



Analys av multi-GNSS med GPS och Galileo under påverkan av flervägsutbredning

NIKLAS STENBERG, ERIK AXELL, TORE LINDGREN

Niklas Stenberg, Erik Axell, Tore Lindgren

Analys av multi-GNSS med GPS och Galileo under påverkan av flervägsutbredning

Titel	Analys av multi-GNSS med GPS och Galileo under påverkan av flervägsutbredning
Title	Analysis of multi-GNSS with GPS and Galileo in multipath environments
Rapportnr/Report no	FOI-R--4892--SE
Månad/Month	Januari
Utgivningsår/Year	2020
Antal sidor/Pages	30
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	Ledning och MSI
Projektnr/Project no	E72784
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

I denna rapport undersöks fördelarna med användning av multi-GNSS i miljöer med flervägsutbredning. Med multi-GNSS avses i detta arbete utnyttjande av flera satellitkonstellationer med olika typer av signaler på flera frekvensband. Den huvudsakliga frågeställningen är att studera hur tillgänglighet och noggrannhet i positionsbestämning kan förbättras genom samtidigt nyttjande av flera GNSS. Detta arbete fokuserar på satellitnavigeringssystemen GPS och Galileo. Studien baseras på simuleringar av de olika signaltyperna och satellitkonstellationerna, samt tester med en hårdvarusimulator och två befintliga mottagare, där den ena motsvarar en massmarknadsmottagare och den andra en professionell högpresterande mottagare.

Två mottagare med förmåga att använda både GPS och Galileo utvärderades. En av mottagarna har dessutom förmåga att använda två frekvensband samtidigt. Mottagartesterna visar att kombinationen av GPS och Galileo inte alltid ger mindre positionsfel än konstellationerna var för sig i befintliga mottagare. Att kombinera mätningar från både GPS och Galileo kan teoretiskt göras så att positionslösningen för kombinationen av konstellationer ger mindre fel än för de enskilda konstellationerna. Testerna visar dock att så inte alltid görs i befintliga mottagare.

Utvärderingarna visar att prestanda skiljer mellan mottagare. Det var därför inte möjligt att, med befintliga mottagare, utvärdera skillnaden i prestanda mellan olika signaltyper vad gäller deras robusthet mot exempelvis flervägsutbredning. Teoretiska utvärderingar visar dock att de nya GPS- och Galileo-signalerna är mer robusta mot flervägsutbredning än äldre signaler.

Kombinationen av GPS och Galileo gör att fler satelliter är tillgängliga vilket främst är av nytta i scenarier med svår flervägsutbredning och blockering av signaler p.g.a. exempelvis närliggande byggnader. I sådana situationer kan en kombination av flera GNSS vara nödvändig för att bestämma en position. Utvärderingar av grundkonstellationerna för GPS och Galileo visar att Galileo har något bättre prestanda i Sverige och dess närområde vad gäller satellitgeometrierna och antalet synliga satelliter. Med nuvarande operativa konstellationer är dock prestandan bättre med den fulla GPS-konstellationen, eftersom Galileo ännu inte är fullt utbyggt.

Nyckelord: multi-GNSS, flervägsutbredning, GPS, Galileo

Summary

In this report, the advantage of using multi-constellation GNSS-receivers in multipath environments is investigated. Multi GNSS in this work refers to the use of multiple satellite constellations with different types of signal on multiple frequency bands. The main objective is to study how the availability and accuracy of the position solution can be improved by simultaneous use of multiple GNSS. This work focuses on the GPS and Galileo satellite navigation systems. The study is based on simulations of the different types of signal and satellite constellations, and tests using a hardware simulator and two existing receivers. One of the receivers is a mass-market type of receiver and the other is a professional grade receiver.

Two receivers with the ability to use both GPS and Galileo were evaluated. One of the receivers also has the ability to use two frequency bands simultaneously. The receiver tests show that the combination of GPS and Galileo do not always provide smaller position error than using the constellations individually. Combining measurements from both GPS and Galileo can theoretically be made in such a way that the position error for the combination is smaller than for the separate constellations. However, tests show that the measurements are not combined that way.

Evaluations of different types of signal and constellations show that the performance may vary between receivers. Therefore, it was not possible, with existing receivers, to evaluate the variations in performance between different types of signal regarding their robustness to, for example, multipath propagation. However, theoretical evaluations show that the new GPS and Galileo signal types are more robust towards multipath propagation than the older signals.

The combination of GPS and Galileo provides the availability of a larger number of satellites, which has the greatest advantage in scenarios with multipath propagation and signal blockage due to, for example, nearby buildings. In such situations, a combination of multiple GNSS could be necessary for determining a position. Evaluations of the basic constellations of GPS and Galileo show that Galileo has slightly better performance in Sweden and its neighbourhood in terms of satellite geometries and the number of visible satellites. With the current operational satellites, however, the performance is better with the full GPS constellation, since the Galileo constellation is not complete.

Keywords: multi-GNSS, multipath propagation, GPS, Galileo

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Simulering av flervägsutbredning i Matlab	8
2.1	Simuleringsmodell	8
2.2	Effekten av flervägsutbredning	10
3	Jämförelse av GPS- och Galileo-konstellationerna	15
3.1	Utvärdering av GDOP och antal synliga satelliter för GPS och Galileo över Sverige	15
3.1.1	Grundkonstellationerna	15
3.1.2	Grundkonstellationen jämfört med den fulla konstellationen för GPS	17
4	Utvärdering av flervägsutbredning med mottagare	19
4.1	Simulering och inspelning	19
4.2	Modell för flervägsutbredning	20
4.3	Resultat från mottagartester	21
4.3.1	Ingen flervägsutbredning (referensfall)	22
4.3.2	Flervägsutbredning	23
4.3.3	Flervägsutbredning och blockering av byggnad	25
5	Slutsatser	29
6	Referenser	30

1 Inledning

I denna rapport undersöks fördelar med användning av multi-GNSS i miljöer med flervägsutbredning. Med multi-GNSS avses i detta arbete användningen av flera satellitkonstellationer med olika typer av signaler på ett eller flera frekvensband. Syftet med arbetet är att studera noggrannheten i positionsbestämning genom nyttjande av olika kombinationer av satellitkonstellationer och signaltyper hos flera GNSS. Detta arbete fokuserar på de öppna (okrypterade) signalerna för satellitnavigeringssystemen GPS och Galileo. De delfrågeställningar som studeras är följande:

- Vilken noggrannhet kan förväntas i miljöer med flervägsutbredning vid utnyttjande av de olika typerna av signaler, och kombinationer av dem, hos GPS och Galileo?
- Hur påverkas noggrannheten och möjligheten till positionsbestämning av att nyttja satelliter i GPS, Galileo eller kombinationen av dem i miljöer med flervägsutbredning och signalblockering?
- Vilken noggrannhet kan förväntas på nordliga breddgrader (i Sverige) av att nyttja satelliter i GPS och Galileo, samt en kombination av dem?

Studien baseras på teoretiska simuleringar av de olika signaltyperna och satellitkonstellationerna, samt tester med hårdvarusimulator och två befintliga mottagare. Det pågår en snabb utveckling av nya satelliter och signaler i flera GNSS. Tidigare har det mesta fokus varit på användning av GPS, men även det europeiska systemet Galileo är under uppbyggnad och förväntas vara fullt operativt 2020. Även det ryska systemet Glonass är fullt utbyggt och det kinesiska systemet BeiDou är under snabb uppbyggnad. Befintliga GNSS moderniseras genom införande av ett flertal nya signaler. Utvecklingen går alltså mot ett betydligt större antal satelliter och ett större antal signaler på olika frekvenser [1].

Fler satelliter förväntas öka tillgängligheten och noggrannheten i positionsbestämningen, speciellt i stadsmiljöer som präglas av flervägsutbredning och blockering av signalerna p.g.a. närliggande höga byggnader. Att teoretiska prestandavinster kan förväntas av att nyttja nya typer av signaler och flera satelliter innebär inte per automatik att dessa vinster visar sig även i befintliga mottagare. I praktiken är det inte självklart att mätningar från både GPS och Galileo kombineras så att felet blir mindre än för de enskilda systemen. Därför har även två typer av befintliga mottagare, med förmåga att använda både GPS och Galileo, utvärderats. En av mottagarna har dessutom förmåga att använda två frekvensband.

2 Simulering av flervägsutbredning i Matlab

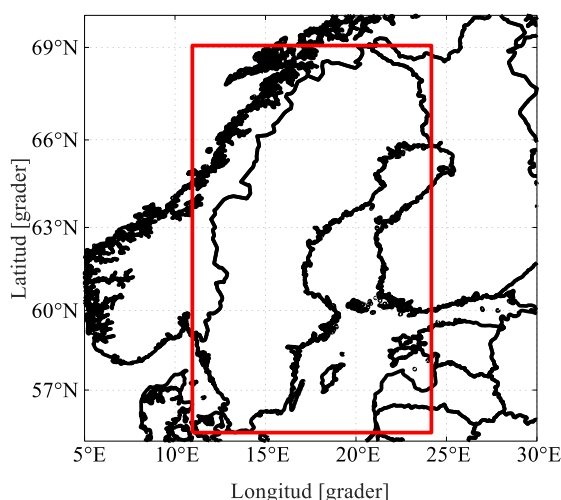
I detta kapitel beskrivs resultatet från simuleringar av hur en GNSS mottagare påverkas av flervägsutbredning för ett antal olika signaler från GPS- och Galileo-satelliter.

Simuleringarna är gjorda i Matlab och beskrivs i avsnitt 2.1, och resultatet presenteras i avsnitt 2.2. Syftet med simuleringarna är att jämföra prestandan med avseende på val av signaler och typ av kombination av konstellationer för en multi-GNSS mottagare i ett scenario med flervägsutbredning.

2.1 Simuleringsmodell

Simuleringarna har gjorts i Matlab där den simulator som beskrivs i [2] har använts för att generera pseudoavstånden från satelliterna i GPS- och Galileo-systemen. De nominella grundkonstellationerna för GPS- och Galileo-systemen har antagits och beräkningen av satellitpositionerna har gjorts för en slumpmässig tid. Banparametrarna för den nominella GPS konstellationen bestående av 24 satelliter är hämtade från [3]. Den nominella grundkonstellationen för Galileo består också av 24 satelliter och deras banparametrar är hämtade från [4]. I de simuleringar som är gjorda har analytiska uttryck för autokorrelationerna för de olika signalerna använts, d.v.s. *acquisition*-steget som i praktiken utförs i en mottagare har inte simulerats. Dessa analytiska uttryck finns givna i [1]. Då syftet med dessa simuleringar har varit att studera effekten av flervägsutbredning har samtliga andra felkällor, inklusive termiskt brus, försummats.

GNSS-mottagaren har antagits befinna sig på en slumpmässig position mellan latituderna 55.3369° och 69.06° och longituderna 10.9575° och 24.1667° (d.v.s. i Sverige och dess närhet). I figur 1 visas det aktuella området. På denna position har det antagits att det finns en oändligt lång gata i en slumpmässig riktning flankerad av byggnader på båda sidor (*urban canyon*). Mottagaren antas befinna sig mitt i gatan som är 30m bred och byggnaderna antas vara 10m höga. Byggnaderna blockerar satelliter med låg elevation i vissa riktningar och dessa inkluderas inte i positionslösningen. Dessutom tas satelliter med elevationsvinkel under fem grader inte med i positionslösningen. Pseudoavstånden till de återstående satelliterna får en flervägsutbredningskomponent med slumpmässig fördröjning mellan 0 och 30m. Denna komponent antas ha 25 % av energin (6 dB lägre effekt) jämfört med direktkomponenten.



Figur 1. Det område som mottagaren antagits befinna sig i.

De signaler som har studerats är:

- GPS L1C/A
- GPS L1P
- GPS L1C Pilot
- GPS L1M
- Galileo E1OS Pilot
- Galileo E1PRS.

