

Modeliranje razširjanja radijskih valov v naravnih jamah

Andrej Hrovat¹, Michel D. Bedford², Tomaž Javornik¹

¹ Institut Jožef Stefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Camborne School of Mines, University of Exeter, Cornwall Campus, Penryn, Cornwall UK

E-pošta: andrej.hrovat@ijs.si, M.D.Bedford@exeter.ac.uk, tomaz.javornik@ijs.si

Modeling of the radio waves propagation in natural caves

Abstract. Paper discusses open problems in the modeling of the radio wave propagation in natural caves with rough walls, floor and ceiling and non-uniform cross section shape and dimension along the cave. The common problems which have to be solved in modeling process in empirical and deterministic channel models are: cave geometry estimation and simplification, estimation and inclusion of the wall roughness in the model and uncertainties in received signal characteristics measurements and their impact on channel model.

1 Uvod

Razširjanje radijskega valovanja v cestnih in železniških predorih je opisano v številnih študijah za obstoječe in bodoče telekomunikacijske sisteme [1]. Cestni in železniški predori so pravilnih geometrijskih oblik. Stene, strop in tla so relativno gladki, zato ne povzročajo omembe vrednega sipanja radijskega valovanja. Dodatna prometna infrastruktura, kot so prometni znaki, pa ne pomenijo bistvenih ovir za širjenje radijskega valovanja. Za modeliranje razširjanja radijskega valovanja v predorih se uporabljajo naslednji pristopi: izračun nivoja radijskega signala z reševanjem Maxwellovih enačb, modalna analiza, kjer predor modeliramo z izgubnim valovodom, vrsta empiričnih modelov, kjer na podlagi meritev izračunamo potek slabljenja radijskega signala v praznem in/ali polnem predoru, in modeliranje širjenja radijskega valovanja z metodo sledenja radijskim žarkom, ki je še posebno primerna za modeliranje radijskih kanalov sodobnih širokopasovnih in več-antenskih sistemov [1]. Razširjanje radijskih valov v naravnih jamah, starejših predorih izdelanih ročno, kot so rudniški predori in predori za arheološka raziskovanja do sedaj še ni raziskano. Poznavanje lastnosti radijskega kanala v naravnih jamah in rudniških rovin postaja vse pomembnejše zaradi: (i) vpeljave številnih brezžičnih senzorjev v podzemno okolje, ki služijo za preverjanje trenutnega stanja v podzemnih jamah kot so temperatura, vlaga ter prisotnost zdravju škodljivih plinov, (ii) govornih in podatkovnih komunikacij v primeru nesreč in (iii) dostopnost multimedijских vsebin v dobro obiskanih turističnih jamah.

Vendar se lastnosti naravnih jam bistveno razlikujejo od lastnosti predorov in prehodov zgrajenih na osnovi sodobnih gradbenih standardov. Glavne

razlike so: (i) prečni presek naravnih jam ni enak po celotni dolžini jame ampak se nepredvidljivo spreminja vzdolž jame, (ii) naravne jame niso ravne ali rahlo ukrivljene temveč lahko vsebujejo precej ostrih nepravilnih zavojev, (iii) rovi se občasno končajo v velikih dvorinah, (iv) stičišča rovin so geometrijsko nepravilna, (v) v rovinah se naključno pojavljajo vertikalne in horizontalne ovire kot so stebri in pragovi, in (vi) stene rovin niso ravne, temveč razgibane zaradi delovanja vode in kapnikov, ki pri tem lahko nastanejo. Zaradi omenjenih lastnosti naravnih jam je modeliranje razširjanja radijskega valovanja v naravnih jamah zelo zahtevno in predstavlja velik raziskovalni izziv.

