

Daniel Johansson

Tidsynkronisering av ett TDOA-baserat positioneringssystem

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Ledningssystem
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--0649--SE

December 2002

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Daniel Johansson

Tidsynkronisering av ett TDOA-baserat positioneringssystem

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0649--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år December 2002	Projektnummer E 7059
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
Författare/redaktör Daniel Johansson	Projektledare Stefan Ahlgren	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Johan Falk	
Rapportens titel Tidsynkronisering av ett TDOA-baserat positioneringssystem		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>Rapporten redovisar möjligheter och svårigheter för att synkront samla in data till geografiskt skilda TDOA-mottagare. Synkront har i detta fall specificerats till 10 ns maximal tidsavvikelse mellan två mottagare under ett dygn. Ett utvärderingsarbete har gjorts för att inventera beprövade metoder och på marknaden befintliga produkter för att slutligen ge förslag för hur en synkron datainsamling skall realiseras. Utvärderingar grundar sig framförallt på prestanda- prövning men också grad av komplexitet och tillgänglighet finns med som utvärderingsfaktorer.</p> <p>Utvärderingsarbetet visar att "självständiga" oscillatorer inte lämpar sig för ett TDOA-system, varför en gemensam tidreferens krävs för att få mottagarna att arbeta synkront. En lösning, som bedöms vara lämplig, är att tillämpa "common-view" mot GPS-signaler vilket innebär att två eller flera mottagare observerar samma GPS-satellit för att på så vis reducera gemensamma fel såsom drift i satellitklocka, atmosfärsfördröjningar etcetera. Ett annat alternativ, för att med ännu bättre prestanda, realisera en synkron datainsamling är att använda GPS bärvågsmottagare som innebär att fasskillnad av GPS-bärvågen mäts vid respektive mätplats för att vidare jämföras mot varandra.</p> <p>För en taktisk TDOA-pejl krävs dock redundans i systemet för att vid ett eventuellt bortfall av GPS-signalen låta en annan referens, i form av mycket stabila oscillatorer och/eller alternativ "extern" tidskälla, ta över.</p>		
Nyckelord TDOA, synkronisering, tidreferens, oscillatorer, GPS, common-view, GPSDO		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 54 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0649--SE	Report type Technical report
	Research area code 6. Electronic Warfare	
	Month year December 2002	Project no. E 7059
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Daniel Johansson	Project manager Stefan Ahlgren	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible Johan Falk	
Report title (In translation) Time synchronization of a TDOA-based position finding system		
Abstract (not more than 200 words) <p>In this report the possibilities and problems on synchronous data acquisition for geographically separated TDOA-receivers are considered. In this case, the receiver's synchronization is specified to max 10 ns deviation for 24 hours. An inventory of reliable methods and existing products has been made. Performance, price, complexity and availability are factors that were taken into consideration in the evaluation.</p> <p>The evaluation shows that undisciplined oscillators are unsuitable for a TDOA system, and because of that a common reference are necessary to make the receivers work synchronous. The proposed solution is to use common-view against GPS signals which means that several receivers observes the same GPS satellites to reduce errors in satellite clocks, delays in the atmosphere etcetera. Another solution, with even better performance, is using the carrier phase of the GPS signal which means that the carrier phase is measured and compared between respective receiver station.</p> <p>For a tactical TDOA system redundancy is necessary. This is issued using a very stable oscillator disciplined by the GPS when present.</p>		
Keywords TDOA, synchronization, time reference, oscillators, GPS, common-view, GPSDO		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 54 p.	
	Price acc. to pricelist	

FOI-R--0649--SE

INNEHÅLL

Förkortningar och definitioner.....	9
Inledning.....	11
1.1 Bakgrund	11
1.2 Syfte.....	11
1.3 Beskrivning av en TDOA-pejl	12
Metod	15
Prestandakrav.....	17
3.1 Avstånd mellan mottagare.....	17
3.2 Fasfel mellan LO-signaler	18
3.3 Tidsfel mellan sampelklockor.....	18
Oscillatorer	21
4.1 Kvartskristalloscillator.....	21
4.2 Rubidiumoscillator.....	22
4.3 Cesiumoscillator	23
4.4 Sammanställning	24
Markbunden tidsdistribution.....	25
5.1 Koaxialkablar och fiberledningar.....	25
5.2 DCF77	26
5.3 Loran-C (Long Range Navigation).....	28
5.4 TV-signaler.....	30
Satellitbaserad tidsdistribution	31
6.1 NAVSTAR GPS	31
6.1.1 Felkällor.....	33
6.1.2 Common-view GPS.....	37
6.1.3 Fasmätning av satellitsignalens bärvåg.....	42
6.1.4 Datautbyte mellan mottagare	43
6.2 GLONASS.....	43
6.3 Galileo.....	44
6.4 TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer)	44
6.5 TV-satelliter.....	45
GPS-disciplinerade oscillatorer (GPSDO)	47
Slutsats.....	49
Referenser.....	53

FOI-R--0649--SE

FÖRKORTNINGAR OCH DEFINITIONER

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures: Den internationella byrån för mått och vikt
C/A	Coarse/Acquisition: GPS-kod som kan användas av civila GPS-mottagare
Cs	Cesium
CV	Common-View
Galileo	Europeiskt satellitnavigeringssystem som skall vara under civil kontroll. Befinner sig nu i utvecklingsfasen. Beräknat att vara i full drift 2008.
GLONASS	GLOBAL NAVIGATION Satellite System: ryskt satellitbaserat positioneringssystem
GNSS	Global Navigation Satellite Systems: ett samlingsnamn för globala satellitbaserade system för navigation och positionsbestämning
GPS	Global Position System: amerikanskt satellitbaserat positioneringssystem (NAVSTAR GPS)
GPSDO	GPS-Disciplinerad Oscillator
GRI	Group Repetition Interval: sändningsintervall för "kedjor" i navigationssystemet Loran-C
Loran	LONG RANGE Navigation: markbundet 2D navigationssystem
LO	LokalOscillator

NAVSTAR	NAVigation System with Time And Ranging
OCXO	Owen Controlled Crystal Oscillator
P-code	Precise code (Protected Code): GPS-kod som kan nyttjas av USA och dess allierade
PPS	Pulse Per Second
PRN	Pseudo Random Noise
Rb	Rubidium
SA	Selective Availability: av USA:s Försvarsdepartement medveten störning av GPS C/A-kod
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillator
TDOA	Time Difference Of Arrival
TEC	Total Electron Count
TWSTFT	Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer
UCXO	UnCompensated Crystal Oscillator
UTC	Universal Time Coordinated. Världsstidskalan, baseras på atomsekunden men följer jordens rotation. Svensk lokal tid är UTC + 1 h under ”normaltid” och UTC + 2 h under sommartid.
VHF/UHF	Frekvensband som täcker 30 – 3000 MHz.

Kapitel 1

INLEDNING

1.1 Bakgrund

Genom att mäta ankomsttidsskillnad för en signal mellan flera geografiskt skilda mottagare kan signalkällans position skattas. Denna metod kallas TDOA (Time Difference Of Arrival) och är en hyperbolisk pejlmätning som ofta associeras med RADAR samt mobiltelefonnät.

På FOI, Institutionen för Telekrigsystem, har ett delprojekt för TDOA-baserad pejling nyligen startats (våren 2002) där en TDOA-pejldemonstrator för VHF/UHF-bandet skall byggas under nästkommande år.

Eftersom hela idén med ett TDOA-system går ut på att mäta tid är det av yttersta vikt att mottagarna arbetar synkront mot varandra. Detta gäller framförallt då mottagarna placerats relativt nära varandra då skillnaden mellan respektive ankomsttid blir liten. Att få mottagarna att arbeta synkront har hittills varit ett av de största problemen vid TDOA-mätningar.

Ett utvärderingsarbete angående tidssynkronisering har gjorts och presenteras i denna rapport. Utvärderingar grundar sig framförallt på prestanda-
prövning men också grad av komplexitet och tillgänglighet.

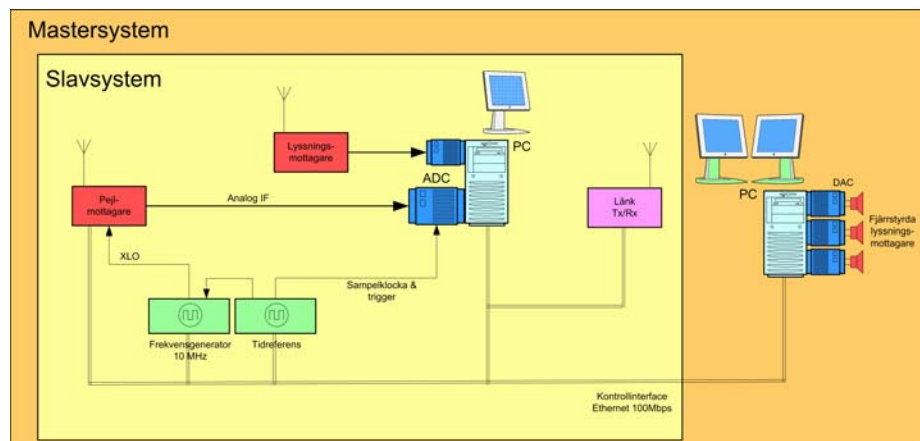
1.2 Syfte

Denna rapport syftar till att påvisa möjligheter och svårigheter för att synkront samla in data till geografiskt skilda TDOA-mottagare. Utvärderingsarbetet syftar också till att bygga upp kunskap kring de lösningar marknaden idag erbjuder, både gällande produkter och beprövade metoder.

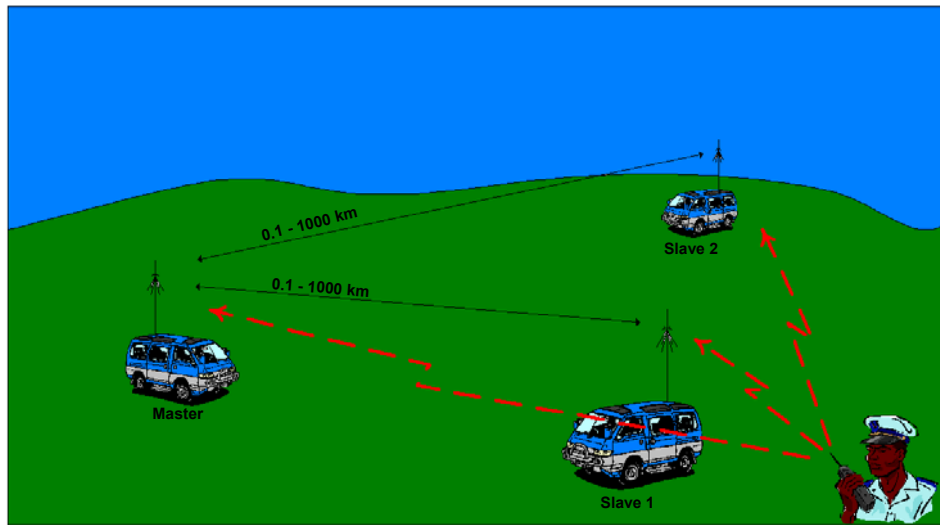
1.3 Beskrivning av en TDOA-pejl

En TDOA-mottagare kan i sin enkelhet beskrivas som en dator bestyckad med en A/D-omvandlare som samlar in data från en radiomottagare vars LO-signal hämtas från en extern oscillator. Denna oscillator samt A/D-omvandlarens styrsignaler fasläses till en väl definierad referensoscillator som skall vara synkroniserad mot en annan TDOA-mottagare (se figur 1).