I figur 2 presenteras autokorrelationen för de signaler som har studerats i detta kapitel. Uttrycken för dessa autokorrelationer beskrivs i detalj i [5]. Följning (*tracking*) med en fördröjningsloop (*delay lock loop*) har simulerats genom att placera ut *early*-, *late*- och *prompt*-korrelatorer på sådana avstånd att amplituden i *early*- och *late*-korrelatorerna motsvarar 75 % av amplituden i *prompt*-korrelatorn i fallet utan flervägsutbredning. För en detaljerad genomgång av fölning, se t.ex. [6]. Flervägsutbredningskomponenten adderas till den direkta signalen och orsakar då ett fel i det uppskattade pseudoavståndet till satelliten som kan vara positivt eller negativt. Storleken på felet beräknas genom att jämföra amplituden på *early*-korrelatorn med amplituden på *late*-korrelatorn och på så sätt bestämma hur mycket pseudoavståndet måste justeras för att *early*- och *late*-korrelatorerna ska få samma amplitud.

Det positionsfel som orsakas av flervägsutbredning kommer att bero på både hur många satelliter som är tillgängliga och hur dessa är utspridda. Om fler än ett GNSS används finns olika metoder för att kombinera dessa. De tre huvudsakliga metoderna presenteras nedan för fallet då en kombination av GPS och Galileo används.

Den enklaste lösningen innebär att en position beräknas för de två systemen var för sig och sedan kombineras på något sätt. Positionen ges av lösningen till ekvationen

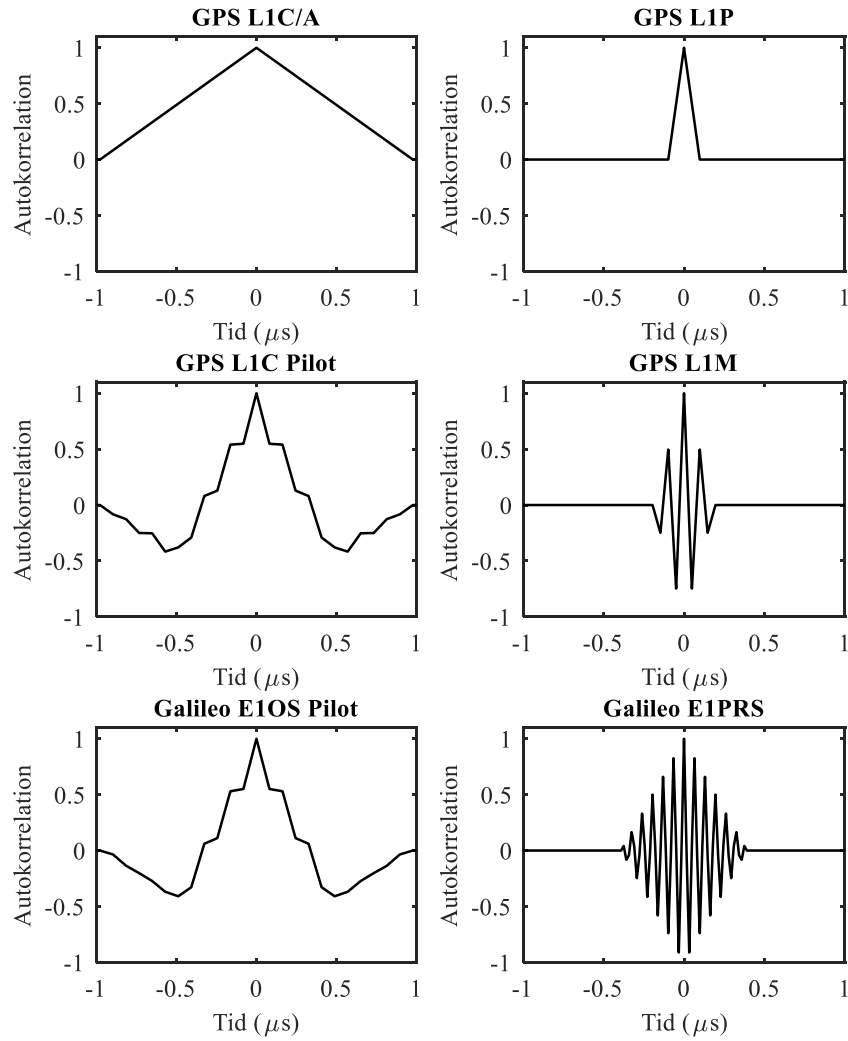
$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_1 & 1 \\ \hat{\rho}_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{\rho}_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \delta t \end{bmatrix} \quad (1)$$

där R_1 är pseudoavståndet till satellit 1, $\hat{\rho}_1$ är riktningen från den uppskattade positionen som ges av x , y och z och δt är mottagarens klockfel. Ekvation (1) löses iterativt för GPS och Galileo var för sig. I denna studie väljs sedan den lösning med mest fördelaktig geometri baserat på GDOP-värdet (*geometric dilution of precision*, som skall vara så lågt som möjligt, se [6]). I detta fall behövs åtminstone fyra tillgängliga satelliter från något av systemen.

Pseudoavstånden från GPS och Galileo-systemen kan även användas i en gemensam lösning. Om den relativa klockdriften mellan de två systemen inte är känd ges positionen av lösningen till

$$\begin{bmatrix} R_{GPS,1} \\ R_{GPS,2} \\ \vdots \\ R_{GPS,n} \\ R_{Galileo,1} \\ R_{Galileo,2} \\ \vdots \\ R_{Galileo,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{GPS,1} & 1 & 0 \\ \hat{\rho}_{GPS,2} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{\rho}_{GPS,n} & 1 & 0 \\ \hat{\rho}_{Galileo,1} & 0 & 1 \\ \hat{\rho}_{Galileo,2} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{\rho}_{Galileo,n} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \delta t_{GPS} \\ \delta t_{Galileo} \end{bmatrix} \quad (2)$$

där δt_{GPS} är klockfelet relativt GPS och $\delta t_{Galileo}$ är klockfelet relativt Galileo. I detta fall behövs minst en tillgänglig satellit från vardera system och minst fem tillgängliga satelliter totalt.



Figur 2: Autokorrelation för de studerade GNSS-signalerna.

Om den relativa klockdriften mellan de två systemen är känd försvinner en okänd term från (2) och positionen ges istället av lösningen till

$$\begin{bmatrix} R_{GPS,1} \\ R_{GPS,2} \\ \vdots \\ R_{GPS,n} \\ R_{Galileo,1} \\ R_{Galileo,2} \\ \vdots \\ R_{Galileo,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{GPS,1} & 1 \\ \hat{\rho}_{GPS,2} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{\rho}_{GPS,n} & 1 \\ \hat{\rho}_{Galileo,1} & 1 \\ \hat{\rho}_{Galileo,2} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{\rho}_{Galileo,n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \delta t \end{bmatrix}. \quad (3)$$

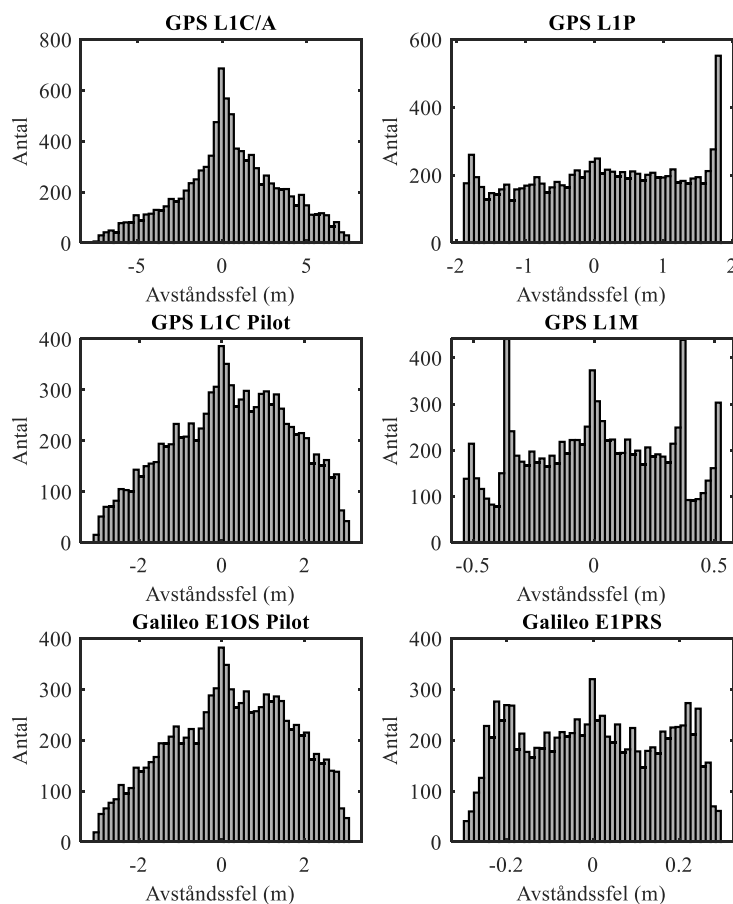
I detta fall behövs totalt fyra tillgängliga satelliter från de två systemen tillsammans. För samtliga lösningar (1)-(3) har pseudoavstånden för de olika signalerna viktats lika.

2.2 Effekten av flervägsutbredning

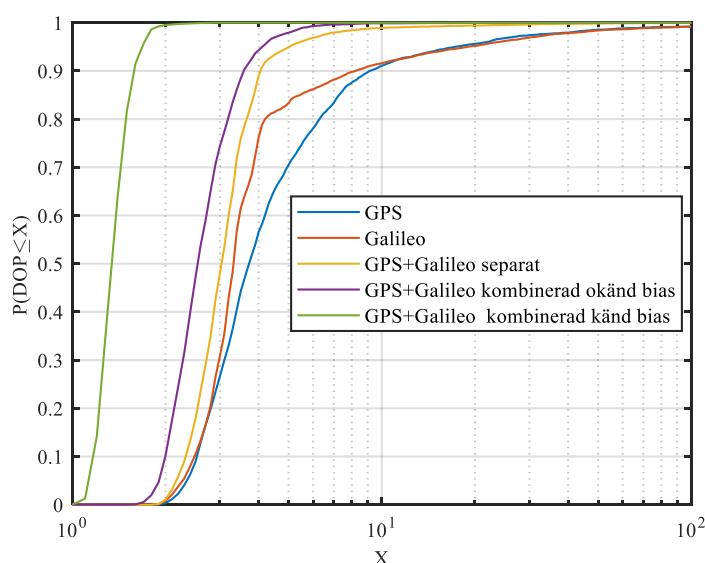
Nedan följer en utvärdering av avståndsfel, GDOP och positionsfel med ovanstående simuleringsmodell gjord med 10000 simuleringar. I figur 3 visas avståndsfelet för de

signaler och den modell som presenteras i avsnitt 2.1. Notera de olika skalorna på x-axeln för de olika signalerna. Det är tydligt att de moderniserade civila signalerna (GPS L1C Pilot och Galileo E1OS Pilot) är mer robusta mot flervägsutbredning än den mest använda civila GPS-signalen (GPS L1C/A). Samma sak gäller för de militära signalerna där M-koden (GPS L1M) har betydligt bättre prestanda än P-koden (GPS L1P). Bäst prestanda har i detta fall PRS-signalen (Galileo E1PRS). Skillnad i prestanda beror på signalerna modulation och bandbredd. Några av dessa huvudsakliga signalegenskaper ges i [1].

I figur 4 visas sannolikheten att GDOP är lägre eller lika med ett givet värde i det scenario som beskrivs i avsnitt 2.1. *Separat* innebär att positionen beräknas för de två systemen var för sig och att den med lägsta GDOP väljs, se ekvation (1). *Kombinerad okänd bias* innebär lösning av ekvation (2) och *kombinerad känd bias* innebär lösning av ekvation (3). Prestandan för enbart Galileo är i detta fall bättre än för enbart GPS vilket beror på att konstellationen för Galileo är optimerad för god prestanda vid högre latituder jämfört med GPS. Att kombinera GPS och Galileo ger i samtliga fall bättre prestanda än att endast använda ett system vilket beror på att fler satelliter finns tillgängliga. Bäst prestanda fås med en kombinerad lösning av GPS och Galileo där tidsskillnaden mellan systemen är känd. Denna lösning har i detta fall ett GDOP-värde på högst 2 med 99,5 % sannolikhet i det aktuella scenariot.



