Za določitev ocene jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki KRP se uporablja modificirana enačba (1) v obliki (11), ki upošteva tudi nadmorske višine geografskega interesnega območja.

$$P_{rx}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i + C_x(x-x_i) + C_y(y-y_i) + C_z(z-z_i)}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} \quad (11)$$

V (11) 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.

2.1.6 Krigingova metoda

Krigingova interpolacijska metoda oziroma izpeljanke osnovne ideje [1, 6, 7, 9–11, 18, 19] obravnavajo jakosti radijskega signala v KRP kot vrednosti funkcije naključnega procesa v prostoru. Ocena jakosti radijskega signala P_{rx} v posamezni (x, y) točki KRP 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 (12). V enačbi (12) so w_i , $i = 1, \dots, N$ interpolacijske uteži N izmerkov P_i , ki so na voljo na lokacijah (x_i, y_i) , $m(x, y)$ in $m(x_i, y_i)$ pa so

povprečne vrednosti funkcije naključnega procesa v točki interpoliranja in v točkah izmerkov.

$$P_{rx}^*(x, y) = \sum_{i=1}^N w_i(x, y)[P_i(x_i, y_i) - m(x_i, y_i)] + m(x, y) \quad (12)$$

Izpeljanke Krigingove osnovne ideje se razlikujejo glede na obravnavanje povprečne vrednosti v (12), kar se odraža pri vrednostih interpolacijskih uteži. Za gradnjo KRP se najpogosteje uporabljata enostavni in splošni Krigingov postopek. Cenilko enostavnega Kriginga pomeni enačba (13), cenilko splošnega Kriginga pa enačba (14).

$$P_{rx_{SK}}^*(x, y) = \sum_{i=1}^N w_{i_{SK}}(x, y)P_i(x_i, y_i) \quad (13)$$

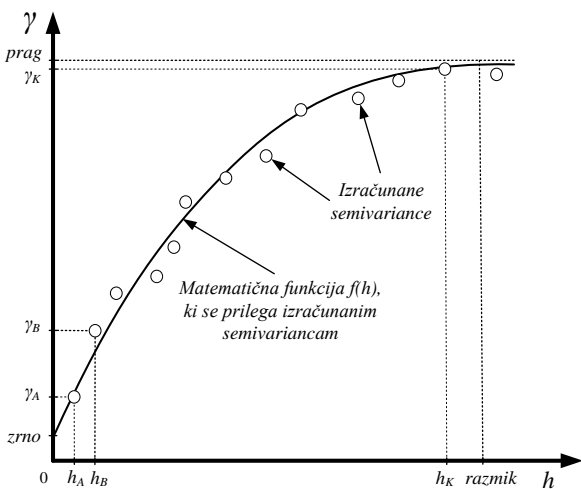
$$P_{rx_{OK}}^*(x, y) = \sum_{i=1}^K w_{i_{OK}}(x, y)P_i(x_i, y_i),$$

$$\text{kjer je } \sum_{i=1}^K w_{i_{OK}}(x, y) = 1 \quad (14)$$

Za določitev uteži v obeh primerih se najprej izrazi stopnja povezanosti med jakostjo radijskega signala na vseh točkah KRP. Nad vsemi razpoložljivimi izmerki se izvede variogramska analiza [18]. Če je na voljo N izmerkov, se iz njih tvori $M = N(N - 1)/2$ parov. Za vsak par se izračuna evklidska razdalja, t. i. razdalja zamika h med izmerkoma, in semivarianca γ (15) [18].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M [P_i(x_i, y_i) - P_i(x_{i+h}, y_{i+h})]^2 \quad (15)$$

Slika 6 prikazuje primer grafa točk γ v odvisnosti od h , ki se imenuje empirični semivariogram, in izraža prostorsko avtokorelacijo med izmerki. Kot je prikazano, se takšnemu grafu prilega izbrana zvezna matematična funkcija $f(h)$, 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



