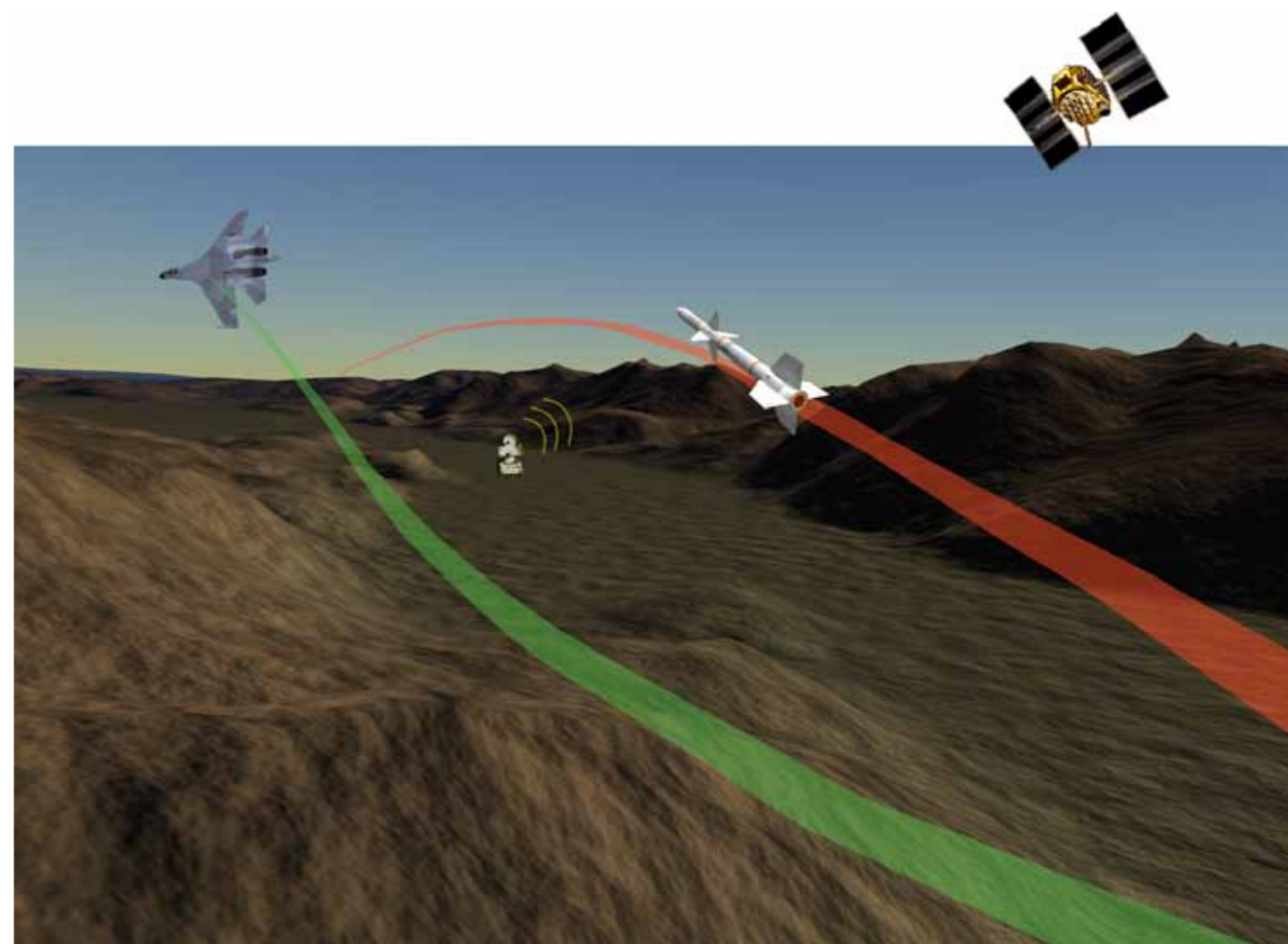


BENGT BOBERG, FREDRIK BEREFELT, ULRIK NILSSON,
PETER STRÖMBÄCK, SVEN-LENNART WIRKANDER



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1250 anställda varav ungefär 900 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Bengt Boberg, Fredrik Berefelt, Ulrik Nilsson, Peter Strömbäck &
Sven-Lennart Wirkander

Robust Navigering - Slutrapport

Utgivare FOI – Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 TUMBA	Rapportnummer, ISRN FOI-R--2081--SE	Klassificering Användarrapport
	Månad år December 2006	Projektnummer E6060
	Forskningsområde Bekämpning och skydd	
	Delområde VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare Bengt Boberg, Fredrik Berefelt, Ulrik Nilsson, Peter Strömbäck & Sven-Lennart Wirkander	Projektledare Bengt Boberg	
	Godkänd av Helena Bergman	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig John Robinson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
Rapporttitel Robust Navigering - Slutrapport		
<p>Sammanfattning</p> <p>Robust navigering är ett treårigt forskningsprojekt med målen att designa algoritmer och simuleringsmodeller för systemutvärdering av robusta navigeringssystem. Denna rapport avser förmedla en översikt över genomförd verksamhet under projektets gång med extra fokus på verksamheten under år 2006, samt nyttan med robusta navigeringssystem i såväl civila säkerhetssystem som försvarsapplikationer.</p> <p>FOI har länge bedrivit forskning inom området integrerad navigering, huvudsakligen inriktat mot kostnadseffektiva navigeringssystem. Under 2006 har ultratät integration mellan GPS och tröghetsnavigeringssystem studerats. En ultratät integration utnyttjar information från tröghetsnavigeringssystem (TNS) inte bara för att förbättra skattningar av position och hastighet utan även för att åstadkomma effektivare följning av satellitsignaler (eng. tracking) i GPS-mottagaren. En ultratät integration fungerar därför bra i svagsignalmiljö (inomhus och stadsmiljö) och kan till och med följa blockerade satelliter. Den ultratäta integrationen är också överlägsen andra integrationsmetoder i militära applikationer, typiskt med avsiktlig störning och hög dynamik, med bättre både störfasthet och noggrannhet än traditionella integrerade navigeringssystem.</p>		
Nyckelord Robust navigering, integrerad navigering, ultratät integration, UTC		
Övriga bibliografiska uppgifter		
ISSN ISSN-1650-1942	Antal sidor 34	Språk Svenska
Distribution Enligt missiv	Pris Enligt prislista	
	Sekretess Öppen	

Issuing organisation FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 TUMBA	Report number, ISRN FOI-R--2081--SE	Report type User report
	Month year December 2006	Project number E6060
	Research area code Strike and Protection	
	Sub area code Weapons and Protection	
	Sub area code 2	
Author(s) Bengt Boberg, Fredrik Berefelt, Ulrik Nilsson, Peter Strömbäck & Sven-Lennart Wirkander	Project manager Bengt Boberg	
	Approved by Helena Bergman	
	Scientifically and technically responsible John Robinson	
	Sponsoring agency FM	
Report title Robust Navigation - Final Report		
Abstract <p>Robust navigering is a research project spanning over three years. The main objective is to design algorithms and simulation models for evaluation of robust navigation systems. The purpose of this report is to communicate an overview of project activities and uses of robust navigation systems for civil and defence applications.</p> <p>FOI (The Swedish Defence Research Agency) has been involved in research on integrated navigation systems for a long time with special focus on cost effective navigation systems. During 2006 ultra tightly integrated navigation systems were studied. An ultra tight integration system uses information from inertial navigation system (INS) not only to improve the estimates of position and velocity but also to achieve more efficient tracking of satellite signals in the GPS receiver. An ultra tight integration therefore works well in a weak-signal environment (indoor and urban environment) and can even track blocked satellite signals. The ultra tight integration is also superior to other integration methods in military applications, typically in scenarios with intentional jamming and high dynamics, with better jamming resistance and more accurate positioning than traditional navigation systems.</p>		
Keywords Robust navigation, integrated navigation, ultra tight integration, UTC, ultra tightly coupled, deep integration		
Further bibliographic information		
ISSN ISSN-1650-1942	Pages 34	Language Swedish
Distribution By sendlist	Price According to price list	
	Security classification Unclassified	

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problemställning	2
1.2.1	Störning	2
1.2.2	Miljö med svaga signaler (stadmiljö/inomhus)	2
1.2.3	Hög dynamik	3
1.3	Robust navigering	3
1.3.1	Aktiviteter	3
1.3.2	Nyttan med projektet	4
1.3.3	Internationell försvarsforskning	4
1.3.4	Fortsättning	4
2	Sammanfattning år 2004/2005	7
2.1	Samverkande navigering	7
2.2	Integrerade navigeringssystem	9
3	Integrerad navigering	11
3.1	Lös integration	11
3.2	Tät integration	11
3.3	INS-stöttning av GPS-mottagare	12
4	Ultratät integration	15
4.1	Centraliserad design	15
4.2	Decentraliserad design	17
4.3	Sammanfattning av ultratät integration	17
4.4	Tillämpningar av ultratät integration	19
4.4.1	Militära tillämpningar	19
4.4.2	Civila tillämpningar	20
4.5	Relaterat arbete	20
4.5.1	Produkter	21
4.5.2	Forskargrupper	22
5	Bilaga	25
5.1	Teknisk beskrivning av ultratät integration	25
5.1.1	Satellitsignal	25
5.1.2	Kodmätningar - Vektor DLL	26
5.1.3	Integrationsfilter	28
5.2	Förslag till mjukvaruarkitektur för framtida implementation	28
5.2.1	Plattformsrörelse och IMU-signaler	28
5.2.2	GPS-signalgenerator	29
5.2.3	Front-End för GPS-mottagare	29
5.2.4	Integrerade navigeringssystem	29
	Litteraturförteckning	31

1 Inledning

Denna rapport ger en översikt av verksamheten i projektet Robust Navigering. Det första kapitlet ger en kortfattad bakgrund, beskriver problemställningen likväl som de aktiviteter som bedrivits. Kapitlet avslutas med nyttan av projektets resultat för Försvarmakten samt föreslår en lämplig fortsättning inom Robust Navigering. Kapitel två beskriver den verksamhet som pågått under 2004 och 2005. I kapitel tre beskrivs och jämförs olika metoder för integrerad navigering. Kapitel fyra går in mer i detalj på den nya metod, ultratät integration, som behandlats i projektet under 2006. Här beskrivs även civila och militära tillämnningar såväl som relaterat arbete som inbegriper forskning och produktutveckling. I en bilaga finns även en mer teknisk beskrivning av den centraliserade ultratäta algoritmen som tagits fram inom detta projekt.

1.1 Bakgrund

I ett nätverksbaserat försvar är det viktigt att militära enheter har kännedom om position, rörelse och tid även i svåra miljöer så som stads- och inomhusmiljöer, telekrigsmiljö och tät vegetation. Många militära och civila navigeringssystem är idag baserade på globala satellitnavigeringssystem (eng GNSS, Global Navigation Satellite Systems) som GPS. Satellitbaserade navigeringssystem är dock känsliga mot störningar och bör därför skyddas och stöttas. Ett effektivt skydd för satellitbaserade navigeringssystem är adaptiv lobformning. Stöttning kan ske dels genom integrering med andra sensorer, till exempel tröghetsnavigeringssensorer, dels genom samverkan med andra navigerande plattformar. Användandet och beroendet av satellitnavigering kommer med stor sannolikhet att öka i framtiden. Baserat på den senaste utvecklingen inom GNSS är det troligt att antalet tillgängliga satelliter för navigering har dubblats till år 2011.

Att känna en plattforms position och rörelse är inte enbart viktigt ur en strategisk synvinkel, det är också nödvändigt för att styrda vapen ska fungera. För att ha fullgod kunskap om styrda vapens effekt och känslighet är det därför viktigt att ha kunskap om navigeringssystem och navigeringsmetoder. Detta gäller även vid användning och utveckling av obemannade spaningsfarkoster. Utvecklingstakten inom navigeringssystem har de senaste åren ökat med en mängd nya användningsområden och applikationer baserade på GNSS. Några exempel på intressanta områden som FOI följer är: användning av och utveckling inom MEMS-sensorer (Micro-Electro-Mechanical-System), ultratät integration mellan GPS och TNS och samverkande navigering. Utveckling sker snabbt och drivs av både civila och militära applikationer som till exempel positionering i kommunikationssystem, utvecklingen av framtida automatiska säkerhetssystem för bilar, inomhuspositionering för räddningspersonal och in-satsstyrkor.

1.2 Problemställning

1.2.1 Störning

GPS är baserat på svaga satellitsignaler (ca 100 ggr svagare än det termiska bakgrundsbruset) och är därför lätt att störa ut. Det finns många beskrivningar på hur man enkelt och billigt kan slå ut GPS i ett stort område. På internet kan man hitta kretsscheman för hur man själv bygger en GPS-störare och kommersiella militära GPS-störare (både enkla/billiga och tekniskt avancerade) har funnits i flera år. Detta tillsammans med den ökade användningen av störkänsliga GPS-applikationer på den civila marknaden ökar också risken för att dessa slås ut med förödande konsekvenser. I Irakkriget 2003 (enligt *Aerospace daily*) användes störare för att slå ut amerikanernas GPS-baserade system. Störning av satellitbaserade navigeringssystem påverkar både militära system och strategiskt viktiga funktioner i samhället.

