

Projektnummer/Project no Uppdragsgivare/Client  
E86336 Försvarsmakten  
FoT-område  
Vapen och skydd

Författare/Author  
Robert Carsk, Kristoffer Hägglund

Datum/Date Memo nummer/Number  
2025-12-05 FOI Memo 9117

# LEO-PNT på Nordkalotten



Omslagsbild: Shutterstock

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

# 1 Inledning

Satellitbaserade system för positionering, navigering och tid (PNT) är en kritisk komponent för modern infrastruktur. Traditionella globala satellitbaserade navigeringssystem (GNSS) har länge varit standardlösningen för PNT-tjänster, men deras prestanda och tillgänglighet kan vara begränsade i utmanande miljöer. Geografiska operationsmiljöer såsom Nordkalotten och andra områden norr om polcirkeln medför utmaningar, exempelvis låg satellitvisibilitet, jonofärska störningar och begränsad täckning från geostationära satelliter. Förutsättningar, möjligheter och specifika utmaningar som PNT-system står inför på Nordkalotten diskuteras mer utförligt i [1] där möjligheter och utmaningar för positionering med stöd från satelliter i lågt flygande omloppsbanor (LEO<sup>1</sup>) behandlas översiktligt.

Konceptet med att etablera PNT-förmåga genom LEO-satelliter har på senare år framstått som ett intressant alternativ till traditionella GNSS-lösningar. Genom att använda satelliter i låg omloppsbana kan LEO-PNT medföra förbättrad signalstyrka och bättre täckning i områden där GNSS presterar dåligt, vilket är särskilt intressant för nordliga breddgrader där behovet av tillförlitliga PNT-tjänster ökar i takt med den växande aktiviteten och intresset för de regionerna.

Den stora frågan är huruvida LEO-PNT kan erbjuda tillräcklig prestanda, både generellt och med avseende på den svåra operationsmiljön som Nordkalotten utgör tillsammans med de plattformsbegränsningar som obemannade flygande farkoster medför. Detta memo analyserar möjligheterna för olika koncept för LEO-PNT på Nordkalotten.

# 2 Bakgrund

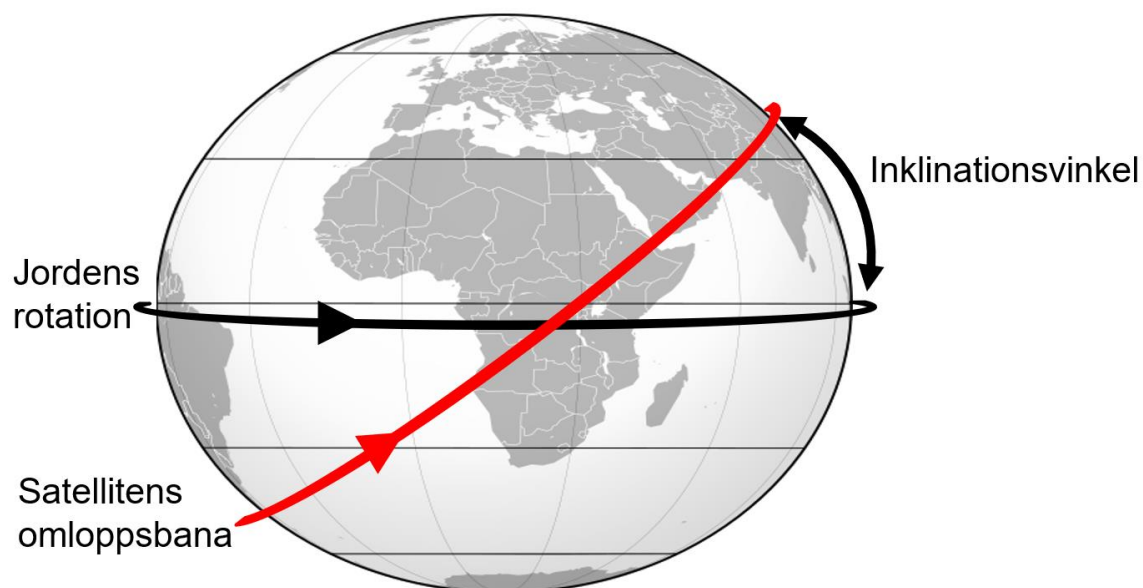
GNSS på nordliga breddgrader står inför ett antal specifika utmaningar. Satelliterna är ofta placerade i geostationära eller semi-geostationära omloppsbanor och vid nordliga breddgrader kan dessa satelliter ligga lågt på horisonten. Detta minskar signalstyrkan vid mottagaren och ökar risken för interferens på grund av atmosfärisk påverkan vid låga vinklar.

Ett alternativ är att utnyttja satelliter i lägre omloppsbanor, vilket har flera fördelar jämfört med geostationära satelliter. LEO-satelliter har kortare avstånd till jordytan, vilket innebär högre effekt och bättre störstålighet för signalerna. LEO-konstellationer har täckning över hela jordklotet, även om omloppsbanorna varierar mellan olika konstellationer. Majoriteten av LEO-konstellationerna har sina satelliter i polära omloppsbanor (nära 90° i inklinationsvinkel) för att få så bra global täckning som möjligt, men dessa representerar en minoritet sett till antalet satelliter i omlopp. Majoriteten av satelliterna i LEO tillhör Starlink, vars omloppsbanor är koncentrerade på låga inklinationsvinklar mellan 43–53°, se Figur 1. Polära omloppsbanor ger upphov till en högre koncentration av satelliter kring polerna och en lägre koncentration kring ekvatorn på grund av geometrin, vilket illustreras i Figur 2 och Figur 3, där Starlinks konstellation kan jämföras med OneWebs. En högre koncentration av satelliter kring polerna är en fördel för Sverige och framförallt vid Nordkalotten som befinner sig nära nordpolen.

Frekvensområdet för LEO-satelliter är typiskt högre än traditionell GNSS, vilket är gynnsamt sett till jonofärsstörningar kopplat till högre latitud [2]. Många av de kommersiella LEO-kommunikationssystemen (exempelvis Starlink och OneWeb) sänder på Ku-band och högre (12 – 18 GHz). Dessa frekvenser är mer robusta mot jonofärsstörningar men riskerar att påverkas mer av regn- och snöoväder [3].

