

# **Satellitbaserad positionsbestämning och alternativa metoder vid störningar**

Alexander Blomqvist 38912

Kandidatavhandling i datateknik

Handledare: Annamari Soini

Fakulteten för naturvetenskaper och teknik

Åbo Akademi

2024

## **Referat**

Satellitbaserad positionsbestämning, till exempel gps, används i omfattande grad både privat och kommersiellt. De radiosignaler som systemen använder utsätts för både naturliga och avsiktliga störningar. I EU är särskilt avsiktlig störning ett växande problem.

Den här avhandlingen beskriver hur de satellitbaserade positionsbestämningssystemen är uppbyggda och vilka begränsningar de har. Här presenteras också alternativa positionsbestämningmetoder såsom radionavigering, visuell navigering och tröghetsnavigering.

Avhandlingen studerar också den mänskliga faktorn och vilka fenomen som kan uppstå till följd av att människor förlitar sig för mycket på teknik och automatiska navigeringssystem.

## **Sökord**

Positionsbestämning, BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS, störning, spoofing

## **Användning av AI som stöd vid skrivarbetet**

Jag har använt generativ AI ChatGPT 4 och ChatGPT 4o som hjälpmedel i skapandet av min avhandling. Främst har jag fört dialog om ordval i min skrivna text och som uppslagsverk för ord och förkortningar i källtexter. Jag har också använt generativ AI för att hantera inställningar och reagera på felmeddelanden i LaTeX-texthanteraren och för att automatisera mina källors källinformation till LaTeX-referenser i korrekt format. I slutskedet av skrivandet har jag också använt mig av generativ AI för att diskutera kapitlens omfattning och analysera om jag har uppenbara brister eller luckor i mitt omfång.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teknisk analys av satellitbaserad positionsbestämning</b>	<b>3</b>
2.1	Principerna bakom satellitbaserade positionsbestämningssystem . . . . .	3
2.2	Jämförelse av BeiDou, Galileo, GLONASS och GPS . . . . .	4
2.2.1	Jämförelse av olika modulerings tekniker och flerkansalöverföring . . . . .	4
2.2.2	Latitudbegränsningar . . . . .	6
2.2.3	Nätverksassisterad satellitbaserad positionering . . . . .	6
2.2.4	Användarbegränsningar . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Teknisk analys av störningar</b>	<b>9</b>
3.1	Naturlig störning . . . . .	9
3.1.1	Signalskugga . . . . .	9
3.1.2	Utrustningsfel . . . . .	10
3.1.3	Jonosfäriska egenskaper och rymdväder . . . . .	10
3.1.4	Signalreflektion . . . . .	10
3.1.5	Elektromagnetisk störning i mottagarens närhet . . . . .	11
3.2	Avsiktlig störning . . . . .	11
3.2.1	Aktiv signalstörning . . . . .	11
3.2.2	Spoofing . . . . .	12
3.2.3	Sabotage av utrustning . . . . .	13
3.3	Diagnostikmetoder . . . . .	13
3.4	Fallstudier över störningar . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Den mänskliga faktorn</b>	<b>16</b>

4.1	Kunskapsförtvining . . . . .	16
4.2	Övertro på teknik . . . . .	17
4.3	Informationsöverbelastning . . . . .	17
4.4	Informationsfiltrering och abstraktion av information . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Alternativa</b>	
	<b>positionsbestämningsmetoder</b>	<b>19</b>
5.1	Radionavigering . . . . .	20
5.2	Visuell och signalreflektionsbaserad positionsbestämning . . . . .	21
5.3	Tröghetsnavigering . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Lösningar</b>	<b>23</b>
6.1	Myndigheternas rekommendationer . . . . .	23
6.2	Den mänskliga faktorn . . . . .	23
6.3	Tekniska lösningar mot störning av satellitbaserade positionsbestämningssystem . . . . .	24
6.3.1	Jonosfäriska algoritmer . . . . .	24
6.3.2	Polarisationsfilter . . . . .	24
6.3.3	Kryptering . . . . .	24
<b>7</b>	<b>Sammanfattning</b>	<b>26</b>

# 1. Inledning

Satellitbaserad positionsbestämning används både i professionella och privata sammanhang, och dagens samhälle har länge kunnat lita på dess precision och tillförlitlighet. Teknologin används förutom direkt av konsumenter också som ett centralt verktyg i många industrier, till exempel i flygindustrin, sjöfartsindustrin, jordbruksindustrin och inom autonoma system. I dessa industrier har satellitbaserad positionsbestämning förbättrat effektiviteten och säkerheten markant. Flera industrier och system är i dag helt eller delvis beroende av satellitbaserad positionsbestämning.

Till de mest kända och mest använda satellitbaserade positionsbestämningssystemen hör BeiDou (Kina), Galileo (EU), GLONASS (Ryssland) och GPS (USA). Utöver dessa globala system finns det även mindre regionala system som NavIC (Indien) och QZSS (Japan) [1]. Alla dessa system fungerar enligt samma grundprincip: De beräknar avstånd mellan användaren och satelliter på kända omloppsbanor i rymden och kombinerar flera avståndsmätningar för att kalkylera användarens position. [2]

Under de senaste fem åren har tillförlitligheten för satellitbaserad positionsbestämning minskat märkbart. I Finland och Europa har det skett flera incidenter där signalkvaliteten på dessa system har sjunkit kraftigt och plötsligt. De finska myndigheterna har konstaterat att en störningshändelse i mars 2022 skedde på grund av avsiktlig störning, men fullständiga rapporter av situationen är sekretessbelagda [3]. Även Europeiska unionen har observerat minskad precision och tillförlitlighet i satellitbaserad positionsbestämning. Europeiska unionens byrå för luftfartssäkerhet (EASA) har därför sedan 2023 inlett en kampanj med informationsinsamling och informationsdelning, och har utfärdat nya rekommendationer över åtgärder för alla parter i flygindustrin för att hantera dessa problem med minskad tillförlitlighet i satellitbaserad positionsbestämning [4]. Utöver de avsiktliga störningarna, som ofta är resultat av myndigheters eller militärens aktivitet, finns det flera naturliga störningar som också påverkar systemens tillförlitlighet. I en artikel i The New York Times i maj 2024 beskrivs ett fall där jordbruksmaskiner i USA upplevde avbrott i positionsbestämningssystem, som troligen orsakades av kraftigt solväder [5].

När satellitbaserad positionsbestämning blir otillgänglig eller opålitlig, finns det flera gamla och nya tekniker som kan användas istället för att bestämma positioner. Visuellt positionsbestämning används till exempel inom autonoma system, och radiobaserad positionsbestämning används både i personnavigering och i robusta äldre system inom sjöfart och flygindustri. Avancerade tekniker som tröghetsnavigering används ofta i kombination med andra positionsbestämningssystem i autonoma system, inom personnavigering, i blandad och virtuell verklighet och i flygindustrin.

Denna studie är en teknisk analys av dom vanligaste satellitbaserade positionsbestämningssystemen och dess sårbarheter samt en presentation av alternativa positionsbestämningssystem. Avhandlingen granskar både naturliga och avsiktliga störningar mot bakgrunden av den minskade tillförlitligheten och precisionen i satellitbaserad positionsbestämning i Europa. Studien fokuserar på den civila användningen av publikt tillgängliga satellitbaserade positionsbestämningssystem med särskilt fokus på europeisk relevans. Aktuell geopolitik och militära intressen berörs endast när de är direkt relevanta för studiens avgränsningar. Avhandlingen strävar efter att ge en helhetsbild av både nuvarande och potentiella framtida hot mot satellitbaserad positionsbestämning. Det analyseras också vilka åtgärder som redan gjorts och som kunde implementeras för att upptäcka och motarbeta dessa hot. Avhandlingen understryker betydelsen av redundanta system och åtgärder för dagens satellitbaserade positionsbestämningssystem för att säkerställa att både industrier och konsumenter kan fortsätta att använda globalt tillgängliga och pålitliga positionsbestämningssystem i framtiden.

## 2. Teknisk analys av satellitbaserad positionsbestämning

Satellitbaserad positionsbestämning är en metod att bestämma position baserat på signaler från satelliter. BeiDou, Galileo, GLONASS och GPS fungerar alla på samma principer. Skillnaderna i systemen härstammar främst från de tekniker som var tillgängliga när systemen designades. GPS (1983) och GLONASS (1993) är betydligt äldre än GALILEO (2016) och BeiDou (2020) [2, 6]. Systemen moderniseras kontinuerligt, samtidigt som bakåtkompatibilitet respekteras. [2]

### 2.1 Principerna bakom satellitbaserade positionsbestämningssystem

Alla satellitbaserade positionsbestämningssystem bygger på samma grundprincip, att bestämma position genom att trilaterera signaler från satelliter i rymden. Trilaterering är principen för att beräkna position i tre dimensioner baserat på avstånd till fyra eller flera kända punkter. Signalerna innehåller bland annat en tidsstämpel som mottagande enhet kan använda för att beräkna hur länge det har tagit för signalen att nå fram till användaren. Genom att jämföra den aktuella tiden med tidsstämpeln från den sändande satelliten och information om signalens hastighet, kan mottagande enhet skapa en ekvation för att räkna ut avståndet till avsändaren, som är lätt att lösa matematiskt. Det beräknade avståndet kallas för pseudoavstånd  $d_p$  (eng: pseudorange) [2].

$$d_p = t_{\text{signal}} \times v_{\text{signal}} \quad (1)$$

där  $d_p$  representerar pseudoavstånd,  $t_{\text{signal}}$  signaltid och  $v_{\text{signal}}$  signalhastighet.

