



5G – tekniker i militära tillämpningar

En skanning av området

BÖRJE ASP, ERIK AXELL, PATRIK ELIARDSSON,
TORE LINDGREN, JAN NILSSON

Börje Asp, Erik Axell, Patrik Eliardsson, Tore Lindgren, Jan Nilsson

5G – tekniker i militära tillämpningar

En skanning av området

Titel	5G-tekniker i militära tillämpningar – En skanning av området
Title	5G technologies for military communications – A survey
Rapportnr/Report no	FOI-R-4711-SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2018
Sidor/Pages	33 p
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	4. Informationssäkerhet och kommunikation4. Informationssäkerhet och kommunikation
FoT-område	Ledning och MSI
Projektnr/Project no	I70141
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

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

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

Sammanfattning

Rapporten är resultatet av en litteraturstudie genomförd på FOI med syfte att undersöka möjligheterna med nya 5G-tekniker inom militär kommunikation. Som bakgrund börjar rapporten med att behandla 5G-scenarier och användarfall och översiktligt beskriva nuvarande standardiseringsläge samt hur 5G-systemen kommer att se ut. Därefter beskrivs de olika teknikerna som studerats och deras eventuella betydelse inom militär kommunikation.

Generellt kommer 5G att bidra till mera redundans och en ökad flexibilitet. Det medför flera fördelar, bl.a. snabba omkonfigureringar av näten som ökar robustheten mot störning. Flera nya tekniker förutspås få betydelse för militära tillämpningar, speciellt kan nämnas mjukvarudefinierade nät och nya sätt att utföra interferensundertryckning.

Nyckelord: 5G, arkitektur, SDN, flexibilitet, interferensundertryckning, litteraturstudie

Summary

The report is the result of a literature study performed at FOI with the purpose of exploring the possibilities of new 5G technologies in military communication. The report begins by mentioning proposed 5G scenarios and briefly describing the current standardization situation and the 5G system. Thereafter, the various techniques studied and their possible consequences for military communication are described.

Generally, 5G will contribute to more redundancy and increased flexibility. It brings several benefits as fast network reconfigurations that increase robustness against interference and jamming. Several new technologies are predicted to be of importance for military communications, for example Software Defined Networking (SDN) and new ways to perform interference cancellation.

Keywords: 5G, architecture, SDN, flexibility, interference cancellation, literature survey

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Syfte och mål	6
1.3	Metod	6
1.4	Inriktning	6
1.5	Innehåll	6
2	Scenarier och användarfall	8
2.1	Extremt mobilt bredband	8
2.2	Massiv maskinkommunikation	8
2.3	Mycket tillförlitlig kommunikation med låg fördröjning	9
3	Standardisering av 5G – New radio	10
3.1	Standardiseringsläget	10
3.2	5G-terminologi	11
3.3	Fas I av standarden – 3GPP Release 15	12
3.4	Frekvensområden för 5G	15
3.5	Fas II av standarden – 3GPP Release 16	16
4	Tjänsten Mission Critical	18
5	Satellitbaserad 5G	19
6	Utvalda tekniker	21
6.1	Mjukvarudefinierade nät (SDN)	21
6.2	Multi-antennsystem	21
6.3	Self-interference cancellation	22
6.4	Hantering av flera samtidiga användare	25
6.5	Bredbandiga mottagare och millimetervåg	26
6.6	Multikonnectivitet vid flera bärvägar	27
6.7	Felrättande kodning	29
6.8	Säkerhetsarkitekturer	30
7	Slutsatser	31
8	Referenser	32

1 Inledning

Rapporten är skriven inom FOIs fördjupade avskanningar med syfte att undersöka möjligheterna med nya 5G-tekniker inom militär kommunikation.

1.1 Bakgrund

Under de senaste åren har omfattande forskning pågått i industrin och på universitet världen över för att ta fram tekniker för den kommande mobiltelefonistandarden (5G). Ett flertal nya intressanta tekniker har utvecklats och föreslagits ingå i standarden såsom *carrier aggregation*, *massive MIMO*, *self-interference cancellation*, *software defined networking*. Dessa tekniker har potentialen att erbjuda högre kapacitet, robustare kommunikation och flera användare jämfört med 4G, vilket är eftertraktat inom mobiltelefonindustrin men även för Försvarsmakten. 5G ska vara den tekniska lösningen för att uppnå detta inom mobilindustrin, men kan det också vara det för Försvarsmakten? Speciellt intressant är att 5G har som målbild att bära s.k. *Mission Critical*-tjänster.

1.2 Syfte och mål

Rapporten sammanfattar en mindre studie där syftet har varit att bygga kunskap om nya tekniker inom 5G som kan användas inom militär kommunikation. Målet är att beskriva några av de tekniska alternativ som har tagits fram inom 5G-utvecklingen och hur de eventuellt skulle kunna användas för militär radiokommunikation. Speciellt intressant är om det skulle finnas framtagna tekniker inom 5G som skulle kunna öka robustheten, kapaciteten samt minska frekvensbristen som är ett stort bekymmer för dagens militära kommunikationssystem.

1.3 Metod

Studien har genomförts huvudsakligen genom litteraturstudier, samt via ett deltagande på en 5G workshop organiserat av Wireless@KTH. En egen workshop med inbjudna gäster från Ericsson där olika frågeställningar diskuterats har också genomförts.

1.4 Inriktning

En stor del av dagens civila forskning inom telekommunikation har kopplingar mot 5G. Det är inte bara nya kommunikationstekniker som utvecklas utan 5G kräver även nya och förbättrade komponenter såsom effektivare batterier, mikrovågskretsar, miniatyrisering av kretsar, etc. Sådana nya komponenter kommer också att få påverkan på Försvarsmaktens kommunikationslösningar i framtiden.

De första 5G-systemen i kommersiell drift förväntas succesivt börja införas omkring 2020. Delar av dagens 4G-system (LTE/LTE-A) är dock en del av det cellulära 5G-konceptet och kommer därför fortsätta att utvecklas under en lång tid framöver.

Därefter kommer 5G att fortsätta utvecklas via flera nya releaser och eventuellt övergå i 6G någon gång i framtiden. Målsättningen med rapporten är inte att översiktligt beskriva hela 5G-området, utan snarare att fokusera på och sammanfatta några specifika teknikområden, och deras eventuella relevans för militär kommunikation.

