

# ZDRUŽENI SISTEMI GNSS/INS ZA NEPREKINJENO NAVIGACIJO

INTEGRATED GNSS/INS SYSTEMS FOR SEAMLESS NAVIGATION

*Klemen Kozmus Trajkovski*

**UDK: 004:519.21:528.28**

## **POVZETEK**

*Navigacijski sistemi običajno temeljijo na sprejemnikih GNSS. Članek predstavlja trenutno stanje sistemov GNSS, navigacijo s tehnologijami GNSS in opisuje GPS-navigacijske instrumente. Nekatere naloge zahtevajo neprekinjeno navigacijo, česar ne moremo zagotoviti samo z uporabo GNSS-navigacije. Sistem za neprekinjeno navigacijo dopolnjujejo inercialni navigacijski sistemi. Predstavljene so osnove inercialne navigacije, opisane so inercialne merilne enote, navedeni tipi IMU in tipični pogreški inercialnih senzorjev. Predstavljeni sta dve metodi obdelave podatkov združenih sistemov GNSS/INS, tradicionalni Kalmanov filter in umetne nevrnske mreže, ki po nekaterih raziskavah dosegajo boljše rezultate kot Kalmanov filter. Omenjeni sta še dve dodatni možnosti za izboljšanje ali celo zagotovitev neprekinjene navigacije, psevdoliti in širokopasovni radijski valovi.*

## **KLJUČNE BESEDE**

*GNSS, INS, IMU, MEMS, Kalmanov filter, umetne nevrnske mreže*

**Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02**

## **ABSTRACT**

*Navigation systems are commonly based on GNSS receivers. The article presents the current status of GNSS, discusses GNSS navigation and describes GPS navigation instruments. Some applications require seamless navigation which cannot be provided by GNSS itself. The system for uninterrupted navigation uses Inertial Navigation System besides GNSS. The bases of inertial navigation, Inertial Measurement Units, types of IMU and typical inertial sensor errors are presented. The processing of data from an integrated GNSS/INS is usually performed either by a traditional Kalman Filter or an artificial neural network. According to some of the research, the latter performs better than the conventional Kalman Filter. Seamless navigation can be improved or even made possible by the use of pseudolites or Ultra-wide Band.*

## **KEY WORDS**

*GNSS, INS, IMU, MEMS, Kalman filter, Artificial Neural Network*

## **1 UVOD**

Satelitski sistem GPS (angl. Global Positioning System) je v zadnjih letih zelo razširil možnosti navigacije. GPS-navigacijo s pridom že nekaj časa izkoriščajo pomorci, da jih vodi od luke do luke, instrumenti ponujajo tudi možnost, da na podlagi informacij o luninih menah nakažejo ribičem, kje se zbirajo ribe. Letalskih prevozov si brez navigacije že dolgo ne znamo predstavljati. Dandanes je že večina tovornih vozil opremljena s satelitsko navigacijo. Nekatere države imajo že razvito satelitsko cestninjenje. Navigacijske naprave za osebno in avtomobilsko navigacijo so dostopne vsakomur, kar je pripomoglo k zelo razširjeni uporabi satelitske navigacije.

Navigacijski sistemi na morju in v zraku lahko temeljijo zgolj na uporabi sistemov GNSS (angl. Global Navigation Satellite System), saj sprejem signalov s satelitov ni oviran. Na kopnem je drugače. Še vedno velja, da je velika večina kopenskega površja »dobro pokrita« s sateliti katerikoli čas dneva. Problematična so predvsem območja, porasla z gosto vegetacijo, in urbana območja z visokimi stavbami. Poseben izziv je navigacija znotraj objektov.

Reševalci, gasilci in vojaki so primeri skupin, ki za učinkovito delovanje in celo preživetje potrebujejo sistem, ki jih bo čim hitreje in čim varneje vodil do ponesrečencev in nazaj na varno. Pojavila se je torej potreba po neprekinjeni navigaciji. Zaradi omejitev sistemov GNSS navigacija, sledenje, daljinsko vodenje in usmerjanje oseb ne more temeljiti zgolj na obdelavi signalov satelitov GNSS, temveč mora navigacijski sistem dopolnjevati tehnologija, ki zagotavlja določitev položaja, hitrosti in smeri gibanja, tudi ko navigacijski instrument sprejema premalo signalov. Najbolj pogosto v kombinaciji z GNSS uporabljamo inercialne navigacijske sisteme (INS). Združeni sistemi GNSS/INS pa zaradi svojih značilnosti zahtevajo tudi ustrezno obravnavo.

## 2 TEHNOLOGIJA IN INSTRUMENTI GNSS

GNSS je tehnologija določanja položaja na podlagi sprejema radijskih signalov s satelitov, ki krožijo okoli Zemlje. Najbolj uveljavljen sistem GNSS je GPS, ki ga je v 80. letih začelo vzpostavljati obrambno ministrstvo ZDA. Podoben sistem, imenovan GLONASS, so vzpostavili v takratni Sovjetski zvezi. V 90. letih sta razvoj in vzdrževanje sistema GLONASS zastala in sistem več let ni bil uporaben. Rusija v zadnjih nekaj letih ponovno vzpostavlja sistem satelitov in trenutno je utirjenih 20 satelitov od nominalnih 24 (vir: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>), kar pomeni, da sistem že skoraj polno deluje. Sistem Galileo je civilni projekt GNSS, ki ga izvaja Evropska unija. Trenutno sta utirjena dva testna satelita (vir: <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>). Do polne realizacije sistema bo minilo še kar nekaj let. Roki niso trdno določeni in se spreminjajo, kar se dogaja predvsem zaradi neugodnih finančnih razmer.

Ker je bila tehnologija GPS dejansko nekaj časa edini uporaben in globalno delujoči sistem, se je do nedavnega za satelitsko določanje položaja uporabljal kar izraz GPS. Dejansko je bil kar nekaj let tudi edini uporaben sistem. Z obnovo sistema GLONASS in vzpostavljanjem novih sistemov (Galileo - EU, Compass/ Beidou - Kitajska) se ponovno uveljavlja splošen izraz globalni navigacijski satelitski sistemi - GNSS.