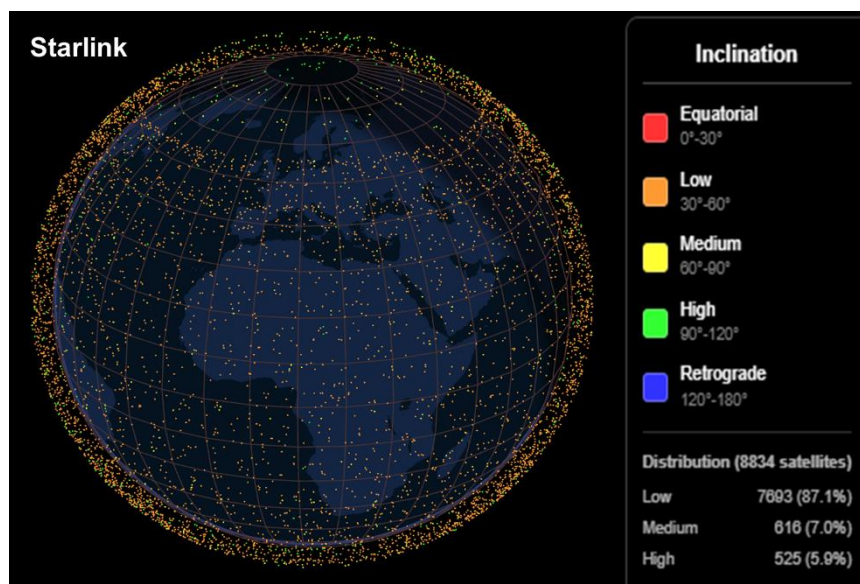
---

<sup>1</sup> Low earth orbit (160 – 2 000 km över havet).

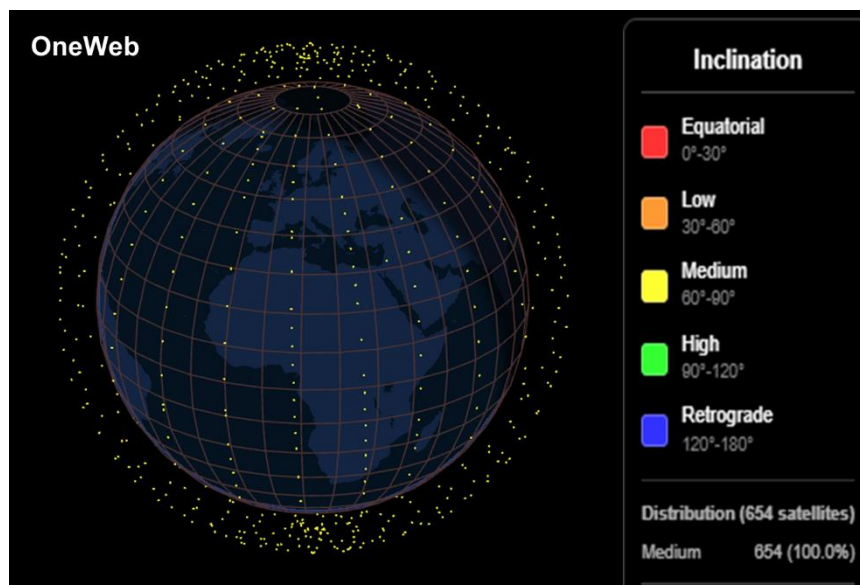
Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

Figur 1. Illustration av inklinationsvinkeln på omloppsbanor hos satelliter (Illustration FOI).

Inom de närmaste åren förväntas antalet satelliter i LEO att fortsatt öka kraftigt, med växande existerande konstellationer men även helt nya. Alla nuvarande konstellationer skickar signaler utan dedikerade nyttolaster för PNT. Däremot planeras konstellationer med tillhörande nyttolaster för PNT som exempelvis klock- och banfelkorrektionsdata. Dessa kallas för dedikerade LEO-PNT-system och förväntas kunna ge upphov till bättre PNT-lösningar än med de existerande systemen idag som måste utnyttja signalerna opportunistiskt.



Figur 2. Starlinks satelliter i framförallt låga inklinationsvinklar [4].

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

Figur 3. OneWebs satelliter i polära omloppsbanor på medium inklinationsvinklar [4].

Hur LEO-PNT är tänkt att realiseras kan delas in i tre huvudkategorier [5]:

- 1) Dedikerade system, satellitnätverk med nyttolaster avsedda enbart för PNT. Dessa medför en hög installationskostnad och längre tidshorisont innan en hel konstellation är operabel med global täckning (5+ år), men kan ge GNSS-liknande resultat (< 1 m noggrannhet).
- 2) Hybrid PNT, där etablerade kommunikationssatelliter också erbjuder en PNT-tjänst på bekostnad av viss kommunikationsprestanda. Det är möjligt att en sådan lösning kan erbjudas på kortare sikt (ca 5 år) och ge hög noggrannhet (< 1 m).
- 3) Opportunistisk PNT som utnyttjar signaler från kommunikationssatelliter som inte är avsedda för PNT. Detta kräver modifierad mottagarutrustning men ingen förändring av själva satellitplattformen eller dess signaler. Experimentsystem används inom forskning och utveckling men noggrannheten är i de flesta fall låg (< 100 m). Färdiga produkter existerar inte för tillfället men kan förmodligen introduceras på kort sikt.

De två första kategorierna är beroende av samarbete med satellitkonstellationens ägare för att kunna implementera tjänster för PNT och har en betydligt högre associerad kostnad och längre tidshorisont än att nyttja befintliga kommunikationssignaler opportunistiskt.

I följande avsnitt redogörs de tre olika metoderna utifrån aktuell status och realiserbarhet, kopplat till de förutsättningar och utmaningar som Nordkalotten medför. Framförallt ligger fokus på opportunistiska LEO-PNT-system eftersom det är mest intressant i dagsläget.