För att positionsbestämma en emitter krävs minst tre TDOA-mottagare. En av dessa tre mottagare fungerar som master (överordnad mottagare) vars uppgift är att samla in data, både från dess egna pejl-mottagare och från de utplacerade slavmottagarna, för vidare bearbetning och presentation (se figur 2). Vid långa avstånd mellan mottagarna sker dataöverföringen med någon form av radiolänk. I detta avseende är det tillräckligt med enkelriktad kommunikation (slav till master) vilket innebär att masterstationen kan vara ”radiotyst”.



Figur 1: Generellt blockschema för en TDOA-mottagare (master/slave).



Figur 2: Blockbeskrivning över en TDOA-pejl där tre mottagare (en master och två slavstationer) är separerade 0.1 till 1000 km från varandra för att positionsbestämma en emitter.

FOI-R--0649--SE

Kapitel 2

METOD

För att utvärdera olika metoder för gemensam tid/frekvensreferens i en TDOA-mottagare har framförallt befintliga metoder studerats. Undersökning av marknadens utbud har gjorts i samråd med experter och leverantörer inom området för att få en uppfattning om vad som är möjligt att realisera med befintliga produkter och metoder.

Med utgångspunkt från synkroniseringens prestandakrav har metoder och produkter utvärderats för att med en rimlig kostnad kunna realisera en noggrann referensälla för en TDOA-mottagare. Slutsatser av utvärderingsarbetet och förslag på lösningar presenteras i denna rapport.

FOI-R--0649--SE

Kapitel 3

PRESTANDAKRAV

Synkroniseringsproblem har hittills varit ett av de största problemen vid realisering av TDOA-system och extra hårda krav ställs på synkronism då TDOA-mottagarna placerats relativt nära varandra. Den TDOA-demonstrator som realiseras under 2003 kommer inte att vara avsedd för taktiskt bruk då avsikten med denna demonstrator är kunskapsuppbyggnad kring TDOA-tekniken samt att påvisa möjligheterna för att realisera en TDOA-pejl för VHF/UHF-bandet. Eftersom demonstratorn i första hand inte är avsedd för taktiskt bruk har prestandakraven koncentrerats mot en fungerande pejl, krav på exempelvis temperaturlåghet, robusthet och realtidspejling finns inte med i kravspecifikationen.

3.1 Avstånd mellan mottagare

En av styrkorna med TDOA-pejling är en flexibel lösning med relativt små mottagare som är enkla att omgruppera. Mottagarna skall kunna vara separerade 100 meter till 1000 km från varandra, vilket innebär att det inte alltid går att synkronisera mottagarna via en fysisk ledare (t.ex. koaxialkabel). Ju närmare mottagarna är belägna relativt varandra, desto högre krav ställs på att mottagarna arbetar synkront (se tabell 1).

		Avstånd mellan antenner					
		1 m	10 m	100 m	1 km	10 km	1000 km
Tidsfel	100 ps	$\pm 2.7^\circ$	$\pm 0.27^\circ$	$\pm 0.027^\circ$	$\pm 0.0027^\circ$	$\pm 0.00027^\circ$	$\sim 0^\circ$
	1 ns	$\pm 27^\circ$	$\pm 2.7^\circ$	$\pm 0.27^\circ$	$\pm 0.027^\circ$	$\pm 0.0027^\circ$	$\pm 0.00027^\circ$
	10 ns	-	$\pm 27^\circ$	$\pm 2.7^\circ$	$\pm 0.27^\circ$	$\pm 0.027^\circ$	$\pm 0.0027^\circ$
	100 ns	-	-	$\pm 27^\circ$	$\pm 2.7^\circ$	$\pm 0.27^\circ$	$\pm 0.027^\circ$
	1 us	-	-	-	$\pm 27^\circ$	$\pm 2.7^\circ$	$\pm 0.27^\circ$

Tabell 1: Approximativt vinkelfel vid TDOA-skattning för olika antennavstånd och tidsfel.

3.2 Fäsfel mellan LO-signaler

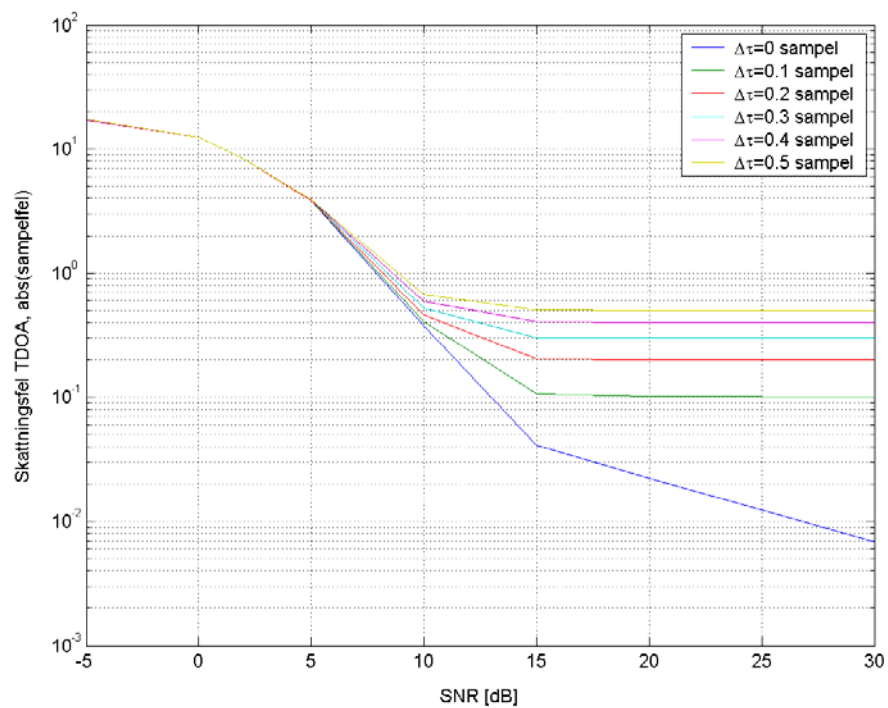
För att veta hur fas- och frekvensdifferenser mellan två eller flera mottagare påverkar TDOA-skattningen har simuleringar i Matlab gjorts. I Matlab-programmet har en mottagarmodell byggts upp där LO-signalerna till blandarstegen kunde ändras, detta för att påvisa att fasskillnader mellan olika LO-steg inte ställer till med bekymmer vid beräkning av ankomsttidsskillnad [1].

3.3 Tidsfel mellan sampelklockor

Simuleringar visar dock att mottagarnas sampelklockor inte får skilja alltför mycket eftersom tidsvariationer mellan klockorna påverkar TDOA-skattningen. Det är ju just en tidsskillnad mellan respektive mottagares samplade indata som skall mätas. Skulle däremot datainsamlingen påbörjas vid olika tidpunkter hos de olika mottagarna kan detta enkelt justeras i efterhand, förutsatt att denna tidsskillnad är känd [1]. Figur 3 visar simuleringsresultat för signal-brus-förhållandets påverkan av TDOA-skattningen vid olika sampelfel.

Den maximala tidsavvikelsen mellan två mottagarklockor har specificerats att maximalt få uppgå till 10 ns under 1 dygn, vilket innebär att ett vinkelfel med $\pm 0.27^\circ$ vid antennseparationen 1 km tolereras (enligt tabell 1). Det är däremot inte nödvändigt att mottagarnas tid/frekvensreferens är synkroniserade mot UTC¹, huvudsaken är att skillnaden mellan de olika mottagarenheterna begränsas.

¹ UTC (Universal Time Coordinated): Världstidsskalan (tidigare GMT (Greenwich Mean Time)). Baseras på atomsekunden men följer jordens rotation. Upprätthålls genom medelvärdesbildning av cirka 230 atomur placerade vid nationella laboratorier.



Figur 3: Simuleringsresultat för signal-brus-förhållandets påverkan av TDOA-skattningen vid olika tidsfel (synkroniseringsfel [1]).

FOI-R--0649--SE

Kapitel 4

OSCILLATORER

För att ta reda på om det finns oscillatorer som klarar tidigare nämnda prestandakrav har olika oscillator typer studerats med hänsyn till stabilitet.

4.1 Kvartskristalloscillator

Kvartskristalloscillatorn är en mekanisk resonator som utnyttjar den piezoelektriska effekten. Genom att spänningssätta kristallen kan den fås att endera extrahera eller kontrahera, beroende av spänningskällans polaritet. Vid en pålagd växelspanning, med en viss frekvens, kommer kristallen att sättas i mekanisk resonans vars frekvens är unik för varje kristallindivid och beror bland annat på kristallens tjocklek och massa.

Kristallen ändrar bland annat sin elasticitet med ändrad temperatur vilket leder till att resonansfrekvensen blir temperaturkänslig. Varianter av kristalloscillatorer finns som kompenserar för denna typ av fel, så kallade TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator) och kan enkelt beskrivas som en kristalloscillator med temperaturgivare kopplad i en reglerkrets. OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator) är en annan variant av kristalloscillator som reducerar temperaturproblem. Här har man gjutit in kristallen i en värmeisolerad kapsel som håller konstant temperatur.

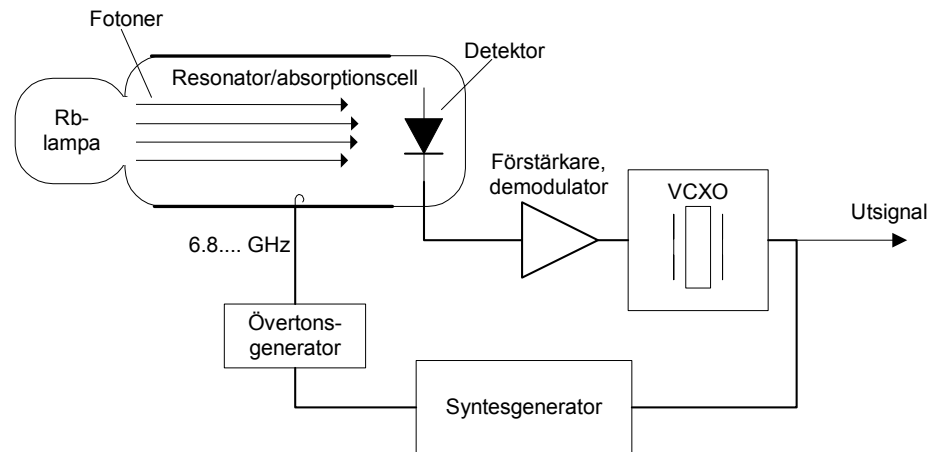
En annan stor faktor som kan påverka kristalloscillatorns resonansfrekvens är kristallens åldring, som bland annat beror på att främmande atomer eller molekyler med tiden diffunderar in i kristallen, eller på att atomer eller molekyler lämnar kristallen.