Figur 3: Avståndssfelet p.g.a. flervägsutbredning för de signaler och den modell som presenteras i avsnitt 2.1.



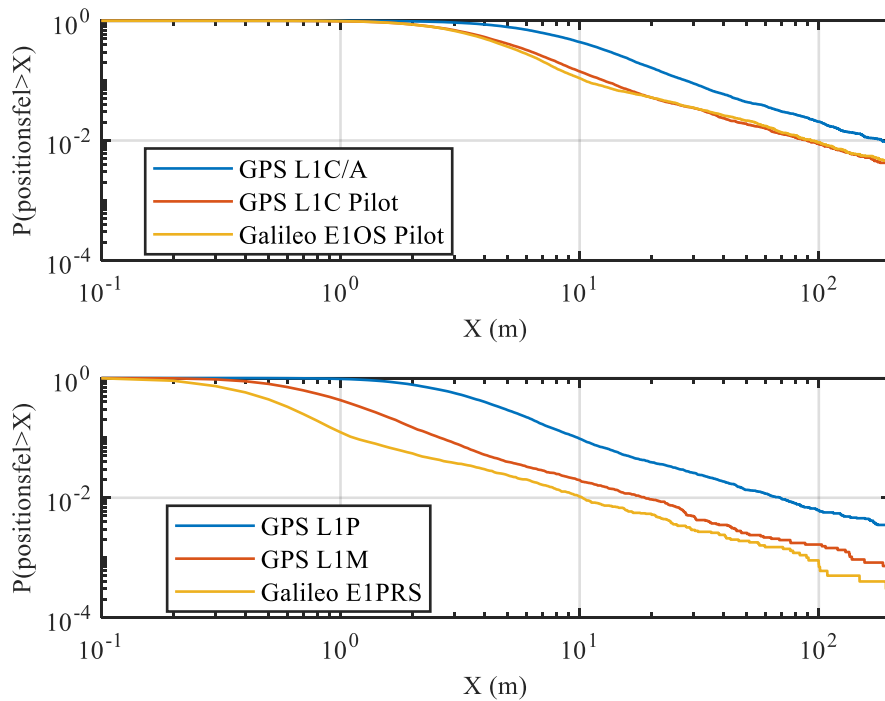
Figur 4: GDOP för positionslösningar med GPS och Galileo. *Separat* innebär att positionen beräknas för de två systemen var för sig och att den med lägst GDOP väljs, se ekvation (1), *kombinerad okänd bias* innebär lösning av ekvation (2) och *kombinerad känd bias* innebär lösning av ekvation (3).

Sannolikheten för att positionsfelet orsakat av flervägsutbredning överstiger ett givet värde för olika signaler och kombinationer av signaler visas i figur 5 - figur 7. I figur 5, där positionsfelet för de enskilda signalerna visas, syns att de moderniserade signalerna ger betydligt bättre prestanda än de äldre GPS-signalerna. Detta gäller både för GPS och Galileo och såväl de civila som de militära signalerna.

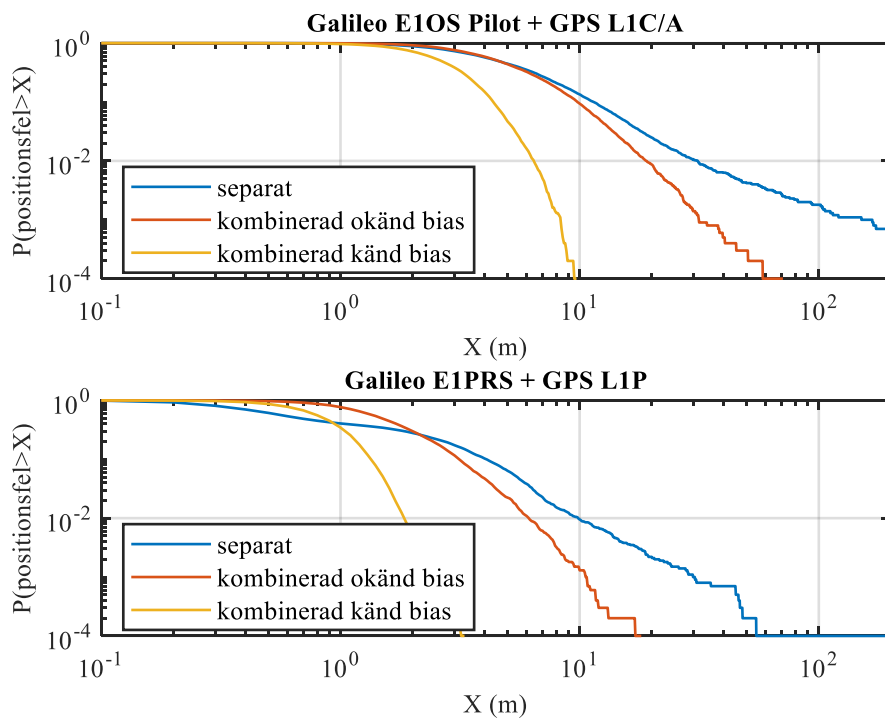
Av intresse är att mottagarens positionsfel ska vara så litet som möjligt. Det innebär i det scenario som studeras här att risken för stora positionsfel skall vara så låg som möjligt. En jämförelse mellan figur 5, där prestandan för de enskilda signalerna visas, och figur 6 och figur 7, där prestandan för kombinationer av olika signaler visas, tyder på att en dramatisk minskning av risken för stora positionsfel kan förväntas när GPS och Galileo kombineras. Särskilt de kombinerade positionslösningarna på formen i ekvation (2) och (3) i avsnitt 2.1 minskar risken för stora positionsfel.

Även om absolut bäst prestanda och robusthet fås genom att kombinera GPS L1M med Galileo E1PRS sker den största förbättringen genom att använda både GPS och Galileo i positionslösningen, och då helst på formen i ekvation (2) och (3) eller motsvarande. Detta är tydligt eftersom risken för stora positionsfel är lägre vid kombinerad positionslösning med de civila smalbandiga signalerna GPS L1C/A och Galileo E1OS (se figur 6) än med endast Galileo E1PRS som är den signal som enskilt ger bäst prestanda (se figur 5). Vilka signaler som används bör istället bestämmas utifrån andra kriterier som typ av tillämpning och robusthet mot t.ex. störning och vilseledning.

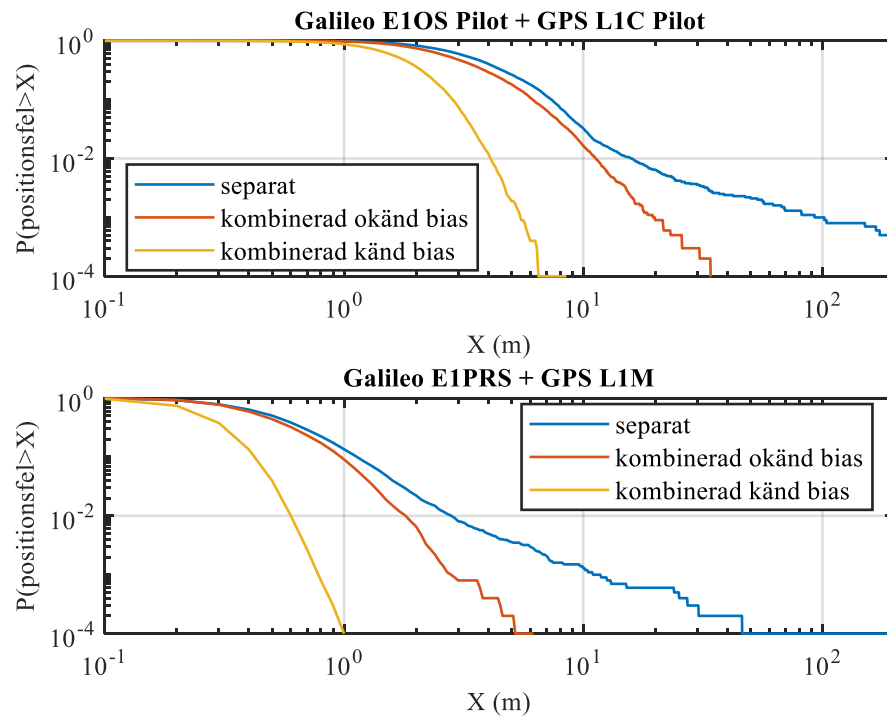
Notera att kombinationen av Galileo E1PRS och GPS L1P som beräknats enligt alternativet *separat* blir bättre för små positionsfel, vilket ses i figur 6, än de andra två alternativen. Det kan bero på att pseudoavstånden från de två systemet viktas lika samtidigt som avståndsfelen med GPS L1P är större än avståndsfelen med Galileo E1PRS, vilket ses i figur 3.



Figur 5: Sannolikheten för att positionsfelet orsakat av flervägsutbredning överstiger ett givet värde för olika signaler. Endast ett GNSS (GPS eller Galileo) används i detta fall.



Figur 6: Sannolikheten för att positionsfelet orsakat av flervägsutbredning överstiger ett givet värde för olika kombinationer av signaler. *Separat* innebär att positionen beräknas för de två systemen var för sig och att den med lägsta GDOP väljs, se ekvation (1), *kombinerad okänd bias* innebär lösning av ekvation (2) och *kombinerad känd bias* innebär lösning av ekvation (3).



Figur 7: Sannolikheten för att positionsfelet orsakat av flervägsutbredning överstiger ett givet värde för olika kombinationer av signaler. *Separat* innebär att positionen beräknas för de två systemen var för sig och att den med lägsta DOP väljs, se ekvation (1), *kombinerad okänd bias* innebär lösning av ekvation (2) och *kombinerad känd bias* innebär lösning av ekvation (3).

3 Jämförelse av GPS- och Galileo-konstellationerna

Nedan följer en jämförelse av GPS och Galileo med avseende på antalet satelliter som är synliga samt DOP-värden för konstellationerna.

3.1 Utvärdering av GDOP och antal synliga satelliter för GPS och Galileo över Sverige

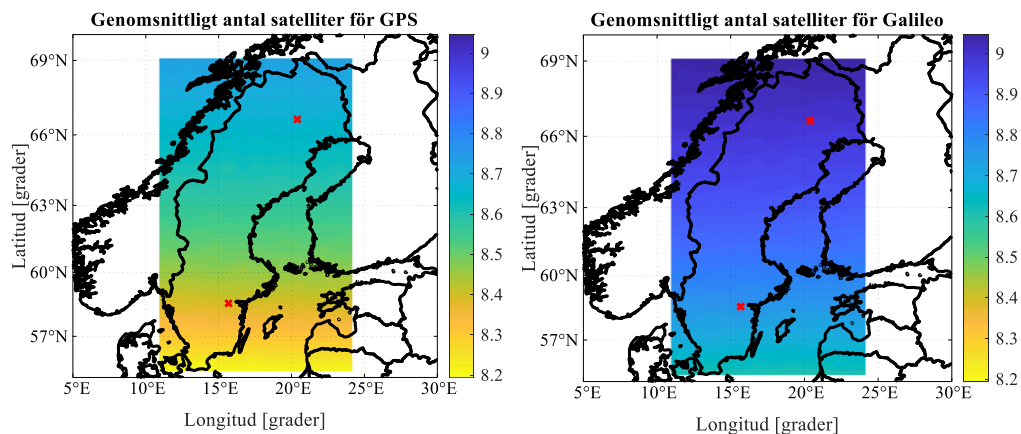
Antalet satelliter som är synliga samt GDOP har utvärderats med den Matlab-simulator som beskrevs i avsnitt 2.1 och med samma latitud- och longitudgränser. Utvärderingarna gjordes över en grid bestående av 35x15 rutor (latitud x longitud) över 24 timmar i steg om en minut. En elevationsmask på fem grader användes. En sammanfattning av resultaten visas i tabell 1 för två valda punkter som markeras i kommande figurer.

Tabell 1. Genomsnittligt GDOP och genomsnittligt antal satelliter över 24 timmar för två positioner utvärderat för GPS med 24 respektive 32 satelliter i konstellationen, samt för Galileo med 24 satelliter i konstellationen. Antal satelliter i konstellationerna anges inom parentes.