Vsak sistem GNSS ima lastne satelite in njihovo razporeditev, svoje specifične frekvence valovanj in svoje načine kodiranja signalov. Temu primerno morajo biti z elektroniko opremljeni sprejemniki GNSS, da lahko sprejemajo signale s satelitov enega ali več sistemov. Sprejemniki GPS lahko namreč sprejemajo samo signale s satelitov GPS, sprejemniki z oznako GNSS sprejemajo signale s satelitov GPS in GLONASS, nekateri od njih pa v prihodnosti tudi s satelitov Galileo. Sistem GLONASS še ni popolno funkcionalen, zato se trenutno uporablja kot dopolnitev sistema GPS na območjih, kjer je zaradi ovir omejen sprejem signalov GPS.

## 2.1 Navigacija z GNSS

Elektronika in strojna programska oprema v sprejemnikih pogojujejo natančnost določitve položaja, ki jo lahko doseže sprejemnik GNSS. Natančnost instrumenta je najbolj odvisna od tega, ali je sprejemnik eno- ali dvofrekvenčen in ali podpira tudi fazni način sprejema opazovanj. Osnovni način je kodni, tega podpirajo vsi sprejemniki GNSS. Dejansko dosežena natančnost je odvisna od več dejavnikov, najbolj pa vplivajo razmere opazovanja, natančnost instrumenta in uporabljena metoda določitve položaja.

Najosnovnejši instrumenti GNSS so t. i. navigacijski instrumenti. Položaj določajo na podlagi kodnih psevdo razdalj do satelitov, pridobljenih iz kodnih opazovanj. Trenutno vsi navigacijski instrumenti temeljijo izključno na sistemu GPS. Ti instrumenti so tudi najcenejši. Natančnost določitve položaja, ki jo dosežejo tovrstni instrumenti, je v splošnem nekaj metrov, lahko tudi več kot deset metrov, kot navajata Kozmus in Stopar (2003). Dosežena natančnost je najbolj odvisna od razmer opazovanj in razporeditve satelitov med opazovanji.

Instrumenti GNSS omogočajo določitev položaja na Zemlji na podlagi sprejema signalov s satelitov. Neznanke v vsakem trenutku določitve avtonomnega položaja so tri komponente položaja v trirazsežnem geocentričnem koordinatnem sistemu (X,Y,Z ali  $\varphi, \lambda, h$ ) in popravek sprejemnikove ure. Za določitev štirih neznank mora sprejemnik določiti razdaljo do vsaj štirih satelitov, katerih položaj se za vsak trenutek izračuna na podlagi podatkov oddanih efemerid v navigacijskem sporočilu. Vsako opazovanje signalov z dodatnih satelitov predstavlja nadštevilnost ter posledično izravnavo po metodi najmanjših kvadratov, možnost odkrivanja grobih pogreškov, boljšo natančnost in zanesljivost končne določitve položaja.

V normalnih razmerah za sprejem signalov s satelitov sprejemniki sprejemajo signale od šestih do enajstih satelitov obenem, če se omejimo samo na sistem GPS. To velja ob domnevi, da v okolici instrumenta ni fizičnih ovir ali pa jih je malo, tako da le delno motijo sprejem signalov. Fizične ovire na poti signala do sprejemnika (beton, les, kovina, steklo, človeško telo) toliko oslabijo ali celo zadušijo signal, da ga sprejemnik ne zazna več. Fizične ovire del vpadnega signala tudi odbijejo. Če odbiti del signala doseže anteno instrumenta GNSS, govorimo o pogrešku večpotja (angl. multipath).

V oteženih razmerah, kamor prištevamo na primer gosto vegetacijo (gozdovi ipd.) ali tako imenovane urbane kanjone (ulice, obdane z visokimi stavbami), je lahko vpliv fizičnih ovir že tolikšen, da je sprejem zadostnega števila signalov vprašljiv. Razpoložljivost satelitov na nekem mestu je tudi časovno odvisna, saj sateliti GNSS krožijo okoli Zemlje in se njihova geometrijska razporeditev stalno spreminja. Poleg tega je v oteženih razmerah pogosta prisotnost pogreška večpotja.

V zadnjih letih so se na trgu pojavili tako imenovani HS GPS (angl. High Sensitivity GPS), visoko občutljivi sprejemniki signalov GPS. Zaradi integracije podatkov opazovanj v daljšem časovnem obdobju so sposobni sprejemati tudi precej šibkejše signale od običajnih sprejemnikov, kot opisuje Lachapelle (2007). Instrumenti HS GPS so zmožni določati položaj tudi v oteženih razmerah, celo znotraj objektov - do neke mere, odvisno od konstrukcije objekta. Ker pri določitvi položaja

v oteženih razmerah sodelujejo tudi zelo šibki signali, ki lahko nosijo manj natančne informacije kot močnejši, in je močno prisoten tudi pogrešek večpotja, so lahko položaji, pridobljeni s temi instrumenti, zelo pogrešeni, tudi za več kot sto metrov, kar v raziskavah ugotavlja tudi avtor članka. Z ustrezno obdelavo podatkov surovih opazovanj je mogoče tudi tovrstna opazovanja spraviti v okvir natančnosti deset metrov ali nekaj slabše, odvisno predvsem od razmer opazovanj.

## 2.2 Navigacijski instrumenti GPS

Navigacijski instrumenti GPS so v primerjavi z drugimi praviloma najmanjši, najbolj preprosti za uporabo, seveda pa tudi najcenejši. Višje natančnosti določitve položaja, kot jo omogočajo ti instrumenti, za običajno navigacijo ne potrebujemo.