Slika 6: Primer empiričnega semivariograma s prilegano matematično funkcijo

napako oziroma variabilnost na lokalni ravni, medtem ko razmik definirana meja okna lokalne okolice točke interpoliranja. Na podlagi matematične funkcije, ki se prilega empiričnemu semivariogramu, se določijo vrednosti semivariance pri poljubni razdalji h . Na primer, če je h_A razdalja med lokacijo izmerka A (x_A, y_A) in točko interpoliranja (x, y) , velja $\gamma_A = f(h_A)$, če je h_B razdalja med lokacijo izmerka B (x_B, y_B) do točke interpoliranja (x, y) , velja $\gamma_B = f(h_B)$, medtem ko za K -ti izmerek velja $\gamma_K = f(h_K)$. Podobno se določijo vrednosti semivariance pri vrednosti razdalj med izmerki, na primer za razdaljo h_{AK} med izmerkoma A in K je vrednost semivariance $\gamma_{AK} = f(h_{AK})$.

Enostaven 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 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.

Interpolacijske uteži $w_{i_{SK}}$, ki minimizirajo napako variance enostavne cenilke (13), se izračunajo skladno z enačbo (16), medtem ko se interpolacijske uteži $w_{i_{OK}}$, ki minimizirajo napako variance splošne cenilke (14), izračunajo skladno z enačbo (17), kjer μ pomeni Lagrangeov parameter. V obeh primerih se vrednosti semivariance γ_{ij} pri razdaljah h_{ij} med izmerki na lokacijah (x_i, y_i) in izmerki na lokacijah (x_j, y_j) izračunajo s pomočjo semivariograma kot $\gamma_{ij} = f(h_{ij})$, medtem ko so $\gamma_{i0} = f(h_{i0})$ vrednosti semivariance pri razdaljah h_{i0} med posameznim izmerkom na lokaciji (x_i, y_i) in točko interpoliranja (x, y) .

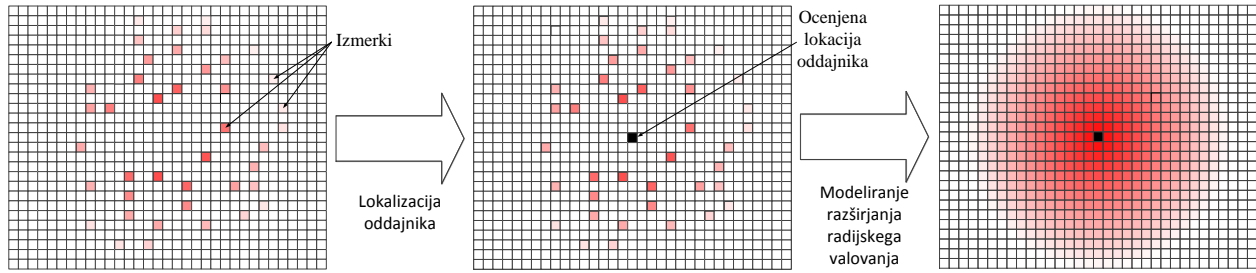
$$\begin{bmatrix} w_{1_{SK}} \\ \vdots \\ w_{N_{SK}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \cdots & \gamma_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} w_{1_{OK}} \\ \vdots \\ w_{K_{OK}} \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1K} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{K1} & \cdots & \gamma_{KK} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{K0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Ocena jakosti radijskega signala v točki interpoliranja (x, y) se po določitvi uteži s pomočjo (16) ali (17) izračuna z enačbo (18).