### 3 Dedikerade LEO-PNT-system

Idag finns ett antal kända aktörer som arbetar för att skjuta upp satellitkonstellationer med tillhörande PNT-nyttolaster för möjliggörande av ett dedikerat PNT-system [6]. EU och Kina har varsitt program inom ESA respektive SatNet LEO för testning av LEO-PNT-satelliter medan ett flertal kommersiella aktörer bygger sina egna [7, 8]. Huruvida LEO-konstellationer klassas som dedikerade eller hybrida (kapitel 4) LEO-PNT-system är lite av en gråzon och kan variera mellan källor. Tabell 1 innehåller därför de aktörer som kan klassas antingen som dedikerade eller hybrida LEO-PNT-system.

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

Tabell 1. Framväxande dedikerade LEO-PNT-leverantörer hämtade från [8, 9] under november 2025. Notera att dessa siffror ändras på vecko- eller månadsbasis. Frekvensband: VHF (30–300 MHz), UHF (0,3–3 GHz), L (1–2 GHz), S (2–4 GHz), C (4–8 GHz).

Företag/Organisation	Land	Inklinationsvinkel	Antal uppskjutna satelliter	Frekvensband	Totalt antal planerade satelliter
Iridium	USA	86,4°	66	L	66
Xona Space Systems	USA	97°	1 testsatellit	L, C	258
TrustPoint	USA	-	2 testsatelliter	C	300
JAXA	Japan	55°	0	C	480
ArkEdge Space	Japan	-	0	VHF	50–100
Centospace	Kina	-	5 testsatelliter	L	190
Geely	Kina	-	0	L	240
SatNet LEO-PNT	Kina	86,5°, 50°	0	L	506
GNSSaS	UAE	-	0	L, S	-
ESA LEO-PNT	Europa	Polär	0	L, S, C, UHF	10 testsatelliter (upp till 263)

I Tabell 1 syns att Xona Space Systems, Centospace, Geely och SatNet LEO-PNT utvecklar sina system för att leverera signaler i L-bandet, vilket gör dem kompatibla med redan existerande utrustning för GNSS så länge de uppdateras med ny programvara för att hantera signalerna [8]. Tack vare detta finns också möjligheten att, i mottagarna, fusionera signalerna från befintliga GNSS-satelliter och dessa LEO-satelliter för att potentiellt uppnå ännu bättre positions- och tidsestimat.

TrustPoint och JAXA använder C-bandet för sina signaler, vilket har vissa fördelar såsom att det är ett mindre trångt frekvensspektrum samt mindre känsligt för interferenser. ESA använder sina 10 testsatelliter för att undersöka prestanda i flera olika frekvensband [8].

Utöver det kommersiellt tillgängliga Iridium STL kommer de nya konstellationerna att utöka antalet satelliter i sina konstellationer. Fler satelliter förväntas kunna ge upphov till positioneringsnoggrannheter på centimeter- eller decimeternivå. Tillsammans med de andra positiva egenskaperna med signaler från LEO-satelliter som nämndes i kapitel 2 finns potential till att detta kan bli en lovande teknik för satellitbaserad PNT i framtiden.

Några av dessa framtida konstellationer utvärderas i simuleringsmiljöer idag, där exempelvis Xona Space System har nära samarbete med utvecklare av simuleringsmiljöer för GNSS. Deras tänkta fulla konstellation, Pulsar, går att testa i simuleringsmiljö i väntan på att konstellationerna förverkligas i riktiga omloppsbanor runt jorden. Dedikerade LEO-PNT-konstellationer förväntas bli fullt operativa först någon gång efter år 2030 [6].

Eftersom de dedikerade konstellationerna för LEO-PNT fokuserar på att leverera PNT-förmåga och inte kommunikation, prioriteras fullständig och kontinuerlig täckning över jordytan. Det är bland annat därför som polära omloppsbanor är vanliga val för dessa. Genom att placera satelliterna i polära banor uppnås fullständig täckning över jordytan med ett mindre antal satelliter än för många andra omloppsbanor. Som tidigare nämnts är polära omloppsbanor en fördel för Sverige och Nordkalotten då satelliternas täthet ökar desto närmare polerna de kommer. Detta står i kontrast till hur den nuvarande största LEO-konstellationen, Starlink, valt att placera sina satelliter i omloppsbana för att optimera tillgängligheten och bandbredden på deras kommunikationssignaler för områden med flest antal användare.

För LEO-satellitkommunikation är fasstyrda antenner den ledande antenntekniken på grund av att mottagaren behöver följa satelliterna som rör sig snabbt över himlen med en typisk omloppstid på 90–120 minuter [10]. De senaste fem åren har sett stora framgångar inom realiserbarheten av fasstyrda antenner som tidigare var associerade med hög kostnad och beräkningstunga

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

signalbehandlingsalgoritmer [11]. Detaljer kring tänkta antennlösningar för systemen ovan är ofta inte öppet publicerade, men att effektivt kunna följa satelliter över himlen är önskvärt även för PNT-ändamål. Däremot är de nödvändiga datatakterna för PNT-behov inte lika höga som för kommunikation, vilket kan innebära att enklare antennlösningar kan användas. Fasstyrd antenner medför robusthet i form av störskydd vilket är en fördel om systemet ska operera i en telestörd miljö. Med tanke på tidshorizonten för utvecklingen och realiseringen av dedikerade PNT-konstellationer kan antennutvecklingen förändras, där antingen nya lösningar framträder eller att fasstyrd antenner blir ännu mer effektiva och tillgängliga. Troligen lär antennlösningen för de dedikerade PNT-systemen likna dagens fasstyrd antensystem för satellitkommunikation då liknande frekvensområde nyttjas och även på grund av den ökade robustheten som fasstyrd antenner medför. För lägre frekvensband är det svårare att realisera gruppantennor med lika många antennlement, varför enklare antennlösningar kan användas.