Oblika instrumenta je odvisna od načina uporabe. Osebn instrumenti so primerni za navigacijo oseb, za avtomobilsko navigacijo običajno uporabimo instrumente, ki jih pritrdimo na vetrobransko steklo ali armaturno ploščo, navtični instrumenti so prilagojeni za uporabo na morskih plovilih. Primeri instrumentov so prikazani na sliki 1.

Večina navigacijskih naprav ima sprejemno anteno vgrajeno v ohišje naprave, nekatere pa lahko povežemo tudi z zunanjo anteno. Povezavo z zunanjo anteno običajno vzpostavimo brezžično prek vmesnika Bluetooth, lahko pa tudi prek kabla.



Slika 1: GPS-navigacijski instrumenti: levo – osebni, sredina – avtomobilski, desno – navtični (vir: <http://www.garmin.si>)

Večina navigacijskih instrumentov na trgu ima podobno zasnovo: antena, sprejemnik, vezje za obdelavo podatkov opazovanj in uporabniška vmesniška enota za interakcijo z uporabnikom, združeno v enotno ohišje. Velikost ohišja je odvisna predvsem od velikosti zaslona, števila in razporeditve tipk ter robustnosti naprave (odpornost proti udarcem in vodi). Sama elektronika za sprejem in obdelavo signalov zavzema zelo malo prostora.

Kritični položaji, ki zahtevajo neprestano navigacijo, se največkrat nanašajo na navigacijo oseb, npr. gasilci, reševalci in vojaki, zato morajo biti navigacijski instrumenti čim lažji in čim manjši, da kar najmanj ovirajo gibanje osebe, ki nosi napravo. Za združevanje z INS so najbolj primerni sprejemniki v obliki modulov (kot npr. na sliki 2), ki jih povežemo z zunanjo anteno. Obdelava podatkov opazovanj vseh sensorjev in krmiljenje (vhodno-izhodne enote) običajno potekata ločeno na zunanji napravi (npr. dlančnik).



Slika 2: GPS-modul na čipu (levo) in v ohišju z zunanjo anteno (desno) (vir: <http://www.u-blox.com>)

### 3 OSNOVE INERCIALNE NAVIGACIJE

Inercialni senzorji delujejo po načelu inercije. Inercija je po prvem Newtonovem zakonu gibanja vztrajanje telesa v mirovanju oziroma v konstantni vzdolžni in kotni hitrosti, razen če nanj ne vplivajo dodatne sile ali navori. Inercialni referenčni sestav je koordinatni sistem, kjer veljajo Newtonovi zakoni gibanja. Inercialni referenčni sestav se niti ne suče niti ne pospešuje, kot povzemajo Grewal idr. (2001).

Inercialna navigacija temelji na izračunu trenutne hitrosti in položaja iz začetne hitrosti in položaja ter časovne zgodovine kinematičnih pospeškov, kot navaja Chatfield (1997). Hitrost je enaka seštevku začetne hitrosti in integrala kinematičnega pospeška po času. Položaj je enak vsoti začetnega položaja in integrala hitrosti po času. Navigacijski računalnik izvaja integracije v ustreznem računskem koordinatnem sistemu.

Senzorje gibanja v inercialnih navigacijskih sistemih imenujemo inercialne merilne enote oziroma splošno IMU (angl. Inertial Measurement Unit), kot navajajo številni avtorji, med drugimi Jekeli (2000) in Chatfield (1997). Inercialni senzorji merijo vrednosti zasukov in pospeške. Zasuke beležijo žiroskopi, pospeške pa merijo pospeškometri.

Tipična inercialna merilna enota vsebuje tri žiroskope in tri merilce pospeškov. Žiroskopi predstavljajo referenčni koordinatni sistem za orientacijo pospeškometrov. Merilci pospeškov merijo spremembe pospeška v vsaki izmed treh osnih smeri. Računalnik opravi dve ločeni integraciji podatkov, ki jih prejme iz senzorjev. Rezultat prve integracije meritev pospeška je hitrost enote, ki je vhodni podatek za drugo integracijo, ki daje podatek o trenutnem položaju enote, kot opisuje Kozmus (2000).

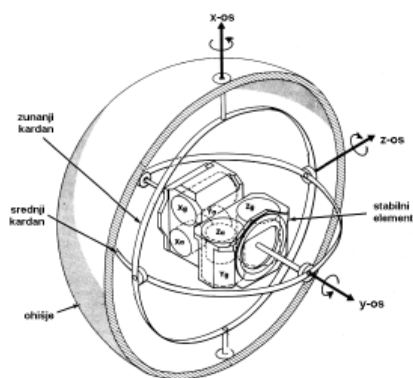
Inercialna navigacija uporablja podatke meritev žiroskopov in pospeškometrov za presojo položaja, hitrosti in smeri nosilca INS, ki je lahko vesoljsko plovilo, izstrelek, letalo, ladja, podmornica ali kopno vozilo, kot naštevajo Grewal idr. (2001). Seveda pa sistem INS lahko nosi tudi človek, saj je razvoj omogočil razvoj zelo majhnih in lahkih enot IMU.

Inercialni navigacijski sistem sestavlja, povzeto po Grewal idr. (2001):

- IMU, ki vsebuje dva ali več pospeškometrov in vsaj tri žiroskope. Vsi senzorji so fiksno pritrjeni na enotno platformo, zato ohranjajo notranjo relativno orientacijo.
- Navigacijski računalnik, ki računa težni pospešek (ni merjen s pospeškometri) in dvojno integrira merjeni pospešek za določitev položaja objekta.

