

GEORADAR I GPS TEHNOLOGIJE - PRINCIPI PRIMENE U DETEKCIJI PODZEMNE INFRASTRUKTURE

Dušan Petrovački, Aleksandar Ristić
Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu

Sadržaj - Rad opisuje osnovne principe primene nove tehnologije u procesu formiranja sveobuhvatnih, geografskih informacionih sistema o složenim strukturama podzemnih instalacija. Analiza obuhvata mogućnosti sprege uređaja Georadar i GPS tehnologije sa stanovišta kvaliteta i raznovrsnosti dobijenih informacija. Definisani su osnovni parametri i metode tehnologije koji direktno ili indirektno utiču na brzinu akvizicije, odnosno kvalitet ulaznih i izlaznih podataka.

1. UVOD

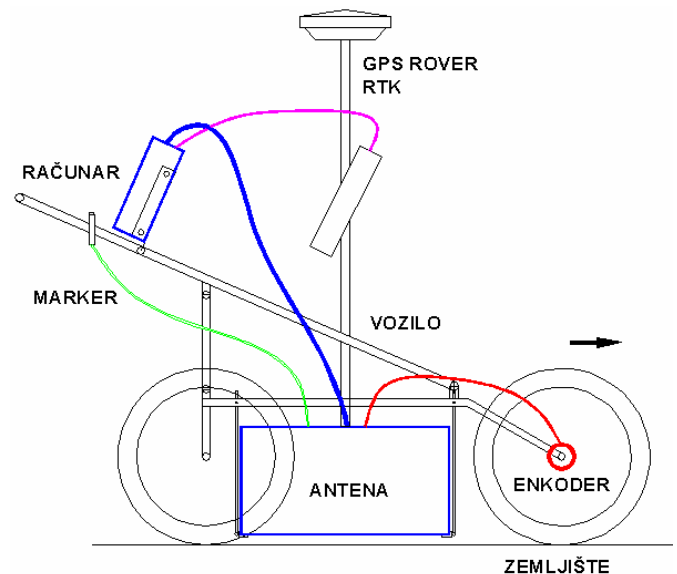
Tehnologija detekcije prostornog položaja podzemnih objekata infrastrukture i karakteristika tla bez iskopavanja ima značajnu ulogu sa stanovišta prikupljanja kvalitetnih podataka za proračun, modelovanje i upravljanje složenim infrastrukturnim sistemima. Projektovanje i izrada novih mreža instalacija u procesu razvoja naseljenih mesta sa složenom podzemnom infrastrukturom su svojom dinamikom uveliko prevazišli konvencionalne tehnologije za generisanje informacija o položaju i karakteristikama postojećih podzemnih instalacija. Konvencionalne tehnologije bazirane na raskopavanju, upotrebi zastarelih, neažuriranih podloga sa trasama, uz izbegavanje ažuriranja trasa i netačno odmeravanje su uzrok nepotpunih i netačnih podataka o podzemnim instalacijama. Direktna posledica takvog pristupa je skup, nekoordiniran proces trasiranja i postavljanja novih vodova praćen oštećenjima postojeće infrastrukture. Nedostatak kvalitetnih informacija o stvarnom stanju i funkcionisanju, na primer, gradske vodovodne mreže indirektno utiče na efikasnost, jer je količina proizvedene i distribuirane vode znatno veća od evaluirane.

2. PRINCIP RADA GEORADARA

Georadar (*Ground Penetrating Radar - GPR*) je uređaj namenjen za neinvazivnu detekciju (bez raskopavanja) i precizan prikaz lokacije i oblika objekata u podpovršinskom sloju. Georadar se sastoji od sklopa predajne i prijemne antene, upravljačke jedinice sa operativnim sistemom, baterijskog napajanja i pokretnog vozila. Vozilo - tricikl je opremljeno obrtnim inkrementalnim enkoderom koji pri skeniranju obezbeđuje tačno pozicioniranje centra antene iznad ose cevovoda. Georadar je opremljen i markerom kojim se u radarskom skenu označavaju detalji od interesa. 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.