## 4 Hybrida LEO-PNT-system

Ett alternativ till dedikerade LEO-PNT-konstellationer är att modifiera befintliga satellitkommunikationssystem för att förse användare med PNT-information. Sådana system kallas för förbättrade satellitkommunikationssystem (eng. enhanced communications satellite systems). Kommunikationssatelliterna kan förses med en extra nyttolast som sänder information för PNT. Detta koncept kan beskrivas som att ”åka snålskjuts” (eng. piggybacking), men kan kräva en egen kommunikationskanal eller extra hårdvara. Ett alternativ är att integrera PNT-kapabilitet i det fysiska lagret i kommunikationssatelliten, s.k. hybridiserad PNT (eng. fused LEO-PNT). På så sätt nyttjas samma hårdvara för att sända både kommunikation och PNT-signaler.

Konceptet introducerades i [12] där författarna konstaterar att metoden med att modifiera kommunikationssatelliter med PNT-funktionalitet är realiserbar, på bekostnad av viss kommunikationsprestanda. Med antagandet att PNT-förmågan implementeras på Starlink beräknas att högst 1,6 % av nedlänkens kapacitet och 0,77 % av energin behöver reserveras för PNT vilket är försumbart sett till Starlinks förmåga. Den största kostnaden är att en del av satellitens förmåga att styra antennens huvudlob där majoriteten av energin fokuseras mot användare på marken, måste avsättas för att leverera PNT-information. Författarna uppskattar att 11,3 % av satellitens styrningsresurser behöver reserveras för PNT.

Konceptet i [12] förutsätter fasstyrd antenner på mottagarsidan för att kunna nyttja Starlinks kommunikationssignaler. En mottagare måste vara kapabel att använda samma resursallokeringschema som nätverkets konstellation använder. Om satelliten sänder smala lobar över hela frekvensbandet måste mottagaren ha en fasstyrd antenn som är kapabel att följa dessa.

Hybrida PNT-lösningar diskuteras bland annat inom kommande LEO-system ämnade för kommunikation, såsom EU:s kommande satellitkonstellation IRIS<sup>2</sup> [13, 14, 15, 16]. Planen är att IRIS<sup>2</sup> ska bestå av 290 satelliter i MEO-<sup>2</sup> och LEO-banor. IRIS<sup>2</sup> förväntas vara i bruk omkring år 2030. Det ska noteras att förslagen kommer från forskargrupper utan koppling till IRIS<sup>2</sup>-projektet så det återstår att se huruvida det kommer ingå någon PNT-funktionalitet i den slutgiltiga konstellationen. Ett EU-ägt satellitkommunikationssystem med PNT-stöd skulle dock vara intressant för svenska PNT-ändamål. IRIS<sup>2</sup> ska kunna ge täckning i polära områden såsom Nordkalotten [14], och med dedikerat stöd för PNT-syften är det ett högaktuellt alternativ för positionering av UAV:er och patrullrobotar på Nordkalotten.

Ett exempel på ett operabelt kommersiellt LEO-PNT-system som kan anses vara av typen ”fused” är Satelles STL (Satellite Time and Location), som använder sig av Iridiumsattelliter. Tjänsten finns implementerad i form av nyttolaster på samtliga Iridiumsattelliter. STL nämns som en möjlig PNT-

---

<sup>2</sup> Medium earth orbit (2000 – 36000 km över havet).

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

lösning i [1], där det påpekas att det inte finns särskilt många indikationer på systemets faktiska prestanda, framförallt i dynamiska miljöer. STL är främst marknadsfört för tidsynkronisering av nätverk, som ett komplement till 5G-nätverk och som backup till kritisk infrastruktur. Faktiska tillgängliga mätresultat är knapphändiga. Enligt en rapport från USA:s transportdepartement [17] från år 2021, som undersöker och värderar alternativa kommersiella tekniker för GPS, lyfts Satelles STL fram som det bästa (tillgängliga) LEO-baserade systemet (och den näst bästa lösningen totalt sett). Enligt demoförsöken i rapporten ger STL:s lösning en tidsnoggrannhet på mellan 9 och 118 ns och ett positioneringsfel ned till 10 meter för stationära mottagare. Ett liknande test där Satelles deltog genomfördes år 2023 av EU:s DEFIS (Defence Industry and Space) för alternativa PNT-lösningar [18]. För stationära mottagare undersöktes positioneringsfelet i tre scenarier: 1, 14 och 100 dagar efter GNSS-avbrott. Satelles STL-lösning resulterade i ett horisontellt positioneringsfel på 17 meter och ett vertikalt positioneringsfel på 10 meter, för alla tre testfallen, vilket är liknande med vad som demonstrerades i [17].

I EU:s test dokumenterades även STL:s antennlösning. Där användes två stycken helixantennor av typen Tallysman HC610. Själva antennen är ganska liten (33 x 54,2 mm) men i försöket är hela antennlösningen monterat på ett ca 1,5 meter högt stativ. Det framgår inte om det finns komponenter i stativet som är väsentliga för mottagningen mer än att få upp antennen från marken. Förmodligen är det endast antennhuvudet som faktiskt behövs på ett mottagarsystem. Mottagaren som användes i testet var av typen PNT6220 från tillverkaren Jackson Labs Technologies [19]. Mottagaren innehåller flera delsystem, varav ett är Satelles STL och den är därför lite större än vad en dedikerad STL-mottagare förmodligen behöver vara. En något äldre mottagarmodul (STL-6200), även den från Jackson Labs, är mycket mindre [20]. Själva kretskortet är endast 36 x 51 mm vilket indikerar att de moderna modulerna kan göras väldigt små. Det är inte tydligt om ytterligare hårdvara behövs för att använda STL-funktionaliteten.

Iridium har annonserat en egen ny mottagare för Satelles STL, kallad Iridium PNT ASIC, som planeras lansera i mitten av 2026 med bra SWaP<sup>3</sup>-egenskaper och viss ökad robusthet. Mottagaren är flexibel och kan använda signaler från antingen bara Iridiums LEO-satelliter eller en kombination av signaler från satelliter av både Iridium LEO och GNSS för att ta fram en PNT-lösning [21, 22].

