

Satelitska podpora vplutju v pristanišče in privezovanju

Franc Dimc, Blaž Luin, Marko Perkovič

Fakulteta za pomorstvo in promet, Univerza v Ljubljani, Pot pomorščakov 4, Portorož

E-pošta: franc.dimc@fpp.uni-lj.si

Satellite-based harbour entrance and berthing

Abstract. Navigational measures at the port entrance are well regulated by IMO performance specifications, but with the demand for more transported goods, safety requirements are evolving. Modern maritime electronic positioning systems on their way to autonomous ships develop integrity measures and exchange information with other ships and authorities. An adaptive and satellite-based solutions lead to radio navigation aids similar to those used in aviation domain.

1 Uvod

Zgoščevanje ladijskega prometa narekuje v priobalni plovbi še posebej natančno spremljanje in pogosto izmenjavo zanesljivih podatkov [1]. Nerazumevanje ali slabo tolmačenje podatkov je eden od glavnih vzrokov trčenj in nasedanj ladij. Zato morajo biti ladijskim častnikom v straži, pilotom na poveljniškem mostu in zaradi avtomatskega pošiljanja podatkov tudi operaterjem obalne nadzorne službe (Vessel Traffic System, VTS) na voljo zanesljivi podatki zadosti časa, da lahko ustrezno odločajo in ukazujejo izvajanje potrebnih manevrov. Če odmislimo klasični pogled skozi okno, se pretežno odločajo glede na podatke informacijskega sistema za spremljanje in prikaz podatkov na elektronski karti (ECDIS) o položaju plovila, navigaciji in času (PNT), ki temelji na klasičnih instrumentih (kompas, RADAR, brzinomer, globinomer) in na svetovnih satelitsko podprtih sistemih (GNSS). Navigacijske naprave morajo zaradi doslej povedanega izpolnjevati posebne zahteve po točnosti, integriteti, razpoložljivosti in neprekinjenosti dostopa do podatkov PNT [2].

Ladja s sporočili avtomatskega identifikacijskega sistema (AIS) seznanja posadke bližnjih ladij in operaterja VTS s trenutnim položajem in integriteto svojih naprav. Napake modeliranja v podatkih naprav so posledica predvsem omejitev modeliranja pogojev sprejema satelitskih signalov in le delnega upoštevanja ostalih omejitev ladijskih elektronskih naprav.

Integriteta naprav, ki so izvirni podatkov PNT, je razvrščena v tri razrede: visok, srednji in nizek. Samodatek o integriteti uporabniku sporoča, ali je sistem trenutno sposoben omogočati varno plovbo oz. je zanj sploh uporaben [3]. Integriteto GNSS opisujejo: mejna vrednost oz. meja opozarjanja (*alert limit, AL*), čas do alarma in ocena tveganja integritete. Glede na zahteve Mednarodne pomorske organizacije (*International Maritime Organization*, IMO) za plovbo v pristanišču

je za AL določenih 25 m, napaka določanja položaja do 10 m, čas do alarma zaradi nedelovanja sistema pa 10 s, tveganje integritete pa 10^{-5} v 3 urah [1], [2]. Med plovbo brez znanih pravih vrednosti sprejemnik GNSS sam ocenjuje napake določanja položaja plovila. Po algoritmu za spremljanje stanja integritete naprave (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM*) sodobni sprejemnik stalno računa na svojo statistiko podatkov psevdorazdalj vezano trenutno oceno napake izračuna položaja, imenovano stopnja zaščite (*Protection Level, PL*). Tveganje izpada integritete pa pomeni verjetnost, da bo sprejemnik kadarkoli s signali GNSS uporabniku določil napako položaja, povzročeno ali z napakami instrumentov na ladji (*Vessel Technical Error, VTE*) ali s sistematskimi navigacijskimi napakami navigacijskih sistemov (*Navigational Systematic Error, NSE*), ki bo takrat od pravega položaja oddaljen več kot za AL, ne da bi se v predpisanem času od pojava napake sprožil alarm, ki se lahko prenese kot posebna zastavica (*RAIM flag*) v sporočilih AIS. V praksi zaenkrat nastopajo omejitve, ker nekateri sprejemniki sploh ne izdajajo zastavice RAIM v sporočilih in ker morda ladijski AIS zastavice ne prenaša.

Če torej sprejemnik GNSS v priobalni plovbi pravočasno opozori odgovornega, da je PL preseгла AL ali da podatki niso na voljo ter se tako razglasi za nezanesljivega, ostane kot naprava vreden zaupanja, saj je pravočasno opozoril, naj se odgovorni ne zanaša na njegove trenutne podatke. S katerimi podatki pa si bo pri odločanju pomagal v tem primeru, je odvisno od senzorjev in naprav, ki so še vključene v ECDIS.



