

Kritično vrednotenje modelov za načrtovanje radijskega omrežja s terenskimi meritvami

Tomi Mlinar¹, Urban Podgrajšek², Boštjan Batagelj¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za sevanje in optiko

²IT 100, d. o. o.

E-pošta: tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

Evaluation of radio network planning models with field measurements

Abstract. In this paper, we compare radio coverage prediction models with field measurements in a selected polygon. Calculations and measurements were performed for the VHF and UHF frequency bands. Four models were used for comparison: Egli, Okomura, Hata-Davidson and Longley-Rice. All four are suitable for evaluation in urban, suburban and rural areas. Comparison of calculations and measurements shows that all four models give exaggerated results. The Longley-Rice model is most useful for coverage prediction in the VHF range, and the Okomura model in the UHF range. We must emphasize that engineering experience is required when working with the models to obtain satisfactory results.

1 Uvod

Pred gradnjo radijskih omrežij ima načrtovanje pokrivanja ključno vlogo za učinkovito gradnjo in zagotavljanje kakovostnih zvez uporabnikom. Obstaja več metod oziroma modelov za izračun pokrivanja, ki upoštevajo različne parametre, uporabljene tehnologije in področja uporabe [1]. V tem prispevku povzemamo najpogostejše uporabljene modele, ki se uporabljajo za načrtovanje pokrivanja radijskih sistemov, ki delujejo na frekvenčnem območju VHF (ang. Very High Frequency), ki sega od 30 do 300 MHz in UHF (ang. Ultra High Frequency), ki sega od 300 do 3000 MHz. Upoštevali smo posebnosti, ki veljajo za urbana, predmestna in podeželska območja. Rezultate modelov smo primerjali s terenskimi meritvami, ki smo jih opravili na izračunanem območju pokrivanja.

2 Modeli za načrtovanje pokrivanja

Obstaja vrsta računalniških modelov, s katerimi predvidimo pokrivanje radijskega omrežja. V grobem ločimo modele, ki so primernejši za urbana območja, primestna območja ali za podeželje. Na točnost izračunov vpliva vrsta parametrov, ki jih posamezni modeli upoštevajo. Načrtovanje pokrivanja v osnovi pomeni, da izračunamo, kakšna je jakost signala na določeni točki v okolici oddajnika. Preden signal prispe do določene točke, mora prepotovati pot, na kateri so naravne ali umetne ovire, spreminja se relief in vrsta površine (trava, gozdovi, reke, morje ...), nad katero se signal razširja. Zato je pri točnosti napovedi nekega modela pomembno,

katere parametre upošteva pri izračunih. Osnovna slabljenja, ki jih modeli izračunavajo, so slabljenje signala v praznem prostoru, ravninsko slabljenje in slabljenje zaradi loma ali uklona na oviri [2, 3].

Najbolj preprosti modeli izračunavajo le slabljenje v praznem prostoru (ang. Free Space Loss), ki je razmerje med sprejeto in oddajno močjo pri širjenju signala skozi prazen prostor brez ovir. Zapišemo ga s Friisovo enačbo

$$l_{FS} = \frac{P_{RX}}{P_{TX}} = G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (1)$$

kjer je P_{RX} sprejeta moč, P_{TX} oddajna moč, G_{TX} dobitok oddajne antene, G_{RX} dobitok sprejemne antene, λ valovna dolžina signala in d razdalja med oddajnikom in sprejemnikom.

Ker se signal le redko širi po praznem prostoru, večina modelov upošteva, da se signal dodatno oslabi zaradi odbojev ali drugih pojavov na prenosni poti. Takšnemu slabljenju pravimo ravninsko slabljenje. Zapišemo ga z enačbo

$$l_p \approx G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 |1 + |\Gamma| e^{j\Delta\phi}|^2, \quad (2)$$

kjer je Γ koeficient odbojnosti, ki je odvisen od vpadnega kota signala, polarizacije, lastnosti površine (relativne dielektrične konstante ϵ_r , specifične prevodnosti σ) in valovne dolžine signala. $\Delta\phi$ je fazni premik med direktnim in odbitim signalom.

