

GEORADAR I GPS TEHNOLOGIJE - PRIMERI PRIMENE U DETEKCIJI PODZEMNE INFRASTRUKTURE

Aleksandar Ristić, Dušan Petrovački
Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu

Sadržaj - Rad prikazuje mogućnosti nove tehnologije detekcije podzemne infrastrukture kroz reprezentativne projektno primere. Projektni primeri su obrazloženi sa stanovišta kvaliteta i raznovrsnosti dobijenih informacija. Analiziran je uticaj određenih parametara i tehnika na brzinu akvizicije, odnosno kvalitet ulaznih i izlaznih podataka.

1. UVOD

Georadar (*Ground Penetrating Radar - GPR*) je uređaj namenjen za neinvazivnu detekciju i precizan prikaz lokacije i oblika objekata u podpovršinskom sloju. Prateći uređaj je GPS (*Global Positioning System*) rover kojim se mere prostorne koordinate tačaka trase cevovoda na površini, odnosno tačke projekcije trase na površinu zemljišta. Određivanje parametara podzemnih instalacija Georadarom i merenje površinskih koordinata GPS roverom je na nivou centimetarske tačnosti. Navedena tačnost zadovoljava propise o mapiranju podzemnih vodova definisane Pravilnikom o Katastru vodova, propisanim od strane Republičkog Geodetskog Zavoda [1].

Predajna antena Georadara emituje polarizovane elektromagnetne (EM) talase visoke frekvencije u zemljište. Usled različitih nehomogenosti u zemljištu tipa raslojenosti zemljišta, podzemnih objekata infrastrukture, kamenja, šljunka i sličnog, jedan deo EM talasa se reflektuje od graničnih površi između različitih materijala, dok drugi deo refrakcijom prolazi do narednih slojeva. Proces se ponavlja sve dok slabljenje emitovanog signala ne bude isuviše veliko. Refleksija EM talasa od graničnih površi je posledica razlike u električnim i magnetnim svojstvima materijala objekata infrastrukture i slojeva zemljišta.

Vreme neophodno da emitovani EM talas od predajne antene dođe do granične površi i reflektuje se nazad do prijemnog dela je vreme dvostrukog puta t_R [ns], što zapravo predstavlja merenu veličinu na osnovu koje se određuje stvarna dubina objekta z . S obzirom da se Georadarom beleži vreme dvostrukog puta, neophodno je odrediti relativnu električnu konstantu medijuma nekom od metoda. Najčešće se primenjuje rekalkibracija uređaja na samom terenu na osnovu georadarskog snimka objekta poznate dubine [2].

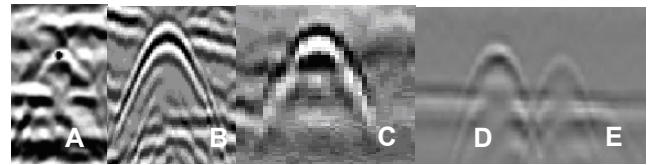
Uobičajene vrednosti maksimalne dubine skeniranja pri detekciji cevi su od 3.5 do 7m (za antene 400MHz i 200MHz respektivno). Vertikalna rezolucija pri detekciji cevovoda je od 2,5 do 6cm (za antene 200MHz i 400MHz respektivno).

Detekcija parametara cevovoda se vrši 2D ili 3D skeniranjem radnog prostora. Koja će od metoda biti primenjena zavisi od složenosti mreže instalacija i neophodnih podataka za proračun ili model.

Pravilna hiperbolična refleksija nastaje skeniranjem u pravcu pod 90° u odnosu na trasu cevovoda (poprečni sken). Ukoliko je trajektorija antene u pravcu trase cevovoda, hiperbola se transformiše u pravu.

