

UDK 629.783.056.8:528.28
Pregledni znanstveni članak

Razvoj i primjena pseudolita za pozicioniranje i navigaciju

Gorana NOVAKOVIĆ, Almin ĐAPO, Hrvoje MAHOVIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. Iako su Globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS) uveli revolucionarne promjene na području pozicioniranja i navigacije, poznato je da preciznost, pouzdanost, dostupnost i cjelovitost rezultata dobivenih tom tehnologijom značajno ovisi o broju i geometrijskom rasporedu vidljivih satelita. To je osobito izraženo u područjima s ograničenom vidljivošću satelita, kao što su gradska područja, doline, otvorena rudnička okna, velika gradilišta. Osim toga, u zatvorenim prostorima ili ispod zemlje, npr. tvorničke hale, unutrašnjost zgrada, tuneli, pozicioniranje je potpuno onemogućeno zbog nedostupnosti satelitskih signala. Ti nedostaci mogu se otkloniti uključivanjem dodatnih izvora signala koje odašilju pseudoliti (naziv izveden od pseudo-sateliti), terestrički generatori i odašiljači signala sličnih satelitskim, za primjenu u lokalnom području.

Pseudoliti se mogu koristiti kao nadopuna GNSS-a u slučaju nedovoljnog broja vidljivih satelita ili za poboljšanje geometrije te kao samostalan mjerni sustav koji može u potpunosti zamijeniti konstelaciju GNSS satelita, u zatvorenim prostorima, ispod zemlje ili na drugim planetima.

Iako to može izgledati kao nova mjerna tehnologija, koncept terestričkih odašiljača datira još iz vremena početaka razvoja GPS-a, kada su pseudoliti osmišljeni za testiranje GPS korisničke opreme. Od tada, uvidjevši da se pseudoliti mogu vrlo uspješno koristiti i u druge svrhe, istraživački timovi širom svijeta neprekidno usavršavaju i razvijaju nove konstrukcije pseudolita nastojeći ih prilagoditi zahtjevima pojedinih primjena.

U članku se prikazuju teorijske osnove, prednosti i nedostaci, razvoj tehnologije pseudolita, daljnja istraživanja i nove konstrukcije te primjena pseudolita u nekim područjima pozicioniranja i navigacije.

Ključne riječi: pseudoliti, proširenje GPS-a, pozicioniranje i navigacija u zatvorenim prostorima.

¹ Prof. dr. sc. Gorana Novaković, dr. sc. Almin Đapo, Hrvoje Mahović, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: gorana.novakovic@geof.hr, adapo@geof.hr, maligauss@gmail.com.

1. Uvod

Iako su Globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS) našli vrlo značajnu i široku primjenu na svim područjima gdje je osnovni zadatak pozicioniranje i navigacija, postoje neka ograničenja pri korištenju te tehnologije. Poznato je da kvaliteta rezultata dobivenih satelitskim mjernim sustavima izravno ovisi o broju dostupnih satelita i geometrijskom rasporedu satelita-prijemnik. Pod nepovoljnim uvjetima za opažanje, tj. ograničenom vidljivošću satelita, kao što su npr. gradska područja (ulice s visokim zgradama, tzv. urbani kanjoni), doline, velika gradilišta ili otvorena rudnička okna, broj vidljivih satelita možda neće biti dovoljan za dobivanje pouzdanih i preciznih podataka. Osim toga, pozicioniranje korištenjem GPS-tehnologije u zatvorenim prostorima ili ispod zemlje (tvorničke hale, unutrašnjost zgrada, tuneli, podzemne garaže, pothodnici i sl.) potpuno je onemogućeno zbog nedostupnosti satelitskih signala. Nadalje, zbog ograničenja u vezi geometrije satelita, točnost visinske komponente uglavnom je dva do tri puta lošija nego za horizontalne komponente položaja. Zbog tih nedostataka kontinuirano su se provodila istraživanja kako bi se GPS upotpunio drugim tehnologijama u svrhu poboljšanja cjelokupne provedbe mjernog procesa. Neki od poznatih primjera su integracija GPS-a s GLONASS-om i integracija GPS-a s Inercijalnim navigacijskim sustavom (INS). Međutim, mnogi od navedenih nedostataka mogu se riješiti primjenom pseudolita (riječ nastala od *pseudo*+*satellites*, često skraćeno PL), terestričkih generatora i odašiljača signala sličnih satelitskim, za primjenu u lokalnom području. Pseudoliti se mogu koristiti u kombinaciji, odnosno kao nadopuna GPS-a u slučaju nedovoljnog broja vidljivih satelita ili za poboljšanje geometrije, a također i za primjenu u zatvorenim prostorima ili pod zemljom, gdje pseudoliti, kao samostalan mjerni sustav, mogu u potpunosti zamijeniti konstelaciju GPS-satelita.

Koncept tehnologije pseudolita nije novost, osmišljen je sedamdesetih godina prošlog stoljeća, za testiranje GPS-korisničke opreme, prije lansiranja prvih satelita u orbitu. Od tada se kontinuirano provode istraživanja i testiranja u svrhu poboljšanja postojećega mjernog sustava te razvoja novih konstrukcija pseudolita za njihovu što širu primjenu u području pozicioniranja i navigacije, pa čak i na drugim planetima.

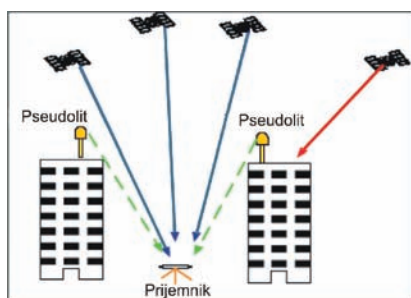
Koliko je značajna i raširena primjena pseudolita na području geodetske djelatnosti govori i činjenica da je u okviru rada IAG (International Association of Geodesy), u sklopu Odbora 4: *Pozicioniranje i primjene*, formirana Istraživačka grupa 4.1: *Primjena pseudolita u pozicioniranju i navigaciji*. Cilj je istraživanja te grupe pronalaženje novih područja primjene pseudolita, osobito na području inženjerske geodezije. Osnovni sadržaji istraživačkih aktivnosti odnose se na nadopunu satelitskih sustava pseudolitima, koncept pseudolita kao samostalnoga mjernog sustava i integracija pseudolita s ostalim sensorima, kao npr. INS (vidi npr. Lee i dr. 2002; Grejner-Brzezinska i dr. 2002). Na njihovoj web stranici (URL 1) mogu se naći podaci o novim istraživanjima vezanim uz pseudolite, relevantni linkovi, a također i sveobuhvatan popis istraživanja i radova iz tog područja.

Kako se u Hrvatskoj pseudoliti još uvijek ne koriste te ne postoji domaća literatura koja obrađuje to područje, motivacija za pisanje ovog članka bila je upoznati hrvatsku stručnu javnost s osnovama tehnologije pseudolita, koji se već dugi niz godina primjenjuju u različitim područjima pozicioniranja i navigacije.

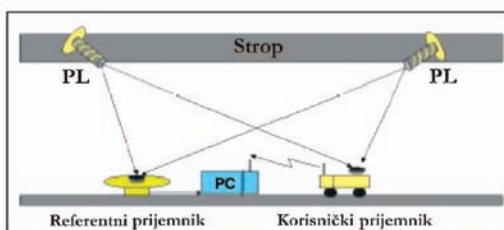
U članku se daje kratak pregled razvoja tehnologije pseudolita, teorijske osnove, prednosti i nedostaci, daljnji razvoj te prikaz područja pozicioniranja i navigacije gdje je primjena pseudolita danas već nezaobilazna. Kako je materija vezana uz pseudolite i njihovu primjenu opsežna, zainteresirani se upućuju na članke i ostale publikacije navedene u Literaturi, koji su samo malen dio dostupnih sadržaja.

2. Pseudoliti

Pseudoliti ili pseudo – sateliti su (uglavnom) terestrički odašiljači signala primjena kojih na otvorenom omogućuje dodatni (lokalni) izvor signala (slika 1a) ili čak u potpunosti zamjenjuju konstelaciju GPS-satelita u zatvorenom prostoru (slika 1b).



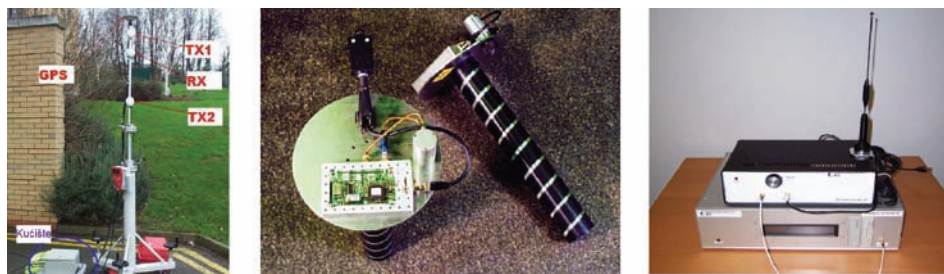
a) Nadopuna GPS-a pseudolitima (Ning 2004)



b) Pseudoliti kao samostalan mjerni sustav za primjenu u zatvorenim prostorima (Jun i Kee 2006)

Slika 1. Primjena pseudolita kao nadopuna GPS-a na otvorenom i za pozicioniranje i navigaciju u zatvorenim prostorima.

Primjena pseudolita seže još od početaka razvoja tehnologije GPS-a, kasnih 1970-ih, prije lansiranja prvih satelita u orbitu. Na testnom području Inverted Range, lociranom u Army Yuma Proving Ground u Arizoni (SAD), konstruiran je sustav koji se sastojao od 4 terestrička odašiljača, koji su simulirali satelitske signale u svrhu testiranja korisničke GPS-opreme, odnosno cjelokupnog mjernog sustava. Ti terestrički odašiljači nazvani su *pseudoliti* (Harrington i Dolloff 1976), (slika 2).



Slika 2. Pseudoliti.

Prvi pseudoliti konstruirani su tako da odašilju GPS L1 signale, iako je navigacijska poruka bila različita od one koju šalju GPS-sateliti. Naime, pseudoliti su samo odašiljali informacije o fiksnim koordinatama položaja pseudolita. Sredinom 1980-ih, Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) konstruirao je pseudolit koji je primao GPS-signale, računao korekcije i slao te informacije na jednoj frekvenciji u L-pojasu. RTCM-ov Odbor SC-104 (Recommended Standards for Differential Navstar GPS Service) definirao je Poruku tipa 8 (Type 8 Message) za almanah pseudolita, koji sadrži informacije o lokaciji, kodu i operativnom stanju pseudolita. Prvi članak u kojem se preporučuje korištenje pseudolita za civilno zrakoplovstvo i pomorsku navigaciju objavljen je 1986. godine (Klein i Parkinson 1986). Nakon toga započela su intenzivna istraživanja u vezi korištenja pseudolita i za ostale primjene pozicioniranja i navigacije (npr. Bartone 1996; Zimmerman i Cannon 1996; Morley 1997a; Altmayer 1998; Choi i dr. 2000; Wang 2002a). Međutim, prototip pseudolita te vrste bio je tada prilično skup. Početkom 1990-ih istraživači sa Sveučilišta Stanford razvili su jeftiniji GPS (L1 C/A kod) pseudolit za korištenje u sustavu automatskog slijetanja zrakoplova (Cohen i dr. 1993). Prvi komercijalni pseudolit, koji je proizvela tvrtka IntegriNautics, pojavio se na tržištu sredinom 1990-ih. Nakon toga mnogi su proizvođači usavršavali i razvijali nove konstrukcije pseudolita u svrhu njihove što šire primjene. Prije nego što se prikaže daljnji razvoj i nove konstrukcije pseudolita, potrebno je, ukratko, izložiti teorijske osnove i pogreške vezane uz rad pseudolita.

