

Kalmanov filter v analizi kinematičnih GPS-opazovanj

Klemen Kozmus*, Bojan Stopar**

Povzetek

Kinematične GPS-tehnike so močno pospešile razvoj in razširjenost uporabe tehnologije GPS. Značilne pogreške, ki so prisotni pri kinematičnih opazovanjih, se skuša odstraniti v postopkih dodatne obdelave. Kalmanov filter predstavlja močno procesno orodje za obravnavo večjega obsega podatkov.

V članku so poleg kratkega opisa uporabe kinematičnih tehnik GPS v geodeziji in osnov Kalmanovega filtra prikazane tehnike filtriranja in glajenja na praktičnih primerih, iz katerih je razvidna smiselnost uporabe tehnik filtriranja na tovrstnih podatkih.

Uvod

Opazovanja GPS so bila sprva omejena na statično metodo. Položaj točke je bil določen z večurnimi statičnimi opazovanji. Razvoj GPS-instrumentarija, algoritmov za obdelavo opazovanj in računalniških sistemov je omogočil uvedbo novih metod GPS, ki omogočajo določitev položaja med gibanjem sprejemnika. Kinematične in kombinirane statično-kinematične metode so v veliki meri prispevale k široki uporabnosti tehnologije GPS.

Kalmanov filter je algoritem za optimalno obdelavo podatkov. V osnovi služi diskretnim procesom, lahko pa se ga razširi na zvezne in nelinearne procese. Ena glavnih značilnosti algoritma je rekurzivnost, kar pomeni, da se vhodni podatki obravnavajo zaporedno, kot pridejo v sistem. Kalmanov filter za izračune na določenem koraku ne potrebuje vseh predhodnih opazovanj, kajti vse predhodne izračune hrani v sistemski matriki, ki jo obnovi z vsakim novim opazovanjem. Količina podatkov v računskem koraku se z večanjem števila opazovanj v seriji ne veča, zato je algoritem procesorsko in pomnilniško nezahteven. Algoritem predpostavlja normalno razporeditev pogreškov meritev.

Kinematični GPS v geodeziji

Vse geodetske metode izmere so relativne, kar pomeni, da z njimi določamo položaj, ki je določen relativno glede na privzeto referenčno točko. Le tako se namreč lahko doseže natančnost, ki zadošča zahtevam geodetskih nalog. S kinematičnega stališča relativna določitev položaja pomeni, da se sprejemnik, s katerim določamo detajl, premika po delovišču. Sprejemnik v takšni vlogi se imenuje premični sprejemnik. V istem času referenčni sprejemnik miruje na točki, ki služi kot osnova relativne določitve položaja.

Čista kinematična metoda je tehnika zajema opazovanj med gibanjem antene. Beleženje trenutnega položaja je pogojeno s časovnim ali dolžinskim intervalom med posameznimi zajemi položajev. Za potrebe geodezije čista kinematična metoda ni najprimernejša. Bolj primerna je t.i. "Stop-and-Go" metoda. Na posamezni točki je

* mag., FGG – Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

** izr.prof.dr., FGG – Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

antena kratek čas statična ("Stop" faza), nato se premika proti naslednji detajlni točki ("Go" faza). Bistvo Stop-and-Go metode je zagotoviti nadštevilnost opazovanj z večjim številom opazovanj na isti točki. Opazovanja na posamezni točki praviloma trajajo manj kot 2 minuti.

Temelj kinematične metode GPS je zanesljiv algoritem za določitev začetnega števila celih valov ob zagotovljenem neprekinjenem sprejemu signala najmanj štirih satelitov ves čas izmere. Postopek določitve neznanega števila celih valov med GPS-sprejemnikom in vsakim satelitom imenujemo inicializacija. Inicializacijo lahko izvedemo na znanem vektorju - znanem položaju dveh točk, s statičnimi meritvami pred začetkom izmere ali z uporabo algoritma "On-The-Fly". Ob zanesljivi določitvi števila celih začetnih valov kljub kratkim opazovanjem dosežemo natančnost, ki je primerljiva, a vseeno nekoliko nižja od statične ali hitre statične metode izmere.

Po uspešno izvedeni inicializaciji je potrebno zagotoviti neprekinjen sprejem vsaj štirih satelitskih signalov, kar je ob nenehnem gibanju premičnega sprejemnika v prostoru lahko dokaj težavna naloga. Izogibati se moramo vsem oviram, ki bi lahko onemogočile sprejem signalov. Prekinitev sprejema zadostnega števila signalov zahteva ponovno izvedbo inicializacije.

