

UDK 621.317.729.3:528.021.6/.7:629.783
Pregledni znanstveni članak

GPS-antena Zephyr Geodetic

Nikola SOLARIĆ, Miljenko SOLARIĆ, Mladen ZRINJSKI – Zagreb¹

SAŽETAK. U radu su opisana fizikalna svojstva i poboljšanja GPS-antene Zephyr Geodetic. Ta antena omogućava vrlo precizna mjerenja, s vrlo malim smetnjama, jer umanjuje utjecaj multipath efekta. Osim toga, ima više pobudnih mjesta tako da su u njoj manja zaostajanja signala. Iz usporedbe te antene s poznatom Choke ring antenom, vidi se, da se sa Zephyr Geodetic antenom postižu rezultati usporedivi s Choke ring antenom, a djelomično i bolji na malim elevacijskim kutovima satelita (Krantz i dr. 2001b). Stoga ne čudi da su mjerenjima koja su izvedena sa Zephyr Geodetic antenom na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu postignuti izvrsni rezultati (Solarić i dr. 2008).

Ključne riječi: GPS-antena Zephyr Geodetic, Choke ring antena, multipath, kružno polarizirani elektromagnetski val, fazno središte antene.

1. Uvod

Antene su vrlo važni, a može se reći i najvažniji dijelovi GPS-mjernih sustava. Svrha im je da primaju radiosignale odaslane sa svih GPS-satelita koji se nalaze iznad horizonta antene, pojačavaju željene signale, odbace nepoželjne signale, a vrlo je važno da su ti signali pouzdani.

Radiosignale odaslane s GPS-satelita teško je primati s pomoću GPS-antene (Thompson 2008) jer sateliti:

- emitiraju signale male snage (maksimalnom samo 50 W, što je snaga obične sobne žarulje),
- jako su udaljeni od površine Zemlje, približno 20 200 km,
- kreću se velikom relativnom brzinom od približno 3,9 km/s i
- svi GPS-sateliti odašilju radiosignale na istim frekvencijama.

¹ Prof. emer. dr. sc. Nikola Solarić, član emeritus Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: nikola.solaric@geof.hr,

Prof. dr. sc. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: miljenko.solaric@geof.hr,

Mladen Zrinjski, dipl. ing. geod., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: mladen.zrinjski@geof.hr.

GPS-antene za geodetska mjerenja sastoje se od vodiča u obliku kvadrata, dimenzija približno pola valne duljine GPS-signalu, frekvencije L1 i L2 (Padros i dr. 1997) (slika 1 i slika 2), (a u novije vrijeme i L5), te donje površine na koju dolazi vodič.

Kako bi GPS-antene bile manje osjetljivima na smetnje, pri njihovom konstruiranju posvećena je velika pozornost problemu multipath efekta² (Bilajbegović i dr. 1991, Bačić i Bašić 1999), a posebno smetnjama koje dolaze ispod horizonta antene.

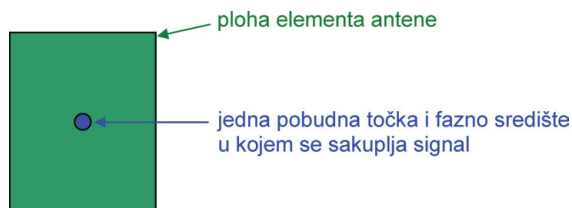
Novi pristup konstruiranju GPS-antena, s novim inovacijskim patentima, bazira se na različitom konstruiranju glavnog elementa (dijela) antene i donje površine antene, na koju je postavljen glavni element. Rezultati takvoga novog pristupa konstruiranju i inovacijskim patentima doveli su do izvedbe Trimble Zephyr Geodetic antene, koja se po karakteristikama (performansama) može usporediti s poznatom Choke ring antenom.

GPS-antena Zephyr Geodetic proizvedena je 2001. godine, a nova generacija te antene, GNSS-antena Zephyr Geodetic 2, proizvedena je 2006. godine.

U radu je detaljno opisan princip rada Zephyr Geodetic antene te je dan prikaz nekih poboljšanja i novih karakteristika novijega modela – Zephyr Geodetic 2 antene.

2. *N*-pobudnih točaka

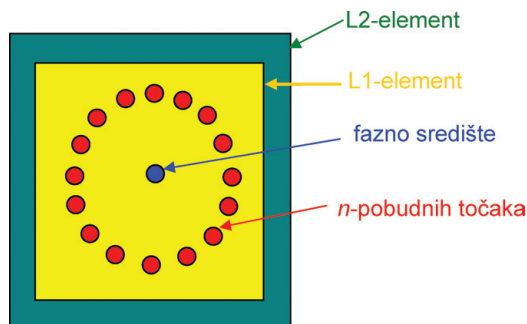
Za eliminaciju varijacija zaostajanja širenja GPS-signalu u Zephyr Geodetic anteni primijenjena je metoda s više pobudnih³ točaka. O zaostajanjima širenja signala u GPS-antena pise u članku Solarić i dr. 2008. U tu je svrhu u tu antenu prema patentu Lennen i dr. 1996, umjesto uobičajene jedne pobudne točke (slika 1) postavljeno *n*-pobudnih simetričnih točaka za frekvencije L1 i L2 (slika 2). Broj pobudnih točaka može biti 2^k , gdje je *k* cijeli broj. Na taj se način postiže da su manje varijacije zaostajanja širenja signala u anteni, ovisno o elevaciji i azimutu signala koji dolazi sa satelita, tj. smanjuje se elipsoid pogrešaka električnoga faznog središta antene (slika 21).



Slika 1. Obična GPS-antena s jednom pobudnom točkom (tlocrt), u kojoj su veća zaostajanja signala, a zaostajanja su funkcija elevacije i azimuta signala satelita.

² Multipath (engl.) – višestruka refleksija signala (Bilajbegović i dr. 1991); efekt pri kojem signali pojedinog satelita dolaze do antene kroz različite putanje (Bačić i Bašić 1999).

³ Pobuda, napajanje, uvlačenje – feed (engl.) (Bartolić 2009).



Slika 2. GPS-antena s n -pobudnih točaka na elementu za frekvencije L1 i L2 (tlocrt).

Antena i priključeno pojačalo pretvaraju energiju desno kružno polariziranog elektromagnetskog vala odašlanoga s GPS-satelita (frekvencije L1 i L2, a u novije vrijeme i L5 te GLONASS, Galileo i Compass signala) u električnu struju.

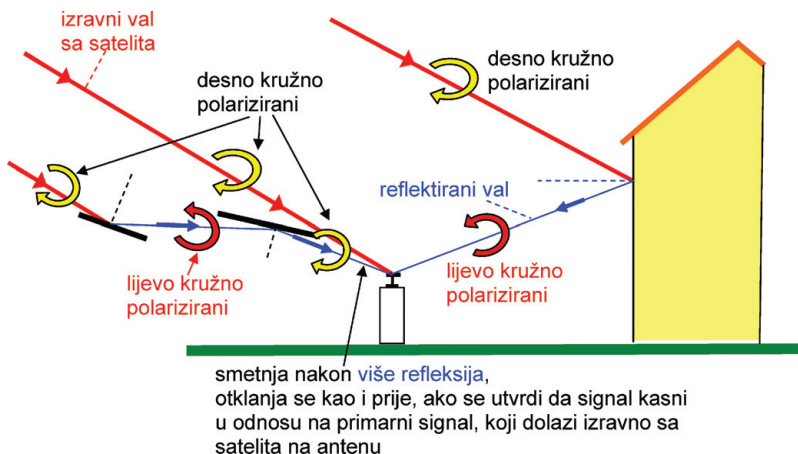
Simetrija pobudnih točaka u anteni omogućava i bolje detektiranje desne kružne polarizacije te filtriranje lijeve kružne polarizacije, ako se pojavi elektromagnetski val s lijevom kružnom polarizacijom, kao posljedicom refleksije (Thompson 2008).