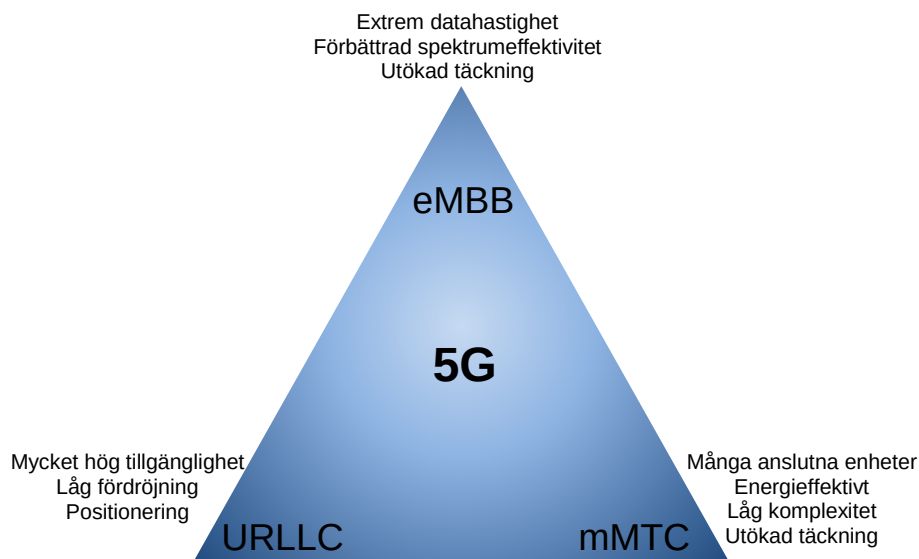
1.5 Innehåll

Rapporten börjar i kapitel 2 med en beskrivning av scenarier och användarfall. I kapitel 3 behandlas standardiseringsarbetet, grundsystemet och terminologin för 5G. Kapitel 4 tar

upp det speciella användarfallet *Mission Critical*. I kapitel 5 behandlas en utökning av grundkonceptet där satellit ingår. De olika teknikerna som studerats beskrivs och analyseras utifrån möjliga militära tillämpningar i kapitel 6. Rapporten avslutas med en sammanfattning av slutsatserna i kapitel 7.

2 Scenarier och användarfall

I utvecklingen bakom 5G-standarden har tre dimensionerande användarfall som ska driva utvecklingen identifierats. Figur 1 visar de tre användarfallen och deras viktigaste krav. Användarfallen beskrivs var och ett i detta kapitel.



Figur 1. De tre övergripande användarfallen bakom utvecklingen av 5G.

2.1 Extremt mobilt bredband

Extremt mobilt bredband *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB) har varit och är i huvudsak det mest drivande användarfallet i utvecklingen inom 5G. Med eMBB ska höga datahastigheter, upp till storleksordningen gigabits per sekund, kunna tillhandahållas av systemet. Låga datahastigheter, i storleksordningen tiotals megabit, ska vara tillgängligt överallt och alltid till 99 %, vilket ska förbättra användarupplevelsen (QoE, *Quality of Experience*). Datahastigheter och fördröjningstider degraderas succesivt med ett ökat antal användare [1] [2]. Vid tillfälliga situationer med många användare på liten yta, t.ex. konserter och sportevenemang ska 5G fortfarande kunna leverera höga datahastigheter och låga fördröjning som medger t.ex. strömmande HD-video. Datahastigheterna och fördröjningstiderna ska även uppfyllas för användare som färdas snabbt, t.ex. i höghastighetståg, i upp till 500 km/h [3].

Ökad datahastighet och bättre yttäckning, som det här användarfallet innebär, är även intressant för Forsvarsmakten. Men de trådlösa kommunikationssystem inom Forsvarsmakten har dock andra grundförutsättningar vilket gör att datahastigheter i samma storleksordning som eftersträvas inom 5G inte bedöms som rimliga, dock är högre datahastigheter efterfrågat.

2.2 Massiv maskinkommunikation

Massiv maskinkommunikation (mMTC) är utformad för mycket bra yttäckning med hundratusentals enheter per kvadratkilometer. Ett ytterligare syfte med mMTC är att tillhandahålla anslutningsmöjligheter med relativt låg mjukvaru- och hårdvarukomplexitet och låg energiförbrukning. Många av enheterna är batteridrivna eller drivna av alternativa energikällor och datamängden de behöver sända är liten och de sänder sällan. Tjänsterna som enheterna hanterar tenderar att vara relativt toleranta mot fördröjningar. Enheterna har normalt en lång livslängd och därför måste tjänster och programvara vara skalbara och

kunna bytas ut relativt snabbt för att hantera nya affärsmöjligheter. Exempel på maskinkommunikation är; övervakning och automatisering av byggnader och infrastruktur, smart jordbruk, logistik och spårning av utrustning, alltså typiskt för IoT (*Internet of Things*) produkter [2] [3].

Sensornätverk med massor av anslutna sensorer över stora områden som kan vara aktiva under långa perioder, dessutom batteridrivna, skulle kunna vara ett intressant användarfall för Försvarsmakten. Informationen som inhämtas av ett sådant nätverk skulle i många fall kunna vara känslig, därför blir säkerhetsaspekterna än viktigare.