Podatke kinematičnih opazovanj se lahko obdeluje naknadno ali sproti, v realnem času. Slednja metoda, t.i. RTK oziroma "Real-Time-Kinematic", se čedalje bolj uveljavlja, saj že med samo izmero pridobimo informacijo o količini in kvaliteti opravljenega terenskega dela.

Vplivi na kinematična opazovanja so podobni vplivom in pogreškom v vsaki GPS-izmeri: ionosferska in troposferska refrakcija, pogrešek tirnic satelitov, razporeditev satelitov, pogreški sprejemnika in antene ter ostali. Najbolj značilen pogrešek kinematične izmere je pogrešek odboja signala, t.i. "multipath". Multipath se namreč v kratkih časovnih obdobjih, ki so značilna za kinematično izmero, pojavi kot sistematičen pogrešek. Tipična okolja z visokim potencialom za multipath so npr.: okolica kovinskih streh, mokrih dreves, stolpnih in žičnatih ograj. Vpliv pogreška na natančnost določitve položaja točke lahko znaša več centimetrov za fazna opazovanja. Pogrešek zmanjšamo s primerno obliko antene, primerno postavitvijo antene ali procesno-signalnimi tehnikami.

Kalmanov filter

Osnovna postopka Kalmanovega filtra sta filtriranje in glajenje. Glajenje se lahko izvaja zgolj na filtrirani seriji opazovanj. Algoritem filtriranja upošteva lastnosti trenutnega opazovanja in sistema, ki ga tvorijo predhodna opazovanja, medtem ko algoritem glajenja dodatno upošteva značilnosti celotne serije izmere. Zaradi upoštevanja dodatnih informacij daje postopek glajenja praviloma boljše rezultate. Postopka glajenja v nasprotju s filtriranjem ni možno izvajati v realnem času, saj se glajenje izvaja od predzadnjega filtriranega opazovanja do prvega.

Postopki Kalmanovega filtriranja so v osnovi namenjeni filtriranju podatkov (iskanje grobih pogreškov, sistematičnih vplivov in večjih odstopanj) in glajenju linij. Zaradi odprtosti se ga lahko priredi lastnim zahtevam v vseh tehničnih aplikacijah. V povezavi z GPS-opazovanji se lahko postopke filtriranja uporabi v obdelavi surovih opazovanj za določanje položaja, pri modeliranju urinega teka sprejemnikove ure, pri zaznavanju izpada signala in pri določanju števila celih začetnih valov. Kalmanov filter dosledno upošteva in modelira karakteristike značilnih pojavov v procesu.

V model obravnave podatkov se lahko vključi opazovanja različnih merskih naprav, vsaka s svojo lastno dinamiko in značilnimi pogreški, ki omogočajo pridobitev informacije o določeni spremenljivki. V tem primeru je željeno kombiniranje podatkov meritev v sistematičnem in optimalnem smislu. Kalmanov filter kombinira vse razpoložljive podatke meritev in predhodna znanja o sistemu in instrumentariju za dosego ocene neznank na način, ki statistično minimizira pogreške.

Cilj vsakega tipa filtra je, splošno gledano, doseči optimalno rešitev ocene neznank s pomočjo podatkov iz okolja, obremenjenega s šumom. Optimalno rešitev predstavlja minimiziranje pogreškov v določenem pogledu.

Filtriranje kinematičnih GPS-opazovanj

Poleg relativne metode določitve položaja, ki je edini primeren za geodetske potrebe, obstajata še dve, manj natančni metodi. Absolutna določitev položaja temelji na kodnih opazovanjih psevdorazdalj do satelitov z enega samega sprejemnika. Natančnost določitve položaja se poveča z vključitvijo drugega sprejemnika, ki je postavljen na točko z znanim položajem. Položaj detajlne točke se določi na podlagi popravkov psevdorazdalj, ki se izračunajo na referenčnem sprejemniku. Ta metoda določitve položaja se imenuje diferencialna. Relativna metoda temelji na skupni obdelavi faznih opazovanj obeh sprejemnikov, ki je zaradi večje ločljivosti opazovanj faze za faktor pribl. 100 bolj natančna od diferencialne.