Med uträknat pseudoavstånd till många samtida satelliter, tillsammans med information om var satelliterna befinner sig på sina respektive omloppsbanor, kan man räkna ut positionen

på mottagande enhet genom trilaterering [2]. Eftersom avstånden mellan satelliten och användaren är väldigt långa, är precision i samtliga variabler viktig. Ekvationen försvåras av refraktioner och av signalfördröjningar som uppkommer när signalen rör sig utöver rymdens vakuum och även genom atmosfären. I atmosfären passerar signalen luftskikt med olika densitet. Variationerna i densiteten påverkar både hur signalen bryts (refraktion) och hur mycket signalen fördröjs. Beroende på mottagarens position, luftfuktighet, lufttryck och andra atmosfäriska faktorer varierar dessa fenomen från fall till fall. Jonosfären med sina elektromagnetiska störningar orsakar också stora fel i pseudoavståndet, då signalen kan fördröjas eller försämrats. Dessa fenomen gör uträkningarna mer komplicerade, men moderna beräkningar av pseudoavståndet är relativt bra på att korrigera för dem. [7, 2]

## **2.2 Jämförelse av BeiDou, Galileo, GLONASS och GPS**

Principen för trilaterering och beräkning av pseudoavstånd genom signaltid är liknande för alla system, men innehållet i signalerna och modulerings-tekniken eller flerkanalsoverföringen varierar mellan dem. Utöver grundläggande information, som signaltid och sändande satellits position, innehåller signalerna också systemspecifik telemetri som till exempel information om satellitens status och konstaterade felmarginaler. [2]

### **2.2.1 Jämförelse av olika modulerings-tekniker och flerkanalsoverföring**

Satellitbaserade positionsbestämningssystem bygger på att mottagande enhet kan tolka signaler från flera satelliter samtidigt. Systemet måste vara designat så att signalerna går att urskiljas från varandra och tolkas var för sig. För att signalerna från satelliterna inte ska interferera med varandra, måste signalerna vid sändningen moduleras, eller använda sig av flerkanalsoverföringsteknik. Olika satellitbaserade positionsbestämningssystem använder olika tekniska lösningar för detta. Modulerings- eller flerkanalsoverföringstekniken är en viktig faktor i hur resistent systemet är mot störningar. [2]

Modulering är den princip som används för att koda in informationen i en bärvåg. En bärvåg är en sinusvåg som både sändarens och mottagarens antenner är känsliga för. Några metoder för modulering av en bärvåg är amplitudmodulering (AM), frekvensmodulering (FM) och fasmodulering (PM). Amplitudmodulering och frekvensmodulering är bekanta från traditionell analog radio, där en analog ljudsignal moduleras antingen i amplitud eller frekvens ovanpå en bärvåg. Bär vågens frekvens är den radiofrekvens man väljer på radion. Amplitudmodulering går ut på att variera bärvågen i amplitud för att koda information. Det

betyder att fasen och frekvensen hålls konstanta, och informationen finns i variationer på amplituden av bärvågen. Frekvensmodulering håller fasen och amplituden konstanta, men innehåller information i variation av frekvens. Fasmodulering har frekvens och amplitud konstanta, medan variation i fasen innehåller informationen. [8]

Signalen från satellitbaserade positionsbestämningssystem är mer komplex än radions signaler och är uppdelad på flera frekvenser dedikerade för olika ändamål. Till exempel har GPS-nätverket tre huvudsakliga frekvensband som används i vardaglig navigering, och tre frekvenser för annat bruk. De vanliga frekvenserna i GPS kallas för L1, L2 och L5. Den huvudsakliga navigeringsinformationen finns i L1. Frekvenserna L2 och L5 används för att ge högre precision till civilt och militärt bruk och som ett extra skydd för störningar. L6 används för mera specifika syften, som precisionsförbättringar för det japanska QZSS-systemet. [9]

Binär fasmodulering (BPSK) är en grundläggande moduleringsteknik för GPS. Informationen på BPSK är kodad som fasvariationer på bärvågen. BPSK är den ursprungliga moduleringstekniken för det civila navigeringsmeddelandet, och den används på den civila navigeringskoden, den så kallade C/A-koden (Coarse/Acquisition) i GPS L1-signalen. Dessutom är L1-signalen samtidigt modulerad med binär offset-bärare (BOC) i den militära M-koden, och multiplexerad binär offset-bärare (MBOC) i L1C, som används för att öka precisionen för civil navigering. BOC är en sorts fasförskjutningsteknik där koden multipliceras med en delbärvåg, vilket resulterar i en sinus- eller cosinusfasförskjuten binär offset-bärare [9]. Galileo använder BOC och en så kallad altBOC, där två signaler moduleras samtidigt på en och samma bärvåg [6]. GLONASS använder både frekvensdelad multipelåtkomst (Frequency Division Multiple Access, FDMA) och i de nya satelliterna BPSK. FDMA är en enklare teknik där varje satellit sänder på en unik frekvens eller kanal på samma frekvensband [10]. MBOC erbjuder förbättrad tålighet mot interferens, särskilt signalreflektion och aktiv signalstörning, egenskaper som saknas på de äldre teknikerna som BPSK och FDMA [9]. BeiDou använder BPSK och BOC, och i de nyare satelliterna MBOC och AltBOC [11].

## 2.2.2 Latitudbegränsningar

Satellitkonstellationens design inverkar på systemets hörbarhet på väldigt höga och väldigt låga latituder. Satellitkonstellationerna har olika omloppsbanor, och omloppsbanorna varierar i höjd och i inklinationsvinkel. Inklinationsvinkeln avser vinkeln till ekvatorn. En högre inklinationsvinkel leder till ett större användningsområde, då satelliten passerar högre och lägre latituder i sin bana. GPS-konstellationen har en inklinationsvinkel på  $55^\circ$  och en omlopps bana på ca 20 000 km, GLONASS har en inklinationsvinkel på ca  $65^\circ$  och en omlopps bana på ca 12 000 km och Galileo har en inklinationsvinkel på  $56^\circ$  och en omlopps bana på ca 23 000 km:s höjd. BeiDou har satelliter i geostationär omlopps bana på ca 36 000 km:s höjd, i så kallad lutande geosynkron omlopps bana med  $55^\circ$  inklinationsvinkel på ca 36 000 km:s höjd och i medelhög omlopps bana (Eng: Medium Earth Orbit) på ca 21 000 km och med en inklinationsvinkel på  $55^\circ$ . [12, 13]

I studier över hörbarhet på GPS, Galileo och GLONASS vid höga och låga latituder, konstateras att man uppnår tillräckligt god hörbarhet nära polerna för navigering, men tillförlitligheten för vertikal positionsbestämning lider. För att uppnå god vertikal noggrannhet, krävs det en fördelning av satelliter vid både högre och lägre höjdsvinkel än vad konstellationerna idag tillåter. [12, 14] Det bör tilläggas att utöver geometriska begränsningar, tenderar de jonosfäriska störningarna att vara kraftigare vid polerna, vilket leder till högre sannolikhet för naturlig störning. Detta sker på grund av att jordens magnetfält är format som en tratt, lodrätt till marken vid polerna, vilket tillåter partiklar att nå jonosfären [15].

## 2.2.3 Nätverksassisterad satellitbaserad positionering

Nätverksuppkoppling kan användas för att förbättra satellitbaserade positionsbestämningssystem på många sätt. En situation där nätverksuppkoppling kan förbättra användarupplevelsen är när det gäller hur länge det tar att uppnå första positionsfixering (även kallat TTFF från engelskans time to first fix). Detta görs dels genom att kombinera grov positionsbestämning med andra metoder och information över nätverket om vilka satelliter som befinner sig på sådant ställe så att enheten kunde ta emot signaler från dem, samt med information om satellitsignalernas fas. Detta gör att enheten kan fokusera på möjliga satelliter och förväntade faser. Mottagande enhet kan också via nätverket ta emot information om satelliters position och felkorrigering, istället för att vänta på att ta emot samma information från satellitens signal. Med dessa metoder kan man spara tiotals sekunder för att uppnå första positionsfixering. Det finns också system som skickar vidare mottagna obehandlade signaler till en server för beräkning av pseudoavstånden. Detta sparar processeringsresurser hos mottagaren, men leder till

fördröjning i positionsbestämning. [2]

## 2.2.4 Användarbegränsningar

Globala positionsbestämningssystem är i regel publikt tillgängliga för allmänheten, men i vissa specifika fall kan det finnas behov att begränsa användningen eller precisionen av systemen. Systemens syfte varierar också mellan att vara militära verktyg, en del av den civila infrastrukturen eller en blandning av dessa.