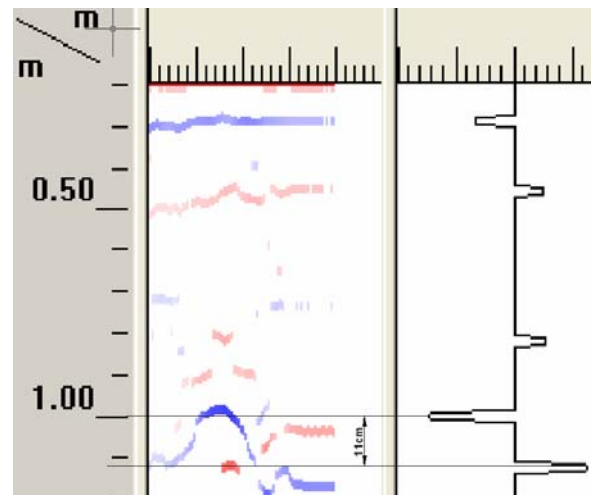
2. UTICAJ MATERIJALA I TIPA VODOVA NA OBLIK REFLEKSIJE

Oblik hiperbole i tip ekstremne vrednosti amplitude (pozitivna ili negativna) zavisi od materijala voda [3]. Analizom navedenih parametara moguće je odrediti tip i materijal voda. Slika 1 prikazuje hiperbole sa različitim karakteristikama sa različitim lokacija u Novom Sadu. Analizom oblika hiperbole i vrednosti amplitude utvrđuje se tip skeniranog objekta - cev ili kabel. Svetli segmenti hiperbole ukazuju na pozitivne pikove amplitude, a tamni na negativne. Ako je pozitivni pik najveći, definiše ili kablovski vod ili cev ispunjenu tečnošću. Najveći negativni pik definiše praznu cev. Slika 1A prikazuje refleksiju energetskog kabla prečnika 35mm. Slika 2B prikazuje refleksiju pune metalne cevi prečnika 100mm. Slika 2C prikazuje refleksiju prazne salonitne cevi 150mm. Slike 2C i 2D predstavljaju uporedni prikaz refleksije prazne metalne cevi i prazne PVC cevi sa optičkim kablom. Obe cevi su prečnika 110mm.



Sl. 1. Detekcija tipa i materijala vodova

Može se zaključiti da se najlakše uočavaju razlike između energetskih kablova i na primer prazne PVC cevi, a problem pri određivanju može da bude mala razlika između refleksije betonske i PVC cevi. Takođe se uočava da je refleksija bolja kada su skenirani vodovi metalni, a slabija ako su vodovi nemetalni (beton, PVC) [4]. Razlika postoji zato što se najveći deo EM talasa reflektuje o metalni vod, dok je PVC cev transparentna za EM talase. Na osnovu navedene činjenice moguće je detektovati metalni vod u zaštitnoj PVC cevi. Na slici 2 je prikazan procesiran snimak optičkog voda u zaštitnoj PVC cevi prečnika 110mm.

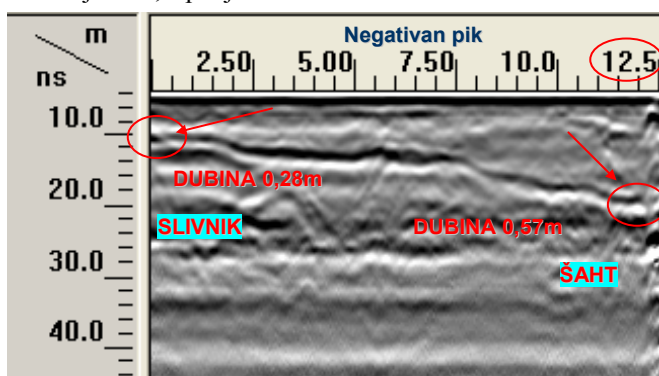


Sl. 2. Optički vod u zaštitnoj PVC cevi

Slika 2 ilustruje sken radara sa izdvojenim pozitivnim i negativnim pikovima. Negativni pik pokazuje dubinu do temena PVC cevi ($h=1.00\text{m}$), a pozitivni pik dubinu do optičkog voda ($h=1.12\text{m}$). Poznajući standardizovane prečnike PVC vodova, moguće je indirektno odrediti prečnik PVC cevi kao razliku navedenih dubina.