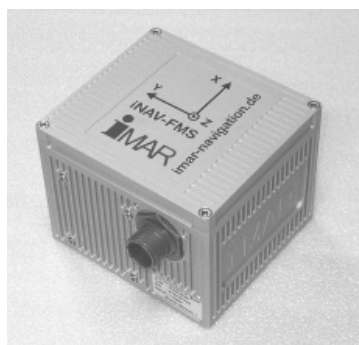
### 3.1 Inercialne merilne enote

Obstajata dve izvedbi inercialnega merilnega sistema. Prvi predstavlja fizično realizacijo navigacijskega koordinatnega sistema na kardanski podlagi v sistemu treh obročev, katerih osi so med seboj pravokotne. Tak sistem se imenuje **kardanski sistem** (angl. gimbaled system). Vloga obročev je izolacija platforme od vplivov nosilnega objekta. Ker je v praksi nemogoče ustvariti popoln ravnotežni sestav in osi brez trenja, se v te sisteme vstavljajo žiroskopi, ki zaznajo zasuk sistema zaradi trenja osi ali neravnotežja sestava. Na podlagi zaznanih zasukov notranjih motenj sistema se v izračunu izločijo zasuki sestava okoli osi, kot razlagajo Grewal idr. (2001). Shema kardanskega sistema je na sliki 3.



Slika 3: Shema kardanskega inercialnega sistema  
(vir: [http://history.nasa.gov/alsj/Im\\_imu.gif](http://history.nasa.gov/alsj/Im_imu.gif))

Drugi način izvedbe je **pritrjen sistem** (angl. strapdown system). Sistem senzorjev je pritrjen neposredno na ohišje nosilnega objekta. Osi IMU sovpadajo z osmi telesa, merijo pa se projekcije specifičnih sil in kotne hitrosti objektnega koordinatnega sistema. Vrednosti meritev pospeškov je treba transformirati v tako imenovani navigacijski koordinatni sistem. Transformacijo izvedemo z rotacijsko matriko, ki jo določimo na podlagi vrednosti odčitkov žiroskopov. Vrednosti pospeškov množimo z ustreznimi elementi rotacijske matrike, da dobimo komponente pospeška v smeri koordinatnih osi, ki jih uporabimo za določitev hitrosti in poti v smereh posameznih koordinatnih osi, kot opisuje Kozmus (2000). IMU je običajno v obliki geometrijskega telesa (kvader ali valj), primer enote je na sliki 4.



Slika 4: IMU pritrjenega inercialnega sistema (vir: [http://www.imar-navigation.de/bilder/imu\\_fsas.jpg](http://www.imar-navigation.de/bilder/imu_fsas.jpg))

Pritrjeni sistemi so manjši, lažji in cenejši od kardanskih sistemov in imajo manjšo porabo energije. Vzdrževanje takih sistemov je lažje in cenejše. Zaradi večjih premikov objekta pa morajo imeti vgrajene zelo natančne žiroskope s širokim delovnim območjem, kot sklepa Kozmus (2000).

Osnovni pogreški senzorjev IMU:

- časovni odklon (angl. drift, bias) – pogrešek izhodne enote sistema po integraciji (pri žiroskopih narašča linearno, pri pospeškometrih kvadratno);
- pogrešek faktorja merila (angl. scale factor error) – linearni odklon merjene vrednosti od prave;
- šum (angl. random walk) – slučajni pogrešek.

Obstaja več tipov IMU, ki vsebujejo različne inercialne senzorje, razlikujejo pa se predvsem po doseženi natančnosti, velikosti in ceni. Najvišji razred IMU je t. i. »navigation-grade«. Senzorji imajo zelo majhne pogreške, zato so zmožni izvajati navigacijo brez dodatnih instrumentov, kot trdijo Strus idr. (2008). So pa tudi cene tovrstnih naprav zelo visoke, tudi do 100.000 EUR, kot navajata tudi Huang in Chiang (2008). Srednji razred predstavljajo t. i. »tactical-grade« IMU, ki imajo vgrajene cenejše komponente, zaradi česar je tudi natančnost nižja. Zaradi majhnosti in cene se vedno bolj uporabljajo enote MEMS (angl. Micro Electro Mechanical System), ki združujejo mikromehanične in elektronske komponente na enotnem čipu. MEMS IMU je lahko zelo majhna enota, površina čipa je lahko manjša od 1 cm<sup>2</sup>. Cene enot MEMS so zelo različne, od nekaj 10 EUR do več 100 EUR. Njihova natančnost je v primerjavi z dražjimi izvedbami še vedno omejena, kar dokazuje tudi Godha (2006). Tipične vrednosti pogreškov žiroskopov v IMU posameznih razredov so predstavljene v preglednici 1.

Pogrešek	Navigation-grade *	Tactical-grade **	MEMS ***
Odklon	0,005 °/h	1 °/h	20 °/h
Faktor merila	10 ppm	150 ppm	300 ppm
Šum	0,005 °/√h	0,125 °/√h	0,3 °/√h

\* Honeywell HG9848 (<http://www.honeywell.com>)

\*\* Honeywell HG1700 (<http://www.honeywell.com>)

\*\*\* Honeywell HG1930 (<http://www.honeywell.com>)

*Preglednica 1: Pogreški žiroskopov v posameznih razredih IMU*

#### 4 ZDRUŽENI SISTEM GNSS/INS

Osnovna navigacija praviloma temelji na tehnologiji GNSS, saj ta zagotavlja časovno konstantnost natančnosti določitve položaja in ob uporabi ustreznih metod omogoča tudi visoke natančnosti, do nekaj centimetrov. Sprejemnik GNSS mora biti za zadosten sprejem signalov s satelitov postavljen na dokaj odprtem območju. Stavbe in gosta vegetacija otežijo ali preprečijo pot signalov do sprejemnikov. Razpoložljivost satelitov na določenem mestu se v času spreminja, saj sateliti GNSS »potujejo« okoli Zemlje po tirnicah.

Razpoložljivost GNSS je torej omejena, predvsem v urbanih okoljih. Sistemi, ki zahtevajo stalno

in neprekinjeno določanje položaja, ne morejo temeljiti zgolj na tehnologiji GNSS. GNSS je praviloma osnovna komponenta takšnega navigacijskega sistema. Sisteme dopolnjujeje tehnike, ki zapolnijo vrzeli, ko GNSS ni na razpolago.