2.3 Mycket tillförlitlig kommunikation med låg fördröjning

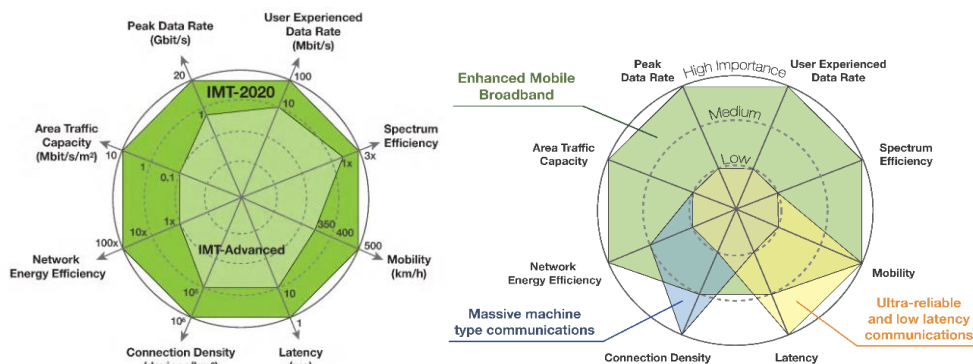
För vissa tillämpningar sker övervakning och kontroll i realtid, end-to-end fördröjningen ska vara mycket låg (millisekunder) och behovet av tillförlitlighet är stor. Detta kallas mycket tillförlitlig kommunikation med låg fördröjning *Ultra-Reliable Low-Latency Communication* (URLLC). Exempel på tillämpningsområden är inom automation av smarta elnät och i industriell processtyrning, självkörande bilar och sensornätverk, där det finns höga krav vad det gäller tillförlitlighet och låg fördröjning på tillämpningsnivå [2].

Aktörer inom samhällssäkerhet behöver tillförlitlig och säker kommunikation som medger video i realtid och möjlighet att skicka högupplösta bilder. Största utmaningen i att tillhandahålla detta ligger i att kunna garantera det till sjöss, i luften, under marken (t.ex. tunnelbanor, källare) och inomhus. Trafik som rör samhällssäkerhet kan behöva prioriteras över annan trafik i nätet [3]. IT-säkerhetsaspekter kommer att få en ökad betydelse för både mMTC och URLLC då det kan vara samhällskritiska system som är anslutna.

Försvarsmakten kan ses som en aktör inom samhällssäkerhet och berörs därför i högsta grad av detta användarfall. Om kraven för detta användarfall uppfylls är det troligt att det går att använda 5G-systemet för att fjärrstyra obemannade plattformar.

3 Standardisering av 5G – New radio

Under 2012 startade ITU¹ (ITU-R) utvecklingen av ”IMT for 2020 and beyond” och satte därmed agendan för de kommande forskningsaktiviteterna inför lanseringen av femte generationens mobiltelefonisystem, 5G. Specifikationen för IMT-2020 är efterföljaren till IMT-2000 från 2008 framtagna för 4G, se Figur 2. Som grund för IMT-2020 har ett antal viktiga prestandakrav tagits fram av ITU. Denna utgör grunden för den standard som nu utvecklas av 3GPP².



Figur 2 Vänstra figuren visar skillnaden i förmågor mellan IMT-2000 och IMT-2020. Till höger visas hur viktiga de definierade nyckelförmågorna är i olika användarfall (Bild: ITU –R M.2083-0).

Under studiefasen av 5G diskuterades många olika användarfall som skulle bli dimensionerande för 5G. De slutliga användarfallen definierade av 3GPP inkluderar; *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *ultra-reliable, low-latency communications* (URLLC) samt *massive machine-type communications* (mMTC), se kapitel 2. De extrema variationer i behov som eMBB och mMTC och allt annat däremellan genererar skall hanteras av ett enhetligt och flexibelt luftgränssnitt i 5G.

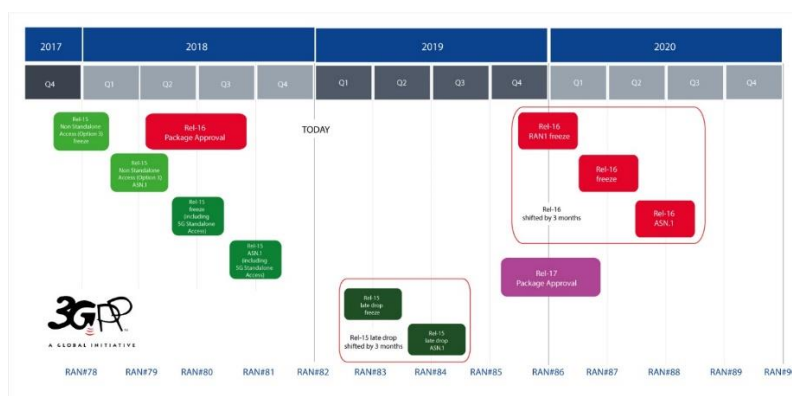
3.1 Standardiseringsläget

Den första 5G-standard, 3GPP Release 15, bygger på ett helt nytt radiogränssnitt, *New Radio* (NR). Huvuddragen i NR beskrivs längre fram i rapporten. NR kan kontrolleras på två olika sätt, antingen i *Non-Standalone operation* (NSA), där systemet inte har egen kärnnätkapacitet utan där LTE:s kärnnät används i kontrollplanet. I det andra fallet, *Standalone operation* (SA), finns det full kontrollplansfunktionalitet i ett eget 5G-kärnnät.

Den första fasen av 5G-standard, Release 15, var från början tänkt att vara klar i juni 2018 med storskalig utrullning under 2020. Men under ett möte i Dubrovnik i mars 2017 godkändes en accelererad plan som skulle kunna medge storskaliga fältprov och kommersiell utrullning redan under 2019, se Figur 3. Denna interimsversion kallad *Non-Standalone* (NSA) 5G NR eller ”early drop” som var klar i december 2017, möjliggör för utvecklare att tidigt kunna skapa 5G-utrustning och mjukvara. NSA förlitar sig på 4G-radio och -kärnnät för täcknings- och mobilitetshantering, men där 5G NR används för att öka datatakten och minska fördröjningarna, se Figur 4.

¹ International Telecommunication Union.

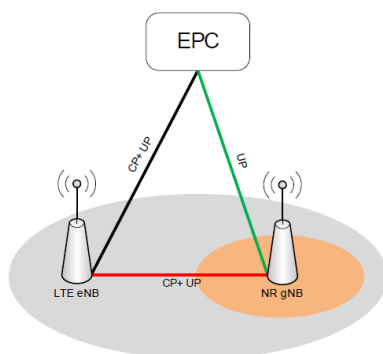
² 3GPP, 3rd Generation Partnership Project, är en samarbetsorganisation mellan olika organisationer aktiva inom telekommunikation.



Figur 3 Tidplan för utvecklingen av 5G (Bild: 3GPP).

Fas 1 av 5G var klar i juni 2018 (utvecklingen fryst i september 2018) och innehåller ett helt nytt kärnnät vilket gör 5G helt oberoende av LTE eller LTE-A. Från och med releasen i september 2018 finns det bara en standardversion gemensam för NSA och SA.

