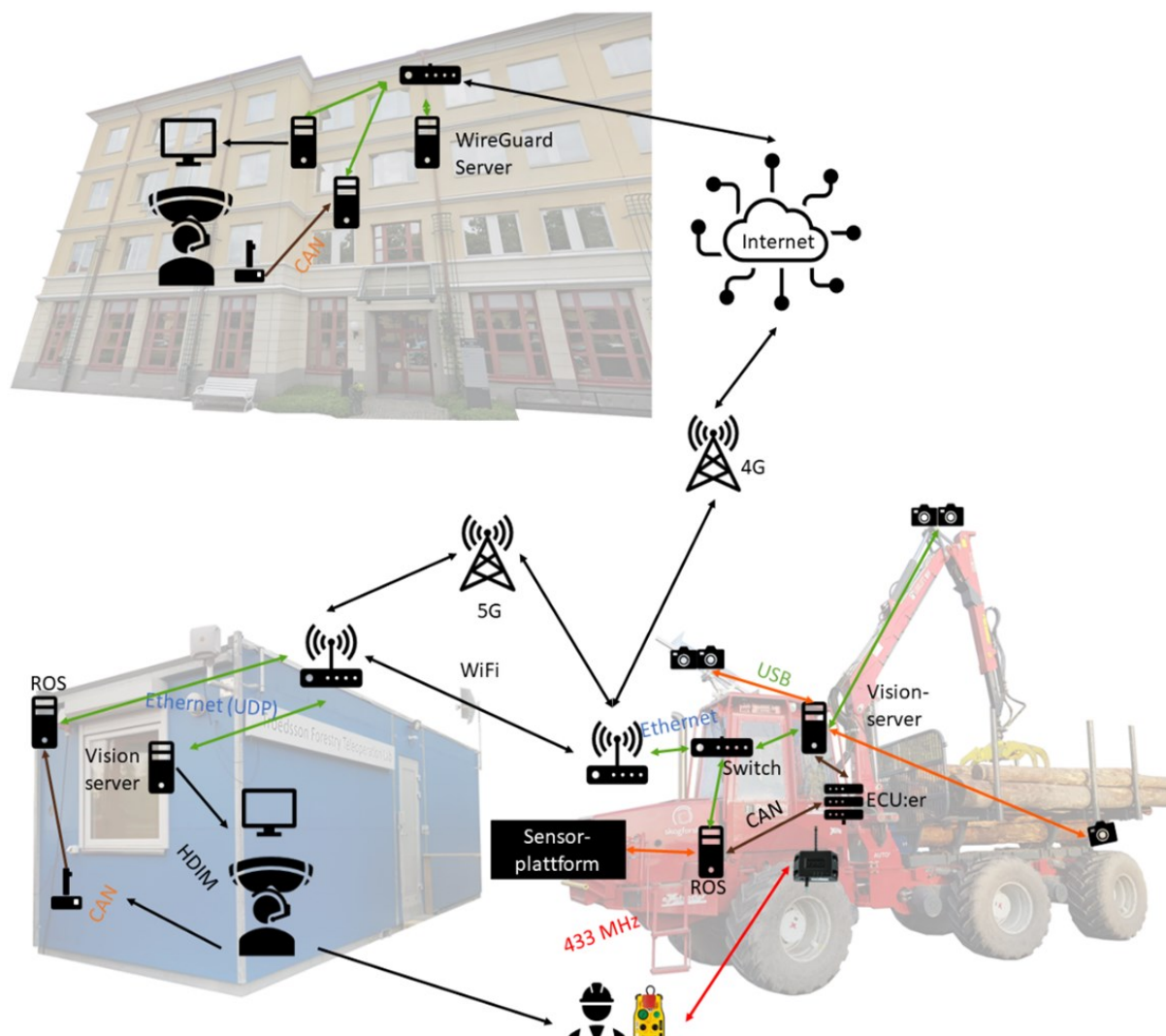


Telekommunikation för fjärrstyrda skogsmaskiner

Fjärrstyrning med 5G

Petrus Jönsson, Tobias Semberg, Morgan Rossander



Systembeskrivning av fjärrlabbet. I en av uppställningarna användes två 4G-routrar på maskinen, en för styrsystemet och en för videosystemet.