2.2 Posredni postopki

Slika 7 prikazuje posredno gradnjo KRP. Pri teh postopkih izmerke najprej uporabimo za določanje lokacije in parametrov oddajnika, nato z modeliranjem razširjanja radijskega valovanja na interesnem geografskem območju izračunamo KRP. Ločujemo tri osnovne primere: a) ko so lokacija in parametri oddajnika znani, b) ko je znana bodisi lokacija bodisi



Slika 7: Posredna gradnja KRP

parametri oddajnika in c) ko niso znani ne lokacija oddajnika in ne njegovi parametri. Pri gradnji KRP se obravnava večinoma primer c).

$$P_{rx}(x, y) = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_K \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} W_1(SK \text{ ali } OK) \\ \vdots \\ W_K(SK \text{ ali } OK) \end{bmatrix} \quad (18)$$

V primeru a) je gradnja KRP 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 prvi in drugi primer posredne gradnje KRP lahko gledamo tudi kot na poenostavitev primera c), kjer je treba oceniti tako neznanu lokacijo oddajnika kot tudi njegove parametre. Temu načinu sledi nedavno predstavljen postopek LiVE [20], ki nakazuje trend nadaljnjih raziskovalnih možnosti v smeri posrednih postopkov gradnje, saj natančneje izdelava KRP kot najboljša neposredna metoda Kriging.

2.2.1 Postopek LiVE

Posredni postopek LiVE [20] 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 gradnjo KRP predvideva model razširjanja radijskega valovanja, kjer jakost radijskega signala logaritemsko pada z

razdaljo. Povprečna jakost radijskega signala $\overline{P_{rx_i}}$ na določeni točki KRP se, če ni motenj v izmerkih na lokacijah (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, N_{MCD}$, določi s pomočjo enačbe (19). Po kratki izpeljavi se ta izrazi kot (20), 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 (20) se zapiše za vse izmerke in predstavi kot sistem enačb $A\theta = b$ v matrični obliki, pri čemer so A , θ , in b podane v (21).

$$\overline{P_{rx_i}} = P_{tx} - P_{L0} - 10\alpha \log_{10} d_{(x_i, y_i)} \quad (19)$$

$$x_i^2 + y_i^2 = 2x_{tx}x_i + 2y_{tx}y_i + 10^{\frac{P_{tx} - P_{L0} - \overline{P_{rx_i}}}{5\alpha}} - D^2 \quad (20)$$

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

$$\theta = \begin{bmatrix} x_{tx} \\ y_{tx} \\ 10^{\frac{P_{tx}}{5\alpha}} \\ D^2 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots \\ x_{N_{MCD}}^2 + y_{N_{MCD}}^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Sistem enačb $A\theta = b$ predstavlja optimizacijski problem, katerega rešitev je $\hat{\theta}$ (22). $\hat{\theta}$ 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 na vsaki posamezni (x, y) točki KRP se na koncu določi na podlagi enačbe (23).

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} \|A\theta - b\| \quad (22)$$

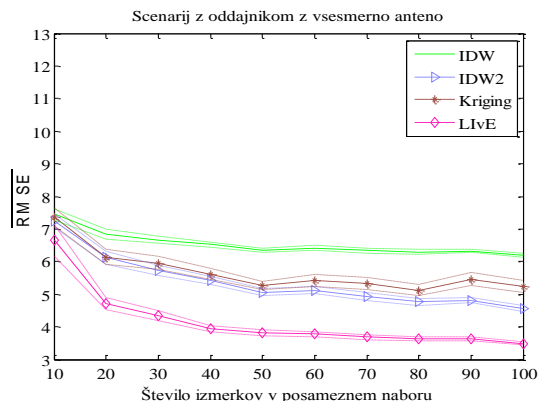
$$P_{rx}(x, y) = \hat{P}_{tx} - P_{L0} - 10\alpha \log_{10} \hat{d}_{(x, y)} \quad (23)$$