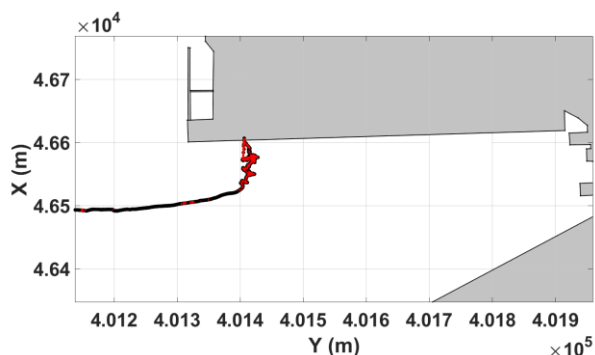
Slika 1. Skica pojava večpotja (večzarkovni prenos), Koper.

2 Območja napak podatkov GNSS

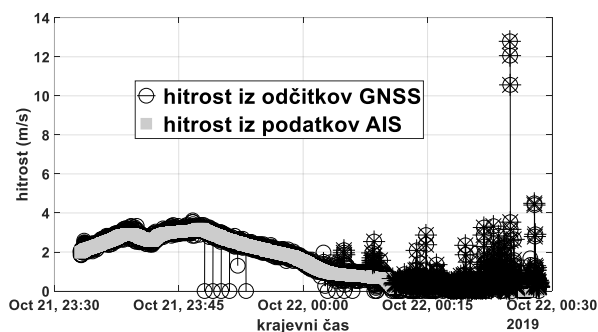
Ladijskim pilotom napake v podatkih sprejemnikov GNSS določanja položaja dejansko otežujejo pregled nad stanjem plovbe in usklajevanje s poveljniki

vlačilcev, privezovalci ladje ter službo VTS. V pristanišču se ladjam z mlajšimi generacijami sprejemnikov GNSS dogaja redkeje, ladjam s starejšimi, večinoma eno-frekvenčnimi, pa se sorazmerno pogosto zgodi, da se jim pri pristaniških napravah zaradi odbojev satelitskih signalov od kovinskih konstrukcij pojavljajo težave zaradi nenadnih izrazitih skokov.

Pojav splošno ponazarja Slika 1, rezultate tega pojava pa štiri slike, ki ji sledijo. GNSS sledi ladij sta prikazani na Sliki 2 in Sliki 4, obrežje je prikazano s sivo barvo. Opazen je vpliv večpotja oz. večžarkovnega prenosa (*multipath*), ki se zaradi napak pri določanju psevdorazdalj, odraža v določanju položaja in iz njih izračunanih trenutnih vrednostih hitrosti (na Sliki 3 in Sliki 5) med manevrom pristajanja 1. in 2. bazenu pristanišča Koper.



Slika 2. GNSS sled (D96, UTM) pristajanja kontejnerske ladje Concord: 6500 TEU, LOA 304,16 m, Koper, 22.10.2019



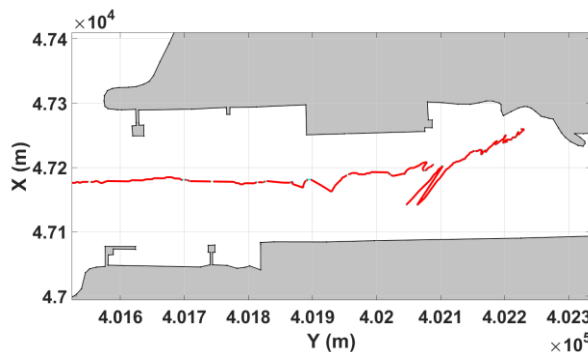
Slika 3. Med plovbo v 1. bazenu zabeležena hitrost ladje Concord, Koper, 22.10.2019.

Krogi na Sliki 3 in Sliki 5 označujejo hitrosti, izračunane iz odčitkov položajev GNSS, sivi kvadrati pa odčitke hitrosti, ki jih je za AIS priredil GNSS. S črnimi zvezdicami poudarjeni izračuni, ko hitrost iz odčitkov položajev GNSS premikajoče ladje več kot dvakrat presega hitrost z AIS, so bili zabeleženi, ko se je ladja z manjšo hitrostjo bližala pomolu.