Galileo styrs helt och hållet av civila organ. GLONASS, GPS och BeiDou är däremot i första hand militära verktyg, som samtidigt delvis är tillgängliga för allmänheten [2]. Dessa system kunde hypotetiskt begränsas av militära skäl. Detta har dock inte skett sedan maj år 2000 [16]. Eftersom den civila positionsbestämningen består av att tolka mottagna signaler som skickas helt okrypterade och helt utan tvåvägskommunikation mellan användare och satellit, är det inte möjligt att selektivt begränsa en specifik användare. Det kunde vara möjligt att begränsa hela positionsbestämningssystem, eller att med legislativa åtgärder begränsa försäljning och export eller import av mottagare.

GPS har i början på 1990-talet haft en inbyggd och avsiktlig försämring av precisionen på C/A-koden på den civila signalen. Detta fenomen kallas för selektiv tillgänglighet (SA från engelskans Selective Availability). SA genomfördes ursprungligen för att undvika att USA:s militära motståndare framgångsrikt skulle kunna använda deras egna GPS-system emot dem, exempelvis i avancerade missiler. SA var tillfälligt avstängt under Gulfkriget för att underlätta USA:s egna soldaters användning av kommersiella navigeringsenheter. SA avslutades slutligen till följd av politiska beslut i maj 2000, och moderna GPS-satelliter har inte denna egenskap implementerad i sin hårdvara. [16, 17]

Man kunde tänka sig att de globala positionsbestämningssystemen med koppling till militära organ kunde ha hemlig beredskap för system som liknar 1990-talets GPS SA-egenskaper. Detta går inte att verifiera.

Utöver denna hypotetiska begränsning på hela satellitbaserade positionsbestämningssystem av militära skäl, regleras tekniken i Missile Technology Control Regime (MTCR). MTCR är ett samarbete mellan 35 länder med syfte att begränsa spridning av missil- och kärnvapentechnologi. MTCR täcker komponenter och teknologier som kunde användas i tillverkning eller utveckling av dylika vapen. [18] I segmentet som gäller reglering av teknik som kan användas i kryssningsmissiler, inkluderas bland annat satellitbaserad positionsbestämning. All satellitbaserad positionsbestämning är enligt avtalet reglerad att sluta fungera om hastigheten i mottagaren uppnår över 600 m/s över jordens yta. Denna reglering sker i mottagande enhet och implementeras i praktiken i mjukvaran på samtliga

produkter som produceras i avtalsländerna. [19] Eftersom regleringen gäller export och försäljning av mottagande enheter, skulle det vara möjligt för individer eller organisationer att modifiera eller producera egna enheter som inte påverkas av dessa regler. Dessutom bör det tilläggas att MTCR inte är globalt bindande, utan endast gäller medverkande länders produktion och export.

## 3. Teknisk analys av störningar

Eftersom avståndet från satellitkonstellationen till användaren är väldigt långt, är signalen som mottagande enhet tar emot svag. En mycket svag signal är naturligt känslig för störningar, och radiosignalers styrka avtar enligt inversa kvadratlagen, vilket innebär att en fördubbling i avstånd betyder en fyrdubbling i signalförminskning. Formeln för den inversa kvadratlagen är:

$$I \propto \frac{1}{d^2} \quad (1)$$

där  $I$  representerar signalstyrkan och  $d$  är avståndet från signalens källa. [20, 21]

Den svaga signalen är känslig för många olika typer av interferens och störningar. Med interferens avses blockering eller förändring av en signal på väg från sändare till mottagare, medan störning även innefattar tekniska fel i sändande eller mottagande enhet, samt avsiktlig störning. Störning av satellitbaserad positionsbestämning kan delas in i naturliga och avsiktliga störningar. En del naturliga störningar är förutsägbara och går att kompensera med mjukvara, medan övriga naturliga samt alla avsiktliga störningar är svåra att förutse och kompensera för.

### 3.1 Naturlig störning

Naturliga störningar inkluderar allt det som händer naturligt och oavsiktligt. Några av de vanligaste störningarna är jonosfäriska fenomen, signalreflektion och elektromagnetisk störning, men även oväntat rymdväder och utrustningsfel är potentiella störningskällor [7].

#### 3.1.1 Signalskugga

Satellitbaserad positionsbestämning använder sig av relativt svaga radiovågor. Föremål som befinner sig mellan användaren och satelliten kan orsaka så kallad signalskugga. Signalskuggan kan leda till att signalen absorberas, diffrakteras eller reflekteras. Några vanliga scenarier är byggnader och infrastruktur eller naturliga hinder, så som topografiska

hinder och vegetation. Mängden material och materialets egenskaper påverkar hur mycket signalen försämras. Betong och sten är några exempel på material som försvagar signalen väldigt mycket. Signalskugga är en av de största orsakerna till försämrad prestanda, särskilt vid personnavigering i urban omgivning. Ibland kan signalen ändå nå användaren indirekt via reflektioner. Detta behandlas mera i avsnittet 3.1.4 Signalreflektion. [2]

### **3.1.2 Utrustningsfel**

Utrustningsfel är något som satellitbaserade positionsbestämningssystemdesigners har varit tvungna att beakta redan från början, och det är ett kontinuerligt arbete att avveckla gamla satelliter och att planera nya ersättande. En GPS IIA-satellitens beräknade livslängd är 7,5 år. När man beslutat att ta en satellit ur bruk, flyttas den till en omlopps bana dedikerad till rymdskrot där satelliten till slut stängs ned. [22] Satelliternas hälsa, omlopps bana och status övervakas av markstationer som jämför sina exakta positioner med systemets beräknade position och diagnostikinformation. Markstationerna kan kalibrera och förbättra satelliternas precision genom att korrigera omloppsbanan eller genom att ladda upp korrigeringsalgoritmer till satelliternas signalgenerering [23].

### **3.1.3 Jonosfäriska egenskaper och rymdväder**

Jordens jonosfär är ett skikt i atmosfären som har en extra hög förekomst av joniserad gas. Jonosfären försämrar radiokommunikationen, och skiktets elektromagnetiska egenskaper varierar ofta [24], vilket gör det svårt att kompensera för jonosfären med mjukvara.

Utöver vardagliga variationer i jonosfärens elektromagnetiska egenskaper kan rymdväder tillfälligt påverka jonosfären och magnetosfären. Variationer i solvinden samt koronamassutkastningar kan orsaka betydande förändringar i magnetosfären, vilket kan leda till att radiosignalerna från satelliter fördröjs eller sprids. Detta kan leda till positioneringsfel eller total förlust av läsbar signal. [25] Solstormar förekommer cykliskt i ungefär 11-års cykler, och närmaste solcykelmaximum förutspås ske i juli 2025 [26][27].

### **3.1.4 Signalreflektion**

Signalreflektion avser en situation där satellitsignalen inte når användaren direkt, utan via en reflektion från omgivningen från till exempel berg, byggnader eller vatten. Detta är en av de största orsakerna till försämrad prestanda. Denna reflekterade signal, som har fördröjd signaltid och modifierad fas jämfört med den direkta signalen, interfererar sedan med den direkta signalen. Interferensen kan orsaka fel i pseudoavstånd på många meter. Reflektionens avstånd inverkar mycket på hur den reflekterade signalen påverkar

den direkta signalen. Korta reflektioner är svåra att korrigera, eftersom de interfererar och förvränger den uppmätta signalens fas. [2]

### **3.1.5 Elektromagnetisk störning i mottagarens närhet**

Elektroniska apparater i användarens närhet kan oavsiktligen orsaka elektromagnetisk störning. Möjliga källor till elektromagnetisk störning kan vara mobilnätkommunikation särskilt på LTE 1800/1900 MHz frekvensband, eller till och med en kamera på en drönare [28]. [29] Avståndet till den elektromagnetiska störningen är kritiskt, eftersom radiovågors styrka avtar i kvadrat till avståndet enligt den inversa kvadratlagen (formel 1). Många elektroniska enheter kan skapa elektromagnetisk störning och särskilt i flygindustrin är det noggrant kartlagt hurdan störning som kan tillkomma, och utrustning certifieras för att kunna fungera tryggt och förutsägbart i annan utrustnings närhet [30].