AGPS (angl. Assisted GPS oziroma Aided GPS) temelji na komunikaciji z brezžičnim omrežjem, ki instrumentu posreduje podatke o tirnicah satelitov, urah satelitov in času, kar pripomore k hitrejšemu določanju položaja, ko je na voljo dovolj satelitov. Drugih prednosti sistem nima.

Postopek DR (angl. Dead Reckoning) je način določitve položaja na podlagi znanega položaja v nekem trenutku in spremljanja spremembe položaja z upoštevanjem smeri, hitrosti in časa potovanja. Spremembe smeri in hitrosti določajo primerni senzorji. Najbolj primerni senzorji za določanje položaja s postopki DR so inercialne merilne enote IMU.

Združitev tehnologij GNSS in INS je logična tudi zaradi lastnosti ene in druge tehnologije, saj se dobro dopolnjujeta. Natančnost položajev, določenih z GNSS, je časovno stabilna, problematična pa je stalna razpoložljivost zadostnega števila satelitov. Naprave IMU delujejo neodvisno od zunanjih razmer, slabost inercialnih senzorjev pa je predvsem časovna nestabilnost, saj s časom strmo narašča predvsem odklon oziroma »drift«. Relativna pomanjkljivost instrumentov GNSS je osveževanje podatka o položaju objekta. Novejši instrumenti sicer omogočajo osveževanje s frekvenco do 20 Hz, kar pa je še vedno manj, kot omogočajo inercialni senzorji, pri katerih tudi frekvenca 100 Hz ni redkost.

Združitev sistemov GNSS in INS temelji na prostem sklapljanju (angl. loose coupling), vezanem sklapljanju (angl. tight coupling) ali trdnem vezanem sklapljanju (angl. ultra-tight coupling). Prosto sklapljanje vključuje obdelana opazovanja GNSS, medtem ko vezano sklapljanje deluje na podlagi surovih opazovanj GNSS. Trdno vezano sklapljanje izvaja še dodatno operacijo, namreč posreduje podatke sistema INS instrumentu GNSS za zmanjšanje pogreškov sledenja signalov GNSS in s tem izboljšuje zmogljivost sistema GNSS, kot navaja Gao (2007).

Združen sistem GNSS/INS lahko dopolnimo še s podatki drugih senzorjev, npr. z barometrom za določitev višinske razlike ali kompasom za določitev smeri gibanja.

Sprejemnik GNSS in senzorji IMU so lahko združeni v enotnem ohišju, kot npr. na sliki 5 (zunanja je samo antena GPS), lahko pa so fizično ločeni in povezani z enotno računalniško enoto, kjer poteka obdelava podatkov meritev.



Slika 5: Združen sistem GPS/MEMS (vir: <http://www.xsens.com/en/general/mti-g>)



## 5 OBDELAVA MERITEV SISTEMOV GNSS/INS

Množica raznovrstnih podatkov meritev različnih senzorjev (GNSS, pospeškometri, žiroskopi) zahteva ustrezno obravnavo in vrednotenje.

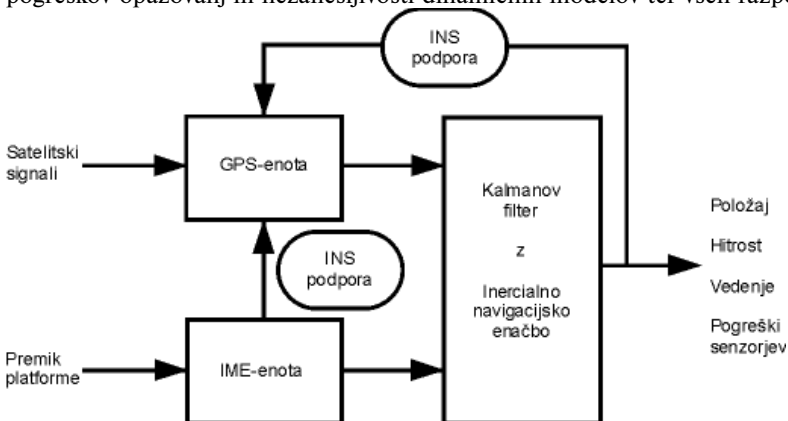
Instrumenti GNSS lahko kot izhodni podatek oddajajo surova opazovanja v binarni obliki, lahko pa jih instrument predhodno obdela in odda izbrane informacije o času, položaju, hitrosti, smeri gibanja, številu satelitov, vplivu razporeditve satelitov na natančnost in presojo natančnosti določitve položaja v standardni obliki NMEA 0183.

Inercialne merilne enote IMU zaznavajo linearne in kotne pospeške objekta. Ker moramo izhodne podatke pospeškometrov in žiroskopov integrirati, da pridobimo podatke o hitrosti in položaju, se pogrešek določitve položaja povečuje linearno s časom, zaradi česar je uporabnost navigacijskega sistema, ki temelji zgolj na inercialnih senzorjih, časovno omejena in odvisna od natančnosti vgrajenih senzorjev.

Ključni problem obravnave podatkov INS je modeliranje pogreškov senzorjev. Sistematične pogreške lahko do neke mere odpravimo s kalibracijo sensorja, slučajne pogreške pa običajno odpravimo stohastično z ustreznimi modeli, npr. model Gauss-Markova, kot navaja Jekeli (2001). Nemodelirane pogreške lahko kot neznanke vključimo v matematični model obdelave podatkov.

### 5.1 Kalmanov filter

Kalmanov filter (KF) je zgodovinsko gledano najbolj uveljavljeno orodje za obdelavo podatkov senzorjev združenih sistemov GNSS/INS. KF obdela vsa opazovanja, ne glede na njihovo natančnost, za pridobitev ocene trenutne vrednosti neznank v procesu z uporabo znanja o dinamiki sistema in lastnostih merilnih instrumentov, statističnega opisa šumov sistema, pogreškov opazovanj in nezanesljivosti dinamičnih modelov ter vseh razpoložljivih informacij



Slika 6: Shema obdelave podatkov združenega sistema GNSS/INS s Kalmanovim filtrom

o začetnih pogojih neznank v sistemu, kot opisuje Kozmus (2002). Potek obdelave podatkov združenega sistema GNSS/INS s Kalmanovim filtrom je prikazan na sliki 6.