3. Polarizacija elektromagnetskog vala

3.1. Općenito o polarizaciji

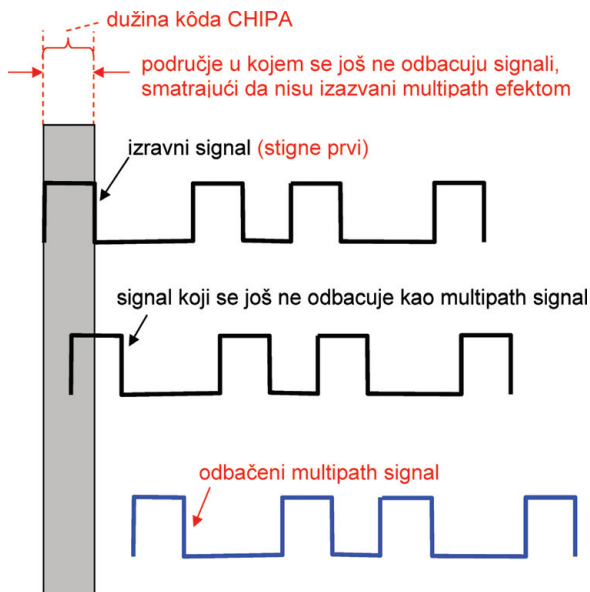
Kako na GPS-antene ne bi djelovali različiti elektromagnetski valovi (kojih uvijek ima u prirodi) i kako oni ne bi djelovali kao smetnje, GPS-sateliti odašilju kružno (cirkularno) polarizirane elektromagnetske valove, a ne valove koji nisu polarizirani. GPS-antene izrađene su tako da ne primaju elektromagnetske valove koji nisu kružno polarizirani. Na taj je način od početka razvoja GPS-a znatno smanjen utjecaj različitih smetnji. Zbog toga je u svemirskim komunikacijama prihvaćena primjena tehnologije odašiljanja kružno polariziranih valova.

Kako bi se smanjio utjecaj smetnji izazvanih multipath efektom koristi se svojstvo da kružno polarizirani elektromagnetski val, nakon refleksije na nekoj plohi, mijenja smjer polarizacije (Hofmann-Wellenhof i dr. 2008). Na taj način može se razlikovati koji je elektromagnetski val došao izravno sa satelita na GPS-antenu, a koji je štetan i došao je nakon refleksije s okolnog terena ili objekta. Sa satelita na antenu izravno dolazi desno kružno polarizirani val. To omogućava da se štetni lijevo kružno polarizirani val (nastao refleksijom) odstrani filtriranjem na anteni i na taj način smanji utjecaj multipath efekta (slika 3). Na toj anteni, kao i na prijašnjim modelima, dio multipath smetnji otklanja se izbacivanjem onih signala koji dolaze na antenu s većim zakašnjenjem od signala izravno primanog sa satelita (slika 4).



Slika 3. Grafički prikaz izravno primanog elektromagnetskog vala odaslanoga s GPS-satelita i reflektiranih elektromagnetskih valova koji izazivaju multipath efekt.

Na slici 3 prikazani su izravno primljen elektromagnetski val, odaslan s GPS-satelita, i reflektirani elektromagnetski valovi koji izazivaju multipath efekt. Samo jednom reflektirani elektromagnetski val iz desno polariziranog prelazi u lijevo polarizirani val. Vrlo rijetko događa se da nakon više refleksija na antenu dolazi desno kružno polarizirani val i izaziva smetnju. Takvi signali, nastali multipath efektom, otklanjaju se filtriranjem ako pokazuju veće zaostajanje po vremenu ili fazi, ili je signal manje amplitude (Thompson 2008).



Slika 4. Pregled primljenih i odbačenih signala satelita.

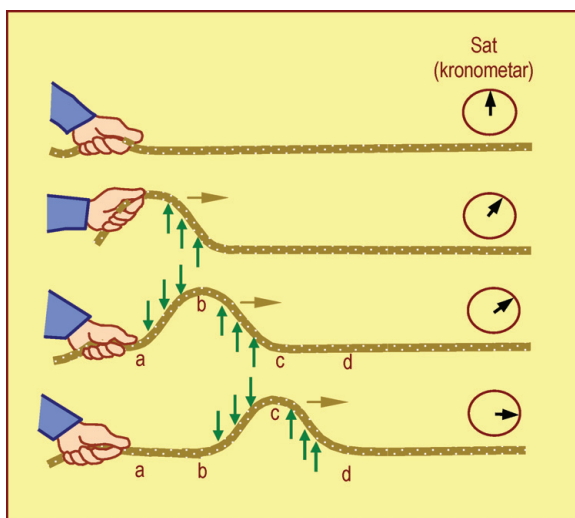
Na slici 4 prikazano je otklanjanje kodnog signala, koji dolazi na antenu s većim zakašnjenjem od signala koji dolazi na antenu izravno sa satelita. Na taj način otklanja se dio multipath efekta na kodnom signalu (Wells 1987). Slično je i kod faznih mjerenja: ako je duljina kašnjenja (zaostajanja) veća od $1/4$ valne duljine (tj. 5–6 cm), mjerenje se odbacuje smatrajući da je izazvano multipath efektom (Thompson 2008).

3.2. Fizikalno objašnjenje refleksije valova

Kako bismo objasnili pretvaranje desne kružne polarizacije u lijevu kružnu polarizaciju, dat ćemo najprije fizikalno objašnjenje refleksije valova na primjeru savitljivog užeta.

a) Gibanje pulsno vala u užetu

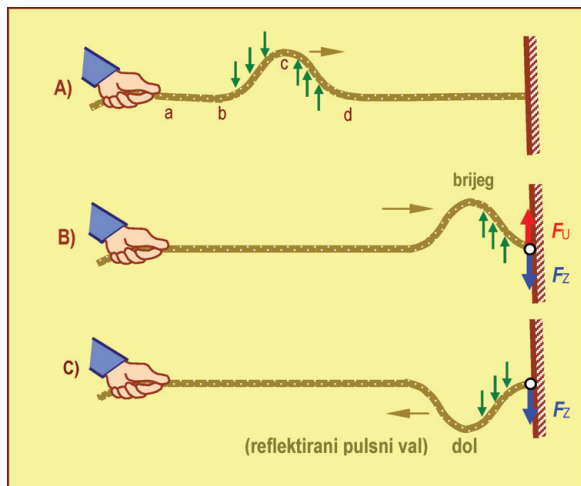
U nategnutom savitljivom užetu pulsni val može se izazvati pokretom ruke prema gore i dolje (slika 5) (Paar 2006). Pritom zelene vertikalne strelice na slici predodaju brzine pojedinih čestica užeta. Tako stvoreni pulsni val krenut će prema drugom kraju užeta i putovat će nekom brzinom. Valja naglasiti da samo valni oblik užeta putuje nekom brzinom, a uže se ne kreće prema svom drugom kraju (Mayer 1971).



Slika 5. Grafički prikaz kako se pokretom ruke prema gore i dolje izaziva pulsni val u užetu i kako se kreće u savitljivom užetu.

b) Refleksija vala na granici sredstava

Može se promotriti gibanje pulsno vala u savitljivom užetu koje je desnim krajem pričvršćeno za zid. Ako se duž užeta slijeva giba pulsni val u obliku jednog brijega, tada on nalijeće na kraj užeta pričvršćen za nepomični zid (slika 6A).



Slika 6. Gibanje pulsnog vala u užetu i njegova refleksija na kraju užeta učvršćenom za nepomični zid.

Kada pulsni val stigne do kraja užeta, djeluje na zid silom F_U prema gore (slika 6B), kao da uže želi podići zid. Međutim, prema III. Newtonovu zakonu akcije i reakcije, zid djeluje na uže protusilom F_Z jednakog iznosa, ali suprotnog smjera, tj. djeluje prema dolje (slika 6C).

Pod utjecajem sile reakcije F_Z , kojom zid djeluje na uže u smjeru prema dolje, čestice užeta blizu njegova učvršćenoga kraja počnu se gibati prema dolje, pa se val reflektira u obliku dola.

Dakle, upadni pulsni val u obliku brijega, koji nailazi na granicu užeta učvršćenu za zid, odbit će se kao reflektirani pulsni val u obliku dola. Vrijedit će i obrnuto, tj. upadni pulsni val u obliku dola reflektira se u obliku brijega. Drugim riječima, val promijeni fazu za 180° i giba se u smjeru odakle je došao.

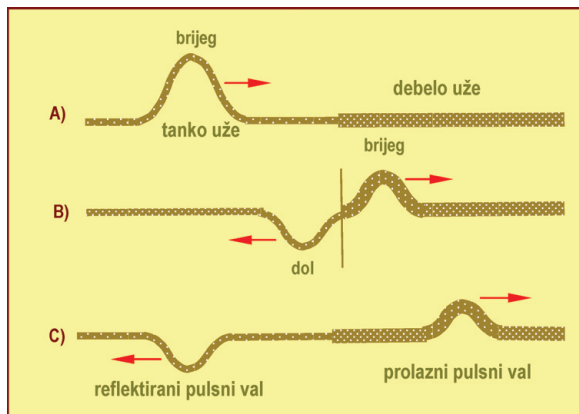
Takva se refleksija vala na granici sredstava događa kod svih vrsta valova (Paar 2006).

c) Refleksija vala na granici između različitih sredstava

Može se promotriti rastegnuto uže koje se sastoji od dvaju spojenih užeta različitih debljina, pri čem je lijevi dio užeta tanji, a desni je dio deblji (slika 7A).