## **3.2 Avsiktlig störning**

Avsiktlig störning innefattar både blockering av signalen på vägen från satelliten till användaren och manipulering av innehållet i signalen. Avsiktlig störning begränsas i lag och övervakas av myndigheter och militära organ.

### **3.2.1 Aktiv signalstörning**

Aktiv signalstörning (eng: jamming) är en avsiktlig störning av radiosignaler, där syftet är att överrösta den genuina signalen med brus. En aktiv signalstörningsattack behöver inte vara tekniskt avancerad, och utrustningen är lätt att få tag på, då det endast krävs att överrösta den naturligt svaga satellitsignalen med brus för att delvis eller helt blockera signalen. Aktiv signalstörning kan ske både lokalt av privatpersoner eller myndigheter och regionalt av nationella militärer. Enligt USA:s revisionsmyndighet (Government Accountability Office, GAO) kan en aktiv signalstörning på så lite som 1 Watt störa GPS-användning i ett område med en radie på över 3 km. [31]

Eftersom aktiv signalstörning till sin natur består av att med hög effekt skicka brus, är en aktiv signalstörningsattack lätt att upptäcka. Även om mottagande enhet saknar diagnostikmetoder, blir följderna endast att enheten förlorar positioneringsförmågan, vilket också avslöjar attacken. På grund av att aktiv signalstörning består av att konstant aktivt skicka högeffektbrus, är attackens källa också lätt att lokalisera, vilket gör det möjligt att koordinera myndighets- eller militärrespons mot sändaren. Man kan lokalisera en aktiv signalstörning genom triangulering eller jämförelser av signalstyrka på flera olika positioner. [32]

Förekomsten av aktiv signalstörning har ökat i Europa de senaste åren. Även vid andra områden som befinner sig i närheten av väpnade konflikter har signalstörningen ökat. Detta beror på att relativt enkla fjärrstyrda drönare har börjat användas i väpnade konflikter och i terrorhot på grund av deras låga pris och stora tillgänglighet. Enkla konsumentdrönare utgör ett reellt hot för militära och civila mål. En kostnadseffektiv metod att skydda dessa mål från enkla drönarattacker är att använda sig av konstant aktiv signalstörning både på radiostyrnings- och satellitbaserade navigeringsfrekvenser. [33]

### 3.2.2 Spoofing

I satellitbaserad positionsbestämning är en spoofingattack en attack som imiterar en genuin signal och modifierar dess innehåll för att lura systemet att ange en falsk position. Spoofing kan involvera en eller flera signaler samtidigt. Spoofingattacker inkluderar både enkla upprepningsattacker och sofistikerade förfalskningsattacker. [31]

En upprepningsattack innebär att angriparen tar emot genuina satellitsignaler och blockerar den genuina signalen, för att sedan upprepa den genuina signalen med en fördröjning. Eftersom signalen i sig är genuin, är det svårt att upptäcka en upprepningsattack, och följderna av en sådan attack är att mottagaren får en modifierad position. Det är svårt att skraddarsy en exakt falsk position med en upprepningsattack eftersom man endast kan förlänga signalfördröjningen, inte förkorta den. [31]

En sofistikerad spoofingattack innebär att skapa en helt ny falsk signal baserad på offentlig information om hur satellitbaserade positioneringssystemsignaler är uppbyggda. Angriparen kan skapa flera förfalskade signaler för flera satelliter, och därmed förfalska en exakt position. Om den modifierade pseudopositionen dessutom långsamt och gradvis avviker från den genuina positionen, kan det vara väldigt svårt för mottagande enhet att upptäcka en sofistikerad spoofingattack. En sofistikerad spoofingattack kräver kunskap i satellitbaserade positionsbestämningssystem och avancerad utrustning, särskilt om attacken riktar sig mot ett rörligt mål [31, 34]. Irans militär hävdar att de använde sig av en sofistikerad spoofingattack på GPS- och kommunikationssignaler för att lura en amerikansk militärdrönare att landa inom Irans gränser [31].

Fördelen med spoofing över aktiv signalstörning är att en spoofingattack kan försämra precisionen i en positionsbestämning utan att användaren är medveten om störningen. Detta är möjligt eftersom en lyckad spoofing-attack imiterar en normal situation med upplevt god kontakt med satelliterna, och användaren därmed saknar uppenbar orsak att avbryta positionsbestämningen eller gå över till andra redundanta system.

### 3.2.3 Sabotage av utrustning

Satellitbaserade positionsbestämningssystem består av utrustning i rymden och på marken. Teoretiskt sett skulle det vara möjligt att sabotera utrustningen i rymden eller på marken för att försämra eller helt förstöra satellitbaserade positionsbestämningssystem. Utöver cyberattacker har detta inte enligt publika källor skett på något av de globala systemen. USA:s revisionsmyndighet uppger att man kan sabotera satelliter genom missiler, markbaserade energivapen (t.ex. laser, mikrovågor) eller genom användning av sabotagesatelliter. Enligt USA:s revisionsmyndighet har USA, Ryssland, Kina och Indien alla uppvisat en förmåga att sabotera satelliter. USA:s revisionsmyndighet diskuterar inte sabotage eller försvar av markutrustningen. [31]

Markutrustning kräver alltid fysiska säkerhetsåtgärder. Utöver hot från avsiktligt fysiskt sabotage kan naturkatastrofer, cyberattacker och sabotage av övrig infrastruktur påverka markbaserad utrustning. Det har skett några cyberattacker på markbaserad utrustning och man kan konstatera att cyberhotet är konstant och allvarligt. [35]

## 3.3 Diagnostikmetoder

Diagnostikmetoder är centrala för att undvika farosituationer. Om ett fel i positionsbestämning kan leda till personskador eller betydande materialskador, är det ytterst viktigt att upptäcka fel och agera på situationer av försämrad tillförlitlighet.

Vid vissa störningshändelser är störningen uppenbar eftersom enheten förlorar kontakten till systemet helt och hållet. Vid andra störningar som påverkar uppmätt position utan att förlora kontakten helt, kan vissa mottagande enheter visa fel position. De system som saknar diagnostikmetoder antar att mätdata alltid är sanna även om den uppmätta positionen varierar väldigt snabbt. Vissa avancerade och resurskrävande navigerings- och positionsbestämningssystem kan samla data från flera olika källor och därmed upptäcka fel när data från olika källor inte stämmer överens. [2]

I vissa moderna satellitbaserade positionsbestämningssystem finns det mjukvara som kontinuerligt beräknar den uppmätta positionens tillförlitlighet. Mjukvaran beräknar förväntad position baserad på en hastighetsvektor och senaste position, och jämför dessa med uppmätta data för att upptäcka tillfälligt brus. Vissa mjukvarulösningar kan också kompensera för långvariga fel i mätdata, och förutspå samt korrigera för vissa störningar. Även i dessa system är det att föredra att ha mätdata från flera källor samtidigt, exempelvis barometrisk mätning för höjdberäkning eller markbaserad positionsbestämning. [36, 37]

Diagnostikmetoder kräver resurser som kanske inte är ändamålsenliga för alla system och lösningar. Till dessa resurser hör bland annat processeringskapacitet och batteriförbrukning, vilka inverkar på kostnader och utrymmeskrav.

Satellitbaserade positioneringssystem har processer för att upptäcka och korrigera fel i enskilda satelliter eller i hela systemet. Till exempel har GPS-systemet konstant övervakning av signalerna, omloppsbanorna och korrigeringsalgoritmerna. Diagnostik över satelliter görs genom att jämföra mätstationernas exakta positioner med den beräknade positionen. Mätstationerna jämför också satelliternas klockor med extremt noggranna lokala klockor. Detta kan sedan användas för att korrigera satellitens klocka, omlopps bana, navigeringsmeddelanden med mera. [2]

### **3.4 Fallstudier över störningar**

Förutom normalt förekommande lokala störningar såsom signalreflektion, sker det ibland större händelser som påverkar satellitbaserad positionsbestämning över stora områden. Här presenteras några störningshändelser samt ett exempel på lyckad spoofing-attack från år 2011.