Baserat på de antenner och mottagare som existerar för STL är det troligen möjligt att de kan implementeras på exempelvis en patrullrobot. Men för att få en bättre förståelse av hur Satelles STL faktiskt presterar i en PNT-kontext, framförallt i dynamiska scenarier, samt vilka plattformskrav en sådan mottagare med antennlösning medför, behöver systemet studeras genom praktiska försök i realistiska operationsmiljöer.

## 5 Opportunistiska LEO-PNT-system

Opportunistisk PNT innebär att mottagaren nyttjar signaler som är avsedda för andra tillämpningar för PNT-ändamål. För fallet med LEO-PNT innebär det att använda sig av kommunikationssignalerna från den stora mängd satelliter som existerar i de låga omloppsbanorna idag. Tillräckligt noggrann positionering från detta är svårt att uppnå på grund av två aspekter: klockfel (osäkerhet i tidsangivelser från satellit- och mottagarklockor) samt banfel (s.k. efemerider, satelliten befinner sig inte exakt i den position som förutsagts). Som nämnts skickas inte klock- eller banfelskorrektion från de existerande LEO-satelliterna. Dessa måste därför estimeras och kompenseras för. Modeller för dessa fel har först under de senaste åren lyckats ge tillräckligt bra lösningar för att nå positioneringsfel under 10 meter.

---

<sup>3</sup> Storlek, vikt och effekt (eng. Size, Weight and Power).

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

Idag finns det redan en mängd satellitkonstellationer i LEO-banor. I Tabell 2 nedan presenteras de konstellationer med flest uppskjutna satelliter tillsammans med några av deras egenskaper.

*Tabell 2.* De nuvarande största satellitkonstellationerna inom LEO samt några av de största planerade konstellationerna Qianfan, E-Space och Honghu-3, tagna ur [23, 24, 25], under november 2025. Notera att dessa siffror uppdateras vecko- eller månadsvis. Inklinationsvinklarna är baserade på respektive konstellers huvudsakliga satellitbanor. Frekvensband: UHF (0,3–3 GHz), L (1–2 GHz), S (2–4 GHz), X (8–12 GHz), Ku (12–18 GHz), Ka (27–40 GHz), Q (33–50 GHz), V (40–75 GHz).

Konstellation & Aktör	Land	Inklination	Antal aktiva satelliter	Planerade nya antal satelliter	Frekvensband	Applikation
Starlink – SpaceX	US	43–53°	7559	41 584	Ku, Ka, V	Kommunikation
OneWeb – Eutelsat Group	UK	88°	644	588	Ku, Ka	Kommunikation
Starshield – SpaceX	US	70°	127	32	X, Ku, Ka	Kommunikation
Jilin – Chang Guang Satellite Technology Corporation	CN	98°	107	100	-	Bildtagning
Planet – Planet Labs PBC	US	52°	103	150	S, X	Bildtagning
Qianfan – Shanghai Spacesail Technologies	CN	89°	69	15 000	Ku, Q, V	Kommunikation
Iridium – Iridium	US	86°	67	75	L	Kommunikation
Guowang – China Satellite Network Group (SatNet)	CN	86°	63	13 000	-	Kommunikation
Kuiper – Amazon	US	30–52°	52	3232	Ku, Ka	Kommunikation
Spire – Spire	US	52°	31	90	UHF, S, X, Ku	Väderprognoser och spårning av flygfarkoster
E-Space – E-Space	US	0–98°	5	337 323	-	Kommunikation
Honghu-3 – Hongqing Technology	CN	45–60°	0	10 000	-	Kommunikation

Från informationen i Tabell 2 kan det noteras att Starlink tydligt leder utvecklingen gällande mängden satelliter inom LEO. Många av konstellationerna prioriterar polärbanor med inklinationsvinklar nära 90°, trots att Starlink med sin överlägset största mängd satelliter främst har andra omloppsbanor. De olika konstellationerna arbetar inom flera olika frekvensspektrum och det är tydligt att det finns planer på att skicka upp många fler satelliter till LEO, se exempelvis den stora mängden registrerade och planerade satelliter hos E-Space på 337 323 stycken. Enligt [23] och [24], som har data om de kända LEO-konstellationerna, finns i skrivande stund över 563 000 registrerade och planerade satelliter inom LEO. I Tabell 2 syns även att USA-baserade aktörer ligger i framkant sett till antalet satelliter inom LEO, med Storbritannien och Kina strax därefter. Kina har dock större planer på framtida konstellationer än Storbritannien just nu. Andra nationer än dessa, samt organisationer och privata aktörer har också planer på att skjuta upp egna satelliter för att säkerställa robust operativ funktionalitet utan att behöva förlita sig på andras system, eller för att komma åt marknadsandelar [26].

LEO-satelliterna nyttjar i stort sett hela frekvensbandet från UHF (0,3–3 GHz) till V-bandet (40–75 GHz) för ändamål som kommunikation, TV, radioastronomi med mera. De lägre frekvensbanden används oftast för låghastighetskommunikation, exempelvis IoT-tjänster (Internet of Things), medan vissa nya system har börjat experimentera med V-bandet för att öka kapaciteten och möjligheterna för framtida tjänster. För opportunistisk PNT är det specifikt signalerna på 10,7–12,7 GHz som är mest intressanta, eftersom dessa frekvensband oftast används för kommunikation [27]. Enligt [28] påverkas höga frekvenser, såsom Ku-bandet, inte nämnvärt av jonofärsstörningar men de är däremot känsliga mot regn.

Starlink är en av de mest mogna konstellationerna med störst antal satelliter i omloppsbanan och har därför varit en fokuspunkt för forskning som försöker utnyttja Starlink-signaler för PNT-ändamål.

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

År 2023 lyckades en forskargrupp [27] identifiera delar av Starlinks signalstruktur och extrahera synkroniseringssekvenser som kan utnyttjas genom att analysera signalernas tid- och frekvensgenskaper för att möjliggöra positionering.