V enačbi (2) je predpostavljeno, da je odbojna površina gladka, kar bi pomenilo, da je odboj idealen, vendar to ne drži vedno. Pogosto je površina hrapava, kar ovrednotimo s t.i. Rayleighovim kriterijem

$$C = \frac{4\pi\sigma \sin\theta}{\lambda}. \quad (3)$$

Iz enačbe (3) vidimo, da je hrapavost površine odvisna od vpadnega kota θ in valovne dolžine signala λ . Standardni odklon σ površinske hrapavosti glede na srednjo aritmetično višino odbojne površine je pogosto merilo valovitosti terena.

Naslednja vrsta slabljenja, ki ga upoštevajo kompleksnejši modeli, je slabljenje zaradi uklona na klinasti oviri, ki ga zapišemo z enačbo

$$L_U = -20 \log \left| e^{-j\frac{\pi}{2}} \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}u^2}}{\sqrt{2\pi}u} \right|, \quad (4)$$

kjer je u Fresnelov parameter, ki je odvisen od razdalje med oddajnikom in oviro d_1 , razdalje med oviro in sprejemnikom d_2 , višino ovire d_0 in višino sprejemne antene d_{RX} . Izračunamo ga po enačbi

$$u = \sqrt{2} \frac{h_0 - h_{RX}}{\sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}} \quad (5)$$

V nadaljevanju je opisanih nekaj modelov, ki jih običajno uporabljajo računalniški programi za izračunavanje pokrivanja.

2.1 Model Egli

Model Egli [4] je eden prvih modelov za oceno pokrivanja na pretežno ravnem odprtem terenu, brez večjih urbaniziranih območij. Uporablja preproste matematične izraze za izračun slabljenja signala

$$l_E = G_{TX} G_{RX} \left(\frac{h_{TX} h_{RX}}{d^2} \right)^2 \beta \quad (6)$$

V enačbo za standardno slabljenje je Egli dodal parameter β , ki upošteva določeno slabljenje zaradi valovitosti terena. Egli je do teh ugotovitev prišel z empiričnimi meritvami na frekvencah od 90 MHz do 1 GHz. Kot vidimo iz enačbe (7) je parameter β odvisen od frekvence f .

$$\beta = \left(\frac{40}{f} \right)^2 \quad (7)$$

Gre za preprost model, ki ni uporaben za zahtevnejše izračune pokrivanja.

2.2 Metoda JRC

Metoda JRC (Joint Research Centre) [3] je bila razvita v okviru odbora Evropske komisije in temelji na podatkih o reliefu terena, vrsti tal, gostoti vegetacije in drugih parametrih. Ta metoda uporablja topografsko bazo podatkov, ki je imela v prvi različici raster 500 m. Računalniški program na podlagi vseh razpoložljivih topografskih podatkov preveri obstoj vidnega polja med oddajnikom in sprejemnikom ter preveri dodaten prazen prostor za prvo Fresnelovo cono (po potrebi doda uklonsko slabljenje). Iz dobljenih podatkov izračuna slabljenje po enačbi

$$L = \max(L_{FS}, L_p) + L_U \quad (8)$$

kjer pomeni L_{FS} slabljenje praznega prostora, L_p prostorninsko slabljenje in L_U uklonsko slabljenje.

Ta metoda je uporabna za dokaj točno napovedovanje pokritosti na prostranih območjih z različnimi tipi terena. Predvsem je odvisna od rastra topografske karte.

2.3 Model Blomquist-Ladell

Model Blomquist-Ladell [3] je nadgradnja modela JRC in zato daje boljše rezultate. Predvsem uporablja za izračune izboljšano enačbo za ravninsko slabljenje, ki upošteva še nekaj dodatnih dejavnikov, kot sta vpliv troposfere in ukrivljenost Zemlje. Slabljenje po tem modelu se izračuna po enačbi

$$L = L_{FS} + \sqrt{(L'_p - L_{FS})^2 + L_U^2} \quad (9)$$

kjer je L'_p ravninsko slabljenje, ki upošteva dodatne dejavnike.