3GPP införde även termen NG-RAN som refererar till ett radioaccessnät som ansluter till ett 5G-kärnnät där radioaccessnätet antingen kan vara eLTE (LTE Release 15 och framåt) eller baserat på det nya luftgränssnittet 5G NR. I mars 2018 lanserade 3GPP även vad man kallade en "late drop" för Release 15 som skall vara klar i december 2018. Denna version innehåller endast arkitekturrelaterade optioner som inte blev klara till septemberutgåvan. Denna senare release skall vara fullständigt bakåtkompatibel med tidigare 5G-releaser. Först med Release 16, som förväntas vara klar i december 2019 (frysas i mars 2020) kommer standarden att uppfylla de krav som ITU satt upp som mål för 5G.



Figur 4 En NR NSA-nod (NR gNB) och dess koppling till LTE-kärnnät (EPC³) och en LTE-basstation (eNB⁴).

3.2 5G-terminologi

Inom 5G har en ny terminologi utvecklats. Här nedan beskrivs några av de ingående begreppen kortfattat:

- NR: *New Radio Access Technology*, den nya radioaccessstekniken i 5G
- NG-RAN: *Next Generation Radio Access Network* (även 5G-RAN), radioaccessnätet

³ Evolved Packet Core, kärnnätet för LTE.

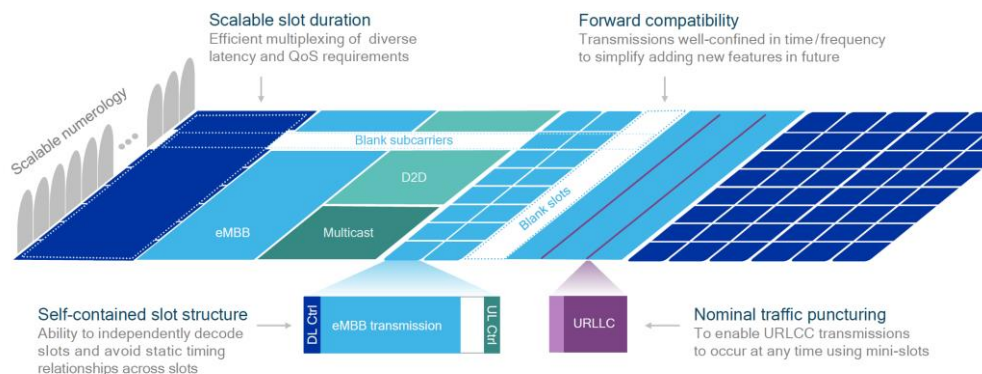
⁴ evolved NodeB.

- Numerologi: motsvarar, lite förenklat, avståndet mellan underbårvågor i frekvensdomänen. Genom att skala ett underbårvågsavstånd med ett heltal N kan olika numerologier definieras
- 5GC: 5G Core Network, andra benämningar är *NextGen Core* (*Core Network for Next Generation System*) och detta är 5G:s kärnnät
- 5G-AN: 5G Access Network, identifierar ett access-nätverk, antingen 5G-RAN och/eller ett icke-3GPP accessnätverk, som ansluter till ett 5G kärnnät
- ng-eNB: en nod (basstation) som tillhandahåller E-UTRA⁵ användarplan och kontrollplansprotokoll(termineringar) mot en UE och som ansluts via NG-interfacet till 5GC. Definierad från Release 15 och framåt
- gNB: en nod (basstation) som tillhandahåller NR användarplan och kontrollplansprotokoll(termineringar) mot en UE och som ansluts via NG-interfacet till 5GC. Definierad från Release 15 och framåt
- NG-RAN nod: antingen en gNB eller en ng-eNB
- NG-C: kontrollplansinterface mellan NG-RAN och 5GC
- NG-U: användarplaninterface mellan NG-RAN och 5GC
- Xn: nätverksinterface mellan NG-RAN noder

3.3 Fas I av standarden – 3GPP Release 15

3.3.1 Flexibelt slotbaserat 5G NR-ramverk

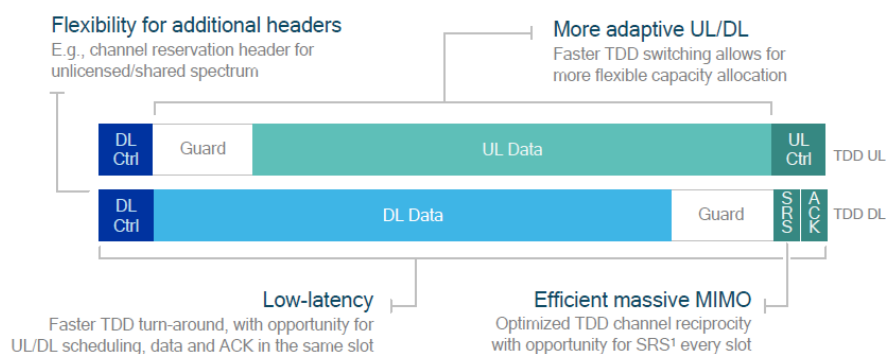
Det slotbaserade NR-ramverket, Figur 5, är en nyckelkomponent i 5G-designen. Det gör det möjligt för operatörerna att effektivt multiplexa flera olika 5G-tjänster på en frekvens. Förhoppningen är att denna struktur ska ge en mer framtidssäker design jämfört med vad som har varit fallet med tidigare generationers cellulära nät.



Figur 5 Flexibelt slotbaserat NR-ramverk (Bild: Qualcomm).