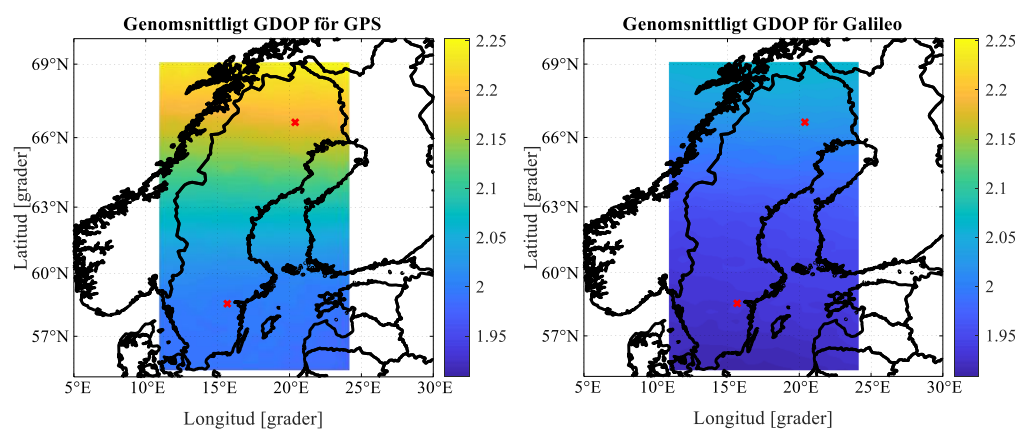
Konstellation(-er)	N 58,5659° E 15,6751° (nära Linköping)		N 66,6383° E 20,3926° (nära Jokkmokk)	
	Genomsnittligt GDOP	Genomsnittligt antal satelliter	Genomsnittligt GDOP	Genomsnittligt antal satelliter
GPS (24)	2,00	8,39	2,19	8,67
Galileo (24)	1,93	8,76	2,02	8,99
GPS (24) + Galileo (24)	1,46	17,15	1,56	17,66
GPS (32)	1,75	11,24	1,87	11,57

3.1.1 Grundkonstellationerna

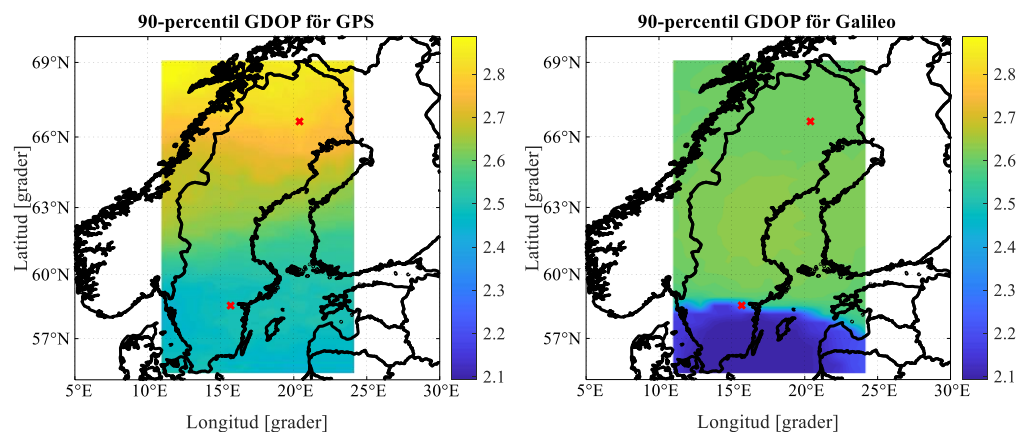
I detta avsnitt utvärderas grundkonstellationerna för GPS och Galileo som båda består av 24 satelliter. Samma banparametrar som användes i kapitel 2 används här. Genomsnittligt antal satelliter som är synliga över 24 timmar för GPS och Galileo visas i figur 8. Det är i genomsnitt fler synliga satelliter över Sverige med Galileo än med GPS. Det beror troligen på att satellitbanorna för Galileo är planerade för att ha bättre täckning för nordliga breddgrader jämfört med GPS, som tidigare nämnts. Detta medför att GDOP är bättre för Galileo jämfört med GPS, vilket bland annat ses i figur 9 som visar genomsnittligt GDOP utvärderat över 24 timmar. Notera dock att skillnaden inte är stor. I figur 10 visas 90-percentilerna av GDOP för GPS (vänster) respektive Galileo (höger). Den figuren visar också att satellitkonstellationen för Galileo har något bättre prestanda över Sverige jämfört med GPS.



Figur 8. Genomsnittligt antal satelliter som är synliga för GPS (vänster) och Galileo (höger) utvärderat över 24 timmar.

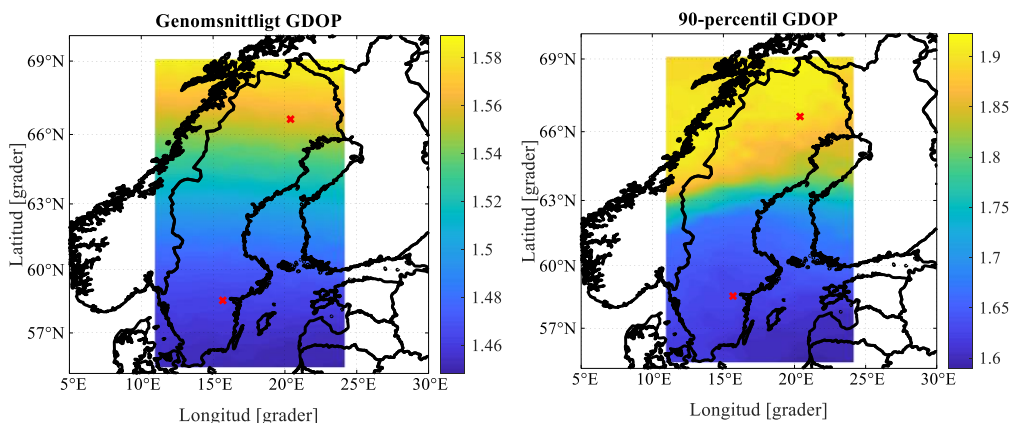


Figur 9. Genomsnittligt GDOP för GPS (vänster) och Galileo (höger) utvärderat över 24 timmar.



Figur 10. 90-percentil för GDOP utvärderat för GPS (vänster) och Galileo (höger) över 24 timmar.

Om GPS och Galileo kombineras, vilket främst är av intresse, kommer antalet synliga satelliter närmast dubblas. Det gör att även GDOP förbättras vilket ses i figur 11 som visar genomsnittligt GDOP respektive 90-percentilen för GDOP, för kombinationen av GPS och Galileo. GDOP är beräknat för fallet då pseudoavstånden används i en gemensam lösning och den relativa klockdriften mellan systemen inte är känd, se avsnitt 2.1.



Figur 11. Genomsnittligt GDOP (vänster) och 90-percentil för GDOP (höger) utvärderat över 24 timmar för kombinationen av GPS och Galileo.

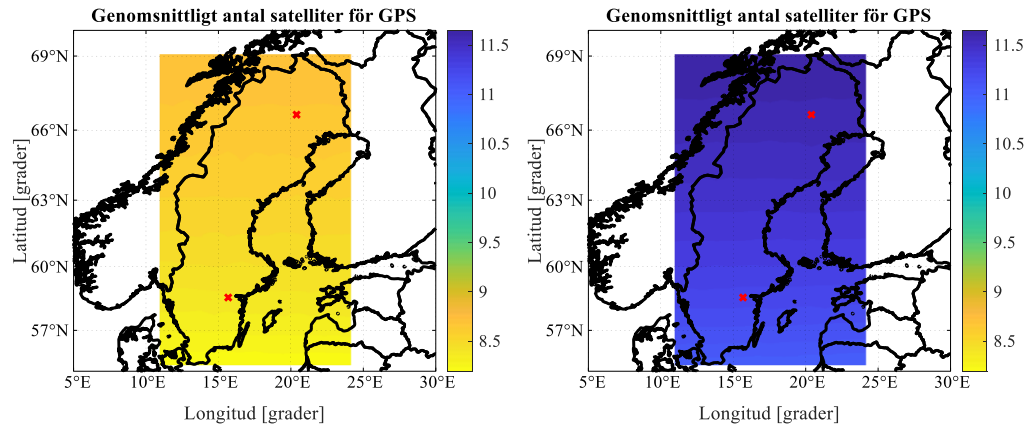
3.1.2 Grundkonstellationen jämfört med den fulla konstellationen för GPS

Grundkonstellation för GPS består av 24 satelliter, men GPS har i praktiken fler satelliter än så i konstellationen, närmare bestämt är det 32 satelliter i konstellationen för nuvarande. I dagsläget är 30 av dessa 32 satelliter operativa. Nedan jämförs grundkonstellation för GPS (24 satelliter) mot den fulla konstellation bestående av 32 satelliter. Banparametrar för den fulla konstellationen är hämtad från programvaran till Spirent-simulatorens som används för mottagartesterna i kapitel 4 och där är alla 32 satelliter operativa.

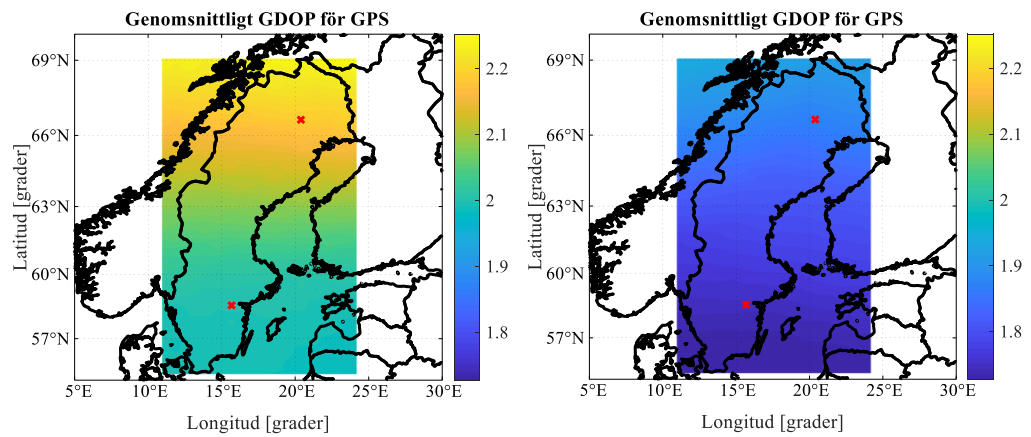
En jämförelse av antalet synliga satelliter mellan grundkonstellationen för GPS som består av 24 satelliter och den fulla konstellationen bestående av 32 satelliter visas i figur 12. Genomsnittlig GDOP för de två konstellationerna visas i figur 13. Antalet satelliter som är synliga ökar så klart när GPS-konstellationen bestående av 32 satelliter används. Vidare förbättras även GDOP som en följd av de extra satelliterna. Därmed är i praktiken fler satelliter synliga med GPS jämfört med den planerade grundkonstellationen för Galileo bestående av 24 satelliter. Vidare är GDOP med den fulla GPS-konstellationen bättre än grundkonstellationen för Galileo.

Observera att extra reservsatelliter planeras för Galileo men var dessa satelliter kommer placeras är ännu inte bestämt [7]. Dessa extra satelliter kan göra att prestandan närmar sig den för den fulla GPS-konstellationen. Notera dock att exempelvis de genomsnittliga GDOP-värdena för den fulla GPS-konstellationen endast är marginellt bättre än grundkonstellationen för Galileo.

I praktiken används sällan enbart Galileo-signaler i GNSS-mottagare, utan även GPS-signaler i en övervägande majoritet av mottagare. I de flesta fall är därför Galileo i kombination med GPS mest intressant. I en hotsituation där GPS eventuellt inte kan användas är det dock viktigt att Galileo fungerar tillfredsställande utan stöd från andra GNSS.



Figur 12. Genomsnittligt antal satelliter som är synliga för GPS med 24 (vänster) respektive 32 (höger) satelliter utvärderat över 24 timmar.



Figur 13. Genomsnittligt GDOP för GPS med 24 (vänster) respektive 32 (höger) satelliter utvärderat över 24 timmar.