2.1. Teorijske osnove pseudolita

S teorijskog aspekta pozicioniranja, pseudolit je “satelit na Zemlji” koji odašilje signale slične signalima GPS-a. Pseudoliti uglavnom emitiraju signale na GPS-ovu pojasu frekvencije L1: 1575,42 MHz ili/na L2: 1227,6 MHz, koristeći C/A kod i odgovarajući PRN ID (npr. 33 do 37 u slučaju četiriju pseudolita). Kada pseudoliti odašilju signale na frekvencijama koje su različite od frekvencija GPS L1/L2, integracija GPS-a i pseudolita slična je integraciji GPS-a i GLONASS-a. Međutim, ako pseudolit odašilje na frekvenciji GPS L1 (i/ili L2), integracija je relativno jednostavna budući da se pseudoliti tretiraju kao dodatni sateliti na Zemlji. Uz takvu konfiguraciju, standardni GPS-prijemnici, uz određene modifikacije, mogu primiti signale pseudolita (LeMaster i Rock 1999; Stone i Powell 1998). Iako pseudoliti odašilju signal poput GPS-satelita, njihov je signal mnogo jači od GPS-ova. Zbog toga može doći do interferencije signala. Taj problem poznat je kao near/far problem i mogućnosti njegova rješavanja bit će detaljnije opisane u sljedećem poglavlju, budući da način odašiljanja signala pseudolita i njegova konstrukcija ovise o pristupu rješavanju tog problema.

Pseudolitima se, jednako kao i GPS-om, mogu provesti kodna i fazna mjerenja. Dakle, osnovni principi preciznoga GPS-pozicioniranja mogu se primijeniti i za pseudolite. Općenito, slično jednadžbama koje vrijede za GPS-opažanja, matematički model za kodna i fazna mjerenja pseudolitom glasi (Wang i dr. 2001; Ning i dr. 2004):

$$R_k^p = \rho_k^p + c \cdot (dt^p - dt_k) + T_k^p + dr_k^p + dm_k^p + \varepsilon_k^p \quad (1)$$

$$\phi_k^p = \frac{1}{\lambda_p} \rho_k^p + \frac{c}{\lambda_p} \cdot (dt^p - dt_k) + N_k^p + \frac{1}{\lambda_p} T_k^p + \frac{1}{\lambda_p} dr_k^p + \delta m_k^p + e_k^p, \quad (2)$$

gdje je: R_k^p , ϕ_k^p udaljenost između prijemnika k i pseudolita p , na osnovi kodnih odnosno faznih mjerenja, λ_p valna duljina signala pseudolita p , ρ_k^p geometrijska (topocentrična) udaljenost između prijemnika k i pseudolita p , c brzina svjetlosti, dt^p pogreška sata pseudolita p , dt_k pogreška sata prijemnika k , N_k^p neodređeni cijeli broj valnih duljina (ambiguitet), T_k^p troposferska korekcija, dr_k^p pogreška položaja pseudolita, dm_k^p , δm_k^p utjecaj multipatha na kodna, odnosno fazna mjerenja, ε_k^p , e_k^p preostale pogreške kodnih, odnosno faznih mjerenja (pogreška položaja, ostatak atmosferskih utjecaja, multipath, šum prijemnika i dr.).

Može se uočiti da u jednadžbama (1) i (2) ne postoji član koji se odnosi na ionsfersku korekciju zato što se i pseudolit i prijemnik korisnika nalaze na Zemlji. Dakle, za razliku od GPS-signalu, signali pseudolita prolaze samo kroz niži sloj troposfere. Utjecaj troposfere pri mjerenju pseudolitima potrebno je korigirati korištenjem specijalnog troposferskoga kompenzacijskog modela (npr. Morley 1997a; Dai i dr. 2000; Soon i dr. 2003). Troposferska korekcija pri pseudosatelitskim mjerenjima istovjetna je korekciji pri elektrooptičkim mjerenjima duljina. Matematički model integracije GPS-mjerenja i mjerenja pseudolitom može se naći u članku (Chen 2006). Iako su jednadžbe za kodna i fazna mjerenja pseudolitom slične jednadžbama za GPS- opažanja, treba uzeti u obzir da se pogreške kao što su multipath, troposfersko zaostajanje, pogreška u određivanju položaja pseudolita i sinkronizacija sata pseudolita, rješavaju na različit način nego slične pogreške kod GPS-a.

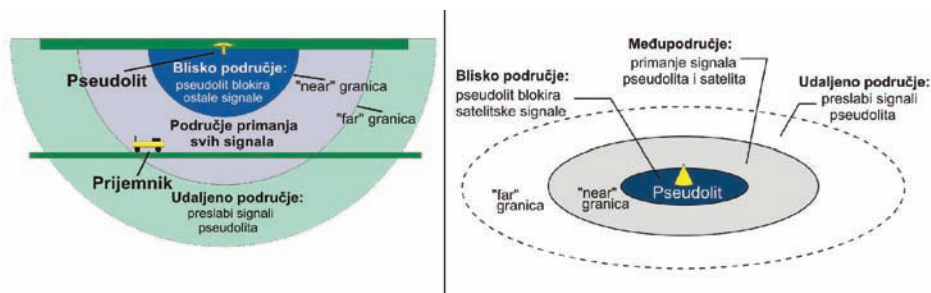
Pseudoliti obično koriste jeftinije kristalne oscilatore ili satove (TCXO – temperature compensated crystal oscillator) i rade neovisno u tzv. nesinkroniziranome modu. U ovom slučaju, za precizno satelitsko i pseudosatelitsko pozicioniranje koristi se postupak dvostrukog diferenciranja za uklanjanje pogreške sata (pseudo) satelita i sata prijemnika. To zahtijeva da bazni prijemnik prati GPS-sigale i sigale svih pseudolita. To je jedini način na koji je moguće postići visoku točnost pozicioniranja koristeći fazna mjerenja. Prema tome centimetarska preciznost pozicioniranja nesinkroniziranim pseudolitima moguća je jedino korištenjem bazne stanice koja šalje korekcije putem radioveze poput standardnoga GPS-RTK sustava (Rizos 2005). Međutim, ako bi se mreža pseudolita sinkronizirala, SPP (Single Point Positioning) pozicioniranje centimetarskom preciznošću bez korištenja bazne stanice i radioveze bilo bi moguće. Danas je većina pseudolitskih sustava sinkronizirana na GPS-vrijeme preko GPS-prijemnika koji rade u SPP načinu (korištenjem pseudo-udaljenosti). Potrebna je iznimno visoka razina sinkronizacije uzimajući u obzir da je pogreška u mjerenju vremena od 1ns jednaka pogreški od 30 cm u duljini (LeMaster 2002; Rizos 2005).

2.2. Izvori pogrešaka pri korištenju pseudolita

Integracija GPS-a i pseudolita ima značajne prednosti. Neke su od njih veća položajna preciznost, poboljšana pouzdanost, dostupnost, kontinuiranost, cjelokupnost i skraćeno vrijeme za otklanjanje ambiguiteta. Iako su to velike prednosti, one se ne mogu ostvariti bez da se uzmu u obzir neki tehnički problemi vezani uz konstrukciju sustava pseudolita. Jedan od osnovnih problema je tzv. near/far problem, koji se ne pojavljuje pri GPS-mjerenjima.

Near/far problem

Jedna od osnovnih teškoća vezanih uz korištenje pseudolita je pojava tzv. near/far (blizu/daleko) problema, a nastaje zbog toga što se promjenom udaljenosti između GPS-prijemnika i pseudolita mijenja jakost signala pseudolita. Taj problem ne postoji u slučaju samo GPS-pozicioniranja, jer su GPS-sateliti na relativno velikoj udaljenosti od korisnika, pa srednja jakost satelitskih signala ostaje relativno konstantna, bez obzira na kretanje prijemnika. U slučaju pseudolita, ta pretpostavka o konstantnoj jakosti primljenog signala ne vrijedi uvijek. Kako je jakost primljenog signala obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti pseudolit-korisnik, može se dogoditi da GPS-prijemnik prima signale različite razine jakosti. Jedan od krajnjih slučajeva nastaje zbog prevelike udaljenosti između pseudolita i prijemnika, pa je signal pseudolita preslab da bi ga GPS-prijemnik detektirao (far-problem). Druga krajnost nastaje kada je pseudolit preblizu GPS-prijemnika, pa svojim jakim signalima ometa, odnosno blokira GPS-sigale i signale ostalih pseudolita (near-problem). Na slici 3 grafički je prikazan near/far problem. Ako je korisnik izvan "far" kružnice, neće primati signale pseudolita, ali će biti u mogućnosti primati GPS-sigale. Ako je korisnik unutar "near" kružnice, pseudolit blokira GPS-prijemnik koji stoga ne može primati signale GPS-satelita. Unutar tih dviju granica korisnik može nesmetano primati signale i od pseudolita i od GPS-satelita.



Slika 3. Prikaz near/far problema (u zatvorenom prostoru i na otvorenome).

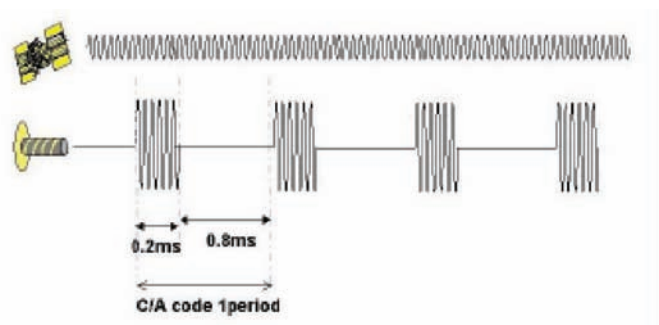
Kako se procjenjuje omjer između "near" i "far" granica (radijusa), može se naći u (npr. Morley 1997a; Jovancevic i dr. 2007). Taj je omjer reda veličine 10:1. To je vrlo ograničavajuća vrijednost, pa su provedena mnoga istraživanja kako otkloniti, odnosno reducirati near/far problem (Martin i dr. 1999; Kee i dr. 2000; Hill i dr. 2001; Jovancevic i dr. 2007).