2.4 Model Longley-Rice

Model Longley-Rice [5] je eden najbolj priznanih modelov za načrtovanje pokrivanja na različnih terenih. Primeren je za frekvence od 20 MHz do 40 GHz. Za izračun uporablja zapletene matematične modele, kjer upošteva podatke o terenu (površinska odbojnost, dielektričnost, specifična prevodnost tal), efektivni radij Zemlje, višine stavb, vegetacijo in klimatske pogoje. Poleg prej opisanih podatkov pa ta model za izračun slabljenja potrebuje še dodatne podatke, kot so efektivna višina antene, horizontalna razdalja med anteno in obzorjem oziroma prvo oviro, vpadni kot med anteno in obzorjem oziroma oviro, skupni vpadni kot med horizontalnima linijama oddajne in sprejemne strani in valovitost terena. Pri izračunih je zelo pomembno pravilno določiti efektivno višino antene, ki je določena glede na prevladujočo odbojno površino.

Model Longley-Rice najprej izračuna zvezno funkcijo oddaljenosti od oddajnika in prišteje slabljenje praznega prostora. V naslednjem koraku doda slabljenje med oddajnikom in sprejemnikom na tri različne načine, glede na oddaljenost med njima. Pri prvem načinu, kjer je med oddajnikom in sprejemnikom neposredna vidljivost, se prišteje slabljenje zaradi hrapavosti površine in uklonsko slabljenje. Pri drugem načinu, ko je sprejemnik za obzorjem ali za oviro, se izračuna dodatno slabljenje zaradi odboja od gladke površine in uklonsko slabljenje na klinasti oviri, poleg tega pa se upošteva še ukrivljenost Zemlje. Pri tretjem načinu, kjer je med oddajnikom in sprejemnikom večja razdalja ali je med njima večja ovira, se zaradi uklona pot signala podaljša. Prišteje se dodatno slabljenje, ki se računa kot uklonsko slabljenje preko hrapavega terena.

Za računanje slabljenja v urbanem okolju je bil uveden popravek za urbano okolje

$$UF = 16,5 + 15 \log_{10} \left(\frac{f}{100} \right) - 0,12d \quad (10)$$

kjer je frekvenca f podana v MHz in razdalja d v kilometrih. Popravek UF se izraža v decibelih.

Ta model pa ima tudi slabost in to je, da ne vključuje nobenega popravka, ki bi upošteval dodatno slabljenje, kadar je ovira v neposredni bližini oddajnika ali sprejemnika.

2.5 Youngove meritve

Youngova metoda [3] temelji na empiričnih meritvah signalov inženirja Younga v New Yorku na frekvencah od 150 do 3700 MHz. V enačbo za ravninsko slabljenje je dodal parameter β , ki upošteva slabljenje zaradi prisotnosti zgradb. Skupno slabljenje je

$$l_Y = G_{TX} G_{RX} \left(\frac{h_{TX} h_{RX}}{d^2} \right)^2 \beta \quad (11)$$

V tem primeru faktor β predstavlja slabljenje zaradi prisotnosti zgradb in ne zaradi nepravilnosti terena, kot v Egljevi enačbi za slabljenje.