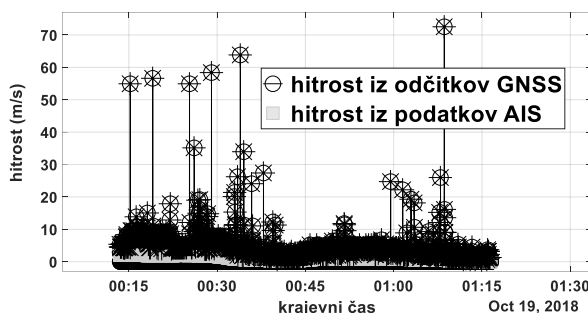
V težavah s podatki položaja je potrebno z RAIM zaznati porast NSE, kar je pojem, uvožen iz letalskega prometa. Največjo NSE je mogoče opisati z vsoto v danem trenutku pričakovanih sistematskih napak, kar ponazarja Enačba (1):

$$NSE_{\max} = \text{nap. karte} + \text{nap. GNSS} + \text{druge napake} \quad (1)$$

Iz primerjave Slike 4 in Slike 5 sklepamo, da je hitrost iz samih odčitkov GPS vso plovbo skozi 2. bazen zelo nerealna in vsaj dvakrat presega SOG z merilnika hitrosti.



Slika 4. GNSS sled ladje Couga (D96, UTM) za prevoz razsutega tovora: DWT 50806, LOA 182,98 m, Koper, 18.10.2018.



Slika 5. Med plovbo v 2. bazenu zabeležena hitrost ladje Couga, Koper, 18.10. 2018.

Območja, kjer se pogosto pojavlja večpotje, je možno ocenjevati iz sporočil AIS oz. t.i. NMEA stavkov. Zaradi negotovosti ocenjevanja dolžine psevdorazdalj do satelitov, določenih iz kod, je mogoče statistično določati z zbiranjem podatkov oz. beležiti mesta pogostih nenadnih preskokov podatkov AIS o položaju ladij.

Kartiranje območja večpotja pa je bolj analitično določljivo iz surovih podatkov. Oblika takšnih podatkov je za rezultate položaja z največjo točnostjo, neodvisno od uporabljenega sprejemnika, predpisana v obliki, imenovani RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), ki pa jih v sporočilih AIS zaenkrat ni. Kartiranje lahko temelji na analizi močnostnega spektra razmerja signal šum vsakega posameznega zaznavnega satelita [4].

Veliko naporov se vlaga v modeliranje napak večpotja in s tem v njihovo zmanjševanje na različnih področjih uporabe GNSS. Modeliranje napak vključuje poznavanje: oddaljenosti objektov od antene sprejemnika GNSS, njihove relativne usmerjenosti

odsevnih površin na zveznico do antene, sevalnega diagrama antene in iz almanahov znanih položajev satelitov nad obzorjem.

Kartiranje območij, bogatih z napakami, je pomembno v času priprave postopkov certificiranja sprejemnikov GNSS, ki bi ustrezali zahtevam določenih procesov (npr. plutja v območju dvigal), saj služba VTS lahko opozarja poveljnika ladje, ki vpluje brez pilota, naj se na teh območjih v določenih konstelacijah satelitov manj zanaša na podatke, zbrane z GNSS.

Elegantno rešitev v pogojih večpotja predstavlja GNSS kompas. To je sprejemnik GNSS z več antenami, ki je sposoben z obdelavo signalov zmanjšati vplive sofaznih oz. sorazmerno razdalji med antenami zakasnenih motenj, upošteva smer proti posameznemu satelitu.

3 Nadzor pristajanja in privezovanja

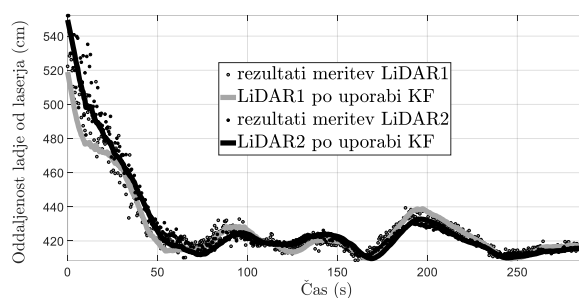
Privezovanje izjemno velikih ladij je vedno težaven proces, ki postane še bolj zapleten, kadar je treba s plovili ravnati 1) na omejenih območjih omejene globine, se hkrati 2) zoperstaviti še silovitemu bočnemu vetru ali 3) manevrirati v močnem toku ali celo v vseh treh omenjenih pogojih hkrati. Končni manever približevanja pomolu in natančno pozicioniranje na privezna mesta sta še posebej zahtevna na kontejnerskih terminalih, kjer je vzdolž pomola nameščenih mnogo dvigal ladja-obala, kar zelo omejuje možnost dopustne napake pri privezovanju, še posebej, če so dvigala nameščena v bližini krila poveljniškega mosta, premec ali krma pa segata čez rob obale (Slika 6).