4 Utvärdering av flervägsutbredning med mottagare

I detta kapitel utvärderas nyttan med multi-GNSS i befintliga mottagare vid flervägsutbredning. Två olika mottagare används, NovAtel OEM7700 och u-blox EVK-M8N. GNSS-data skapas med en hårdvarusimulator.

4.1 Simulering och inspelning

Ett referensscenario och två flervägsscenarioer simulerades med GNSS hårdvarusimulatore Spirent GSS9000. GNSS-konstellationerna GPS och Galileo användes, med 32 operativa satelliter för GPS och 27 operativa satelliter för Galileo enligt standardinställningarna i programvaran till Spirent-simulatore. Signaler på frekvensbanden L1 och L2, samt E1 och E5 skapades av simulatore. Satellitsignalerna genererades under ca 30 minuter för en position (N 58° E 15°, höjd 0 m) den 31 oktober 2019, vid två tidpunkter klockan 12:00 och 18:00 (GPS-tid).

Scenarierna utvärderades med en GNSS-mottagare av modell NovAtel OEM7700, som kan använda flera frekvensband och flera konstellationer. Mottagaren är en professionell högpresterande mottagare. Utvärderingarna gjordes med olika konfigurationer av mottagaren, till exempel att bara använda GPS, att bara använda Galileo eller att använda båda konstellationerna. Observera dock att när NovAtel-mottagaren är konfigurerad att bara använda Galileo så följs (tracking) fortfarande GPS satelliterna, men de används inte i positionslösningen. Mottagaren avgör själv vilka signaler för varje konstellation som används i positionslösningen, till exempel Galileo E1, E5a, E5b eller E5 AltBOC. Den kan dock inte endast använda till exempel Galileo E5a, utan GPS L1 och Galileo E1 är primära signaler/frekvenser och någon av dessa måste alltid användas. NovAtel-mottagaren har dessutom möjlighet till GPS L2P-mätningar. Mottagaren var konfigurerad att använda en elevationsmask på fem grader. NovAtel-mottagaren konfigurerades till att spara meddelandeformatet bestpos som bland annat innehåller beräknad position (latitud, longitud och höjd) samt information om vilka signaler och frekvenser som användes för beräkning av positionslösningarna. Data sparades även från mottagaren för att generera observations- och navigationsfiler i RINEX-format för beräkning av positionslösningar i efterhand.

En u-blox-mottagare av modell EVK-M8N användes även för att utvärdera scenarierna. Mottagaren är en massmarknadsmottagare. Den konfigurerades till att använda GPS tillsammans med Galileo, bara GPS, eller bara Galileo. Till skillnad från NovAtel-mottagaren kan u-blox-mottagaren endast ta emot på ett frekvensband, vilket innebär att mottagaren använder endast L1/E1. En elevationsmask på fem grader användes. NMEA-meddelanden sparades, bland annat innehållande beräknad position och data för att skapa observations- och navigationsfiler i RINEX-format för efterhandsberäkningar.

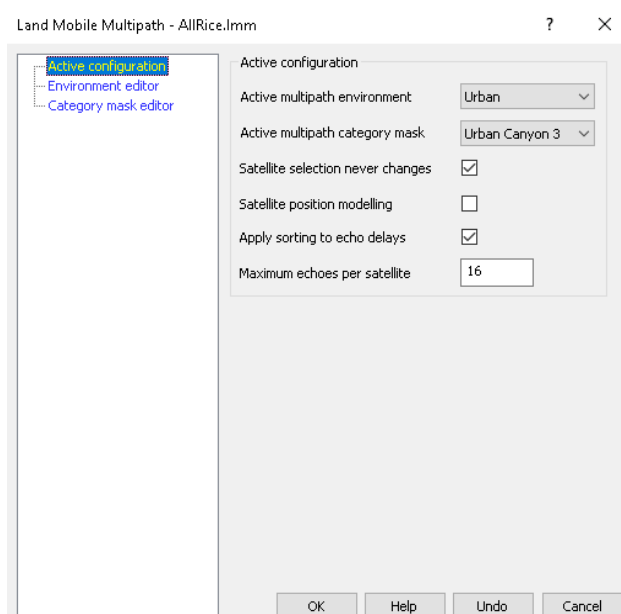
RINEX-filerna från NovAtel-mottagaren och u-blox-mottagaren användes för att beräkna positioner med programvaran RTKLIB¹. Det innebär att de pseudoavstånd som beräknades i NovAtel-mottagaren eller u-blox-mottagaren används för att beräkna positionen. Inställningen *single point positioning* användes som beräknar en iterativ viktad minsta kvadrat-estimering av positionen (*iterative weighted least square*). En elevationsmask på fem grader användes. Korrektion av fel från jonosfären gjordes antingen med *broadcast modell (brdc)* eller *dual-freq* (använder två frekvenser). För *brdc*

¹ <http://www.rtklib.com/>

används GPS L1 och/eller Galileo E1. För *dual-freq* används en linjärkombination av mätningar på två frekvenser (pseudoavstånd och fasmätningar) för att eliminera jonosfärsfelet. I RTKLIB används L1 och L2 för GPS, medan E1 och E5 används för Galileo. Standardinställningen att positionslösningen förkastas om inte GDOP är mindre än 30 användes i RKTILB.

4.2 Modell för flervägsutbredning

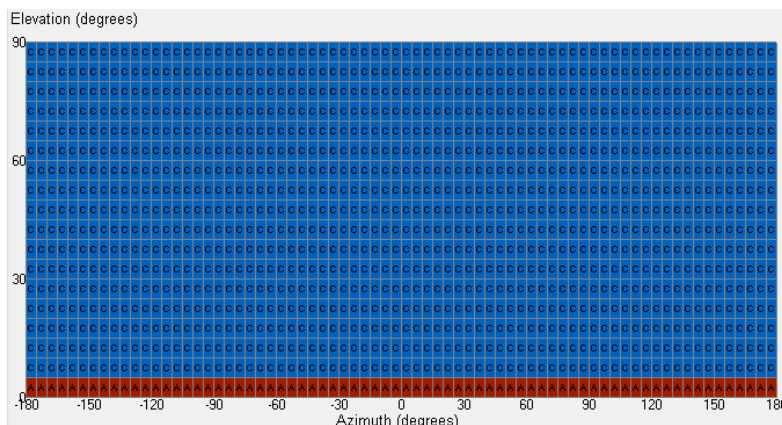
En statistisk modell för flervägsutbredning användes i GNSS-simulatorens Spirent GSS9000 med inställningar enligt figur 14. Direktsignalen (LOS) modellerades med en Rice-fördelning och flervägskomponenterna med en Rayleigh-fördelning. Förinställda parametrar för dessa två modeller användes motsvarande en stadsmiljö enligt figur 15. Vidare användes en kategorimask (*category mask*) för att ange, för viss azimut- och elevationsvinkel, om signaler i den riktningen skulle blockeras (A), bestå av endast direktsignalen (B), utgöras av både direktsignalen och flervägskomponenter (C), eller bestå av endast flervägskomponenter (D).



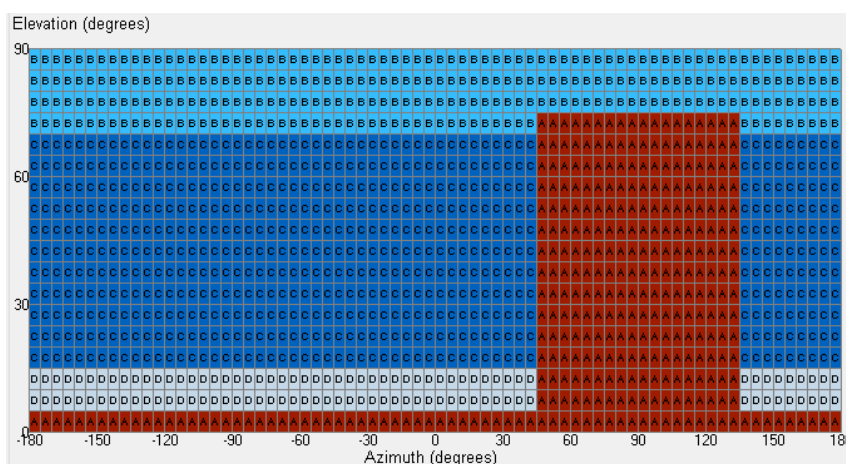
Figur 14. Inställningar för flervägsutbredning.

Environment		Urban	Copy	Remove
Rician fading for direct line of sight (LOS) signals				
Start elev.	K			
0	1.1			
20	4.1			
30	10.9			
40	80.9			
50	0.6			
60	10.5			
70	51.2			
80	129.1			
Rayleigh fading, power decay, and exp. delay for reflected signals				
Start elev.	K	d	Ph(0)	b
0	27.3	11	-16.5	0.118
20	9.3	26.2	-17	0.063
30	11.1	6.5	-23.6	0.069
40	7.9	8.5	-23.5	0.081
50	46.4	6.3	-26.1	0.079
60	9.3	6.3	-26.1	0.079
70	4.8	6.3	-26.1	0.079
80	104948.6	6.3	-26.1	0.079
Deep fading simulation				
Zero speed offset	0	Hz		
User velocity value	10	m/s		
Other parameters for reflected signals (echoes)				
Maximum near echo delay		600	ns	
Power level update interval		10	ms	

Figur 15. Parametrar för flervägsutbredningsmodell.



Figur 16. Kategorimask (skärmbild från datorn till simulatören) för det första flervägsutbredningsscenariot utan byggnader.



Figur 17. Kategorimask (skärmbild från datorn till simulatören) för det andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad.

Två varianter av kategorimask användes. En där signaler från satelliter med elevation 0-5 grader blockeras (A) och resten utgjordes av direktsignal och flervägskomponenter (C) enligt figur 16. Den andra kategorimasken som användes var en där en byggnad modelleras med (A), vidare använde en kombination av kategorierna A-D, se figur 17. Bortsett från byggnaden utgörs elevationsvinklarna 70-90 grader endast av direktsignalen (B), 15-70 grader utgörs av både direktsignalen och flervägskomponenter (C), 5-15 grader utgörs av endast flervägskomponenter (D), och 0-5 grader blockeras (A).

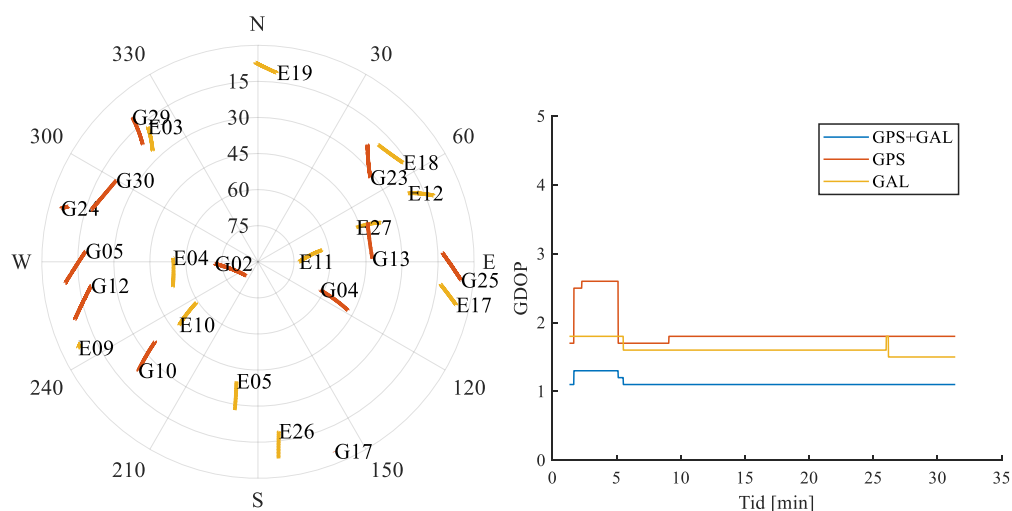
4.3 Resultat från mottagartester

Nedan följer resultaten från simuleringarna. RINEX-data från NovAtel mottagaren och u-blox mottagaren användes även för att beräkna tid och position med RTKLIB.