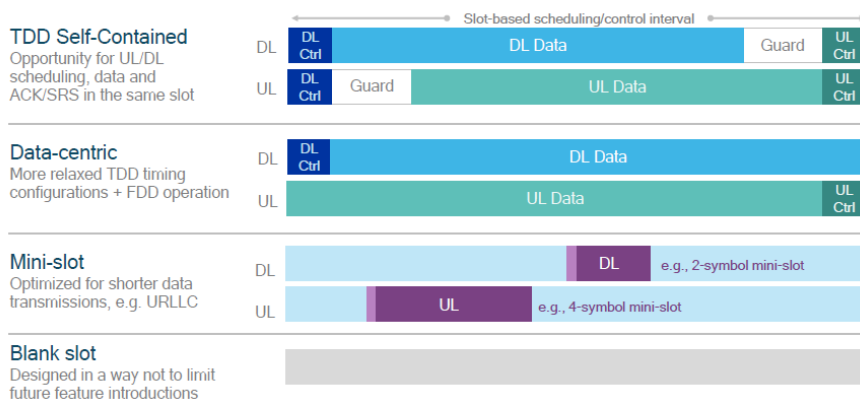
En för det flexibla ramverket mycket vital teknisk innovation är den självständiga (*self-contained*) slotstrukturen för tidsduplex (TDD). En sådan slot kan innehålla kontroll-signaler (UL/DL schemaläggning), data och Ack (*Acknowledgement*). Med denna struktur, Figur 6, kan varje NR-transmission ske med oberoende avkodning av enskilda slots och möjlighet att undvika statiska tidsförhållanden mellan slots. Denna design förenklar införandet av nya 5G NR-funktioner och -tjänster i framtiden.

⁵ Evolved Universal Terrestrial Radio Access, radiogränssnittet för LTE.



Figur 6 Fördelar med att använda en självständig TDD-slot (Bild: Qualcomm).

Strukturen med självständiga slots i 5G NR ger minskad fördröjning relativt LTE tack vare möjligheten till snabb UL/DL-växling och skalbara slot-tider, se 3.3.2. Förutom minskad fördröjning ger denna design mer adaptiva TDD UL/DL-konfigurationer, avancerad reciprocitetsbaserad antennteknik (t.ex. styrning av massiv MIMO i nedlänk baserad på snabb avkänning av upplänken) såväl som att nya användarfall möjliggörs. Figur 7 visar några fler exempel på hur strukturen kan anpassas till olika användningsfall och framtida krav genom detta förfarande.



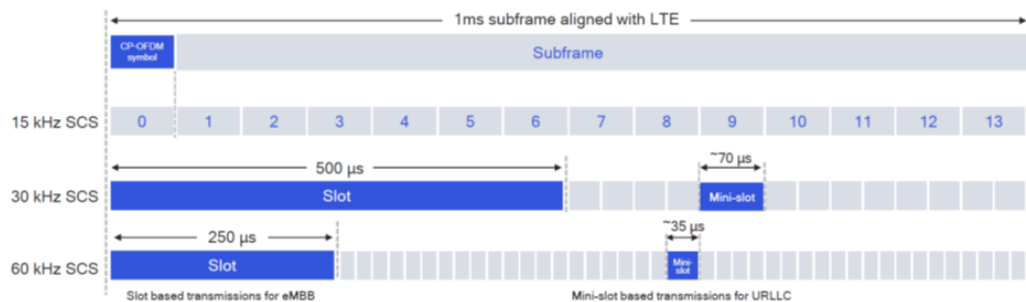
Figur 7 Några exempel på flexibla slotstrukturer (Bild: Qualcomm).

3.3.2 Basvågform

5G NR bygger i grunden på traditionell OFDM (*Orthogonal Frequency Division Modulation*) med ett cykliskt prefix. Några grunddata för NR ges här nedan:

- Maximal kanalbandbredd för en NR-bärvåg är 400 MHz (Release 15 specificerar upp till 100 MHz).
- Skalbar numerologi ger separation mellan underbärvågor från 15 kHz till 480 kHz.
- Antalet underbärvågor per PRB (*Physical Resource Block*) är 12.
- Antalet OFDM-symboler per slot varierar med underbärvågsseparationen.
 - Underbärvågsseparation ≤ 60 kHz, 12 (expanderat cykliskt prefix) eller 14 symboler/slot (normalt cykliskt prefix).
 - Underbärvågsseparation > 60 kHz, 14 symboler/slot.
- En numerologi motsvarar, lite förenklat en given underbärvågsseparation i frekvensdomänen.

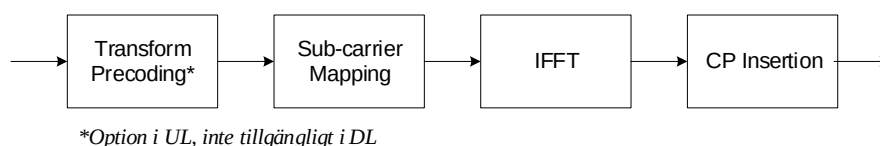
- En datatransmission kan omfatta en eller flera slots, så kallad slotaggregering, vilket ger reducerad overhead och förbättrad spektraleffektivitet.
- Längden på en radoram är oberoende av numerologi och är alltid 10 ms och en subram är 1 ms, se Figur 8.
- För alla numerologier gäller att de på symbolnivå och tidsmässigt går jämnt ut med en subram.



Figur 8. Skalbart transmissionsintervall för några numerologier. Observera användningen av "mini-slots" som nyttjar 2, 4 eller 7 OFDM-symboler.

I nedlänk (DL) använder NR konventionell OFDM med cykliskt prefix. I upplänken (UL) finns det två val: konventionell OFDM med cykliskt prefix med en funktion som utför förkodning genom DFT-spridning (*transform precoding*), och som kan vara aktiverad eller deaktiverad. Ett blockschema för dessa sändare illustreras i Figur 9. För de två varianterna av OFDM gäller följande:

- CP-OFDM: Åtminstone för eMBB upp till 40 GHz (eventuellt 52.6 GHz), kan användas för både singel-ström och multi-ström (det senare typiskt för MIMO) transmission.
- DFT-S-OFDM: Begränsad till singel-ström transmission (klarar ej MIMO) och främst avsedd för räckviddsbegränsade fall.



Figur 9 Blockschema för en sändare med CP-FDM och DFT-S-OFDM.

3.3.3 Skalbar numerologi

Med numerologi avses en parametrisering av OFDM, till exempel avstånd mellan underbärvågor (*Subcarrier spacing, SCS*), symboltid (*Symbol duration*), längd på cykliskt prefix (*Cyclic Prefix duration*) slottid/storlek (*Slot duration/size*) och ramlängd/storlek (*Frame duration/size*). Som jämförelse stöttar LTE flera bandbredder upp till 20 MHz med i de flesta fall en fix numerologi med 15 kHz mellan underbärvågorna.