Kalmanov filter presoja stanje dinamičnega sistema na podlagi dinamičnega modela in modela opazovanj. Oba modela sta povezana s statističnimi lastnostmi, ki opisujejo natančnosti modelov. Stopnje statističnega šuma so običajno podane pred filtriranjem in se med rekurzivnim procesom ne spreminjajo. Če so apriori statistični podatki neustrezni, lahko povzročijo nezanesljive rezultate, v skrajnem primeru pa lahko vodijo v divergenco, kot trdita Mohamed in Schwarz (1999). Nenadne spremembe hitrosti in smeri gibanja, ki so zelo značilne za gibanje oseb, je nemogoče predvideti, zato je zelo težko sestaviti sistem s konstantnimi variancami šuma. Rešitev tovrstnih težav ponuja **adaptiven Kalmanov filter**. Adaptivno filtriranje poskuša določiti statistične parametre dinamičnega modela na podlagi obnašanja sistema med obdelavo podatkov. Razvitih je bilo več vrst adaptivnega filtriranja, npr. Mohamed in Schwarz (1999) in Gao idr. (2007), ki se izkažejo za boljše rešitev pri obravnavi dinamičnih modelov, kjer dinamike obravnavanega objekta ni mogoče vnaprej točno predvideti.

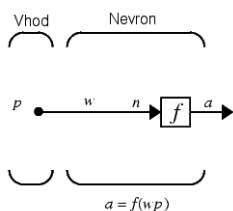
## 5.2. Umetne nevronske mreže

Čeprav velja Kalmanov filter za eno najboljših in preizkušenih rešitev za združitev različnih senzorjev, ima vseeno nekatere pomanjkljivosti, predvsem pri stabilnosti, količini računanja in imunosti na učinke šuma. Umetne nevronske mreže (UNM) so močno orodje za reševanje nelinearnih nalog, ki vključujejo povezavo vhodnih in izhodnih podatkov brez predhodnega znanja o vključenih matematičnih procesih, kot trdijo Chiang idr. (2003).

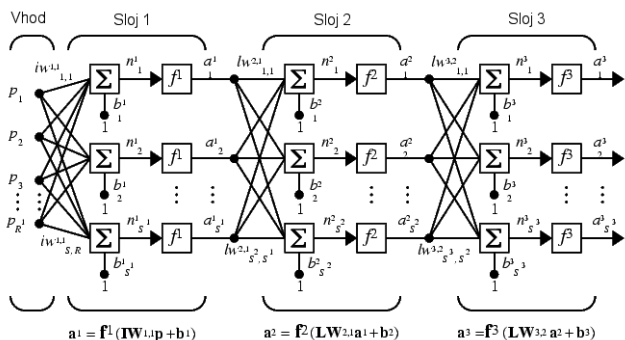
Postopki obdelave podatkov z UNM temeljijo na t. i. »učenju« nevronske mreže, ki posnema biološke živčne sisteme. Podobno kot v naravi je mrežna funkcija močno določena s povezavami med elementi. Nevronsko mrežo lahko naučimo izvajati določeno funkcijo s prilagajanjem uteži med elementi, kot je zapisano v uporabniškem priročniku programa Matlab (2002). Postopek učenja UNM temelji na primerjavi izhodnih podatkov, ki jih dobi z obdelavo danih vhodnih podatkov, in ciljnih podatkov. Mreža v postopku učenja primerja izhodne in ciljne podatke ter tako dolgo prilagaja uteži med elementi, da se izhodni in ciljni podatki razlikujejo v okviru zahtevane natančnosti. Naučena mreža nato obdela poljubne vhodne podatke.

Nevronska mreža je sestavljena iz vhodnega in izhodnega sloja nevronov ter poljubnega števila skritih slojev, izhodne podatke pa pridobimo z izbrano prenosno funkcijo. Vsak sloj ima lahko poljubno število nevronov. Shema preprostega nevrona je prikazana na sliki 7. Skalarni vhodni podatek  $p$  je prenesen skozi povezavo, ki pomnoži njegovo moč z utežjo  $w$ . Utežni vhodni podatek  $wp$  je edini argument prenosne funkcije  $f$ , ki producira skalarni rezultat  $a$ .

Shema večslojne nevronske mreže je prikazana na sliki 8. Vsak sloj ima svojo matriko uteži  $W$ , t. i. bias vektor  $b$ , izhodni vektor  $a$  in prenosno funkcijo  $f$ . Povzeto po Matlab (2000).



Slika 7: Shema preprostega nevrona



Slika 8: Večslojna umetna nevronska mreža

Pozitivne lastnosti umetnih nevronskih mrež pri obravnavi številnih nelinearnih količin z ne povsem točno definiranimi medsebojnimi odnosi so s pridom izkoristili v različnih raziskavah.