Utvärderingar gjordes av positionsfel (3D), antal satelliter som används i positionslösningen och positionsosäkerhet. Positionsosäkerhet beräknades som

$\sqrt{\sigma_{lat}^2 + \sigma_{lon}^2 + \sigma_{hgt}^2}$ där termerna är standardavvikelserna i latitud, longitud och höjd som

mottagaren beräknar internt. Vidare visas satellitpositionerna över scenarierna i form av så kallade *skyplots* som visar satelliternas elevation- och azimutvinkel. Även GDOP redovisas för scenarierna. Bara en variant av GDOP beräknas för kombinationen av GPS och Galileo. Den görs för alternativet då pseudoavstånden från GPS och Galileo används i en gemensam lösning. Figuren som visar satellitpositionerna och GDOP är beräknade med RTKLIB på RINEX-data från NovAtel mottagaren då den är konfigurerad för både GPS och Galileo.



Figur 18. Satellitpositioner (vänster) och GDOP (höger) start klockan 12 utan flervägsutbredning. G står för GPS och E står för Galileo. Numren är satellit-ID.

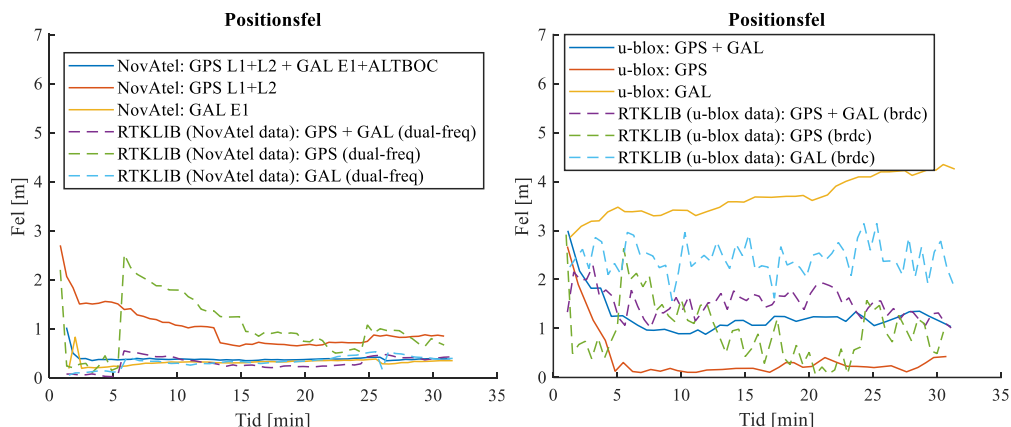
Den simulerade modellen av en byggnad återspeglar ett relativt svårt flervägsscenario. Utan flervägsutbredning och blockering av en byggnad så är ungefär nio till elva satelliter synliga och kan följas av NovAtel-mottagaren för GPS respektive Galileo. När flervägssmodellen med byggnad används vid klockan 12 kan NovAtel-mottagaren endast följa fem GPS-satelliter och fem Galileo-satelliter. Vid klockan 18 följs sex satelliter av vardera GNSS. Simuleringstiden startar vid tiden 0 i alla figurer vilket är då scenariot startar (klockan 12:00 eller 18:00).

4.3.1 Ingen flervägsutbredning (referensfall)

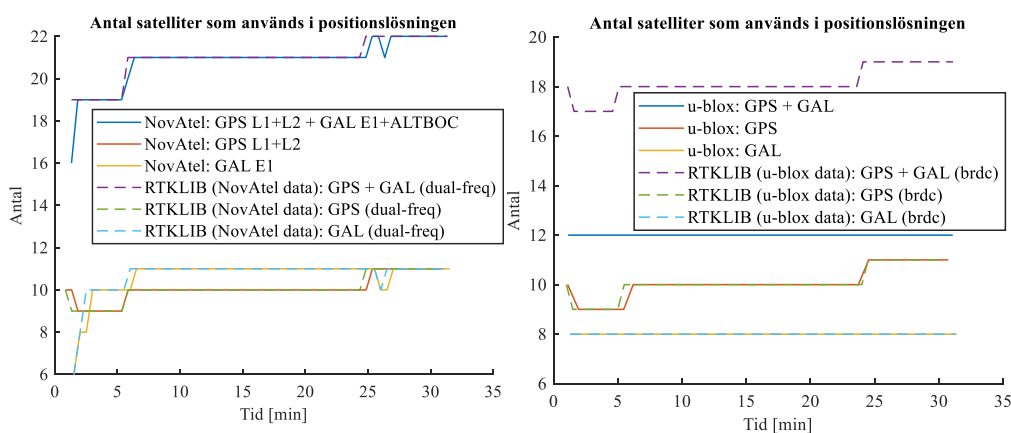
Referensscenariot simulerades endast med start klockan 12:00. I det fallet är det mer än tio satelliter tillgängliga med bra geometrisk spridning för både GPS och Galileo, se figur 18 (vänster). Det gör att GDOP är lågt i detta scenario, se figur 18 (höger). Lågst är GDOP för kombinationen av GPS och Galileo.

Positionsfelen för detta referensfall visas i figur 19 för NovAtel-mottagaren och u-blox-mottagaren. Figuren visar resultat för positionslösningar baserade på antingen enbart GPS, enbart Galileo, eller kombinationen av GPS och Galileo. Observera att de två olika mottagarna (NovAtel och u-blox) ger lite motstridiga resultat. För NovAtel-mottagaren är positionsfelet störst för position baserad på enbart GPS, medan lösningen baserad enbart på GPS ger minst fel med u-blox. Notera dock att resultat likt dessa kan variera något för samma mottagare vid olika tillfällen (olika realiseringar av samma scenario) och att resultaten så klart varierar på grund av olika mottagarimplementationer. Att det inte går att utläsa ett entydigt resultat till fördel för någon av konstellationerna beror alltså huvudsakligen på skillnader i implementation mellan mottagarna, och inte på signalernas egenskaper. Notera dessutom att NovAtel-mottagaren använder två frekvensband, medan u-blox-mottagaren bara använder ett, så resultaten mellan mottagarna för olika konstellationer är inte direkt jämförbara.

För NovAtel-mottagaren (direkt och via RTKLIB) ges inte någon större förbättring mellan att bara använda Galileo och att använda GPS tillsammans med Galileo. Notera dock att positionsfelet i detta fall utan flervägsutbredning redan är litet. För u-blox är lösningen med enbart GPS bättre än kombinationen av GPS och Galileo. Antal satelliter som används i positionslösningarna visas i figur 20 för NovAtel och u-blox. Notera att för u-blox används endast åtta satelliter i positionslösningarna vilket kan bidra till lite större positionsfel jämför med de andra fallen. Dock används fler satelliter i positionsberäkningen med kombinationen GPS och Galileo än lösningen som bara använder GPS och trots detta ger enbart GPS bättre positionsnoggrannhet.



Figur 19. Positionsfel i fallet utan flervägsutbredning för NovAtel jämfört med RTKLIB (vänster) och u-blox jämfört med RTKLIB (höger). Scenariot startar klockan 12.



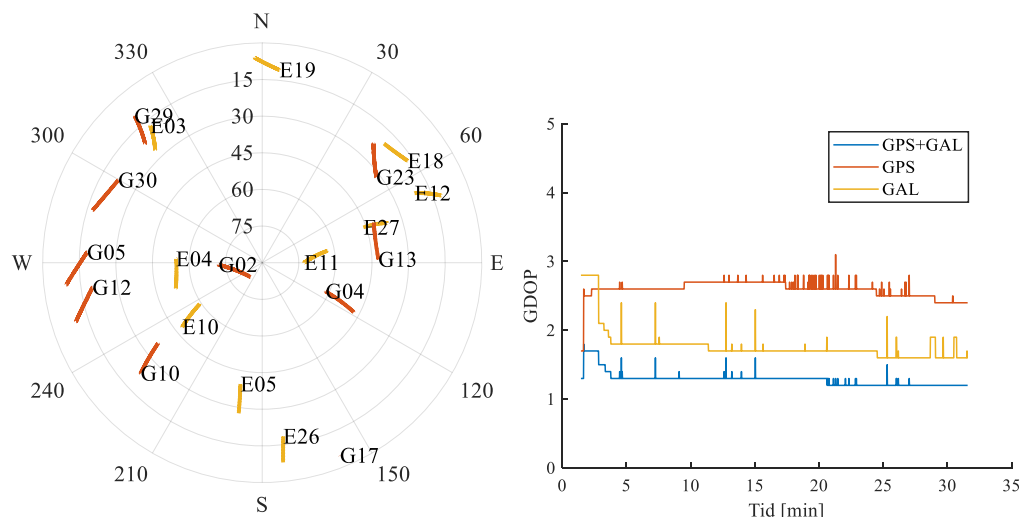
Figur 20. Antal satelliter som används i positionslösningen i fallet utan flervägsutbredning för NovAtel jämfört med RTKLIB (vänster) och u-blox jämfört med RTKLIB (höger). Scenariot startar klockan 12.

Att kombinationen av GPS och Galileo ger sämre resultat än att enbart använda en av konstellationerna beror på hur de olika signalerna används av mottagarna. Troligen används inte informationen från de två konstellationerna på ett sätt som minimerar positionsfelet när konstellationerna kombineras. Det kan till exempel handla om att skillnader i fel mellan de olika signaltyperna inte tas hänsyn till på ett korrekt sätt. Exempelvis, för NovAtel-mottagaren ger Galileo mindre positionsfel än GPS, vilket troligen innebär att mottagarens pseudoavståndsmätningar för GPS har större fel än för Galileo. För u-blox-mottagaren gäller det omvända förhållandet mellan konstellationerna. Om pseudoavståndsmätningarna från de två konstellationerna kombineras med felaktig skattning av de varierande felen så blir konsekvensen att den kombinerade positionslösningen får större fel än lösningen baserat på den enskilt bästa konstellationen.

4.3.2 Flervägsutbredning

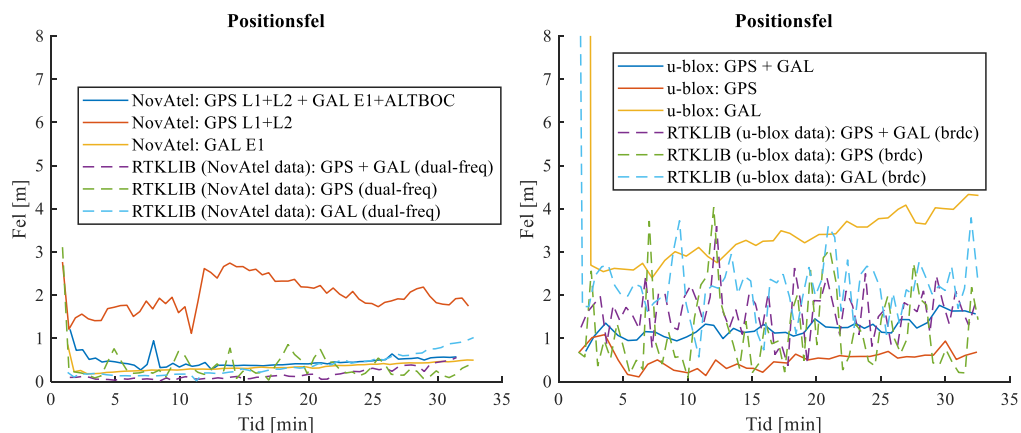
Nedan utvärderas det första scenariot med flervägsutbredning enligt kategorimasken i figur 16. Signaler från satelliter med elevation 0-5 grader blockerades och från resterande satelliter genererades direktsignalen plus flervägskomponenter.

Satellitpositioner och GDOP visas i figur 21. Eftersom det nu även är flervägskomponenter blir följning av satelliter lite sämre än i referensfallet i avsnitt 4.3.1, vilket bland annat gör att GDOP blir lite sämre.