Rješenje near/far problema odnosi se uglavnom na konstrukciju signala. Postoje, u osnovi, tri postupka obrade signala pseudolita u svrhu rješenja near/far problema. Ti postupci uključuju:

1. *Različite frekvencije.* Problem se može otkloniti odašiljanjem signala pseudolita na frekvencijama različitim od frekvencije GPS L1 (1575,42 MHz), ali unutar istog pojasa frekvencije kao GPS (Frequency Division Multiple Access – FDMA).

2. *Različiti kodovi.* Korištenje alternativnih kodova koji imaju dulje sekvence nego postojeći GPS-kodovi (Code Division Multiple Access – CDMA).
3. *Postupak pulsiranja.* Pulsiranje signala pseudolita u slučajno odabranim ili fiksnim intervalima (Time Division Multiple Access – TDMA).

Budući da rješenja pod 1 i 2 zahtijevaju modifikaciju GPS-prijemnika, za opću primjenu uglavnom se koristi treći postupak, pomoću pulsiranja signala (TDMA) (slika 4). Signali pseudolita odašilju se u učestalim, kratkim i jakim impulsima. Interval između impulsa, kada je pseudolit ugašen, omogućuje GPS-prijemniku primanje satelitskih signala bez interferencije sa signalima pseudolita. (Većina suvremenih GPS-prijemnika tretira pulsirajuće signale pseudolita kao kontinuirani signal.)

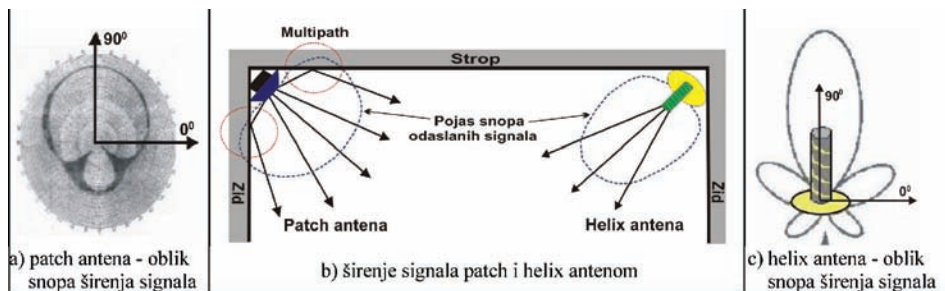


Slika 4. Shema pulsiranja signala pseudolita (Kee i dr. 2000).

Multipath signala pseudolita

Poznato je da je multipath velik problem pri korištenju satelitskih sustava. Međutim, multipath koji se pojavljuje pri korištenju pseudolita još je veći problem, osobito u zatvorenim prostorima, jer je broj potencijalnih površina od kojih se može reflektirati signal znatno veći (strop, zidovi, prozori i ostale zapreke). Osim toga, u usporedbi s multipathom GPS-signala, multipath pseudolita ima neke jedinstvene karakteristike. Multipath kod pseudolita ne nastaje samo zbog refleksije signala od okolnih površina, što uzrokuje dulju putanju signala, nego može nastati i interferencija između direktnog i reflektiranog signala, što kvari originalni signal. U usporedbi s GPS-om, ovdje je multipath vrlo ozbiljan problem, zbog malog elevacijskoga kuta signala pseudolita. Kao što je poznato, GPS-opažanja pod malim elevacijskim kutom (10° ili 15°) odbacuju se kako bi se minimalizirao utjecaj multipatha i izbjegli problemi vezani uz troposfersko zaostajanje signala. Nadalje, ako su i pseudolit i prijemnik statični, multipath će biti konstantan, imat će sustavan utjecaj, tj. ne može se smanjiti tijekom vremena kao u slučaju GPS-a.

Rješenje problema multipatha nalazi se u primjeni drugačijih konstrukcija antena. Naime, konvencionalne radiofrekvencijske antene obično su tzv. *patch* antene, koje proizvode široki snop signala (slika 5a) i time uzrokuju ozbiljan utjecaj multipatha (slika 5b). Unutarnji navigacijski sustavi koriste *helix* antene kojih je oblik snopa odašiljanja signala optimalan za prijemnike jer je snaga signala veća u smjeru emitiranja signala, a manja u ortogonalnom smjeru (slika 5c).



a) patch antena – oblik snopa širenja signala

b) širenje signala patch i helix antenom

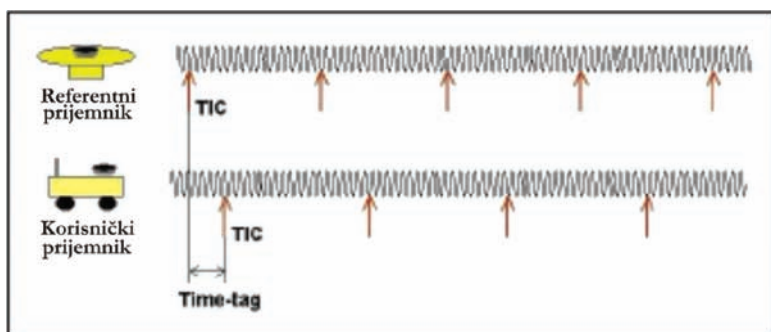
c) helix antena – oblik snopa širenja signala

Slika 5. Helix antena u usporedbi s patch antenom koja uzrokuje značajni multipath.

Osim toga, kut (odnosno snop) pod kojim helix antena odašilje signale može se podesiti promjenom njezine duljine. Antene koje se postavljaju na sredinu stropa podesene su na kratku duljinu kako bi proizvele širi snop, dok su antene na rubovima prostorije dulje kako bi proizvele užu snop, čime se otklanja utjecaj multipatha (Slika 5b).

Time-tag pogreška

Precizni atomski satovi u GPS-satelitima međusobno su dobro sinkronizirani, tako da svi korisnici koji primaju satelitske signale mogu uskladiti svoje vrijeme registracije signala. Međutim, pseudoliti međusobno nisu sinkronizirani jer koriste jeftinije TCXO satove, pa prijemnici dobivaju podatke u različitim vremenima. Na taj način nastaje tzv. *time-tag* pogreška (slika 6).



Slika 6. Time-tag pogreška (Kee i dr. 2000).

Rješenje problema *time-tag* nađeno je u korištenju jednoga glavnog (master) pseudolita s kojim referentni i korisnički prijemnik usklađuju svoje vrijeme svakih 6 sekundi. Na taj je način vrijeme usklađeno unutar $1 \mu\text{s}$; *time-tag* pogreška smanjena je ispod $0,3 \text{ mm}$, što se može zanemariti (Kee i dr. 2000; Badea i Eriksson 2005).

Pseudolit pole

Još jedan utjecaj koji se pojavljuje pri korištenju pseudolita, vezan je uz promjenu temperature, tzv. pseudolit pole. Kada je sustav inicijaliziran, instrument je na temperaturi okoliša u kojem se nalazi. Tijekom rada instrument se počne zagrijavati, pa dolazi do promjene frekvencije. Uzrok je korištenje TCXO nestabilnih satova, što izaziva pogrešku u mjerenju udaljenosti.

Rješenje problema pseudolit pole nalazi se u rekalkibraciji sustava unutar kratkih intervala (Badea i Eriksson 2005). Ako se instrument postavi unutar uređaja koji regulira temperaturu na otprilike dvostruki iznos nego što je temperatura okoliša, npr. 50 °C ako je vanjska temperatura oko 20 °C, taj će se problem otkloniti. Regulacijom temperature svih elektroničkih dijelova sustava može se odrediti odstupanje sata i pretpostaviti da je to odstupanje konstantno.

Pogreška određivanja položaja pseudolita

Za dobivanje krajnjeg rezultata pozicioniranja potrebno je poznavati položaj izvora signala. Kod GPS-a navigacijska poruka sadrži podatke almanaha i broadcast efemeride satelita. Pri relativnom GPS-pozicioniranju, utjecaj pogrešaka orbite na duljinu bazne linije približno je proporcionalan omjeru duljine bazne linije i udaljenosti satelita. Zbog velike udaljenosti od satelita do prijemnika, za kratke bazne linije, pogreške orbite mogu se zanemariti. Kako su pseudoliti “sateliti na Zemlji”, umjesto almanaha i efemerida koriste se njihovi unaprijed određeni položaji (nekim od geodetskih mjernih metoda). Pogreška položaja bit će konstantna jer su pseudoliti stacionarni. Treba naglasiti da, u određenim situacijama, mala pogreška u određivanju položaja pseudolita može izazvati veliku pogrešku u mjernom modelu i prema tome utjecati na krajnji rezultat pozicioniranja. O utjecaju pogreške položaja pseudolita detaljno je prikazano u članku (Wang i Lee 2002b), gdje su teorijske i numeričke analize pokazale da se postavljanjem pseudolita na optimalnu lokaciju taj utjecaj može znatno reducirati. O pogreški položaja pseudolita može se naći i u člancima (Morley 1997a; Wang i dr. 2000; Dai i dr. 2001c; Kee i dr. 2003).

Utjecaj kružne polarizacije signala prema pravilu desne ruke (RHCP)

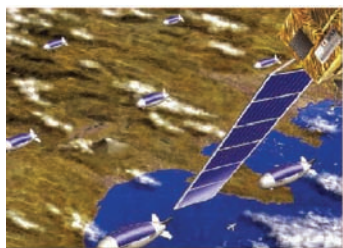
Osim navedenih, postoji još jedan izvor pogrešaka vezan uz antenu, koji se može zanemariti pri GPS-mjerenju, ali se mora uzeti u obzir kod mjernih sustava koji koristi pseudolite. To je tzv. efekt kružne polarizacije signala prema pravilu desne ruke (RHCP – Right-Hand Circularly Polarized effect). Vektori od GPS-satelita do referentnog i korisničkog prijemnika gotovo su isti, pa se utjecaj RHCP-a može zanemariti, čak i pri preciznom pozicioniranju. Međutim, taj utjecaj kod pseudolita je znatan, jer se vektori od pseudolita do korisnika mijenjaju kako se korisnik pomiče, dok su vektori od pseudolita do referentnog prijemnika uvijek isti (vidi sliku 1b). U članku (Jun i Kee 2006) prikazan je način kompenzacije tog utjecaja, što je nužno ako se žele postići visoko precizni rezultati.

3. Daljnji razvoj i nove konstrukcije pseudolita

Širom svijeta istraživački timovi provode različita ispitivanja i testiranja, kako u laboratorijima tako i na terenu, u svrhu rješenja nedostataka vezanih uz pseudolite i razvoja novih konstrukcija kako bi imali što širu primjenu u praksi. Na temu pseudolita i mogućnosti njihove primjene održavaju se brojni znanstveni skupovi, publicirani su mnogi radovi među kojima i doktorski i magistarski radovi (npr. Cobb 1997; Morley 1997a; Bartone 1998; Dai 2002; LeMaster 2002; Proгри 2003; Badea i Eriksson 2005). Slijedi nekoliko primjera novih konstrukcija.