Stötar och gravitationsförändringar är andra orsaker till ostabilitet och är framförallt märkbara i ugnsstabiliserade kristalloscillatorer. För att undvika fel orsakade av ändrad gravitation är det viktigt att oscilatorn trimmas och används i dess normala driftläge. Stötar mot oscilatorn kan framförallt ge ändringar hos kringelektroniken men kan också påverka själva kristallens egenskaper något [2].

En kristalloscillator har i laboratoriemiljö en approximativ tidsdrift med cirka 10 μ s till 250 ms efter en dag beroende på kristalloscillatorns utförande [3].

4.2 Rubidiumoscillator

En rubidiumoscillator bygger på att övergångar mellan två väldefinierade energinivåer i Rb-atomen utnyttjas. Med hjälp av dessa energiövergångar styrs svängningarna från en kristaloscillator (integrerad i Rb-oscillatorn) till en mycket exakt och stabil frekvens. Blockschemata som beskriver hur en Rb-oscillator med dess ingående elektronikdelar kan vara uppbyggd visas i figur 4 nedan.



Figur 4: Blockschemata för en RB-baserad oscillator.

Denna typ av oscillator består av en glasbehållare innehållande rubidium som upphettas för att förångas Rb-atomerna. För att få Rb-atomerna att övergå till en högre energinivå tillförs en högfrekvent signal via en omgivande spole. Vid återgång till lägre energinivåer emitteras fotoner i vakuumbehållaren (Rb-lampan) som filtreras och ”strålar” in i en resonator (ibland även kallad mikrovågscell eller absorptionscell). En syntesgenerator är kopplad till resonatorn och beroende på hur väl syntesgeneratorns frekvens stämmer överens med referensfrekvensen² så absorberas fotonerna olika mycket i resonatorn. Ju bättre absorption av fotoner, desto bättre stämmer syntesgeneratorns frekvens överens med Rb-atomens referensfrekvens.

För att detektera hur mycket ljus som släppts igenom resonatorn används en fotodetektor, vilken ger en spänning som i sin tur styr en VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator). Det är denna oscillators utgång som är den fysiska utgången hos Rb-oscillatorn. Kristalloscillatorns utgång är dessutom återkopplad till syntesgeneratorn för att denna skall svänga in rätt vid avvikelser från kristalloscillatorns utgång [2].

² Referensfrekvensen för Rb är 6 834 682 613 Hz. Energin i en foton med frekvensen 6 834 682 613 Hz motsvarar skillnaden mellan de två lägsta energinivåerna hos Rb.

Typiskt tidsfel för en rubidiumbaserad oscillator beror till stor del av oscillatorns utförande (och därmed priset.) ”Dyra” Rb-oscillatorer ger efter en dag ett approximativt tidsfel med cirka 3 ns medan de billigare Rb-oscillatorerna kan ha ett relativt tidsfel med ungefär 1 μ s [3].

4.3 Cesiumoscillator

Likt Rb-oscillatorn bygger Cs-oscillatorn på principen att detektera övergången mellan två väldefinierade energinivåer och även i denna typ av oscillator läser man en kristalloscillator till en mer exakt och stabil referens, i detta fall cesiumatomen.

En sekund är den tid för 9 192 631 770 perioder av den strålning som motsvarar en övergång mellan två specifika energinivåer i grundtillståndet av isotopen Cesium-133. Denna definition av 1 s antogs som SI-standard 1967 och är anledningen till att Cs-133 är en primärstandard som aldrig behöver kalibreras mot högre normaler [2]. Däremot jämför internationella laboratorier sina Cs-oscillatorer sinsemellan. Till exempel är UTC ett viktat medelvärde mellan 230 atomur som finns fördelade på ca 60 olika laboratorier runt om i världen.

Approximativt tidsfel för en Cs-oscillator uppgår till 3 ns till 86 ns efter ett dygn men är, i jämförelse med tidigare nämnda oscillator typer, mer långtidsstabil [3].

4.4 Sammanställning

Att använda en helt fristående oscillator som tidreferens, med tidigare nämnda prestandakrav, i en TDOA-mottagare bedöms inte vara en lösning för synkron datainsamling. Exempelvis är det vanligt att en cesiumoscillator driver cirka 10 ns/dygn vilket innebär att tidsskillnaden mellan två oscillatorer (med nämnda prestanda) kan uppgå till 20 ns efter ett dygn. Dessutom är en Cs-oscillator relativt dyr, i storleksordningen 500 000 SEK (se tabell 2 för sammanställning). För att uppnå de specificerade prestandakraven krävs någon form av gemensam tidreferens för att TDOA-mottagarna skall arbeta synkront.

	XO	Rb	Cs
Stabilitet	ms/dag	µs/dag	ns/dag
Kostnad	kr	från 15 kkr	500 kkr
Storlek	små	bärbar	släpbar
Miljöpåverkan	stor	medel	liten

Tabell 2: Sammanställning av olika oscillator typer
(på marknaden vanliga prestanda).

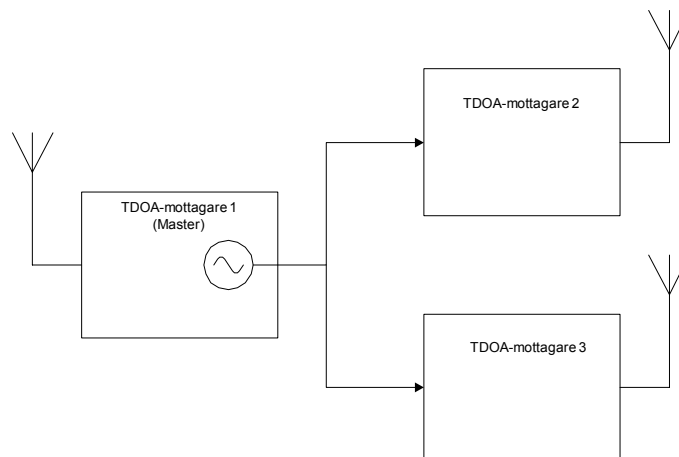
Kapitel 5

MARKBUNDEN TIDSDISTRIBUTION

Att låta synkroniseringen av geografiskt skilda mottagare ske via exempelvis internationella långvågssändare (t.e.x. Loran-C, DCF77) eller via TV-synkroniseringssignaler kan tyckas vara möjliga alternativ. En fördel med exempelvis långvågssystem är att de till skillnad mot GPS inte behöver ha fri optisk sikt mellan sändare och mottagare. Dock uppnår man ändå inte önskad prestanda med dessa typer av radiobaserade metoder på grund av en rad andra olika faktorer (se nedan).

5.1 Koaxialkablar och fiberledningar

Genom att använda direkt synkronisering mellan mottagare behövs i princip endast en referensoscillator i TDOA-pejlen (se figur 5). Genom att låta mastermottagaren i systemet distribuera referenssignaler via ledare, i form av koaxialkabel eller fiberledning, kan övriga mottagares ingående komponenter låsas till en och samma signal. Det förutsätts då att man kompenserar för ledningarnas utbredningsfördröjningar, speciellt om koaxialkabel används där den typiska utbredningshastigheten är 2×10^8 till 2.5×10^8 m/s.



Figur 5: Direkt synkronisering av TDOA-mottagare via en ”masterklocka”.

Vid användande av temperaturkompenserade fiberledningar kan tidsskillnaden mellan mottagarna bli så pass god som 10-50 ps, för avstånd mindre än 50 km [4, 5].

Om ledningarna inte är ”fast” installerade kräver denna metod mycket jobb vid eventuell omgruppering av TDOA-mottagare. Detta gäller framförallt fiberledningar vilka är svårare att hantera. Metoden skulle kunna vara användbar om man i förväg gräver ner ledarna mellan olika mottagarplatser men detta ger en enorm begränsning i flexibilitet.

5.2 DCF77

DCF77 är en tysk långvågsstation belägen i Mainflingen, ca 25 km sydöst om Frankfurt. Det är mot denna sändare som de så kallade radiokontrollerade klockorna (armbandsur, klockradio etcetera) synkroniseras mot, ofta specificerade att ge en maximal tidsdrift med ± 1 sekund per 1 milj. år.

Långvågsstationen sänder datum och tid, baserad på cesium-ur, en gång per minut med pulsbreddsmodulation vid 77.5 kHz. Stationen sänder kontinuerligt, dygnet runt, med undantag för tekniska avbrott och underhåll. Räckvidden för denna 50 kW sändare är begränsad till cirka 1 500 km men kan, vid goda atmosfäriska förhållanden, uppgå till cirka 2 000 km vilket innebär att sändaren täcker större delen av Centraleuropa (se figur 6) [6].



Figur 6: 1500 km radie från Frankfurt (markerat med gult) visar att DCF77 täcker större delen av Centraleuropa.

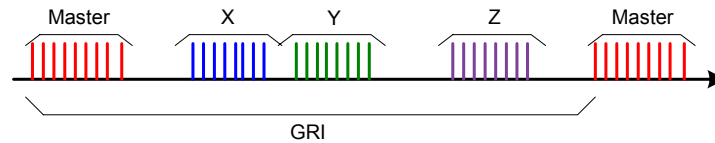
Den största felkällan vid tidsöverföring från DCF77 är jonosfären vilket innebär att tidsnoggrannheten varierar med tiden. Normalt kan en tid erhållas inom 1 ms relativt UTC. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut har gjort mätningar mot denna sändare och visat att signalen från DCF77 alltid ”reflekteras” i jonosfären. Nattetid kan jonosfärsvågen bli mycket starkare än markvågen vilket leder till att mottagaren låser mot den förstnämnda signalen. Om mottagaren låser till en jonosfärsvåg kan kraftiga variationer i signalens utbredningstid uppstå [7].

Mottagning av tidssignaler från DCF77 från geografiskt skilda platser bedöms inte som ett alternativ för noggrann tidreferens. Osäkerheter i signalens utbredning och begränsad täckningsyta gör denna referenskälla olämplig som en del av en TDOA-pejl.

5.3 Loran-C (Long Range Navigation)

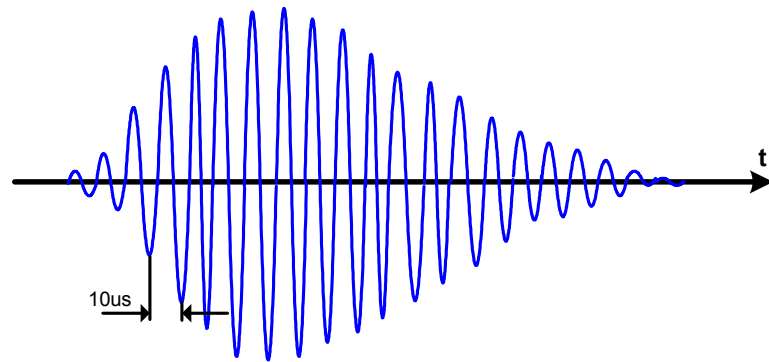
Loran är en akronym för Long Range Navigation och är ett markbundet hyperboliskt 2D-navigationsystem, till en början framförallt avsett för navigering till sjöss. Loran-C är en modernisering av föregångaren Loran-A (Loran-B har aldrig varit operativ) och introducerades i Europa under 1950-talet, av Förenta staternas kustbevakning (USCG - United States Coast Guard), för att tillgodose USA:s marina behov.