Efter att Starlinks synkroniseringssekvenser blev identifierade fokuserade ett annat forskarlag på att ta fram hela signalen [29]. På så sätt kan ett antal beständiga signalegenskaper användas för PNT. Vid en mätning togs signaler från 63 Starlink-satelliter emot och användes för att beräkna positionen för en användare genom att utnyttja signalernas doppleregenskaper, vilket resulterade i ett maximalt positioneringsfel på två meter över 20 sekunder.

I [30] härleds modeller för att positionera en UAV på fyra olika sätt via korrigering av efemerider för olika LEO-konstellationer. Tre av lösningarna resulterade i positioneringsfel på under tio meter och med den bästa på 1,51 meter. Notera att de hittills presenterade resultaten är framtagna offline med efterbearbetning och innehåller således mer eller mindre tillrättalagda resultat. Trots detta är dessa resultat lovande gällande opportunistisk PNT från LEO-konstellationer, men notera att majoriteten av Starlinks satelliter är koncentrerade på latituder mellan 43–53°. Eftersom Sverige befinner sig på latituder över 55° kommer inte samma tillgång till Starlinks signaler att vara möjlig. Därför förväntas inte samma positioneringsnoggrannhet vara uppnåbar som i forskningsresultaten ovan, då de var gjorda i USA som befinner sig inom det koncentrerade täckningsområdet för Starlink. Däremot har användare i Sverige bättre tillgång till satellitsignalerna från konstellationerna som går i polära banor.

Majoriteten av försöken med opportunistisk LEO-PNT har utförts under tämligen gynnsamma förhållanden, på USA:s fastland med tillgång till hundratals satelliter. Endast en forskargrupp har genomfört studier om opportunistisk PNT norr om polcirkeln. I [31] upprättades en mätuppställning ombord på ett fartyg som navigerade längs Grönlands västkust (utanför Ilulissat – 69:e breddgraden), längs en drygt åtta km lång sträcka (under 20 minuter). Under färden samlades data in från totalt tolv Starlink- och nio OneWeb-satelliter. Genom att kombinera data från LEO-satelliterna med data från en altimeter och ett antal antaganden kring skeppets dynamik kunde de påvisa ett slutgiltigt positionsfel på 27 meter, med ett medelfel på 119 meter. Det framgår dock inte huruvida detta var realtidsberäkningar eller ej, men förmodligen är det efterbearbetning det handlar om.

En annan intressant utveckling är Starlinks nytillskott till sin konstellation med drygt 600 satelliter som befinner sig ännu närmare jordytan på 360 kilometers altitud. Dessa tar vara på signalerna från de existerande Starlink-satelliterna som ligger i högre omloppsbanor och agerar själva som satellitmobilmaster. Detta för att leverera data direkt till vanliga LTE-mobiler med små antennelement och radiomottagare. Denna förmåga kallas ”Starlink Direct to Cell” och SpaceX har dessutom köpt rättigheter till ett spektrum inom S-bandet för nästa generation av denna konstellation [32].

För att använda kommunikationssignaler för opportunistisk LEO-PNT har forskargrupperna hittills använt sig av olika antenner och mottagare för att ta emot och använda signalerna. I [27] användes en parabolantenn med en diameter på 90 cm för att observera Starlinksignaler och i [33] användes en helixantenn och flera parabolantenner med en diameter på uppskattningsvis några decimeter för att observera kommunikationssignaler från Orbcomm, Iridium, Starlink och OneWeb. I det senare fallet med [33] hade antennerna en fix orientering och var fastmonterade på taket på en bil. Detta till skillnad från i [27] som använde en stationär men styrbar antenn tillsammans med Starlinks publika data om sina satelliters omloppsbanor för att spåra en satellit åt gången. Rapporterna presenterar sällan detaljerad information om de använda antennernas fysiska dimensioner, men produktspecifikationerna för de vanligaste antennerna för Starlink, OneWeb och Iridium för mobila plattformar finns sammanställda i Tabell 3. I [33] användes totalt tre mottagare av två olika sorter vars dimensioner och vikt ges i Tabell 4.

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

Tabell 3. Några av de vanligaste antennerna för mottagande av kommunikationssignaler från LEO-konstellationer till mobila plattformar, där D = diameter, H = höjd [34, 35, 36].

Rektangulära antenner	L x B x H [cm]	Vikt [kg]
StarLink Performance, Gen3	60,9 x 39,6 x 4,0	5,2
Intellian OW10HV (OneWeb)	56,0 x 45,0 x 12,0	12,2
Cirkulära antenner	D x H [cm]	Vikt [kg]
Intellian C700 (Iridium)	37,0 x 27,0	7,3

Tabell 4. Mottagarna som användes i forskningsrapporten [33] med sitt bilmonterade system och deras dimensioner och vikt [37, 38].

Radiomottagare	L x B x H [cm]	Vikt [kg]
USRP B205mini-i	8,3 x 5,1 x 0,8	0,02
USRP NI-2954	26,7 x 4,1 x 21,8	1,59

Den experimentuppsättning som användes i försöket norr om polcirkeln [31] innehöll hårdvara för sampling och behandling av data, monterad i en större låda, tillsammans med antenner för Starlink- och OneWeb-konstellationerna. Lådan var i sitt befintliga tillstånd för stor och otympligt för att kunna integreras på en flygande plattform. Antennerna som används för majoriteten av experimentuppställningarna inom opportunistisk PNT är i många fall samma som kommunikationsantennerna, oftast med fasstyvningsförmåga. Dessa är oftast för stora eller tunga för att kunna integreras på lättare mobila plattformar såsom UAV:er och patrullrobotar. Mindre kommersiella antenner existerar dock, exempelvis Starlinks mini (299 x 259 x 39 mm, 1,1 kg). I Ukraina har Starlinkterminaler integrerats på multikopter-UAV:er [39] vilket indikerar att antennstorleken inte nödvändigtvis är ett hinder för plattformintegration. Fasstyrda gruppantenn kan göras små på högre frekvensband (> 10 GHz), där tusentals antennelement kan få plats på en 0,2 m<sup>2</sup> yta [39]

I dessa forskningsrapporter har ingen särskild hänsyn tagits till någon plattformsspecifik design på antenner och mottagare. Storleken på deras radioinstrument ger dock någon indikation av vilka plattformar som kan tänkas vara lämpliga för opportunistisk LEO-PNT idag.