Kako bi se signali pseudolita mogli koristiti za SPP-pozicioniranje, bilo je potrebno sinkronizirati signale pseudolita s GPS-signalima. Ta vrsta pseudolita nazvana je *Sinkroliti* (engl. Synchrolite) (Cobb 1997). Najpoznatiji su sustavi na tržištu Novariant (URL 2) i Locata (URL 3) koji su uspjeli riješiti problem sinkronizacije, međutim oni ne koriste signal pseudolita na GPS L1 frekvenciji.

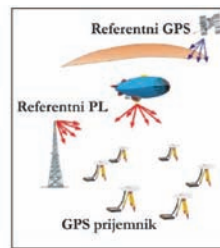
U svrhu davanja DGPS korekcija podataka za GNSS-sustave, pseudoliti su se postavili na stratosferske platforme (Dovis i dr. 2000). Takvi pseudoliti nazivaju se *Stratoliti* (engl. Stratolite). Korištenje “zračnih” pseudolita, instaliranih u vojnim zrakoplovima, predložio je Raquet i dr. (Racquet i dr. 1995). U članku (Tsujii i dr. 2001) opisuje se sustav stratosferskih platformi (SPF) koje se nalaze na visini od oko 20 km. One su izvori signala za navigacijsko-pozicijski servis (slika 7b), za primjenu kao što je praćenje okoliša, komunikacije i dodatni izvori signala (slika 7a). Za testiranje predloženog sustava korištena je metoda “inverznog” pozicioniranja (slika 7c) koja je detaljnije opisana u poglavlju 4.3.



a) Konceptualni prikaz sustava stratosferskih platformi



b) Navigacijsko-pozicijski servis; koristi pseudolite na stratosferskim platformama



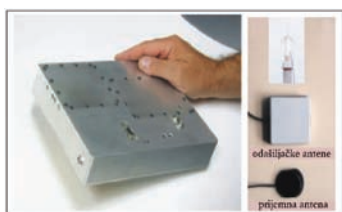
c) Inverzno pozicioniranje

Slika 7. Pseudoliti na stratosferskim platformama (Tsujii i dr. 2001).

Za potencijalnu primjenu sustava pseudolita za navigaciju na Marsu, istraživači sa Sveučilišta Stanford razvili su samo-kalibrirajući skup pseudolita (LeMaster i Rock 1999, 2001, LeMaster 2002), koji mogu odašiljati i primati signale, a nazvani su *Transiveri* (primopredajnici) (engl. Transceivers). Sastoje se od odašiljača i prijemnika te mogu primati signale svih izvora uključujući i vlastiti. Konstrukcija instrumenta omogućuje poništavanje pogreške sata odašiljača i prijemnika bez korištenja odvojene referentne stanice, koja se zahtijeva za relativno satelitsko pozicioniranje. Ostale primjene transivera mogu se naći u (Stone i dr. 1999a).

Od ostalih istraživanja treba napomenuti da su istraživački timovi sa Sveučilišta New South Wales (Satellite Navigation and Positionin group – SNAP), Sveučilišta FAF u Munchenu, japanske agencije JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) i Nacionalnog sveučilišta u Seoulu proveli nekoliko zrakoplovnih testova radi ispitivanja korištenja pseudolita u različitim područjima pozicioniranja i navigacije. U Politehničkom institutu Worcester u SAD-u, konstruiran je i testiran sustav pseudolita za potrebe protupožarnog sustava u zatvorenim prostorima. Istraživački timovi u Australiji, Kini, Kanadi i Engleskoj proveli su ispitivanja primjene pseudolita u praćenju pomaka i deformacija brana, mostova, otvorenih rudničkih okna i visokih zgrada.

Najvažnije od svih dostignuća vezanih uz razvoj pseudolita izum je nove tehnologije pozicioniranja nazvane *Locata*, koju je u suradnji sa grupom SNAP razvila Locata Corporation (Camberra, Australija) (URL 3). *Locata* je konstruirana da bi prevladala ograničenja GPS-a i ostalih, trenutačno raspoloživih sustava pozicioniranja, a može se koristiti i u zatvorenim prostorima (signali prodiru kroz zidove i krov) i na otvorenome. Dio tehnologije *Locata* sastoji se od vremenski sinkroniziranih transivera, koji se nazivaju *LocataLite*. Mreža tih transivera formira *LocataNet*, koji odašilju signale slične GPS-signalima, a imaju takav potencijal da omogućuju pozicioniranje pokretne jedinice (prijemnika) zvane *Locata* sa subcentimetarskom preciznošću, korištenjem faznih mjerenja (slika 8, slika 2 lijevo). Dakle, SPP-pozicioniranje, bez referentne stanice odnosno radioveze, u zatvorenim prostorima i na otvorenome, trenutačno, s centimetarskom preciznošću, a što je oduvijek bio krajnji zahtjev koji se tražio od tehnologije pozicioniranja u realnom vremenu, sada je stvarnost.



Prototip *LocataLite* hardvera i antena (transiver) (Barnes i dr. 2003c)



Prototip *Locata* hardvera (prijemnik) (Barnes i dr. 2003c)



Današnji *LocataLite* (transiver) (Rizos 2005)

Slika 8. *Locata* tehnologija.

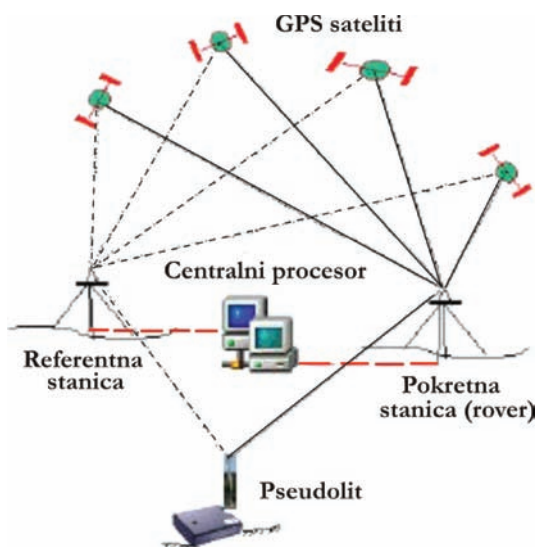
U ovom članku napominju se samo osnovne karakteristike tehnologije *Locata*, a detaljan opis te primjena u različitim područjima pozicioniranja izloženo je u mnogim radovima (npr. Barnes i dr. 2003c, 2003d, 2004a, 2004b, 2005, 2007a, 2007b; Van Cranenbroeck i dr. 2007; Montillet i dr. 2007). S obzirom na značaj i količinu materije, tehnologija pozicioniranja *Locata* mogla bi biti tema posebnog članka.

4. Konfiguracija mjernog sustava temeljenog na pseudolitima

Općenito, postoje tri načina primjene pseudolita. Prvi je način *nadopuna* GPS-konstelacije pseudolitima, drugi je primjena pseudolita kao *samostalnoga mjernog sustava* u zatvorenim prostorima, a treći način je koncept *inverznog* sustava pozicioniranja temeljen na pseudolitima (Dai i dr. 2001a, 2001b, 2001c; Dai i dr. 2002; Rizos 2005).

4.1. Pseudoliti kao nadopuna GPS-a

Proširenje-GPS sustava pseudolitima pogodno je u slučajevima gdje geometrija postojeće GPS-konstelacije ne odgovara zahtjevima pozicioniranja, osobito ako se zahtijeva i velika preciznost visinske komponente. Primjenjuje se za područja kao što su tzv. urbani kanjoni, doline, otvoreni rudnici i sl. (Stone i Powell 1999b; Rizos 2005). Dodatni signali pseudolita mogu znatno unaprijediti izvedbu mjernog sustava i tako poboljšati kvalitetu rezultata. Općenita konfiguracija sustava prikazana je na slici 9.



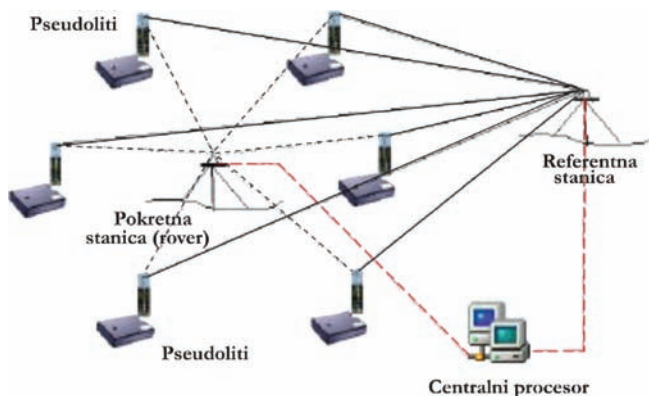
Slika 9. Konfiguracija GPS-sustava pozicioniranja upotpunjenog pseudolitima (Dai i dr. 2001b).

Geometrija “konstelacije satelita” može se poboljšati pažljivim izborom lokacije pseudolita. U slučaju GPS-a, opažanja pod malim elevacijskim kutom obično se odbacuju kako bi se izbjegao značajni multipath i utjecaj troposferske i ionosferske refrakcije. Međutim, kada je riječ o pseudolitima, to nije potrebno. Zbog toga se može očekivati da visoko precizna opažanja pod malim elevacijskim kutovima, kada se uključe u obradu podataka, mogu znatno poboljšati *preciznost* rezultata, osobito visinske komponente. *Dostupnost* se također povećava, zato što su pseudoliti dodatni izvor signala te time proširuju GPS-konstelaciju. Osim toga, povećava se i

pouzdanost rezultata, jer što je više prekobrojnih mjerenja to je lakše otkriti grubo pogrešna opažanja. Nadalje, broj i smještaj pseudolita odabire se u skladu sa zahtjevima točnosti, troškovima sustava i uvjetima okoliša u kojem se izvode radovi.

4.2. Pseudoliti kao samostalan mjerni sustav

Zbog nedostupnosti signala, GPS-tehnologija ne može se primijeniti u zatvorenim prostorima ili pod zemljom. U takvim slučajevima pseudoliti mogu, kao samostalan mjerni sustav, potpuno zamijeniti konstelaciju GPS-satelita, čime se proširuje primjena, npr. za praćenje pomaka i deformacija, u tunelima, pothodnicima i sl. Konfiguracija pseudolita kao samostalnoga mjernog sustava prikazana je na slici 10.