2.6 Metoda Okumura-Hata

Metoda Okumura-Hata [6] je empirična metoda, ki velja za mestna in primestna območja. Temelji na obsežnih meritvah v Tokiu in velja za frekvence do 1920 MHz. Enačbi za slabljenje v praznem prostoru (1) je dodana vrsta korekcijskih faktorjev, tako da je enačba slabljenja po metodi Okumura-Hata podana kot

$$L = L_{FS} + L_{mu} + H_{TX} + H_{RX} + K_a - K_A. \quad (12)$$

L_{mu} je mediana slabljenja glede na prazen prostor v urbanem področju nad skoraj ravnim zemljiščem, z efektivno višino oddajne antene $h_{TXe}=200$ m in referenčno višino sprejemne antene $h_{RXe} = 3$ m. Popravka H_{TX} za oddajno in H_{RX} za sprejemno anteno se uporabljata za višine anten, ki niso na referenčnih višinah [3]. K_a je korekcijski faktor orientacije v ulici. Ta upošteva popravek slabljenja glede na razmerje med smerjo gibanja sprejemnika (npr. v vozilu) in smerjo širjenja radijskega signala. K_A pomeni popravek za primestno, podeželsko ali odprto območje.

Metoda Okumura-Hata je do danes doživela množico izboljšav in se jo še vedno šteje za referenčno sodobnim modelom.

Z namenom, da bi bile Okumura-Hatove grafične metode lažje za uporabo, je Hata vpeljal nekaj empiričnih, matematičnih enačb. Izračuni, ki jih dajejo Hatove enačbe v primerjavi z izvirnimi Okumurinimi krivuljami, dajejo zanemarljive razlike, ki le redko presežejo 1 dB. V praksi se rezultati izračunov zelo dobro ujemajo z meritvami na terenu.

Model Hata se je z modelom COST 231 nadgradil za uporabo na frekvencah med 1800 in 1900 MHz. Uporabnost tega modela je omejena na makrocelice v urbanem okolju, kjer mora biti oddajna antena nad nivoji streh sosednjih stavb.

2.7 Leejeva metoda

Leejeva metoda [3] je bila posebej razvita za oceno pokritosti s signalom frekvence 900 MHz na gosto poseljenih območjih. Za izračune na drugih frekvencah vključuje vrsto prilagoditvenih parametrov, vendar so tam odstopanja relativno velika. Zato je danes zelo uporabna za napovedovanje pokrivanja z omrežjem LoRa, ki deluje na frekvenci 868 MHz in se ga uporablja za pokrivanje pametnih mest z internetom stvari (IoT).

Metoda ločuje med dvema modeloma. Prvi je za oceno slabljenja med dvema območjema in drugi za oceno slabljenja med dvema točkama. Prvi model izračunava slabljenje po enačbi

$$L = L_0 + \gamma \log d - F_0, \quad (13)$$

kjer L_0 predstavlja mediano slabljenja signala na razdalji 1 km, γ nagib krivulje slabljenja, F_0 pa je popravek slabljenja. L_0 in γ sta dobljena z meritvami na frekvenci 900 MHz, F_0 pa je skupek popravkov, ki

veljajo tudi za druge frekvence in druge pogoje od referenčnih. F_0 se izračuna z enačbo

$$F_0 = 10 \log(F_1 F_2 F_3 F_4 F_5), \quad (14)$$

kjer so korekcijski faktorji od F_1 do F_5 namenjeni naslednjim prilagoditvam: višini oddajne antene, dobitku oddajne antene, višini sprejemne antene, dobitku sprejemne antene in nosilni frekvenci.

Drugi model, ki se uporablja za oceno slabljenja med dvema točkama, je podoben prvemu, le da pri izračunih upošteva še nagib terena.

3 Meritve pokrivanja

Merili smo na frekvenčnih področjih VHF in UHF [2].

Osnovna merilna oprema za področje VHF:

- repetitor (bazna postaja) Motorola SLR5500 ($f_{TX} = 173,4125$ MHz, $f_{RX} = 168,9125$ MHz, $P_{TX} = 1,23$ W),
- vsesmerna antena R-F 133 NH (G=0 dBd),
- mobilna radijska postaja Motorola DM4601e,
- magnetna vsesmerna antena Negoya UT-308UV (G = 0 dBd),
- antena GPS DAM 1575A2.