SpaceX nya tjänst ”Starlink Direct to Cell” visar att deras signaler kan upptäckas även med små antenner och små mottagare, men ingen har ännu hunnit försöka att nyttja dessa signaler för opportunistisk PNT. Det går således inte att titta på några förmågor för opportunistisk PNT från antenner och mottagare i denna storleksordning än, men bara genom att signalerna används på LTE-mobiler visar åtminstone på en teoretisk framtida förmåga.

## 6 Slutsatser

Möjligheten till noggrann positionering och navigering på Nordkalotten begränsas av ett flertal utmaningar. Låg satellitvisibilitet, jonosfäriska störningar, svåra väderförhållanden och begränsad täckning är några av faktorerna som påverkar prestandan för traditionell GNSS. Med LEO-satelliter kan vissa av svårigheterna jämfört med GNSS motverkas till viss mån, exempelvis genom att satelliterna är närmare jordytan, i polära omloppsbanor, och använder högre frekvensområden som inte påverkas lika mycket av störningar i jonosfären. Dessa egenskaper varierar dock beroende på vilken konstellation som avses. Starlink, med absolut flest satelliter i omlopp, har majoriteten av satelliterna i omloppsbanor runt ekvatorn. OneWeb, som den näst största civila aktören, har sina satelliter i polära omloppsbanor vilket gynnar visibiliteten på Nordkalotten jämfört med Starlink. Frekvensområdet för dessa konstellationer som är ämnade för kommunikation är ovanför 10 GHz, vilket inte påverkas nämnvärt av jonosfären.

PNT genom nyttjande av låga satellitomloppsbanor är ett relativt nytt forskningsområde. För tillfället existerar inga dedikerade LEO-konstellationer för PNT-ändamål, och av de som är på gång är det fortfarande troligen minst fem år innan det finns något som kan användas i full skala.

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

Alternativa lösningar, som hybridiserad LEO-PNT, är också en möjlig framtidsteknik som skulle kunna implementeras i kommande konstellationer såsom EU:s IRIS<sup>2</sup>. Funktionaliteten existerar redan kommersiellt i form av Iridium/Satelles STL, men det är inte tydligt hur bra positionslösningen som STL levererar faktiskt är, framförallt för mobila plattformar. Speciellt svårt är det att sja om vilka felmarginaler som erhålls i utmanande operationsmiljöer såsom på Nordkalotten. För att gå vidare i det här steget krävs tester och utvärdering av den faktiska produkten så som den är tänkt att användas av Försvarsmakten.

Den på kort sikt mest lovande LEO-PNT-lösningen är att använda signalerna från LEO-satelliterna opportunistiskt. Inom akademien är det sådana metoder som dominerar, där det byggs egna mottagarsystem, utvecklas algoritmer för att kompensera för osäkerheter och felmarginaler, och testas på riktigt mot olika okända LEO-satelliter. Däremot är mycket av det som dyker upp i litteraturen oanvändbart för positioneringsändamål på Nordkalotten. Framförallt sker tester och utvärderingar under gynnsamma förhållanden, med tillgång till fördelaktig mängd data och stöttande sensorer. Många lösningar baseras även på beräkningar offline, efterbearbetning av signalerna eller simuleringar av satellitdata. En tredje aspekt är att det sällan tas hänsyn till fysiska begränsningar på mottagarplattformen. Hårdvaran kan förmodligen i många fall minimeras, och erfarenheter från kriget i Ukraina tyder på att mottagare och antenner kan monteras på flygande plattformar. Till sist är det en brist på relevanta försök i arktiska miljöer med utmaningar såsom Nordkalotten medför.

Trots bristerna är opportunistisk LEO-PNT den mest lovande tekniken i dagsläget. För att få en tydligare förståelse av teknikens möjligheter och begränsningar bör egna system utvecklas och utvärderas i den faktiska operationsmiljön.

## 7 Referenser

- [1] J. Rantakokko et al, "PNT på Nordkalotten - utmaningar och möjligheter," Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Memo 8731, 2024.
- [2] C. Andersson et al, "Ett förändrat Arktis," Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI-R--3654--SE, 2013.
- [3] E. Tusin Dayo, "Mitigation of Rain Fade Effect at the Ku Band Using Sute Duversity Techniques," *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 6, nr 7, pp. 1-6, 2021.
- [4] "Satellitemap," [Online]. <https://satellitemap.space/>. [Använd 4 november 2025].
- [5] Z. Komodromos, S. Morgan, Z. Clements, W. Qin, J. Morrison och T. Humphreys, "Network-Aided Pseudorange-Based LEO PNT from OneWeb," IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2025.
- [6] T. Pultarova, "Inside the race to find GPS alternatives," MIT Technology Review, 6 juni 2025. [Online]. <https://www.technologyreview.com/2025/06/06/1117978/inside-the-race-to-find-gps-alternatives/>. [Använd 3 oktober 2025].
- [7] P. Gutierrez, "ESA: LEO PNT A Game Changer," Inside GNSS, 18 januari 2024. [Online]. <https://insidegnss.com/esa-leo-pnt-a-game-changer/>. [Använd 7 november 2025].
- [8] E. Rubinov, "The Rise Of LEO PNT - A new era in satellite navigation," *SatMagazine*, maj 2025.
- [9] Inside GNSS, "LEO PNT: A Fundamental Evolution to Answer New Application Needs," Inside GNSS, 4 juni 2025. [Online]. <https://insidegnss.com/leo-pnt-a-fundamental-evolution-to-answer-new-application-needs/>. [Använd 7 november 2025].