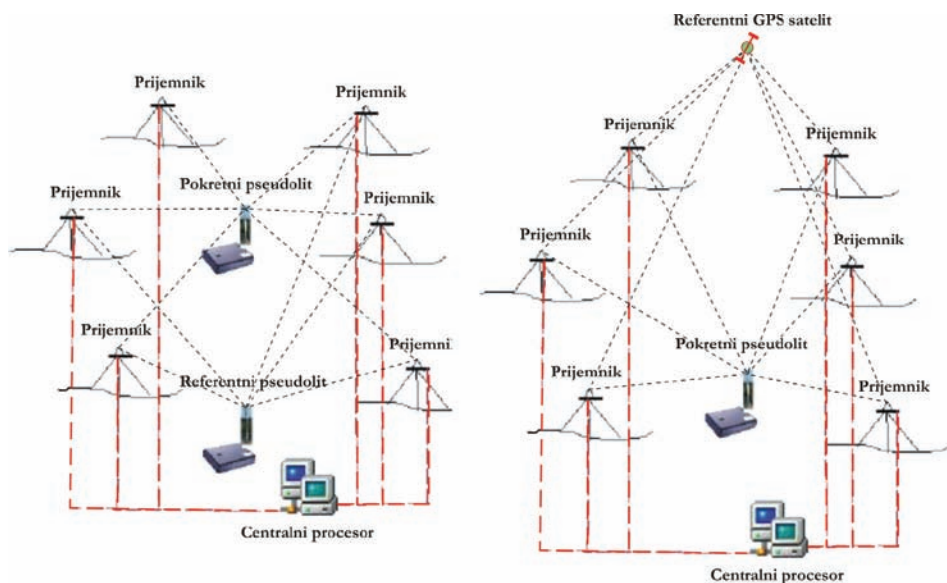
Slika 10. Konfiguracija pseudolita kao samostalnoga mjernog sustava (Dai i dr. 2001b).

U slučaju pozicioniranja u zatvorenim prostorima, pseudoliti se mogu postaviti bilo gdje, pa se prema tome geometrija pseudolita može maksimalno optimirati unaprijed, te tako ostvariti najbolje moguće rezultate. Nadalje, zbog njihove relativno niske cijene može se koristiti veći broj pseudolita, a može se odabrati i frekvencija emitiranja signala tako da bude optimalna za određeni zadatak. Prema tome, ako se koriste pseudoliti kao samostalni mjerni sustav, tada su, za razliku od GPS-a, svi instrumenti, uključujući prijemnike i pseudolite, pod izravnim kontrolom korisnika, što omogućuje veću fleksibilnost u izboru mjernog plana.

Međutim, pri pozicioniranju samo pomoću pseudolita i prijemnici i pseudoliti su stacionarni, geometrija se s vremenom ne mijenja, pa se postavlja pitanje ambiguiteta. Kako postoji mogućnost prilagodbe signala pseudolita, rješenje se nalazi u sličnom pristupu koji koriste dvofrekventni GPS-prijemnici, tj. uporaba multifrekventnog sustava koji može trenutačno riješiti ambiguitet, čak i u slučaju kada nema pokreta (Zimmerman i dr. 2000). To je slično konceptu sustava *Locata* (URL 3) i Novarijant (URL 2).

4.3. Inverzni sustav pozicioniranja temeljen na pseudolitima

Treća konfiguracija je “inverzno” pozicioniranje koje se temelji na pseudolitima, gdje “konstelacija” GPS-prijemnika sa precizno određenom “orbitom” prima signale pokretnog pseudolita. Sustav se sastoji od niza GPS-prijemnika, referentnog pseudolita (ili referentnoga GPS-satelita), pokretnog pseudolita i središnjeg sustava za obradu podataka (slika 11).



Slika 11. Konfiguracije “inverznog” pozicioniranja pomoću pseudolita (lijevo: dva pseudolita, desno: pseudolit i GPS-satelit) (Dai i dr. 2002).

Dakle, za “inverzno” pozicioniranje mogu postojati dvije konfiguracije mjernog sustava, ovisno o izboru korištenja referentnog ili pseudolita ili GPS-satelita. Sustav na slici 11 lijevo omogućuje veću fleksibilnost, a i troškovi su smanjeni jer je cjelokupna oprema smještena na Zemlji pa se čitav sustav može lakše optimirati. Koncept inverznog pozicioniranja pomoću pseudolita prvi je uveo Racquet i dr. (Racquet i dr. 1995), u svrhu preciznog pozicioniranja vojnih zrakoplova. Od tada su provedena mnoga istraživanja te je proširena primjena takvih sustava i za određivanje pomaka i deformacija objekata (npr. Dai i dr. 2000, 2001b, 2001c, 2002; Barnes i dr. 2002, 2003a, 2003b; Tsujii i dr. 2002).

5. Primjena pseudolita za pozicioniranje i navigaciju

U posljednja dva desetljeća pseudoliti su našli vrlo široku primjenu u različitim područjima pozicioniranja i navigacije, na otvorenom i u zatvorenim prostorima, pod zemljom, a također i za istraživanja na drugim planetima. U nastavku, zbog ograničenog prostora, slijedi samo nekoliko primjera primjene te tehnologije.

Primjena pseudolita za praćenje pomaka i deformacija

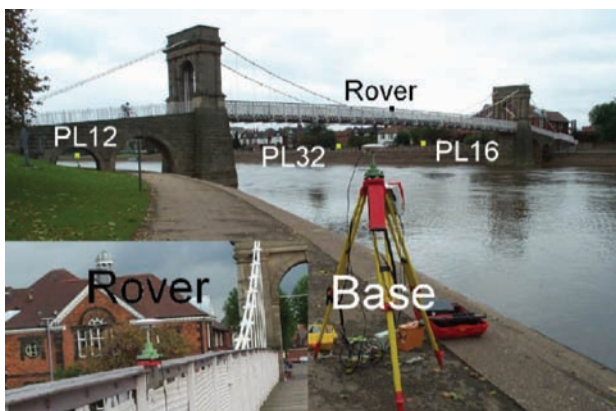
Zahvaljujući visokoj preciznosti faznih mjerenja, GPS-tehnologija našla je široku primjenu i na području fizikalne geodezije, kao što je mjerenje pomaka Zemljine kore, klizanje tla, a također i u inženjerskoj geodeziji, gdje se rutinski prati stabilnost objekata kao što su mostovi, brane, velike zgrade i sl. (deformacijska analiza). Osnovni razlog korištenja GPS-tehnologije njezina je mogućnost kontinuiranog (24/7) praćenja i postizanje centimetarske preciznosti pomoću relativnog pozicioniranja, na osnovi faznih mjerenja. Međutim, kao što je već rečeno, kvaliteta GPS-rezultata ovisi o broju i geometrijskom rasporedu vidljivih satelita. Osim toga, praćenje deformacija u zatvorenim prostorima (tuneli, pothodnici, hale) onemogućeno je zbog nedostupnosti GPS-signalu. Nadalje, zbog ograničenja koja se postavljaju pri izboru korištenih satelita, točnost visinske komponente je 2 do 3 puta lošija od horizontalnih. Za kontinuirano praćenje deformacija objekata (na osnovi epoha-po-epoha) poželjno je da mjerni sustav omogući dobivanje jednake preciznosti svih komponenti položaja, cijelo vrijeme. Međutim, korištenjem GPS-a preciznost položaja ne samo što neće biti ista za sve komponente, nego će se tijekom 24 sata i znatno mijenjati. To sve ograničava korištenje GPS-tehnologije u određenim primjenama, osobito ako se, kao u praćenju deformacija, zahtijeva visoka točnost određivanja visina. Pseudoliti mogu na različite načine otkloniti navedene nedostatke (Dai i dr. 2001b; Chen 2006; Meng i dr. 2004).

Kako bi se istražilo koje su potencijalne primjene pseudolita u praćenju pomaka i deformacija, provedeni su mnogobrojni eksperimenti. U članku (Dai i dr. 2001c) opisuju se dva eksperimenta provedena u svrhu ispitivanja mogućnosti pozicioniranja pseudolitima kao nadopuna GPS-u, u industrijskom okruženju. Rezultati su među ostalim pokazali da se preciznost pozicioniranja znatno povećala, s time da je preciznost vertikalne komponente gotovo istog reda veličine kao i preciznost horizontalne komponente položaja.

Za praćenje pomaka i deformacija objekata, u posljednje se vrijeme sve više koristi već spominjana tehnologija *Locata*, koja je svojom fleksibilnošću znatno unaprijedila čitav mjerni proces. Postoji mnogo radova na temu primjene te tehnologije za potrebe deformacijske analize (npr. Barnes i dr. 2004a, 2005, 2007a; Van Cranenbroeck 2007).

Praćenje pomaka i deformacija mostova

Za praćenje deformacija velikih građevinskih objekata, osobito savijanje (progib) dugačkih visećih mostova, poželjno je da mjerni sustav omogući jednaku preciznost svih položajnih komponenti, cijelo vrijeme. Korištenjem satelitskih sustava dobivena položajna točnost 3-D komponenti je nejednaka, a osim toga dostupnost GPS-satelita funkcija je geografske širine područja gdje se nalazi objekt i okolnih prepreka. Zbog toga je točnost komponente sjever-jug obično lošija od komponente istok-zapad u područjima sa srednjom širinom ($\varphi > 45^\circ$), a u najgorem slučaju horizontalna točnost pozicioniranja može se smanjiti na istu razinu kao i vertikalna komponenta (Meng i dr. 2004). Takvim mjerenjima nije moguće pravilno tumačiti stvarnu deformaciju objekta. Pseudoliti, smješteni na optimalnoj lokaciji, mogu upotpuniti geometriju GPS-satelita i time znatno poboljšati točnost 3-D pozicioniranja za praćenje progiba mosta. U članku (Barnes i dr. 2003a) opisuju se primjena takvog mjernog sustava na primjeru visećeg, pješačkog mosta u



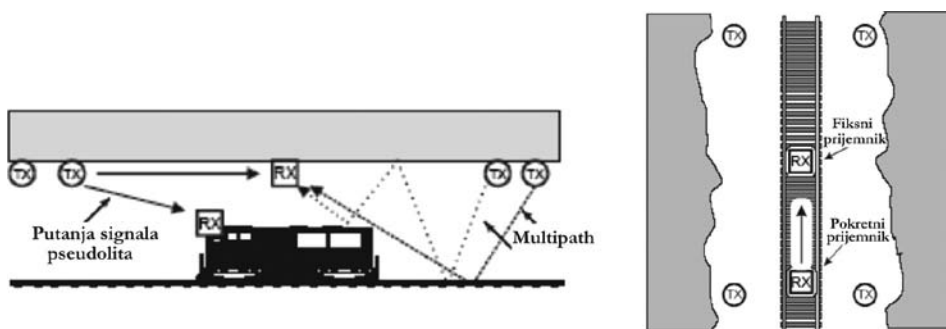
Slika 12. Lokacija pseudolita u odnosu na bazni i pokretne GPS-prijemnike (Barnes i dr. 2003a).

Nottinghamu, UK (slika 12). Rezultati su pokazali jednaku položajnu (subcentimetarsku) preciznost sviju komponenti položaja.

Neki od ostalih radova koji obrađuju korištenje pseudolita u praćenju deformacija mostova su npr. (Meng i dr. 2002, 2003; Barnes i dr. 2003b, 2007a).