V nadaljevanju bomo predstavili nekaj problemov pri modeliranju razširjanja radijskega valovanja v naravnih jamah, na katere smo naleteli pri modeliranju razširjanja radijskega valovanja v treh predorih dveh naravnih jamah, ki se nahajajo v naravnem parku Yorkshire Dales Veliki Britaniji in sicer, predora Roof Tunnel in the Milky Way Inlet v jami Kingsdale Master in predor v jami Skirwith. Posvetili se bomo glavnim elementom, ki jih potrebujemo za modeliranje razširjanja radijskega valovanja in sicer (i) opis okolja v katerem se radijsko valovanje razširja, (ii) meritev radijskega signala, (iii) določitev modelov razširjanja radijskega valovanja in (iv) prilagoditev parametrov modela glede na izmerjene vrednosti nivoja radijskega signala.

Članek vsebuje naslednja poglavja. V prvem poglavju po uvodu opišemo metodo za izdelavo opisa geometrije podzemne jame, nato nadaljujemo s problemi pri meritvah moči sprejetega signala. V četrtem poglavju opišemo dva modela razširjanja radijskega valovanja v naravnih jamah in njihove omejitve. Sledi še zaključek s sklepnimi ugotovitvami in predlogi za nadaljnje delo.

2 Geometrijski opis naravne jame

Geometrijski opis okolja v katerem se širi radijsko valovanje je izrednega pomena za modeliranje širjenja radijskih valov. Digitalni model višin in raba tal sta neobhodna za modele širjenja radijskega valovanja na neposeljenih in vaških okoljih, mesta lahko opišemo s shape-datotekami ali digitalnim modelom stavb, za notranjost stavb pa uporabljamo vrsto vektorskih modelov s katerimi opišemo stene in odprtine v njih kot so okna, vrata, itd. Omenjeni podatki že obstajajo, pridobljeni pa so bili s satelitskim ali letalskim pregledovanjem zemljine površine, ali geodetskimi meritvam stavb, oziroma iz načrtov stavb. Geometrijski opisi podzemnih jam ne obstajajo, zato jih moramo

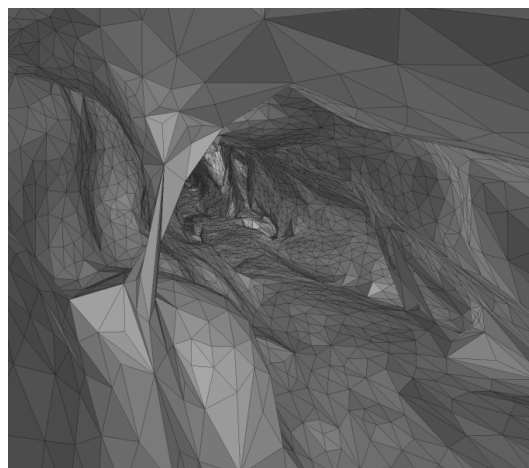
pridobiti sami s 3D laserskim skeniranjem. Laserski skenerji so običajno pritrjeni na trinožna stojala ali na vozilo. Ker tega pristopa v podzemnih jamah ne moremo uporabiti, lahko uporabimo prenosni ročni skener. V primeru pregledovanja naravnih jam smo uporabili skener ZEB1 podjetja GeoSlam, ki je komercialni produkt temelječ na znanstvenih dognanjih [2]. Skener je pritrjen na palico in omogoča pregled okolice na vseh 360 stopinjah. Vsebuje tudi vrsto senzorjev za premikanje v vseh smereh, katerih podatki se uporabijo za zlivanje dveh ali več zaporednih slik. Izhodna datoteka skenerja ZEB1 vsebuje oblak 3D točk, ki se jih z namensko programsko opremo GeoSlam Hub pretvorimo v datoteko standardnega trikotniškega formata (STL). Po podatkih proizvajalca je natančnost skeniranja 2 do 3 cm.