Titel/Title  
LEO-PNT på NordkalottenMemo nummer/Number  
FOI Memo 9117

- [10] I. Merino-Fernandez, S. Khemchandani, J. del Pino och J. Sais-Perez, "Phased Array Antenna Analysis Workflow Applied to Gateways for LEO Satellite Communications," *Sensors*, vol. 22, nr 9406, p. 19, 2022.
- [11] G. He, X. Gao, L. Sun och R. Zhang, "A Review of Multibeam Phased Array Antennas as LEO Satellite Constellation Ground Station," *IEEE Access*, pp. 147142-147154, 29 oktober 2021.
- [12] P. Iannucci och T. Humphreys, "Fused low-Earth-orbit GNSS," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022.
- [13] "IRIS2," European Union Agency for the Space Programme, 25 april 2025. [Online]. <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/secure-satcom/iris2>.
- [14] SES Space and Defence, "IRIS2 Poised to Deliver New Era of Global MEO Coverage," SES Space and Defence, 8 maj 2025. [Online]. <https://sessd.com/gsr/iris2-poised-to-deliver-new-era-of-global-meo-coverage/>. [Använd 22 oktober 2025].
- [15] O. Picchi et al, "Fused PNT Performance Assessment from First to Second Generation User Terminal for an IRIS2 Constellation," i *Proceedings of the 38th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2025)*, 2025.
- [16] O. Picchi, F. Menzione, F. Soualle och J. Peral-Rosado, "Fused PNT on Future Wideband European Non-Terrestrial Network Infrastructure," i *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2025.
- [17] A. Hansen et al, "Complementary PNT and GPS Backup Technologies Demonstration Report," U.S. Department of Transportation, 2021.
- [18] L. Bonenberg, B. Motella och J. Fortuny Guash, "Assessing Alternative Positioning, Navigation and Timing Technologies for Potential Deployment in the EU," Publications Office of the European Union, 2023.
- [19] T. Cozzens, "Jackson Labs' PNT-6220 ready to protect critical infrastructure," 16 juni 2020. [Online]. <https://www.gpsworld.com/jackson-labs-pnt-6220-ready-to-protect-critical-infrastructure/>. [Använd 5 november 2025].
- [20] "New GNSS-Independent Receiver Generates Nanosecond Timing, Meter-Level Accuracy from Low-Earth Orbit Satellite Signals," *Inside GNSS*, 18 februari 2021. [Online]. <https://insidegnss.com/new-gnss-independent-receiver-generates-nanosecond-timing-meter-level-accuracy-from-low-earth-orbit-satellite-signals/>. [Använd 5 november 2025].
- [21] Iridium, "Iridium PNT ASIC," [Online]. <https://www.iridium.com/iridium-pnt/integration/iridium-pnt-asic/>. [Använd 5 december 2025].
- [22] T. Cozzens, "Iridium unveils global GPS device protection on a chip," 28 oktober 2025. [Online]. <https://www.gpsworld.com/iridium-unveils-global-gps-device-protection-on-a-chip/>. [Använd 5 december 2025].
- [23] J. McDowell, "Jonathan's Space Pages - Enormous ('Mega') Satellite Constellations," [Online]. <https://planet4589.org/space/con/conlist.html>. [Använd 30 september 2025].
- [24] J. McDowell, "Jonathan's Space Pages - Large LEO Satellite Constellations," [Online]. <https://planet4589.org/space/con/largecon.html>. [Använd 30 september 2025].
- [25] R. Kong, "NTN's New Power Player: Is China Aiming to Take the Lead in Space-Based Connectivity," *Via Satellite*, 25 augusti 2025. [Online]. <https://interactive.satellitetoday.com/via/september-2025/ntns-new-power-player-is-china-aiming-to-take-the-lead-in-space-based-connectivity>. [Använd 10 november 2025].
- [26] R. F. O'Loughlin, "Orbital ambitions: LEO satellite constellations and strategic competition," International Institute for Strategic Studies, 27 maj 2025. [Online]. <https://www.iiss.org/online-analysis/six-analytic-blog/2025/05/orbital-ambitions-leo-satellite-constellations-and-strategic-competition/>.

Titel/Title  
LEO-PNT på Nordkalotten

Memo nummer/Number  
FOI Memo 9117

- [27] T. E. Humphreys, P. A. Iannucci, Z. M. Komodromos och A. M. Graff, "Signal Structure of the Starlink Ku-Band Downlink," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 6016-6030, 2023.
- [28] C. Andersson et al, "Ett förändrat Arktis - En inledande kartläggning av FOI-kompetenser," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--3654--SE, 2013.
- [29] S. Kozhaya, J. Saroufim och Z. M. Kassas, "Starlink for PNT: A Trick or Treat?," i *ION GNSS+*, Baltimore, 2024.
- [30] J. Saroufim, S. Hayek, S. Kozhaya och K. Z. M., "Improved LEO PNT Accuracy Enabled by Long Baseline Ephemeris Corrections," i *ION GNSS+*, Baltimore, 2024.
- [31] W. Barrett, S. Kozhaya, Z. Kassas och D. Marsh, "Navigating the Arctic Circle with Starlink and OneWeb LEO Satellites," i *IEEE Conference on Military Communications (MILCOM)*, 2025.
- [32] SpaceX, "SpaceX - Updates," 8 september 2025. [Online].  
<https://www.spacex.com/updates#dtc-gen2-spectrum>. [Använd 27 oktober 2025].
- [33] S. Hayek, J. Saroufim, S. Kozhaya, W. Barret och Z. M. Kassas, "Demonstration of Ground Vehicle Navigation with Non-cooperative Multi-constellation LEO Satellites," i *ION GNSS+*, Baltimore, 2024.
- [34] StarLink, "StarLink Performance Specifications".
- [35] Intellian Technologies, "OW10HV Compact Flat Panel for Land Mobility Data Sheet," Intellian Technologies, 2025.
- [36] Intellian Technologies, "C700 Iridium Certus Maritime Terminal Product Datasheet," Intellian Technologies, 2025.
- [37] Digilent, "USRP B205mini-i: 1x1 USB Software-Defined Radio Platform".
- [38] National Instruments, "USRP-2954 Specifications," 2017.
- [39] J. Rantakokko och J. Nygård, "Obemannade farkoster för markstriden - erfarenheter från Ukraina," Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI-R--5723--SE, 2025.