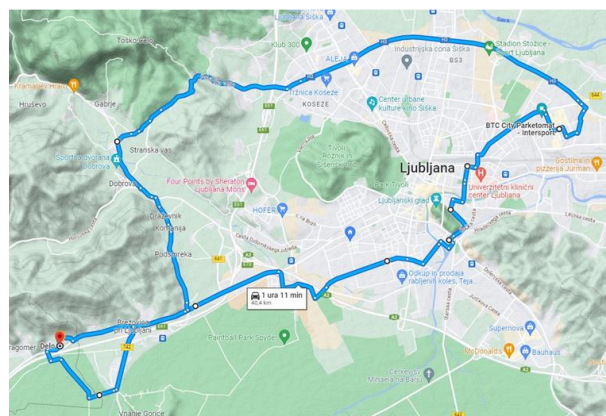
Osnovna merilna oprema za področje UHF:

- Repetitor (bazna postaja) Motorola SLR1000 ($f_{TX} = 458,3875$ MHz, $f_{RX} = 485,3875$ MHz, $P_{TX} = 1,21$ W)
- Vsesmerna antena R-F 130 NZ (G=0 dBd)
- Mobilna radijska postaja Motorola DM4601e
- Magnetna vsesmerna antena Negoya UT-308UV (G = 0 dBd)
- Antena GPS DAM 1575A2

Pred meritvami smo vso opremo ustrezno kalibrirali.

Meritve smo beležili z računalniškim programom Mototrb Site Survey [8], ki je vzorčil podatke s periodo 10 sekund. Na vsaki točki se je zabeležilo jakost sprejetega signala, GPS koordinate in čas vzorčenja.

Meritve smo izvedli na poligonu v okolici Ljubljane (slika 1). Zajeli smo tako urbano kot primestno in podeželsko območje.



Slika 1. Merilni poligon v okolici Ljubljane v skupni dolžini 40 kilometrov

Pri merjenju z mobilno radijsko postajo je treba opozoriti na nekaj značilnosti. Občutljivost radijske postaje je bila -124 dBm, prag šuma pa pri -127 dBm.

Radijska postaja meri nivo sprejetega signala na izbranem kanalu. Daleč od bazne postaje, predvsem v urbanih območjih, kjer bi moral biti nivo signala daleč pod pragom šuma, je sprejemna radijska postaja vseeno zabeležila nivoje, ki so bili tudi boljši od -115 dBm. To lahko pripišemo motilnim signalom v tem kanalu ali motnjam iz sosednjega kanala. Na podežlju in v primestnih območjih teh težav ni bilo zaznati.

4 Izračun pokrivanja

Izračun pokrivanja [2] smo naredili s štirimi modeli (Egli, Okomura, Hata-Davidson in Longley-Rice) in za dve frekvenčni področji (VHF in UHF).

Za izračune smo uporabili programsko opremo Softwright Tap 7.5 [7], ki je namenjena izračunavanju pokrivanja z radijskim signalom, ocenjevanju intramodulacijskih in drugih motenj ter načrtovanju zvez točka-točka. Za podlago je bila uporabljena topografska karta ločljivosti 10 metrov.

5 Primerjava izračunov z meritvami

Rezultate meritev in izračunov pokrivanja (preglednica 1) smo primerjali s programsko opremo Softwright TAP Mapper.

Preglednica 1. Odstopanje izračunanih vrednosti od izmerjenih

Model za izračun	VHF	UHF
	Povprečno odstopanje izračuna od meritev	
Egli	+14 dB	+16,6 dB
Okomura	+4,3 dB	+5,3 dB
Hata-Davidson	+7 dB	+8 dB
Longley-Rice	+4,1 dB	+8 dB