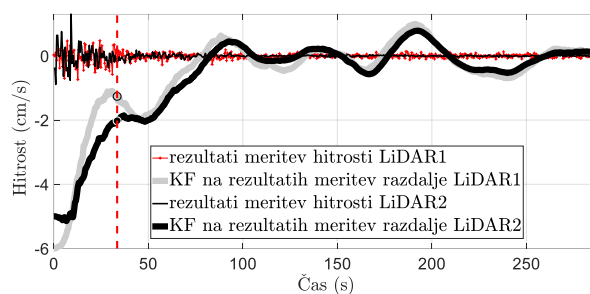
Slika 6. Ladja Concord, privezana v pristanišču Koper.

Da bi se izognili trkom, je potrebno bočno gibanje popolnoma nadzorovati; ladja mora biti vzporedna s pomolom, pri čemer se mora ohranjati še dopustna bočna hitrost približevanja in obenem preprečevati, da bi se plovilo bistveno pomaknilo vzdolžno. Podatki o položaju, pridobljeni z GNSS, tudi tisti, ki vključujejo diferencialne popravke, in sporočeni po AIS, vsebujejo bistveno prevelike napake za tako natančne postopke.

Nadzor omogoča LiDARski privezni in pristajalni sistem, ki je bil po preizkusih in uporabi ustrezne obdelave podatkov laserskih merilnikov z metodo Kalmanovega filtriranja (KF) (Slika 7), razvit za pristanišči Koper in Świnoujście (Poljska) [5].



Slika 7. Obdelava podatkov LiDARjev, zajetih med manevrom vzporednega približevanja pomolu na mirni gladini.



Slika 8. Obdelava generičnih podatkov o hitrosti in podatkov o oddaljenosti, obdelanih s KF s Slike 7.

Vpeljani LiDARski sistem v pristanišču Koper omogoča zanesljivo odčitavanje usmerjenosti ladje glede na os pomola (*angle-of-approach*) z ločljivostjo do $0,5^\circ$, posebno pomembna pa je zanesljiva meja določljivosti hitrosti $3,0 \text{ cm/s}$, saj se sme najtežja kontejnerska ladja, ki lahko vpluje v koprsko pristanišče, s tolikšno hitrostjo nasloniti na odbojnike pomola. Iz rezultatov na Slika 8 sklepamo, da sta se ob naslonitvi na odbojnike (trenutek označen s črtkano črto) obe *laserski točki* na boku ladje proti pomolu premikali pod mejno vrednostjo $3,0 \text{ cm/s}$.



Slika 9. Prikaz podatkov na prenosni pilotovi napravi (PPU).

Pilot na ladjo prinese prenosno enoto (PPU) in jo priključi na AIS vtičnico ladje. S PPU pilot zbira podatke LiDARskega sistema preko povezave Zig Bee in 4G, zraven pa tudi podatke senzorjev plime in dveh ultrazvočnih merilnikov vetra (Slika 9), preko priključka na ladijski sistem pa prejema še izvleček podatkov z navigacijskih sistemov plovila ter vlačilcev, ki delujejo na osnovi GNSS, da lahko vodi proces pristajanja in izplutja.

4 Prihodnost s prilagodljivimi rešitvami

Ker je manevriranje v pristaniščih omejeno, so raziskovalci skovali MVPA (*Marine Vessel Protection Area*) [7], na dve razsežnosti razširjen pojem AL, namenjen ladjam, ki za plovbo poleg integritete GNSS uporabljajo podatke o integriteti EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) ter poznajo ocene napak ladijskega kurza, ki je odvisen od lastnosti uporabljanega kompasa. Varno območje se na ECDIS predstavlja kot posebno obarvana površina.

Projektna skupina, v kateri sodeluje tudi Fakulteta za pomorstvo in promet Univerze v Ljubljani, si je v zaključenem projektu MAGS (*Maritime Adaptive GNSS Safety Concept*), ki ga je financirala Evropska vesoljska agencija, zastavila cilj ugotoviti kolikšen varen manevrski prostor potrebuje posamezna ladja glede na vremensko-prometne okoliščine ter na svojo opremljenost s senzorji in instrumenti ter svoj HPL (*Horizontal Protection Level*), za varno vplutje v območje pristanišča.