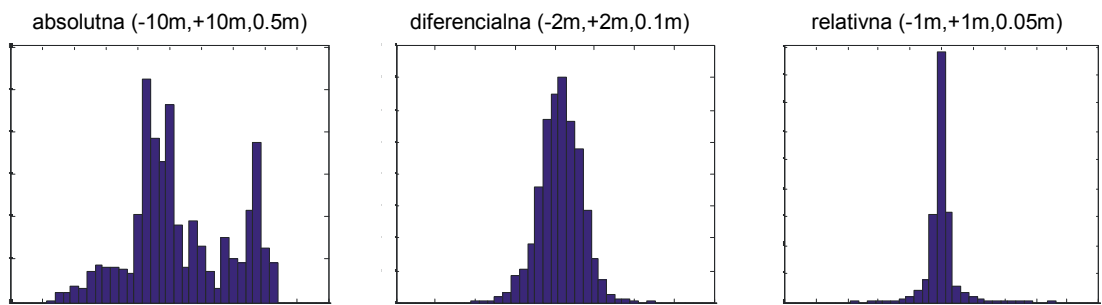
Obravnavani so vsi zgoraj omenjeni načini določitve položaja: absolutni, diferencialni in relativni. Natančnost določitve položaja v posameznem trenutku je merilo za utež, ki ga dobi posamezno opazovanje. Položaj s slabšo natančnostjo bo imel manjšo utež in posledično manjši prispevek v modelu sistema, ki ga predstavlja množica zaporednih opazovanj. V množici podatkov vsake epohe opazovanj se nahaja tudi informacija o natančnosti določitve posameznih komponent položaja, ki se izračuna v postopku določitve trenutnega položaja. Tako izračunane standardne deviacije niso absolutna mera natančnosti, ampak so ocenjene vrednosti standardne deviacije oz. notranja natančnost določitve položaja. Predvsem v kinematičnem načinu je to edini razpoložljivi podatek o kvaliteti izvedenih opazovanj.

Algoritem Kalmanovega filtra v svoji osnovi predpostavlja normalno razporeditev šuma opazovanj. Šum v praktičnem smislu izmere predstavljajo pogreški meritev. Pred samo aplikacijo Kalmanovega filtra na seriji opazovanj je torej potrebno določiti statistično razporeditev pogreškov opazovanj. Optimalni rezultati so dosegljivi zgolj v primeru, ko imajo pogreški normalno oz. Gaussovo razporeditev.

Analiza različnih metod določitve položaja v kinematičnih izmerah pokaže, da se absolutna opazovanja poleg slabše natančnosti od diferencialnih in relativnih opazovanj razlikujejo tudi po statističnih karakteristikah. Tovrstna opazovanja so namreč obremenjena s številnimi vplivi, ki v seštevku nimajo značilnosti normalnega šuma pogreškov opazovanj. Pogreški absolutnih opazovanj v splošnem nimajo normalne porazdelitve, kar pomeni težavno obravnavo teh opazovanj. Metodi diferencialne in relativne določitve položaja odstranita negativne vplive na GPS-opazovanja v tolikšni meri, da poleg povečane natančnosti dosežeta tudi normalno porazdelitev pogreškov izmere. Obravnava tovrstnih opazovanj je precej lažja, uporaba pa dosti širša.

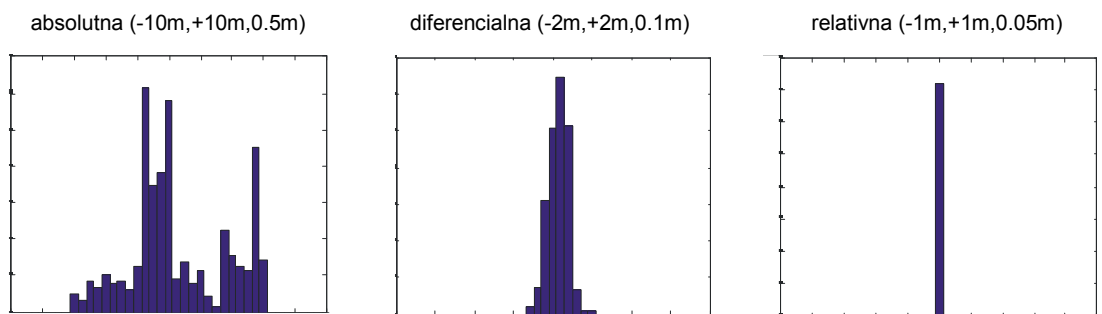
Razporeditev pogreškov posameznih metod določitve položaja je razvidna iz rezultatov opazovanj v kinematičnem načinu na točki z znanim položajem. Z vsako metodo so se izvedla 12-urna opazovanja z 10-sekundnim intervalom zajema podatkov opazovanj. Na sliki 1 so prikazani histogrami odstopanj absolutnih, diferencialnih in

relativnih opazovanj višinske komponente. Zaradi velike razlike v natančnosti in smiselnosti prikazov so razponi intervala prikaza različni. Skrajni vrednosti prikaza odstopanj od prave vrednosti in širina razreda so na prikazih zapisani poleg imen metod.