3. SPECIFIČNOSTI UZDUŽNOG SKENA

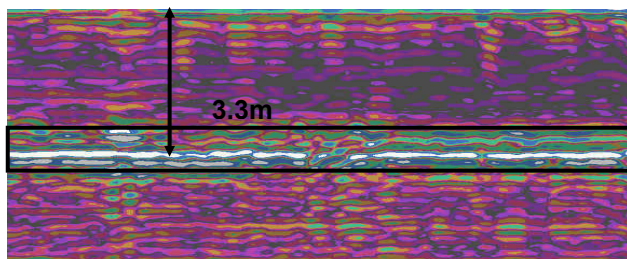
Kretanjem antene po osi cevovoda – uzdužnim skeniranjem hiperbolična refleksija se transformiše u pravu. S obzirom da je minimalna površina antene u zahvatu, pri uzdužnom skeniranju metalnih objekata dobija se najslabija refleksija. Prazne cevi izrađene od neprovodnih materijala (beton, PVC, salonit, keramika) imaju suprotne polarizacione efekte što je i uzrok negativnih pikova i dobrog kvaliteta uzdužnog skena. Slika 3 prikazuje uzdužni sken PVC cevi dužine 12m , prečnika 200mm na lokaciji u Novom Sadu uz ilustraciju parametara koji se mogu odrediti: nagib cevi u vertikalnoj ravni (pad cevi), dužina cevi, mesto račvanja i redukcije cevi, ispunjenost cevi.



Sl. 3. Uzdužni sken PVC cevi

4. STRUKTURNA ANALIZA ZEMLJIŠTA

Pri detekciji i mapiranju postojećih, odnosno projektovanju novih trasa podzemnih instalacija od interesa je određivanje nivoa podzemnih voda i mesta curenja cevovoda [5]. Slika 4 prikazuje radarski sken zemljišta sa definisanim nivoom podzemne vode na lokaciji u Industrijskoj zoni u Novom Sadu.



Sl. 4. Detekcija nivoa podzemne vode

Isticanje fluida iz cevovoda je karakterisano pojavom šupljina i udubljenja kao posledica vrtloženja fluida na mestu isticanja. Analizom radarskog skena određuje se dubina i oblik nastale anomalije, odnosno mesta curenja [6]. Slika 5 prikazuje radarski sken anomalije u zemljištu kao posledicu curenja cevovoda. Navedena zapažanja su upotrebljiva i za preventivnu analizu stanja svih tipova kopnenih saobraćajnica (klizišta, kaverne, udubljenja, sloj asfalta itd.). Alternativno rešenje detekcije curenja je analiza promene

vrednosti dielektrične konstante i oblika refleksije EM talasa na mestu curenja [7].