Tanji dio užeta je sredstvo u kojem je brzina vala veća, a deblji dio užeta je drugo sredstvo, u kojem je brzina vala manja.

Na granici tankog i debelog užeta, deblje uže (veće mase po dužnome metru) otežavat će titranje čestica na tanjem užetu (manje mase po dužnome metru), slično kao i nepomični zid. Međutim, titranje na granici tankog i debelog užeta ipak je moguće, iako otežano, te upadni val djelomice prolazi i nastavlja se gibati uzduž debelog užeta (slika 7C), a dio vala počinje se vraćati, tj. reflektira se (slika 7B).



Slika 7. Prolazni i reflektirani pulsni val na granici između tankog i debelog užeta, tj. na granici između različitih sredstava.

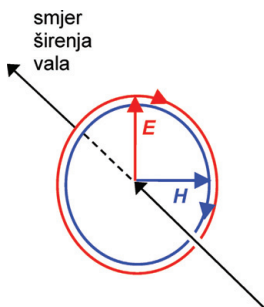
Može se promotriti slučaj kada je tanko užeta vrlo tanko i debelo užeta vrlo debelo, odnosno kada je masa tankog užeta ($m_{\text{tan.už.}}$) po dužnome metru znatno manja od mase debelog užeta ($m_{\text{deb.už.}}$) po dužnome metru, tj. kada je $m_{\text{tan.už.}} \ll m_{\text{deb.už.}}$. U tom slučaju događa se samo refleksija vala, a debelo užeta je tromo i neće se pomaknuti isto kao i nepomični zid.

Može se zaključiti:

Razdvajanje upadnog vala na prolazni i reflektirani val na granici dvaju medija zbiva se kod svih vrsta valova i u svim sredstvima (Paar 2006).

3.3. Promjena kružne polarizacije nakon refleksije

S GPS-satelita na antenu dolazi izravno desno kružno polarizirani elektromagnetski val (slika 8), u kojem tijekom širenja vala vektor električnog polja kruži udesno, a vektor magnetskog polja okomit je na vektor električnog polja. Nakon samo jedne refleksije elektromagnetskog vala od terena ili objekta, val mijenja polarizaciju u lijevo kružno polarizirani val.



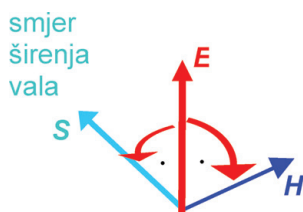
Slika 8. Širenje desno kružno polariziranog elektromagnetskog vala.

Na slici 8 prikazano je širenje desno kružno polariziranog elektromagnetskog vala u kojem vektor električnog polja tijekom širenja vala kruži u prostoru desno po spirali, a vektor magnetskog polja čitavo je vrijeme okomit na vektor električnog polja.

Objašnjenje zašto desno kružno polarizirani elektromagnetski val, nakon refleksije, mijenja polarizaciju u lijevo kružno polarizirani val dat ćemo na linearno polariziranom valu (u kojem električni vektor titra u jednom smjeru, a magnetski vektor okomito na električni vektor).

Linearno polarizirani elektromagnetski val može se prikazati vektorskim produktom vektora električnog polja \mathbf{E} i vektora magnetskog polja \mathbf{H} , te vektorom širenja elektromagnetskog vala \mathbf{S} (slika 9) (Sears 1963b, str. 330):

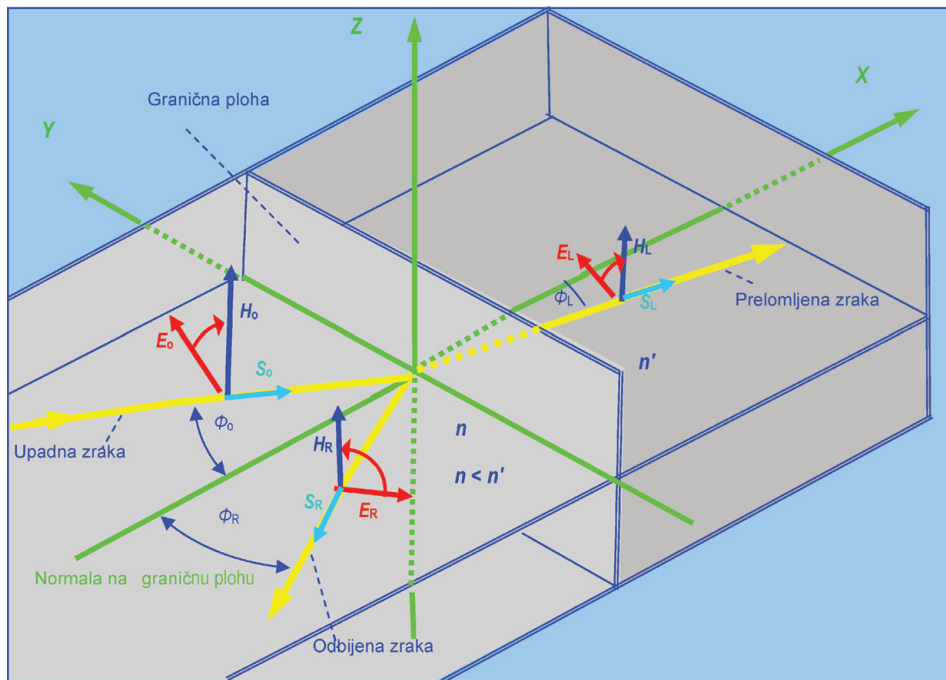
$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}. \quad (1)$$



Slika 9. Linearno polarizirani elektromagnetski val i vektorski produkt vektora električnog polja \mathbf{E} i vektora magnetskog polja \mathbf{H} , te vektor širenja elektromagnetskog vala \mathbf{S} .

Kako bi se pri refleksiji promijenio smjer širenja vala mora se promijeniti ili smjer vektora električnog polja \mathbf{E} ili smjer vektora magnetskog polja \mathbf{H} . Koji će od tih slučajeva nastupiti ovisi o tome da li elektromagnetski val ide iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo ili obrnuto (vidi izvod u Sears 1963b, str. 329–334; Sears 1963a, str. 131–135). Iz toga izvoda, u kojem su povezani vektor električnog polja, vektor magnetskog polja, dielektrična konstanta i magnetska permeabilnost, vidi se da se pri prijelazu iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo **mijenja smjer vektora električnog polja \mathbf{E}** za 180° u odnosu na upadni val (slika 10), slično kao što se ponaša mehanički val kod refleksije vala na granici između različitih sredstava (slika 7). Pri prijelazu iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo **mijenja se smjer vektora magnetskog polja \mathbf{H}** za 180° u odnosu na upadni val. Kako bismo analizu pojednostavili pretpostavili smo, kao što je to i inače na terenu, da imamo nevodljive medije, tj. dielektrična sredstva, a ne vodiče. Osim toga nisu analizirani različiti kutovi upada elektromagnetskih valova.

Ako elektromagnetski val prelazi iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo (slika 10), pri refleksiji vektor \mathbf{E}_R promijeni smjer za 180° u odnosu na upadni val, a time se promijeni i smjer vektorskog produkta $\mathbf{S}_R = \mathbf{E}_R \times \mathbf{H}_R$, tj. dobjije se reflektirani val (vidi izvod u Sears 1963b, str. 329–334; Sears 1963a, str. 131–135).



n – indeks loma optički rjeđeg sredstva

n' – indeks loma optički gušćeg sredstva

S_0, E_0, H_0 – vektori upadnog elektromagnetskog vala

S_R, E_R, H_R – vektori reflektiranog elektromagnetskog vala

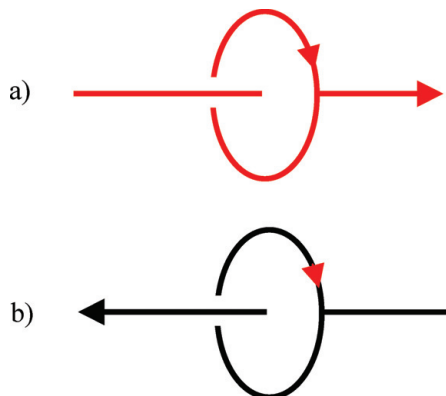
S_L, E_L, H_L – vektori lomljenog elektromagnetskog vala

Slika 10. Odbijanje (refleksija) elektromagnetskog vala na graničnoj površini između dvaju optičkih sredstava, pri prijelazu iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo ($n < n'$).