I maj 2024 utsattes jorden för den största solstormen på tjugo år. Solen är år 2024 nära sitt aktivitetsmaximum på en ungefär elvaårig cykel. Denna solstorm ledde till att en del av den jordbruksutrustning i Nordamerika som använder sig av GPS-signaler förlorade positioneringsförmågan. Tiden för solstormen råkade infalla vid tiden för sådd på många fält. John Deere, en tillverkare av jordbruksutrustning, uppgav att deras äldre enheter påverkades av störningen, men att en del av deras nyare mer avancerade GPS-system med förbättrad antenn och filterteknik fungerade som vanligt under solstormen. [5, 38, 39]

Aktiv signalstörning och spoofing har ökat i Europa. EU:s byrå för luftfartssäkerhet (EASA) har publicerat säkerhetsinformation, som understryker att hotet om störningar är särskilt stort i Östersjön, östra Medelhavet och Svarta havet, Mellanöstern och Arktis. Det gemensamma för dessa områden är att de befinner sig nära militära operationer eller intressen. [4] Detta hot leder i flygindustrin till att flygfält med enbart satellitbaserade landningsprocedurer inte går att använda vid störning. YLE skriver i april 2024 att flygbolaget Finnair tillfälligt avbryter sin reguljärrutt till Dorpat i Estland på grund av störningar som påverkar möjligheten att landa. [40] Även i Finland har flygbolaget Transavia i juli 2024 avbrutit sina flyg till Nyslott på grund av satellitbaserad störning. Man har planerat att flygen tills vidare kunde landa i Helsingfors istället. [41]

Ett annat fenomen som Traficom och USA:s kommunikationsmyndighet (FCC) har

observerat är privata små aktiva signalstörningsenheter som används i fordon. Detta växande problem har främst uppstått som en följd av att förare av arbetsfordon motsätter sig arbetsgivarens övervakning av deras rörelser. I USA har det förekommit att sådana signalstörningsenheter har rört sig tillräckligt nära flygfält för att störa flygtrafiken och flygledningen. [42, 43]

År 2011 skedde det en kapning av en av USA:s militärdrönare. USA:s revisionsmyndighet bekräftar inte direkt vad som hände, men de uppger i en rapport om GPS-hot att Iran hävdar att de har kapat en RQ-170-drönare genom att använda spoofing och aktiv signalstörning, vilket ska ha lett till att drönaren landade på Iransk mark. [31] Nyhetskällor hävdar att förutsägbart beteende hos den obemannade drönaren gjorde att man kunde utnyttja den automatiska landningsfunktionen. Först blockerades drönarens kommunikation med hjälp av aktiv störning, och sedan spoofades GPS-signalerna så att drönaren trodde att den genomförde en trygg landning på egen mark, trots att den de facto befann sig i Irans luftrum. [31, 44, 45]

## 4. Den mänskliga faktorn

Människor blir snabbt vana vid att använda teknologi som förbättrar eller automatiserar manuella uppgifter. Även industrier och företag är ivriga att optimera och effektivera procedurer med hjälp av teknik. Fördelarna med teknik och automation är stora, men i detta kapitel undersöks nackdelar och risker med att lita för mycket på dem. Inom flygindustrin har detta fenomen studerats och dokumenterats grundligt på grund av att positionsbestämning och navigering är centrala för effektivitet och säkerhet och på grund av att moderna flygplan ofta är automatiserade. Man kan anta att flygindustrins studier delvis också gäller andra industrier samt civilpersoners vardagsliv.

### 4.1 Kunskapsförtvining

Om man sällan använder sig av en färdighet, tenderar färdigheten att förtvinas. Detta fenomen kallas för kunskapsförtvining och är ett välstuderat fenomen särskilt inom flygindustrin. [46]

I en metastudie om kunskapsförtvining för personnavigering kunde det konstateras att navigeringsfärdigheter negativt korrelerar med hur ofta personer använder sig av satellitbaserad navigering. Särskilt individens förmåga att skapa mentala kartor av sin omgivning, kunskap om var landmärken är och hur stigar och vägar går tenderar att ha en negativ korrelation med användningen av automatisk navigering. Tack vare modern teknik och fungerande navigationsappar behöver den moderna människan inte använda sig av navigeringsfärdigheter. Det konstateras också att särskilt personer med ett sämre lokalsinne och sämre navigationskunskaper gärna automatiserar bort navigering i sin vardag och därmed inte heller övar upp sina färdigheter. [47]

Inom flygindustrin har studier visat att färdigheten att manuellt styra flygplanet kontinuerligt måste övas för att motarbeta kunskapsförtvining. Moderna passagerarflygplan och deras processer kräver ofta att piloterna använder sig av teknik och automation, bland annat navigeringssystem och autopilot. En yrkespilot som flyger passagerarflygplan övar

därmed sällan att flyga helt manuellt. Detta fenomen påverkar flygsäkerheten negativt, men industrin och myndigheterna är medvetna om risken. [46, 48]

## **4.2 Övertro på teknik**

I ett modernt samhälle med tillförlitliga och exakta satellitbaserade positionsbestämningssystem finns det risk för att man bygger upp rutiner och industrier baserade på att systemen alltid är tillgängliga och pålitliga. Om en person inte har tillgång till satellitbaserad navigering, är det nyttigt att kunna navigera i sin närmiljö med hjälp av skyltar och vägnamn.

I kapitel 3.4 Fallstudier över störningar presenterades exempel på flygfält som man i praktiken inte kan landa passagerarflygplan på, om de satellitbaserade positionsbestämningssystemen inte är tillförlitliga. Utöver dessa exempel går det att räkna upp många andra system som kräver satellitbaserade positionsbestämningssystem för att fungera. Kriminalvårdens fotboja kan vara baserad på satellitbaserad positionsbestämning, likaså vägtullsystem, obemannade fordon, jordbruksautomation och försvaret. [49, 50]

Även om alla dessa system inte är livskritiska, finns det en risk i att designa system som är beroende av en specifik teknik för att fungera. Följderna kan vara ekonomiska eller juridiska.

## **4.3 Informationsöverbelastning**

I system med väldigt mycket information kan det uppstå problem där användaren blir överbelastad av information. Man kan förlora förmågan att se helheter och ta till sig ytterligare information och förmågan att fatta rätt beslut. I ett exempel från flygindustrin kunde man observera att misstag kan ske då helikopterpiloter har instrument med för mycket information [51]. I en nödsituation kan piloter lida av informationsöverbelastning och av sensorisk överbelastning när många olika system samtidigt blinkar och alarmerar med ljud. Detta kan leda till så kallat tunnelseende, där piloten koncentrerar sig på endast ett system, och får svårt att fatta beslut. [52]

## **4.4 Informationsfiltrering och abstraktion av information**

Risken för informationsöverbelastning och sensorisk överbelastning har uppmärksamrats inom flygindustrin, och en följd av detta är att information ofta filtreras och abstraheras. Det

är viktigt att filtrera bort onödig information, så att den relevanta och kritiska informationen verkligen uppmärksammas. [51]

Denna filtrering och abstraktion av information kan i sin tur leda till andra problem. Piloten kan ibland överraskas av åtgärder som sker automatiskt. Detta är potentiellt en farlig situation, och piloten måste kunna vara medveten om alla beslut som fattas i flygplanet och ha möjlighet att reagera korrekt på informationen bakom besluten. Studier har visat att nästan alla piloter någon gång har överraskats av beslut fattade av automatiserade system i flygplan. [53]

## 5. Alternativa positionsbestämningmetoder

Positionsbestämning avser olika metoder för att bestämma position, både globalt och lokalt. Globala positionsbestämningssystem, såsom satellitbaserad positionsbestämning och användning av fysiska kartor, är välkända och används för att bestämma positioner i ett globalt koordinatsystem. Lokal positionsbestämning används däremot för att undvika hinder och bestämma positioner i ett begränsat område. Denna information kan inte i sig användas för att fastställa den globala positionen, men den är avgörande för lokal navigering.

När man jämför positionsbestämningssystem som alternativ till satellitbaserad positionsbestämning, är både lokala och globala positionsbestämningssystem relevanta. Lokal positionsbestämning kan fungera i isolation, till exempel i en robotdammsugare som navigerar ett begränsat område. Lokal positionsbestämning kan också användas i kombination med global positionsbestämning för att skapa mera detaljerad information. Till exempel kan en bil med körfältsassistans (eng. Lane Assist) använda datorseende för att bestämma fordonets position i relation till vägmarkeringarna [54]. Detta kan öka precisionen från några meter till några centimeter, vilket möjliggör säker navigering av fordonet till mitten av körfältet. Den lokala positionsbestämningen kan också användas för att fortsätta navigera när den globala positionsbestämningen är otillgänglig. Om man till exempel förlorar den globala positionsbestämningen i en tunnel, kan man använda den lokala positionsbestämningen i form av stegmätning från början av tunneln och kalkylera en pseudoposition när man kombinerar den lokala positionen och den senaste kända globala positionen.

## 5.1 Radionavigering

Radionavigering, ibland kallad för markbaserad navigering, har länge använts i flygindustrin för att öka säkerheten och precisionen. Markbaserad radionavigering fungerar på låg, medelhög eller väldigt hög frekvens (LF, MF och VHF), och beroende på system kan man bestämma avstånd, relativ riktning eller navigera i en två- eller tredimensionell zon. [55] Det radiobaserade landningssystemet ILS består av två radiostrålar som har en smal överlappning. Endast om flygplanet befinner sig inuti överlappningszonen, och alltså kan ta emot båda signalerna samtidigt, är det i rätt zon. Överlappningen kan vara tvådimensionell eller tredimensionell. Den tredimensionella zonen guidar vanligtvis planet i landningsbanans riktning och i en tre graders sjunkande vinkel för landning [56].