Zaradi razgibanosti podzemnih jam so trikotniki, ki opisujejo geometrijo jame razmeroma majhni, zato je število trikotnikov za opis jame precej veliko, kar lahko pri nekaterih pristopih za modeliranje razširjanja radijskih žarkov, na primer z metodo sledenja radijskim žarkom, močno podaljša čas računanja. Število trikotnikov lahko zmanjšamo z združevanjem trikotnikov. Pri tem izgubimo podrobnosti o geometriji jame, še posebno, če uporabimo standardne metode, ki novi večji trikotnik izračunajo tako, da minimizirajo srednjo kvadratno napako med novim združenim trikotnikom in množico manjših trikotnikov. Bolj verno geometrijsko obliko jame dobimo, če poiščemo ekstremske odstopanja ter na osnovi njih zgradimo nov geometrijski model jame. Pri uporabi metode sledenja radijskim žarkom moramo upoštevati, da so trikotniki dovolj veliki, da odbijejo večji del energije radijskega valovanja. Za dober geometrijski model podzemne jame moramo določiti tudi elektromagnetne lastnosti materiala iz katerega je jama zgrajena.

Slika 1 prikazuje postopek skeniranja podzemne jame, Slika 2 pa rezultate skeniranja v obliki STL.



Slika 1. Postopek skeniranja podzemne jame



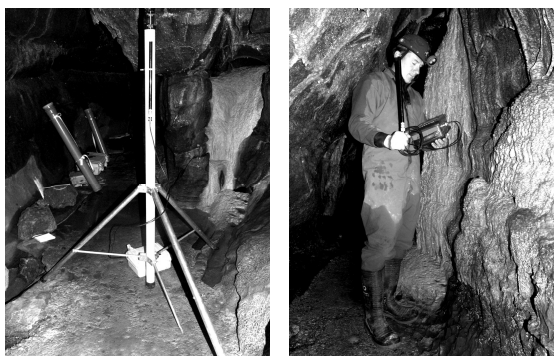
Slika 2. Geometrijski 3D model podzemne jame.

3 Merjenje lastnosti radijskega signala

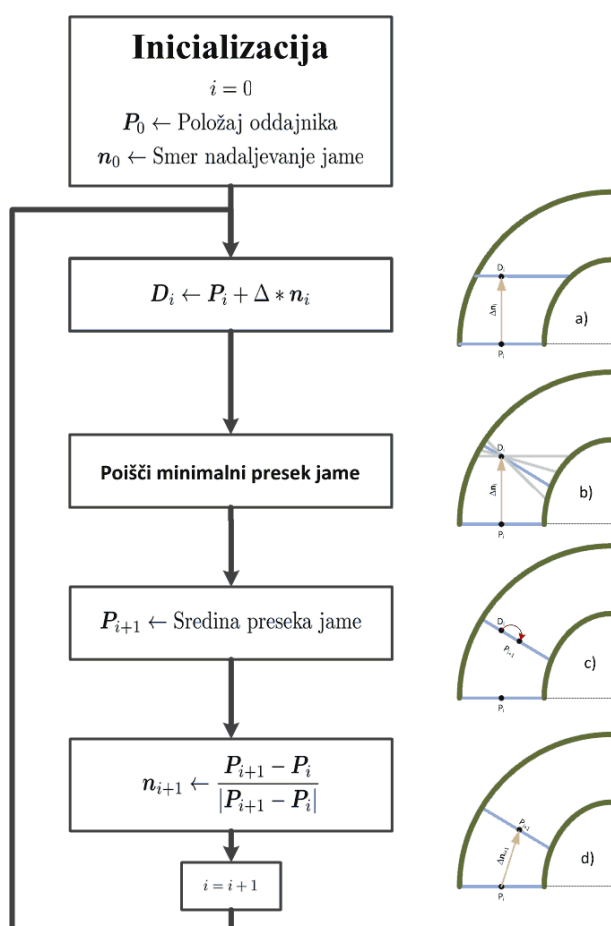
Dober model širjenja radijskega valovanja zahteva umerjanje modela, oziroma preverjanje veljavnosti modela z izmerjenimi rezultati. Vsaka meritev mora poleg radijskih parametrov, na primer nivoja sprejetega signala ali impulznega odziva radijskega kanala, vsebovati tudi položaj oddajnika in sprejemnika, oboje zapisano v lokalnem ali globalnem koordinatnem sistemu. Za določanje lokacije oddajnika in sprejemnika zunaj stavb običajno uporabimo kar globalne satelitske sisteme za določanje položaja, kot sta GPS in GLONASS in umerjen tlačni višinomer za določanje višine oddajnika in sprejemnika. V notranjosti stavb pa položaje oddajnika/sprejemnika vpišemo ročno ali uporabimo metode določanje položaja oziroma sledenja na osnovi sidrskih vozlišč, katerih lokacija je poznana. Višino oddajnika/sprejemnika pa se dokaj enostavno določi z meritvijo razdalje od tal.