Operacije skeniranja radnog područja i merenja koordinata mogu da se vrše nezavisno ili sinhronizovano. Tehnologija nezavisne akvizicije podrazumeva da se u prvom koraku Georadarom detektuje podzemni linijski objekat i dubina, a centar antene pozicionira iznad ose linijskog objekta. Završni korak akvizicije je merenje koordinata centra antene GPS roverom. Sinhronizovana akvizicija podataka podrazumeva da se kontinuirano beleže tačke na

trajektoriji antene Georadara, ili samo početna i krajnja tačka trajektorije antene Georadara. Sinhronizovan rad podrazumeva direktnu komunikaciju Georadara i GPS rovera. 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]. Slika 1 prikazuje funkcionalne celine uređaja i međusobne veze.



Sl. 1. Funkcionalne celine Georadara

U toku kretanja vozila, predajna antena 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.

Princip rada Georadara se zasniva na analizi propagacije EM talasa, odnosno određivanju vektora jačine električnog i magnetnog polja kao funkcija vremena i prostornih koordinata. Vektori elektromagnetnog polja u homogenoj linearnoj sredini zadovoljavaju Maksvelove jednačine i mogu se predstaviti u vidu talasnih, odnosno Helmholtzovih jednačina [2]:

$$\Delta \cdot \vec{E} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \cdot \sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\Delta \cdot \vec{H} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu \cdot \sigma \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

gde je:

\vec{E} - vektor jačine električnog polja u EM talasu [V/m],

\vec{H} - vektor jačine magnetnog polja u EM talasu [A/m],

ε - električna konstanta medijuma [F/m], $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_R$,

$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ [F/m], električna konstanta vakuuma

μ - magnetna konstanta medijuma [H/m], $\mu = \mu_0 \mu_R$,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m], magnetna konstanta vakuuma

σ - specifična provodnost medijuma [S/m].

Ako se razmatra slučaj gde je medijum propagacije talasa savršeni izolator ($\sigma=0$) i uzmu u obzir karakteristike ravnih uniformnih talasa jednačine (1) i (2) mogu se predstaviti sa jednačinama propagacije polarizovanog EM talasa uzduž Z ose [3]:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = \mu \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$\vec{H}_y(z, t) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \vec{E}_x(z, t) = \frac{1}{Z} \cdot \vec{E}_x(z, t) \quad (4)$$

gde je:

$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ [Ω] - impedansa sredine, odnosno mera uticaja električnih i magnetnih svojstava medijuma na propagaciju EM talasa

\vec{E}_x, \vec{H}_y - komponente vektora EM talasa, međusobno su

upravne, odnosno upravne su i na pravac prostiranja talasa

Opšte rešenje jednačina (3) i (4) može da se predstavi u obliku:

$$\vec{E}_x(z, t) = E_m \cdot \cos[\omega(t - \beta \cdot z)] \quad (5)$$

$$\vec{H}_y(z, t) = \frac{E_m}{Z} \cdot \cos[\omega(t - \beta \cdot z)] \quad (6)$$

gde je:

E_m - amplituda komponente električnog polja E_x

ω - učestanost komponenti polja [s^{-1}]

$\beta = \omega / c$ - fazni koeficijent,

$$c = (\mu_0 \cdot \varepsilon_0)^{-0.5} \text{ - brzina svetlosti: } c = 2.998 \times 10^8 \text{ [m/s]} \quad (7)$$

$$v_{talasa} = (\mu \cdot \varepsilon)^{-0.5} \quad (8)$$

Jednačine (5) i (6) opisuju propagaciju EM talasa koji se kreće brzinom c u smeru Z ose. Opšte rešenje pokazuje da EM talas prolaskom kroz proizvoljni medijum menja brzinu (8) i intenzitete vektora polja kao posledicu uticaja električnih i magnetnih svojstava medijuma.

S obzirom da su karakteristike medijuma kroz koji se vrši propagacija EM talasa takve da nije savršen izolator, neophodno je razmotriti i uticaj specifične provodnosti medijuma na osobine EM talasa. Jednačine (9) i (10) predstavljaju modifikaciju izraza (5) i (6) uz uvažavanje uticaja specifične provodnosti medijuma.

$$\vec{E}_x(z, t) = E \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cos(\omega \cdot t - \beta \cdot z + \theta_E) \quad (9)$$

$$\vec{H}_y(z, t) = \frac{E}{|Z|} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cos(\omega \cdot t - \beta \cdot z + \theta_E - \theta_Z) \quad (10)$$

gde je:

E - efektivna vrednost komponente električnog polja E_x

θ_E - početna faza električnog polja

θ_Z - argument impedanse sredine

α - koeficijent slabljenja EM signala kroz medijum [Np/m]

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{\left(1 - j \cdot \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon}\right)} \text{ [Ω] - kompleksna impedansa} \quad (11)$$

Izrazi (8) i (9) ukazuju da amplitude vektora polja EM talasa opadaju po eksponencijalnom zakonu kako se talas prostire duž Z ose, a mera promene brzine je određena koeficijentom slabljenja α . U opštem slučaju, ε , μ i σ su kompleksne veličine, tako da tačno određivanje parametara α i β nije jednostavno [4]. Izraz (12) definiše brzinu prostiranja talasa gde se jasno vidi uticaj specifične provodnosti, odnosno pojave disperzije EM talasa. Sledi zaključak da medijumi sa visokim stepenom provodnosti gotovo u potpunosti sprečavaju propagaciju EM talasa [4].

$$v_{talasa} = \frac{\omega}{\beta} \approx c \cdot \left(1 - \frac{\sigma^2}{8 \cdot \omega^2 \cdot \varepsilon^2}\right) \text{ [m/s]} \quad (12)$$

Praktična primena Maksvelovih jednačina za određivanje parametara polja tokom skeniranja Georadarom je ograničena njihovom složnošću. Stoga su usvojene određene pretpostavke da bi se omogućila praktična primena. Većina medijuma od interesa za razmatranje je takva da se uticaj magnetnih svojstava materijala može eliminisati $\mu_R \approx 1$, što čini zanemarivu grešku u većini slučajeva. Uticaj specifične provodnosti se uobičajeno ugrađuje primenom tablične klasifikacije uticaja tipova medijuma. Kvalitetnije rešenje problema provodnosti predmet je dobrog dela naučnih istraživanja iz ove oblasti. Na osnovu jednačina (7) i (8) sledi da je brzina propagacije EM talasa kroz zemljište:

$$v_{talasa} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_R}} \text{ [m/s]} \quad (13)$$

gde je ε_R - relativna električna konstanta medijuma. Izraz (13) ukazuje da u ovom slučaju ε_R najviše utiče na promenu brzine propagacije.

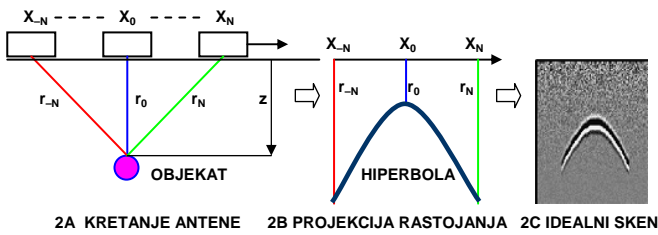
Vreme neophodno da emitovani EM talas od predajne antene dođe do granične površi i reflektuje se nazad do prijemnog dela je vreme dvostrukog puta t_R [ns], što zapravo predstavlja merenu veličinu na osnovu koje se određuje stvarna dubina objekta:

$$z = v \cdot \frac{t_R}{2} = \frac{c \cdot t_R}{2 \sqrt{\varepsilon_R}} \text{ [m]} \quad (14)$$

S obzirom da se Georadarom beleži vreme dvostrukog puta, neophodno je odrediti ε_R nekom od metoda. Najčešće se primenjuje rekaliibracija uređaja na samom terenu na osnovu georadarskog snimka objekta poznate dubine [3].

Na slici 2 je prikazan proces generisanja radarskog skena. Apscisa predstavlja trajektoriju antene, a ordinata vreme dvostrukog puta t_R reflektovanog talasa, odnosno relativnu dubinu do temena cevi z .

S obzirom da je rastojanje između prijemne i predajne antene u antenskom sklopu malo, tada je put koji EM talas pređe od predajne antene do objekta približno jednak putu reflektovanog EM talasa od objekta do prijemne antene.