Inom den marina industrin finns det både passiva radarreflektorer och aktiva radarfyrar som kan användas för positionsbestämning. Dessa system ökar precisionen och säkerheten särskilt vid dålig sikt när man navigerar med hjälp av digitala eller fysiska sjökort. [57]

Radiobaserad personnavigering är en teknik som utvecklats särskilt för inomhusnavigering i offentliga byggnader som köpcenter, museer samt tåg- och busstationer. Tekniken kan användas för bland annat säkerhets-, navigerings- och marknadsföringssyften. Radiobaserade positionsbestämningssystem fungerar i regel antingen med lågenergisk bluetoothteknik (BLE) [58] eller wifiteknik [59], men andra lösningar som närfältskommunikation (NFC, från engelskans Near Field Communication) och ljusvågor kan också användas. Det går att bestämma position med hjälp av dessa tekniker baserat på signalstyrka, signalfördröjning och triangulering. Teknikerna och metoderna varierar i räckvidd, signalpenetration, precision, batteriförbrukning och hur svåra de är att implementera. De största utmaningarna för radiobaserad personnavigering finns i interferens, särskilt signalreflektion, och i hur krävande arbetet att implementera och underhålla systemen är. Framtida utveckling och forskning inom positionsbestämning inkluderar utöver dessa tekniker också 5G-teknik och ultra-wideband-teknik (UWB). [60]

## 5.2 Visuell och signalreflektionsbaserad positionsbestämning

Till visuell positionsbestämning hör traditionell navigering med hjälp av topografi, objekt eller stjärnor tillsammans med kartor eller instruktioner. Utöver detta kan man även inkludera automatisk visuell positionsbestämning. Automatisk visuell positionsbestämning avser autonom positionsbestämning som är baserad på datorseende, oftast från kameror. Automatisk visuell positionsbestämning används oftast i kombination med andra positionsbestämnings- eller navigationstekniker. I många moderna bilar används datorseende och en form av visuell navigering för att hålla bilen på rätt körfält på vägen eller för att undvika kollisioner [54]. Denna positionsbestämning fokuserar på bilens omedelbara närhet och förser positionsbestämningssystem med precis och detaljerad information i realtid som integreras med data från flera andra källor.

Till signalreflektionsbaserad positionsbestämning hör radar och ljusradar (LIDAR, från engelskans Light Detection And Ranging). Dessa tekniker använder sig inte av synligt ljus, utan av reflekterade aktiva signaler för att skapa en uppfattning om enhetens omgivning. Både datorseende och signalreflektionssystem kräver jämförelse av sensordata med en positionsbestämningsdatabas för att kunna beräkna position.

Militärteknik har sedan 1970-talet använt sig av höjdskillnader från radarsystem för att navigera kryssningsmissiler på en känd bana. Höjdkartor över den planerade rutten jämförs med data från radar som sedan används för att navigera och för att kalkylera hastighet. Höjdkartor och luftburen radar är en bra metod för navigering, eftersom höjdskillnader kan antas vara statiska och man har en bra översikt från luften. [61]

Datorseende kan genomföra objektigenkänning, djupseende, relativ hastighetsanalys och skapa tredimensionella kartor [62]. De flesta av dessa metoder används för lokal positionsbestämning eller reaktiv navigering (t.ex. kollisionundvikande, parkeringssensor) [62]. Avancerat datorseende är resurskrävande.

## 5.3 Tröghetsnavigering

Tröghetsnavigering (INS, från engelskans Inertial Navigation System) är en navigeringsmetod som använder gyroskop och accelerometrar för att mäta förändringar i position. Magnetiska mätningar kan ibland användas i kombination med INS för att förbättra attitydmätningarna. INS-systemets mätningar av ändring i position i kombination med känd startposition, eller i kombination med global positionsbestämning, används för

att kalkylera aktuell position. Tröghetsnavigering används i flyg- och i marinindustrin, på vägar och järnvägar, inom personnavigering och i militära lösningar. Tröghetsnavigering är också viktigt inom autonoma system och i blandad eller virtuell verklighet. [63] Tröghetsnavigeringssystem är naturligt benägna till felberäkningar eftersom varje ny beräkning baseras på den tidigare. Detta innebär att även väldigt små fel i mätning ackumuleras över tid för varje iterering. Detta fenomen kallas för INS-drift och är en av de största utmaningarna med tröghetsnavigering. [64]

Personnavigering genom tröghetsnavigering patenterades 2006 av Motorola, som beskriver tröghetsnavigering och dess begränsningar i precision, storlek på enheter och pris [65]. Denna grundläggande teknik har sedan utvecklats, och idag är precisionen väldigt hög tack vare förbättrad sensorteknik, ökad processeringsprestanda och avancerad filterteknik [66]. I en studie med tröghetsnavigeringssystem monterade på skor på en person, uppnåddes en låg felmarginal på endast 4 meter över 3100 meters navigering. Fördelen med placering av enheten på skon är att systemet kan kalibrera sig självt varenda gång foten läggs på marken, då man kan utgå ifrån att enheten är helt stilla i relation till marken. Detta motverkar INS-drift och möjliggör för kontinuerlig kalibrering av sensorerna. [64]

## 6. Lösningar

### 6.1 Myndigheternas rekommendationer

Finlands Transport- och kommunikationsverk (Traficom) informerar att flygsäkerheten i Finland fortfarande är hög och att aktörer inom flygindustrin i Finland är förberedda på eventuella störningar. Traficom följer med situationen tillsammans med andra myndigheter, och understryker vikten av att rapportera eventuella störningar. Myndigheterna agerar på störningar inom alla sektorer innanför Finlands gränser men konstaterar att deras befogenheter är begränsade vid avsiktliga störningar som härstammar från utlandet. Traficom påminner om att flygkartor är pålitliga navigationshjälpmedel och att man bör vara förberedd på att använda dem i situationer där satellitbaserad positionsbestämning inte är pålitlig. [67, 68, 69]

Den Europeiska unionens byrå för luftfartssäkerhet (EASA) har publicerat en bulletin med rekommendationer för samtliga aktörer inom flygbranschen, inklusive myndigheter och flygledning. I rekommendationerna påpekas att piloter bör få kontinuerlig utbildning för att kunna reagera effektivt och säkert i en situation med minskad automatisk navigering. [4]

### 6.2 Den mänskliga faktorn

Övertro på teknik kan motarbetas genom att regelbundet använda manuella färdigheter samt att lära sig nya kunskaper och system. Gällande informationsöverbelastning fortsätter forskningen och vidareutveckling av system för att filtrera informationsflödet. [52] En framtida felfri och pålitlig automation kunde eliminera problemen genom att helt frångå mänskliga operatörer.

Inom flygindustrin har EASA konstaterat att regelbunden skolning, simulatorträning och stöd för mental hälsa och välmående är viktiga för att stöda flygsäkerheten [48]. Angående störning av satellitbaserade positionsbestämningssystem rekommenderar EASA utbildning

i relevanta situationer och att piloter ska vara förberedda på att använda sig av alternativa positionsbestämningssystem [4].

## **6.3 Tekniska lösningar mot störning av satellitbaserade positionsbestämningssystem**

Tekniska lösningar för att motverka störning av satellitbaserade positionsbestämningssystem inkluderar både fysiska polarisationsfilter och antennteknik samt algoritmer och mjukvara. Systemomfattande reaktioner på vardaglig störning görs kontinuerligt [2].

### **6.3.1 Jonosfäriska algoritmer**

Ett effektivt sätt att korrigera för störningar orsakade av jonosfären är att använda sig av flera frekvensband och att jämföra deras faser. Detta kan fungera eftersom olika frekvenser påverkas olika mycket och på olika sätt av jonosfäriska fenomen. Satellitbaserade stödsystem (SBAS, från engelskans Satellite-Based Augmentation System) kan också användas för att kompensera för tillfälliga störningar. SBAS innebär att systemet korregerar för fel genom att jämföra precisa positioner av markstationer med systemets beräknade positioner, och laddar sedan upp en korrigeringsalgoritm till satelliterna. Vissa system kan kommunicera direkt med användaren för korrigeringsinformation. [7]

### **6.3.2 Polarisationsfilter**

Man kan motverka signalreflektionsstörning med polarisationsfilter. Eftersom genuina satellitsignaler är högercirkulärt polariserade, och reflektioner speglar denna egenskap och blir vänstercirkulärt polariserade, kan man med ett filter effektivt eliminera signalreflektionsstörningar. Det är svårt att utveckla mjukvarulösningar för detta ändamål, men det har visat sig att användning av särskilt designade antenner som filtrerar bort signaler med fel polarisering är ett effektivt sätt att korrigera för denna sorts störningar. [70, 2]. Sådana filter kunde också användas som försvar mot avsiktliga störningsattacker, om den förfälskade signalen eller det överröstande bruset saknar korrekt polarisering.