Systemet består av flera synkroniserade ”kedjor” av sändarstationer med Cs-oscillatorer där en av sändarna i varje ”kedja” fungerar som master som sänder synkroniseringspulser till slavstationerna (2 till 4 slavstationer). De synkroniserade sändarstationerna sänder pulssignaler med bärvågsfrekvensen 100 kHz till en passiv mottagare som beräknar skillnaden i ankomsttid för respektive signal. Respektive kedja i systemet har ett unikt sändningsintervall, så kallat GRI (Group Repetition Interval), som kan variera mellan 40 och 100 ms. Sändningsförfarandet är väl definierat liksom respektive sändares position vilket möjliggör positionsbestämning om mottagaren tar emot signal från minst tre sändare. I figur 7 visas pulser från tre slavsändare (X, Y och Z) som är synkroniserade med mastersändaren i gruppen.



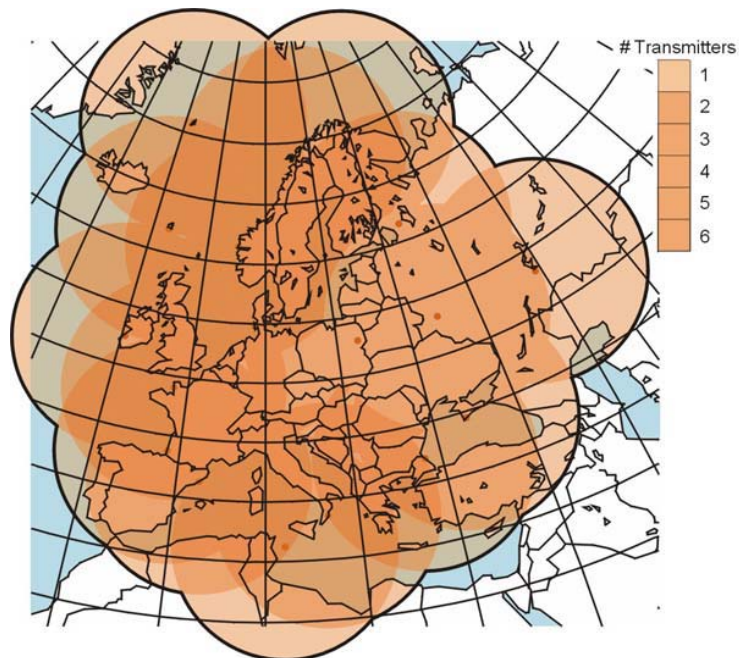
Figur 7: GRI med synkroniseringspulser där pulserna från tre slavsändare är synkroniserade med ”kedjans” master.

Eftersom Loran-C sänder pulser kan mottagaren skilja mellan markvåg och de signaler som färdats via jonosfären genom att låta mottagaren låsa till en av bärvågsperioderna i början av pulsen (vanligtvis nollgenomgången för den tredje bärvågsperioden), förutsatt att perioden har ”tillräckligt” hög amplitud. Om mottagaren är låst till exempelvis tredje perioden och dess amplitud degraderas kommer mottagaren att söka sig längre in i pulsen för att låsa på en starkare bärvågsperiod. Detta innebär att tidsdata förskjuts med steg om 10 μ s varje gång mottagaren hoppar över en period (figur 8) [8].



Figur 8: Loran-puls där periodtiden för bärvågen är 10 mikrosekunder.

För tid/frekvenskalibrering av TDOA-mottagare skulle det vara tillräckligt att åtminstone en Loran-C sändare kan nås och täckningen för Loran-C mottagning får i Europa anses vara god (se figur 9) [9]. Trots detta är synkronisering med hjälp av Loran-C inte lämpad för TDOA-pejling då en typisk tidsskillnad mellan två klockor (baserade på Loran-C) är $1 \mu\text{s}$ [5]. Dessutom är det osäkert hur länge Loran-C kommer att finnas kvar då allt fler går över till satellitnavigering.



Figur 9: Täckningskarta för Loran-C (Europa) [9].

5.4 TV-signaler

Ett antal olika tekniker har prövats för tid- och frekvensjämförelser genom att använda markbundna TV-sändare [5]. Exempelvis har man infört tid- och frekvensinformation i TV-signalen och gjort försök att stabilisera bärvågsfrekvens- och synkroniseringssignaler. Den vanligaste metoden för noggrann tidreferens via TV-signalen är dock ”common-view”, vilket innebär att respektive mottagare tar emot signal från en gemensam sändare

Försök har visat att en tidsskillnad mellan två mottagare kan bli nedåt 10 ns genom att mottagarna låser mot en gemensam synkroniseringssignal från en gemensam TV-sändare. Man låter mottagarens lokala klocka starta en räknare och den mottagna synkroniseringspulsens stoppa räknaren. Ungefär 10 sådana förfaranden per sekund är vanligen tillräckligt för bra resultat. Data växlas därefter mellan mottagarna för efterbearbetning och justering [5]. Givetvis måste sändar- och mottagarstationernas position vara känd för att kompensera för TV-signalens utbredningsfördröjning.

Stora nackdelar med denna metod är att TV-sändarna inte sänder kontinuerligt över hela dygnet, att signalen lätt kan störas samt att flervägsutbredning kan ge osäkerheter (exempelvis kan ofta en spökbild skådas i bildrutan på grund av flervägsutbredning). Man är också begränsad till sändarstationens täckningsområde då respektive mottagare bör ta emot signalen från samma sändare.

Kapitel 6

SATELLITBASERAD TIDSDISTRIBUTION

Det finns idag ett antal olika möjligheter att få tid via satellitburna system. Exempelvis kan synkronisering av två mottagare ske med hjälp av tekniken TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) där man abonnerar en plats hos en kommersiell kommunikationssatellit för att utbyta data mellan mottagare. Andra sätt att få sin utrustning att arbeta synkront är att använda vanliga GPS-mottagare eller, med bättre precision, använda bärvågsmottagare för GPS-signaler.

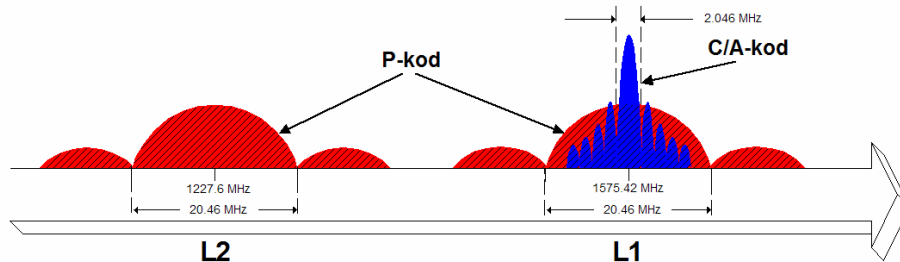
Denna rapport behandlar det amerikanska GPS-systemet (NAVSTAR GPS) mer ingående än andra satellitbaserade system med anledning av en rad faktorer:

Då det amerikanska GPS-systemet är utbrett och beprövat finns mycket information att hämta om detta system och eftersom systemet används av många civila användare ska mycket till innan systemet degraderas. Tvärtom, ser man att tillförlitligheten och noggrannheten hela tiden förbättras. Exempel på detta är att en tredje bärvåg från GPS-satelliterna kommer att vara tillgänglig inom en snar framtid. Beprövade tekniker för noggrannare satellitbaserade tidsjämförelser finns också väl dokumenterat, såsom ”common-view” och fasmätning av GPS-bärvåg.

6.1 NAVSTAR GPS

NAVSTAR GPS (Navigation System with Time And Ranging Global Positioning System) är ett navigationssystem där passiva GPS-mottagare tar emot signaler från några av systemets satelliter för att positionsbestämma mottagaren. De 28 GPS-satelliterna (december 2002) är fördelade i 6 banplan ca 20 200 km ovanför jordytan och varje satellit har en omloppstid på 11 timmar och 58 minuter. Varje satellit sänder data till GPS-mottagarna på två frekvensband, L1 (1 575,42 MHz) och L2 (1 227,6 MHz). L1-bandet innehåller två bandspridda PRN-koder, P-koden och C/A-koden, som är unika för varje satellit vilket gör att satelliterna går att skilja åt vid mottagarsidan (se figur 10). C/A-koden (Coarse/Acquisition) används av civila GPS-mottagare medan P-koden (Precise) är en hemlig kod som bara kan användas av USA och dess allierade. Denna sistnämnda kod finns även i L2-bandet [10].

Fram till maj 2000 var C/A-koden medvetet störd med den så kallade SA-tekniken (Selective Availability) för att ge civila användare sämre precision vid navigering.



Figur 10: Frekvensspektra för GPS-signalerna L1 och L2 (ej skalenligt)

L1 BPSK-moduleras med en 1,023 MHz PRN-kod (C/A-koden) vilken repeteras varje millisekund. De data som kan fås från respektive satellit är:

- Satellitens position
- Sändningstid
- Satellitstatus (satellitens ”hälsa”)
- Korrektioner av satellitens klocka
- Modell av utbredningsfördröjningar
- UTC
- Satelliternas konstellation (läge)

GPS är specificerad att kunna ange tid med bättre än 40 ns noggrannhet relativt UTC, exklusive atmosfärsfördröjningar, flervägsutbredning, mottagarfördröjningar etcetera. Noggrannheten vid jordytan begränsas framförallt av fördröjningar i jonosfären, satelliternas position och klockor [10].

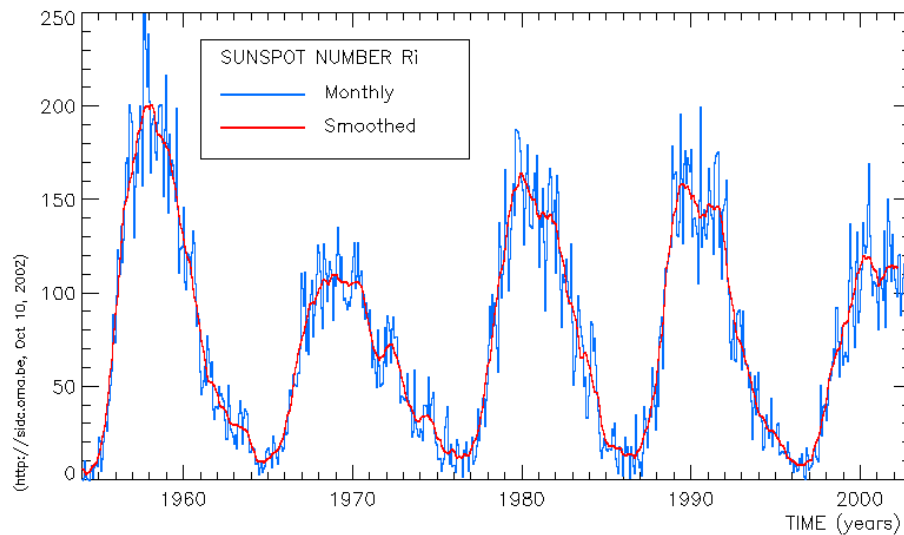
De i nedan presenterade felkällor och metoder för att reducera fel gäller framförallt NAVSTAR GPS men mycket av det som nämns är gemensamt för all slags satellitbaserad tidsdistribution.