Slika 1 – Histogrami odstopanj kinematičnih opazovanj na točki

Na vseh serijah opazovanj je bilo izvedeno filtriranje in glajenje po algoritmu Kalmanovega filtra. Zaradi nenormalne statistične razporeditve absolutnih opazovanj so postopki filtriranja na taki seriji zgolj pogojno uporabni. Histogrami glajenih vrednosti opazovanj so prikazani na sliki 2. Intervali prikaza so enaki zgornji sliki.



Slika 2 – Histogrami glajenih vrednosti kinematičnih opazovanj na točki

Osnova delovanja filtra je identična za statične in kinematične primere – uporabljajo se iste enačbe in iste oblike vhodnih in izhodnih podatkov. Razlike nastopijo v definiciji določenih parametrov algoritma. Stopnjo filtriranja določata predvsem kovariančni matriki opazovanj in sistema. Kovariančna matrika opazovanj je odvisna od natančnosti opazovanj, sistemsko kovariančno matriko pa je potrebno definirati ločeno za vsak primer. V statičnem modelu se praviloma matriko enolično definira tako, da se varianca sistema z vsakim novim opazovanjem ustrezno zmanjša. Nevarnost takšne definicije variance sistema je pretirana natančnost vektorja sistema ob večjemu številu opazovanj na isti točki. Ker so kinematična opazovanja na posamezni točki kratkotrajna, ta ugotovitev ni kritična.

Če je dinamika obravnavanega kinematičnega modela znana, je določanje kovariančne matrike sistema relativno enostavno. Ker karakteristike gibanja v prostoru, kjer je mogoče izvajati GPS-opazovanja, običajno niso znane, postane določanje sistemske kovariančne matrike težavno. Določitev je empirična in je različna za vsak obravnavan primer. Določanje sistemske kovariančne matrike je delikatno opravilo, saj lahko pridemo do povsem napačnih rešitev, ki pa se na prvi pogled kažejo kot povsem pravilne.

Osnovni namen filtriranja in glajenja serije kinematičnih opazovanj je modeliranje in odstranitev določenih motenj v podatkih opazovanj. Kljub temu, da absolutna

opazovanja ne ustrezajo zahtevani normalni razporeditvi pogreškov, so zaradi najslabše natančnosti in največje obremenjenosti s pogreški v osnovi najbolj primerna za morebitno izboljšanje rezultatov izmere. Tudi na seriji absolutnih meritev je pogojno možno izvajati filtriranje in glajenje, vendar pa zaradi karakteristike teh opazovanj rezultat ni optimalen.

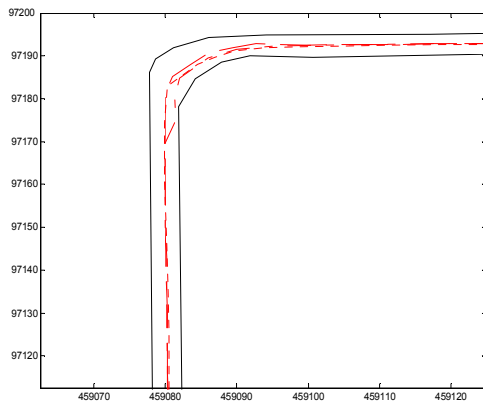
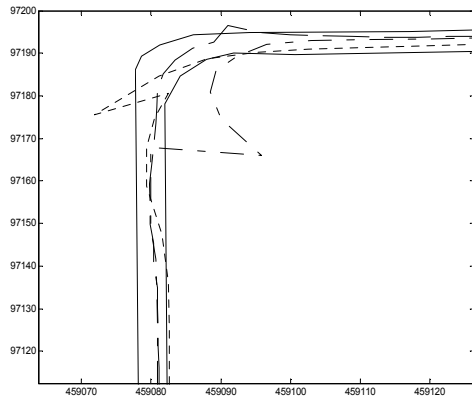
Diferencialna opazovanja so bolj natančna od absolutnih, vsebujejo manj motenj, so pa zadosti "Gaussova", da so rezultati filtriranja in glajenja zadovoljivi. Ob pravilni nastavitvi parametrov filtriranja so amplitude motenj zelo zmanjšane in graf, ki ga tvorijo filtrirani položaji, je precej bolj gladek od grafa merjenih diferencialnih položajev. Gladkost grafa se dodatno poveča z glajenjem filtriranih položajev. Na tak način se v največji možni meri približamo dejanski poti gibanja, če je seveda tudi ta gladka, brez nenadnih sprememb v smeri gibanja in hitrosti. Anomalije v gibanju je potrebno pred obdelavo določiti in v postopkih filtriranja upoštevati.