2.3 Hibridni postopki

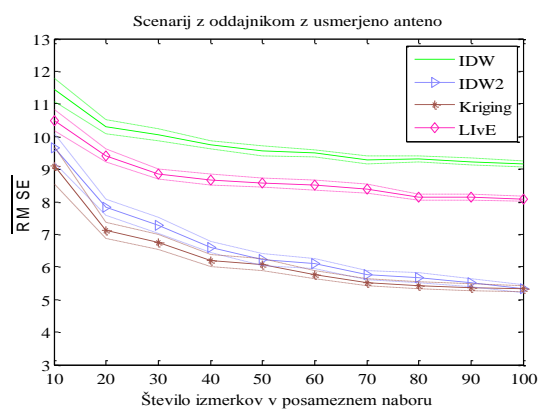
Hibridni postopki za gradnjo KRP na splošno kombinirajo pristop neposrednih in posrednih postopkov, zato bi na določene lahko gledali tudi kot na posredne postopke. Na primer, v [13] najprej uporabijo neposredni pristop, da pridobijo sliko, ki pri uporabi neposrednih postopkov že pomeni KRP. V nadaljevanju z uporabo metod za obdelavo slik ocenijo parametre oddajnika. Na koncu uporabijo modeliranje razširjanja radijskega valovanja s pomočjo ocenjenih parametrov in zgradijo končno KRP. Ravno nasproten pristop so uporabili v [21], kjer so najprej zgradili predhodno KRP s pomočjo modeliranja radijskega signala, ki so jo nato popravili s pomočjo izmerkov in interpolacijske metode, da so pridobili končno KRP.

3 PRIMERJAVA POSTOPKOV GRADNJE KRP

Z računalniško simulacijo smo primerjali najpogosteje uporabljene pregledane postopke za gradnjo KRP, in sicer metodi inverzne utežene in inverzne kvadratno utežene razdalje, Krigingovo metodo in postopek L_{IvE}. V simulacijskem okolju GRASS RaPlAT [22] smo izračunali pokrivanje z radijskim signalom za izbrano bazno postajo delujočega mobilnega omrežja z upoštevanjem lokacije, frekvence in moči oddajnika in tako pridobili referenčno KRP. Primerjavo postopkov smo izvedli za dva scenarija. V prvem smo predvideli vsesmerni, v drugem pa usmerjeni oddajnik s tipično sektorsko anteno, katere azimut in naklon smo uskladili z nastavitvami izbrane postaje. Z ključnim vzorčenjem referenčne KRP smo pripravili različne nabore izmerkov, ki bi bili v praksi pridobljeni po principu soudeležbe prostorsko distribuiranih mobilnih terminalov. Izmerkom smo dodali Rayleighove naključne spremenljivke, s katerimi smo modelirali presih zaradi razširjanja signala po več poteh. Natančnost postopkov gradnje KRP smo preverili na podlagi 100 naborov različno porazdeljenih izmerkov, pri čemer so bile velikosti naborov od 10 do 100 izmerkov. Za oceno natančnosti smo uporabili povprečno vrednost 100 izračunov korena srednje kvadratne napake (angl. average root mean square error, \overline{RMSE}) med zgrajenimi KRP in referenčno KRP ter pripadajoče 95-odstotne intervale zaupanja. Rezultate prvega scenarija prikazuje slika 8, drugega scenarija pa slika 9. Rezultati na sliki 8 potrjujejo ugotovitve iz [20], da je posredni postopek L_{IvE} natančnejši od uporabljenih neposrednih postopkov. Zadovoljivo vrednost \overline{RMSE} doseže že pri majhnem številu izmerkov, kar nakazuje potencialen razvoj gradnje KRP v smeri posrednih postopkov. Nasprotno rezultati na sliki 9 prikazujejo, da je postopek L_{IvE} pri usmerjenem oddajniku slabši od nekaterih neposrednih postopkov in da \overline{RMSE} doseže zasičenje že pri majhnem številu izmerkov. To nas v okviru nadaljnjega dela napeljuje k razvoju novega posrednega postopka gradnje KRP, ki bo upošteval usmerjenost oddajne antene, digitalni



Slika 8: Primerjava natančnosti postopkov gradnje KRP na podlagi scenarija z oddajnikom z vsesmerno anteno



Slika 9: Primerjava natančnosti postopkov gradnje KRP na podlagi scenarija z oddajnikom z realno usmerjeno anteno

model višin terena in vpliv različne rabe tal ter uporabil izmerke tudi za kalibracijo modela razširjanja radijskega valovanja.