6.1.1 Felkällor

6.1.1.1 Atmosfären

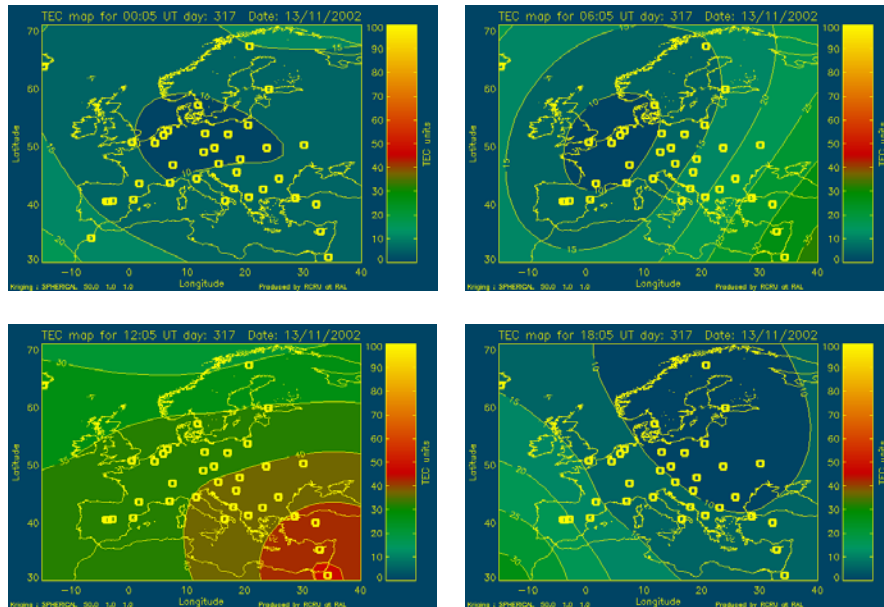
Satellitens GPS-signal måste passera genom jordens atmosfär innan signalen når mottagarna på jorden, vilket innebär att signalen påverkas av atmosfärens laddade partiklar (jonosfären) samt neutrala atomer och molekyler (troposfären).

Fördröjningar orsakade av jonosfären är oundvikligt och är idag en av de största felkällorna vid civil tidsdistribution via GPS. Jonosfärens egenskaper ändras med exempelvis solfläckstalet varför också fördröjningarna fluktuerar. Solfläckstalet varierar med en periodtid på cirka 11 år och har nyligen passerat dess maxima, vilket innebär att solfläckstalet är på väg nedåt (se figur 11).



Figur 11: Solfläckstalets 11-års periodicitet

Jonosfärens degradering av GPS-signalernas utbredningshastighet ges av $\Delta t = 40,3 \cdot TEC / c \cdot f^2$, där TEC står för jonosfärens elektrontäthet (Total Electron Count) [11]. TEC -kartorna i figur 12 visar att fördröjningar på grund av elektrontäthet är mindre nattetid än vid dagtid. Detta beror på att elektronerna rekombinerar och bildar neutrala molekyler då solljuset minskar. På morgonen lyser solen återigen på molekylerna varvid elektronerna frigörs på nytt.



Figur 12: TEC-kartor som beskriver hur elektrontätheten varierar mellan olika tider på dygnet (blått illustrerar låg elektrontäthet medan gult illustrerar mycket högt TEC-tal). Kartorna är hämtade från SPACE WEATHER WEB (<http://ionosphere.rcru.rl.ac.uk>) och gäller för 13/11-2002.

Modeller för att kompensera dessa fördröjningar finns men är dock inte exakta. Då USA (och dess allierade) har tillgång till två bärvågssfrekvenser kan de hantera jonosfärsfördröjningar mer exakt än civila användare. Loggar för hur jonosfären har ändrats finns dock att tillgå varvid i princip exakta fördröjningsmodeller kan beräknas i efterhand.

År 2006 räknar man med att börja sända ytterligare en ”civil” bärvåg, med lägre frekvens (1 176,45 MHz) [12], vilket möjliggör mer noggranna beräkningar av jonosfärens påverkan vid GPS-mottagning.

Fördröjningar som orsakas av troposfärens egenskaper kan inte uppskattas genom att använda ”två-frekvenssystem”. I stället mäts troposfärens fuktighet, temperatur och tryck för att beräkna troposfärsfördröjningen.

6.1.1.2 Fördröjningstid i ledare

Det är inte bara atmosfären som fördröjer signaler. I typiska koaxialkablar för HF-ändamål varierar utbredningshastigheten mellan 2×10^8 till 2.5×10^8 m/s vilket ger en fördröjningstid på 4 till 5 ns/m. Fördröjningstiden är inte beroende av frekvensen, däremot kan man visa att utbredningshastigheten påverkas av de distribuerade reaktanserna hos en transmissionsledning enligt formeln $v = 1/\sqrt{lc}$, där l är karakteristisk induktans per meter och c den karakteristiska kapacitansen per meter [2]. På många GPS-mottagare idag finns möjligheten att kompensera för fördröjningar i ledare.

6.1.1.3 Satelliternas position

En annan vanligt förekommande felkälla till onoggrann GPS-tid är att satelliterna inte alltid går exakt rätt i sin bana. Markstationer kontrollerar kontinuerligt att satelliterna följer sin bana för att skicka upp korrigeringsdata vid behov. De uppdaterade satellitpositionerna kan därefter tas emot av GPS-mottagarna [10].

6.1.1.4 Satelliternas klockor

Trots att satelliterna innehåller Cs-klockor kan satelliternas klockor skilja från varandra. Klockornas drift kontrolleras och registreras hela tiden av markstationer, för att vidare skickas via satelliten till GPS-mottagaren som tar med klockdriften vid beräkning av avståndet till satelliten. Det är omöjligt att ge ett exakt klockfel varför satelliternas klockor i princip alltid kan vara en felkälla vid vanlig GPS-navigering.

6.1.1.5 Flervägsutbredning

Då avståndet mellan satellit och mottagarantenn mäts förutsätts att signalen kommer direkt från satelliten. Objekt vid antennens närhet kan reflektera GPS-signalen vilket kan leda till interferens mellan direktvåg och reflekterad våg. Mottagaren kan låsa till en reflekterad våg och på så vis mäta en felaktig utbredningstid mellan satellit och antenn.

Flervägsutbredning kan ge upphov till fel som är svårt att detektera vilket gör det extra viktigt att GPS-mottagarna placeras ut med varsamhet, speciellt vid tätbebyggda områden och vattendrag. Flervägsutbredning går till viss del att reducera med hjälp av signalbehandlingsalgoritmer samt speciellt utformade GPS-antennor som hindrar signaler med låg elevation att påverka resultatet.

6.1.1.6 Sikt

Fri sikt krävs mellan satellit och mottagare varför det på vissa ställen kan vara svårt att få kontakt med flera satelliter, speciellt vid tätbebyggelse. Med satellitinklinationen 55 grader är det i Sverige viktigast att ha fri sikt söderut för att få kontakt med så många satelliter som möjligt. Ju närmare polerna man kommer, desto svårare blir det att få kontakt med många satelliter samtidigt.

6.1.1.7 Störning

Avsiktlig och oavsiktlig störning är viktiga parametrar att beakta vid taktisk användning av GPS. NAVSTAR GPS är i grunden ett militärt system som upprätthålls och kontrolleras av DoD (Department of Defense) i USA vilka har möjlighet att när som helst degradera och/eller störa ut GPS-systemet lokalt. Exempelvis var C/A-koden medvetet störd fram till maj 2000 med den så kallade SA-tekniken (Selective Availability), för att ge civila användare sämre precision vid positionsmätningar.

I och med att USA skaffade sig möjligheten att stänga av GPS lokalt uppkom begreppet NAVWAR (navigationskrigföring) som i Sverige definieras som åtgärder för att nedsätta prestanda i alla former av navigationshjälpmedel såsom satellit-, radio-, positionerings-, terrängföljnings-, och tröghetsnavigeringssystem [13].

En GPS-signal är mycket svag vilket gör det relativt enkelt att, medvetet och omedvetet, störa ett GPS-baserat system. Kommersiella GPS-störsändare finns att tillgå på marknaden vilket exempelvis kan associeras till terroristhot.

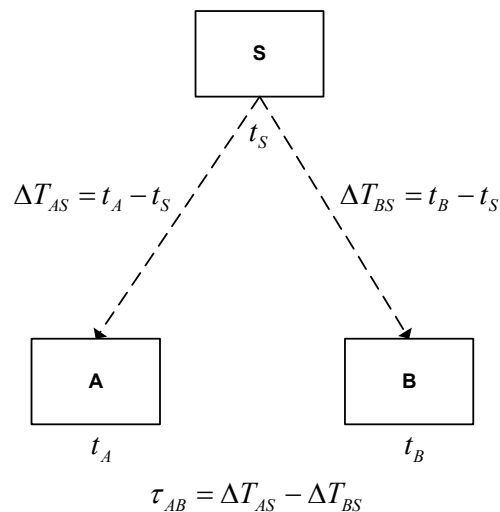
Oavsiktlig störning kan uppstå om kraftiga sändare med frekvenser kring satelliternas frekvens finns i GPS-mottagares närhet.

Olika sätt att öka störtåligheten hos mottagarsystemet finns, såsom att använda speciella antenner, god filtrering etcetera men dessa behandlas inte i denna rapport.

6.1.2 Common-view GPS

”Common-view” (CV) inom GPS-sammanhang är en metod som går ut på att två eller flera mottagare ”tittar” mot samma satellit/satelliter för att reducera gemensamma fel vilket därmed möjliggör en noggrannare tidsdistribution till två eller flera mottagare. Gemensamma fel kan till exempel vara avsiktlig störning av C/A-koden (SA), atmosfärsfördröjningar, onoggrannheter i satelliters klocka och dess banor [14].

Common-view GPS är en teknik som vanligen används för att jämföra klockor mellan olika internationella laboratorier. En principskiss som beskriver tidsjämförelser mellan två laboratorier via CV GPS visas i figur 13 nedan.



Figur 13: Principskiss för tidsjämförelser via common-view GPS.

En GPS-mottagare vid varje mottagarstation (A och B) tar emot en signal från samma satellit S för att vidare jämföra mottagarens 1 PPS-signal mot mottagarstationens lokala klocka (1 PPS). En tidsskillnad mellan satellitens klocka och vardera laboratoriums klocka erhålls (ΔT_{AS} respektive ΔT_{BS}) och utbytes för att vidare beräkna skillnaden mellan de lokala laborierklockorna.