Ladja bo po načrtih skupine že v bližnji prihodnosti izmenjevala podatke o plovi preko satelita (*VHF Data Exchange System*, VDES) z okoliškimi ladjami (podobno kot sedaj z AIS) in jih bo v predpisani obliki posredovala tudi obalnim postajam VTS oz. ustrezni pristaniški službi. Služba bo v skladu s parametri vplutja in trenutno prometno situacijo vsakemu plovilu posebej določila MVPA in odločila ali odobri njegovo približevanje pristanišču po zastavljeni poti in z načrtovanimi manevri ali ne, upoštevajoč MVPA vseh v nadzorovanem območju prisotnih plovil.

Po odobritvi vplutja se bo začela faza dejanskega vplutja v pristanišče, v kateri bo služba VTS spremljala premike vseh plovil, razdalja robov MVPA do robov območja varne plovbe se bo sproti prilagajala vremenskim podatkom (METOCEAN), vsem lastnim spremembam kurza in hitrosti pa se bo prilagajala tudi površina MVPA. Odgovorni na poveljniškem mostu bo lahko spremljal na ECDIS trenutno vrednost MVPA svojega plovila in vsa morebitna opozorila, saj jih bo obalna služba osveževala v realnem času. Za povečanje zanesljivosti je poleg rabe storitev EGNOS predvidena tudi vpeljava storitve evropskega satelitskega navigacijskega sistema Galileo, imenovana HAS (*High Accuracy Service*), v kateri je v sodobnih pogojih telekomunikacij zelo zaželen tudi storitev NMA (*Navigation Message Authentication*). NMA s preverjanjem pristnosti zagotavlja zaščito prenesenih podatkov in signalov, njena uporaba s sistemom javnih in zasebnih ključev praktično onemogoča potvarjanje (*spoofing*).

5 Sklepi

Ocena, da uporabljamo toliko satelitsko podprtih navigacijskih naprav, kolikor nas trenutno živi na svetu, odseva ne le izredno razširjenost ampak tudi izredno zanašanje uporabnikov na takšen način navigacije. Zato je mera upravičenega zaupanja v navigacijski podatek za varno navigacijo zelo pomembna. Odgovorni na poveljniškem mostu je ob pojavih različnih šumov in celo namernih motenj [6] mirnejši, če prejme vsaj verodostojno opozorilo naj bo previden, kaj šele, da v jasni grafični podobi sproti dobiva obvestila, kako varna je njegova plovba.

Sprejemnik GNSS, sposoben obdelave signalov več sistemov, združen z GNSS neodvisnimi senzorji, postaja običajna oprema v pomorskem prometu. Satelitsko podprta nadgradnja s prilagodljivimi rešitvami spremljanja in opozarjanja plovil sledi rešitvam v letalskem prometu [8], v katerem je varnost pri pristajanju letal in ostajanje v predvidenem krajevno-časovnem oknu na pristajalni stezi enakovredna vplutju ladje v območje pristanišča in ostajanje v dodeljeni MVPA ob vstopu v pristanišče v določenem, malo daljšem, časovnem obdobju.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo kap. Matjažu Felicjanu za strokovni pregled in izboljšave besedila.

Literatura

- [1] IMO, „Resolution A.915(22) Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS),“ 2001.
- [2] IMO, „Resolution A.1046(27), Worldwide Radionavigation System.,“ 2011.
- [3] IMO, „MSC.1/Circ.1575, Guidelines for Shipborne Position, Navigation and Timing (PNT) Data Processing,“ 2017.
- [4] A. Bilich in K. M. Larson, „Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR),“ *Radio Science*, p. 16, 2007.
- [5] M. Perkovič, L. Gućma, M. Bilewski, B. Muczyński, F. Dimc, B. Luin, P. Vidmar, V. Lorenčič in M. Batista, „Laser-Based Aid Systems for Berthing and Docking,“ *J. Mar. Sci. Eng.*, p. 20, 2020.
- [6] Uredništvo, „Real-time interference detection by GIDAS makes satnav safer,“ *GPS World*, p. 1, 2020.
- [7] P. Zalewski, L. Gućma, S. Gewies, K. Urbanska, S. Schlueter in M. Porretta, „Concept of EGNOS Implementation in the Maritime Domain,“ v *8th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, NAVITEC*, Noordwijk, Nizozemska, 2016.
- [8] J. Burns, B. Clark, R. Cassell, C. Shively, T. Murphy in M. Harris, „Conceptual Framework for the Proposal for GBAS to Support CAT III Operations,“ ICAO NSP WGW WP11, Montréal, Kanada, 2009.