Innehåll

Förord	3
Summary	4
Sammanfattning	5
Bakgrund och syfte	6
Systembeskrivning	7
Uppställning 4G - fiber	8
Uppställning 4G – 4G	9
Uppställning för utvärdering av lokalt 5G	9
Styrsystemanpassning	10
Resultat	11
Körbarhet	11
Nätverksmätningar	11
Wireguard belastningstest	11
Bandbredd	11
Ping och jitter	12
5G	13
Ping	13
Prestanda	13
Slutsatser	15
4G	15
5G	15
Mediabevakning och demonstrationer	16
Publicering	17
Pågående projekt	18
Framtida forskning	19



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 31 augusti 2022 av Gert Andersson, Programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering den 13 september 2022.

Redaktör: Hanna Andtbacka, hanna.andtbacka@skogforsk.se
©Skogforsk 2022 ISSN 1404-305X

Förord

Rapporten beskriver möjligheterna med olika telekommunikationslösningar för fjärrstyrda skogsmaskiner. Försöken med lokalt 5G gjordes i nära samarbete med Telenor, Ericsson och Fujitsu. Då detta projekt var ett av de första projekten i världen med att använda lokala 5G-stationer uppstod en hel del förseningar. En del berodde på bristen på halvledare som påverkade att få tillgång till rätt utrustning samt att pandemin orsakade en del försening.

Projektgruppen vill tacka Stiftelsen Nils och Dorthi Troëdssons forskningsfond för finansiering av projektet och tålamodet med att projektet blev försenat över ett år.

Petrus Jönsson, projektledare

Summary

Perhaps the most important issue for use of teleoperation of forest machines in practice is access to well-functioning telecommunications with high capacity in forest terrain.

In this project, 5G was compared against alternative technologies, both for remote control locally at the logging sites and remote control of machines from longer distances. The project was carried out in the Troëdsson Forestry Teleoperation Lab, set up in 2019.

Remote control with 5G could be equated to remote control with Wi-Fi technology. Delays and video quality were judged to be acceptable. Remote control with 4G technology in combination with signals via fibre also gave acceptable but different results, depending on which variant was used on the machine. The best stability and performance were achieved with a setup using two separate routers. This ensured that the control system could work almost independently of the video system.

When this project was started, the 5G systems, and in particular the technology called "Industry Connect", were relatively new and no large-scale evaluations had been carried out. The project was one of the first in the world to test local 5G systems. Development and understanding of the 5G systems from the time the project started in 2020 until today has progressed rapidly, and this study has contributed a piece to the puzzle.

Sammanfattning

För att fjärrstyrning av skogsmaskiner ska kunna användas i praktiken är kanske den allra viktigaste frågan tillgång till väl fungerande telekommunikation med hög kapacitet i skogsterräng.

I projektet jämfördes 5G mot alternativa teknologier, både för fjärrstyrning lokalt vid avverkningstrakten och fjärrstyrning av maskiner från längre avstånd. Projektet utfördes i det nyligen etablerade Troëdsson Forestry Teleoperation Lab.

Fjärrstyrning med 5G kunde likställas med att fjärrstyra med Wi-Fi-teknik. Fördröjningar och videokvalitet bedömdes vara helt acceptabla. Även fjärrstyrning med 4G-teknik i kombination med signaler via fiber gav acceptabla men olika resultat beroende på vilken variant som användes på maskinen. Bäst stabilitet och prestanda uppnåddes med uppställning där två separata routrar användes. Det säkerställde att styrsystemet kunde arbeta närmast oberoende av videosystemet.

Då detta projekt startades var 5G-systemen och i synnerhet den teknik som benämns "Industry Connect" relativt nytt och några utvärderingar i större omfattning hade inte genomförts. Projektet var ett av de första i världen med att testa lokalt 5G-system. Utvecklingen och förståelsen för 5G-systemen från det att projektet startade 2020 tills idag har gått fort framåt och denna studie har varit en pusselbit i utvecklingen.

Bakgrund och syfte

Räckvidden för lokal 5G kan vara i storleksordningen mer än tio gånger bättre än Wi-Fi. Skog förväntas dämpa signalerna och räckvidden för båda överföringstyperna. Förutom skogens täthet tros våta väderförhållanden förkorta räckvidden.