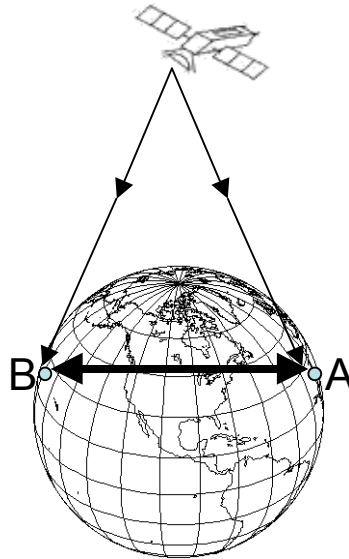
CV GPS fungerar bäst om de olika GPS-mottagarna är relativt nära varandra eftersom det medför att elevationsvinkeln till satelliten blir ungefär densamma för de olika mottagarplatserna. Detta leder till att satellitsignalens utbredningsförhållande blir lika mellan satelliten och respektive mottagarplats. Det bidrar också till att fler satelliter blir gemensamma för mottagarna vilket

ger en bättre tidnoggrannhet mellan mottagarna (vid multikanals CV). En annan fördel med att ha GPS-mottagarna nära varandra är att den yttre miljön, såsom temperatur, luftfuktighet etcetera, i stort sett blir densamma för varje mottagare och påverkar därmed klockor och övrig elektronik lika mycket.

6.1.2.1 Enkanalig CV

Om enkelkanaliga mottagare används för CV GPS krävs att GPS-mottagarna kan hantera ett satellitschema alternativt att data samlas in för bearbetning i efterhand. Schemat talar om för mottagaren när den kan börja samla in data från en viss satellit. En andra mottagare, på en annan plats, har samma schema och startar sin datainsamling samtidigt från samma satellit. Efter datainsamlingens slut växlar mottagarna data med varandra för jämföring. Det tar ca 12.5 minuter för satelliten att sända all sin "almanac-data" och genom att ta emot mer än 12.5 minuter säkerställer man att samtliga mottagare i CV-uppställningen har tagit emot samma data. Den Internationella Byrån för Mått och Vikt (BIPM- Bureau International des Poids et Mesures) publicerar ett satellitschema för enkanaliga CV-mätningar var sjätte månad där vardera mätpass omfattar 13 minuter [15].

Tidsskillnaden mellan två geografiskt skilda klockor kan med enkanalig common-view GPS bli nedåt 5 ns [16].



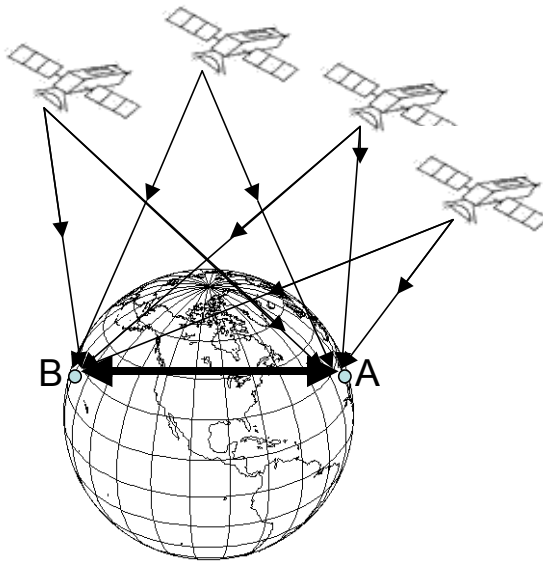
Figur 14: Common-view med en-kanals GPS-mottagare

6.1.2.2 Multikanals CV

Dagens GPS-mottagare kan oftast hantera minst 8 satellitsignaler samtidigt. Detta är till stor fördel vid CV-mätningar då varje satellit i "sikt" ökar tidsnoggrannheten. Generellt gäller att ju fler satelliter mottagaren observerar och ju längre tid tidsdata medelvärdesbildas desto mindre blir tidsskillnaden mot UTC. Om en GPS-mottagare tar emot signal från 8 satelliter samtidigt kan tidsnoggrannheten, med "vanlig" GPS-mottagning, hos mottagaren bli nedåt 35-50 ns relativt UTC.

Till skillnad mot enkanalig common-view behöver mottagarna inget satellit-schema att arbeta efter. Varje multikanalsmottagare tar i stället emot signaler från alla satelliter som når mottagaren (figur 15). Detta är till stor fördel om tidssignalen kontinuerligt skall övervakas. Till skillnad mot enkanaliga GPS-mottagare uppstår inte abrupta signalavbrott vid satellitbyten då multikanalsmottagaren kan övergå "mjukare" mot nya satelliter inom dess elevationsmaskvinkel.

För att erhålla tidsskillnaden mellan två klockor, vid geografiskt skilda platser, görs beräkningar endast med de satelliter som var i gemensam vy för mottagarna. Teoretiskt sett skulle 12 satelliter kunna ses samtidigt men typiskt är att man endast kan se 5-6 satelliter inom en elevationsmaskvinkel på 15 grader [15]. Med denna metod kan tidsskillnaden mellan två klockor bli under 1 ns [6, 11].



Figur 15: Multikanals common-view

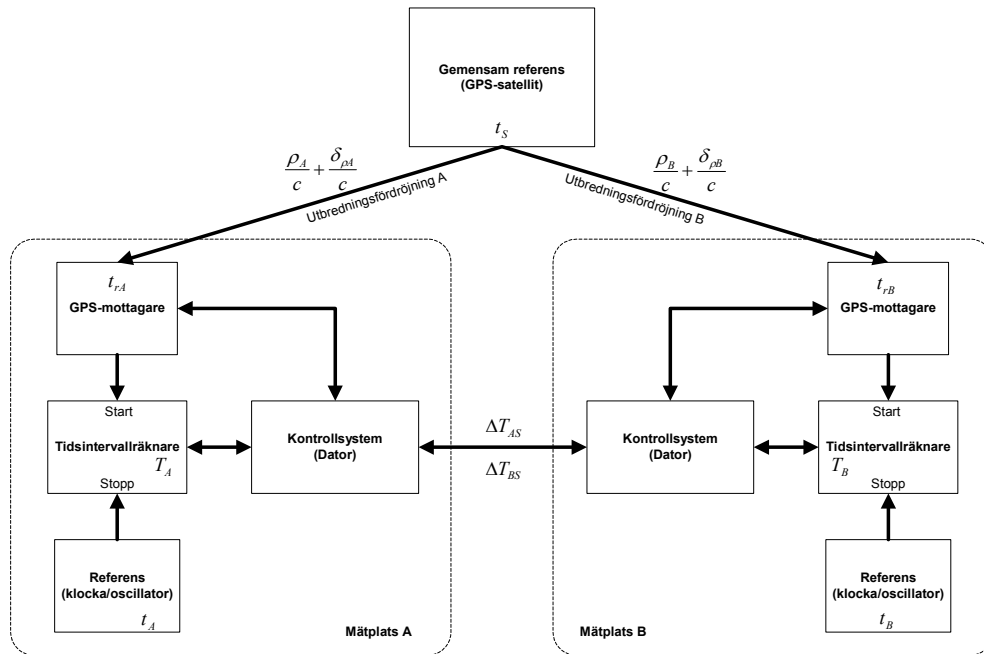
Tabellen nedan (tabell 3) visar gemensamma satelliter för tre geometriskt skilda mottagare med en elevationsmaskvinkel på 15 grader. Position 1 motsvarar Linköping, position 2 motsvarar Nyköping och position 3 motsvarar Sundsvall. Som synes blir skillnader i azimut och elevation mot satelliterna små mellan de olika mottagarplatserna. Nedanstående data (tabell 3) hämtades från Naval Air Warfare Center – Weapons Division, China Lake och gäller för den 12 november 2002 klockan 13:00 UTC.

Satellit PRN	Data från ' http://sirius.chinalake.navy.mil/satpred/ ' 12/11-2002				
	5	7	9	14	30
Az (1)	243,4	59.9	180.3	311.9	249.3
Az (2)	244.6	61.1	185,1	312.5	250.5
Az (3)	239.5	65.1	184.6	310.2	248.8
EI (1)	53.2	36.9	75.5	29.3	17.9
EI (2)	52,1	37.9	75.0	28.9	17.0
EI (3)	49,9	40.0	70.2	31.5	15.5

Tabell 3: Fem gemensamma satelliter för mottagare placerade i Linköping, Nyköping respektive Sundsvall (med elevationsmaskvinkeln 15 grader).

Nedan beskrivs hur common-view GPS utnyttjas för noggrann tidsjämförelse av geografiskt skilda klockor (se figur 16).

Genom att låta en 1 PPS-signal från mätplatsens GPS-mottagare starta en räknare kommer denna att mäta den tid det tar innan den lokala oscillatorns 1 PPS-signal stoppar räknaren. Samma förfarande sker samtidigt vid den andra mätplatsen. Ett kontrollsystem, exempelvis i form av en PC vid vardera mottagarplats, skickar kommandon till GPS-mottagaren för att låsa denna till en viss satellit (enkanalig CV GPS). Om en multikanals GPS-mottagare används övervakar kontrollenheten vilka satellitsignaler som tagits emot och utbyter data med den andra mottagarplatsen för att se vilka satelliter som varit gemensamma. Eftersom båda mottagarplatsernas tidsintervallräknare styrs av samma referens (gemensam satellitklocka) blir respektive tidsintervallräknarens data ett mått på hur mycket de lokala klockorna skiljer sig från referensens klocka. Data mellan stationerna utbytes för att vidare jämföra tidskillnaden mellan mätplatsernas klockor.



Figur 16: Blockschemata för klockjämförelser med CV GPS

Förloppet kan beskrivas med en matematisk modell där tidsintervallet mellan lokal 1 PPS-signal och den 1 PPS-signal som ges av GPS-satelliten blir:

$$T_i = t_i - t_s + \frac{\rho_i}{c} + \frac{\delta_{\rho_i}}{c} + t_{ri} \quad \text{där}$$

t_i lokal 1 PPS-signal från lokal klocka i (i motsvarar A resp. B)

t_s satellitens 1 PPS-signal,

$\frac{\rho_A}{c}$ geometrisk fördröjning mellan satellit och mottagarantenn

$\frac{\delta_{\rho_i}}{c}$ fördröjning som orsakats av jonosfären, troposfären etcetera.

t_{ri} fördröjning i GPS-mottagare, kablar etcetera.

Skillnaden mellan mätplatsens lokala klocka och satellitens klocka blir således

$$\Delta T_{iS} = t_i - t_S = T_i - \frac{\rho_i}{c} - \frac{\delta_{\rho_i}}{c} - t_{ri}$$

varvid skillnaden mellan respektive mottagares lokala klocka kan erhållas:

$$\tau_{AB} = \Delta T_{AS} - \Delta T_{BS}.$$

(Se [16] för vidare information.)

6.1.2.3 GPS-mottagare för common-view

Mottagare för common-view GPS behöver inte kosta mer än en vanlig GPS-mottagare (typiskt ca 5000 SEK). Många av dagens GPS-mottagare går att låsa mot vissa satelliter för att åstadkomma en ”gemensam vy” för flera mottagare. Alternativt kan man låta mottagarna ta emot signaler från alla satelliter inom elevationsmaskvinkeln för att i efterhand jämföra gemensamma satelliter.