Natančnost relativnih opazovanj je zelo visoka, ob pravilni izvedbi inicializacije v normalnih pogojih je serija opazovanj običajno brez večjih motenj, zato je filtriranje in glajenje serije relativnih opazovanj praviloma nepotrebno.

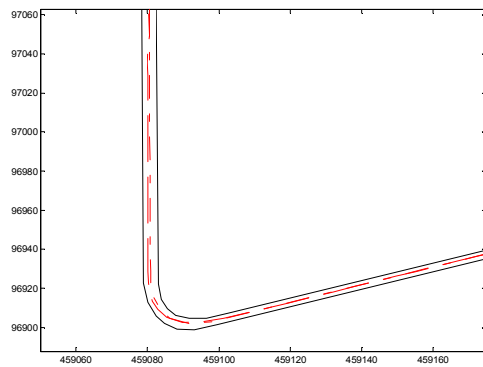
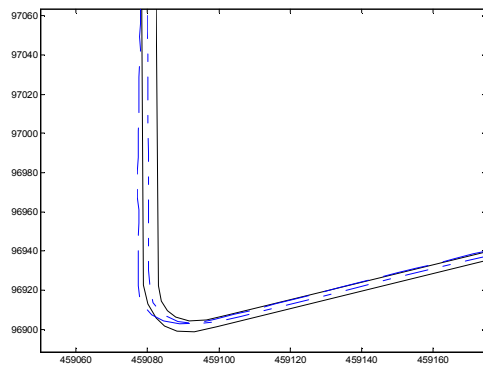
Filtriranje položajev, pridobljenih s kinematičnimi GPS-opazovanji, temelji na primerjavi napovedanega in dejanskega položaja, izračunanega iz podatkov opazovanj. Napovedani položaj se določi na osnovi znanih podatkov o gibanju opazovalca. Smer gibanja in predvideni položaj točke je najlažje določiti, če se obravnavani objekt premika po vnaprej definirani poti, npr. vozilo na cesti. Filtriranje na znani trasi je ob pomanjkanju ostalih informacij edini pravi način določanja predvidenega položaja.

Analiza pravih kinematičnih opazovanj je bila opravljena na delovišču, ki je bilo predhodno detajlno posneto z RTK-GPS metodo. Robovi poti, na kateri se je izvajalo testiranje, so na slikah označeni s polno črto.

Na levem delu slike 3 je prikazan odsek poti, kjer je v vseh treh izmerah z absolutno metodo prišlo do grobih pogreškov. Desni del slike 3 kaže, kako je možno s primerno obravnavo podatkov opazovanj priti do boljših rezultatov.

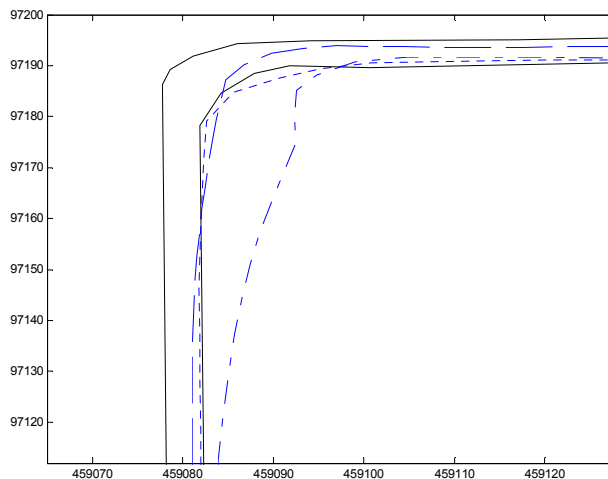


Slika 3 – Absolutna opazovanja in filtriranje absolutnih kinematičnih opazovanj
 Na sliki 4 je prikazan primer ustrezne obravnave diferencialnih opazovanj.