5G måste kunna arbeta över ett mycket stort område av radiospektrum och kommer att använda betydligt större bandbredder än LTE. 5G har därför en skalbar numerologi för att kunna stödja olika frekvensband och implementeringsmodeller, se Tabell 1. Motsvarande symboltider ges av Tabell 2. Avståndet mellan underbärvågorna måste också skala med

bandbredden för att beräkningskomplexiteten inte skall öka exponentiellt för större bandbredder.

Tabell 1 Numerologier som stöts i Release 15. OBS $\mu=5$ definieras inte fullt ut i Release 15.

μ	$\Delta f = 2^{\mu} \cdot 15$ [kHz]	1 PRB=12 underbärsvågor [kHz]	Cykliskt prefix	Stöd för data	Stöd för synkronisering
0	15	180	Normalt	Ja	Ja
1	30	360	Normalt	Ja	Ja
2	60	720	Normalt, Expanderat	Ja	Nej
3	120	1440	Normalt	Ja	Ja
4	240	2880	Normalt	Nej	Ja
5	480	5760	Normalt	Ja	Ja

Tabell 2 OFDM symboltid (normalt cykliskt prefix).

Parameter/Numerologi (μ)	0	1	2	3	4
Avstånd mellan underbärsvågor (kHz)	15	30	60	120	240
Symbol längd (μ s)	66.67	33.33	16.67	8.33	4.17
Cykliska prefixets (CP) längd (μ s)	4.69	2.34	1.17 normalt CP 4.13 expanderat CP	0.57	0.29
OFDM symbol inklusive CP (μ s)	71.35	35.68	17.84	8.92	4.46

Ett litet avstånd mellan underbärsvågor ger fördelen av ett relativt långt cykliskt prefix (i absolut tid) med en rimlig overhead medan större avstånd behövs för att, till exempel, hantera ökat fasbrus vid högre bärsvågsfrekvenser och därmed öka vågformens robusthet.

Eftersom det cykliska prefixet skalar med symboltiden har en hög numerologi kortare cykliskt prefix som är mindre lämplig för radiomiljöer med lång fördröjningsspridning (*delay spread*) av flervägskomponenterna, typiskt för stora celler. Högre ordningens numerologier är därför mer lämpade för små celler. I NR finns ett specialfall av cykliskt prefix. Vid 60 kHz underbärsvågsavstånd finns, förutom det normala prefixet, även ett längre cykliskt prefix som medger 60 kHz numerologi i större celler på bekostnad av ökad overhead.

3.4 Frekvensområden för 5G

I Release 15 finns det två frekvensområden definierade för 5G, FR1 och FR2. FR1 omfattar 450-6000 MHz, se Tabell 3, och FR2 omfattar 24250-52600 MHz, se Tabell 4. Andra frekvensband och bandbredder kan komma i framtida releaser och redan i Release 16 förväntas nya frekvensband och ändringar av befintliga frekvensband införas.

Tabell 3 Frekvenser i frekvensområdet FR1 definierade i Release 15, 3GPP TS 38.101-1 V15.2.0 (2018-06). SUL=Supplemental Uplink, SDL=Supplemental Downlink.

NR Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive, UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit, UE receive	Duplex Mode
	$F_{UL\ low} - F_{UL\ high}$	$F_{DL\ low} - F_{DL\ high}$	
n1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
n5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
n7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
n8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
n12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
n20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
n25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
n38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
n39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
n40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
n41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
n51	1427 MHz – 1432 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	TDD
n66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	FDD
n71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
n75	N/A	1432 MHz – 1517 MHz	SDL
n76	N/A	1427 MHz – 1432 MHz	SDL
n77	3300 MHz – 4200 MHz	3300 MHz – 4200 MHz	TDD
n78	3300 MHz – 3800 MHz	3300 MHz – 3800 MHz	TDD
n79	4400 MHz – 5000 MHz	4400 MHz – 5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz – 1785 MHz	N/A	SUL
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz – 1980 MHz	N/A	SUL
n86	1710 MHz – 1780 MHz	N/A	SUL

Tabell 4 Frekvenser i frekvensområdet FR2 definierade i Release 15, 3GPP TS 38.101-1 V15.2.0 (2018-06).

NR Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive, UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit, UE receive	Duplex Mode
	$F_{UL\ low} - F_{UL\ high}$	$F_{DL\ low} - F_{DL\ high}$	
n257	26500 MHz – 29500 MHz	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	27500 MHz – 28350 MHz	TDD

3.5 Fas II av standarden – 3GPP Release 16

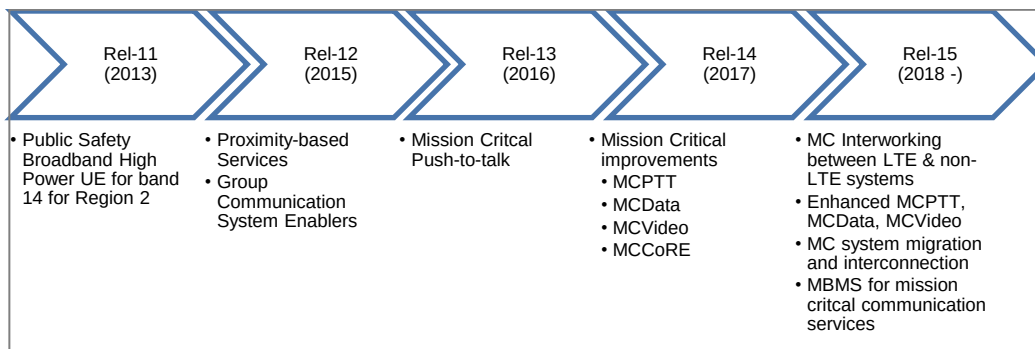
Fas II av standarden förväntas som tidigare omnämnts bli klar i slutet av 2019. Bland alla de saker som studeras och som kan komma att ingå i fas II är följande värda att omnämnas;

- MIMO-förbättringar
- Interferensbegränsningsmetoder
- Reduktion av effektförbrukning, främst UE
- Frekvenser över 52.6 GHz