Alla GPS-mottagare arbetar inte efter samma algoritmer. En del mottagare läser mot den satellit som har högst elevationsvinkel, andra mottagare läser till de satelliter med den bästa geometriska konstellationen (GDOP – Geometric Dilution Of Precision, generellt gäller att mer utspridda satelliter ger bättre resultat). Med anledning av detta kan olika mottagare ge olika resultat, fastän de är anslutna till samma antenn vid samma mätplats. Detta gör det extra viktigt att använda likadan utrustning vid mottagarplatserna för common-view.

6.1.3 Fasmätning av satellitsignalens bärvåg

Fasmätning av satellitsignalens bärvåg är en teknik som framförallt nyttjas inom geodesi³ för mycket noggranna positionsinmätningar. Genom att tillämpa denna teknik vid noggrann tidsjämförelse kan en noggrannhet med några tiotals pico-sekunder realiseras mellan två klockor. Speciella mottagare krävs för denna typ av mätning och ligger vanligen i prisklassen 20 – 50 000 SEK för en L1-mottagare. För en mottagare som kan hantera båda bärvågorna är det vanligt att priset uppgår till cirka 50 – 100 000 SEK. För att utnyttja bärvågsmottagaren i synkroniseringssammanhang krävs speciell mjukvara som klarar av att bearbeta data från mottagaren. Sådan typ av mjukvara har utvecklats av ett flertal laboratorier, exempelvis Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut i Borås (SP).

³ Geodesi: Vetenskapen om jordens uppmätning.

L1-signalens bärväg har en våglängd på 190,4 mm och om det är möjligt att mäta antal våglängder mellan satellit och mottagare kan ett noggrant avstånd till satelliten erhållas.

Likt den vanliga CV-tekniken låter man flera mottagare samtidigt observera samma satellit. Respektive mottagare jämför skillnaden mellan sin lokala klocka och de mottagna perioderna för att vidare beräkna tidsskillnaden mellan de olika mätplatserna [17].

6.1.4 Datautbyte mellan mottagare

Gemensamt för common-view GPS och för jämförelser av satellitsignalens bärväg är att data måste utbytas mellan stationerna för att jämföra och eventuellt kompensera för tidsskillnader. Det är dock tillräckligt med en enkelriktad dataöverföring för att jämföra de geografiskt skilda klockorna. Datamängderna behöver inte vara stora, exempelvis producerar en 8-kanals GPS-mottagare data med en takt om cirka 100 bytes/s [14].

6.2 GLONASS

Det ryska satellitnavigationssystemet GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema eller Global Navigation Satellite System) har i likhet med det amerikanska GPS-systemet två navigeringssignaler, SP (Standard Precision) och HP (High Precision), där SP är tillgänglig för civila användare. Till skillnad från det amerikanska GPS-systemet så sänder GLONASS-satelliterna med olika frekvenser för att skilja dem åt (vissa satelliter har samma frekvens men är inte ”synliga” samtidigt). De frekvenser som används är $1\,602\text{ MHz} + x \cdot 0.5625\text{ MHz}$, där x står för kanalnumret [18]. I full drift består GLONASS av 24 satelliter (21 + 3 reservsatelliter) och med en inklinationsvinkel på 64,8 grader skulle detta satellitnavigeringssystem (vid full drift) täcka norra Sverige bättre än NAVSTAR GPS.

Att använda GLONASS som referenskälla kan verka vanskligt eftersom vissa brister finns vid övervakningsstationerna. Exempelvis kan det ta flera timmar innan felaktigheter i satelliter etcetera upptäcks. Dessutom har GLONASS så få satelliter (13 operativa oktober 1998) vilket leder till sämre signaltäckning på jordytan [18]. Däremot skulle GLONASS kunna fungera som komplement till NAVSTAR GPS.

6.3 Galileo

Redan under tidigt 1990-tal insåg den Europeiska Unionen behovet av ett " eget" globalt satellitnavigeringssystem. Några av skälen till ett " eget" system är att täcka norra Europa bättre genom att placera satelliterna med en högre inklination samt att göra fler satelliter tillgängliga för att täcka upp bättre i tät bebyggelse där byggnader hindrar signalen att nå mottagarna. En annan viktig anledning till initiativet av ett europeiskt satellitnavigeringssystem är att USA inte garanterar att GPS alltid kommer att vara tillgängligt för alla.

Planerandet av det europeiska navigeringssystemet Galileo är i full gång där EU och det europeiska rymdorganet ESA (European Space Agency) är de främsta aktörerna. Man räknar med att skjuta upp den första experimentsatelliten år 2004 och det nya satellitpositioneringssystemet beräknas att vara i full drift år 2008 [12].

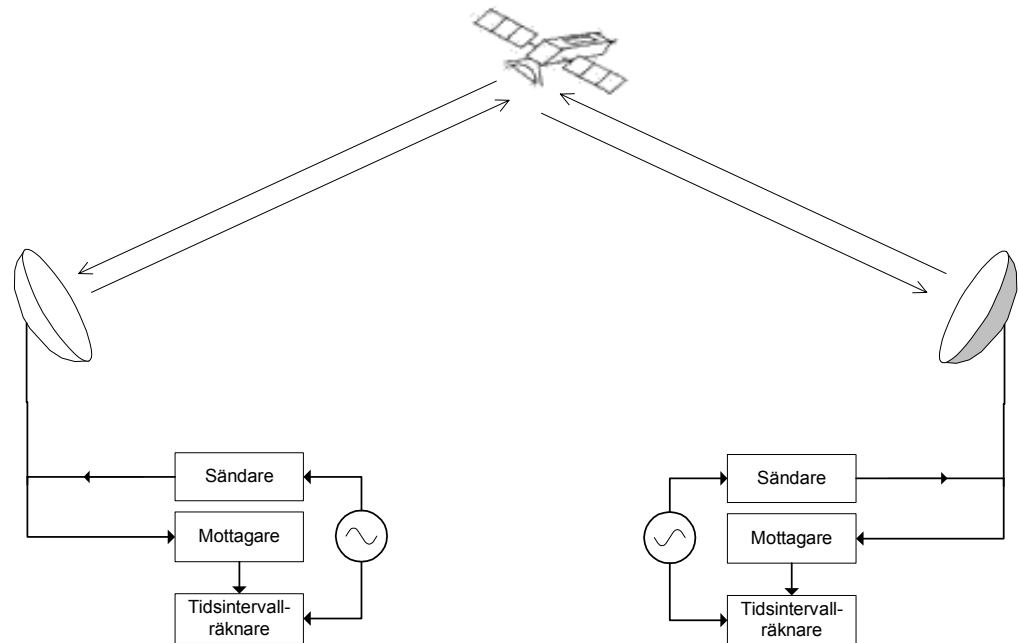
Satellitkonstellationen kommer att bestå av 30 stycken satelliter (27 operativa satelliter och 3 i reserv), fördelade i tre cirkulära banor, cirka 24 000 km (23 616 km) ovanför jordytan. Satelliterna kommer att sända 10 navigationssignaler inom frekvensbanden 1 164 - 1 215 MHz, 1 260 - 1 300 MHz och 1 559 - 1 591 MHz [19].

Galileo kommer, till skillnad mot det amerikanska GPS-systemet, att vara under civil kontroll. GPS, GLONASS och Galileo kommer att vara helt oberoende av varandra men ändå kompatibla. Detta innebär att användare får bättre redundans i sina system där satellitnavigeringsteknik används.

6.4 TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer)

Ett alternativ till den traditionella GPS CV-tekniken är att utnyttja tvåvägskommunikation via en geostationär kommunikationssatellit. BIPM använder denna teknik, via kommersiella kommunikationssatelliter, som en primär tidsöverföring till vissa europeiska laboratorier då TWSTFT kan ge en tidsnoggrannhet med mindre än 1 ns mellan två klockor [5].

Tekniken bygger på att två markstationer, från geografiskt skilda platser, samtidigt sänder sin tidssignal (typiskt 1 PPS) till varandra. En tidsintervallsräknare mäter tiden mellan sin egen klocksignal och den mottagna signalen (andra stationens klocksignal). Tidsintervallsdata växlas sedan mellan markstationerna för att vidare jämföras (se figur 17) [20].



Figur 17: TWSTFT för noggrann tid- och frekvensreferens.

En nackdel med denna teknik är att det krävs utrustning för både mottagning och sändning vid varje markstation som kan hantera satellitkommunikation, vilket leder till ökad komplexitet. En annan stor nackdel med TWSTFT är att tekniken blir relativt dyr eftersom ”satellitid” hos en kommersiell satellit måste köpas.

Med anledning av de i ovan nämnda nackdelar bedöms TWSTFT inte vara lämpad som en del av ett TDOA-baserat pejlsystem.

6.5 TV-satelliter

En annan satellitbaserad metod att få geografiskt skilda klockor att arbeta synkront är att utnyttja kommersiella TV-satellitlänkar. Likt markbunden TV-signalssynkronisering låter man mottagarens lokala klocka starta en räknare medan en definierad synkroniseringspuls från TV-sändaren stoppar räknaren.

Den största felkällan vid synkroniseringsdistribution från TV-satelliter är osäkerheter av satellitens position. Felaktig satellitposition ger fel vid beräkning av signalens utbredningstid, vilket i sin tur leder till felaktig klocksynkronisering. Med efterbearbetning, för korrektion av positionsfel, kan

en tidsosäkerhet med 10 ns uppnås. Utan denna korrektion blir den typiska osäkerheten 1-10 μ s [5].

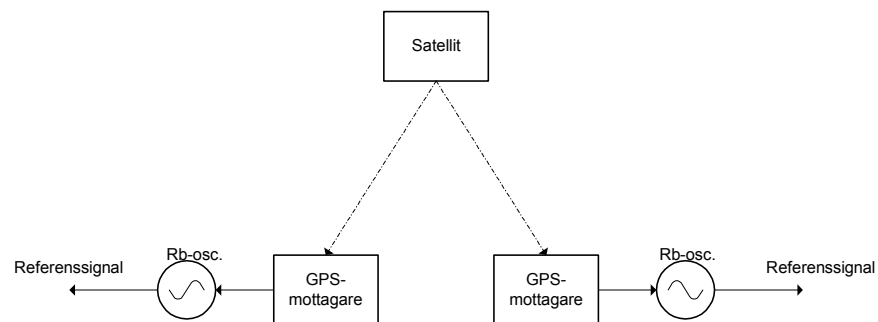
Likt markburen TV-distribution beror signalens tillgänglighet på satellitens sändningsschema vilket inte gör metoden lämpad för TDOA-pejling. Att extrahera synkroniseringspulser är relativt krångligt och dyrt i jämförelse med exempelvis CV GPS.