Källorna till fördröjning väntas hamna med kontrollsignalerna och Wi-Fi som de minst påverkande. Videobehandlingen är krävande och väntas ligga nära fördröjningarna med 4G. Att använda lokal 5G tros ha väsentligt mindre fördröjning än 4G, men större än Wi-Fi. Tillförlitligheten avser hur stabil uppkopplingen är i termer av borttappade datapaket. Det är naturligt att tillförlitligheten sjunker när gränsen för uppkopplingens räckvidd nås, men innan dess bör samtliga paket nå respektive mottagare. Tappade datapaket innebär en olycksrisk för maskinen och dess omgivning om kontrollen tillfälligt tappas vid kritiska arbetsmoment. Därför används kontrollsignaler för att säkerställa att alla meddelande ”nollställs” ifall styrsystemet inte får något nytt meddelande.

Syftet med detta projekt har varit att undersöka möjligheterna med telekommunikation för skoglig tillämpning med lokalt 5G.

Systembeskrivning

Kommunikationen mellan arbetsstationen och maskinen utvärderades med avseende på bandbredd (hur mycket data som kan skickas) samt fördröjning av signalen från arbetsstationen till maskinen. De olika kommunikationsteknikerna som utvärderades var:

- Lokal Wi-Fi – arbetsstationen ansluts till maskinen med kommersiell Wi-Fi-utrustning. Riktantenner används på arbetsstationen. Denna uppkoppling återfinns i Troëdsson Forestry Teleoperation Lab idag.
- Lokalt 5G – arbetsstationen ansluts till en inhyrd 5G-mast (masthöjd 12 respektive 25 meter) och maskinen förses med 5G-mottagare.
- Långdistans 4G – arbetsstationen flyttas till Troëdsson Forestry Technology Lab (Skogforsks kontor inne i Uppsala cirka 5 km från skogsmaskinen) och ansluts till internet. Maskinen ansluter till internet via 4G med kommersiellt tillgänglig 4G-utrustning och den täckning som erbjuds på platsen.
- Långdistans 4G + Wi-Fi – Eventuellt kan det vara svårt få bra 4G-mottagning på maskinen i skogen. En lösning kan vara en kombination av 4G från Skogforsks kontor till en relästation i närheten av avverkningen och därifrån kommunicera med lokal Wi-Fi till maskinen.

Systemen har installerats på prototypskotaren Xt28, som används i Skogforsks forskning i Troëdsson Forestry Teleoperation Lab idag. Från tidigare finansiering av Nils och Dorthi Troëdssons forskningsstiftelse upprättades en operatörstation i en kontorsbod.

Fjärrstyrningssystemet som användes för att undersöka körbarheten för de olika kommunikationssystemen består av tre delsystem enligt figur 1 nedan:

- 1) Videoöverföring med programvaran Oden från Voysys.
- 2) Maskinstyrning baserad på konventionella styrspakar, med tillägg av programvara utvecklad i ROS (Robot Operating System).
- 3) Ett trådlöst nödstopp. Videoöverföring och styrsignaler delar samma nätverk och kommunikationslänk, men körs på olika datorer. Det trådlösa nödstoppet är däremot funktionellt helt fristående.

labbet konfigurerats att dirigera trafiken till WireGuard servern som i sin tur gav klienterna tillgång till övriga maskiner i labbets nätverk. För att enheterna i labbet skulle komma åt maskinernas enheter konfigureras en hänvisning i routern i labbet mot WireGuard servern som i sin tur skickade datatrafiken tillbaka till respektive enhet i maskinen via den upprättade VPN-tunneln. Uppställningen gjorde det möjligt att kommunicera med maskinen trots att 4G modemerna saknar egna publika IP nummer mot internet. VPN-tunnlarna är dessutom krypterade vilket gjorde kommunikationen säkrare.

Uppställning 4G – 4G

Uppställningen 4G – fiber gör det även möjligt för WireGuard klienterna att kommunicera med varandra. I uppställningen 4G – 4G utnyttjades labbet som en knutpunkt för att sammankoppla två 4G anslutningar som båda saknade egna publika IP nummer mot internet. All trafik i denna uppställning gick således igenom WireGuard servern placerad i Troëdsson ForestTechnology Lab i Skogforsks Uppsalakontor.