Iz preglednice 1 lahko razberemo, da dajejo rezultati izračunov po vseh modelih precejšnje rezultate. Rezultati izračunov po modelu Egli najbolj odstopajo od izmerjenih rezultatov. Odstopanje je tako veliko, da so ti rezultati omejeno uporabni, se jih pa da izboljšati s pomočjo vnosa efektivnih višin anten. Ker so izračuni s tem modelom zelo hitri, je ta model uporaben za prvo oceno pokrivanja. Po modelu Okomura dobimo zelo dobre rezultate za frekvenčno področje VHF in nekoliko slabše za UHF. Treba pa je omeniti, da smo pri tem modelu izbrali popravek za skoraj odprto in povsem odprto območje, čeprav je bil velik del meritev opravljen v urbanem območju. Z modelom Hata-Davidson dobimo povprečno dobre rezultate. Vnašanje popravkov je bolj predvidljivo, ima pa omejitve v zasenčenih območjih, ker ne upošteva zadosti slabljenja naravnih ovir. Med modeloma Okomura in Hata-Davidson je pomembna razlika v hitrosti izračunavanja pokrivanja. Medtem ko je za mrežo 20 x 20 km model Okomura potreboval več kot 12 ur, je model Hata-Davidson izračunal v 45 minutah. Model Longley-Rice se je izkazal za najbolj prilagodljivega in natančnega. To je veljalo tudi za zasenčena območja, zato je ta model idealen za odkrivanje t.i. sivih lis.

6 Sklep

Po analizi modelov in primerjavi le-teh z meritvami lahko sklenemo, da ni enega univerzalnega modela, ki bi bil primeren tako za vse terene kot za vse tipe poseljenosti. Vsi računski modeli dajejo precejšnje rezultate.

Pri ocenjevanju pokrivanja je ključnega pomena ločljivost topografske karte in dostopnost podatkov o posameznih slojih, kot je npr. vrsta terena, višine zgradb in podobno. Metodi, kot sta Okomura-Hata in Longley-Rice, že v osnovi pri izračunu upoštevata digitalne karte in podatke o slojih. Potrebno je opomniti, da večina modelov omogoča ročno izbiranje popravkov za razne tipe terena in gostoto poseljenosti. Pri njihovi izbiri je potrebno veliko inženirskih spretnosti in izkušenj.

Podatki o višini, zgradbi in gostoti stavb so pomembni pri načrtovanju v urbanih območjih, saj je tam gostota oddajnikov in uporabnikov zelo velika in je velika potreba po izogibanju interferencam. To velja za javna mobilna omrežja, medtem ko je za profesionalna omrežja predvsem pomembno poznavanje mejnega področja med dvema celicama in verjetnost delovanja omrežja, tako po času kot po lokaciji.

Sklenemo lahko, da je za načrtovanje omrežij v frekvenčnem področju VHF najbolj uporaben model Longley-Rice. Najboljše rezultate za radijske sisteme, ki delujejo na frekvenčnem področju UHF daje model Okomura, kjer pa je potrebno vnesti korekcijo za »odprta območja«, četudi so v dosegu pokrivanja manjša ali večja naselja.

Zahvala

Delo je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru projekta J2-3048 in raziskovalnega programa P2-0246.

Literatura

- [1] T. Mlinar: Analiza kakovosti načrtovanja digitalnega radijskega omrežja, Zbornik sedemindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2018, Portorož, Slovenija, 17.-18. september 2018, str. 55-58, ISSN 2591-0442.
- [2] U. Podgrajšek: Primerjava metod za izračun pokritosti sodobnih mobilnih radijskih omrežij, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2023
- [3] J. D. Parsons, »The Mobile Radio Propagation Channel, Second Edition«. Wiley, ISBN: 0-470-841 52-4, 2000.
- [4] Wikipedia, Egli model. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Egli_model, [Dostopano: 14. 7. 2023]
- [5] Wikipedia, Longley-Rice model. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Longley%E2%80%93Rice_model, [Dostopano: 14. 7. 2023]
- [6] 13. 7.6.1 Appendix 7.A: The Okumura-Hata model. <https://www.eit.lth.se/fileadmin/eit/courses/eti051/docs/pp07.pdf>, [Dostopano: 14. 7. 2023]
- [7] TAP 7.5, Terrain Analysis Package, Softwright LLC, USA, www.softwright.com
- [8] Mototrbo Site Survey, CPS 2.0, Motorola Solutions, USA