Kapitel 7

GPS-DISCIPLINERADE OSCILLATORER (GPSDO)

Då GPS inte kan betraktas som en helt tillförlitlig metod att taktiskt använda som tid/frekvensreferens har så kallade GPS-disciplinerade oscillatorer studerats. GPS-disciplinerade oscillatorer innehåller en högkvalitativ oscillator, ofta i form av Rb eller OCXO, som hela tiden jämförs och justeras efter en GPS-mottagare. Genom att tillämpa denna metod fås redundans i systemet. Om GPS-signalen av någon anledning faller bort fungerar oscillatoren som en vanlig ”icke-låst” oscillator.

I en TDOA-mottagare kan en GPS-mottagare stå för långtidsstabiliteten i systemet medan den GPS-disciplinerade oscillatoren får stå för korttidsstabiliteten.



Figur 18: GPSDO som noggrann extern referens.

I figur 18 visas principen för GPS-disciplinerade oscillatorer. Om GPS-signalen av någon anledning faller bort är det hold-over⁴ prestandan hos GPSDO:n som bestämmer tillförlitligheten i TDOA-skattningen.

⁴ Hold-over prestanda är förmågan hos en disciplinerad oscillator att ge fortsatt god stabilitet efter dess styrreferens gått förlorat.

En vanligt angiven hold-over prestanda för en OCXO-baserad GPSDO är cirka 7 μ s per dygn, medan hold-over prestandan för en Rb-baserad GPSDO ofta specificeras till cirka 3 μ s per dygn.

På marknaden finns idag enheter med integrerad GPSDO och GPS-mottagare, ofta bestyckade med flera typer av synkroniserade signalutgångar (exempelvis 1 PPS, 5 MHz och 10 MHz). Många av dessa enheter är moduluppbyggda vilket innebär att det enkelt går att byta ut exempelvis kraftenhet eller oscillator för anpassning mot applikation.

Dagens GPS-mottagare kan ofta hantera 8 till 12 signaler samtidigt och de flesta mottagare kan ställas in för att kompensera för bias-parametrar i form av ledningsfördröjningar, antennfördröjningar etcetera.

Det finns även GPS-disciplinerade oscillatorer utan GPS-mottagare. Ofta låser man dessa oscillatorer med en 1 PPS-signal som de flesta GPS-mottagare är bestyckade med. För de flesta oscillatorer av denna typ gäller också att en GPSDO går att faslåsa mot en annan likadan GPSDO.

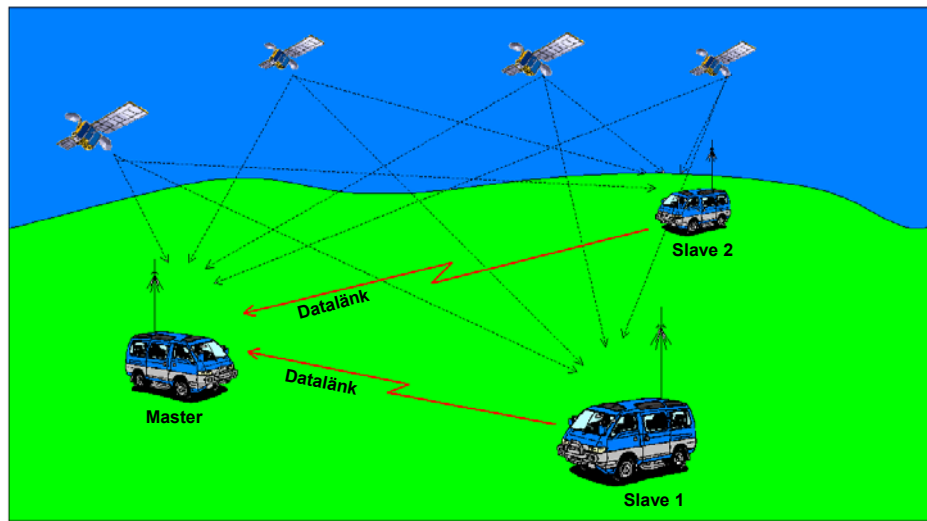
Kapitel 8

SLUTSATS

En slutsats som direkt kan dras av denna utredning är att det inte finns någon ”självständig” oscillator som direkt är lämplig att användas som referensklocka i det tänkta TDOA-systemet. Exempelvis är det inte ovanligt att en Cs-oscillator har en tidsdrift på ca 10 ns/dag. Dessutom kostar Cs-baserade oscillatorer relativt mycket. Vid korta avstånd är det dock möjligt att använda fiberledning eller koaxialkabel för direkt synkronisering av TDOA-mottagarna varvid kravet på stabila oscillatorer minskar. I detta fall fungerar oscillatoren i en av TDOA-mottagarna som gemensam tidreferens för systemet.

Den ovan nämnda metod för synkron datainsamling förefaller olämplig då avståndet mellan respektive mottagare blir mycket begränsat. Metoden skulle dock kunna vara användbar vid de tillfällen då avseendet är att påvisa TDOA-pejlens positioneringsmöjligheter vid näst intill idealisk synkron datainsamling mellan mottagarna.

För att klara fastställda prestandakrav (maximalt 10 ns tidsfel mellan två mottagare) vid längre avstånd krävs någon form av extern synkroniserings-teknik. Den teknik som bedöms vara bäst lämpad för den tänkta pejldemonstratorn är GPS då denna relativt enkla och billiga teknik är väl beprövad och ger god prestanda. För att garanterat klara TDOA-pejlens prestandakrav är det dock inte tillräckligt att endast koppla in en GPS-mottagare till systemet. För noggrann tidsdistribution via GPS krävs inmätning av satellitsignaler under mer kontrollerade former. De GPS-metoder som är mest intressanta för en TDOA-demonstrator är multikanals common-view samt fasjämförelser av satellitsignalens bärvåg. Gemensamt för dessa metoder är att viss efterbearbetning av data krävs för att erhålla bästa möjliga tidsprestanda.



Figur 19: Principskiss för synkronisering av TDOA-mottagare med hjälp av All-in-View common-view GPS.

Vid multikanals common-view GPS tar varje mottagare emot signaler från samtliga satelliter i "sikt". Datautbyte sker kontinuerligt, eller i efterhand, för sammanställning av data och för eventuell korrigering för avvikelser mellan mottagarnas oscillatorer. En principskiss för synkronisering av TDOA-mottagare med hjälp av multikanals GPS-mottagare visas i figur 19 ovan. Med denna metod kan tidsskillnaden mellan två klockor bli nedåt 1 ns för en relativt låg (ca 5 000 SEK per GPS-mottagare) hårdvarukostnad.

För ännu bättre prestanda (tidsskillnad med några tiotals picosekunder) kan bärvågsmätande GPS-mottagare användas vid varje pejlplats. Priset för en mottagare som mäter L1-bärvågen ligger vanligen mellan 20 och 50 000 SEK. Dessa mottagare är främst avsedda för noggrann positions-bestämning, men med speciell mjukvara kan noggrann tidsdistribution (i näst intill realtid) erhållas.

Varsamhet bör iakttas vid användning av GPS som referensälla då systemet är enkelt att degradera. För en taktisk TDOA-pejl bör det finnas redundans för tid/frekvensreferensen. Exempelvis kan en Rb-baserad GPSDO användas, där Rb-oscillatorn står för korttidsstabiliteten och GPS står för långtidsstabiliteten i systemet. Vid bortfall av satellitsignaler är det hold-over prestandan hos GPSDO:n som bestämmer TDOA-skattningens tillförlitlighet. En GPSDO har ofta många typer av utsignalsmöjligheter vilket ökar möjligheterna att få flera helt synkrona signaler, till olika delar av TDOA-mottagaren, utan att någon extern kringelektronik är nödvändig.

I nära framtid, när Galileo finns för operativt bruk, kan det kännas tryggare med ett civilt europeiskt satellitnavigeringssystem. Det krävs dock ändå någon form av redundans i systemet varför andra möjligheter för synkron datainsamling bör undersökas, exempelvis möjligheter att utrusta TDOA-systemet med flera typer av mottagare för extern tidreferens. Förutom ovanstående kommersiella radiobaserade referenskällor bör också möjligheter att synkronisera mot ”egna” radiosändare undersökas.

FOI-R--0649--SE

REFERENSER

- [1] Ulrika Ahnström, *Modellering och simulering av ett mottagarsystem för TDOA-skattning*, FOI-Memo – 02-3047, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Sverige, December 2002.
- [2] Per Carlson, Staffan Johansson, *Modern elektronisk mätteknik*, 1 uppl. ISBN 91-47-01098-3, Sverige, 1997.
- [3] Hugo Fruehauf, *Precision Oscillator Overview*, Zyfer Inc., December 2001.
- [4] Jan Johansson, Kenneth Jaldehag, *Time Transfer Techniques – overview and new developments*, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.
- [5] David W. Allan, Neil Ashby, Clifford C. Hodge, *The Science of Timekeeping*, Hewlett Packard, App. Note 1289.
- [6] Peter Hetzel, *Time Service via the Low-Frequency Transmitter DCF-77*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, October 2001.
- [7] Kenneth Jaldehag, *Spårbarhet för tid och frekvens med hjälp av GPS och andra radio-baserade system?*, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.
- [8] Michael A. Lombardi, *Using Loran-C Broadcasts for Automated Frequency Calibrations*, Time and Frequency Division, NIST Boulder, Colorado.
- [9] Eurofix Working Group, *Information on Eurofix*, Northwest European Loran-C System, January 1998.
- [10] John P. Stenbit, *Global Positioning System Standard Position Service Performance Standard*, Assistant Secretary of Defense for Command, Control, Communications, and Intelligence, October 2001.
- [11] David W. Allan, Marc A. Weiss, *Accurate Time Transfer During Common-View of a GPS-satellite*, Proc. 34th Ann Freq. Control Symposium, May 1980.
- [12] Javier Benedicto, Daniel Ludwig, *Proposed Architecture and Services for the New European Satellite Position System*, GPS World, September 2001.
- [13] Fredrik Berefelt, Lars Falk, Göran Kindvall, Henrik Moberg, *GNSS – hot eller möjlighet?*, FOI dnr 01-2419, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Sverige.
- [14] Judah Levine, *Time Transfer Using Multi-Channel GPS Receivers*, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, No. 2, March 1999.
- [15] Wlodzimierz Lewandowski, Jacques Azoubib, William J. Klepczynski, *GPS: Primary Tool for Time Transfer*, Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 1, January 1999.
- [16] Chang Bok Lee, Dong Doo Lee, Nak Sam Chung, *Development of a GPS Time Comparison System and the GPS Common-View Measurements*, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurements, Vol. 40, No. 2, April 1991.

- [17] Kristine Larson, Judah Levine, *Time Transfer Using the Phase of the GPS Carrier*, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, No. 3, May 1998.
- [18] Judah Levine, *Introduction to time and frequency metrology*, Review of Scientific Instruments, Vol. 7, No. 6, June 1999.
- [19] Andrew Wilson, *Galileo – The European Programme for Global Navigation Services*, ESA Publications Division, ISSN 0250-1589, May 2002.
- [20] D.W Hanson, *Fundamentals of Two-Way Time Transfers by Satellite*, 43rd Annual Symposium on Frequency Control, 1989.