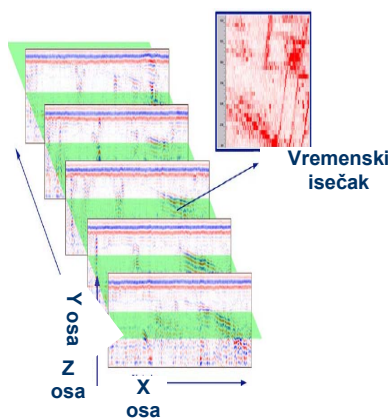
Sl. 5. Detekcija curenja cevovoda

5. SOFTVER ZA POSTPROCESING

RADAN (*Radar Data Analyzer*) je softver koji služi za prikaz, filtriranje i obradu radarskog skena. Prikaz podataka u radarskom skenu najčešće se vrši u *Linescan* formatu gde su različitim odnosom kolorita (ili *grayscale* nijansi) označeni slojevi sa specifičnim vrednostima pozitivne ili negativne amplitude reflektovanog talasa. U osnovne funkcije filteringa spadaju horizontalni (H) i vertikalni (V) *high-pass* i *low-pass* filteri, dekonvolucija i migracija. *High-pass* filteri uklanjaju sistemske šumove, a *low-pass* filteri uklanjaju šumove visoke frekvencije. Zemljište svojim karakteristikama modifikuje polazne EM talase eliminisanjem dela reflektovanog talasa na visokim frekvencijama. Visoka učestanost emitovanja antene stvara efekat odjeka (*ringing*), u smislu generisanja višestrukih refleksija o jedinstveni objekat. Usled efekta odjeka informacije sa dubljih slojeva skena postaju nedostupne. Postupak dekonvolucije odstranjuje efekat odjeka iz skena i rekonstruiše raspored slojeva u radarskom skenu. Postupak migracije kompresuje hiperboličnu refleksiju u jedinstvenu tačku i postavlja je na pravu lokaciju i dubinu uz dodatnu korekciju položaja slojeva zemljišta na većim dubinama. Pored filteringa moguće je izvršiti i korekciju stvarnog položaja i dubine objekata skeniranih na zemljištima pod nagibom, odnosno horizontalnu i vertikalnu kompresiju skena. Odstupanja su posledica topografskih efekata i činjenice da antena uvek emituje snop talasa upravno na površinu. Implementiran je i niz funkcija koje obezbeđuju jasniji sken i isticanje određenih detalja manje amplitude reflektovanog talasa. Pored navedenih funkcija za rad u vremenskom domenu (vreme dvostrukog puta i amplituda talasa), koriste se i specijalizovane funkcije tipa prostornog filtera i Hilbertove transformacije koje obrađuju reflektovani talas u frekventnom domenu (učestanost i faza reflektovanog talasa). *Interactive interpretation modul* obezbeđuje analizu skena razdvajanjem slojeva skena definisanih prema pozitivnim i negativnim pikovima. Rezultati se ekstrahuju u *Access* format. Realizovana je i automatska pretraga skena za detekciju mogućih hiperboličnih refleksija, na principu određivanja najvećeg pozitivnog ili negativnog pika [8].

Funkcije za kreiranje 3D prikaza softverski spajaju više 2D skenova po određenom redosledu (Slika 6). Međuprostor u mreži 2D skenova se generiše primenom intropolacije. Svaki horizontalni sloj u mreži skenova predstavlja refleksije u istom vremenskom trenutku propagacije (*time slice*) – vremenske isečke. Analizom vremenskih isečaka se određuje položaj linearnih pojava tipa cevi. Pretraga može da se vrši ručno ili automatizovano. Rezultate pretrage je moguće eksportovati u 3D AutoCAD dokument [8].

2D radarski sken sa sinhronizovanim odmeravanjem GPS koordinata na površini moguće je prikazati u 3D prikazu [8].

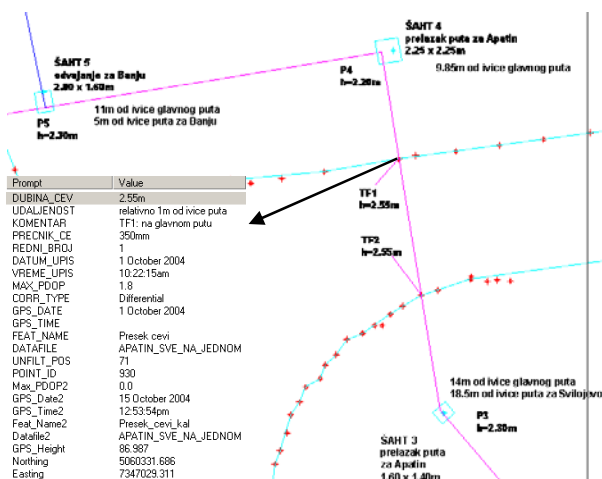


Sl. 6. Princip formiranja 3D skena

6. PRIMER MAPIRANJA TRASE CEVOVODA

Analiza primene Georadara može da se izvrši na primeru projekta detekcije trase regionalnog cevovoda u Apatinu i okolnim mestima. Projekat je obuhvatio snimanje 12 kilometara cevovodne mreže koja jednim delom ide kroz urbanizovanu sredinu – naseljena mesta gde je prisutna i postojeća infrastruktura, dok drugim delom ide kroz neuređeno područje između naseljenih mesta. Parametri koji su određeni Georadarom su definisani atributima u okviru georeferenciranog AutoCAD dokumenta.