Enligt försvarsmaktens riktlinjer, [1], ska redundanta navigeringssystem användas, GPS ska ej vara det enda systemet. Traditionellt sett har man ofta utnyttjat tröghetsnavigeringssystem (TNS) för navigering, vilket är ett störfast system. Tröghetsnavigeringssystem har dock i princip en obegränsad feltillväxt, och det krävs mycket dyra system för att även under kortare tidsperspektiv få en prestanda som kan jämföras med GPS. Dessa system är i dagsläget ofta inte rimliga att använda istället för GPS på grund av kostnad, vikt och storlek. Under senare år har dock utvecklingen av MEMS-sensorer (Micro-Electro-Mechanical-System) medfört att det finns billiga, små och lätta TNS med låg effektförbrukning.

1.2.2 Miljö med svaga signaler (stadsmiljö/inomhus)

Det är inte enbart störning som ställer till problem för navigeringssystem. I stadsmiljö kommer satellitbaserade navigeringssystem alltid att ha problem på grund av skymd sikt till satelliter och flervägsutbredning. Det är därför önskvärt med flera sensorer för att få ett robust navigeringssystem. Ett navigeringssystem baserat på standard GPS ¹ fungerar i dagsläget inte alls inomhus på grund av alldeles för svaga satellitsignaler. Så fort ett GPS-baserat navigeringssystem befinner sig inomhus i dag förloras kontakten med satelliterna (trackingen). När sikten mot satelliterna åter är fri, måste GPS-mottagaren hitta satelliterna igen (re-acquisition), och denna så kallade påläsningsprocess är beräkningstung och kan även ta relativt lång tid vilket påverkar navigeringsprestanda. Därför vill man även inomhus använda flera kompletterande sensorer i så kallade integrerade navigeringssystem. Mycket tyder på att ultratäta integrerade navigeringssystem med fördel kan användas i stadsmiljö och inomhus, då ett sådant är bättre rustat för att ta emot svaga signaler. Ett ultratätt integrerat navigeringssystem klarar av att följa satellitsignalerna även då man t.ex. kommer inomhus, har negativa elevationsvinklar eller byggnader som skymmer sikten. När sikten till satelliterna åter är fri kan det ultratäta systemet direkt hitta satellitsignalerna och låsa på utan re-aquisition. Det

¹Det bör nämnas att det finns en metod, HSGPS (High Sensitivity GPS), som klarar av att följa satellitsignaler ner till 30 dB (1000 ggr) svagare än typiska satellitsignaler utomhus. HSGPS-mottagare använder coherent eller icke-coherent integrationsteknik för att förbättra känsligheten. Ett lager tegelsten dämpar signaler ca 5 dB, 100 mm cement dämpar 14 dB. Ett resultat av att försöka följa svaga signaler blir att flervägsreflexer också används vilket försämrar positionsnoggrannheten. I [2] redovisas resultat från experiment i stadsmiljö (standard GPS-tillgänglig endast 48% av tiden) där HSGPS-mottagaren ger horisontella RMS-fel på 5m och ett löst kopplat navigeringssystem baserat på TNS och GPS ger ett motsvarande horisontellt RMS-fel på 2.5m.

är också mindre känsligt för störningar och klarar av högdynamik bättre än traditionella GPS-mottagare.

1.2.3 Hög dynamik

För en standard GPS-mottagare är hög dynamik ² ofta mycket problematisk och leder till att låsningen till satellitsignalen tappas och man får ett så kallat "hopp" i fas (eng. phase-slip). Det är Dopplerskiftet i bärvågen som GPS-mottagaren saknar information om. Det är den relativa hastigheten mellan satellit och GPS-mottagarantenn som påverkar Dopplerskiftet. Satellitens rörelse är känd medan GPS-mottagaren normalt inte använder information om dess egen rörelse. Problemet vid hög dynamik är att GPS-mottagaren inte är tillräckligt snabb för att hinna med att följa den fasändring som uppstår på grund av att mottagaren accelereras eller roteras. En standard GPS-mottagare har en fast bandbredd på sina trackingloopar som eg. är återkopplade styrlagar som försöker minimera bärvågernas fasfel. En hög bandbredd på trackingloopen gör att snabba fasförändringar kan följas men man erhåller ett stort reglerfel i fas som i sin tur ger ett större positionsfel. Att bestämma bandbredden är att kompromissa mellan följning och positionsfel. En annan viktig effekt att beakta när det gäller val av bandbredd är att störfastheten ökas för en låg bandbredd. Det bör också nämnas att när ett Kalmanfilter använder fasen som observation så påverkas informationsinnehållet av bandbredden vilket igen leder till ytterligare kompromisser vid valet av bandbredd. I den ultratäta integrationen som behandlas senare sker optimering av bandbredd automatiskt med hjälp av Kalmanfilter i GPS-mottagarens trackingloop.

1.3 Robust navigering

Robust navigering är ett treårigt forskningsprojekt som påbörjades år 2004. De långsiktiga målen har varit att utforma algoritmer och simuleringsmodeller för systemvärdering av robusta navigeringssystem.

1.3.1 Aktiviteter

- **2004**
Under 2004 fokuserades arbetet på utveckling av samverkande navigering vilket resulterade i ett konferensbidrag [3].
- **2005**
Fokus under 2005 låg på validering av de tidigare framtagna integrationsalgoritmerna för GPS och tröghetsnavigering. Detta genomfördes och redovisades inom ramen för ett examensarbete [4]. Resultat från studier i *Robust navigering* presenterades bland annat genom ett konferensbidrag [5] till Urban Warfare Workshop som anordnades av FMV, samt genom en artikel publicerad i Militärteknisk tidskrift, [6].
- **2006**
Under 2006 påbörjades forskning på så kallad ultratät integration. En litteraturstudie och en sammanställning av en komplett algoritmbeskrivning av ultratät integration har genomförts och sammanställs i 5.1. Dessutom har ett förslag till arkitektur för framtida implementation tagits fram, se 5.2.

²Med hög dynamik menas här hastighetsändringar (acceleration) och vinkeländringar (vinkelhastigheter) som medför att en GPS-mottagare tappar följning av satellitsignal.

1.3.2 Nyttan med projektet

Genom beställningen av FOT-projektet *Robust navigering* har följande nytta för Försvarsmakten identifierats:

- **Ökade kunskaper om navigeringssystem**

Projektet kan stötta försvarsmakten med kunskap om avancerade navigeringssystem, baserat på teknologi som finns idag och framtida teknologier. Detta kan ske genom att identifiera brister respektive styrkor hos existerande navigeringssystem, vilket kan utnyttjas vid t.ex. upphandling av navigeringssystem samt utvärdering av styrda vapen och UAV:er. Kunskap har förmedlats genom rapporter, föredrag, referensgruppsmöten och konferensbidrag. Följande rapporter har producerats i projektet eller med stöd av projektet *Robust navigering*; [4], [7], [5], [6], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] och [16].

- **Forskning på ny teknologi**

Projektet har bedrivit forskning på nya navigeringsmetoder och teknologier för att kunna bibehålla en hög kunskapsnivå samt driva forskningsfronten på området framåt. Till dessa teknologier hör samverkande navigering och ultratät integration. Dessa behandlas mer senare i rapporten. Konferensbidragen [3] och [5] har producerats under projektets gång.

- **Utveckling av modeller för robotsimulering**

Projektet har utvecklat modeller av navigeringssystem för utvärdering av prestanda hos existerande navigeringssystem vilka bland annat använts i modeller för utvärdering av styrda vapen. Dessa modeller kan fungera som kunskapsbas för att tillgodose Försvarsmaktens eventuella framtida behov inom området navigering, styrning och simulering av styrda vapen och UAV:er. En Matlab-toolbox påbörjades i föregående projekt *Störning av navigeringssystem* och har uppdaterats inom projektet *Robust navigering*.

- **Uppdatering av modeller för simulering av telekrigsscenarier**

Projektet har utvecklat simuleringsmodeller av navigeringssystem för att användas i FoT-projektet *Telekrig mot GNSS* där störstrategier och störskydd simuleras i realistiska NAVWAR (Navigation Warfare). Det är av stor vikt att denna simuleringsmiljö uppdateras för att de slutsatser som dras gällande telekrigsstrategier skall vara så korrekta som möjligt.

Detta gör försvarsmakten bättre rustad att möta morgondagens problem med störning av navigeringssystem samt ökade krav på tillförlitligheten och noggrannhet hos navigeringssystem.

1.3.3 Internationell försvarsforskning

Projektet deltar som EDA CGE (European Defence Agency Captech Government Expert) och följer aktiviteter inom CAPTECH GEM04 som behandlar just guidance & control. EDA prioriterar Unmanned Aerial Vehicles(UAV) och att lösa de praktiska problem som existerar i samband med att flyga i civilt flygrum. Robusta navigeringssystemet är en av de viktigaste delarna för att erhålla en godkänd obemannad flygande farkost. Inom CAPTECH GEM04 pågår diskussioner om djup integration av GNSS och TNS.

1.3.4 Fortsättning

Navigering är viktigt i många tillämpningar såsom styrda vapen, autonoma system, ledningssystem och telekrig. Det har på senaste åren skett mycket

inom detta område och utvecklingstakten kommer troligen att öka. Det tidigare militära satellitbaserade navigeringssystemet GPS har sedan flera år tillbaka anpassats för civilt bruk och allt fler civila användningsområden har införts. Europa är på god väg att införa ett eget satellitbaserat navigeringssystem, Galileo. De navigeringssystem som av tradition länge använts av försvaret är tröghetsnavigeringssystem. För att dessa ska fungera tillfredsställande under en längre tid måste sensorerna vara av hög kvalitet. Dessa är både dyra och stora. Under de senaste åren har utvecklingen av MEMS-sensorer (Micro-Electro-Mechanical-System) ökat och prestanda hos framtida MEMS-sensorer är mycket lovande, samtidigt som storlek, kostnad och effektförbrukning minskar jämfört med traditionella tröghetsensorer. Detta gör det troligt att många navigeringsapplikationer i framtiden kommer att inkludera tröghetsensorer baserade på MEMS-teknologi.

Under projektet *Robust navigerings* gång har några navigeringsområden identifierats som extra intressanta att studera framöver. Dessa beskrivs i korthet nedan.

Ultratät integration

Ultratät integration kommer att diskuteras mer senare i rapporten. Ur militär synvinkel är detta en relativt ny och viktig integrationsmetod mellan GPS och TNS (Tröghetsnavigeringssystem). Med denna metod som är en ny GPS-mottagararkitektur kan TNS stötta GPS:n så att följningen av satellitsignalerna kan förlängas även vid fall med dämpade signaler eller vid högre nivåer av störning (låga signal-brus-förhållanden). Speciellt har detta påvisats för styrda vapen med hög dynamik, vilket är ett mycket svårt fall som inga standard-GPS:er klarar av. Den ultratäta integrationen tar hänsyn till GPS-mottagarens dynamik genom mätningar från tröghetsnavigeringssystem, vilket gör att GPS-satelliterna kan följas bättre. Detta är ett relativt nytt forskningsområde och mycket finns fortfarande att utveckla och förbättra.

Samverkande navigering

När ett robust navigeringssystem för en farkost inte har tillräckligt bra navigeringsprestanda för att lösa en uppgift kan gruppssamverkan mellan flera farkoster, samverkande navigering, vara en möjlig lösning. Det förutsätts att enheterna kan kommunicera med varandra samt att de kan mäta in varandras relativa avstånd. Det finns många exempel på hur samverkande navigering kan utnyttjas. Ett exempel kan vara en grupp av marksoldater som verkar i en stadsmiljö. För att hålla reda på var egna enheter befinner sig har de ett positioneringssystem baserat på GPS, stöttat av olika relativt billiga sensorer samt trådlös kommunikation med egna enheter. Ett stridspar av söker en byggnad, vilket innebär att de förlorar kontakt med satelliterna och GPS slutar fungera. De får nu förlita sig på de stöttande sensorerna (med växande positionsfel) men kan genom den trådlösa kommunikationen få hjälp av sina egna enheter, som befinner sig utanför och har tillgång till satellitbaserad navigering. Genom att skicka över egen position till övriga enheter och mäta relativa avstånd till de andra enheterna fungerar de på samma sätt som satelliter. Därmed vet det avsökande stridsparet var de befinner sig och var de har varandra.

För att ett konstruera ett sådant navigeringssystem krävs goda kunskaper om integrerade navigeringssystem och hur samverkande navigering kan användas.

Marksoldat/räddningpersonal

Problematiken beskriven i föregående avsnitt, *Samverkande navigering*, finns även för räddningspersonal såsom t.ex. brandmän. Fokus på detta område är hur man får ett personburet navigeringssystem robust genom sensorintegration. Det finns idag inga kommersiellt tillgängliga robusta navigeringssystem som säkert hanterar både inomhus och utomhusmiljöer för personburna navigeringssystem. Utomhus är GPS ofta det självskrivna alternativet, men inomhus saknas fullgoda alternativ. Viss forskning har gjorts på tröghetssensorer placerade på fötter i kombination med magnetsensorer, men mycket kvarstår innan dessa navigeringssystem kan anses robusta och ge användbara navigeringsprestanda.

2 Sammanfattning år 2004/2005

Arbetet i projektet under de två första åren bestod i princip av två huvuddelar. 2004 var forskningen inriktad på samverkande navigering och under 2005 på validering av tidigare framtagna integrationsalgoritmer. I detta kapitel beskrivs dessa verksamheter kortfattat.