- *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA)
- Förbättringar av *Carrier Aggregation* (CA) och *Dual Connectivity* (DC)
- 5G i olicensierat spektrum
- Mobilitets-, plats- och positionsförbättringar
- Vehicle to everything (V2X)
- URLLC förbättringar, främst på PHY
- Industriell IoT
- Förbättringar av *Machine-Type-Communications*, MTC
- Förbättringar av smalbandig IoT, NB-IoT
- Integrerat access-stamnät
- 5G för satellit (stöd för icke-mark baserade nät)
- SON och Big Data

4 Tjänsten Mission Critical

Utvecklingen av 'Mission Critical'-tjänsten (MC) för 5G startade redan i LTE med Release 13. Mer grundläggande funktioner som gruppssamtal introducerades redan i Release 12 och utökad effekt för bättre täckning för användare inom samhällskritiska funktioner i Release 11. I och med första releasen av 5G, Release 15, utökas konceptet MC ytterligare. I Figur 10 visas utvecklingen av MC genom de olika releaserna av 3GPP. Inom MC finns det i huvudsak tre tjänster; push-to-talk (MCPTT), video (MCVideo) och data (MCData). Gemensamma krav (MCCoRe) för dessa tre tjänster håller på utvecklas inom en arbetsgrupp i 3GPP [4].



Figur 10. Utvecklingen av Mission Critical inom de olika releaserna av 3GPP.

I utvecklingen av MC har 3GPP beaktat de typiska kraven blåljusmyndigheter och andra samhällskritiska aktörer ställer på ett kommunikationssystem; det ska vara robust, stödja flertalet grupper, privata samtal, säkerhet, etc. MC-tjänsten riktas främst till blåljusmyndigheter, men även tågsektorn, kärnkraftverk, hantverkare och icke professionella användare (t.ex. privatpersoner) kan tänkas få tillgång till vissa delar ur MC, då kanske främst gruppssamtal. En annan aspekt är att MC inom 5G ska kunna kommunicera med icke 5G-system så som t.ex. TETRA, P25 och andra typer av radiosystem som är vanliga i denna sektor [5].

MCPTT-tjänsten ska medge kommunikation mellan flera användare, alltså gruppssamtal, där varje användare ska ges möjlighet att tala. Om flera användare samtidigt begär att få tala eller om det uppstår köer, finns det deterministiska funktioner för att hantera vem som är näst på tur. Användare kan ges högre prioritet så att de kan gå in och avbryta ett samtal och säga sitt. Det går även att lägga in begränsningar i hur länge en användare kan få prata åt gången. En användare kan ingå i flera talgrupper och byta mellan dessa. Utöver gruppssamtal stöds även direktsamtal mellan två användare [6].

MCData-tjänsten ska tillgodose det ökade behovet av ökad datatakt för samhällskritiska funktioner och blåljusmyndigheter. Datatjänsterna ska fungera för olika grupper precis som MCPTT. Funktioner som MCData ska tillhandahålla är t.ex. korta datameddelande (text eller binärdata), fildistribution, IP-konnektivitet, chatt-funktion med leverans-notifikation och utökade status-meddelanden [7].

Tjänsten MCVideo ska tillhandahålla strömmande video. Icke-strömmande video d.v.s inspelade video-filer hanteras av MCData. MCVideo har till stora delar samma krav som MCPTT med en viktig skillnad att MCVideo tillåter att flera i samma grupp sänder samtidigt om kapaciteten i nätet tillåter det. Videoövervakning är en applikation som skulle kunna hanteras med MCVideo [8].

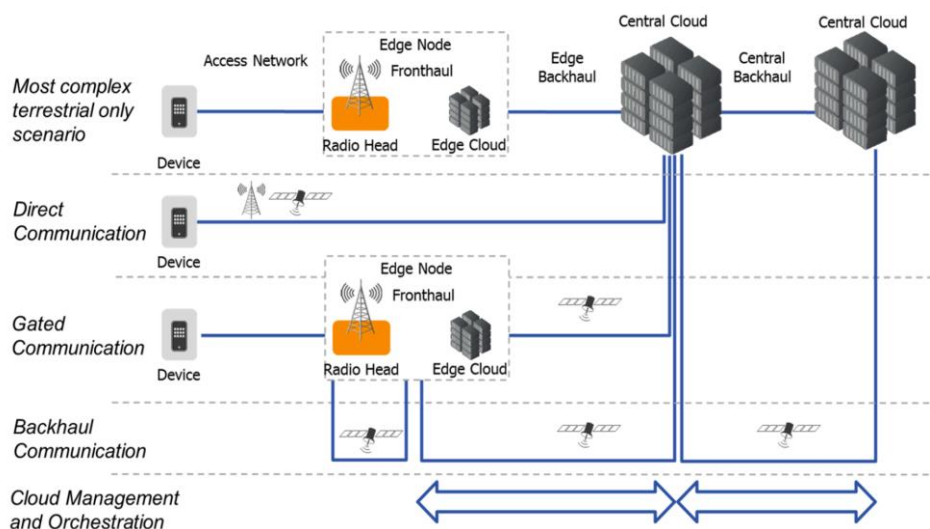
Det bedöms som troligt att MC-tjänsten inom 5G kommer användas av blåljusmyndigheter och andra organisationer inom samhällskritiskinfrastruktur, men det ligger några år framåt i tiden. Om civila aktörer i Sverige börjar använda MC behöver Försvarsmakten ta ställning till hur de ska förhålla sig till MC. 5G-baserad *Mission Critical* kan komma att komplettera, eventuellt ersätta, TETRA i dagens Rakel-system och då berörs Försvarsmakten i högsta grad.