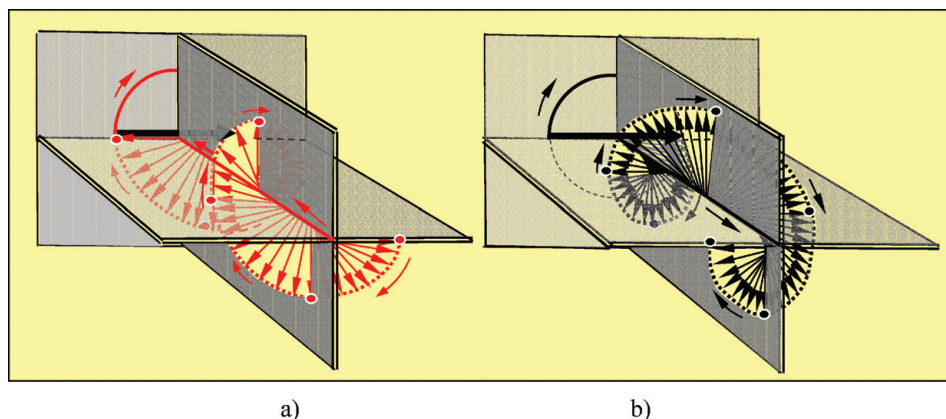
Ako elektromagnetski val prelazi iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, pri refleksiji promijeni se smjer vektora H za 180° , a time i smjer vektorskog produkta $S_R = E_R \times H_R$. Ovaj slučaj nije važan za primjenu kod GPS-antena, jer elektromagnetski val koji dolazi sa satelita gotovo uvijek prolazi iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo.

Nakon refleksije desno kružno polariziranog elektromagnetskog vala od terena ili objekta, vektor električnog polja promijeni smjer za 180° (slika 10) i **nastavi se vrtjeti u istom smjeru** (slika 11a i 11b), ali kako se promjeni smjer širenja vala, on postaje lijevo kružno polarizirani val, jer se uvijek gleda u smjeru širenja vala (slika 11b i 12b).

Vektor električnog polja desno kružno polariziranog elektromagnetskog vala tijekom širenja vala u prostoru kruži po prostornoj cilindričnoj spirali udesno, tj. u smjeru desnog vijka (gledano u smjeru širenja vala), a vektor magnetskog polja kreće se okomito na vektor električnog polja (slika 12a).



Slika 11. Vektor električnog polja vrti se u istom smjeru u upadnom elektromagnetskom valu i zatim nakon refleksije u reflektiranom valu (Bilajbegović 2006, Hecht 2001).



Slika 12. a) Desno kružno polarizirani elektromagnetski val; b) reflektirani lijevo kružno polarizirani elektromagnetski val.

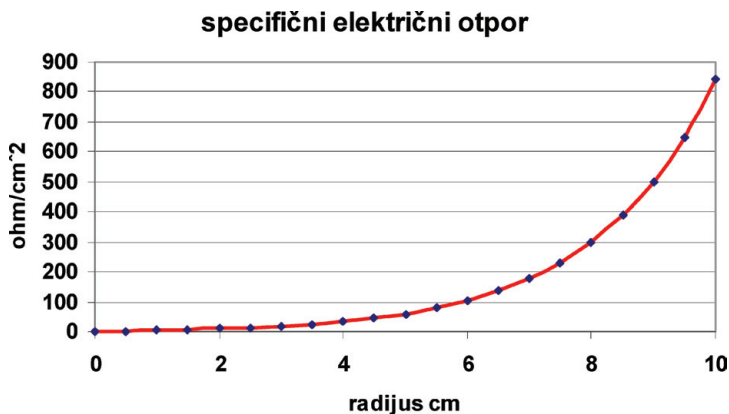
Vektor električnog polja lijevo kružno polariziranog elektromagnetskog vala tijekom širenja vala u prostoru kruži po prostornoj cilindričnoj spirali ulijevo, tj. u smjeru lijevog vijka (gledano u smjeru širenja vala), a vektor magnetskog polja kreće se okomito na vektor električnog polja (slika 12b).

4. Trimble “potajna” donja ploha

Druga je inovacija u Zephyr Geodetic anteni prema patentu Westfall 1997. Prema toj se inovaciji električno polje elektromagnetskog vala (koji dolazi s donje strane antene – ispod horizonta antene) apsorbira u “potajnoj”⁴ donjoj plohi, prije nego

⁴ Potajno – stealth (engl.).

što signal dođe u antenu. To se postiže s pomoću materijala koji ima svojstvo da površinski električni otpor **eksponencijalno pada** duž radijalnog elementa od ruba prema središtu antene (slika 13). Pod djelovanjem elektromagnetskog vala dolazi do promjenjivog električnog polja u donjoj plohi antene, te se inducira napon. Pod djelovanjem napona poteći će električna struja, eksponencijalno sve veća prema središtu antene, jer se otpor smanjuje prema središtu. Budući da se pod djelovanjem struje električna energija pretvara u toplinu prema izrazu I^2R^* , a prema središtu antene teče sve veća struja, proporcionalno s kvadratom jakosti struje sve će se više električna energija pretvarati u toplinu. Taj materijal apsorbira elektromagnetske valove frekvencija L1, L2 i L5, koji dolaze s donje strane antene, i rasipa ih kao toplinu (slika 14b), što ne ometa rad antene. Zbog toga elektromagnetski valovi koji dolaze s donje strane antene, tj. reflektirani od terena i okolnih niskih objekata, ne dolaze u antenu te ne izazivaju smetnje i slabiji mjerni rezultat. Na slici 14 vidi se kako elektromagnetske valove koji dolaze s donje strane antene i signale s bočne strane s multipath efektom apsorbiraju antene Choke ring (slika 14a) i Zephyr Geodetic (slika 14b).

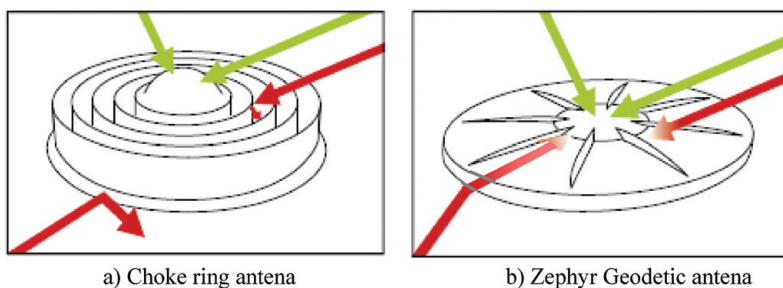


Slika 13. Promjena specifičnog električnog otpora u “potajnoj” donjoj plohi antene prema eksponencijalnoj funkciji s obzirom na veličinu radijusa.

Specijalni materijal u donjoj plohi antene ima prednost što je lagan i jeftin u odnosu na konvencionalne materijale. Razvijen je prilikom razvoja “nevidljivih” (potajnih) zrakoplova (Stealth aircraft). Taj materijal može upijati elektromagnetske valove različitih frekvencija, tako da je uspio i razvoj Zephyr Geodetic antene za prijam više različitih frekvencija.

U Zephyr Geodetic anteni osim spomenutih dvaju inovacijskih patenata primijenjen je i niz prethodnih patenata koji su pridonijeli kvaliteti prijema signala odaslanih sa satelita.

* Električna snaga jednaka je $P=I \cdot V$, gdje je I jakost struje, a V električni napon. Prema Ohmovu zakonu $P=I^2 \cdot R$, električna energija pretvara se u toplinu s kvadratom jakosti struje (R – električni otpor). Da bi se što više energije prenijelo do mjesta na kojem se upotrebljava, a u dalekovodima što manje izgubilo, u dalekovodima je visoki napon, a relativno mala jakost struje (da ne dođe do rasipanja energije). Na mjestu potrošača je mali napon, a relativno velika jakost struje, kako bi se dobilo što više energije.



Slika 14. Princip otklanjanja smetnji koje dolaze s donje strane antena Choke ring i Zephyr Geodetic.

Na slici 14 prikazan je princip otklanjanja smetnji koje dolaze s donje strane antena Choke ring i Zephyr Geodetic. Crvenom bojom prikazane su smetnje koje Choke ring antena većim dijelom reflektira i manjim dijelom upija te ih pretvara u toplinu između prstenova. Zephyr Geodetic antena postupno upija smetnje i pretvara ih u toplinu (zato su na toj anteni smetnje prikazane crvenom bojom koja postupno blijedi). Zelenom bojom prikazani su dobri (poželjni) signali.

5. Primanje signala na malim elevacijskim kutovima

Kako bi se usporedile antene Zephyr Geodetic i Choke ring, postavljene su jedna blizu druge i priključene na isti tip GPS-prijamnika (Krantz i dr. 2001a). Obje antene imale su jednako stanje na horizontu. Podaci mjerenja prikupljeni su 24 sata, sa zapisom svake sekunde, te je prikupljeno ukupno 86 400 epoha.

Na malim elevacijskim kutovima Choke ring antena ima manje pojačanje signala. To smanjeno pojačanje signala čini antenu manje osjetljivom na signale primljene s malih elevacijskih kutova i povećava broj cycle slipova, što je nepovoljno.