4 SKLEP

REM, v najosnovnejši obliki kot KRP, pomenijo sodoben pristop k zavedanju radijskega okolja in podpori souporabe radijskega spektra. Ker se za njihovo gradnjo predvideva uporaba izmerkov zasedenosti radijskega spektra, pridobljenih po principu soudeležbe, smo v prispevku proučili najpogosteje uporabljene metode za njihovo gradnjo. Njihovo delovanje smo primerjali na primeru vsesmerne in usmerjenega oddajnika ter uporabe prostorsko porazdeljenih izmerkov, pridobljenih po principu soudeležbe. Analiza je razkrila, da je posredni postopek L_{IvE} natančnejši kot neposredni postopki pri vsesmernem oddajniku, ne pa tudi pri usmerjenem oddajniku. To odpira možnosti za razvoj novega postopka gradnje KRP, ki bo z uporabo digitalnega modela višin terena, rabe tal in upoštevanjem smernega diagrama oddajne antene izdelal natančnejše KRP in posledično natančnejši REM.

ZAHVALA

Delo je delno financirala Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada in FP7 projekta ABSOLUTE (FP7-ICT-318632).

LITERATURA

- [1] I. Dages, A. Polydoros, J. Riihijärvi, J. Nasreddine, P. Mähönen, L. Gavrilovska, V. Atanasovski, J. van de Beek, B. Sayrac, S. Grimoud, M. Lopez Benitez, J. Perez Romero, R. Agusti, and F. Casadevall, "FARAMIR project final report: Flexible and Spectrum Aware Radio Access through Measurements and Modelling in Cognitive Radio Systems," 2011.
- [2] Y. Zhao, L. Morales, J. Gaedert, K. K. Bae, U. Jung-Sun, and J. H. Reed, "Applying radio environment maps to cognitive wireless regional area networks," in *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007)*, Dublin, Ireland, 2007, pp. 115–118.
- [3] S. Subramani, J. Riihijarvi, B. Sayrac, L. Gavrilovska, M. Sooriyabandara, T. Farnham, and P. Mahonen, "Towards Practical REM-based Radio Resource Management," in *Future Network & Mobile Summit*, Warsaw, Poland, 2011.
- [4] B. Sayrac, S. Ben Jemaa, and P. Cordier, "Radio Environmental Maps (REMs): A Cognitive Tool for Environmental Awareness," Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), 2011.
- [5] T. Podobnikar, "Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti," Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2001.
- [6] A. B. H. Alaya-Feki, S. Ben Jemaa, B. Sayrac, P. Houze, and E. Moulines, "Informed spectrum usage in cognitive radio networks: interference cartography," in *2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008)*, Palais des Festivals, Cannes, France, 2008.
- [7] M. Angjelcinovski, V. Atanasovski, and L. Gavrilovska, "Comparative analysis of spatial interpolation methods for creating radio environment maps," in *19th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 2011, pp. 334–337.
- [8] D. Denkovski, V. Atanasovski, L. Gavrilovska, J. Riihijärvi, and P. Mähönen, "Reliability of a Radio Environment Map: Case of Spatial Interpolation Techniques," in *7th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CROWNCOM)*, Stockholm, 2012, pp. 248–253.
- [9] C. Phillips, M. Ton, D. Sicker, and D. Grunwald, "Practical Radio Environment Mapping with Geostatistics," in *2012 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Bellevue, Washington, USA, 2012.
- [10] M. A. Azpurua and K. D. Ramos, "A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude," *Progress In Electromagnetics Research M (PIERM)*, vol. 14, pp. 135–145, 2010.
- [11] H. B. Yilmaz, "Cooperative spectrum sensing and radio environment map construction in cognitive radio networks," PhD thesis, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Bogazici University, 2012.
- [12] L. Bolea, J. Perez-Romero, R. Agusti, and O. Sallent, "Image Processing Techniques as a Support to Transmitter Positioning Determination in Cognitive Radio Networks," in *Sixth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2010)*, Los Alamitos, CA, USA, 2010.
- [13] L. Bolea, J. Perez-Romero, and R. Agusti, "Received signal interpolation for context discovery in Cognitive Radio," in *14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Brest, France, 2011.
- [14] L. Bolea, J. Perez-Romero, R. Agusti, and O. Sallent, "Context Discovery Mechanisms for Cognitive Radio," in *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC2011 Spring)*, Budapest, Hungary, 2011.
- [15] R. J. Renka, "Multivariate interpolation of large sets of scattered data," *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 14, pp. 139–148, 1988.
- [16] R. Franke and G. Nielson, "Smooth interpolation of large sets of scattered data," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 15, pp. 1691–1704, 1980.
- [17] I. A. Nalder and R. W. Wein, "Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 92, pp. 211–225, 1998.
- [18] P. Goovaerts, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*: Oxford University Press, 1997.
- [19] R. Mahapatra and E. C. Strinati, "Interference-aware dynamic spectrum access in cognitive radio network," in *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* 2011, pp. 396–400.
- [20] H. B. Yilmaz and T. Tugcu, "Location estimation-based radio environment map construction in fading channels," *Wireless communications and mobile computing*, 2013.
- [21] Y. Ould Isselmou, H. Wackernagel, W. Tabbara, and J. Wiart, "Geostatistical interpolation for mapping radio-electric exposure levels," in *First European Conference on Antennas and Propagation Conference (EuCAP 2006)*, Nice, France, 2006.
- [22] A. Hrovat, I. Ozimek, A. Vilhar, T. Celcer, I. Saje, and T. Javornik, "Radio Coverage Calculations of Terrestrial Wireless Networks using an Open-Source GRASS System," *WSEAS Transactions on Communications*, vol. 9, pp. 646–657, 2010.