2.1 Samverkande navigering

När ett robust navigeringssystem för en farkost inte har tillräckligt bra navigeringsprestanda för att lösa en uppgift kan gruppssamverkan mellan flera farkoster, samverkande navigering, vara en möjlig lösning. I projektet har olika navigeringsstrategier för hur satellitinformationen skall användas för specialfallet med två farkoster i stadsmiljö utvärderats, se figur 2.1. I figur 2.2 visas hur positionsfelet varierar för det undersökta scenariot där samverkan kan ske två gånger.

Förutsättningar:

De undersökta metoderna bygger på att varje farkost har sitt eget navigeringssystem baserat på GPS och TN. Därutöver förutsätts kommunikation samt kännedom om det relativa avståndet eller den relativa avståndsvektorn mellan farkosterna.

Fördelar:

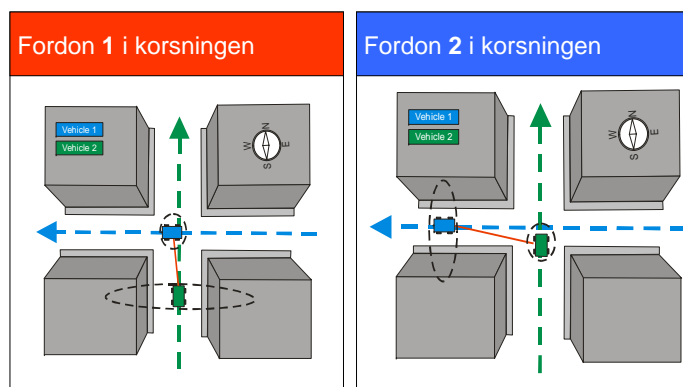
Gruppssamverkan medför att

- hela gruppens navigeringsprestanda förbättras
- navigeringsprestanda kan förbättras i både störd och urban miljö
- farkosterna kan utrustas olika. Det är då möjligt att ha få farkoster med robusta och störskyddade navigeringssystem (GPS/TNS/gruppantenn) kombinerade med många och billiga farkoster. Detta resulterar i lägre totalkostnad men förbättrade navigeringsprestanda för hela gruppen.

Slutsats:

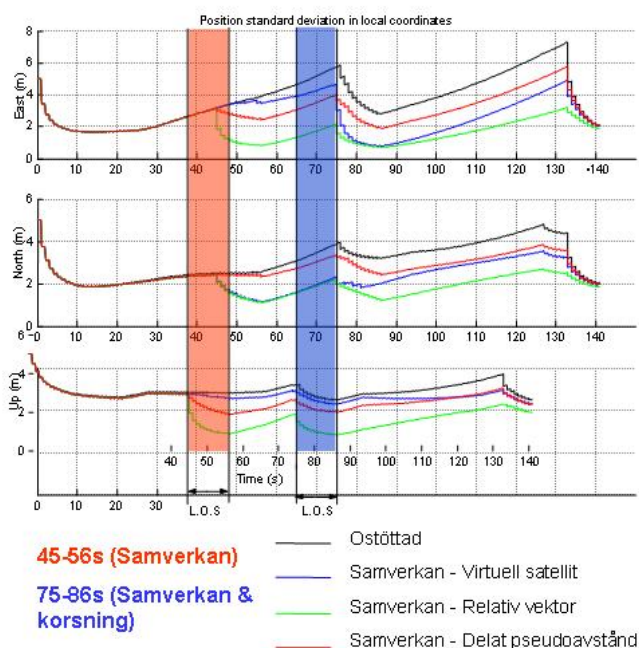
Den bästa effekten av samverkande navigering erhålles då farkosterna ser få och olika satelliter. Navigeringslösningens kvalitet bestäms av de båda enheternas gemensamma uppsättning av satelliter. Samverkande farkoster har potentialen att förbättra navigeringsprestanda i både störd och urban miljö.

Resultaten av denna undersökning presenterades i ett konferensbidrag [3] på ION NTM2004. Samverkande navigering är ett sätt att bibehålla eller till och med förbättra navigeringsprestanda och samtidigt sänka kostnaderna. Mer information om detta arbete finns i statusrapporten från 2005 [7].



Figur 2.1: Det undersökta scenariot inkluderar två samverkande farkoster som navigerar längs korsande gator. Här visas två tillfällen då samverkan mellan farkosterna sker. Resterande tid är farkosterna skymda av byggnader. Ellipserna visar respektive fordons positionsosäkerhet.

Standardavvikelse i position



Figur 2.2: I figuren ovan visas standardavvikelsen för positionen för den gröna farkosten (den som färdas i nord-sydlig riktning i figur 2.1) under en simulering av samverkande navigering. De två samverkande farkosterna har bara kontakt med varandra under två korta tidsintervall (det intervall då fordon 1 är i korsningen är rödmarkerat och det intervall då fordon två är i korsningen är blåmarkerat). Detta räcker dock för att ge förbättrade navigeringsprestanda under resterande körning. Under den första perioden av samverkan får den gröna farkosten motsvarande förbättrade satellitkonstellation genom samverkan som då den befinner sig i korsningen med fler synliga satelliter. Mer detaljer om principerna för de tre olika samverkansmetoderna beskrivs i [3].

2.2 Integrerade navigeringssystem

Navigeringsalgoritmer, som tidigare utvecklats i projektet, validerades under 2005 med hjälp av experimentella data. För detta ändamål utformades en experimentplattform. Resultaten av valideringen presenterades i [4], [7] och [8].

Experiment med både hög och låg dynamik utfördes i en berg-och-dalbana respektive i en bil. En lös och en tätt kopplad GPS/TNS-integration med billig MEMS-IMU jämfördes. Integrationen baserades på ett *Extended Kalman Filter (EKF)*.

För lågdynamikexperimentet placerades navigeringssystemet i bil som färdades i en miljö som delvis innehöll tät vegetation och byggnader. Detta resulterade i att navigeringssystemet ofta hade mindre än fyra satelliter tillgängligt och i en dålig geometrisk konstellation. Testbanan innehöll många skarpa svängar. I figur 2.3 visas en jämförelse av resultatet av de båda algoritmerna i en skarp sväng. Man kan se att det löst-kopplade navigeringssystemet inte presterar lika bra som det tätt-kopplade. Det löst kopplade systemet resulterade i en hackigare bana med stora fel. Att banan blir hackigare beror främst på att det löst-kopplade systemet inte kan estimeras gyrofelen lika väl som det tätt-kopplade systemet, vilket resulterar i större positionsfel mellan GPS-uppdateringarna. Den täta integrationen hanterar blockering av satelliter bättre och är därmed jämnare och mer noggrann. Att det löst-kopplade systemet ger så stora positionsfel i det beskrivna området beror på att det inte kan hantera få GPS-satelliter (mindre än 4) lika väl som det tätt-kopplade systemet. Detta är en av de egenskaper som gör att ett tätt-kopplat GPS/TNS system är att föredra i en svår miljö där satellittillgängligheten är begränsad såsom stadsmiljö, skog eller liknande. Mer information om valideringen av navigeringsalgoritmerna finns i [8] och [4].

Förutsättningar:

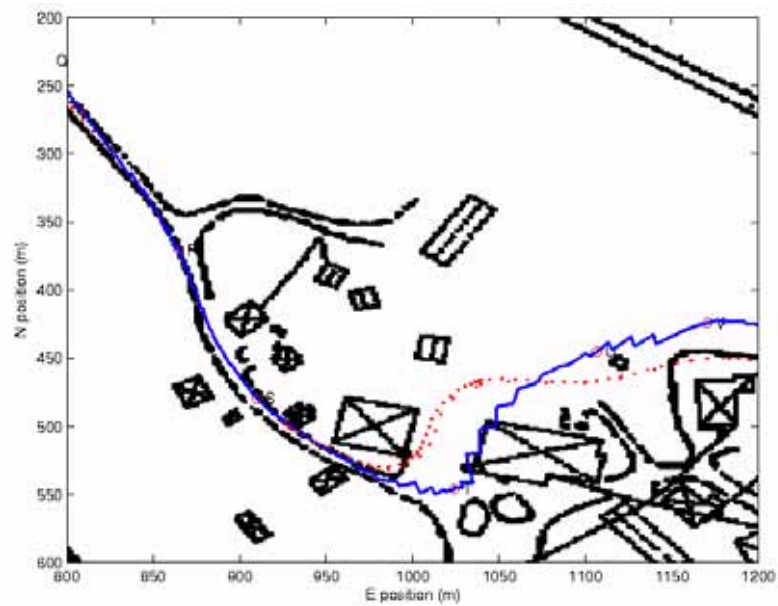
Två GPS/TNS-baserade navigeringsalgoritmer, lös respektive tät integration har jämförts i olika miljöer (låg dynamik, hög dynamik och urban miljö). En billig och enkel MEMS-IMU har använts i TNS.

Fördelar:

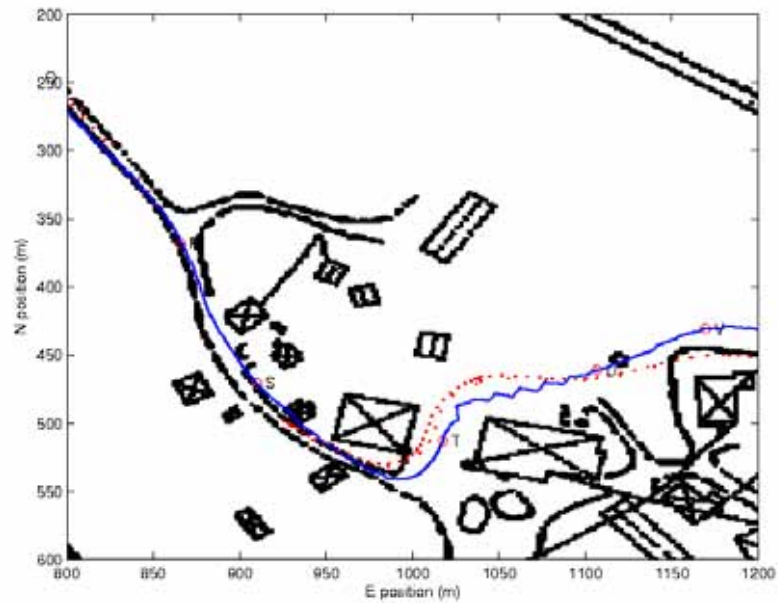
- Lös integration är lätt att implementera.
- Tät integration att föredra i svår miljö med begränsad satellittillgänglighet.

Slutsats:

Experiment ger ovärderlig information om problem som är svåra att förutse och modellera i simuleringar.



(a) Lös integration med GPS/TNS.



(b) Tätt integration med GPS/TNS

Figur 2.3: Jämförelse mellan en lös och en tät integration baserad på TNS och GPS. Den blå linjen representerar den integrerade navigeringslösningen och de röda prickarna representerar facit position (givet med några cm fel). Det tätt-kopplade GPS/TNS systemet får mer information när det är mindre än fyra satelliter synliga och får därför ett mindre positionsfel.

3 Integrerad navigering

FOI har länge forskat inom området integrerad navigering. Det huvudsakliga långsiktiga målet är att undersöka och utveckla robusta och kostnadseffektiva navigeringssystem. Det är framför allt en kombination av tröghetsnavigeringssystem (TNS) och GPS som resulterar i robusthet och goda prestanda. Traditionella, högpresterande och robusta militära navigeringssystem är dyra, stora och effektkrävande. Det är en viktig och utmanande uppgift att utveckla billiga integrerade multisensornavigeringssystem med GPS och MEMS-sensorer (Micro-Electro-Mechanical System). I detta kapitel ges en beskrivning av olika metoder för integrerad navigering. Det finns många olika namn på samma typ av integration mellan GPS och TN. Därför ges här en kort beskrivning av de olika integrationsprinciper som FOI har undersökt. I tabell 3.1 ges en sammanfattning av metodernas fördelar och nackdelar.

Metod	Fördelar	Nackdelar
Lös integration	Enkel implementering, COTS	Ostöttad GPS, störkänslig, stora fel med få satelliter
Tät integration	Begränsat fel med få satelliter	Ostöttad GPS, störkänslig
Ultratät integration	Störfast, klarar hög dynamik, kan följa (tracka) ej synliga satelliter, mindre effektförbrukning	Komplex integration (ny mottagararkitektur), sekretess, exportkontroll, prototyper

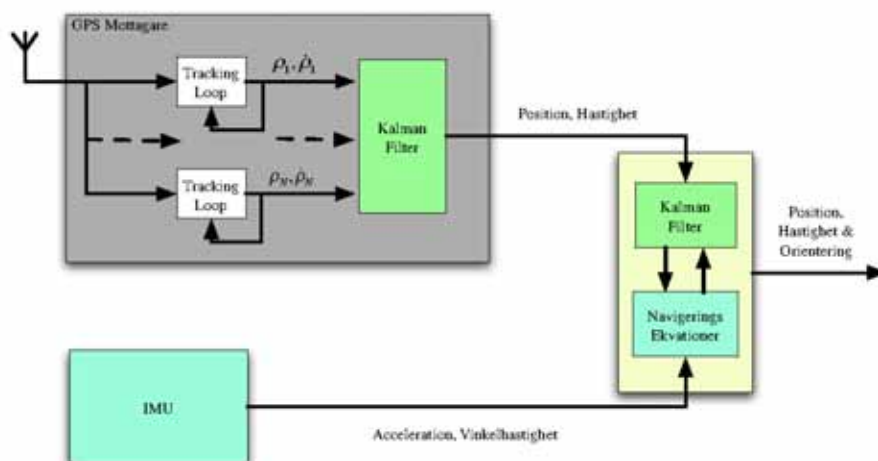
Tabell 3.1: Jämförelse av tre olika integrationsmetoder för navigering med GNSS (Global Navigation Satellite System) och tröghetsnavigeringssystem.