Podaci mjerenja obrađeni su softverom UNAVCO TEQC (Estey i Meertens 1999), a dobiveni rezultati pokazali su da je Zephyr Geodetic antena detektirala manji broj cycle slipova nego Choke ring antena, što se vidi iz tablice 1.

Tablica 1. Odnos broja dobrih mjerenja prema ukupnom broju epoha mjerenja (Krantz i dr. 2001a).

Elevacija 0° do 10°	Choke ring antena	Zephyr Geodetic antena
Odnos broja dobrih mjerenja prema ukupnom broju epoha mjerenja	57,17%	60,47%

Poznato je da stariji modeli Choke ring antena ne primaju dobro signale s malih elevacijskih kutova.

Međutim, tvrtka Leica plasirala je na tržište stožastu Choke ring antenu AR25 (slika 15), koja nema nedostatak lošeg primanja signala s malih elevacijskih kutova.



Slika 15. GNSS-antena Leica AR25 Choke ring (URL 4).

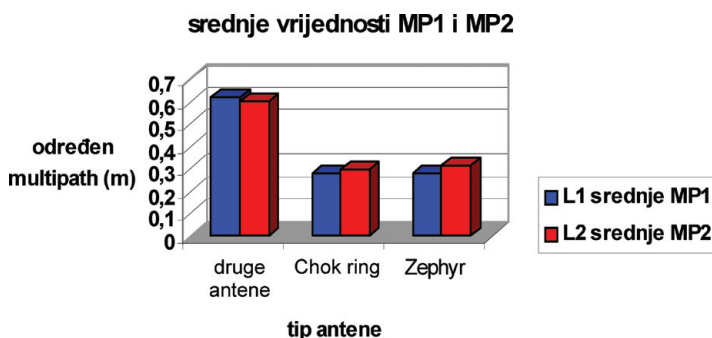
Na slici 15 prikazana je GNSS-antena Leica AR25 Choke ring, koja ima mogućnost primanja svih postojećih signala (ali i trenutačno planiranih za budućnost) sa sustava GPS, GLONASS, Galileo i Compass (URL 4).

6. Procjena utjecaja multipath efekta

Kako bi se procijenila otpornost Zephyr Geodetic antene na multipath efekt, u odnosu na Choke ring antenu, postavljene su te dvije antene zajedno s Trimble 5700 GPS-prijamnicima na referentnu točku, a to je učinjeno i s trećim dvofrekventnim parom antena/prijamnik drugog proizvođača. Test je izveden u razdoblju od 24 sata, sa zapisom svake sekunde. Radi ocjene učestalosti multipath efekata, prema Estey i Meertens 1999, procijenjeni su multipath parametri:

- MP1 za frekvenciju L1 i
- MP2 za frekvenciju L2.

Izračunate srednje vrijednosti MP1 i MP2 za navedena tri GPS-para antena/prijamnik (Krantz i dr. 2001b) prikazane su grafički (slika 16). Iz grafikona se vidi da je Zephyr Geodetic antena približno jednako otporna na multipath efekt kao i Choke ring antena.



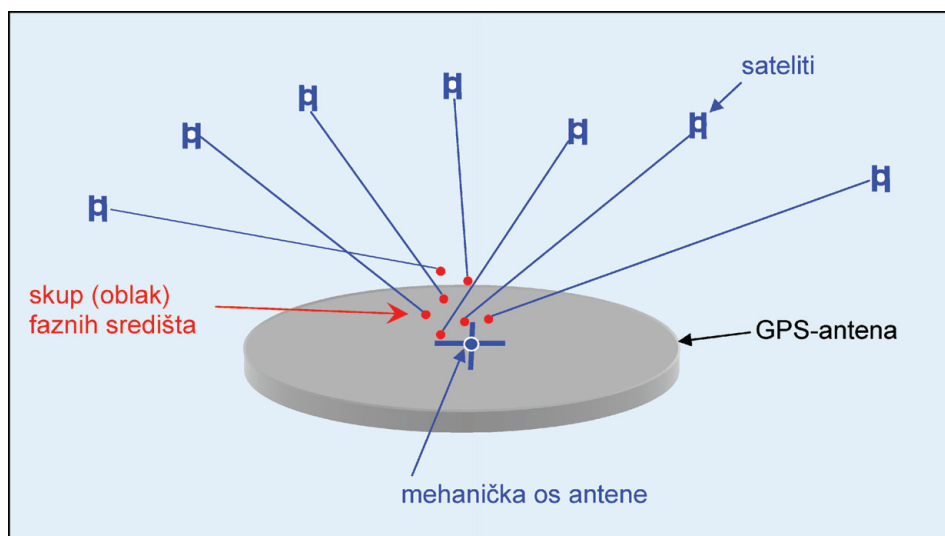
Slika 16. Grafički prikaz otpornosti antena na multipath efekt (Krantz i dr. 2001b).

U radu Bilajbegović i Vierus 2007 opisano je ispitivanje utjecaja multipath efekta na različite tipove antena. Pokazalo se da ispitivanja što ih obavljaju zaposlenici nekih tvrtki na antenama koje proizvode njihove tvrtke ne daju potpuno “realne” rezultate.

7. Varijacije faznog središta antene

Pri preciznim geodetskim određivanjima položaja točaka potrebno je precizno poznavati položaj fizikalnog mjernog središta (mehaničke osi antene) i elektroničkog središta antene, od kojeg se izvode fazna mjerenja (točka faznog središta antene) (Solarić i dr. 2008).

Položaj u koji pada fazno središte različit je za frekvencije L1, L2 i L5, a gdje točno pada njegov položaj ovisi o smjeru iz kojeg dolazi signal sa satelita, tj. o elevacijskom kutu i u manjoj mjeri o azimutu satelita. Antena istovremeno prima signale sa svih GPS-satelita iznad horizonta, na različitim elevacijama i azimutima, pa će u svakom trenutku umjesto jedne točke nastati skup (oblak) faznih središta (slika 17). Taj skup sastoji se od $3n$ faznih diskretnih središta, čiji se signali primaju na frekvencijama L1, L2 i L5 (n je broj satelita).



Slika 17. Skup (oblak) faznih središta antene za frekvencije L1, L2 i L5 (na slici je prikazan skup faznih središta za samo jednu frekvenciju i jednu epohu mjerenja).

7.1. Relativna kalibracija antene

U National Geodetic Survey (NGS), (URL 1), izvedena je relativna kalibracija Zephyr Geodetic antene prema Choke ring anteni, kako bi se dobila procjena relativne varijacije faznog središta antene (PCV – Phase Center Variation), (Mader

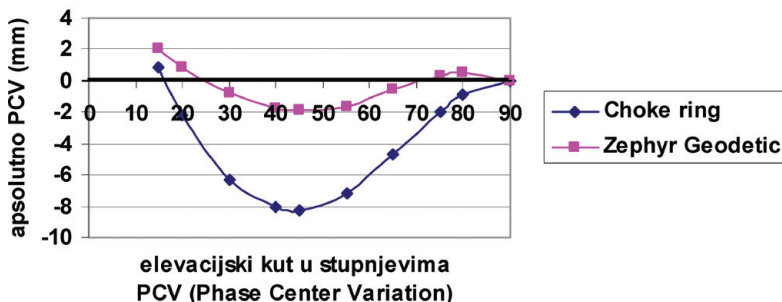
1999). Standardna odstupanja tih mjerenja (koja su pokazala ponovljivost iz 4 mjerenja) za frekvenciju L1 iznosila su 0,3 mm ili manje, a za frekvenciju L2 0,5 mm ili manje (Krantz i dr. 2001b).

To pokazuje veliku kvalitetu Zephyr Geodetic antene koja je nužna za precizna geodetska mjerenja.

7.2. Apsolutna kalibracija antene

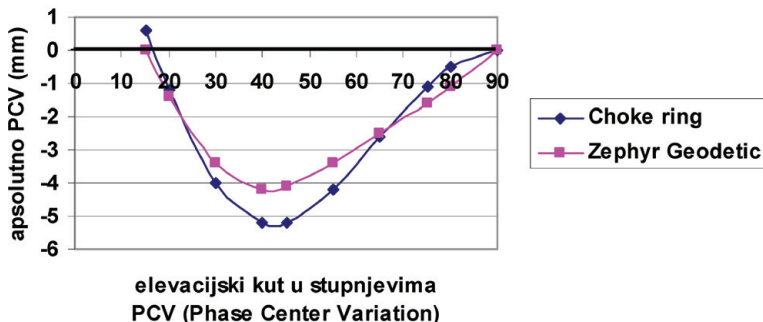
Apsolutna kalibracija antena Choke ring i Zephyr Geodetic ispitivana je u IfE-u (Institut für Erdmessung) u Hannoveru (URL 2). Na slikama 18 i 19 prikazani su rezultati tih apsolutnih kalibracija antena za frekvencije L1 i L2.