Uppställning för utvärdering av lokalt 5G

Mätningarna genomfördes vid Troëdsson Forestry Teleoperation Lab på Jälla Naturbruksskola utanför Uppsala, masten med 5G utrustningen var placerad på: 59.91062N 17.70096E (WGS84)

För prestandautvärdering av 5G så användes två uppställningar för att utvärdera bandbredd och fördröjningar i 5G systemet: Ericsson Industry Connect (föregångaren till Ericsson Private 5G). Detta gjordes dels via mobiltelefon, Oppo find X2 5G (för kontrollmätningar via särskild Watchdog-mjukvara), dels en tidig version av router av märket Advantech ICR 4453 som monterades på prototypskotaren Xt28. Stationssidan upprättades i Troëdsson Forestry Teleoperation Lab med basstationen, Micro Radio 4408, och tillhörande antenn, Kathrein (Ericsson) 80010922.

Radioantennen placerades i en mobil belysningsmast på 12 meters höjd, men kompletterande tester genomfördes med antennen monterad i en skylift på cirka 25 meters höjd. Fokus på testerna av 5G systemet låg på prestation i förhållande till avståndet till antennen. Mätningarna genomfördes med ett ökande avstånd till antennen tills mätenheten inte längre hade någon kontakt med masten.

Resultatet visar UDP-bandbredd från mätenheten till masten och endast mätpunkter med försumbart tapp i datatrafiken, så kallade "packet loss" har tagits med.

Styrsystemanpassning

Styrsystemet utnyttjar kommunikationsinfrastrukturen som ges i ROS och har utvecklats för att ge låg fördröjning av styr signaler och säker användning av maskinen.

Maskinenheten var beroende av meddelanden i stadig 50 Hz-ström. Systemet kunde med rimlig arbetsinsats anpassas så att meddelanden tilläts släpa med 100 ms innan maskinenheten av säkerhetskäl nollade signalerna. För att tillåta större avvikelser i signaler och att hantera fördröjningar med variationer krävs en större ombyggnad av hela systemets arkitektur, där även frågeställningar som hur länge en signal kan tillåtas ligga kvar när kranen rör sig i en viss hastighet kommer in.

Resultat

Körbarhet

Uppställning 4G - fiber gav olika resultat beroende på vilken variant som användes på maskinen. Bäst stabilitet och prestanda uppnåddes med uppställning 1 där två separata routrar användes. Det säkerställde att styrsystemet kunde arbeta närmast oberorende av videosystemet. Även i uppställning 3 då endast router B användes fungerade systemet väl, även om styrsystemet hakade upp sig oftare än med uppställning 1. Uppställning 2 med endast den långsammare router A var okörbart.

Uppställning 4G - 4G var okörbart då router A var otillräcklig redan vid körningar mot fiberanslutningen. Men denna uppställning utfördes i tid innan uppställning av 4G fiber, så vetskapen att router A var otillräcklig fanns ännu inte. Det gjordes inga utförligare försök eller mätningar med denna uppställning.

För 5G uppställningen var körbarheten motsvarande Wi-Fi uppställningen, fördröjningar och videokvalitet bedömdes vara helt acceptabla och i motsvarighet mot Wi-Fi.