### **6.3.3 Kryptering**

Kryptering är ett sätt att försvara sig mot spoofingattacker. Till exempel är den militära komponenten av GPS-system, som upptar en del av både L1 och L2, krypterad. För att kunna spoofa en krypterad signal, måste förövaren generera en modifierad signal som

mottagaren uppfattar som genuin. Det betyder att förövaren i ett krypterat system måste kunna dekryptera signalen, modifiera den, och kryptera den igen. Krypteringen på GPS är ett militärt verktyg och i praktiken är en spoofingattack på militär signal osannolik. [31]

Kryptering kan däremot inte användas som försvar mot upprepningsattacker, eftersom upprepningsattacken endast fördröjer den genuina signalen och inte kräver att signalens innehåll modifieras. [31]

Kryptering kan inte heller användas som försvar mot aktiv signalstörning eller naturliga störningar eftersom dessa källor till störning är oberoende av innehållet i signalen och påverkar hörbarheten eller fördröjningen oberoende av innehåll.

## 7. Sammanfattning

Satellitbaserade positionsbestämningssystem som GPS, Galileo, GLONASS och BeiDou används förutom privat även inom flera industrier såsom flyg, sjöfart och jordbruk. Denna avhandling analyserar de tekniska aspekterna av satellitbaserad positionsbestämning, samt hoten och begränsningarna som finns mot de tidigare nämnda systemen. Här presenteras alternativa positionsbestämningssystem som en lösning vid störningar i de satellitbaserade positionsbestämningssystemen.

Avhandlingen inleds med en teknisk genomgång av satellitbaserade system, samt naturliga och avsiktliga störningar till dessa. Naturliga fenomen, såsom jonosfäriska störningar och signalreflektion, är ofta förekommande källor till störning. Avsiktliga störningar i form av aktiv störning eller spoofing är ett växande fenomen i Europa. Fallstudier över närtida störningshändelser understryker att dessa problem verkligen förekommer, och kan påverka individer och industrier.

Utöver satellitbaserade positionsbestämningssystem finns det andra alternativa positionsbestämningssystem såsom radionavigering, visuell navigering och tröghetsnavigering. Vissa system erbjuder robusta lösningar ifall satellitbaserad positionsbestämning är otillgänglig eller lider av minskad precision, andra system kan komplettera satellitbaserad positionsbestämning. Om man samtidigt kan använda sig av flera positionsbestämningssystem och tekniker, kan man förbättra både prestanda och tillförlitlighet.

I kapitlet om den mänskliga faktorn behandlas risker med att förlita sig för mycket på teknologi. Fenomen som kunskapsförtvinning, informationsöverbelastning och teknologisk övertro kan försämra individers och hela industriernas förmåga att hantera kritiska situationer. Avhandlingen betonar att regelbunden utbildning och användning av manuella navigationsmetoder är viktiga för att säkerställa säkerheten och minska riskerna.

Slutligen ges rekommendationer om tekniska och mänskliga åtgärder för att motverka störningar eller för att kunna fortsätta fungera under störningar. Bland dessa kan nämnas

avancerad filter- och antennteknik, kryptering och skolning av användare samt utveckling av filtrerade användargränssnitt. Vidareutveckling av tekniska system kan vara en lösning på vissa problem, men ett ännu mer avancerat system kan även medföra risker såsom informationsöverbelastning hos användaren samt en ökad teknologisk övertro på individuell och samhällelig nivå.

# Bibliografi

- [1] SpaceFinland: *Satelliittinavigointijärjestelmät*, 2024. <https://spacefinland.fi/satelliittinavigointijarjestelmat>, hämtad: 2024-05-28.
- [2] Kaplan, Elliott D. och Christopher Hegarty (redaktörer): *Understanding GPS/GNSS*. Artech House, 2017.
- [3] Rummukainen: *Katkenut Yhteys*, 2023. <https://yle.fi/a/74-20015375>, hämtad: 2024-04-09.
- [4] European Union Aviation Safety Agency: *2022-02R2 : Global Navigation Satellite System Outage and Alterations Leading to Navigation / Surveillance Degradation*. EASA Safety Information Bulletin, 2023. <https://ad.easa.europa.eu/ad/2022-02R2>.
- [5] The New York Times: *Solar Storm Tractor Break in Nebraska*, 2024. <https://www.nytimes.com/2024/05/13/us/solar-storm-tractor-break-nebraska.html>, hämtad: 2024-08-25.
- [6] European GNSS (Galileo): *Galileo - Open Service - Service Definition Document*. Teknisk rapport, European GNSS (Galileo), 2023. [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD\\_v1.3.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.3.pdf).
- [7] Hexagon (redaktör): *AN INTRODUCTION TO GNSS*. NovAtel, 2010.
- [8] Faruque, Saleh: *Radio Frequency Modulation Made Easy*. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. Springer, 2016.
- [9] Department of Defence: *GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD*, 2020.
- [10] Coordination Scientific Information Center: *GLONASS Interface Control Document*. Teknisk rapport, Coordination Scientific Information Center, Moskva, 1998.

- [11] Sun, FuPing, Shuai Liu, XinHui Zhu och BaoHong Men: *Research and progress of Beidou satellite navigation system*. Science China Information Sciences, 2012. <https://engine.scichina.com/doi/10.1007/s11432-012-4724-2>.
- [12] GPSrchive: *GPS vs GLONASS vs GALILEO System Overview*. <https://www.gpsrchive.com/Shared/Satellites/GPS%20vs%20GLONASS%20vs%20Galileo.html>, hämtad: 2024-07-26.
- [13] China Satellite Navigation Office: *BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard*, 2021. <https://www.beidou.gov.cn>.
- [14] Swaszek, P. F., R. J. Hartnett, K. C. Seals, J. D. Siciliano och R. M. A. Swaszek: *Limits on GNSS Performance at High Latitudes*. I *Proceedings of the 2018 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 2018. [https://digitalcommons.uri.edu/ele\\_facpubs/58](https://digitalcommons.uri.edu/ele_facpubs/58).
- [15] Ilmatieteen laitos: *Magneettikehä - Ilmatieteen laitos*, 2024. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/magneettikeha>, hämtad: 2024-09-15.
- [16] Gibbons, Glen: *Selective Availability: Completely Dead*, 2007. <https://insidengss.com/selective-availability-completely-dead/>, hämtad: 2024-09-04.
- [17] Grier, Peter: *GPS in Peace and War*. Air Force Magazine, april, 1996.
- [18] Missile Technology Control Regime (MTCR): *Missile Technology Control Regime (MTCR) Frequently Asked Questions*, 2023. <https://www.mtcr.info/en/faq>.
- [19] (TEM), MTCR Technical Experts Meeting: *Missile Technology Control Regime (MTCR) Equipment, Software, and Technology Annex*, 2023. <https://www.mtcr.info>.
- [20] National Aeronautics and Space Administration (NASA): *Basics of Space Flight: Chapter 6.1 - The Inverse Square Law*, 2024. <https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter6-1/>, hämtad: 2024-09-16.
- [21] Keysight Technologies: *Inverse Square Law 101 for Engineers*, 2023. <https://www.keysight.com/used/fi/en/knowledge/formulas/inverse-square-law-101-for-engineers>, hämtad: 2024-09-24.
- [22] Cozzens, Tracy: *2 SOPS disposes last GPS IIA satellite after 26 years*, 2020. <https://www.gpsworld.com/2-sops-disposes-last-gps-iaa-satellite-after-26-years/>, hämtad: 2024-06-03.

- [23] The National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing: *GPS.gov control segment*. <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>, hämtad: 2024-06-03.
- [24] Ilmatieteen laitos: *Ionosfääri*. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ionosfaari>, hämtad: 2024-06-04.
- [25] Ilmatieteen laitos: *Avaruusmyrskyt - magneettikehän dynamiikkaa*. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/avaruusmyrskyt>, hämtad: 2024-06-05.
- [26] Sreeja, V.: *Impact and mitigation of space weather effects on GNSS receiver performance*. Geoscience Letters, 2016.
- [27] National Oceanic And Atmospheric Administration National Weather Service: *Analysis determines we are in Solar Cycle 25*. <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle>, hämtad: 2024-06-05.
- [28] Septentrio: *GNSS Interference*, 2020.
- [29] Heidtmann, Bernd: *GNSS Interference*. White paper, 2020.
- [30] European Union Aviation Safety Agency: *Certification memorandum cm-es-004 issue 01: Acceptable methods for aircraft electromagnetic compatibility demonstration*, 2024. hämtad: 2024-09-24.
- [31] U.S. Government Accountability Office: *GPS Alternatives: DOD Is Developing Navigation Systems But Is Not Measuring Overall Progress*, 2022. <https://www.gao.gov/assets/gao-22-106010.pdf>.
- [32] Clark, N. O. och P. W. Ward: *Automatic Jammer Location Techniques*. Teknisk Rapport ADA048575, RCA Missile and Surface Radar Division, 1977. hämtad: 2024-09-04.
- [33] Goward, Dana A.: *Innovation: Recent GPS Jamming in Regions of Geopolitical Conflict*. GPS World, 2023. <https://www.gpsworld.com/innovation-recent-gps-jamming-in-regions-of-geopolitical-conflict/>, hämtad: 2024-09-04.
- [34] Psiaki, Mark L. och Todd E. Humphreys: *GNSS Spoofing and Detection*. Proceedings of the IEEE, 2016.
- [35] NewSpace Economy: *Safeguarding Satellite Ground Stations and Control Centers: A Comprehensive Security Guide*, 2024. <https://newspaceeconomy.ca/2024/06/>

19/safeguarding-satellite-ground-stations-and-control-centers-a-comprehensive-security-guide/, hämtad: 2024-09-04.