Chiang idr. (2003) predlagajo arhitekturo, ki uporablja večslojno usmerjeno nevronska mrežo (angl. MFNN - Multi-layer Feed-forward Neural Network) z vzratnim razširjanjem napake kot algoritmom učenja (angl. back-propagation). Učenje nevronske mreže poteka med razpoložljivostjo podatkov meritev GNSS in INS, kjer so ciljni podatki koordinatne razlike med položajem, določenem z GNSS, in spremembo položaja, ki je določena z INS. Med izpadom opazovanj GNSS navigacija temelji na meritvah senzorjev INS in obdelavi v naučeni nevronske mreži. V splošnem je optimalna arhitektura določena empirično, saj ni mogoče podati splošnih napotkov za število slojev in število nevronov v posameznem sloju. Premalo nevronov lahko povzroči divergenco mreže, medtem ko lahko preveč nevronov predstavlja predoločen model. Algoritem vzratnega razširjanja napake teče vzratno od izhodnega skozi vse skrite sloje do vhodnega sloja. Algoritem popravlja uteži znotraj mreže proporcionalno glede na odstopanja med izhodnimi podatki mreže in želenimi rezultati. V testu, ki so ga izvedli Chiang idr. (2003) in je trajal približno 2000 sekund, so prvih 1800 sekund »učili« nevronska mrežo s podatki IMU in DGPS, zadnjih 200 sekund pa sistem GPS namensko izklopili. Glede na znano trajektorijo gibanja so dosegli odstopanja, manjša od treh metrov, kar je nedvomno zelo dober dosežek glede na specifikacije senzorjev IMU. Seveda pa rezultatov ne gre enostavno posploševati, saj so najbolj odvisni od pogreškov inercialnih senzorjev v sistemu.

Huang in Chiang (2008) predlagata obdelavo podatkov s konstruktivno nevronska mrežo (angl. CNN - Constructive Neural Network). V raziskavi sta uporabila MEMS-inercialne senzorje in primerjala rezultate z obdelavo na podlagi MFNN in metod Kalmanovega filtra. CNN v primerjavi z MFNN zagotavlja več fleksibilnosti, saj ni treba predhodno določati topologije mreže, ker se ta določi samostojno, hkrati pa je metoda tako hitra, da se lahko računa sproti, v realnem času. V raziskavi sta ugotovila, da daje Kalmanov filter najboljše rezultate v prvih 5 do 10 sekundah po izpadu signala GPS. Vendar pa zaradi nestabilnosti in šuma natančnost s Kalmanovim filtrom zelo hitro upada. CNN in MFNN dajeta podobne rezultate, ki so za več kot 55 % izboljšani glede na Kalmanov filter.

## 6 DODATNE MOŽNOSTI ZA ZAGOTOVITEV NEPREKINJENE NAVIGACIJE

Ključni problem navigacije s sistemi GNSS je zagotovitev sprejema signalov z zadostnega števila satelitov, kar je predvsem v urbanih okoljih pogosto težko. Rešitev v teoriji predstavljajo tako imenovani **pseudoliti** (psevdo-sateliti), instrumenti, ki oddajajo podobne signale kot sateliti GPS na frekvenci L1, kot navajata Suh in Shibasaki (2003). Ista avtorja sklepata, da fiksni oddajniki na Zemlji zagotavljajo dodatna opazovanja, poleg »običajnih« satelitov GNSS, za izboljšanje nadzora deformacij. LeMaster (2003) omenja, da lahko pseudoliti povsem nadomestijo satelite GNSS, ko gre za določanje položaja znotraj objektov. Seveda je pri tem treba poskrbeti za dovolj nameščenih pseudolitov. LeMaster (2003) navaja tudi težave pri vzpostavljanju sistema pseudolitov. Sprejemniki morajo znati sprejeti signale s pseudolitov, tudi če ti niso standardni. Položaj pseudolitov je treba predhodno določiti z vsaj enako stopnjo natančnosti, kot je pričakovana natančnost sistema. Sistem pseudolitov je treba tudi ustrezno kalibrirati in sinhronizirati. Vse to so razlogi, da so sistemi pseudolitov predvsem predmet raznih raziskav, v praksi pa redko realizirani. Lee idr. (2005) so zasnovali celo sistem, ki kombinira GPS, pseudolite in INS.

Pseudoliti so seveda uporabni samo tam, kjer so nameščeni, torej za splošno rešitev neprekinjene navigacije niso primerni.

V zadnjih letih se razvoj navigacijskih sistemov usmerja tudi na področje širokopasovnih radijskih valov (angl. **UWB** - Ultrawide-Band). Quinlan (2008) navaja značilnost valov UWB, ki pokrivajo zelo široko frekvenčno območje, kar pomeni zelo fino časovno ločljivost in posledično točno določitev trenutka sprejema signala. Takšna časovna ločljivost omogoča razlikovanje direktnega in odbitega signala, kar vodi do odprave pogreška večpotja oziroma »multipath«. Quinlan (2008) opisuje sistem TRT (UK) FH UWB IPS, ki ga uporabljajo angleški gasilci. Zahtevana natančnost določitve vsake enote v prostoru brez uporabe obstoječe infrastrukture je en meter, da lahko sistem razlikuje nadstropja in sobe. Vsaka enota, ki jo nosi gasilec, vsebuje UWB-sprejemnik-oddajnik, ki stalno določa razdalje do drugih enot v dosegu. Vsaka enota lahko določi svoj relativni položaj na podlagi vsaj štirih neodvisnih razdalj do drugih enot. Zunaj stavbe se fiksne enote pritrdijo na vozila ali celo dvignejo z avtodvigalom. Njihov položaj je določen z GPS ali z referenciranjem na podlagi znanega položaja na karti. Absolutni položaji zunanjih enot se upoštevajo v mrežnem modelu in enote znotraj objekta prikazujejo pravilne položaje. Vse enote svoje podatke pošiljajo kontrolnemu centru, ki združi vse razpoložljive podatke (tudi digitalne karte in sheme objektov) za čim bolj učinkovito in varno reševanje.

## 7 SKLEP

Navigacija je prodrla v vse pore današnjega civiliziranega življenja. GPS-navigacijski instrumenti so postali dostopni vsakomur. Številni uporabniki izkoriščajo preprosto uporabo naprav, na primer za vodenje do cilja v avtomobilu. Uporabnik v napravo vnese naslov ali koordinate ciljnega položaja in naprava voznika usmerja glasovno in grafično. Veliko voznikov se je že »toliko« razvadilo, da brez navigacije sploh ne upajo na pot. Pohodniki uporabljajo navigacijo za vodenje do zelenega cilja ali pa jih navigacija pripelje nazaj na pravo pot, če zaidejo. Če ima

instrument možnost beleženja položajev, si lahko pohodnik shrani zaporedne položaje točk na poti (angl. track), ki jih uvozi na primer v Google Earth in se pohvali bližnjim in prijateljem.