Nätverksmätningar

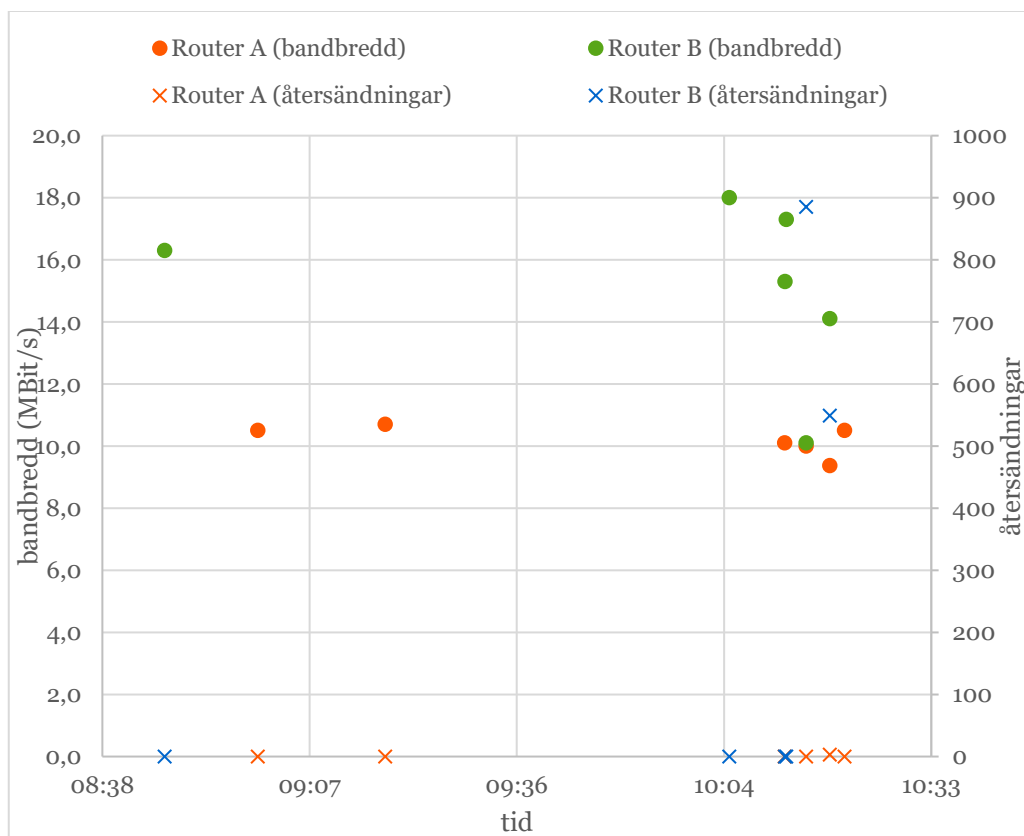
Wireguard belastningstest

För att säkerställa att Wireguardsystemet placerat i Troëdsson Forest Technology Lab hade tillräcklig kapacitet utfördes ett hastighetsförsök med en fiberansluten enhet och en via 4G. Ingen försämring noterades i bandbredd eller antalet omsändningsförsök när systemet kördes simultant jämfört med en enhet var för sig. I försöket gick all trafik enbart genom Wireguardservern och ej till lokala enheter i labbet.

Bandbredd

Resultatet av 4G bandbreddmätningar i samband med körbarhetsförsöken illustreras i Figur 2. Bandbredd för de två 4G-routrarna. Grafen visar även antalet omsändningar av paket. Det tycks finnas en störning mellan enheterna när de arbetar samtidigt.

Medelbandbredden i alla mätningar var 10,1 Mbit/s för Router A och 15,2 Mbit/s för Router B. Skillnaden är väntad då Router B stöder fler parallella uppkopplingar och större bandbredder. Båda enheterna uppvisar dock väsentligt mindre bandbredder än specificerat. Enheterna tycks påverka varandra, vilket kan ses vid mätningarna runt klockan 10:19 (figur 2) då mätningar startades på båda enheterna samtidigt. Speciellt router B fick kraftigt försämrade bandbredd och det uppstod återsändningar av paket. Påverkan på router A var marginell, men 3 återsändningar kunde noteras. Enheterna delade en dubbelantenn och hade samma mobiloperatör.



Figur 2. Bandbredd för de två 4G-routerna. Grafen visar även antalet omsändningar av paket. Det tycks finnas en störning mellan enheterna när de arbetar samtidigt.

Ping och jitter

Pingtiderna avser returtiden för ett meddelande och överföringstiden per väg, Jittret är differensen i ankomsttid på efterföljande paket

Ping för båda enheterna var i medel vid mätningarna 30 ms. Router A hade ett avvikande ping om 138 ms av totalt 2 mätserier med 100 ping i varje, i övriga 199 pingningar var spannet 21-51 ms för Router A. Jitter för router A mättes vid 1Mbit/s och var i medel 6,5 ms för 100 mätningar. Högsta noterade värde var 18 ms, vilket är nära, men ändå under den totala

Router B gav ett spann på 18 -52 ms vid fyra mätserier om 100 s, medeljitter var 6,7 repektive 7,2 ms för två mätserier med 100 s i varje.