Marko Pesko je leta 2009 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko na Univerzi v Ljubljani. Zaposlen je v podjetju Telekom, d.d., in kot mladi raziskovalec iz gospodarstva sodeluje z Odsekom za komunikacijske sisteme na Institutu Jožef Stefan. Njegova raziskovalna dejavnost so brezžična senzorska omrežja in njihovo povezovanje z mobilnimi omrežji naslednje generacije ter gradnja kart radijskega okolja.

Tomaz Javornik je diplomiral leta 1987, magistriral leta 1990 in doktoriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot višji raziskovalni sodelavec na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani. Področja njegovega raziskovanja so: modeliranje radijskih kanalov, kodno modulacijski postopki, brezžična senzorska omrežja in več antenski telekomunikacijski sistemi.

Andrej Košir je profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegovo raziskovalno delo obsega področja uporabniškega modeliranja in personalizacije, uporabniških vmesnikov, optimizacije, statističnega procesiranja signalov in statistične analize podatkov. Sodeloval je pri večjem številu industrijskih in evropskih projektov.

Mitja Štular je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Na Mobitelu je opravljal številne strokovne in vodstvene naloge, med drugim kot vodja projekta gradnje omrežja UMTS in kot tehnični direktor z odgovornostjo za omrežja, storitve in IT. Trenutno opravlja delo strateškega svetovalca v podjetju Telekom Slovenije, raziskovalno in pedagoško pa sodeluje s Fakulteto za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Mihael Mohorčič je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Institutu "Jožef Stefan" kot višji znanstveni sodelavec in vodja Odseka za komunikacijske sisteme, od leta 2006 pa je tudi docent na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. V zadnjem času se raziskovalno ukvarja predvsem z obsežnimi brezžičnimi senzorskimi omrežji, kognitivnimi radijskimi omrežji in dinamičnim sestavljanjem komunikacijskih storitev.