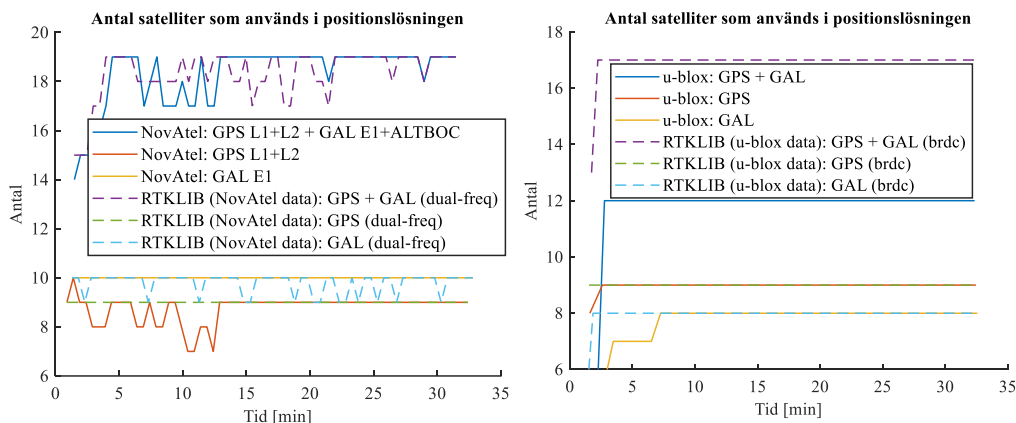


Figur 21. Satellitpositioner (vänster) och GDOP (höger) start klockan 12 i första flervägsutbredningsscenarioet. G står för GPS och E står för Galileo. Numren är satellit-ID.

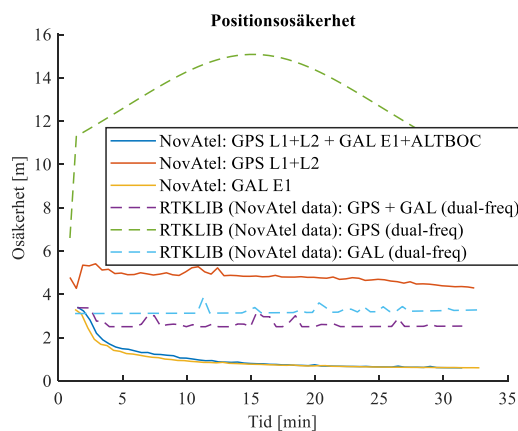
Positionsfelen i detta fall visas i figur 22 för NovAtel och u-blox. I figur 23 visas antalet satelliter som används i positionslösningarna. För referensfallet var positionsfelet med NovAtel lite mindre än 0,5 meter för kombinationen GPS och Galileo, samt för bara Galileo. I detta fall med flervägskomponenter är det ingen större skillnad i storleken på felet. Felet med bara GPS har blivit lite större för den direkta NovAtel-lösningen medan positionen beräknad med RTKLIB blev bättre. Troligtvis använder NovAtel-mottagaren algoritmer för undertryckning av flervägsutbredning som gör att felet inte blir signifikant större när flervägskomponenter läggs till. Samma kan gälla för u-blox vars fel också har ungefär samma storleksordning som i fallet utan flervägsutbredning. Sammantaget så hanterar båda mottagarna detta fall av flervägsutbredning med ungefär samma prestanda som i referensfallet. Resultaten gäller dock för dessa två mottagare, och kan inte generaliseras till alla mottagare. Andra mottagare kan ha större svårigheter att hantera även denna relativt enkla flervägsutbredningsmiljö. Det är alltså viktigt att mottagare som ska kunna fungera tillfredsställande i exempelvis en stadsmiljö har tekniker för att hantera flervägsutbredning. Det ska även nämnas att dessa mottagare som har testats har proprietära algoritmer för att välja vilka satelliter som ska användas och hur mätningar från satelliterna kombineras. Det är svårt att få kunskap om hur detta har implementerats i befintliga produkter.



Figur 22. Positionsfel i första flervägsutbredningsscenarioet för NovAtel jämfört med RTKLIB (vänster) och u-blox jämfört med RTKLIB (höger). Scenariot startar klockan 12.



Figur 23. Antal satelliter i första flervägsutbredningsscenariot för NovAtel jämfört med RTKLIB (vänster) och u-blox jämfört med RTKLIB (höger). Scenariot startar klockan 12.



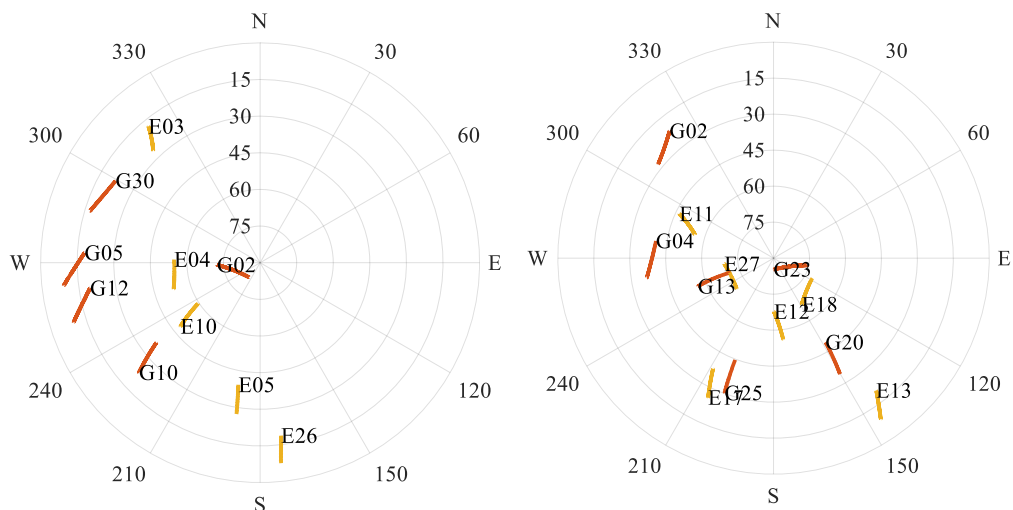
Figur 24. Positionssosäkerhet i första flervägsutbredningsscenariot för NovAtel jämfört med RTKLIB. Scenariot startar klockan 12.

Positionssosäkerhet för NovAtel visas i figur 24. Figuren visar att osäkerheten för den positionslösning i RTKLIB som endast använder GPS med NovAtel-mätningar är högre än för de övriga lösningarna. Samtidigt är positionsfelet för denna lösning mindre än den direkta lösningen från NovAtel som endast använder GPS.

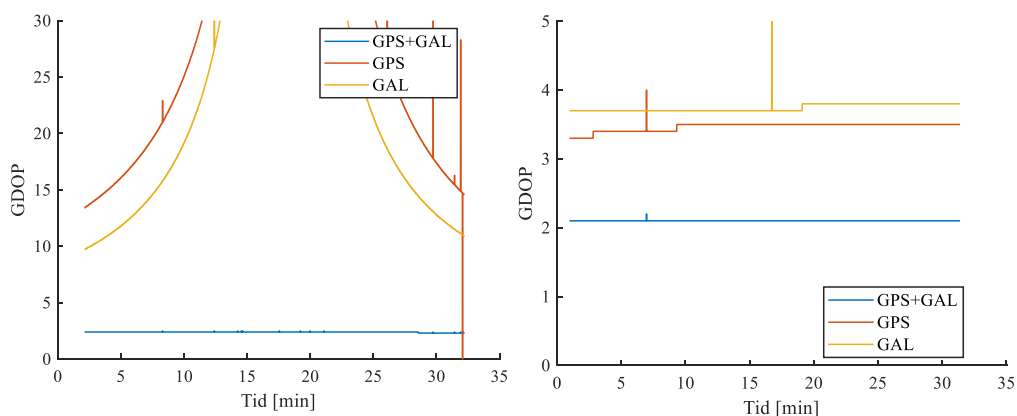
4.3.3 Flervägsutbredning och blockering av byggnad

Här utvärderas det andra flervägsscenariot som modellerade en byggnad, vilket tidigare visades i figur 17. Byggnaden gör att signaler från fler satelliter blockeras. I detta fall utvärderades scenariot med start från två tidpunkter: klockan 12:00 och 18:00. Eftersom elevationsvinklarna 5-15 grader utgörs av endast flervägskomponenter, kan det innebära att mottagarna inte använder dessa signaler eftersom de är för svaga.

Satellitpositioner för detta scenario visas i figur 25, för start klockan 12 respektive 18. I fallet som börjar klockan 12 är det fem GPS-satelliter och fem Galileo-satelliter som följs. På grund av att signaler blockeras av byggnaden och endast ett fåtal satelliter är synliga, är geometrin mellan satelliterna för dålig för att beräkna en position med bra noggrannhet. Detta gör att GDOP är högt för båda konstellationerna separat, medan den är acceptabel för en kombination av konstellationerna, se figur 26 (vänster). Situationen är bättre i fallet som börjar klockan 18, då sex GPS-satelliter och sex Galileo-satelliter är tillgängliga (kan följas av mottagarna). GDOP är då bättre tack vare att en extra satellit är synlig jämfört med klockan 12 och att geometrin mellan satelliterna är bättre, se figur 26 (höger).

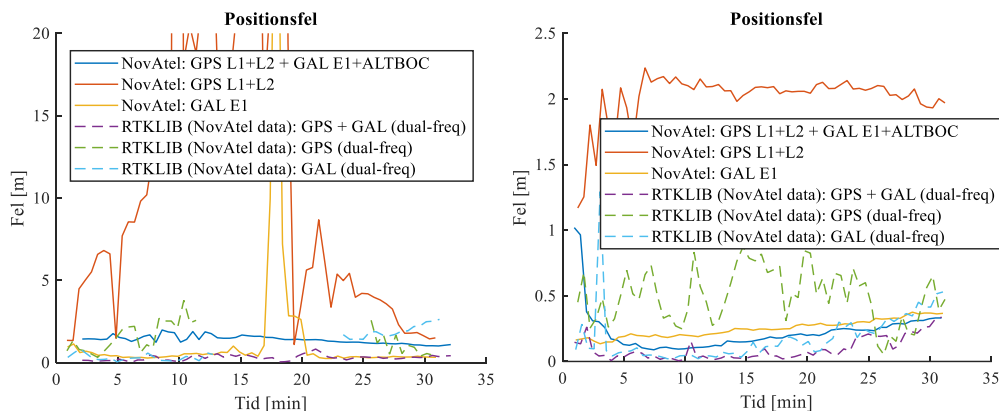


Figur 25. Satellitpositioner i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad från start klockan 12 (vänster) och klockan 18 (höger). G står för GPS och E står för Galileo. Numren är satellit-ID.

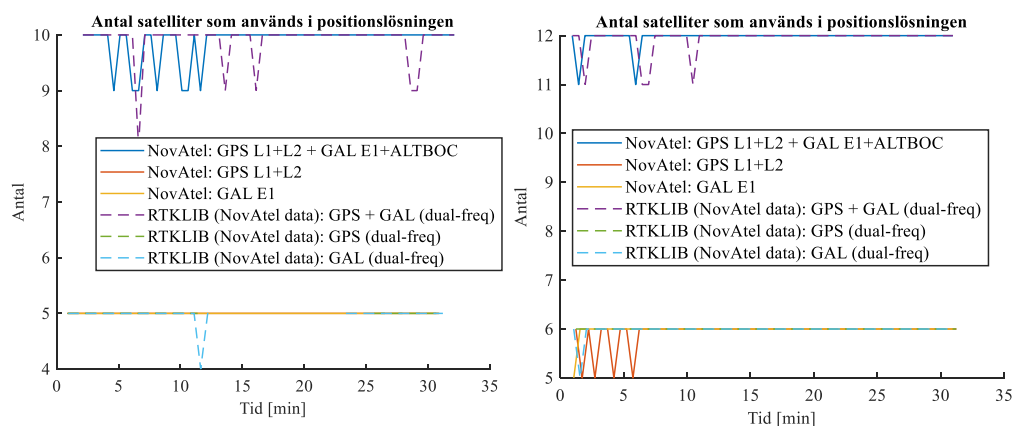


Figur 26. GDOP i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad från start klockan 12 (vänster) och klockan 18 (höger).