Pingtiderna var cirka 15 ms i medel. Jittret uppgick i medel till 50 procent av överföringstiden. Som referens kan noteras att joystickmeddelanden skickas med 50Hz, vilket motsvarar ett komplett meddelande var 20:e ms. Mätningarna antyder att trafiken bör fungera väl, men ett avvikande resultat på 138 ms är mycket högt och kommer störa styrsystemet.

5G

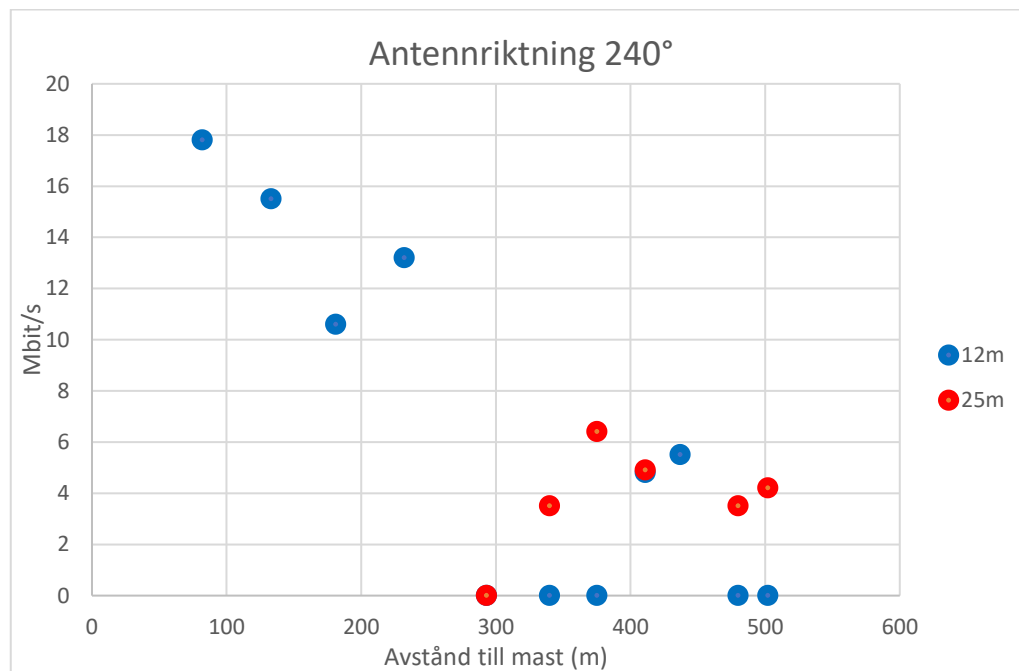
Ping

Den genomsnittliga pingtiden var 13ms (max 32,2ms, min 7,3ms) för mätningar utförda med mobiltelefonen under 10s. Vid praktisk körning kunde enskilda paket med en pingtid över 45ms observeras.