Cevovod je izrađen od različitih tipova materijala (PVC, poliester, metalni segmenti), opsega prečnika (od $\phi 125\text{mm}$ do $\phi 350\text{mm}$) i postavljen na različitim dubinama (od 1m do 2.5m) u zavisnosti od konfiguracije terena i smera distribucije vode. Šahtovi su raspoređeni na svakih 1 do 1.5 km. Proces akvizicije je izvršen za 3 dana.



Sl. 7. Georeferenciran grafički prikaz i baza podataka

Skeniranje je izvedeno antenom centralne frekvencije 200MHz. Za dati opseg dubina bilo je moguće koristiti i antenu centralne frekvencije 400MHz, ali je ona manje robustna zbog velikog broja potencijalnih izvora smetnji (neravan, neraščišćen teren, pukotine, kaverne, ulegnuća).

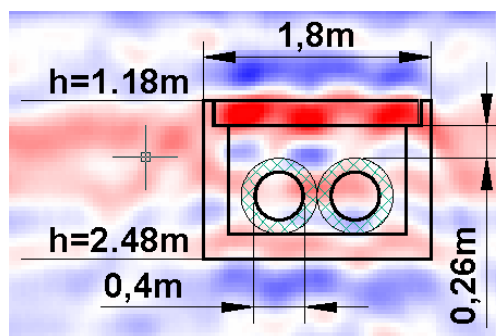
Koordinate svih karakterističnih tačaka na trasi su izmerene primenom GPS rovera Trimble 5800 u RTK (*Real Time Kinematic*) režimu sa generisanjem VRS (*Virtual Reference Station*). VRS softverski simulira permanentnu stanicu u blizini mesta merenja u cilju povećanja tačnosti

merjenja. Mreža permanentnih stanica na teritoriji kompletnog regiona Vojvodine obezbeđuje merjenja koordinata sa tačnošću 1cm [9]. Diferencijalna korekcija u realnom vremenu je preuzeta primenom GPRS (*General Packet Radio Service*) [10]. Rover Trimble 5800 je centimetarske tačnosti i spada u kategoriju geometarskih uređaja.

Sve odmerene tačke na trasi i prateće informacije definisane Georadarom su objedinjene na georeferenciranoj podlozi. Za pravolinijske segmente trase su softverski definisane dužine. Na slici 7 je prikazana tabela sa korisničkom strukturom podataka. Atribute strukture podataka je moguće definisati prema potrebama premera. AutoCAD dokument predstavlja grafički prikaz baze podataka datog cevovoda. Podaci mogu biti ekstrahovani u Excell ili Access format i nadalje tretirani kao baza podataka.

7. PRIMERI ANALIZE BUDUĆE TRASE CEVOVODA

2D skeniranje se primenjuje i u procesu pretrage buduće trase radi predupređenja oštećenja i kolizija sa postojećom infrastrukturom. Na dve lokacije u Novom Sadu su izvršena skeniranja kompletne buduće trase za potrebe izgradnje novog betonskog kanalizacionog kolektora dimenzija 3x3m i cevovodova $\phi 500\text{mm}$. Skeniranjem trase kolektora je detektovano 25 novih instalacija i potvrđeno prisustvo 47 postojećih. Na slici 8 je prikazana kompletna rekonstrukcija oblika i položaja dve toplovodne cevi prečnika 400mm u zaštitnom kanalu od betonskih segmenata.



Sl. 8. Rekonstrukcija položaja i oblika cevovoda sa skena

Skeniranjem trase cevovoda $\phi 500\text{mm}$ je detektovano 20 novih instalacija i potvrđeno prisustvo 24 postojeća. Takođe je definisan i nivo podzemnih voda na 3.3m (Slika 4).