V podzemnih jamah so tla razgibana in neravna, mnogokrat nagnjena, prehodi pa ozki in nizki, tako da je edini način, da si zagotovimo dovolj veliko število meritev vzdolž jame ročno prenašanje oddajnika/sprejemnika od točke do točke. Uporaba namenske geodetske opreme za določanje položaja sprejemnika bi bila precej zamudna, zato se običajno uporabljajo nenatančne metode, ki lahko vnašajo v model precej velike napake. Primer izvajanja meritev v jami prikazuje Slika 3. Razdalje med posameznimi meritvami običajno ni težko izmeriti, za kar potrebujemo običajni meter ali laserski merilnik. Obstaja pa dokaj velika negotovost kolikšna sta azimut in elevacijski kot naslednje meritve, kar direktno vpliva na višino sprejemnika in na njegov horizontalni položaj v jami. Za meritve v jamah v Yorkshire smo dobili podatek, da so oddaljene za cca 1 m in da so se meritve izvajale na višini cca 1.5 m, če je bila višina jame stojna, drugače pa na sredini jame. Horizontalni položaj meritve pa je bil vedno v sredini jame. Da bi ocenili položaj sprejemnika v jami, smo načrtali in izdelali algoritem za izračun položaja sprejemnika, ki temelji na

predpostavki, da se merilec giblje v smeri poteka jame, ter se vedno postavi v središče minimalnega prečnega preseka.



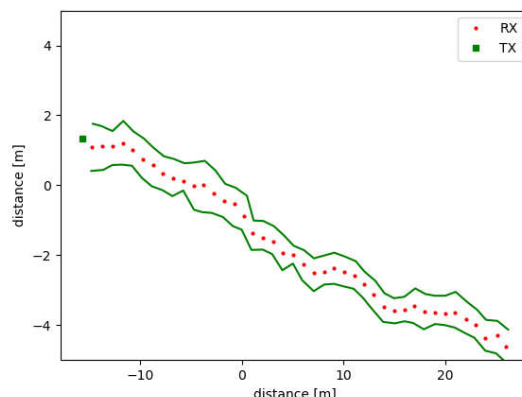
Slika 3. Prikaz izvajanja meritev v jami



Slika 4. Blok diagram iskanja poti v jami

Blok diagram algoritma, prikazuje Slika 4. Za začetno točko izberemo položaj oddajnika, smer gibanja \mathbf{n}_0 pa predpostavimo v smeri nadaljevanje jame. Korak Δ izberemo tako velik, da lahko sledimo poteku jame. Nato se premaknemo v smeri jame \mathbf{n}_i za korak Δ v točko \mathbf{D} , okoli katere vrtimo presečno ravnino toliko časa, da dobimo minimalno vertikalno presečno površino jame. Točka na sredini preseka določa naslednjo točko poti \mathbf{P}_{i+1} . Smer nadaljevanje jame pa določa smer glede na prejšnjo točko \mathbf{n}_{i+1} . Korak Δ izberemo mnogokrat manjši od 1 m, na katerem so bile izvedene meritve. Ker

so konfiguracije naravnih jam precej razgibane, pot v jami na koncu filtriramo z drsnim povprečjem. Pot v jami in obrise jame prikazuje Slika 5



Slika 5. Pot meritev jami in stene jame

Negotovost meritev poveča tudi položaj antene in vpliv človeka (merilca) na nivo radijskega signal. Dodatne merilne napake vnašamo z ročnim izvajanjem meritev in položaja antene glede na človeka, ki je odvisen od višine jame na mestu meritve. Slabljenje zaradi prisotnosti človeka znaša med 0 dB in 6 dB, odvisno od tipa sprejemnika in frekvence.