Primjena pseudolita u tunelima

Kod podzemnih objekata kao što su tuneli, gdje su GPS-signalni nedostupni, postoji mogućnost navigacije postavljanjem pseudolita na pogodnim lokacijama unutar objekta. Poznavajući precizni položaj pseudolita i postavljanjem jedne antene na vozilo a druge fiksirane u tunelu, moguće je brzo rješavanje ambiguiteta i postizanje visoke točnosti rezultata. Kako u tunelu postoje mnoga ograničenja u pogledu smještaja pseudolita, npr. near/far problem, a osobito multipath, za postizanje centimetarske preciznosti pozicioniranja i centimetar/sekunda preciznosti u određivanju brzine, zahtijeva se vrlo pažljiv odabir parametara navigacijskog sustava. U članku (Michalson i Proгри 2000), opisan je prijedlog navigacijskog sustava prikazanog na slici 13, gdje je TX oznaka za pseudolite, a RX za prijemnike.

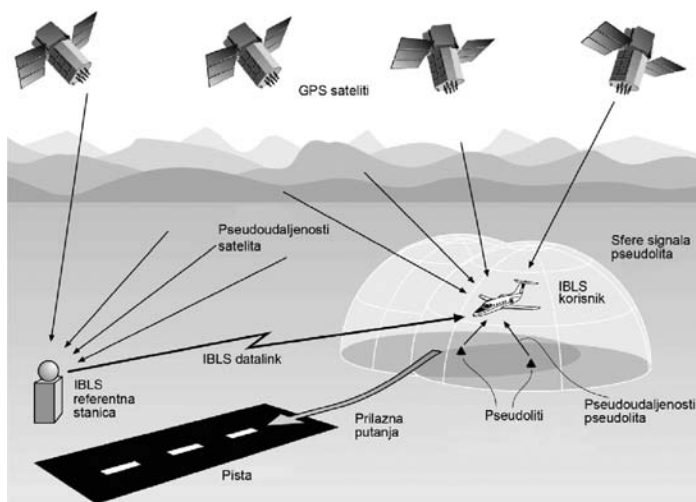


Slika 13. Konfiguracija navigacijskog sustava u tunelu (Michalson i Proгри 2000).

Uski prostor između zidova tunela i vlaka ograničava izbor lokacije pseudolita i prijemnika. Dodatno, u zakrivljenom tunelu vizurna linija (signala pseudolita) neprestano će se mijenjati, što ograničava međusobnu vidljivost između pseudolita i prijemnika. Dakle, lokacija mjerne opreme ovisi o obliku tunela. Rezultati eksperimenta pokazali su da za tunele u pravcu, duljine do 2 km, sustav od 3 para pseudolita, gotovo simetrično pozicioniranih, jedan prijemnik (fiksni) postavljen u središtu tunelskog svoda, a drugi (pokretni) na vrh lokomotive, mogu postići preciznost u položaju i brzini od cm, odnosno cm/sec. Ta se preciznost održava čak i kada se vlak kreće različitim konstantnim brzinama.

Primjena pseudolita u zračnom prometu

Jedna od najpoznatijih je primjena pseudolita za preciznu navigaciju zrakoplova prilikom slijetanja. To je također i jedna od najzahtjevnijih poznatih primjena te vrste navigacije. Čak i bez razmatranja problema preciznosti prilikom slijetanja, zrakoplovstvo je jedan od najzahtjevnijih tehnoloških izazova. Zbog preciznosti i brzine, CDGPS-sustavi temeljeni na pseudolitima dobili su prednost pri izboru u odnosu na mnoge postojeće i sustave u razvoju. Takav sustav naziva se IBLIS (The Integrity Beacon Landing System) i jedan je od prvih projekata na kojima su korišteni pseudoliti. Sastoji se od pseudolita i sinkrolita, omogućavajući precizno slijetanje zrakoplova i po lošem vremenu, te automatsko slijetanje. Mreža dobro postavljenih sinkrolita može omogućiti CDGPS-navigaciju čak i ako je dostupan samo jedan signal GPS-satelita (Cobb 1997). Sustav IBLIS s vremenom je postao danas dobro poznat LAAS (Local Area Augmentation System) (Stone i dr. 1999a), (slika 14).

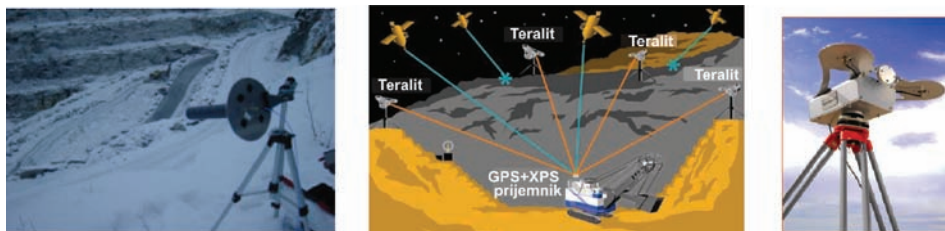


Slika 14. Shematski prikaz sustava IBLIS (LAAS) (Cobb 1997).

O primjeni pseudolita za precizno slijetanje zrakoplova može se naći i u člancima (Cohen i dr. 1993; Baltrop i dr. 1996; Pervan i Parkinson 1997; Soon i dr. 2003; Martin i dr. 2007; Lee i dr. 2008).

Primjena pseudolita u rudarstvu

GPS-tehnologija našla je svoju ulogu i u automatizaciji pojedinih procesa u rudarstvu (otvorena rudarska okna). Međutim, kada se radovi odvijaju na dnu rudarske jame, gdje je vidljivost neba oko 30° od zenita, potrebno je konstelaciju GPS-satelita nadopuniti pseudolitima, koji se postavljaju po rubu jame (slika 15a), (npr. Cobb 1997; Barnes i dr. 2007b). U novije doba, proizvođači mjerne opreme tvrtke Novariant (URL 2) razvili su tehnologiju koja se temelji na novom tipu pseudolita, tzv. *Teralitu* (engl. Terralites), (slika 15c). Sustav Teralit XPS sastoji se od mreže odašiljačkih stanica – teralita i neograničenog broja pokretnih prijemnika (slika 15b).



Slika 15. Primjena pseudolita u rudarstvu (URL 2).

Teraliti odašilju XPS signale (Extended Positioning Signal) do prijemnika, omogućujući dobivanje visoko preciznih rezultata pozicioniranja u područjima gdje postoje zapreke GPS-signalima. Povećanjem dubine jame mijenjaju se i lokalni uvjeti, međutim teraliti se mogu lako premjestiti na odgovarajući položaj.

Primjena pseudolita u cestovnom prometu

Intelligent Vehicle Highway System (IVHS), tj. sustav cestovne navigacije vozila, pretpostavlja da će automobili u budućnosti biti u stanju sami izvoditi navigaciju do određene mjere. Na otvorenim cestama, gdje su GPS-sateliti kontinuirano vidljivi, taj je zahtjev lako ispuniti. Međutim, automobili također moraju prolaziti kroz tunele i urbane kanjone, gdje je GPS-signal rijetko ili uopće nije dostupan (Altmayer 1998). Strateški postavljeni, pseudoliti mogu pomoći u rješavanju tog problema, čime bi dobrobiti sustava IVHS postale još šire dostupne.

Primjena pseudolita u industrijskim postrojenjima

Potreba za pseudolitima javlja se posebno u zatvorenim prostorima kao što su velike tvorničke hale, pothodnici, stanice podzemne željeznice itd. (Barnes i dr. 2004b; Kee i dr. 2003). Jedan takav sustav uspješno je primijenjen u pozicioniranju tvorničke opreme i materijala te povezan s GIS-sustavom u svrhu praćenja rada i vođenja inventarizacije tvornice čeličnih ploča Bluescope u Australiji (slika 16), (Barnes i dr. 2004b).



Slika 16. Pseudoliti u pozicioniranju tvorničke opreme i materijala (Barnes i dr. 2004b).

Primjena pseudolita u pomorstvu

Kako se za pomorsku navigaciju uglavnom koristi GPS, problem koji nastaje u uskim prolazima vezan je za okolne prirodne i umjetne prepreke GPS-signalu. Jednaki se problem javlja i u slučaju navigacije i pristajanja u velikim lukama te posebno u velikim lučkim terminalima pri praćenju i upravljanju ukrcajem, iskrcajem i skladištenjem robe. Poseban je slučaj izvođenje hidrografske izmjere u uskim kanalima i priobalnim područjima sa zaklonjenim GPS-signalom. Taj problem je moguće riješiti upotrebom pseudolita za nadopunu konstelacije GPS-satelita.

Danas, veliki lučki terminali zahtijevaju sveobuhvatnu navigacijsku tehnologiju kako bi na velikom području mogli precizno locirati kontejnere i dizalice. Time se povećava učinkovitost u logistici i stvara dodatna vrijednost za upravitelje luka. Navigacijski podaci uključuju se u operativni sustav terminala (TOS).

Današnje luke opremljene su dizalicama visoke tehnologije koje koriste sofisticiranu tehnologiju za pozicioniranje poput GPS-a, INS-a i odometara. Međutim, u nekim slučajevima to nije dovoljno točno. Zbog toga se na visoke kranove postavljaju pseudoliti (slika 17), čime se povećava pouzdanost i preciznost navigacijskog sustava te tako zadovoljavaju strogi zahtjevi pozicioniranja u lučkim terminalima.

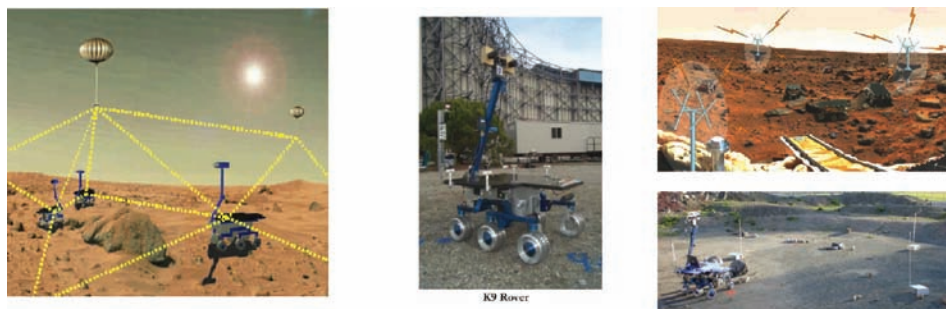


Slika 17. Pseudoliti postavljeni na visoke kranove kao dopuna GPS-a u lukama (URL 4).

Luke, tjesnaci i drugi uski prolazi također imaju isti problem kao i otvorena rudnička okna. U tim je slučajevima zaklonjen horizont, odnosno smanjen je broj dostupnih satelita te je za dopunu konstelacije potrebno uvođenje pseudolita. Za uske kanale zahtjevi preciznosti navigacije i pozicioniranja manji su od 10 cm. Pseudoliti osiguravaju dovoljan broj navigacijskih signala za određivanje položaja i omogućuju sigurnu navigaciju plovilima kroz zaklonjene prolaze (Morley 1997a; Morley i Lachapelle 1997b; Dixon i Morrison 2008; URL 4). U slučaju hidrografske izmjere, pseudoliti omogućuju neometanu izmjeru bez straha od gubitka inicijalizacije prilikom približavanja obali i visokim objektima koji zaklanjaju GPS-signal.