7. PRIMER 3D ANALIZE RASKRSNICE

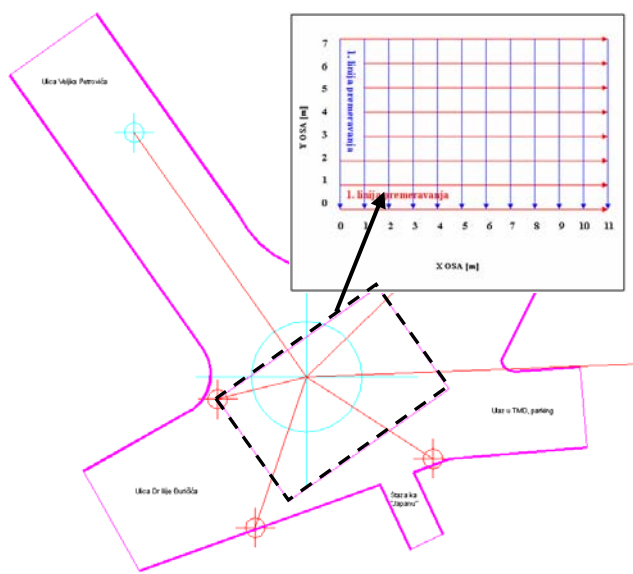
Slika 9 prikazuje raskrsnicu u Novom Sadu koja je obrađena postupkom 3D skeniranja. Analizirano je čvorište sistema atmosferske kanalizacije na raskrsnici. Koordinate saobraćajnica na raskrsnici su izmerene primenom GPS rovera Trimble 5800 čime je obezbeđena podloga za 3D prikaz cevovoda [9]. Na slici 9 su izdvojene granice radne površine sa obeleženim redosledom skeniranja po obe ose. Razmak između trajektorija skeniranja je 1m.

Na slici 10a je prikazan finalni rezultat posprocesinga 3D skena koji je eksportovan u AutoCAD (Slika 10b).

Postprocesing je izvršen primenom softvera RADAN 6.0. Informacije vezane za georeferenciranu mapu raskrsnice određenu GPS tehnologijom i podaci o infrastrukturi dobijeni u radarskom skenu se spajaju u jedinstvenu celinu u AutoCAD projektu.

8. AUTOMATIZOVANA EKSTRAKCIJA PODATAKA IZ RADARSKOG SKENA

Ekstrakcija, proračun, editovanje, filtriranje, skladištenje relevantnih podataka i generisanje izveštaja vrši se *Visual Basic* aplikacijom. Aplikacija primenom *ActiveX* tehnologije preuzima podatke iz *AutoCAD* baze (na primer ekstrakcija podataka iz *AutoCAD* projekta sa slike 10b) i prosleđuje ih u *Access* bazu i *Word* izveštaj. Kreirane informacije predstavljaju kompletan GIS (geografski informacioni sistem) za analizirani lokalitet. Aplikacija je razvijena sa ciljem da ubrza proces ekstrakcije, poboljša validnost dobijenih podataka i smanji uticaj ljudskog faktora na izlazne rezultate.



Sl. 9. Georeferenciran grafički prikaz raskrsnice u Novosadu sa obeleženim radnim područijem

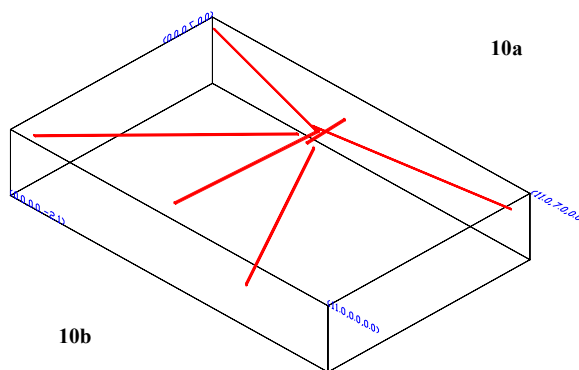
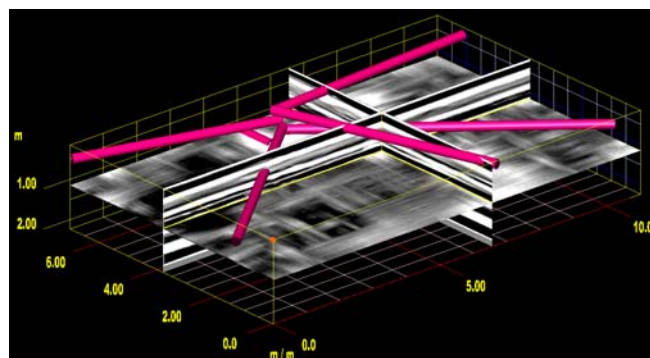
9. ZAKLJUČAK