Slika 4 – Diferencialna opazovanja in filtriranje diferencialnih kinematičnih opazovanj

Glajenje tako filtriranih položajev daje nepričakovane rezultate. V teoretični osnovi so rezultati po izvedenem postopku glajenja boljši od filtriranja. V primeru filtriranja in glajenja na znani trasi to ne drži, kar nazorno prikazuje tudi slika 5. Glajenje je bilo izvedeno z identičnimi parametri kot filtriranje.



Slika 5 – Glajenje absolutnih opazovanj na dani trasi

V primerih gibanja na nepoznanem območju je lahko glajenje koristno orodje. Do neke mere nadomesti dano podlago, hkrati zgladi linijo in odpravi pomanjkljivosti filtriranja, a ima vseeno svoje omejitve.

Preizkušeni postopki obravnave podatkov kinematičnih opazovanj kažejo na določeno pridobitev v kakovosti rezultatov izmere, predvsem v primeru absolutnih in diferencialnih opazovanj. Relativna opazovanja so že v sami osnovi tako natančna, da izboljšave rezultatov skoraj ni mogoče doseči. Pri obdelavi vseh vrst opazovanj je potrebna previdnost, v nasprotnem primeru lahko pride do napačnih rezultatov.

Relativna opazovanja so poleg natančne določitve položaja točk uporabne tudi za druge namene. Možna je uporaba položajev relativnih opazovanj kot podlaga za filtriranje absolutnih in diferencialnih opazovanj. Relativno določeni položaji trase lahko nadomestijo z metodo detajlne izmere določeno traso. Čas pridobitve podatkov o podlagi z relativnimi kinematičnimi opazovanji je v primerjavi z detajlno izmero znatno skrajšan. Tako pridobljena informacija o poti seveda ni optimalna, ker ima na določenih odsekih preveliko gostoto točk, na določenih pa prereditve. Izmera osi na kinematični način se lahko optimizira z ročnim sproženjem meritve položaja na izbranih točkah. Kadar podatkov o trasi ni na razpolago, detajlna izmera pa je predraga, je kinematična določitev osi hitra in relativno poceni rešitev, ki je lahko v postopkih filtriranja učinkovita rešitev, potrebno pa se je zavedati določenih omejitev. Kljub določenim pomanjkljivostim je filtriranje na "relativni" osi veliko bolj učinkovito kot na neznani trasi.

Zaključek

Postopki filtriranja in glajenja nedvomno večajo uporabnost kinematičnih metod, predvsem diferencialne, deloma tudi absolutne metode. V določenih primerih so lahko učinkovite tudi v obravnavi relativnih opazovanj.

Izdatne izboljšave manj kvalitetnih podatkov se ne sme pričakovati. Ob pomanjkanju dodatnih informacij, ki bi pripomogle k boljši rešitvi problema, so rezultati filtriranja in glajenja zadovoljivi. S pravilno obravnavo podatkov meritev se lahko doseže določen napredek v točnosti meritev.

Postopki Kalmanovega filtriranja in glajenja imajo velik potencial za uporabo v številnih nalogah in za različne namene. Algoritem je odprt in ga lahko vsak uporabnik prilagodi glede na svoje potrebe. Če je algoritem dobro nastavljen, zna biti dokaj prizanesljiv, kar pomeni, da deluje in poskuša poiskati optimalno rešitev tudi takrat, ko podatki niso popolni ali so celo napačni. Velika prednost Kalmanovega filtra pred večino ostalih procesnih orodij je obravnava večje količine istovrstnih podatkov ali skupna obravnava podatkov različnega izvora. Vsak dodaten podatek o obnašanju sistema ali posameznega opazovanja dodatno pripomore k optimalni izrabi razpoložljivih podatkov in posledično boljši rešitvi zadane naloge.

Literatura

- Brown R., Hwang P.: *Introduction to Random Signal and Applied Kalman Filtering, Second Edition*, Wiley, 1992
- Kozmus K.: *Analiza in obdelava kinematičnih GPS opazovanj*, magistrska naloga, Ljubljana, 2002
- Merminod B.: *The use of Kalman filters in GPS navigation*, UNSW, 1989
- Strang G., Borre K.: *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*, Wellesley-Cambridge, 1997
- Welch G., Bishop G.: *An Introduction to the Kalman Filter*, University of North Carolina, 2000