3.1 Lös integration

Lös integration är den enklaste metoden att implementera då standardprodukter (Commercial-off-the-Shelf) kan användas. Principen för integrationen bygger på att GPS-mottagaren själv beräknar position och hastighet, se figur 3.1. I TNS integreras accelerometer- och gyro-signaler med hjälp av navigeringsekvationerna. Det Kalmanfilter som estimerar navigeringstillstånden använder position och hastighet från GPS och viktat samman med position, hastighet och attityd från TNS. För att denna integration skall klara av att hålla nere det ständigt växande TN-felet krävs att GPS-mottagaren ser minst fyra satelliter. GPS mottagaren kan då beräkna tredimensionell position och hastighet.

3.2 Tät integration

I den täta integrationen används GPS-rådata som består av pseudoavstånd (uppmätta avstånd till satelliterna) och dess tidsderivator, se figur 3.2. Meto-



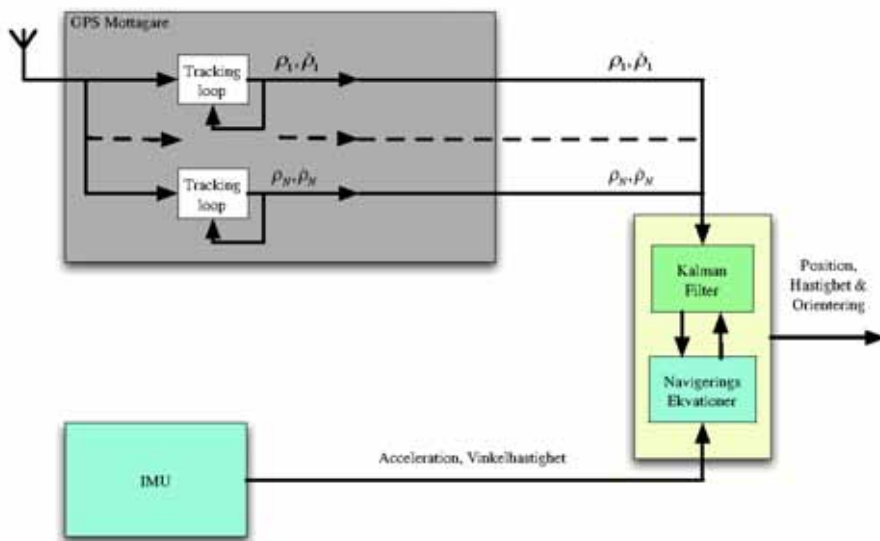
Figur 3.1: Lös integration mellan GPS och TN. Integrationsfiltret får positions- och hastighetsmätningar från GPS-mottagaren och acceleration och vinkelhastigheter från tröghetsensorerna (IMU, Inertial Measurement Unit).

den kräver mer implementationsarbete än för en lös integration men ger bättre navigeringsprestanda eftersom mer detaljerade modeller ligger till grund vid integrationen. Kalmanfiltret för denna metod skattar typiskt fler tillstånd än den lösa integrationen och de består både av GPS-fel och TNS-fel. Den huvudsakliga fördelen vid tät integration är att navigeringsfelens tillväxttakt kan begränsas trots att GPS-mottagaren ser ett fåtal satelliter. Navigeringsprestanda är därför ofta bättre för tät integration i svåra miljöer, med mindre än fyra satelliter, än för den lösa integrationen.

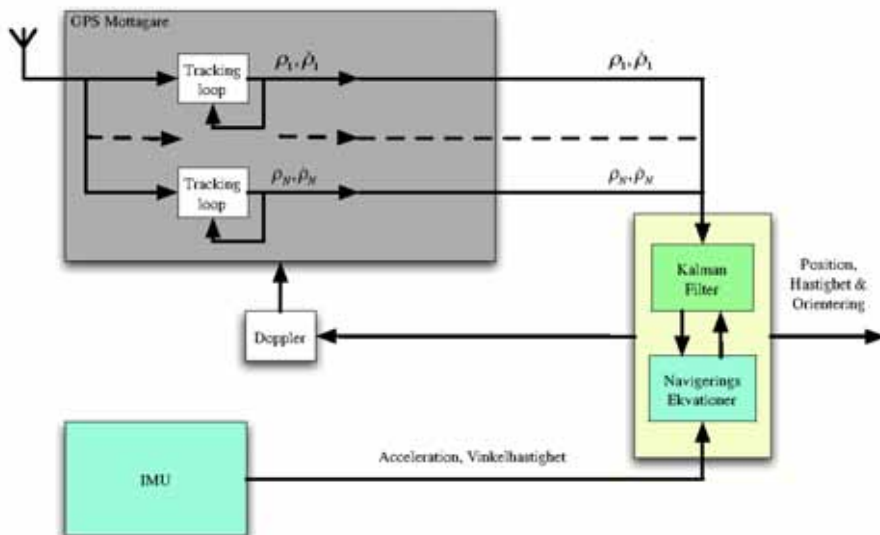
Både den lösa och täta integrationsmetoden är känslig för svaga signalmiljöer och störning. De är dessutom känsliga för hög dynamik då de inte stötts med information om GPS-mottagarens rörelser och därmed lätt tappar låsningen (trackingen) på satelliter. Mottagarens förmåga att kunna följa en satellit-signal är kopplad till dess bandbredd. Genom att ”öppna upp” bandbredden förbättras satellitföljningen med följden att mottagaren blir mer störkänslig och att GPS-mätningarna får ett större fel. I kommande avsnitt behandlas metoder där informationen om hur GPS-mottagaren rör sig kan utnyttjas för att få en robustare integrationsmetod.

3.3 INS-stöttning av GPS-mottagare

I både lös och tät integration är tröghetsnavigeringssystemet basen i navigeringen och stötts av GPS. Men tröghetsnavigeringssystemet kan i sin tur stötta GPS-mottagaren. Ultratät integration och Doppler-stöttning är två olika metoder för att stötta GPS-mottagaren. Metoden Doppler-stöttning, se figur 3.3, bygger på att TNS stöttar GPS-mottagarens tracking-loopar med information om hur mottagaren rör sig. En tracking-loop är ett regelsystem som gör att man kan följa satellitsignalerna och därmed extrahera tidsinformation för positionering. Doppler-stöttning använder rörelsen hos mottagaren för att beräkna en skattning av dopplerfrekvensen som för en standard GPS-mottagare är okänd. Denna stöttande metod behandlas mer i [17]. I metoden ultratät integration ersätts de traditionella tracking-looparna med Kalmanfilter, mer information om denna metod följer i kapitel 4.



Figur 3.2: Tät integration mellan GPS och TN. GPS-mottagarens rå-data (pseudoavstånd samt pseudoavståndsrata) används istället som observationer i integrationsfiltret. Dessa fås även om färre än fyra satelliter är tillgängliga.



Figur 3.3: Vid Doppler-stöttning används information från trögheternavigeringssystemet (eller det integrerade systemet) för att beräkna en skattning på dopplerfrekvensen som skickas till GPS-mottagarens tracking-loopar.

4 Ultratät integration

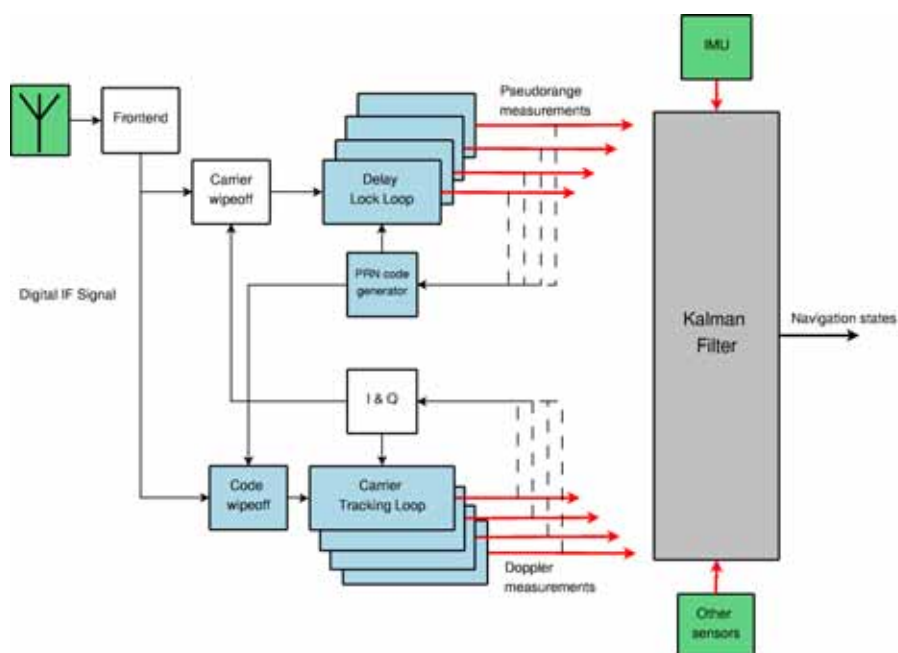
Ultratät integration är som namnet antyder en tätare integration mellan GPS:n och TNS-systemet där de båda systemen interagerar med varandra. De integrationsfilter som i lös respektive tät integration vägde samman information från GPS:n och TNS-systemet är för ultratät integration placerad i vad som traditionellt anses vara GPS-mottagaren. Detta filter ersätter också de traditionella tracking-looparna (följning av satellitsignalerna) som finns i en GPS-mottagare (jämför figur 4.1(a) och figur 4.1(b)). En ultratät integration kan utnyttja att man löser ett överbestämt ekvationssystem i integrationsfiltret, inte bara för att få bättre skattningar av position och hastighet, utan även för att få en bättre följdning av satelliterna. Mätningar från tröghetsensorer kopplas direkt till det integrationsfilter som finns inne i den nya GPS-mottagardesignen och hjälper till att ge en bättre skattning av positionen, hastigheten och orienteringen. I och med att dessa storheter återkopplas till satellitföljningen fås därmed en störfastare och noggrannare följdning av satelliterna vilket också inkluderar information om den egna mottagarens rörelse. Vanligast är att just tröghetsensorer används för denna stöttning, men det finns i denna filterstruktur ingenting som hindrar att andra stöttande sensorer används.

I och med att integrationsfiltret sitter i vad man traditionellt sett anser vara GPS-mottagaren fås en "råare mätning", närmare den rena antennsignalen. Detta har både för och nackdelar. Fördelen är att antaganden om de stokastiska egenskaperna hos mätningen är lättare att analysera teoretiskt eftersom mätfelet kan antas vara vitt brus. Nackdelen är att de matematiska uttrycken för observationerna är olinjära vilket gör det svårare att designa integrationsfiltret. Det finns generellt sett två designar av ultratät integration, centraliserad och decentraliserad design som beskrivs härnäst. Ett exempel på algoritmbeskrivning och förslag på arkitektur för ultratät integration som tagits fram inom detta projekt ges i 5.1.

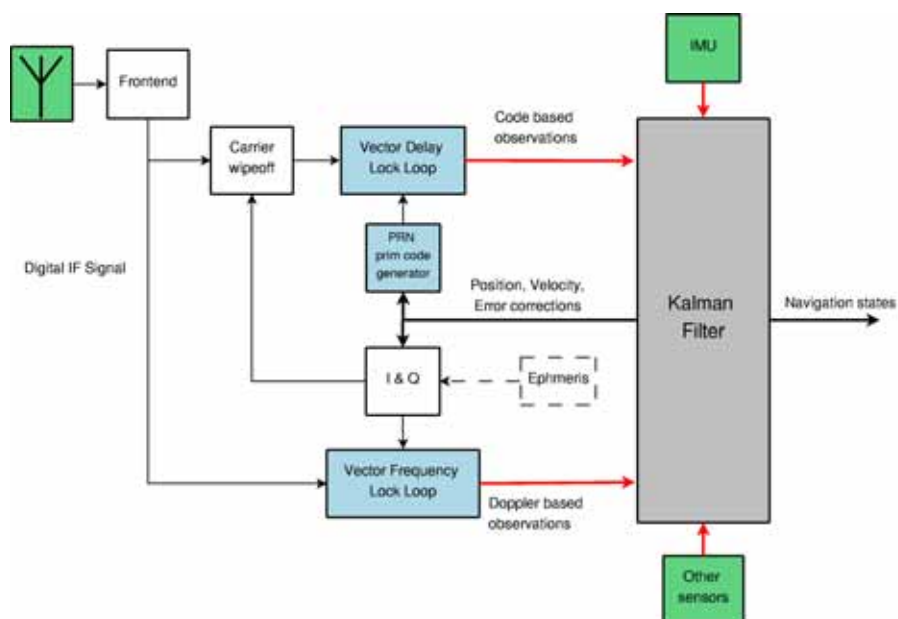
4.1 Centraliserad design

Centraliserad design använder sig av ett enda stort Kalmanfilter för att skatta navigeringstillstånden (position, hastighet och orientering) samt GPS-mottagarens klockfel. Dessa skattningar återkopplas och används för att styra följdningen av satellitsignalerna (tracking). En ultratät integration med centraliserad design visas i figur 4.2(a). Nackdelen med denna variant är att det blir beräkningstungt då filtret behöver uppdateras många gånger per sekund (typiskt 50-1000Hz) för att kunna följa satellitsignalerna. I referenserna [18] och [19] finns mer information om den centraliserade designen.