Usporedba apsolutnih kalibracija antene Choke ring i Zephyr Geodetic, na frekvenciji L1



Slika 18. Rezultati apsolutne kalibracije antena Choke ring i Zephyr Geodetic za frekvenciju L1 (Krantz i dr. 2001b).

Usporedba apsolutnih kalibracija antena Choke ring i Zephyr Geodetic, na frekvenciji L2



Slika 19. Rezultati apsolutne kalibracije antena Choke ring i Zephyr Geodetic za frekvenciju L2 (Krantz i dr. 2001b).

Iz slika 18 i 19 vidi se da su apsolutne varijacije faznog središta:

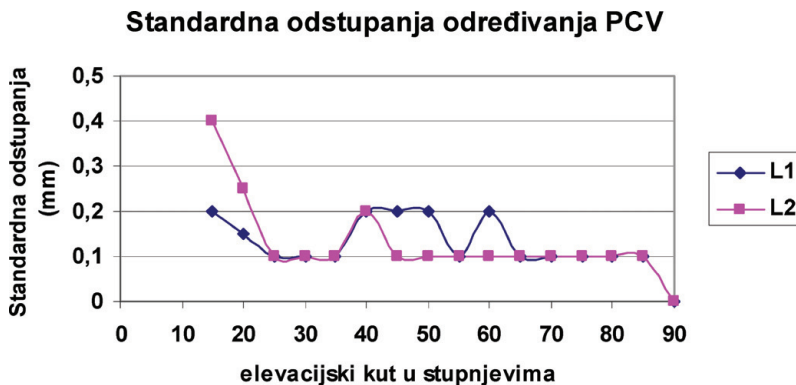
- za frekvenciju L1 znatno veće na Choke ring nego na Zephyr Geodetic anteni, zahvaljujući patentu Lennen i dr. 1996
- za frekvenciju L2 na obje antene približno jednake, razlikuju se samo za 1 do 2 mm.

Tako relativno mala apsolutna odstupanja faznog središta na Zephyr Geodetic anteni mogla su se i očekivati zbog n -pobudnih točaka u anteni.

8. Ponovljivost na slučajno izabranim antenama

Izvedena ispitivanja apsolutnih varijacija faznog središta pokazuju da Zephyr Geodetic antena ima znatno manje varijacije i bolju stabilnost nego Choke ring antena. Slučajnim odabirom izabrano je deset Zephyr Geodetic antena i ispitivana je relativna kalibracija u odnosu na Choke ring antenu.

Međutim, mnogo je zanimljivije da su odstupanja od sredine PCV-a, u ispitivanjima u razdoblju od 14 dana, pokazala izvrsnu ponovljivost. Standardna odstupanja za frekvenciju L1 bila su od 0,1 do 0,2 mm, a za L2 od 0,1 do 0,4 mm. Na slici 20 grafički su prikazana standardna odstupanja određivanja PCV-a, ovisno o elevacijskom kutu, za frekvencije L1 i L2, na Zephyr Geodetic anteni.



Slika 20. Grafički prikaz standardnih odstupanja određivanja PCV-a, ovisno o elevacijskom kutu, za frekvencije L1 i L2, na Zephyr Geodetic anteni (Krantz i dr. 2001b).

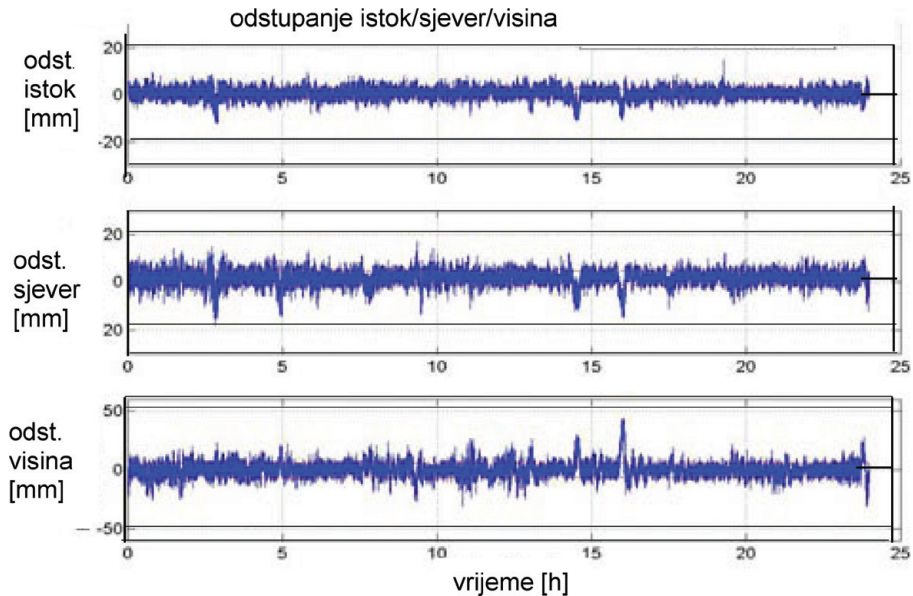
9. Usporedba rezultata 3D koordinata antena

Ispitivanja objavljena u članku Krantz i dr. 2001b pokazala su da je razina šuma na Zephyr Geodetic anteni približno za samo 15% veća u određivanju horizontalnog položaja, a po visini za 29%, nego na Choke ring anteni. Na drugim antenama to je bilo 76% i 120% (tablica 2). To pokazuje da se Zephyr Geodetic antena po preciznosti približava Choke ring anteni.

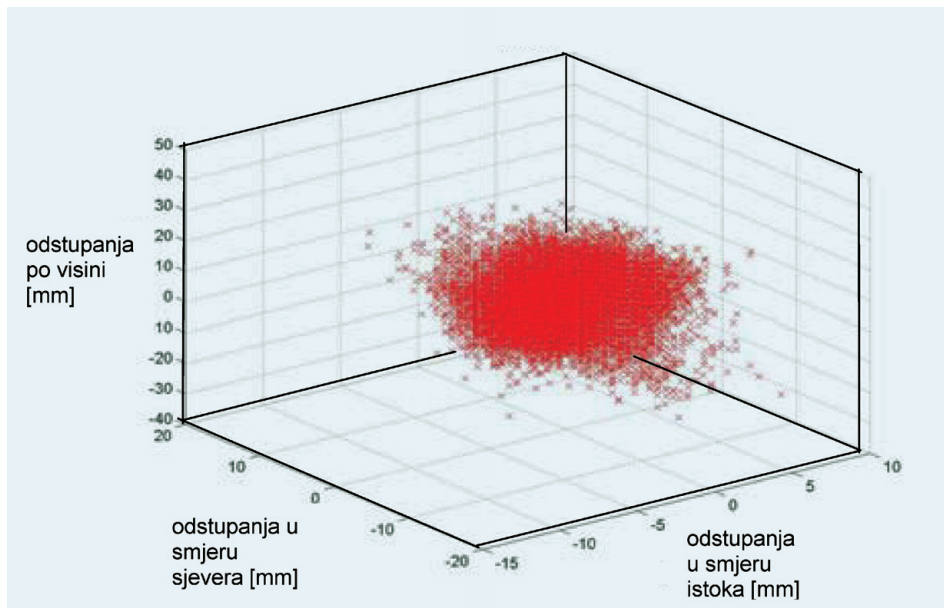
Tablica 2. *Usporedba šumova na Zephyr Geodetic i drugim antenama, u odnosu na Choke ring antenu (Krantz i dr. 2001b).*

Antene	Veći šum nego na Choke ring anteni		
	E	N	H
Zephyr Geodetic	14%	15%	29%
druge antene	76%	67%	120%

Ponovljivost u određivanju 3D koordinata antena ispitana je s pomoću pet slučajno izabranih antena, na baznoj liniji (s referentnom antenom), opažanjem 24 sata. Relativni model PCV-a određen u NGS-u primijenjen je pri obradi rezultata mjerenja. Ispitivanjem su dobivena odstupanja od srednjih vrijednosti u smjeru E, N, H (istok, sjever, visina) ovisno o vremenu (slika 21) te je dan prikaz odstupanja 3D elipsoidnih koordinata (slika 22).