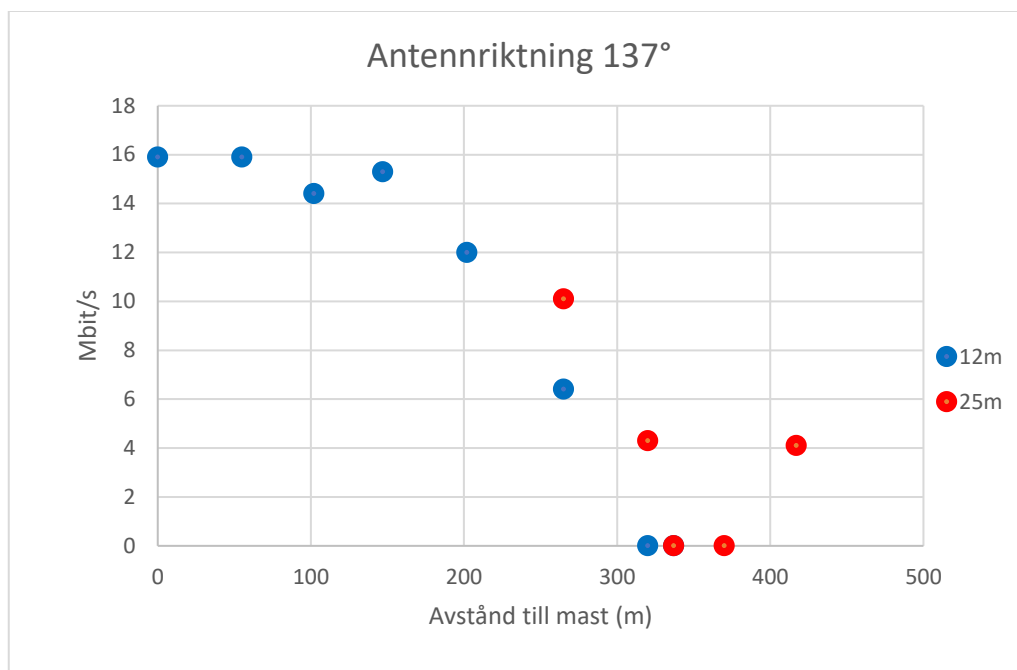
Prestanda

5G systemets prestanda utvärderat i förhållandet mellan mast och mätenhet i två antenriktningar.

Plats: Jälla, Uppsala 59.91062N 17.70096E (WGS84)



Figur 3. Prestandautvärdering i förhållandet mellan masthöjd och riktning 240 grader.



Figur 4. Prestandautvärdering i förhållandet mellan masthöjd och riktning 137 grader

Slutsatser

4G

De fördröjningar och bandbredder som uppmäts med en 4G-anslutning är inom kraven för fjärrstyrning med systemet. Faktiskt körning upplevdes möjligt, även om vissa störningar uppstod och fördröjningen tidvis upplevdes mera påtaglig än förväntat. Samkörningsmätningarna gav en ledtråd att enheterna påverkar varandra och potentiellt är faktisk prestanda vid körning sämre än nätverksmätningarna antyder. Detta trots att data skickas i olika riktning. Orsaken tros vara den gemensamma antennen och/eller uppkopplingen mot samma basstation. En annan möjlighet är utrustningen på kontoret på något sätt utgjorde en flaskhals, även om ett belastningstest av systemet inte kunde påvisa något sådant. Användandet av dubbla routrar är således ingen garanti för oberoende uppkopplingsvägar. Det kunde även noteras ett avvikande meddelande i mätningarna med högre fördröjning, frekvensen av dessa kan tyckas relativt låg, 1 per 200 s, men en störning var 3–4 minuter skulle vara oacceptabelt vid produktivt skogsarbete med kran. Vidare studier krävs för att kartlägga omfattningen och stabiliteten i 4G-anslutningar och vilka åtgärder som kan tas för att hantera avvikelser med så låg inverkan på säkerhet och användbarhet som möjligt. Mera avancerad 4G-nätverksutrustning med dubbla SIM-kort och möjlighet till trafikprioritering kan vara en pusselbit.

5G

Då detta projekt startades var 5G-systemen och i synnerhet Industry Connect något som inte hade utvärderats i någon större omfattning. Projektet var ett av de första i världen med att testa lokalt 5G-system. Utvecklingen och förståelsen för 5G-systemen från det att projektet startade 2020 tills idag har gått fort framåt. Några av de större påverkande faktorerna kan nämnas att;

- Routern från Advantech som monterades på Xt28:an saknade stöd för MIMO (multiple input and output) i upplänk (något som har lyfts med tillverkaren), denna funktion skulle potentiellt kunna ge närmare 2 gånger bättre prestanda.
- Telefonen Oppo find X2 5G saknade MIMO i upplänk.
- Testerna gjordes på 20 MHz-bandet i dag finns möjligheter för 40 MHz, även detta ger potentiellt närmare 2 gånger ytterligare utrymme för sändning av data.
- Multi-User MIMO kommer att finnas tillgå i framtida versioner av Ericsson Private 5G (nutida version av Ericsson Industry Connect) som också ger bättre total genomströmning genom systemet med flera simultana anslutningar.