Blockschemat i figur 4.2(a) motsvarar en traditionell GPS-mottagares kodlåsningssloop, men här i en ultratät uppställning motsvararande övre halvan av figur 4.1(b). Precis som i en traditionell mottagare tas bärvågen bort (carrier wipeoff) genom multiplikation med en genererad referenssignal (I,Q referens). Referenssignalen genereras utifrån skattad frekvensen och fas på signalen från en specifik satellit. Den mottagna signalens frekvensen skiljer sig från den ut-



(a) Traditionell GPS-mottagare använd i en tät integration. I den traditionella GPS-mottagararkitekturen finns flera trackingloopar, en för varje satellit. Dessa återkopplas var för sig och utnyttjar ej den samlade information som Kalmanfiltret i den ultratäta integrationen gör.



(b) Ultratät Integration mellan GPS och TNS. Notera återkopplingen från Kalmanfiltret till GPS:ens satellitföljning (PRN code generator).

Figur 4.1: Jämförelse mellan en traditionell GPS-mottagardesign och en ultratät integration.

sända på grund av satellitens och mottagarens rörelse. Satelliternas rörelse är välkända då de följer förutbestämda Keplerbanor och avvikelserna från dessa skickas ut och kan korrigeras för. Mottagarens rörelse kan fås som en skattning ifrån integrationsfiltret (benämnt Kalmanfilter i figuren). I figur 4.2(a) visas en centraliserad ultratät mottagardesign som utnyttjar en så kallad vektor

delay lock loop (VDLL). VDLL är en kombination av korrelator- och diskriminatorfunktioner som finns i traditionella GPS-mottagare. Utsignalen från VDLL är en vektor med värden proportionella mot tidsförskjutningarna i satellitsignalen (hur en VDLL fungerar i mer detalj finns beskriven i [20]). Dessa tidsförskjutningar är i sin tur en funktion av mottagarens position. Utsignalen från VDLL används sedan som observation av integrationsfiltret där de viktas samman med information från andra sensorer t.ex. tröghetssensorer (IMU, Inertia Measurement Unit). Därmed är den kombinerade satellitföljnings- och positionsberäkningsloopen sluten.

4.2 Decentraliserad design

En decentraliserad design, se figur 4.2(b), delar ut ansvaret av satellitföljningen på ett antal förfilter (en per satellit) som uppdateras ca 50-1000 gånger i sekunden. Dessa förfilter är ofta små kalmanfilter och därmed inte så beräkningstunga som den centraliserade designen är. Därefter används utsignalen från dessa förfilter som observation i ett navigeringsfilter som i sin tur estimerar mottagarens position, hastighet, orientering och klockfel. Dessa estimat beräknas med lägre dataakt och återkopplas sedan till satellitföljningen. Denna design kräver inte lika mycket beräkningar eftersom sammanviktningen till navigeringsstorheter sker långsammare. I referenserna [21], [22] och [23] finns mer information om den decentraliserade designen.

I figure 4.2(b) illustreras ett blockschema för en decentraliserad ultratät design. På samma sätt som för den centraliserade designen, och traditionella GPS-mottagare, tas bärvågen bort genom blocket *carrier wipeoff*. Signalen korreleras sedan med genererade PRN-koder (PRN, Pseudo Random Noise, är en unik kod för varje satellit) som är tidsförskjutna baserade på skattningen av mottagarposition. Detta resulterar i flera genererade signaler från varje satellit för olika tidsförskjutningar av PRN-koden. Ur dessa signaler (I,Q för Early, Late och Prompt) skattas, med hjälp av små och enkla Kalmanfilter (förfilter), signifikanta parametrar såsom fas, signalamplitud och tidsförskjutningar (kodavstånd) för alla satelliter. Dessa skattningar görs många gånger i sekunden och skickas sedan vidare, i lägra takt, till integrationsfiltret där dessa mätningar viktas samman med information från andra sensorer t.ex. tröghetssensorer (IMU, Inertia Measurement Unit).

4.3 Sammanfattning av ultratät integration

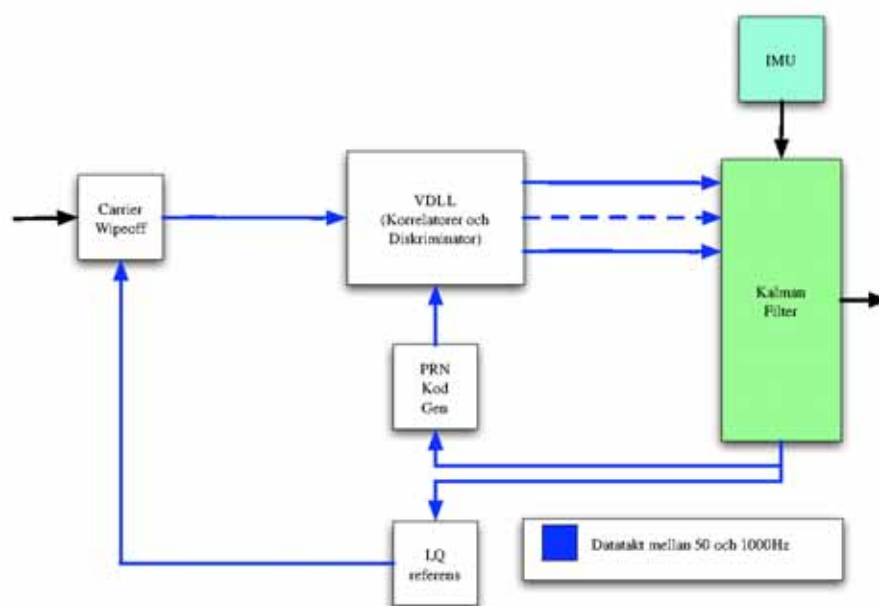
Förutsättningar:

En ny GPS-mottagararkitektur där existerande trackingloopar ersätts med ett eller flera Kalmanfilter. Implementation kan med fördel realiseras i en mjukvaru-GPS. Metoden bygger huvudsakligen på att GPS-mottagarens trackingloopar erhåller information om dess egen rörelse. TNS är ett naturligt sensorsystem men även andra sensorer kan användas.

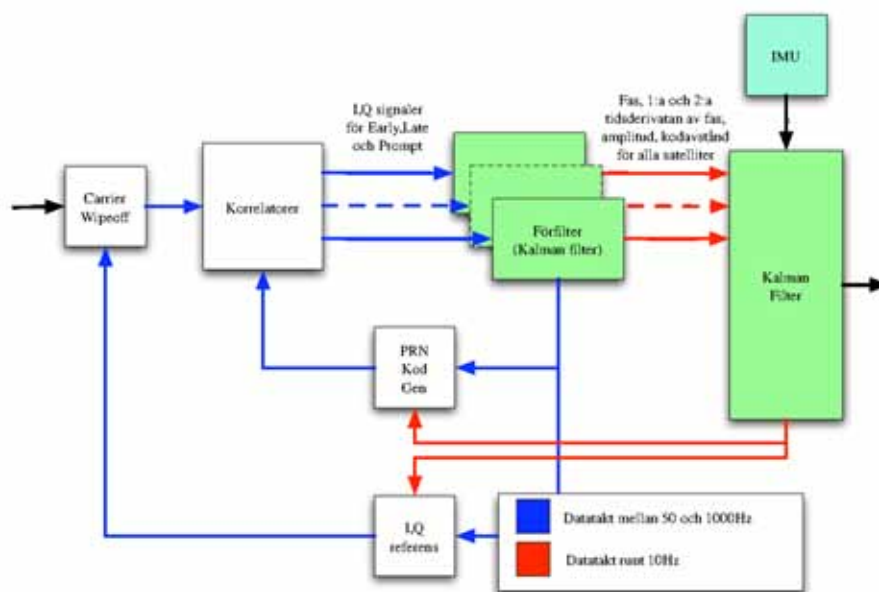
Fördelar:

Ultratät integration

- klarar av att följa dämpade satellitsignaler i svagsignalmiljöer.
- klarar av följning av satelliter inomhus med skydd sikt.
- militära telekrigsscenario med svår avsiktlig störning med hög dynamik samtidigt.



(a) Centraliserad design av ultratät GPS/TNS-integration.



(b) Decentraliserad design av ultratät GPS/TNS-integration.

Figur 4.2: Jämförelse mellan centraliserad och decentraliserad ultratät GPS/TNS-integration. Observera att här utelämnas fasläsningsloop, jämför figur 4.1(b)

- med MEMS-IMU medför ett framtida billigt och litet robust navigeringssystem.

Slutsats:

Ultratät integration är en robust metod att åstadkomma ett integrerat navigeringssystem baserat på GPS för både civila och militära applikationer. Försvars- och företagshemlighet gör det svårt att hitta information om meto-

den. Metoden behöver därför analyseras vidare. Med simuleringar möjliggörs jämförelser med lös och tät integration.

4.4 Tillämpningar av ultratät integration

4.4.1 Militära tillämpningar

Styrda vapen

De applikationer där ultratät integration först dök upp och där det idag är mest fokuserat arbete är styrda vapen (se kapitel 4.5). Navigeringsystemen i styrda vapen riskerar att utsättas för stora dynamiska påfrestningar och medveten störning. Traditionellt sett har man ofta förlitat sig på tröghetsnavigerings-system i dessa applikationer, och så kommer man troligen att fortsätta. Men med en ultratät integration kan man utnyttja GPS-mottagarens noggrannhet även under höga accelerationer. Ultratät integration utnyttjar nämligen återkoppling från tröghetsnavigeringsystemet till GPS-mottagarens tracking-looparna för att kompensera för den dynamik som GPS-mottagaren utsätts för. Vid strategiskt viktiga mål är det rimligt att anta att GPS-störare utnyttjas. När det gäller bredbandiga brusstörare klarar ett ultratät integrerat navigeringsystem sig bättre än traditionell mottagare då den i följningen av satellitsignaler löser ett överbestämt ekvationssystem och har kännedom om den egna plattformens dynamik. Blir störningen tillräckligt stor kommer även den ultratäta integrationen att få svårt att få ut någon vettig information från satellitsignalerna. Den kommer då att navigera med hjälp av tröghetsnavigering. I ett scenario med ett styrt vapen kan en ultratät integration utsatt för en störare i målområdet, eller på väg till målområdet, utnyttja GPS längre. Även om den ultratäta integrationen kan störas ut, kommer detta att ske senare än med ett vanligt integrerat navigeringssystem. Detta innebär att ren tröghetsnavigering kommer att utnyttjas under en kortare tidsperiod och navigeringsfelet i slutpunkten blir mindre.

Obemannade spaningsfarkoster (UAV)

Obemannade spaningsfarkoster (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) riskerar också att bli utsatta för störning. Ofta är det önskvärt att UAV:er görs små och lätta för att kunna operera under längre perioder. Det är därför önskvärt att navigeringsensorerna är lätta och har låg effektförbrukning. MEMS-IMU:er har på senare tid blivit ett realistiskt alternativ. Det är dock viktigt att modellera en MEMS-IMU:s fel korrekt, se t.ex. [10]. För att få noggrann navigering under lång tid utnyttjas GPS och för att bättre klara av störning bör en ultratät integration utnyttjas. Mycket tyder på att även billiga IMU:er kan ge tillräcklig stöttning till GPS:en för att få god störundertryckning, se t.ex. [21].

Marksoldat

En marksoldats uppgifter kan variera mycket. I vissa fall räcker karta och kompass gott och väl för navigering och i vissa fall räcker handburen militär GPS. För en enskild soldat eller en grupp av soldater som ska operera i stadsmiljö med t.ex. genomsökande/intagande av byggnader kommer navigeringsystem i dagsläget att få det mycket svårt. En soldat som söker av en byggnad har uppmärksamheten på sin uppgift och potentiella fiender. Soldaten har i detta läge inte tid att navigera med karta och kompass. Det skulle dock i vissa lägen vara önskvärt att känna till egna enheters position, tid och kapacitet. En önskad utrustning för Markus-soldaten är ett robust navigeringsystem som kopplat till

ett ledningssystem ger taktisk information för ledning av en grups strid i t.ex. bebyggelse eller tät vegetation. För mer information se [3], [24] och [23].

Nordic Battle Group

För Nordic Battle Group (NBG) är positioneringstjänsten en viktig förmåga. Genom att i ledningssystemet ha tillgång till positionerna för de egna enheterna kan operationer ledas och genomföras effektivare, vilket väsentligt förbättrar förbandens överlevnadsförmåga. Om positionerna för soldaterna inom en stridsgrupp, som genomför en rensning eller genomsökning av en byggnad, kan estimeras och distribueras till de andra soldaterna ökar deras stridsförmåga och säkerhet genom att insatsen kan samordnas och ledas effektivare. Mer information om detta finns i [25].