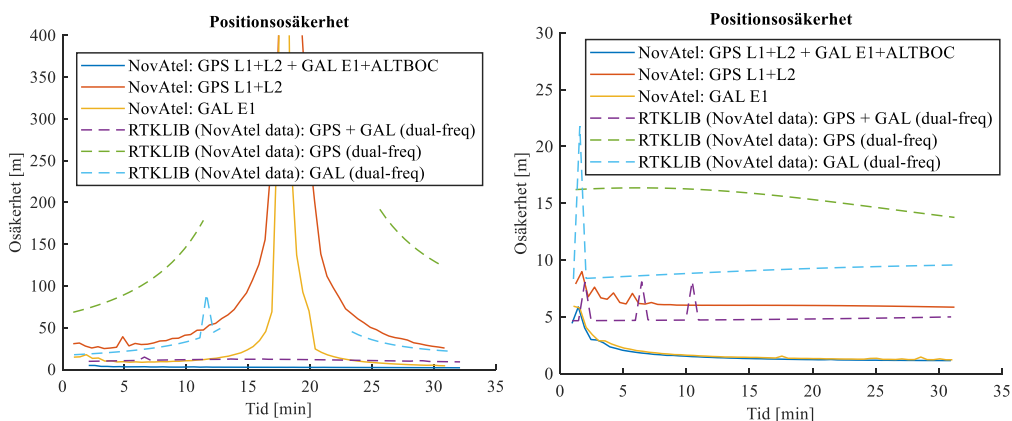
I figur 27 jämförs positionsfelen för NovAtel vid de två klockslagen 12:00 och 18:00. Positionsfelet är sämre i fallet som börjar klockan 12 jämfört med det som börjar 18, speciellt för konstellationerna var för sig. Notera att RTKLIB under vissa tidsintervall i fallet som startar klockan 12 inte alls ger någon position för GPS respektive Galileo, eftersom GDOP är för högt. Att situationen är sämre i fallet som börjar klockan 12 beror främst på att det endast är fem satelliter som följs för GPS respektive Galileo jämfört med de sex satelliter i fallet som börjar klockan 18, samt att geometrin mellan satelliterna är sämre i det första fallet. Antalet satelliter som används i positionslösningarna visas i figur 28. Här går det att se en tydlig fördel med att använda både GPS och Galileo och inte använda endast en konstellation.



Figur 27. Positionsfel i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad för NovAtel jämfört med RTKLIB från start klockan 12 (vänster) och klockan 18 (höger). Observera att positionsfelet för NovAtel GPS går upp till över 100 meter och Galileo cirka 40 meter till vänster i figuren, vilket inte visas.

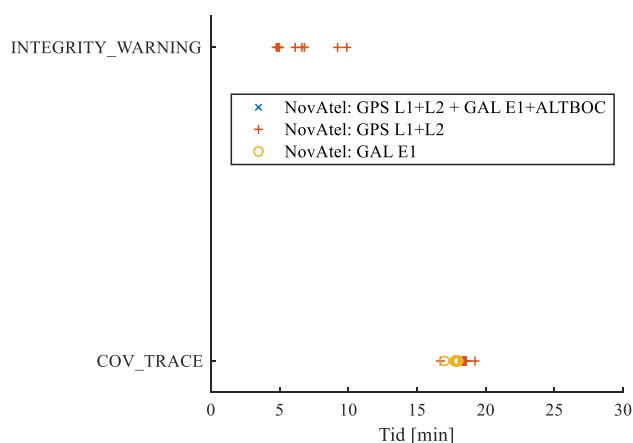


Figur 28. Antal satelliter i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad för NovAtel jämfört med RTKLIB från start klockan 12 (vänster) och klockan 18 (höger). Linjerna för NovAtel GPS respektive GAL samt RTKLIB GPS respektive GAL överlappar kring 5 satelliter (vänster) och 6 satelliter (höger).

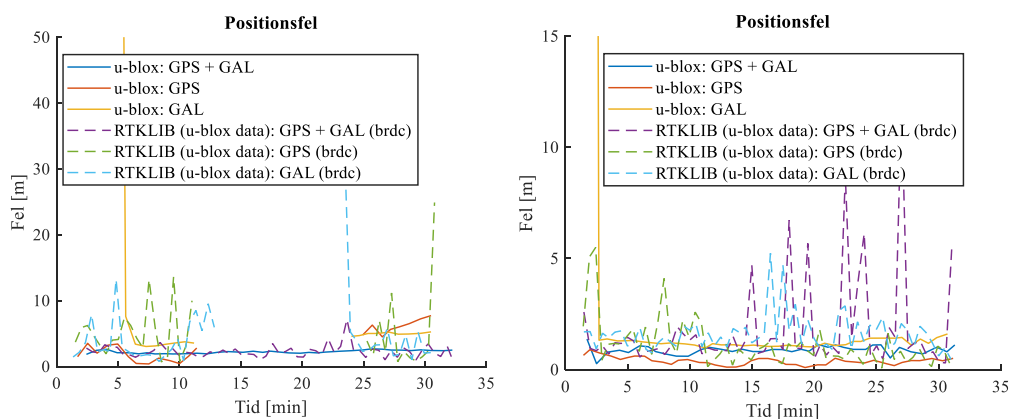


Figur 29. Positionssosäkerhet i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad för NovAtel jämfört med RTKLIB från start klockan 12 (vänster) och klockan 18 (höger).

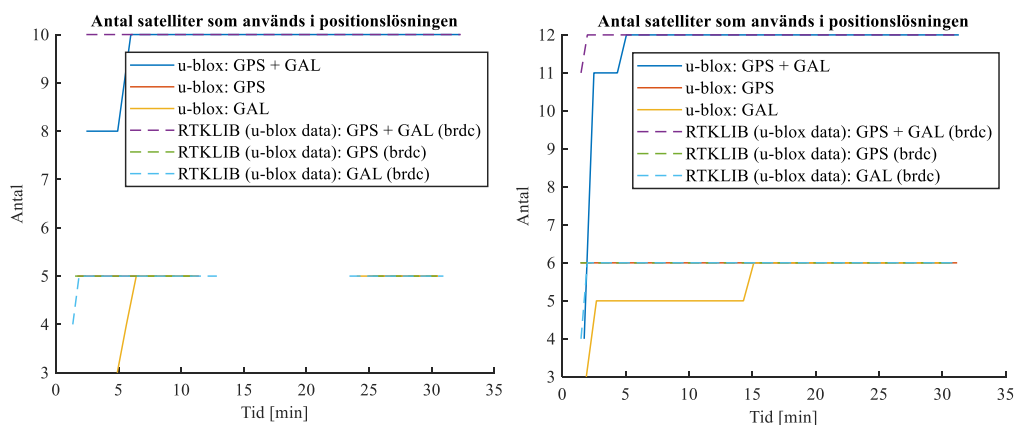
Positionssosäkerheten för positionslösningarna visas i figur 29. Figuren visar att NovAtel-mottagaren rapporterar stora positionssosäkerheter samtidigt som positionsfelen är stora i fallet som börjar klockan 12. Vidare ger NovAtel-mottagaren varningar enligt figur 30 för positionslösningarna som använder enbart GPS eller Galileo i fallet som börjar klockan 12. Varningen *INTEGRITY_WARNING* betyder stora residualer, vilket gör att positionen är opålitlig, och meddelandet *COV_TRACE* betyder att spåret av kovariansmatrisen överskrider en tröskel (> 1000 m).



Figur 30. Varningarna för NovAtel mottagaren i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad för NovAtel jämfört med RTKLIB från start klockan 12. Observera att det inte är några varningar för kombinationen av GPS och Galileo.



Figur 31. Positionsfel i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad för u-blox jämfört med RTKLIB från start klockan 12 (vänster) och klockan 18 (höger).



Figur 32. Antal satelliter i andra flervägsutbredningsscenariot med en byggnad för u-blox jämfört med RTKLIB från start klockan 12 (vänster) och klockan 18 (höger).

I figur 31 visas positionsfelen för u-blox för de två starttiderna klockan 12 respektive 18. Antal satelliter som används i positionslösningarna i dessa två fall visas i figur 32. Även i detta fall beräknas ingen position för endast GPS eller endast Galileo under ett tidsintervall i mitten av scenariot som börjar klockan 12 av samma anledning som togs upp tidigare. En kombination av GPS och Galileo krävs för att kontinuerligt kunna beräkna en position med litet fel.

5 Slutsatser

De nya GPS- och Galileo-signalerna har bättre robusthet mot flervägsutbredning. Vidare gör kombinationen av GPS och Galileo att fler satelliter är tillgängliga vilket främst är av nytta vid svåra scenarier med flervägsutbredning och blockering av signaler p.g.a. exempelvis närliggande byggnader. I fall då byggnader blockerar satellitsignaler, exempelvis i stadsmiljö, är ett enskilt GNSS ibland inte tillräckligt för att ge tillförlitlig position. I sådana situationer kan en kombination av GNSS vara nödvändig.

Antalet tillgängliga satelliter och GDOP för grundkonstellationerna (24 satelliter) för GPS och Galileo samt för en kombination av systemen analyserades. Resultaten visar att Galileo har något bättre täckning över Sverige än GPS, och att kombinationen ger ytterligare förbättring som förväntat. I södra Sverige (nära Linköping) har Galileo, GPS och kombinationen av systemen genomsnittliga GDOP på 1,93, 2,00, och respektive 1,46. Motsvarande siffror i norra Sverige (nära Jokkmokk) är 2,19, 2,02 och 1,56. Dessa värden gäller alltså för grundkonstellationerna bestående av 24 satelliter. Det kan också konstateras att nuvarande operativa satelliter för GPS ger bättre satellitgeometri än Galileo i Sveriges närområde eftersom Galileo ännu inte är fullt utbyggt.

Utvärderingar av befintliga mottagare för olika typer av signaler och konstellationer visar att prestanda kan skilja mycket mellan mottagare. Det var därför inte möjligt att utvärdera skillnaden i praktiken mellan olika signaltyper vad gäller deras robusthet mot exempelvis flervägsutbredning, med befintliga mottagare. Teoretiska utvärderingar visar dock att de nya GPS- och Galileo-signalerna är mer robusta mot flervägsutbredning, och det bör gå att utnyttja i framtida mottagare.

I miljöer utan blockering, men med flervägsutbredning, blir positionsfelen inte mycket större jämfört med referensfallet i de utvärderingar som har gjorts. Detta kan bero på att mottagarna har algoritmer för undertryckning av flervägsutbredning. Det är främst i svår flervägsutbredning med byggnader som blockerar satellitsignaler som en tydlig skillnad i prestanda kan ses.

Kombinationen av GPS och Galileo ger inte alltid mindre positionsfel än konstellationerna var för sig. Till exempel gav positionslösningarna baserade på endast Galileo i vissa fall mindre fel än vad kombinationen av GPS och Galileo gav, med en testad mottagare. Det kan exempelvis bero på att GPS-observationerna är sämre och att det inte tas hänsyn till på bästa sätt i beräkningen av position. Att kombinera mätningar från både GPS och Galileo kan, teoretiskt, göras på ett sätt så att lösningen för en kombination av konstellationer ger mindre fel än de enskilda konstellationerna. I praktiken visar dock tester att så inte alltid görs i befintliga mottagare.

6 Referenser

- [1] T. Lindgren och F. M. Eklöf, "Multi-GNSS - översikt, implementationsaspekter och utmaningar," FOI-D--0782--SE, 2017.
- [2] E. Axell och T. Lindgren, "Multiantenntekniker för detektion av vilseledningsattack mot GNSS," FOI-R--4500--SE, 2017.
- [3] U.S. Department of Defense, "Standard Positioning Service Performance Standard, 4th Edition," 2008. [Online]. Tillgänglig: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>. [Använd 2019-11-29].
- [4] European Global Navigation Satellite Systems Agency, "Orbital and Technical Parameters," [Online]. Tillgänglig: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/orbital-and-technical-parameters>. [Använd 2019-11-29].
- [5] F. M. G. Sousa och F. D. Nunes, "New Expressions for the Autocorrelation Function of BOC GNSS Signals," *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, vol. 60, nr 1, pp. 1-9, 2013.
- [6] P. Misra och P. Enge, *Global Positioning System; Signals, Measurements, and Performance*, 2nd Ed., Lincoln, Massachusetts, USA: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [7] "Galileo Open Service - Service Definition Document (OS SDD V1.1)," 2019. [Online]. Tillgänglig: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf. [Använd 2019-11-29].

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 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.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se