De förlorade paketen med data, Packet loss, i Watchdog-applikationen är inte helt korrekta. Watchdog kör en iperf-mätning där den försöker trycka enorma mängder trafik genom en ganska begränsad upplänk. Effekten blir att på applikationsnivå uppmäts mycket mer packetloss än vad som skulle kunna observeras i radio-lagret (packet loss noterades bara för UDP inte för TCP-trafik).

Mätningarna genomfördes med antennen på en relativt låg höjd vilket påverkar signalens räckvidd. Vid båda tester där avståndet mätts med antennen på olika höjder visas en förbättring i räckvidd när antennen kommer högre upp.

Mediabevakning och demonstrationer

Troëdsson Forestry Teleoperation Lab har fått mycket uppmärksamhet i branschpress och demonstrerats för olika grupper med intresse för skogsteknisk utveckling. Labbet har visats för bland annat Skogforsks styrelse, olika skogsmaskintillverkare samt projektmedarbetare i projektet AutoPlant och en internationell grupp från Oregon. Från media har tidningar som Anläggningsvärlden, SkogsEko och Skogforsks egna tidning Vision, besökt och rapporterat om labbet, vilket refererats av flertalet andra. Arbetet kring fjärrstyrning och Troëdsson Forestry Teleoperation Lab har presenterats på större konferenser som till exempel Skogforskdagarna samt ingått i Skogforsks presentation av projektet AutoPlant på Sweden Innovation Days på världsutställningen i Dubai 2022.

Publicering

På Skogforsks hemsida finns flera filmer, podd-avsnitt och kortare nyhetsartiklar:

[Presentation av Autoplant på Världsutställningen - Skogforsk](#)

[Automation & Fjärrstyrning - Skogforsk](#)

[Underlag för framtidens operatörsstationer - Skogforsk](#)

[Rejält kliv mot ökad automation - Skogforsk](#)

Under detta projekt har även en vetenskaplig artikel påbörjats där Troëdsson Forestry Teleoperation Lab är en huvudkomponent i artikeln. Artikeln är uppdelad i två delar, prestationsjämförelse mellan fjärrmanövrerad och konventionell körning av skogsmaskiner samt en vetenskaplig beskrivning av hela infrastrukturen för labbet och dess ingående komponenter, videosystem, kommunikationssystemen, maskinen och dess sensorer (se figur 1). Artikeln "Teleoperation system with full scale forwarder prototype" kommer att skickas in till Croatian Journal of Forest Engineering under 2022.

Pågående projekt

De tre mest omfattande projekten där Troëdsson Forestry Teleoperation Lab används är Remote Timber, AutoPlant och delprojekt inom Mistra Digital Forests. Projekten är breda Vinnova- och Mistrafinansierade samarbeten mellan skogsbolag, universitet, maskintillverkare och andra teknikföretag.

AutoPlant-projektets fokusområde är markberedning och plantering baserat på autonoma maskiner. Under våren 2022 har Skogforsk studerat autonom kran- och terrängkörning.

Projektet Remote Timbers målsättning är att öka effektiviteten på virkesterminaler genom fjärrstyrning av virkestruckar som används för lossning av timmerbilarna. Att fjärrstyra maskiner på virkesterminaler kan motiveras utifrån ett kostnads-, produktivitets- och arbetsmiljöperspektiv. Om en enskild operatör parallellt kan sköta lossning och lastning på flera virkesterminaler innebär det en betydande effektivitetshöjning. I projektet Remote Timber användes labbet för forskning kring kamerateknik och placering av kameror vid fjärrstyrning.

Under Mistra Digital Forest pågår projekt där terrängkörning simuleras i virtuell miljö och ska valideras i praktisk drift under sommaren hösten 2022 i labbet.

Troëdsson Forestry Teleoperation Lab är en viktig del i tekniska utvecklingen för automation och fjärrstyrning i skogsbruket. Infrastrukturen som finns tillgänglig gör att flera forskningsprojekt har kunnat startas och bedrivas betydligt enklare då en färdig testbädd finns. Under 2023 kommer Mistra Digital Forest att fortsätta i ett nytt fyraårsprogram där labbet ingår i ett par olika forskningsfrågor.

Framtida forskning

Ett nyckelområde för fortsatt utveckling är ny teknik för telekommunikation som har möjlighet att öka räckvidden för fjärrstyrningen.