Slika 21. *Odstupanja 3D koordinata antena od srednjih vrijednosti u smjeru E, N, H, ovisno o vremenu, za 5 antena u razdoblju od 24 sata, u kojem je prikupljeno približno 432 000 točaka (razina pouzdanosti: 1σ) (Krantz i dr. 2001b).*

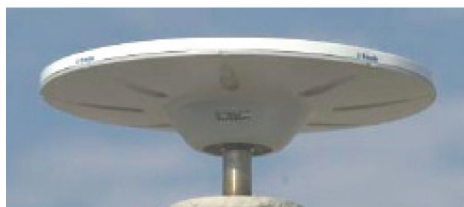


Slika 22. Prikaz elipsoida odstupanja 3D koordinata antena od srednjih vrijednosti za skup faznih središta, za 5 antena u razdoblju od 24 sata, u kojem je prikupljeno približno 432 000 točaka (Krantz i dr. 2001b).

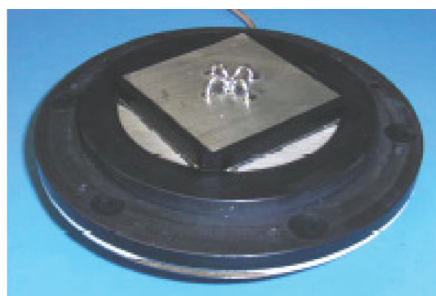
10. Dijelovi Zephyr Geodetic antene

Glavni su dijelovi Zephyr Geodetic antene:

- kućište (koje štiti od Sunca i vlage) (slika 23a),
- prijamni element (slika 23b),
- niskošumno pojačalo (low noise amplifier – LNA), pojačava korisne signale sa satelita pri čem unosi vrlo malo šuma, filtrira nepoželjne signale i pojačava signale približno s 50 dB (slika 24),
- Trimble “potajna” donja ploha antene.

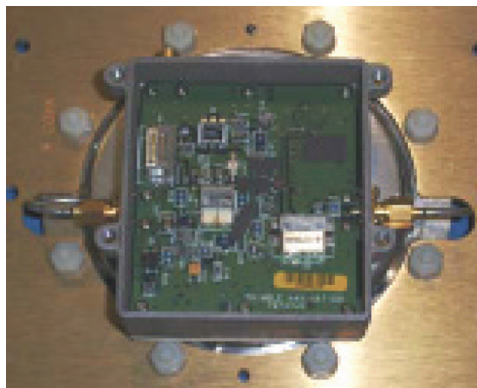


a)



b)

Slika 23. a) Kućište Zephyr Geodetic antene, b) prijamni element antene.



Slika 24. Niskošumno pojačalo.

11. Odabir mjesta za stajalište antene

Kako bi se dobili što točniji podaci mjerenja, treba vrlo pažljivo izabrati mjesto na terenu na koje će se postaviti GNSS-antena.

Trebaju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

- da je nezaklonjen pogled na nebeski svod, tj. da nema zapreka ili objekata oko stajališta u radijusu do **100 m**,⁵
- antena treba biti barem **1,5 m** iznad horizontalnog terena,
- da u radijusu do **300 m** nema:
 - radiodašiljača (mobitela, radijskih i TV-antena),
 - radara,
 - snažnih visokonaponskih vodova.

Smetnje uzrokuju valovi kojih su frekvencije jednake ($n \times \text{frekvencija}$) $\pm 10\%$, pri čemu je n cijeli broj, a frekvencija je jedna od frekvencija primljenog signala sa satelita (npr. L1, L2, L5).

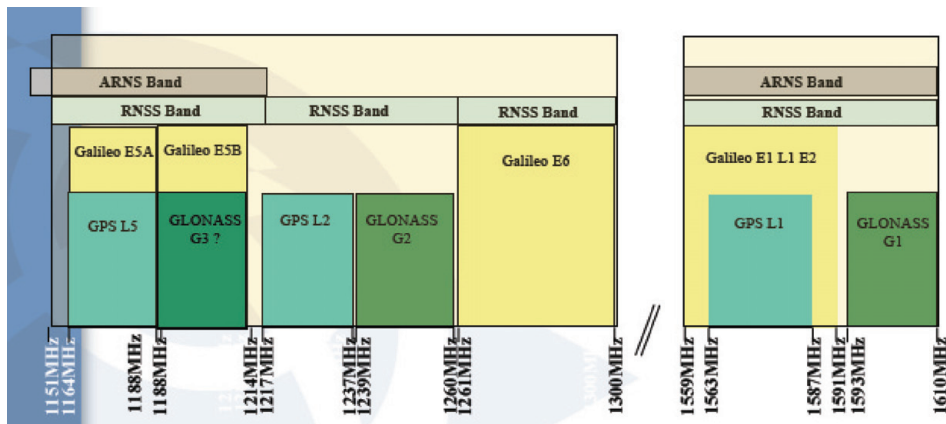
Prijamnici i antene novije proizvodnje manje su osjetljivi na smetnje nego stariji modeli.

12. Područja frekvencija koja primaju antene Zephyr Geodetic 2

Iz područja frekvencija koja danas prima antena Zephyr Geodetic 2 vidi se da pokriva gotovo sva područja frekvencija koja se koriste u geodeziji (slika 25):

- GPS – L1, L2, L5,
- GLONASS – G1, G2, G3,
- Galileo – E1, E2, E5, E6,

⁵ Kako GPS-satelita nema u blizini sjevernoga nebeskog pola, taj dio neba ne mora biti vidljiv, ali ipak zbog štetnih refleksija i do 100 m u tom smjeru nije povoljno da postoje zapreke ili objekti.

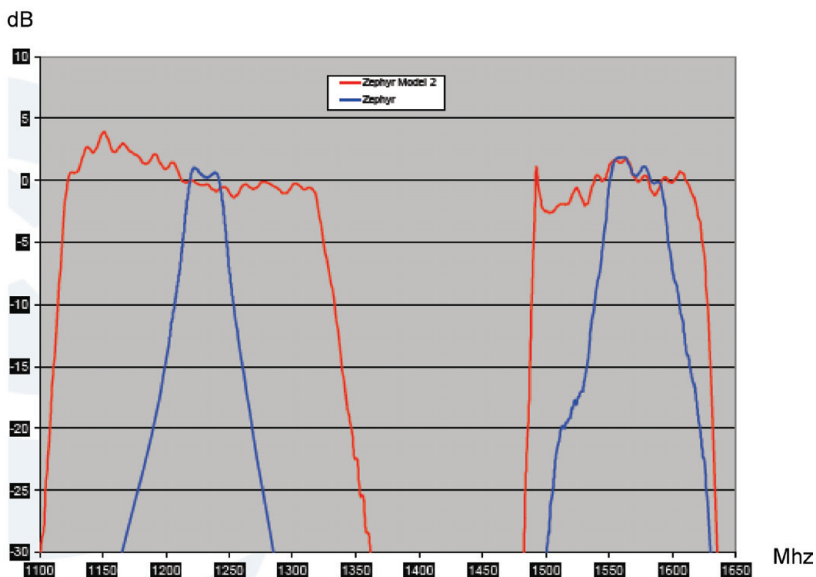


Slika 25. Područja frekvencija koja primaju antene Zephyr Geodetic 2 (Thompson 2008).

- Compass – B1, B1-2, B2, B3,
- i frekvencije SBAS – WAAS, EGNOS, QZSS, Gagan, MSAS i OmniStar satelita.

Stariji model antene (Zephyr Geodetic) imao je uskopojasno pojačalo, a u novi model antene (Zephyr Geodetic 2) ugrađeno je niskošumno pojačalo koje pojačava šira područja frekvencija (slika 26).

Pojačanje



Slika 26. Područja frekvencija koja je prije pojačavalo uskopojasno pojačalo u Zephyr Geodetic anteni prikazano je plavom bojom, a crvenom bojom novo niskošumno pojačalo u anteni Zephyr Geodetic 2 (Thompson 2008).

13. Usporedba karakteristika antena Choke ring i Zephyr Geodetic 2

Prema podacima o karakteristikama, između antena Choke ring i Zephyr Geodetic 2 (URL 3) nema većih razlika. U tablici 3 crvenom bojom prikazane su karakteristike u kojima se Zephyr Geodetic 2 pokazala boljom od Choke ring antene.

Prednosti Zephyr Geodetic 2 u odnosu na Choke ring antenu:

- ima manje šumova kad se GNSS-satelit nalazi na malim elevacijskim kutovima (to vrijedi samo u odnosu na starije modele Choke ring antena),
- ima manje dimenzije,
- jeftinija je i
- robusnija.

Tablica 3. Karakteristike antena Choke ring i Zephyr Geodetic 2 (URL 3).