4 Modeli izgube poti v naravnih jamah

Splošni empirični model izgube poti za naravne jame ne obstaja, ker so geometrije in sestave naravnih jam zelo različne. Posledično bi morali za vsako jamo ali značilni tip jame izvesti nov sklop meritev. V [3] so avtorji predlagali empirični model izgube poti, ki temelji na vrsti meritev v naravnih jama na področju Yorkshire. V modelu je podzemna jama razdeljena na sektorje. V sektorju so lastnosti jame, kot so oblika, hrapavost, velikost, nagib, itd, podobne. Izguba poti v posameznem sektorju se izračuna z valovodnim modelom. Slabljenje na meter dolžine za horizontalne in vertikalne valovodne načine se izračuna po enačbah (1,2),

$$L_{mn}^{(h)} = \frac{\lambda^2}{2} \left(\frac{\epsilon_r^{(h)}(m+1)^2}{w^3 \sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} + \frac{(n+1)^2}{h^3 \sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} \right), \quad (1)$$

$$L_{mn}^{(v)} = \frac{\lambda^2}{2} \left(\frac{\epsilon_r^{(v)}(n+1)^2}{h^3 \sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} + \frac{(m+1)^2}{w^3 \sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} \right), \quad (2)$$

kjer sta n in m indeksa valovodnega načina, w in h sta širina in višina valovoda, medtem ko sta $\epsilon_r^{(h)}$ in $\epsilon_r^{(v)}$ relativni dielektrični konstanti tal in sten. Ker stene, tla in strop jame niso ravne, model predvideva še dodatno slabljenje zaradi hrapavosti (3) in slabljenje zaradi valovitosti tal (4), kjer je Δh koren srednje kvadratne hrapavosti in θ koren srednje kvadratne valovitosti tal. Poleg tega model predvideva še dodatno slabljenje v primeru zavoja v jamah in za stičišče dveh ali več rofov.

$$L_{hr} = \frac{\pi^2 \Delta h^2 \lambda}{2} \left(\frac{1}{w^4} + \frac{1}{h^4} \right), \quad (3)$$

$$L_{nagib} = \frac{\pi^2 \theta^2}{2\lambda}. \quad (4)$$

Dodatno se prvi sektor pri oddajniku razdeli na dva podsektorja. Tik ob oddajniku nivo radijskega signala pada kot v praznem prostoru, medtem ko v drugem podsektorju slabljene signala sledi valovodnemu modelu. Meja med prvim in drugim sektorjem se izračuna po enačbi (5), kjer je d_b točka preloma:

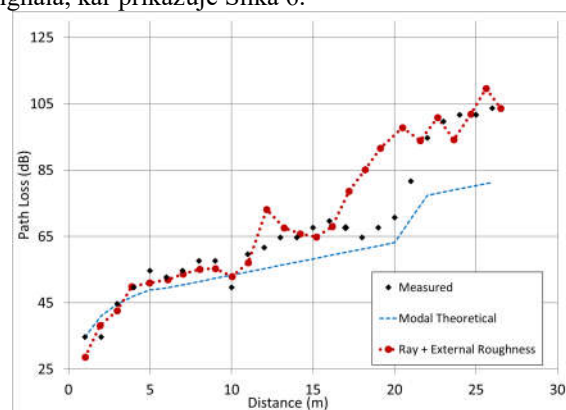
$$d_b = \min \left(\frac{w^2}{\lambda}, \frac{h^2}{\lambda} \right). \quad (5)$$