4.4.2 Civila tillämpningar

Navigering i stadsmiljö

Ett allt vanligare användningsområde för GPS-baserade navigeringssystem är i dag fordonsnavigering för personbilar och yrkestrafik. Dessa system får problem i stadsmiljö, tunnlar och parkeringshus där sikten till satelliterna skymms. I dessa lägen kan ett ultratätt integrerat navigeringssystem förbättra prestanda och ge direkt pålåsning på satelliterna då dessa åter blir synliga (så länge navigeringsprestandan inte har hunnit degraderas alltför mycket). Utöver stöttning från IMU:er kan här även ABS-pulserna (hjulsignaler från automatiskt bromssystem på bil) utnyttjas för att stötta GPS-följningen av satelliter.

Positionering av räddningspersonal inomhus

Positioneringssystem som fungerar för räddningspersonal i inomhusmiljöer kan rädda liv i olika civila insatser. Potentiella användare av sådana system är bland annat brandmän/rökdykare och polis. Vid attentatet mot World Trade Center förolyckades ett stort antal brandmän. Myndigheter i USA har identifierat positionerings- och kommunikationssystem som kritiska tekniker som kan ge väsentligt förbättrad säkerhet för brandmän. Vid större bränder kan släckningsarbetet samordnas på ett effektivare sätt genom användning av positioneringssystem. I bland annat Storbritannien har rökdykare förolyckats vid övningar på grund av att de inte lokaliserats i tid. För mer information se [25].

4.5 Relaterat arbete

Ultratät integration är en relativt ny teknik trots att idéer kring ultratät integration har funnits under en längre tid. Bland annat presenterades en artikel i *NAVIGATION Journal of The Institute of Navigation* om optimal behandling av GPS-signaler redan 1980, [26]. Idag har några större företag och universitet utvecklat fungerande prototyper av ultratäta integrerade navigeringssystem. L3-Communications Interstate Electronics Corporation har även sålt fungerande produkter till den Amerikanska försvarsindustrin.

Detta avsnitt presenterar vilka produkter som finns ute idag eller inom en snar framtid, samt vilka företag/universitet som forskar på ultratät GPS/TN-integration.

4.5.1 Produkter

SiNAV (BAE Systems)

BAE systems har ett navigeringssystem baserat på ultratät GPS/TNS-integration. Det befinner sig för närvarande (2006-09-27) i testfas men skall lanseras inom några månader. Systemet är baserat på MEMS IMU teknologi och testat i 20000g acceleration. SiNAV är speciellt avsett för militära applikationer såsom styrda granater etc. BAE har inga civila tillämpningar av deras ultratäta teknologi.



Figur 4.3: Bild på SiNAV prototypen från BAE Systems.

TRUNAVTM(L3-Communications)

L3-Communications har idag ett navigeringssystem, baserat på ultratät integration. Detta system kallas TRUNAVTM[21] och är designat för styrda granater och dylika högdynamik-applikationer som är känsliga för störning. Samma teknologi använder L3 i ett navigeringssystem för fotsoldater [24], baserat på GPS/TNS men med fler stöttande sensorer så som barometer och kompass. Dessutom utnyttjas trådlös kommunikation för att stötta andra plattformar i en grupp av framryckande fotsoldater (Samverkande Navigering, se avsnitt 2.1). Systemet kan även användas inomhus.

IGS-200 (Rockwell Collins & Honeywell)

Rockwell Collins har i samarbete med Honeywell tagit fram en prototyp på en ultratät GPS-mottagare, IGS-200, som ska klara av höga G krafter och är speciellt avsett för styrda vapen. IGS-200 är än så länge en prototyp men skall sättas i produktion inom 2 år. Honeywell och Rockwell Collins har publicerat en artikel om deras IGS system [27]. Systemet har testats och klarar av 20000g. Honeywell har tagit fram en patenterad algoritm som de kallar Vector Tracking Loop (VTL). I integrationen med denna algoritm har de uppvisat en störundertryckningsförmåga på 66dB (56dB kommer från den militära koden P(Y) och 10dB från VTL algoritmen). Ett Kalmanfilter finns som agerar som integrationsfilter. En Early-Late-kodbaserad diskriminatorfunktion används för att skapa mätningar i 10Hz till Kalman filtret. Diskriminatorfunktionen genereras utifrån fem korrelationspunkter. I och Q värdena taget vid early, late och



Figur 4.4: Bild på TRUNAV™, ett ultratät GPS/TNS-navigeringssystem från L3-Communications Interstate Electronics Corporation.



Figur 4.5: Bild på Rockwell Collins och Honeywells IGS-200 prototyp.

prompt används också för att beräkna signal-brus-förhållandet. Rockwell Collins och Honeywell använder en mjukvara i IGS-200 systemet kallat ECTOS (Embedded Computer Toolbox and Operating System).

RAPToR-III (Raytheon)

Raytheon har förberett för ultratät integration i deras RAPToR (Raytheon Anti-jam Protection Technology) GPS-mottagare och anser att tekniken är mogen. Raytheon har restriktioner på vad de får publicera i öppna rapporter och artiklar. Dock presenterade Raytheon ett bidrag på AIAA 2003 som behandlade prestandan för ett ultratätt system [28]. Det är oklart om detta bidrag är relaterat till RAPToR-III mottagaren eller ej.

4.5.2 Forskargrupper

I detta avsnitt beskrivs olika forskningsgrupper inom området ultratät integration. De grupper/företag som beskrevs i avsnitt 4.5.1 beskrivs inte här igen.



Figur 4.6: Bild av RAPTOr-III mottagaren från Raytheon.

Center for Remote Sensing INC (CRS)

I skrivande stund (2006-09-27) befinner sig CRS i slutfasen av att utveckla en prototyp av ett ultratät-baserat navigeringsystem och förväntas vara klara inom en månad. Denna mottagare kommer att kunna operera i regioner med hög störning (15-20dB bättre än en traditionell GPS-mottagare). CRS har varit involverad i fler amerikanska myndigheters utredningar kring ultratät arkitektur. Deras produkter är främst inriktade mot utveckling av bland annat navigeringsutrustning. Av CRS publicerade konferensbidrag [29], [30] och [31] kan man dra slutsatsen att de utnyttjar en decentraliserad design med multipla för-filter (en per satellit). För-filtren skattar fasfel, första och andra derivatan av fasfelet, avståndsfelet samt amplituden på GPS-signalen. Dessa estimat integreras sedan i ett fusionsfilter som ger navigeringstillstånd, kod- och faskorrekationer. Kod och faskorrelationerna återkopplas till korrelatorerna.

Tracking and Imaging System INC

James Sennott och David Senffner från Tracking and Imaging Systems INC var tidigt ute med idéer kring ultratät integration. Deras publicerade papper [32], [33] och [34] refereras ofta i modernare upplagor.

Universität der Bundeswehr München

Institutet för geodesi och navigering vid "Universität der Bundeswehr München" har studerat "Vektor Delay Lock Loop", VDLL, i en ultratät integration. Bland annat har de tittat på prestanda för en ultratät GPS/TNS-mottagare inomhus [19] och lyckats få GPS-följning inomhus vid signal styrkor ner mot 10-15dB (C/N0) (detta jämfört med det mer gynnsamma fallet utomhus då signalstyrkan ligger kring 40-45dB). De använder sig av en mjukvarumottagare ipexSR som de själva utvecklat [35].

Naval Surface Warfare Center

Ernest J. Ohlmeyer från Naval Surface Warfare Center har i [22] föreslagit en decentraliserad ultratät design baserat på ett antal för-filter som tar I och Q värdet från Early-, Late- och Prompt-korrelatorerna och estimerar feltillstånd i bärvågsfas, bärvågshfrekvens, bärvågsfasacceleration, kod-fas samt amplitud hos GPS-signalen. Dessa värden matas sedan vidare till ett integrationsfilter för navigeringsberäkning. Ohlmeyer uppvisar i [22] god navigeringsprestanda i

C/N_0 intervallet mellan 20dB-Hz och 0db-Hz, vilket i J/S (Jammer-To-Signal) termer motsvarar 50dB till 75dB. Detta är långt under den signalstyrka som en traditionell GPS-mottagare kan arbeta med.

Ohio University

I [36] visar Gunawardena, Soloviev och van Grass från universitetet i Ohio på kontinuerlig tracking vid signal styrkor på 15dB-Hz nivån med en ultratät GPS-mottagare vilket skulle vara 17dB-Hz bättre än en traditionell GPS-mottagare. De har utvecklat en realtidsprototyp där en del signalbehandling görs på en FPGA (Field Programmable Gate Array), medan tracking- och navigeringsberäkningar görs på en PC. Ohio University har publicerat flertalet artiklar i området ultratät integration, se [37],[36], [38], [39] och [40].

Charles Stark Draper Laboratory

Charles Stark Draper Laboratory har publicerat ett antal papper om ultratät integration [41], [42], [43] samt tagit patent på en metod [44]. De uppvisar en förbättrad tracking på minst 15dB vid bredbandig störning jämfört med traditionell design [41].

Calgary University

Universitetet i Calgary har en välkänd forskningsgrupp inom området navigering. Det har tidigare dock inte tittat på ultratät integration, men på ION GNSS 2006 hade de ett par bidrag inom området. I [45] jämförs tre olika vektor-tracking metoder och i [46] används tröghetssensorer för att stötta signalföljningen i en GPS-mottagare.

Övriga grupper

Under denna rubrik listas övriga grupper som är värda att nämnas i samband med ultratät integration.

- University of New South Wales, Australia [47], [48], [49], [50],[51] och [52]
- NAVSYS [53]
- Konkuk University, Sydkorea [54]
- Seoul National University, Sydkorea [54]
- DSO National Laboratories [55]
- GNSS Technology Research Center, Chungnam National University, Sydkorea [18]

5 Bilaga

5.1 Teknisk beskrivning av ultratät integration

Detta stycke är avsett för läsare med en djupare kunskap om signalbehandlingen i GPS-mottagare. Grundläggande signalbehandling för traditionella GPS-mottagare behandlas i bland annat [20], [56], [57] och [58].

Det finns flera olika val vid design av en ultratät integration. Dels kan man välja mellan en decentrealiserad eller en centraliserad design (se kapitel 4), dels kan linjariserade observationer alternativt olinjära observationer användas. Nedan presenteras en centraliserad ultratät integration med linjariserade observationer baserad på referenserna [20] och [18].

5.1.1 Satellitsignal

Den civila delen av GPS-signal på L1-bandet som skickats ut av en godtycklig satellit beskrivas med

$$\nu(t) = \sqrt{2P_m} D_m(t) x_m(t) \cos(\omega(t)) \quad (5.1)$$

där P_m är utsänd signaleffekt, D_m navigeringsmeddelande, x_m den specifika C/A-koden för satellit m , ω bärvågsfrekvensen för L1. Vid mottagaren (antag frirymdsutbredning) kan denna del av signalen beskrivas med

$$r_m(t) = \sqrt{2P_m} D_m(t - \tau_m) x_m(t - \tau_m) \cos(\omega t + \omega_d t + \phi) \quad (5.2)$$

där ω_d är dopplerfrekvensen, ϕ fasen och τ_m är den tid det tar för signalen att färdas från satellit m till mottagaren. Dvs

$$\tau_m(\mathbf{x}_{\text{rec}}) = \frac{|\mathbf{x}_{\text{rec}} - \mathbf{x}_m|}{c} \quad (5.3)$$

där \mathbf{x}_{rec} är GPS-mottagarens position, \mathbf{x}_m satelliten m :s position och c är ljushastigheten. C/A-koden är en förutbestämd pulssekvens (pseudo random kod, PRN) specifik för varje satellit men känd av både satellit och mottagare. Den utsända C/A-koden kan skrivas som

$$x_m(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{L_{ca}-1} c_i \cdot p_{T_c}(t - iT_c - jT_{ca}) \quad (5.4)$$

där $L_{ca} = 1023$ är längden av C/A-koden i chip, c_i är koefficienter i den unika C/A-koden bestående av antingen 1 eller -1 , $T_{ca} = 10^{-3}s$ är C/A-kodens period och $p_{T_c}(t)$ en puls-funktion som är ett då $t \in [0, T_c)$ annars noll. Det relation 5.4 säger är att utsänd C/A-kod består av en sekvens som återupprepas då den tagit slut.

5.1.2 Kodmätningar - Vektor DLL

GPS-mottagare är bandbegränsade och en Front-End brukar i allmänhet användas för att filtrera och sampla ner den inkomna antennsignalen. Typiskt brukar bandbredden på bandpassfiltret vara ca 2 MHz då detta fångar upp ca 90% av C/A-signalen. Den filtrerade C/A-signalen kommer inte längre att vara en ideal pulssignal utan ha en ändlig stigtid. För ett bandpassfilter med bandbredd $2/T_c$ kan den filtrerade C/A-signalen skrivas på slutna form enligt [18] som

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{L_{ca}-1} c_i \frac{1}{\pi} \left[f\left(\frac{4\pi}{T_c}(t - iT_c - mT_{ca})\right) - f\left(\frac{4\pi}{T_c}(t - (i+1)T_c - mT_{ca})\right) \right] \quad (5.5)$$

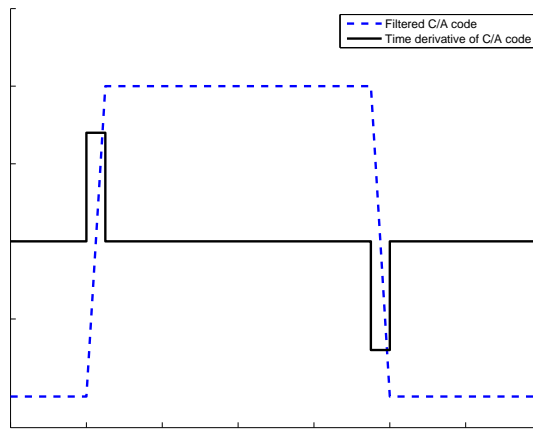
där

$$f(x) = \int_0^x \frac{\sin(y)}{y} dy \quad (5.6)$$

Insignalen från en satellit kan efter sampling och filtrering skrivas som

$$r_m(t_k) = \sqrt{2P_m} D_m(t_k - \tau_m) s_m(t_k - \tau_m) \cos(\omega t_k + \omega_d t_k + \phi) \quad (5.7)$$

Den filtrerade C/A-signalen, $s_m(t_k)$, är styckvis kontinuerligt differentierbar och den differentierade versionen av $s_m(t_k)$ betecknas $s'_m(t_k)$. Ett chip av C/A-signalen kan ses i figur 5.1 där $s(t_k)$ är blå-streckad och $s'(t_k)$ svart.