Primjena pseudolita za istraživanja na Marsu

Pri istraživanju površine drugih planeta, kao npr. Marsa, roveri (roboti) izvode mnogo samostalnih zadataka, npr. kretanje prema određenom cilju istraživanja, postavljanje instrumenata, skupljanje uzoraka i sl. U tu svrhu potrebno je da roveri “znaju” gdje se nalaze ciljevi u odnosu na njihov trenutačni položaj i kako zaobići prepreke na svojem putu do cilja. Ta mogućnost precizne (cm) navigacije i pozicioniranja ključni je zahtjev za samostalno kretanje rovera u nesigurnom okruženju. I tu su došle do izražaja sve prednosti korištenja pseudolita. Za postizanje centimetarske preciznosti unutar sustava potrebno je jednako poznavanje položaja svakog pseudolita. Kako se njihov položaj ne može odrediti kao na Zemlji, Aerospace Robotics Laboratory (ARL) Sveučilišta u Stanfordu, u suradnji s NASA Ames Research Center, razvili su navigacijski sustav temeljen na pseudolitima, sposoban za samostalno određivanje svojeg položaja, nazvan Self-Calibrating Pseudolite Array (SCPA) (LeMaster i Rock 1999, 2001; LeMaster 2002; Matsouka i dr. 2004). Sustav koristi isključivo transivere umjesto uobičajeno odvojenih prijemnika i pseudolita. Naime, parovi uređaja imaju dvosmjernu komunikaciju kojom poništavaju pogreške satova. SCPA-navigacija slijedi iste principe kao fazni diferencijalni GPS (CDGPS). Međutim, umjesto da koristi konstelaciju satelita, SCPA se sastoji od nekoliko stacionarnih transivera raspoređenih u mrežu (slika 18), a omogućuje sve prednosti CDGPS-a, kao što je centimetarska preciznost i 3-D relativno pozicioniranje u lokalnom području.



Slika 18. 3-D navigacija na Marsu pomoću mreže transivera SCPA (LeMaster i dr. 2002).

Mogućnosti sustava SCPA prethodno su ispitane na terenu u Istraživačkom centru NASA Ames, s K9 Mars Roverom (slika 18 u sredini). Rezultati su pokazali da je bez prethodnog poznavanja točnog položaja pseudolita i bez korištenja GPS-satelita, SCPA u mogućnosti ostvariti centimetarsku položajnu preciznost te je kao samostalan navigacijski sustav vrlo pogodan za buduća istraživanja na Marsu.

6. Zaključak

Iako je tehnologija GNSS-a nezaobilazna u suvremenom načinu preciznog pozicioniranja i navigacije, njezina primjena ima određenih ograničenja; nemogućnost primjene u zatvorenim prostorima i pod zemljom te ovisnost kvalitete rezultata o broju i rasporedu vidljivih satelita. Primjena pseudolita, terestričkih odašiljača signala, može omogućiti ili znatno poboljšati učinak satelitskih mjernih sustava. Mogu se koristiti kao nadopuna konstelacije GNSS satelita, omogućujući dodatne izvore signala kada je dostupnost satelita ograničena, a također i kao samostalan mjerni sustav za primjenu u zatvorenim prostorima, a također i pod zemljom ili na drugim planetima.

Osnovni je zaključak da Globalni navigacijski satelitski sustavi imaju vrlo značajnu ulogu u uspostavi geoprostorne informacijske infrastrukture širom svijeta. U današnje doba GNSS je vodeći mjerni sustav za pozicioniranje i navigaciju na mnogim područjima primjene. Možda je jedan od najvažnijih doprinosa GNSS-a što je potaknuo svijest o značaju položajnih informacija. Danas korisnici očekuju precizne i pouzdane informacije o položaju bilo kojeg objekta u realnom vremenu, bilo gdje i u svako doba. Međutim, sadašnji satelitski sustavi pozicioniranja ne mogu ispuniti sve navedene zahtjeve koji se odnose na položajne informacije, što uključuje preciznost, pouzdanost, dostupnost i cjelovitost. Prema tome, bilo je potrebno postojeći mjerni sustav satelitskog pozicioniranja unaprijediti novim tehnologijama, čak ga pod određenim uvjetima i zamijeniti. Nastala kao "nus-proizvod" razvoja GPS-sustava, koncept i tehnologija pseudolita pokazala je velike mogućnosti u ispunjenju tih zahtjeva.

Literatura

- Altmayer, C. (1998): Experiences using pseudolites to augment GNSS in urban environment, Proceedings of ION-GPS-98, Nashville, Tennessee, US, September 15-18, 981-991.
- Badea, V., Eriksson, R. (2005): Indoor navigation with pseudolites (fake GPS sat.), Master thesis, University of Linköping, Sweden.
- Barltrop, K. J., Stafford, J. F., Elrod B. D. (1996): Local DGPS with pseudolite augmentation and implementation considerations for LAAS, 9th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation GPS ION-96, Kansas City, Missouri, 17-20 Sept., 449-459.
- Barnes J. B., Wang, J., Rizos, C., Tsujii, T. (2002): The performance of a pseudolite-based positioning system for deformation monitoring. 2nd Symp. on Geodesy for Geotechnical & Structural Applications, Berlin, Germany, 21-24 May, 326-337.

- Barnes J., Rizos, C., Wang, J., Meng, X., Cosser, E., Dodson, A. H., Roberts, G. W. (2003a): The monitoring of bridge movements using GPS and pseudolites. 11th Int. Symp. on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 25-28 May, 563-572.
- Barnes J., Rizos, C., Lee, H. K., Roberts, G. W., Meng, X., Cosser, E., Dodson, A. H. (2003b): The integration of GPS Pseudolites for Bridge Monitoring, Proceedings of the International Association of Geodesy IAG General Assembly Sapporo, Japan, June 30 – July 11, 2003.
- Barnes, J. B., Rizos, C., Wang, J., Small, D., Voight, G., Gambale, N. (2003c): Locatanet: A new positioning technology for high precision indoor and outdoor positioning, 16th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institute of Navigation, Portland.
- Barnes, J. B., Rizos, C., Wang, J., Small, D., Voight, G., Gambale, N. (2003d): Locata-Net: Intelligent time-synchronised pseudolite transceivers for cm-level stand-alone positioning, 11th Int. Assoc. of Institutes of Navigation World Congress, Berlin Germany, 21-24 October.
- Barnes, J., Rizos, C., Kanli, M., Pahwa, A., Small, D., Voigt, G., Gambale, N., LaMance, J. (2004a): Structural Deformation Monitoring using Locata, 1st FIG International Symposium on Engineering. University of Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004.
- Barnes, J., Rizos, C., Kanli, M., Small, D., Voigt, G., Gambale, N., LaMance, J., Nunan, T., Reid, C. (2004b): Indoor Industrial Machine Guidance Using Locata: A Pilot Study at Bluescope Steel, 60th Annual Meeting of ION, Dayton Ohio, 6-9 June.
- Barnes, J., Rizos, C., Kanli, M., Pahwa, A., Small, D., Voigt, G., Gambale, N., LaMance, J. (2005): High Accuracy Positioning Using Locata's Next Generation Technology, 18th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institute of Navigation, Long Beach, California, 13-16 September 2005, 2049-2056.
- Barnes, J., Rizos, C., Kanli, M., Pahwa, A. (2006): Structural Deformation Monitoring using Locata/s Radio-Location Technology, 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, May 22-24.
- Barnes, J., Van Cranenbroeck, J., Rizos, C., Pahwa, A., Politi, N. (2007a): Long Term Performance Analysis of a New Ground-transceiver Positioning Network (Locata-Net) for Structural Deformation Monitoring Applications, Leica FIG Conference Paper on Structural Deformation Applications, Hong Kong, May 2007.
- Barnes, J., Lamance J., Lilly, B., Rogers, I., Nix, M., Balls, A. (2007b): An integrated Locata & Leica Geosystems positioning system for open-cut mining applications, Institute of Navigation Conference (ION), Fort Worth Texas, Sept 2007.
- Bartone, C. (1996): Advanced pseudolite for dual-use precision approach applications, Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 96, September, 95-105.
- Bartone, C. (1998): Ranging Airport Pseudolite for Local Area Augmentation Using the Global Positioning System, Ph. D. Dissertation, School of Electrical Engineering and Computer Science, Ohio University.
- Chen, J. (2006): Pseudolite-augmented GPS survey technique for deformation monitoring: analysis and experimental study, 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, May 22-24.

- Choi, I. K., Wang, J., Han, S., Rizos, C. (2000): Pseudolites: a new tool for surveyors? Proceeding of the 2nd Trans Tasman Survey Congress, Queenstown, New Zealand, 20-26 August, 141-149.
- Cobb, H. S. (1997): GPS pseudolites: Theory, design, and applications, Ph. D. Dissertation, Stanford University.
- Cohen, C. E., Pervan, B. S., Cobb, H. S., Lawrence, D. G., Powell, J. D., Parkinson, B. W. (1993): Real time cycle ambiguity resolution using a pseudolite for precision landing of aircraft with GPS, The Second International Symp. on Differential Satellite Navigation Systems DSNS/93, Amsterdam, Netherland, March 30-April 2, 171-178.
- Dai, L., Zhang, J., Rizos, C., Han, S., Wang, J. (2000): GPS and pseudolite integration for deformation monitoring applications, Proceedings of 13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, Utah, 19-22 Sept., 1-8.
- Dai, L., Rizos, C., Wang, J. (2001a): The role of pseudo-satellite signals in precise GPS-based positioning, *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 3, No.1, 33-44.
- Dai, L., Wang, J., Rizos, C., Han, S. (2001b): Pseudo-satellites applications in deformation monitoring, *GPS Solutions*, 5(3), 80-87.
- Dai, L., Wang, J., Rizos, C., Han, S. (2001c): Applications of pseudolites in deformation monitoring systems, 10th FIG Int. Symp. on Deformation Measurements, Orange, California, 19-22 March, 11-22.
- Dai, L., Wang, J., Tsujii, T., Rizos, C. (2002): Inverted pseudolite positioning and its applications, *Survey Review*, 36(286), 602-611.
- Dai, L. (2002): Augmentation of GPS with GLONASS and Pseudolite Signals for Carrier Phase-Based Kinematic Positioning, Ph. D. Dissertation, School of Surveying and SIS, The University of New South Wales, Australia.
- Dixon, S. C., Morrison, R. G. (2008): A Pseudolite-Based Maritime Navigation System: Concept through to Demonstration. *Journal of Global Positioning Systems* (2008), Vol. 7, No. 1: 9-17.
- Dovis, F., Kandus, G., Magli, E., Olmo, G. (2000): Integration of stratospheric platforms within the GNSS2 system, Proceedings of GNSS-2000, Edinburgh, Scotland, UK, 1-4 May 2000.
- Grejner-Brzezinska, D., Yi, Y., Wang, J. (2002): Design and navigation performance analysis of an experimental GPS/INS/PL system, 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Applications, Berlin, Germany, 21-24 May, 452-461.
- Harrington, R. L., Dolloff, J. T. (1976): The inverted range: GPS user test facility, *IEEE PLANS/76*, San Diego, California, 1-3 Nov., 204-211.
- Hill, J. M., Progni, I. F., Michalson, W. R. (2001): Techniques for Reducing the Near-Far Problem in Indoor Geolocation Systems, Proceedings of the 2001 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, January 22 - 24, 2001, Long Beach, CA, 860 - 865.
- Jovancevic, A., Bhatia, N., Noronha, J., Sirpatil, B., Kirchner, M., Saxena, D. (2007): Tests of a Flexible Pseudolite-Based Navigation System, *GPS World*, March 1.
- Jun, H., Kee, C. (2006): High Accuracy Pseudolite-based Navigation System: Compensating for Right-Hand Circularly Polarized Effect, *The Journal of Navigation*, 59, 307-320.