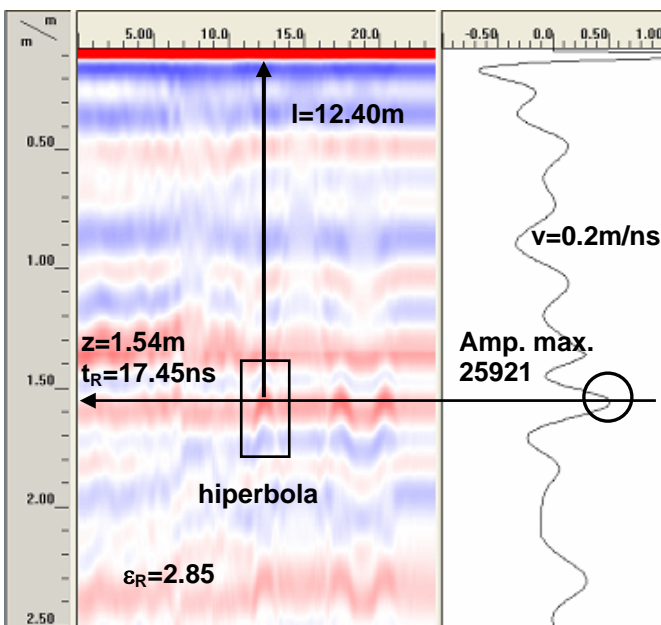


Sl. 2. Generisanje idealnog radarskog skena

Rastojanje od antene do objekta, koje se menja tokom kretanja antene po površini je označeno sa dužima $r_{-N} \dots r_0 \dots r_N$ (2A). Navedene duži se na skenu prikazuju *normalno* na pravac kretanja antene označen tačkama $x_{-N} \dots x_0 \dots x_N$. Sukcesivnim povezivanjem vrhova duži nastaje geometrijska figura hiperbole čiji vrh predstavlja dubinu do temena cevi z (2B).

Svaka tačka na radarskom skenu sadrži i informaciju o amplitudi signala. Tačke na vrhovima duži imaju ekstremne vrednosti amplitude. Ekstremna vrednost na najkraćoj duži r_0 (centar antene je iznad ose cevi) je najveća (pozitivna ili negativna) i predstavlja kriterijum za pretragu skena i određivanje lokacije i dubine objekta. Negativni pik ukazuje da je u pitanju prazna cev, dok je u suprotnom puna cev ili kabel. Refleksije cevi i kabela se međusobno razlikuju prema vrednostima pozitivnog pika. Refleksija kabela ima veći pozitivni pik – «jaču» refleksiju.

Predajna antena emituje konusni snop EM talasa širine $\beta=35^\circ \div 45^\circ$, tako da uređaj detektuje objekat i kad antena nije direktno iznad ose objekta. Na slici 2C je prikazan idealni sken jedne cevi u homogenom sloju zemljišta pri kretanju antene normalno na osu cevi. U stvarnim uslovima sken je zašumljen sa različitim smetnjama i hiperboličkim refleksijama koje potiču od drugih infrastrukturnih objekata što se eliminiše i analizira u postprocesingu. Na slici 3 prikazan je realni sken Georadara sa obeleženom trajektorijom na apscisi i dubinom na ordinati. Na osciloskopu je uočljiv pozitivni pik što ukazuje na punu cev. Za isti slučaj, refleksija kabela bi dala hiperbolu sa užim kracima i većom vrednošću amplitude.



Sl. 3. Realni sken Georadara

3. FUNKCIJA PRENOSA GEORADARA

Osnovne karakteristike rada Georadara su:

- maksimalna dubina lociranja objekta r_M
 - prostorna (vertikalna δ_z i horizontalna δ_x, δ_y) rezolucija δ_R
- Funkcija prenosa, odnosno jednačina Georadara definiše odnos snage signala na prijemnoj i na predajnoj anteni i na osnovu nje je moguće odrediti r_M (slika 3):

$$P_R = P_T \cdot \frac{G_T \cdot \sigma_{obj} \cdot S_R}{(4\pi)^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2} \cdot e^{-2\alpha(r_1+r_2)} \quad (15)$$

G_T – pojačanje predajne antene

σ_{obj} – koeficijent provodnosti [mS/m]