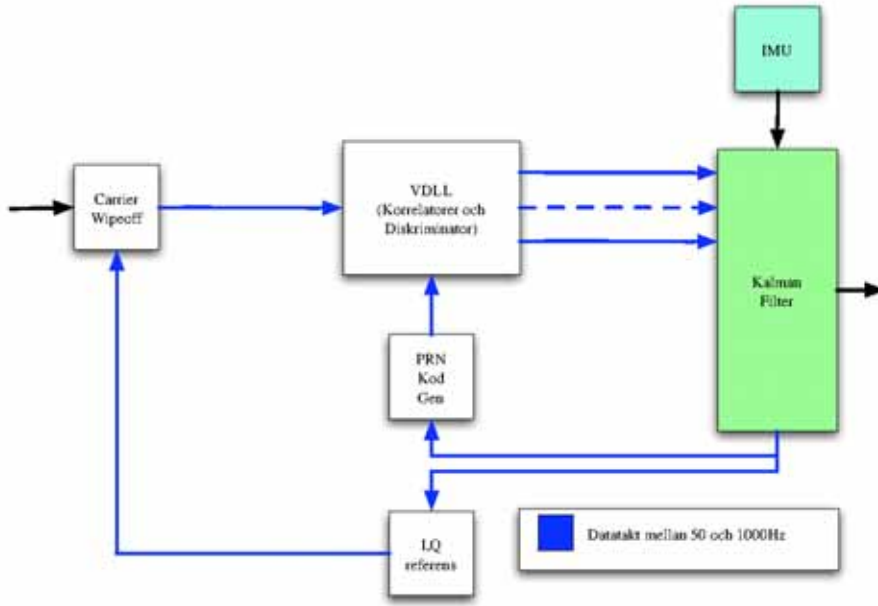


Figur 5.1: Idealiserad illustration av den filtrerade C/A-signalen och dess tidsderivata.

visar en illustration av den föreslagna ultratäta integrationen. Antag att den mottagna signalen, som här är en superpositionerad summa signal bestående av alla N synliga satellitsignaler, efter borttagning av bärvågen (nerblandning till basband, eng. carrier wipe-off) kan skrivas som

$$r(t_k) = \sum_{i=1}^N a_i s_i(t_k, \tau_i(\mathbf{x}_k, k)) + n(t_k), \quad (5.8)$$

där $n(t_k)$ är en vit Gaussisk process och $a_i = \sqrt{2P_i} D_i$ är amplituden på signalen från satellit i , som anses vara konstant under de korta tidsperioder över vilken korrelationen genomförs. Genom att korrelera signalen i ekvation 5.8 med $s'_m(t_k, \tau_m(\hat{\mathbf{x}}))$, fås en linjariserad mätning



Figur 5.2: Centraliserad design av ultratät GPS/TN integration.

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^K r(t_k^j) \cdot s'_m(t_k^j, \tau_m(\hat{\mathbf{x}})) \\
&= \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N s_i(t_k^j, \tau_i(\mathbf{x})) \cdot s'_m(t_k^j, \tau_m(\hat{\mathbf{x}})) \\
&\quad + \sum_{j=1}^K n(t_k^j) \cdot s'_m(t_k^j, \tau_m(\hat{\mathbf{x}})) \\
&= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K s_i(t_k^j, \tau_i(\mathbf{x})) \cdot s'_m(t_k^j, \tau_m(\hat{\mathbf{x}})) + n_m(t_k) \\
&= - \sum_{i=1}^N R_i''(0) \Delta \tau_i \cdot \delta_{im} + n_m(t_k) = -R_m''(0) \Delta \tau_m + n_m(t_k), \quad (5.9)
\end{aligned}$$

där δ_{im} är Kroneckers deltafunktion och $n_m(t_k) = \sum_{j=1}^K n(t_k^j) \cdot s'_m(t_k^j, \tau_m(\hat{\mathbf{x}}))$. Här har C/A-kodens korrelations egenskaper använts och att $\Delta \tau_i$ anses vara nära noll (för bevis se [20]). På detta sätt kan en vektor skapas bestående av en mätning per synlig satellit.

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}(t_k) &= \sum_{j=1}^K r(t_k^j) \begin{bmatrix} a_1 s'_1(t_k^j, \tau_1(\hat{\mathbf{x}})) \\ \vdots \\ a_N s'_N(t_k^j, \tau_N(\hat{\mathbf{x}})) \end{bmatrix} \\
&= - \begin{bmatrix} a_1 R_1''(0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_2 R_2''(0) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_N R_N''(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tau_1 \\ \Delta \tau_2 \\ \vdots \\ \Delta \tau_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t_k) \\ n_2(t_k) \\ \vdots \\ n_N(t_k) \end{bmatrix} \\
&\hat{=} -\mathbf{a}R''(0)\Delta\tau + \mathbf{n}(t_k). \quad (5.10)
\end{aligned}$$

5.1.3 Integrationsfilter

De kodmätningar som härletts i de tidigare avsnitten (se ekv. 5.10) kan användas direkt som observationer i ett Kalmanfilter. Kalmanfiltret behöver en processmodell som beskriver GPS-mottagarens rörelse. Vilken modell som är lämplig beror på tillämpning. Ofta förknippas ultratät integration med GPS och tröghetsnavigeringssystem, men detta är i sig inget krav för att få en ultratät koppling med GPS:n, andra navigeringssensorer kan användas i stället eller som komplement. I och med att tröghetsnavigeringssystem är lämpliga att använda som bas i ett robust navigeringssystem förutsätts att ett sådant används här. Kalmanfiltrets processmodell kan beskrivas av

$$\frac{d}{dt}\boldsymbol{\chi}(t) = F(t)\boldsymbol{\chi}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (5.11)$$

där $\boldsymbol{\chi}(t)$ är tillståndsvektorn, $F(t)$ systemmatrisen och $\mathbf{w}(t)$ är det så kallade processbruset som anses vara Gaussiskt vitt brus med en given kovarians $Q = E[\mathbf{w}\mathbf{w}^T]$. Lämpliga processmodeller för ett Kalmanfilter baserat på tröghetsnavigering finns beskrivna i följande referenser, [59], [60] och [61]. Då tidsförskjutningen är en funktion av mottagarens position, \mathbf{x} kan ekvation 5.10 skrivas som

$$\mathbf{y}(t_k) = A \begin{bmatrix} \frac{\partial \tau_1}{\partial x} & \frac{\partial \tau_1}{\partial y} & \frac{\partial \tau_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_2}{\partial x} & \frac{\partial \tau_2}{\partial y} & \frac{\partial \tau_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \tau_N}{\partial x} & \frac{\partial \tau_N}{\partial y} & \frac{\partial \tau_N}{\partial z} \end{bmatrix} (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k) + \mathbf{n}(t_k) \quad (5.12)$$

Kalmanfiltret viktar därefter samman den tröghetsnavigeringsbaserade processmodellens position, hastighet och orientering med de givna mätningarna från GPS:n till en optimal skattning av tillstånden. Position och hastighets skattningarna återkopplas sedan till GPS:n där dessa tillstånd används för eliminering av bärvågen och vid generering av PRN-koden (och den tidsdifferentierade s'). Detta motsvarar funktionen för de så kallade kodföljningslooparna i traditionella GPS-mottagare, men skiljer sig så tillvida att följningen gemensamt återkopplas genom positionsestimatet (några pseudoavstånd genereras aldrig) och kännedom om plattformens rörelse inkluderas genom processmodellen och IMU-mätningarna.

I denna förenklade framställning av ett ultratät integrerat navigeringssystem tas ingen hänsyn till klockfel hos mottagare eller satelliter men dessa kan enkelt läggas till efterhand.

5.2 Förslag till mjukvaruarkitektur för framtida implementation

I detta stycke beskrivs de delar av en simuleringsmjukvara som behöver utvecklas för att kunna utvärdera en ultratät integration. Syftet med att utveckla en mjukvara för en ultratät integration är att kunna jämföra prestanda med en traditionell tät integration. Det är av intresse att undersöka

- navigeringsprestanda
- satellitföljningsförmåga
- effekter av medveten GPS-störning.

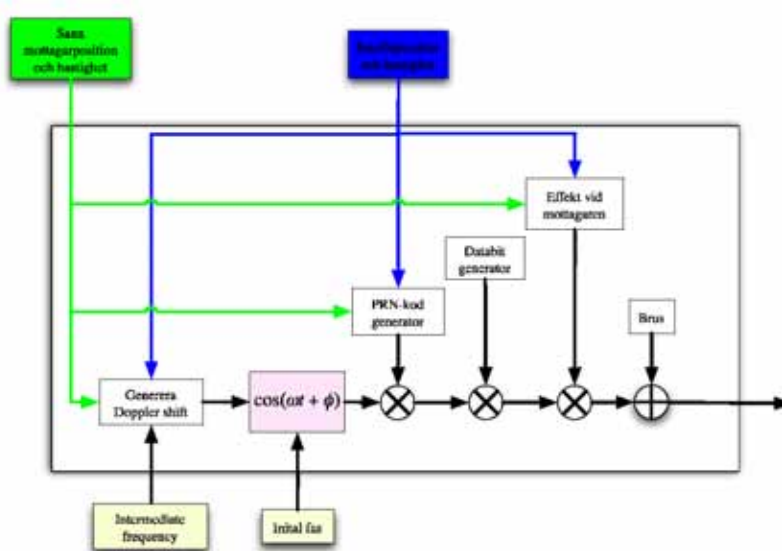
5.2.1 Plattformrörelse och IMU-signaler

Rörelse hos GPS-mottagaren måste kunna simuleras. Detta finns idag förbättrat i den Matlab-toolbox som utvecklats i projektet Robust navigering och

minimalt arbete krävs för detta. Sensorsignaler för tröghetsnavigeringssystem måste genereras från plattformrörelsen för att användas som IMU-signaler i integrationsfiltret, se figur 5.2.4. Detta finns också tillgängligt i den utvecklade Matlab-toolboxen.

5.2.2 GPS-signalgenerator

En signalgenerator för GPS-signaler måste utvecklas. Komplexiteten hos signalgeneratoren kan byggas upp efter hand som den behövs. Initialt behövs position och hastighet från satelliter och GPS-mottagare, PRN-kodsgenerator samt ett pålagt mätrus. Ett blockdiagram för hur signalgeneratoren skulle kunna se ut illustreras i figur 5.3. Signal generatoren skall vara tillräcklig noggran för att kunna jämföra prestanda för satellitföljningen hos en traditionell GPS-mottagare med satellitföljningen hos ett ultratät integrerat system. Initialt kan position och hastighet hos satelliterna sättas godtyckligt för att i ett senare skede utökas med sanna satellitbanor. Klockfel kan initialt sättas till noll för att senare införa korrekta modeller för dessa.



Figur 5.3: Blockschemat över en enkel GPS-signalgenerator.

5.2.3 Front-End för GPS-mottagare

En modell för GPS-mottagarens Front-End bör tas fram. I sin enklaste form kan detta modelleras som ett bandpassfilter, då GPS-signalgeneratoren redan antas generera en nedblandad signal (IF, Intermediate Frequency).