- [36] Zhang, Qingzhu, Jun Zhang, Yanbo Zhu och Wei Liu: *Navigation Accuracy Category-Position Models and Estimate Position Uncertainty Calculations for TIS-B System*. Chinese Journal of Aeronautics, 2009.
- [37] Goward, Dana A.: *Protecting GNSS for Safe Aviation*, 2021. <https://insidegnss.com/protecting-gnss-for-safe-aviation/>, hämtad: 2024-09-04.
- [38] European Space Agency: *The May 2024 Solar Storm: Your Questions Answered*, 2024. [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_weather/The\\_May\\_2024\\_solar\\_storm\\_your\\_questions\\_answered](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather/The_May_2024_solar_storm_your_questions_answered), hämtad: 2024-09-16.
- [39] John Deere: *Solar Storm: How Farmers Prepare for the Impact*, 2024. <https://www.deere.com/en/stories/featured/solar-storm/>, hämtad: 2024-09-16.
- [40] Tanskanen, Jari: *Finnair keskeyttää Viron Tarton lennot kuukaudeksi – kentälle rakennetaan GPS-häirinnästä riippumaton lähestymisjärjestelmä*, 2024. <https://yle.fi/a/74-20086197>, hämtad: 2024-09-16.
- [41] Palvaila, Jaakko: *Hollantilainen lentoyhtiö lopettaa lennot Savonlinnaan Venäjän GPS-häirinnän vuoksi*, 2024. <https://yle.fi/a/74-20101442>, hämtad: 2024-09-16.
- [42] Inside GNSS: *FCC Fines Operator of GPS Jammer That Affected Newark Airport GBAS*, 2013. <https://insidegnss.com/fcc-fines-operator-of-gps-jammer-that-affected-newark-airport-gbas/>, hämtad: 2024-09-16.
- [43] Yle: *Finland detects more GPS jammers as drivers increasingly try to hide their tracks*, 2023. <https://yle.fi/a/74-20078739>, hämtad: 2024-09-16.
- [44] SecurityWeek: *Reports Say US Drone Was Hijacked by Iran Through GPS Spoofing*, 2011. <https://www.securityweek.com/reports-say-us-drone-was-hijacked-iran-through-gps-spoofing/>, hämtad: 2024-09-16.
- [45] CBS News: *U.S. Official: Iran Does Have Our Drone*, 2011. <https://www.cbsnews.com/news/us-official-iran-does-have-our-drone/>, hämtad: 2024-09-16.
- [46] Ebbatson, Matt, Don Harris, John Huddlestone och Rodney Sears: *The relationship between manual handling performance and recent flying experience in air transport pilots*. 2024. hämtad: 2024-09-16.

- [47] Miola, Laura, Veronica Muffato, Enrico Sella, Chiara Meneghetti och Francesca Pazzaglia: *GPS use and navigation ability: A systematic review and meta-analysis*. Journal of Environmental Psychology, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2024.102417>.
- [48] EASA Together4Safety: *Safety Issue Report – Skills and Knowledge Degradation due to Lack of Recent Practice, V2.0*, 2021. <https://www.easa.europa.eu/community>, hämtad: 2024-09-16.
- [49] GNSS Canada: *GNSS Applications: What Are the Most Common Uses of GNSS?*, 2024. <https://www.gnss.ca/gnss/1531-applications>, hämtad: 2024-09-16.
- [50] Azaola, Miguel: *Liability-Critical Applications: Integrity and Interoperability for GNSS Positioning*, 2010.
- [51] Federal Aviation Administration: *Avoiding Information Overload*, 2023. <https://medium.com/faa/avoiding-information-overload-e680ca6c04df>, hämtad: 2024-09-16.
- [52] Flight Safety Foundation: *Attention on Deck*, 2020. <https://flightsafety.org/asw-article/attention%E2%80%89on-deck/>, hämtad: 2024-09-16.
- [53] Hurts, Karel och Robert J. de Boer: *What is it doing now? Results of a Survey into Automation Surprise*. 2014. <https://www.researchgate.net/publication/265750563>, hämtad: 2024-09-16.
- [54] Javaid, Shehmir: *Computer vision in automotive industry: Applications and trends*, 2023. <https://research.aimultiple.com/computer-vision-automotive/>, hämtad: 2024-09-24.
- [55] Federal Aviation Administration: *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, faa-h-8083-25c utgåva, 2023. <https://www.faa.gov>.
- [56] SKYlibrary: *Instrument Landing System(ILS)*. <https://skybrary.aero/articles/instrument-landing-system-ils>, hämtad: 2024-08-31.
- [57] Trafikledsverket: *Radionavigationstjänster*. <https://vayla.fi/sv/tjansteproducenter/yrkessjofart/att-fardas-i-farleder/radionavigationstjanster>, hämtad: 2024-08-31.
- [58] Janani, K., S. Hema, G. Rudhra och Vijaya R. J. Saraswathi: *Indoor Navigation and Location-Based Narration System using Bluetooth Low Energy (BLE) Beacons*.

International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET), 2017.

- [59] Kotaru, Manikanta, Kiran Joshi, Dinesh Bharadia och Sachin Katti: *SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi*. I *Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, 2015.
- [60] Subedi, Santosh och Jae Young Pyun: *A Survey of Smartphone-Based Indoor Positioning System Using RF-Based Wireless Technologies*. Sensors, 2020.
- [61] Ekütekın, Vedat: *Navigation and Control Studies on Cruise Missiles*. doktorsavhandling, The Middle East Technical University, 2004.
- [62] López, Antonio M., Atsushi Imiya, Tomas Pajdla och Jose M. Álvarez: *Computer Vision in Vehicle Technology: Land, Sea, and Air*. John Wiley & Sons, 2017, ISBN 9781118868072.
- [63] Thorland, Jon: *What Is An Inertial Navigation System?* <https://aerospace.honeywell.com/us/en/about-us/blogs/what-is-an-inertial-navigation-system>, hämtad: 2024-08-26.
- [64] Guo, Qingbo, William Deng, Ozkan Bebek, Cenk Cavusoglu, Carlos Mastrangelo och Darrin Young: *Personal inertial navigation system employing MEMS wearable ground reaction sensor array and interface ASIC achieving a position accuracy of 5.5m over 3km walking distance without GPS*. I *2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. IEEE, 2018.
- [65] Swope, Charles B. och Daniel A. Tealdi: *Method and System for Personal Inertial Navigation Measurements*, 2007. <https://patents.google.com/patent/US7280936B1/en>, patent US7280936B1.
- [66] Zhang, Mengde, Kailong Li, Baiqing Hu och Chunjian Meng: *Comparison of Kalman Filters for Inertial Integrated Navigation*. Sensors, 2019.
- [67] Traficom: *GPS-häiriöihin varauduttu ilmailussa – Suomeen ja Suomessa turvallista lentää*, 2024. <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/gps-hairioihin-varauduttu-ilmailussa-suomeen-ja-suomessa-turvallista-lentaa>, hämtad: 2024-09-16.
- [68] Traficom: *Satelliittinavigoinnin häiriöiden havaintokyky Suomessa hyvä*, 2024. <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/satelliittinavigoinnin-hairioiden-havaintokyky-suomessa-hyva>, hämtad: 2024-09-16.

- [69] Traficom: *Ilmailukartta – luotettava navigointiapu yleis- ja harrasteilmailijalle GPS-häiriöiden varalle*, 2024. <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/ilmailukartta-luotettava-navigointiapu-yleis-ja-harrasteilmailijalle-gps>, hämtad: 2024-09-16.
- [70] Khosravi, Farhad, Hamid Moghadas och Pedram Mousavi: *A GNSS Antenna With a Polarization Selective Surface for the Mitigation of Low-Angle Multipath Interference*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7286786>.