S_R – absorpcija po poprečnom preseku prijemne antene [m²],

$$S_R = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} = \frac{c^2}{4 \cdot \pi \cdot f^2} - \text{za kvazisferične objekte čiji je}$$

obim približno $O=2\pi r \approx \lambda$;

f – učestanost EM talasa [MHz],

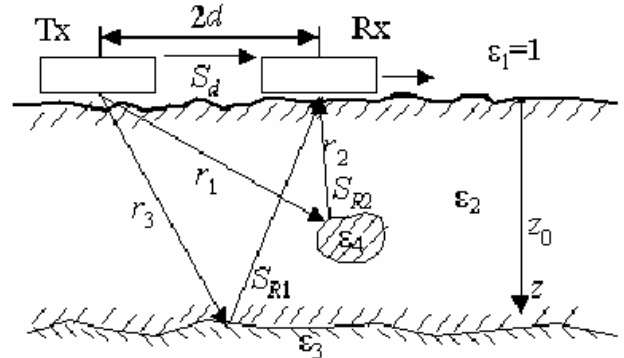
r_1 – rastojanje od predajne antene do objekta [m],

r_2 – rastojanje od objekta do prijemne antene [m], $r_1 \approx r_2 \approx r_M$.

$\alpha(f)$ – koeficijent slabljenja EM signala kroz medijum

$\alpha(f) \approx f^A$ – zavisnost slabljenja od frekvencije [dB/m]

$A \approx 0.5$ $f=100 \div 300$ MHz, $A \geq 1$ $f > 1000$ MHz [5]



Sl. 4. Princip rada antene Georadara

Na slici 3 su prikazane osnovne veličine funkcije prenosa Georadara u vremenskom domenu. Uobičajene vrednosti maksimalne dubine skeniranja pri detekciji cevi su od 3.5 do 7m (za antene 400MHz i 200MHz respektivno).

Prostorna rezolucija δ_R je funkcija frekventnog opsega rada antene i električne konstante medijuma. Rezolucija po vertikalnoj osi (dubini) δ_z se definiše:

$$\delta_z \approx \frac{c}{2 \cdot \Delta f \cdot \sqrt{\epsilon(f)}} \quad (16)$$

Vertikalna rezolucija pri detekciji cevovoda je od 2,5 do 6cm (za antene 200MHz i 400MHz respektivno).

4. METODE DETEKCIJE PARAMETARA

Detekcija parametara vodova 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.

2D skeniranje služi za brzo lociranje podzemnih objekata. Rekalibracijom nad objektom poznate dubine se na osnovu izraza (14) određuje ϵ_R koje važi na lokalnom nivou. Skeniranjem poprečnih profila se utvrđuje stvarna dubina i trasa voda. Pravilna hiperbolična refleksija nastaje skeniranjem u pravcu pod 90° u odnosu na trasu voda, jer je

tada zadovoljen princip obrazložen na slici 2. Ukoliko je trajektorija antene u odnosu na pravac trase pod ostrim uglom hiperbola se deformiše [6,7]. U ekstremnom slučaju, kada je trajektorija antene u pravcu trase voda, hiperbola se transformiše u pravu.

Vodovodne mreže velikih sistema imaju oko 20% gubitaka proizvodnje kao posledicu curenja cevovoda. Pored više postojećih, savremenih metoda, Georadar ima značajnu ulogu i u procesu brzog i efikasnog lociranja mesta curenja, naročito kod cevovoda manjih prečnika. Identifikacija mesta curenja se vrši detekcijom šupljina (kavita) koje stvara tečnost, ili analizom promena u strukturi tla kao posledice zasićenja vlagom (promena električne konstante medijuma ϵ_R) [8].

Na osnovu navedenog, 2D skeniranjem moguće je odrediti dubinu voda, pravac trase, lom trase u horizontalnoj i vertikalnoj ravni, nagib voda, dužinu voda, procenat ispunjenosti cevi, mesto redukcije prečnika cevi, detekciju mesta curenja cevi. Estimacija spoljašnjeg prečnika cevi se vrši dodatnim procesingom, na osnovu geometrije hiperbole. Pri 3D skeniranju softverski se objedinjava više 2D skenova po određenom redosledu. Međuprostor u mreži 2D skenova se generiše primenom intropolacije. 3D skeniranje je značajno za obradu složenih situacija na mestima račvanja i mimoilaženja više tipova podzemnih instalacija. Primenom softvera za postprocesing radarskog skena «RADAN» vrši se filtriranje, normalizacija i transformacija sirovog signala. Realizovane su i funkcije za automatizovanu detekciju i markiranje linijskih objekata [7].