KARAKTERISTIKA	CHOKE RING	ZEPHYR GEODETIC 2
Praktično praćenje elevacijskih kutova	<5°	<3°
Podrška pozicijska područja frekvencija	L1/L2/L5/G1/G2/G3/E1/E2/E5ab/E6/Compass	L1/L2/L5/G1/G2/G3/E1/E2/E5ab/E6/Compass
Podrška SBAS područja frekvencija	WAAS, EGNOS, QZSS, Gagan, MSAS, OmniStar	WAAS, EGNOS, QZSS, Gagan, MSAS, OmniStar
Točnost faznog središta	2 mm ili bolje	2 mm ili bolje
Točnost ponavljanja faznog središta	<1 mm	<1 mm
Maksimalna ekscentričnost faznog središta	2 mm	2 mm
Pojačanje antene	50 dB ± 2 dB	50 dB ± 2 dB
Karakteristika LNA (low noise amplifier – niskošumno pojačalo)	napredno filtriranje kako bi se smanjio utjecaj visokog napona izvan područja odašiljača	napredno filtriranje kako bi se smanjio utjecaj visokog napona izvan područja odašiljača
Tolerancija LNA	13 dB	13 dB
Napon napajanja	3,5 V DC do 20 V DC	3,5 V DC do 20 V DC
Potrošnja struje (maksimum)	125 mA	125 mA
Potrošnje snage (maksimum)	440 mW	440 mW
Dimenzije	38 cm promjer x 14 cm visina	34,3 cm promjer x 7,6 cm visina, zbog manje visine manji je utjecaj vjetra
Masa	4,3 kg	1,36 kg (lakša približno tri puta)
Polarizacija	desna kružna	unaprijeđena desna kružna

KARAKTERISTIKA	CHOKE RING	ZEPHYR GEODETIC 2
Lijeva kružna polarizacija	20 dB minimum	20 dB minimum
NGS (National Geodetic Survey) model raspoloživ	da	da
Ocjena udaraca koje podnosi	preživi pad s visine 1 m na iverom pokriven beton	preživi pad s visine 2 m na beton (robusnija)
Vlažnost	100% otporna, potpuno je zatvorena (zabrtvljena)	100% otporna, potpuno je zatvorena (zabrtvljena)
Temperatura	radna –40 °C do 70 °C skladištenja –40 °C do 70° C	radna –40 °C do 70 °C skladištenja –40 °C do 70 °C
Cijena	visoka	jeftinija približno tri puta

14. Zaključak

U Zephyr Geodetic antenu ugrađena su dva nova patenta: *n*-pobudnih točaka i Trimble “potajna” donja ploha.

Rezultati mnogobrojnih ispitivanja (Krantz i dr. 2001b) pokazuju:

- Stabilnost apsolutnog faznog središta Zephyr Geodetic antene znatno je bolja nego kod Choke ring antene na frekvenciji L1 i približno jednaka na frekvenciji L2.
- Ponovljivost faznog središta Zephyr Geodetic antene u skladu je s PCV modelom do 0,2 mm za bilo koju slučajno odabranu antenu toga tipa. Ta je ponovljivost jednaka prethodno objavljenim rezultatima za Choke ring antenu ili bolja od njih.
- Trimble “potajna” donja ploha, koja se koristi kao otporan materijal za smanjenje multipath efekta, pokazuje približno jednake rezultate kao i stariji modeli Choke ring antena.
- Zephyr Geodetic antena bolje prima signale sa satelita na malim elevacijskim kutovima od starijih modela Choke ring antena.
- Zephyr Geodetic antena konstruirana je tako da koristi električne i mehaničke materijale koji su ekstremno čvrsti i otporni na ekstremne atmosferske uvjete te znatno kompaktniji i lakši od antena sa sličnim karakteristikama.

Stoga ne čudi da su mjerenjima izvedenima sa Zephyr Geodetic antenom na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu postignuti izvrsni rezultati (Solarić i dr. 2008).

Ti rezultati pokazuju da se sa Zephyr Geodetic antenom (odnosno unaprijeđenom, Zephyr Geodetic 2) postižu rezultati usporedivi s Choke ring antenom, a znatno je jeftinija, manja, lakša, robusnija te ima svojstvo boljeg primanja signala sa satelita na malim elevacijskim kutovima od starijih modela Choke ring antena.

Nova GNSS-antena Leica AR25 Choke ring pokazuje bolje karakteristike i svojstva nego Zephyr Geodetic 2 antena.

ZAHVALA. Zahvaljujemo Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske na financiranju projekta “*Razvoj znanstvenog mjeriteljskog laboratorija za geodetske instrumente*”, u okviru kojega je izrađen ovaj rad. Zahvaljujemo i tvrtki Geofoto d.o.o., koja je financirala ispitivanja GPS-uređaja Trimble 5700 sa Zephyr Geodetic antenama na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta, a prof. dr. sc. Asimu Bilajbegoviću na vrlo korisnim savjetima.

Literatura

- Bačić, Ž., Bašić, T. (1999): Satelitska geodezija II, interna skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Bartolić, J. (2009): Usmena komunikacija, siječanj.
- Bilajbegović, A. (2006): Ispitivanja multipath-efekata različitih tipova GPS-antena i njihov utjecaj na točnost određivanja koordinata, javno predavanje na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, 24.11.2006.
- Bilajbegović, A., Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. (1991): Osnovni geodetski radovi – suvremene metode – GPS, Tehnička knjiga, Zagreb.
- Bilajbegović, A., Vierus, M. (2007): Untersuchung der Multipatheffekte verschiedener GPS-Antennentypen und ihrer Einflüsse auf die Genauigkeit der Koordinatenbestimmung, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, No. 1, 9–18.
- Estey, L., Meertens, C. (1999): TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data, GPS Solutions, Vol. 3, No. 1, 42–49.
- Hecht, E. (2001): Optics, 4th edition, Addison Wesley.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008): GNSS – Global Navigation Satellite Systems – GPS, GLONASS, Galileo and more, Springer-Verlag, Wien – New York.
- Krantz, E., Riley, S., Large, P. (2001a): GPS Antenna Design and Performance Advancements: The Trimble Zephyr, Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, California, USA.
- Krantz, E., Riley, S., Large, P. (2001b): The Design and Performance of the Zephyr Geodetic Antenna, Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2001, September 11–14, Salt Lake City, UT, USA, 1942–1951.
- Lennen, G. R., Hand, W., Westfall, B. (1996): GPS receiver with N-point symmetrical feed double-frequency patch antenna, United States Patent #5,515,057, USPTO.
- Mader, G. L. (1999): GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey, GPS Solutions, Vol. 3, No. 1, 50–58.
- Mayer, D. (1971): Fizika za III. razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb.
- Paar, V. (2006): Fizika 3 – udžbenik za 3. razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb.
- Padros, N., Ortigosa, J., Baker, J., Iskander, M. F., Thornberg, B. (1997): Comparative Study of High-Performance GPS Receiving Antenna Designs, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, No. 4, 698–706.
- Sears, F. W. (1963a): Optika, Naučna knjiga, Beograd.
- Sears, F. W. (1963b): Elektricitet i magnetizam, Naučna knjiga, Beograd.

- Solarić, N., Solarić, M., Barković, Đ., Šoško, N. (2008): Mogućnost nezavisne kontrole duljine kalibracijske baze s pomoću GPS-a, *Geodetski list*, 2, 67–82.
- Thompson, C. (2008): *GNSS Antennas Components and Functions*, Trimble.
- Wells, D. (1987): *Guide to GPS positioning*, 2nd ed., Canadian GPS Associates, Fredricktion, New Brunswick, Canada.
- Westfall, B. G. (1997): *Antenna with R-card ground plane*, United States Patent #5,694,136, USPTO.
- URL 1: NGS – National Geodetic Survey, United States Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Oceanic Service, <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>, (23. 02. 2009.).
- URL 2: IfE – Institut für Erdmessung, Universität Hannover, <http://www.ife.uni-hannover.de/>, (24. 02. 2009.).
- URL 3: Trimble, <http://www.trimble.com>, (25. 02. 2009.).
- URL 4: Leica Geosystems, http://www.leica-geosystems.com/en/GNSS-Reference-Networks-Leica-AR25-Choke-Ring-Antenna_70988.htm, (11. 11. 2009.).

GPS-antenna Zephyr Geodetic

ABSTRACT. The paper describes physical properties and improvements of the GPS-antenna Zephyr Geodetic. It enables very precise measurements, with very small disturbances because it reduced the influence of multiple effects. Apart from that, the antenna has got more enhancing items so that there are less signal delays present. From the comparison the antenna with well known Choke ring antenna it can be seen that there are results obtained with Zephyr Geodetic antenna comparable with the results obtained with Choke ring antenna, and they are partly even better at smaller elevation angles of the satellite (Krantz et al. 2001b). It is therefore no wonder that the results obtained with the measurements performed with Zephyr Geodetic antenna at the calibration base of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb, are excellent (Solarić et al. 2008).

Keywords: GPS-antenna Zephyr Geodetic, Choke ring antenna, multipath, circular polarised electromagnetic wave, antenna phase centre.

Prihvaćeno: 2009-11-12