- Kee, C., Jun, H., Yun, D., Kim, B., Kim, Y., Parkinson, B., Lenganstein, T., Pullen, S., Lee, J. (2000): Development of Indoor Navigation System using Asynchronous Pseudolites, Proceedings of ION GPS-2000, Salt Lake, Utah, USA, September 19-22, 1038-1045.
- Kee, C., Yun, D., Jun, H. (2003): Precise calibration method of pseudolite positions in indoor navigation systems, Computers and Mathematics with Applications 46 (10-11), 1711-1724.
- Klein, D., Parkinson, B. W. (1986): The Use of Pseudo-Satellites for Improving GPS Performance, Global Positioning System, Vol. III, Institute of Navigation, Washington, DC.
- Lee, H. K., Wang, J., Rizos, C. (2002): Kinematic positioning with an integrated GPS/pseudolite/INS, 2nd Symp. on Geodesy for Geotechnical & Structural Applications.
- Lee, H. K., Soon, B., Barnes, J., Wang, J., Rizos, C. (2008): Experimental Analysis of GPS/Pseudolite/INS Integration for Aircraft Precision Approach and Landing, The Journal of Navigation, 61, 257-270.
- LeMaster, E., Rock, M. (1999): Mars exploration using self-calibrating pseudolite arrays, Proceedings of US Institute of Navigation GPS-99, Nashville, Tennessee, 14-17 Sept., 1549-1558.
- LeMaster, E., Rock, M. (2001): A Local-Area GPS Pseudolite-based Mars Navigation System, IEEE 10th International Conference on Advanced Robotics, Budapest, Hungary, August 2001.
- LeMaster, E. (2002): Self-Calibrating Pseudolite Arrays: Theory and Experiment, PhD thesis, Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford, CA.
- LeMaster, E., Matsuoka, M., Rock, S. M. (2002): Field Demonstration of a Mars Navigation System Utilizing GPS Pseudolite Transceivers, 2002 IEEE Position, Location, and Navigation Symposium, Palm Springs, CA, April.
- Martin, S. (1999): Antenna diagram shaping for pseudolite transmitter antennas – a solution to the near-far problem, 12th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation GPS ION-99, Nashville, Tennessee, 14-17 Sept., 1473-1482.
- Martin, S., Kuhlen, H., Abt, T. (2007): Interference and Regulatory Aspects of GNSS Pseudolites, Journal of Global Positioning System, Vol. 6, No. 2, 98-107.
- Matsouka, M., Rock, S. M., Bualat, M. G. (2004): Autonomous Deployment of a Self-Calibrating Pseudolite Array for Mars Rover Navigation, 2004 IEEE Position, Location, and Navigation Symp. (PLANS), Monterey, CA, April 2004
- Meng, X., Roberts, G.W., Dodson, A. H., Cosser, E., Noakes, C. (2002): Simulation of the effects of introducing pseudolite data into bridge deflection monitoring data, 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 21-24 May, 2002, Berlin, 372-381.
- Meng, X., Roberts, G.W., Cosser, E., Dodson, A. H. (2003): Real-time bridge deflection and vibration monitoring using an integrated GPS/Accelerometer/pseudolite system, Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 25-28 May.

- Meng, X., Roberts, G.W., Dodson, A. H., Cosser, E., Barnes, J., Rizos, C. (2004): Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural deformation monitoring: analytical and empirical studies, *Journal of Geodesy*, Volume 77, Number 12 / June, 2004, 809-822.
- Michalson, M. R., Proгри, I. F. (2000): Assessing the accuracy of underground positioning using pseudolites, *Proceedings of US Institute of Navigation GPS-2000*, Salt Lake City, Utah, 19-22 September, 1007-1015.
- Montillet, J. P., Meng, X., Roberts, G. W., Taha, A., Hancock, C., Ogundipe, O. (2007): Achieving centimetre-level positioning accuracy in urban canyons with Locata technology, *Journal of GPS – Journal Paper*, Dec 2007.
- Morley, T. (1997a): Augmentation of GPS with Pseudolites in a Marine Environment, MSc Thesis, published as Report No. 20108, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Morley, T., Lachapelle, G. (1997b): GPS Augmentation with Pseudolites for Navigation in Constricted Waterways. *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*, Vol.44, No. 3.
- Ning, F. S., Kao, S. P., Chang, C. C., Meng, X. (2004): Preliminary Testing of Pseudolite to Improve GPS Precision, 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, UK, 28 June – 1 July.
- Pervan, B., Parkinson, B. (1997): Cycle ambiguity estimation for aircraft precision landing using the Global Positioning System, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, 4, 681-689.
- Proгри, I.F. (2003): An assessment of indoor geolocation systems, Ph. D. Dissertation, Worcester Polytechnic Institute, USA.
- Raquet, J., Lachapelle, G., Qiu, W., Pelletier, C., Nash, T., Fenton, P., Holden, T. (1995): Development and Testing of a Mobile Pseudolite Concept for Precise Positioning, 8th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation GPS ION-95, Palm Springs, California, 12-15 September, 817-826.
- Rizos, C. (2005): Pseudolite Augmentation of GPS, Workshop on Geolocation Technology to Support UXO Geophysical Investigations, Annapolis, Maryland, 1-2 June.
- Soon, B. H. K., Poh, E. K., Barnes, J., Zhang, J., Lee, H. K., Rizos, C. (2003): Flight test results of precision approach and landing augmented by airport pseudolites. 16th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institute of Navigation, Portland, Oregon, 9-12 September, 2003.
- Stone, J. M., Powell, J. D. (1998): Precise positioning with GPS near obstructions by augmentation with pseudolites, *Proceedings of IEEE PLANS*, Palm Springs, CA, 562-569.
- Stone, J., LeMaster, E., Powell, D., Rock, S. (1999a): GPS pseudolite transceivers and their applications, *Proceedings of ION-NTM-99*, San Diego, US.
- Stone, J., Powell, D. (1999b): Precise positioning using GPS satellites and pseudolites emphasizing open pit mining applications, 4th Int. Symp. on Satellite Navigation Technology and Applications, Brisbane, Australia, 20-23 July.

- Tsujii, T., Rizos, C., Wang, J., Dai, L., Roberts, C., Harigae, M. (2001): A navigation/positioning service based on pseudolites installed on stratospheric airships, The 5th International Symposium on Satellite Navigation Technology and Applications, Canberra, July 24-27.
- Tsujii, T., Hariage, M., Barnes, J. B., Wang, J., Rizos, C. (2002): Experiments of inverted pseudolite positioning for airship-based GPS augmentation system, 15th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Portland, Oregon, 24-27.
- Van Cranenbroeck, J., Barnes, J., Rizos, C., Pahwa, A., Politi, N. (2007): The potential of a ground based transceiver (LocataLite) network for structural monitoring of bridges and dams, Leica Conference Paper for Institute of Civil Engineers (ICE) Conference, Beijing China, Sept.
- Wang, J., Tsujii, T., Rizos, C., Dai, L., Moore, M. (2000): Integrating GPS and pseudolite signals for position and attitude determination: Theoretical analysis and experiment results. 13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, Utah, 19-22 September, 2252-2262.
- Wang, J., Tsujii, T., Rizos, C., Dai, L., Moore, M. (2001): GPS and pseudo-satellites integration for precise positioning, Geomatics Research Australasia, 74, 103-117.
- Wang, J. (2002a): Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems, Journal of Global positioning Systems, Vol. 1, No. 1. 48-56.
- Wang, J., Lee, H. K. (2002b): Impact of pseudolite location errors on positioning, Geomatics Research Australasia, 77, 81-94.
- Zimmerman, K. R., Cannon, R. H. Jr. (1996): Experimental demonstration of an indoor GPS-based sensing system for robotic applications, Navigation 43(4), 375-395.
- Zimmerman, K. R., Cohen, C. E., Lawrence, D. G., Montgomery, P. Y., Cobb, H. S., Melton, M. C. (2000): Multi-frequency pseudolites for instantaneous carrier ambiguity resolution, 13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, Utah, 19-22 Sept., 1024-1033.
- URL 1: International Association of Geodesy (IAG), www.gmat.unsw.edu.au/pseudolite, (10.03.2009.).
- URL 2: NOVARIANT, www.novariant.com, (25.03.2009.).
- URL 3: Locata, www.locatacorp.com, (02.04.2009.).
- URL 4: Naviva, www.naviva.fi, (16.04.2009.).

Development and Pseudolite Applications in Positioning and Navigation

ABSTRACT. Although the Global navigation satellite systems (GNSS) introduced a revolutionary change in the areas of positioning and navigation, it is well known that the precision, reliability, availability and integrity of the results obtained by this technology, heavily depend on the number and geometric distribution of the satellites being tracked. This is especially problem in areas with limited sky visibility, such as urban canyons, valleys, deep open-pit mines, larges construction sites. Furthermore, indoors, or underground, such as factory halls, inside buildings, tunnels, positioning is totally disabled due to unavailability of satellite signals. These limitations can be overcome by including additional ranging signals transmitted from pseudolites (the term derived from the pseudo-satellite), ground-based generators and transmitters of GPS-like signals, for use in the local area.

Pseudolites can be used to augment the GNSS satellite constellation in case of inadequate satellites coverage and to improve the geometry, and as an independent measurement system that can completely replace the GNSS, such as indoors, underground or on the surface of other planets.

While this may seem like a new measurement technology, the concept of ground-based transmitters can be tracked back to the early development of GPS, when the pseudolites been designed to test the GPS user equipment. Since than, seeing that the pseudolites can be successfully used for other purposes, researches teams around the world continuously improve and develop new pseudolite concepts and hardware, trying to adapt them to the requirements of certain applications.

This paper presents the theoretical basis, advantages and disadvantages, technology development of pseudolites, further research, and new construction, and application of pseudolites in some areas of positioning and navigation.

Keywords: pseudolite, GPS augmentation, indoor positioning and navigation.

Prihvaćeno: 2009-08-24