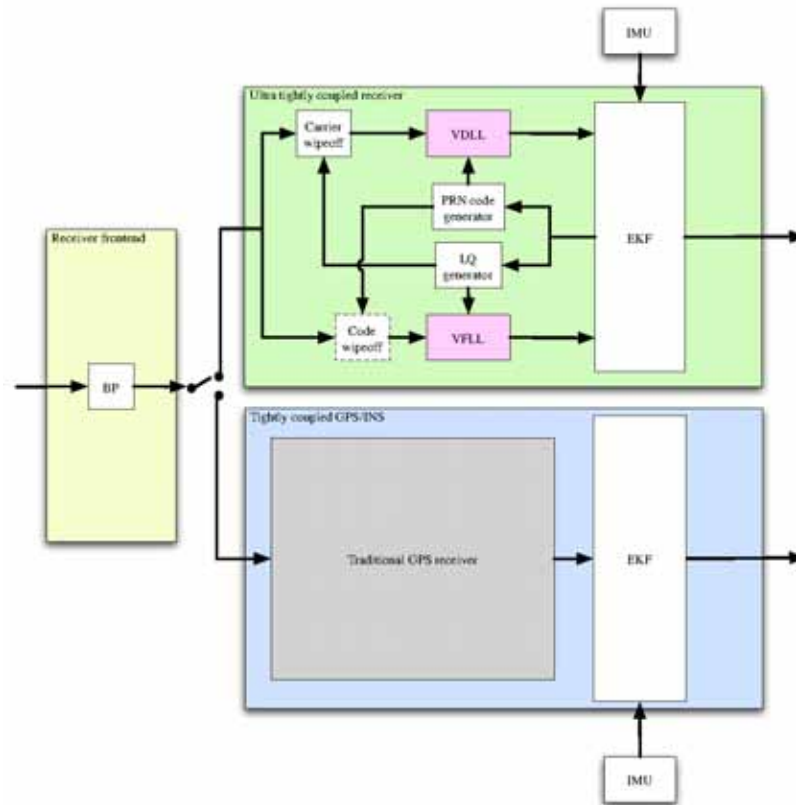
5.2.4 Integrerade navigeringssystem

Ultratät integrerat navigeringssystem

Det ultratätt integrerade navigeringssystem är den enskilt största delen av mjukvaruprojektet och detta är den del som har högst prioritet. Orsaken är att det är viktigt att kunna bedöma och utvärdera metodens fördelar och begränsningar. Försvars- och företags-sekretess medför att det är mycket svårt att göra realistiska bedömningar av metoden i olika taktiska scenarion.

Traditionell tät GPS/TN integration

För att kunna jämföra prestanda hos det ultratäta integrerade navigeringssystem bör en traditionell mjukvaru-GPS utvecklas som integreras med ett tröghetsnavigeringssystem.



Figur 5.4: Blockschema över de två integrerade navigeringssystemet som ska simuleras i mjukvara. En ultratät integration jämförs med en traditionell tät integration med avseende på navigeringsprestanda så väl som prestanda för satellitföljning.

Litteraturförteckning

- [1] A. Eklund. Försvarsmaktens riktlinjer för nyttjande och anskaffning av satellitnavigeringshjälpmedel-GNSS. HKV skrivelse 21 720:74267, Nov 2005.
- [2] C. Hide, T. Moore, C. Hill, and D. Park. Low Cost, High Accuracy Positioning In Urban Environments. *The Journal of Navigation*, 59(3), September 2006.
- [3] F. Berefelt, B. Boberg, J. Nygårds, P. Strömbäck, and S-L. Wirkander. Collaborative GPS/INS Navigation in Urban Environment. In *Proceedings of ION NTM 2004*. ION NTM 2004, January 2004.
- [4] N. Hjortsmarker. Experimental system for validating GPS/INS Integration Algorithms. Technical Report FOI-R-1875-SE, FOI, 2005.
- [5] B. Boberg, L. Pääjärvi, and P. Strömbäck. Robust Navigation in Urban Warfare. In *Trilateral Urban Warfare Workshop*, Stockholm, May 2005. FMV.
- [6] B. Boberg. Robust Navigation - Allowing other system to support GPS renders increased robustness and precision. *Swedish Journal of Military Technology*, (3-4):23-28, December 2005.
- [7] B. Boberg and P. Strömbäck. Robust navigering - statusrapport 2005. Technical Report FOI-R-1832-SE, FOI, December 2005.
- [8] B. Boberg and P. Strömbäck. Robust navigering - Årsrapport. Underlagsrapport FOI-R-1442-SE, FOI, Dec. 2004.
- [9] B. Boberg, U. Nilsson, and P. Strömbäck. Integrerad navigering med MEMS-IMU. Technical Report FOI-R-1939-SE, FOI, Mars 2006.
- [10] B. Boberg, U. Nilsson, and P. Strömbäck. Navigeringsteknik. Technical Report FOI-R-2080-SE, FOI, 2006.
- [11] P. Strömbäck, B. Boberg, and S-L. Wirkander. Specifikation av Kalman-filter för markfordon. Technical Report FOI-R-2082-SE, FOI, 2006.
- [12] B. Boberg and P. Strömbäck. Navigeringssystem för markfordon. Technical Report FOI-R-1628-SE, FOI, April 2005.
- [13] B. Boberg and F. Eklöf. *FOI orienterar om rymden - nytta och teknik*, chapter Rymdteknik - nyttolaster: Navigeringssystem. FOI, May 2005.
- [14] B. Boberg. Erfarenheter från experiment med hög dynamik. Technical Report FOI-S-2034-SE, FOI, 2005.
- [15] B. Boberg. Militär användning av satellitnavigeringssystem. Technical Report FOI-S-2035-SE, FOI, 2005.

- [16] B. Boberg. Robust navigation. Technical Report FOI-S-2036-SE, FOI, 2005.
- [17] S. Alban. *Design and Performance of a Robust GPS/INS Attitude System for Automobile Applications*. PhD thesis, Stanford University, Juni 2004.
- [18] J. W. Kim, D-W. Hwang, and S.J Lee. A Deeply Coupled GPS/INS Integrated Kalman Filter Design Using Linearized Correlator Output. In *Proceedings of PLANS 2006*. ION, IEEE, April 2006.
- [19] T. Pany and B. Eissfeller. Use of a Vector Delay Lock Loop Receiver for GNSS Signal Power Analysis in Bad Signal Conditions. In *Proceedings of PLANS 2006*. IEEE, ION, 2006.
- [20] B.W. Parkinson. and J.J. Spilker. *Global Positioning System: Theory and Applications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.
- [21] J. Beser, S. Alexander, R. Cane, S. Rounds, and J. Wyman. TRUNAVTM: A Low-Cost Guidance/Navigation Unit Integrating a SAASM-Based GPS And MEMS IMU in a Deeply Coupled Mechanization. In *Proceedings of ION GNSS 2002*. ION, 2002.
- [22] E.J. Ohlmeyer. Analysis of an Ultra-Tightly Coupled GPS/INS System in Jamming. In *Proceedings of PLANS 2006*. ION, IEEE, April 2006.
- [23] D. Landis and T. Throvaldsen and B. Fink and P. Sherman and S. Holmes. A Deep Integration Estimator for Urban Ground Navigation. In *Proceedings of PLANS 2006*. IEEE, ION, April 2006.
- [24] S. Rounds. Personal Navigation in a Networked Environment. In *Proceedings of ION GNSS 2006*. ION, 2006.
- [25] P. Händel et Al. Positionering av krishanteringspersonal vid räddningssatser. Ansökan till VINNOVA, 2006.
- [26] E.M. Copps, G.J. Geiger, W.C. Fidler, and P.A. Grundy. Optimal Processing of GPS Signals. *NAVIGATION Journal of The Institute of Navigation*, 27(3):171–182, Fall 1980.
- [27] T.B. Buck, J. Wilmot, and M.J. Cook. A High G, MEMS Based, Deeply Integrated INS/GPS, Guidance, Navigation and Control Flight Manager Unit. In *Proceedings of PLANS 2006*. ION, IEEE, April 2006.
- [28] D.E. Lewis. Ultra-Tightly Coupled GPS/INS Tracking Performance. In *Proceedings of AIAA 2003*. AIAA, November 2003.
- [29] A. Jovancevic and S. Ganguly. Real-Time Implementation of a Deeply Integrated GNSS-INS Architecture. In *Proceedings of ION GNSS 2005*. ION, September 2005.
- [30] A. Jovancevic and S. Ganguly. Flexible Architecture for Space Navigation. In *Proceedings of ION GNSS 2005*. ION, September 2005.
- [31] A. Jovancevic, A. Brown, S. Ganguly, J. Noronha, and B. Sirpatil. Ultra Tight Coupling Implementation Using Real Time Software Receiver. In *Proceedings of ION GNSS 2004*. ION, September 2004.
- [32] J.W. Sennott and D. Senffner. The Use of Satellite Geometry for Prevention of Cycle Slips in a GPS Processor. *NAVIGATION Journal of The Institute of Navigation*, 39(2):217–235, Summer 1992.

-
- [33] J. Sennott and D. Senffner. A GPS Carrier Phase Processor for Real-Time High Dynamics Tracking. In *Proceedings of ION AM 2006*. ION, 1997.
- [34] J.W. Sennott. Receiver Architecture for Improved Carrier Phase Tracking in Attenuation, Blockage and Interference. *GPS Solutions*, 3(2):40–47, 1999.
- [35] T. Pany, R. Kaniuth, and B. Eissfeller. Deep Integration of Navigation Solution and Signal Processing. In *Proceedings of ION GNSS 2005*. ION, 2005.
- [36] S. Gunawardena, A. Soloviev, and F. van Graas. Real Time Implementation of Deeply Integrated Software GPS Receiver and Low Cost IMU for Processing Low-CNR GPS Signals. In *Proceedings of ION AM 2004*. ION, June 2004.
- [37] S. Gunawardena, A. Soloviev, and F. van Graas. Real Time Block Processing Engine for Software GNSS Receivers. In *Proceedings of ION NTM 2004*. ION, January 2004.
- [38] S. Gunawardena, A. Soloviev, and F. van Graas. Deeply Integrated GPS/Low-Cost IMU for Low CNR Signal Processing: Flight Test Results and Real Time Implementation. In *Proceedings of ION GNSS 2004*. ION, September 2004.
- [39] S. Gunawardena, A. Soloviev, and F. van Graas. Implementation of Deeply Integrated GPS/Low-Cost IMU for Reacquisition and Tracking of Low CNR GPS Signals. In *Proceedings of ION NTM 2004*. ION, January 2004.
- [40] S. Gunawardena and A. Soloviev and F. van Graas and M.U. de Haag and M. Braasch. Comparison of Two Approaches for GNSS Receiver Algorithms: Batch Processing and Sequential Processing Considerations. In *Proceedings of ION GNSS 2005*. ION, September 2005.
- [41] D. Gustafson, J. Dowdle, and K. Flueckiger. A High Anti-Jam GPS-Based Navigator. In *Proceedings of ION NTM 2000*. ION, 2000.
- [42] D. Gustafson and J. Dowdle. Deeply Integrated Code Tracking: Comparative Performance Analysis. In *Proceedings of ION GNSS 2003*. ION, 2003.
- [43] D. Gustafson, J. Dowdle, and K. Flueckiger. INS/GPS Deep Integration Navigation Hardware Testbed. In *Proceedings of ION AM 2005*. ION, 2005.
- [44] The Charles Stark Draper Laboratory Inc. Deeply-integrated adaptive GPS-based navigator with extended-range code tracking, us patent 6731237, 2004.
- [45] M.G. Petovello and G. Lachapelle. Comparison of Vector-Based Software Receiver Implementations With Application to Ultra Tight GPS/INS Integration. In *Proceedings of ION GNSS 2006*. ION, 2006.
- [46] A. Osman, N. Ziedan, and N. El-Sheimy. Improving GPS Receiver Tracking Performance of PLL by MEMS IMU Aiding. In *Proceedings of ION GNSS 2006*. ION, 2006.
- [47] S.R. Babu and J. Wang. Comparative study of interpolation techniques for ultra-tightly integration of GPS/INS/PL sensors. *NAVIGATION Journal of The Institute of Navigation*, 4(1-2):192–200, 2005.

- [48] S. Babu and J. Wang. Ultra-Tightly GPS/INS/PL Integration: Kalman Filter Performance Analysis.
- [49] J. Wang, S. Babu, and A. Dempster. Performance of code tracking loops in ultra tight GPS/INS/PL integrations.
- [50] D. Li and J. Wang. Kalman Filter Design Strategies for Code Tracking Loop in Ultra-Tight GPS/INS/PL Integration. In *Proceedings of ION NTM 2006*. ION, January 2006.
- [51] D. Li, J. Wang, and S. Babu. Nonlinear Stochastic Modelin for INS Derived Doppler Estimates in Ultra-Tight GPS/PL/INS Integration.
- [52] D. Li and J. Wang. System Design and Performace Analysis of Extended Kalman Filter-Based Ultra-Tightly GPS/INS Integration. In *Proceedings of PLANS 2006*. IEEE, ION, April 2006.
- [53] A. Brown, D. Nguyen, Y. Lu, and C. Wang. Testing of Ultra-Tightly-Coupled GPS Operation Using a Precision GPS/Inertial Simulator. In *Proceedings of ION GNSS 2005*. ION, September 2005.
- [54] H-S. Kim, S-C. Bu, G-I. Jee, and C-G. Park. An Ultra-tightly coupled GPS/INS Integration using Federated Kalman Filter. In *Proceedings of ION GNSS 2003*. ION, September 2003.
- [55] E-K. Poh, A. Koh, and G. Wong. Evaluation of Coupled GPS/INS Integration Using Software GPS Receiver Model. In *Proceedings of ION GNSS 2002*. ION, September 2002.
- [56] P. Misra and P. Enge. *Global Positioning System - Signals, Measurements, and Performance*. Ganga-Jamuna Press, second edition, 2004.
- [57] J. B.-Y. Tsui. *Fundamentals of Global Positionning System Receivers*. Wiley, 2000.
- [58] E: D. Kaplan. *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House, Inc, 1996.
- [59] C. Jekeli. *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. de Gruyter, 2000.
- [60] P. Strömbäck. Centralized GPS/INS Integration for Urban Navigation. Technical Report FOI-R-0847-SE, FOI, March 2003.
- [61] J.A Farrel and M. Barth. *The Global Navigation System & Inertial Navigation*. McGrew-Hil, 1998.