Navigacija v avtomobilu in osebna navigacija sta uporabniku v pomoč, nista pa nujni. Tudi če pride do trenutnega izpada, ker instrument sprejema premalo signalov zaradi ovir v okolici, to seveda ni kritično. Včasih, npr. reševanje ponesrečenih, gašenje požarov znotraj objektov in manevriranje vojaka na bojnem polju, pa je neprekinjena navigacija nujna, saj lahko rešuje življenja. Takšen sistem poleg sprejemnikov GPS vsebuje še druge instrumente, večinoma so to inercialni senzorji, lahko pa so tudi npr. UWB-radijski valovi, kot pri angleških gasilcih. Seveda takšni kombinirani sistemi zahtevajo tudi ustrezno obdelavo podatkov meritev, ki je veliko bolj kompleksna kot samostojna GPS-navigacija. Običajno rešitve temeljijo na Kalmanovem filtru, razviti pa so tudi postopki z uporabo umetnih nevronske mreže. Sistemi za neprekinjeno navigacijo se bodo nedvomno razvijali še naprej. V poštev bodo prišle nove tehnike obdelave ter različni merilni instrumenti in senzorji.

## LITERATURA IN VIRI:

- Chatfield, A. B. (1997). *Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Chiang, K. W.; Noureldin, A.; El-Sheimy, N. (2003). *Multisensor integration using neuron computing for land-vehicle navigation*. *GPS Solutions*, letnik 6, št. 4, str. 209–218.
- Gao, J. (2007). *Development of a Precise GPS/INS/On-Board Vehicle Sensors Integrated Vehicular Positioning System*. Doktorska disertacija. University of Calgary. Pridobljeno 17. 08. 2007 s spletne strani: <http://www.geomatics.ucalgary.ca/research/publications>
- Gao, W.; Yuanxi, Y.; Xianqiang, C., Shuangcheng, Z. (2007). *Application of adaptive Kalman filtering algorithm in IMU/GPS integrated navigation system*. *Geo-Spatial Information Science*, letnik 10, št. 1, str. 22–26. Pridobljeno 16. 08. 2007 s spletne strani: <http://www.springerlink.com>.
- Godha, S. (2006). *Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application*. Magistrsko delo. University of Calgary. Pridobljeno 17. 08. 2007 s spletne strani: <http://www.geomatics.ucalgary.ca/research/publications>.
- Grewal, M. S., Weill, L. R., Andrews, A. P. (2001). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. John Wiley & Sons.
- Herrera, E. P., Quiros, R., Kaufmann, H. (2007). *Analysis of a Kalman Approach for a Pedestrian Positioning System in Indoor Environments*. *Lecture Notes in Computer Science*, letnik 4641/2007, str. 931–940. Pridobljeno 17. 04. 2009 s spletne strani: <http://www.springerlink.com>.
- Hide, C., Moore, T., Hill, C., Park, D. (2006). *Low cost, high accuracy positioning in urban environments*. *Journal of Navigation*, letnik. 59, izd. 3, str. 365–379.
- Huang, Y. W., Chiang, K. W. (2008). *An intelligent and autonomous MEMS IMU/GPS integration scheme for low cost land navigation applications*. *GPS Solutions*, letnik 12, št. 2, str. 135–146.
- Jekeli, C. (2001). *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. Walter de Gruyter, Berlin.
- Kozmus, K. (2000). *Inercialni sistemi v geodeziji. Raziskave s področja geodezije in geofizike - 2000 : zbornik predavanj*. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, 2000, str. 21–35.
- Kozmus, K. (2002). *Analiza in obdelava kinematičnih GPS opazovanj: magistrska naloga*. Ljubljana.
- Kozmus, K., Stopar, B. (2003). *Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami*. *Geodetski vestnik*, letnik 47, št. 4, str. 404–413.
- Lachapelle, G. (2007). *Pedestrian navigation with high sensitivity GPS receivers and MEMS*. *Pers Ubiquit Comput* (2007) 11, str. 481–488.

Lee, H. K., Wang, J., Rizos, C. (2005). An integer ambiguity resolution procedure for GPS/pseudolite/INS integration. *Journal of Geodesy, letnik 79, št. 4-5, str. 242-255.*

LeMaster, E. (2003). *GPS on the Web: applications of GPS pseudolites. GPS Solutions, letnik 6, št. 4, str. 268-270.*

Matlab (2000). *Matlab 6.5 User's Guide. MathWorks.*

Mohamed, A. H., Schwarz, K. P. (1999). Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS. *Journal of Geodesy, letnik 73, št. 4, str. 193-203.*

Quinlan, M. (2008). *Trial By Fire: Indoor Positioning When It Matters Most. Navigation News, July/August 2008, str. 8-11.*

Strus, J. M., Kirkpatrick, M., Sinko, J. W. (2008). *GPS/IMU Development of a High Accuracy Pointing System for Maneuvering Platforms. Inside GNSS, March/April 2008, str. 30-37.*

Suh, Y. C., Shibasaki, R. (2003). Assessment of pseudolite layout under urban environments using a simulation system for seamless positioning. *KSCE Journal of Civil Engineering, letnik 7, št. 3, str. 261-266. Pridobljeno 17. 04. 2009 s spletne strani: <http://www.springerlink.com>.*

Weimann, F., Abwerzger, G., Hofmann-Wellenhof, B. (2007). *Pedestrian Navigation in Obstructed Environments. GPS World, November 2007, str. 26-34.*

**Prispelo v objavo: 21. 04. 2009**

**Sprejeto: 1. junija 2009**

**asist. mag. Klemen Kozmus Trajkovski, univ. dipl. inž. geod.**

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: [klemen.kozmus@fgg.uni-lj.si](mailto:klemen.kozmus@fgg.uni-lj.si)