Drugi način modeliranja izgube poti v naravnih jamah je determinističen z metodo sledenja radijskim žarkom. Možnost uporabe metode sledenja radijskim žarkom se je pojavila, ko so na trg prišli prenosni infrardeči skenerji, s katerimi lahko dobro opišemo geometrijo podzemne jame z razmeroma velikim številom povezanih trikotnikov. Za modeliranje razširjanja radijskega valovanja v jami smo uporabili komercialni programski paket Wireless InSite podjetja REMCOM, ki omogoča sledenje radijskim žarkom v treh dimenzijah, upošteva hrapavost površine, uklonov na ovirah in odboje na ravnih ploskvah. Program uporablja metodo SBR (Shooting-and-Bouncing-Rays, streljanje in odbijanje žarkov). Zaradi hitrosti izračuna je število interakcij žarka z okolico (število odbojev, uklonov, lomov) omejeno. Pri primerjavi izmerjenih in modeliranih rezultatov z metodo sledenja radijskim žarkom ter empirično metodo, smo ugotovili, da moramo izmerjeni geometrijski model naravne jame ustrezno prilagoditi nosilni frekvenci radijskega signala in ustrezno umeriti programski paket. Pri oceni izgube na poti z metodo sledenja radijskim žarkom in primerjavo izmerjene izgube poti z izračunano smo našli naslednje ovire:

- v geometrijskem modelu naravne jame se pojavljajo napake, kot so manjkajoče ploskve, ploskve se popolnoma ne stikajo, kar povzroči uhajanje radijskega žarka iz naravne jame,
- ne poznamo dielektrične konstante tal stropa in sten jame,
- ploskve v modelu naravne jame morajo biti dovolj velike, da omogočijo odboj večino energije vpadnega radijskega valovanja,
- standardne metode za združevanje ploskev niso primerne, ker temeljijo na minimalni srednji kvadratni napaki, medtem ko so za izračun nivoja radijskega valovanja pomembne maksimalne vrednosti izboklin in vdolbin,
- metoda določanja robov na katerih se radijski žarki uklanjajo ni jasno določen, kar vodi v premalo ali preveč uklonjenih žarkov,

- model upoštevanja hrapavosti površine, ki ga uporablja komercialno orodje, je model za urbana okolja, torej za stavbe z ravnimi zidovi in nekaj izboklinami,
- meritve v naravnih jamah je težko izvesti, predvsem pa je težko določiti mesto meritve, višino meritve, lego antene in vpliv človeka na izmerjene rezultate,
- zaradi širjenja radijskega signala po več poteh oziroma presiha radijskega signala in ozkopasovnih meritev, so meritve zelo občutljive na minimalne premike sprejemne antene.

Kljub omenjenim pomanjkljivostim se z ustreznim umerjanjem metode sledenja radijskim žarkom dokaj dobro približamo izmerjenim nivojem radijskega signala, kar prikazuje Slika 6.



Slika 6. Primerjava izmerjenih vrednosti izgube na poti, empiričnega modela in metode sledenja radijskim žarkom.

5 Zaključek

Ocena izgube na poti v naravnih jamah z metodo sledenja radijskim žarkom dokaj dobro opiše slabljenje radijskega valovanja, vendar pa zahteva ustrezno umerjanje same metode sledenja radijskim žarkom in pa geometrijskega modela naravne jame. Z bolj natančnim model upoštevanja hrapavosti sten in valovitosti tal bodo rezultati tudi bistveno bolj natančni.

Literatura

- [1] A. Hrovat, G. Kandus and T. Javornik, "A Survey of Radio Propagation Modeling for Tunnels," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 2, pp. 658-669, Second Quarter 2014.
- [2] M. Bosse, R. Zlot and P. Flick, "Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3-D Range Sensor with Application to Mobile Mapping," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, no. 5, pp. 1104-1119, Oct. 2012.
- [3] M. D. Bedford and G. A. Kennedy, "Modeling Microwave Propagation in Natural Caves Passages," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 12, pp. 6463-6471, Dec. 2014.