Koordinate tačaka na trasi mogu da se mere primenom GPS uređaja centimetarske (rover *Trimble 5800*) ili decimetarske tačnosti (*GeoExplorer XT*). GPS rover 5800 se koristi za precizno merenje geodetskih tačaka, dok je *GeoExplorerXT* predviđen za akviziciju i koordinata i korisničkih struktura podataka. Izmerene pozicije je neophodno korigovati u cilju povećanja tačnosti merenja. Podaci o korekciji pozicije se preuzimaju iz mreže permanentnih stanica koje predstavljaju tačke sa fiksnom pozicijom [9]. Preuzimanje korekcije je moguće da se izvede u realnom vremenu ili van realnog vremena. U realnom vremenu RTK (*Real Time Kinematic*) korekcija pozicije može da se preuzme GPRS (*General Packet Radio Service*) vezom, radio vezom ili pomoću GSM modema. Van realnog vremena PPK (*Post Processing Kinematic*) korekciju je moguće preuzeti putem interneta [10]. Za potrebe korekcije pozicije u cilju tačnih merenja na teritoriji kompletnog regiona Vojvodine je razvijena mreža permanentnih stanica koja obezbeđuje merenja koordinata sa tačnošću 1cm [10]. Mreža je potpuno operativna godinu dana. U toku je završno proširenje mreže na kompletno područje Republike Srbije.

7. ZAKLJUČAK

U radu su prezentovani fizičko teorijski principi rada Georadara i GPS tehnologije. Obrazložene su mogućnosti i ograničenja metode za potrebe akvizicije, obrade i prikaza podataka o podzemnoj infrastrukturi. Parametri koje je moguće odrediti su dubina voda, pravac trase, lom trase u horizontalnoj i vertikalnoj ravni, nagib voda, dužina voda, procenat ispunjenosti cevi, mesto redukcije prečnika cevi, detekcija mesta curenja cevi. Uticaj specifične provodnosti

medijuma i razvoj algoritama za estimaciju prečnika cevovoda idalje je predmet naučnih razmatranja.

Obrazložene su tehnike 2D i 3D skeniranja za analizu i prostorni prikaz složenih infrastrukturnih celina. Principi i tehnike skeniranja obezbeđuju detekciju cevni i kablovskih vodova svih tipova materijala, detekciju nivoa podzemnih voda, analizu stanja puteva, nivoa kontaminacije tla itd. Prikazani su osnovni principi i tehnike za efikasno mapiranje i prikaz podataka korišćenjem sprege mreže permanentnih stanica i mernih uređaja koji obezbeđuju preciznost i struktuiranost prikupljenih podataka. Razvoj primene metode je usmeren ka usavršavanju procedura za detekciju postojećih parametara i analizu mogućnosti za nove oblasti primene.

8. 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 Republike Srbije, NPV-19B

9. LITERATURA

- [1] Republika Srbija, Republički Geodetski Zavod, *Pravilnik o katastru vodova*, Beograd, 1999.
- [2] Jan van der Kruk, *3D imaging of multi-komponent GPR data*, PhD thesis, TU Delft, The Netherlands, 2001.
- [3] D. J. Daniels, *Surface penetrating radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, GBR, 1996.
- [4] Anja Pälli, *Polythermal Glacier Studies In Svalbard Determined By Ground-Penetrating Radar*, Academic Disseration, University of Oulu, Finland, 2003.
- [5] Nikolay Chubinsky, *Real method for description of the GPR performances*, 10-th International Conference on GPR, 21-24 June, Delft, The Netherlands, 2004.
- [6] W. Al-Nuaimy, S. Shihab and A. Eriksen, *Data fusion for accurate characterisation of buried cylindrical objects using GPR*, 10-th International Conference on GPR, 21-24 June, Delft, The Netherlands, 2004.
- [7] GSSI, *Radan 6 User Manual*, North Salem, USA, 2004.
- [8] Osama Hunaidi, *GPR for detection of leaks in buried plastic water distribution pipes*, 7-th International Conference on GPR, 27-30 May, Lawrence, Cansas, USA, 1998.
- [9] B. Hofmann at all, "*Global Positioning System – Theory and Practice*", fifth edition, NewYork, USA, 2001.
- [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. Also, the basic parameters, methods and their influence on the acquisition speed and data quality are defined.

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

D. Petrovački, A. Ristić