U radu su prezentovane praktične mogućnosti nove metode za detekciju podzemne infrastrukture. Parametri koje je moguće odrediti i brzina akvizicije su obrazloženi kroz niz eksperimentalno - projektnih rezultata. Projektnim primerima je demonstrirana i integracija sa GPS tehnologijom premera koordinata kao i pregled strukture podataka dostupnih korisniku. Proces ekstrakcije i obrade podataka je delimično automatizovan *Visual Basic* korisničkom aplikacijom. Razvoj metode sa hardverskog aspekta podrazumeva primenu antena sa novim centralnim frekvencijama, niza antena u sprezi ili antena sa promenljivom frekvencijom. Sa softverske strane se podrazumeva razvoj niza dodatnih alata koji pružaju viši stepen automatizacije ekstrakcije, obrade i prikaza podataka i manji stepen zavisnosti od ljudskog faktora.

10. NAPOMENA

Istraživanja, primena i analiza tehnologije izloženi u radu su uključeni u okvire projekta "Automatsko upravljanje u industriji, Nacionalni program energetske efikasnosti", finansiran od strane Ministarstva za Nauku i tehnologiju, NP EE 305-101A

Istraživanja, primena i analiza tehnologije izloženi u radu su uključeni u okvire projekta "Nacionalni program za uređenje, zaštitu i korišćenje voda u Srbiji", finansiran od strane Ministarstva za Nauku i tehnologiju, NPV-19B



Sl. 10. Izgled cevi na raskrsnici

11. LITERATURA

- [1] Republika Srbija, Republički Geodetski Zavod, *Pravilnik o katastru vodova*, Beograd, 1999.
- [2] D. J. Daniels, *Surface penetrating radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, GBR, 1996.
- [3] D. Petrovački, A. Ristić, *Georadar i GPS tehnologije – principi primene u detekciji podzemne infrastrukture*, ETRAN konferencija, Budva, SCG, 2005.
- [4] Jesus Paniagua et al., *Test site for the analysis of subsoil GPR propagation*, 10-th International Conference on GPR, 21-24 June, Delft, The Netherlands, 2004.
- [5] Q. Lu, M. Sato, *Groundwater monitoring by GPR*, 9-th International Conference on GPR, 21-24 June, Santa Barbara, California, USA, 2002.
- [6] L.J. Malvar, G. Cline, *Airfield Pavement Void Detection Technology*, Naval Facilities Engineering Service Center, California, USA, 2000.
- [7] M. Eiswirth, C. Heske, L. Burn, D. DeSilva, *New methods for pipeline assessment*, World Water Congress, 15-19 Oct. 2001, Berlin, Germany
- [8] GSSI, *Radan 6 User Manual*, North Salem, USA, 2004.
- [9] W. Mansfeld, *Satellitenortung und Navigation*, Vieweg, Wiesbaden, Germany, 1998.
- [10] <http://gpsweb.ns.ac.yu>

Abstract – This paper describes modern, non-invasive data acquisition methods in underground utility detection. The work presents the possibilities of connecting data acquired with a Ground Penetrating Radar with GPS data and the joint use of these technologies through various examples. Also, the basic parameters, methods and their influence on the acquisition speed and data quality are defined.

EXAMPLES OF USING GROUND PENETRATING RADAR AND GPS TECHNOLOGY FOR DETECTION OF UNDERGROUND UTILITIES

A. Ristić, D. Petrovački