5 Satellitbaserad 5G

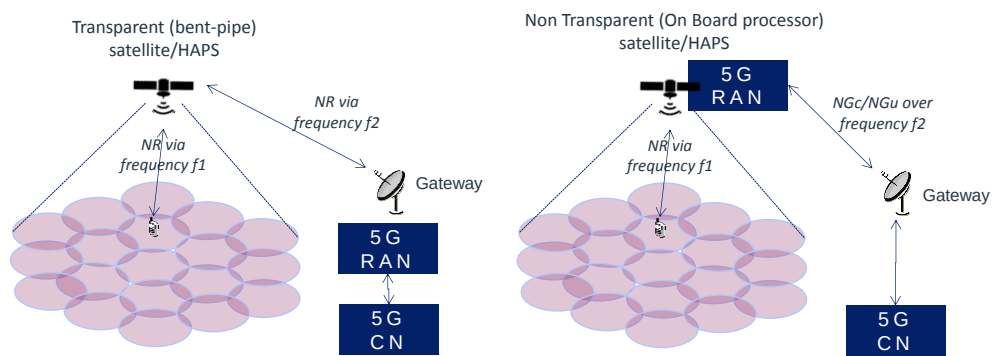
Det finns ett även intresse för en integrerad satellit- och markbaserad nätinфраstruktur inom ramen för 5G. Bland annat har 3GPP studerat betydelsen och användningen av satelliter. I detta sammanhang har begreppet *Non-Terrestrial Networks* (NTN) myntats. Med detta avses nätverk eller segment av nätverk som använder luftburna eller rymdburna (satelliter) farkoster. Luftburna farkoster avser höghöjdsplattformar (HAPS, *High Altitude Pseudo Satellites* eller *High Altitude Platform Stations*) i form av obemannade flygplanssystem och som opererar kvasi-stationärt på typiska höjder mellan 20 (ibland anges ända ner till 8 km) och 50 km. Dessa nätverk ingår i en 3GPP studie, TR 38.811 "*Study on NR to support non-terrestrial networks*", som främst handlar om att definiera ett antal användarscenarier, studera kanalmodeller samt identifiera och analysera möjliga systemarkitekturer. En andra studie, "*Study on using Satellite Access in 5G*", ska leda till en teknisk rapport, TR 22.822, som en del av 3GPP Release 16. SDN (*Software Defined Networking*) och NFV (*Network Functions Virtualization*) är viktiga komponenter i ett system som nyttjar både mark- satellitbaserade enheter.

Eftersom fördröjningarna som introduceras via satellitlänken är i spannet 50-700 ms är 5G via satellit inte lämpligt för tillämpningar som kräver korta fördröjningar. Med andra ord är det bara användarfallen eMBB och mMTC som är aktuella för satellitdelen. Geografiska områden med gles eller dålig 5G-täckning från marknätet nämns som en tillämpning, matning till accesspunkter och basstationer är en annan, kommunikation till flygplan (särskilt över oceanerna) och fartyg är en tredje samt kommunikation med IoT-enheter i avlägsna trakter en fjärde. Figur 11 visar några av dessa användarfall för ett framtida 5G-system som nyttjar både mark- och satellitbaserad 5G-utrustning samt även bygger på en molnarkitektur.

I Figur 12 visas två möjliga satellitbaserade 5G-koncept, den vänstra bilden visar ett koncept där dagens befintliga satelliter troligen kan användas direkt, konceptet till höger kräver nya satelliter eftersom de även bär 5G radioaccess-nätet.



Figur 11 Ett möjligt framtida 5G-system baserat både på mark- och satellitbaserad 5G-utrustning



Figur 12 Två exempel på ett 5G-koncept som utnyttjar satellit-kommunikation, till vänster en så kallad *bent-pipe* lösning där satelliten repeterar inkommande signal från jorden på ett annat frekvensband än inkommande signal och till höger en mer avancerad lösning med delar av radio-accessnätet (RAN) i satelliten.

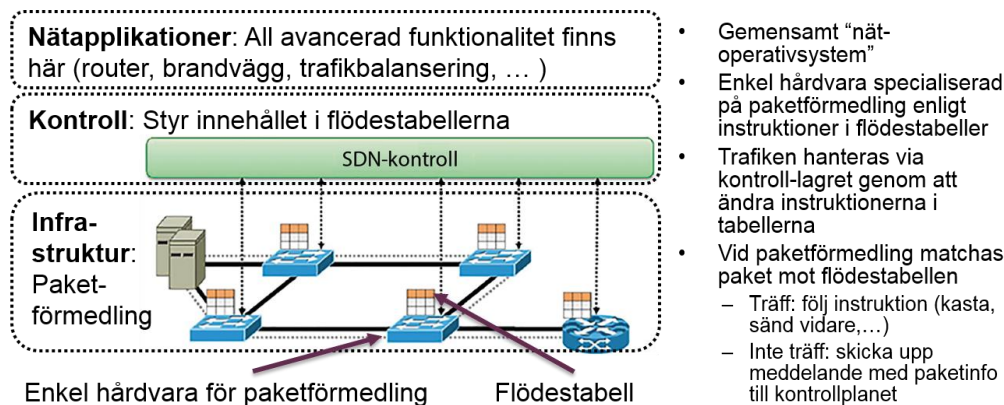
6 Utvalda tekniker

Här nedan har vi identifierat ett antal tekniker som både på lång och kort sikt kan få betydelse för militära radiokommunikationssystem.

6.1 Mjukvarudefinierade nät (SDN)

Mjukvarudefinierade nät *Software Defined Networking* (SDN) är ett relativt nytt tekniskt koncept. Konceptet används redan idag men förutsätts bli ännu viktigare inom den starka utvecklingen av nästa mobiltelefonistandard, 5G. SDN innebär att komponenter i nätinfrastrukturen virtualiseras, *Network Function Virtualization* (NFV).

För att stödja 5Gs nya tjänster krävs bland annat en flexibel och programmerbar infrastruktur. Med en sådan möjliggörs en flexibel uppdelning av tjänsterna samt att tjänsterna och infrastrukturen kan skalas på ett kostnadseffektivt och resurseffektivt sätt. SDN och NFV är lovande tekniker med potential att uppfylla kraven på flexibilitet och programmerbarhet i 5G. Medan SDN skiljer nätverks-kontrollplanet från dataplanet och introducerar abstraktioner och medel för nätverksprogrammerbarhet, frikopplar NFV nätverksfunktioner från hårdvaran. Detta möjliggör realisering av nätverksfunktioner på generella processorer (d.v.s. frikoppling av nätverkstjänster från plattformar). SDN och NFV är kompletterande tillvägagångssätt som kombinerat har potential att skapa möjligheter till nya sätt att utforma, distribuera, driva och hantera nätverk och deras tjänster. Då SDN-funktionalitet succesivt kommer att introduceras i nya produkter (t.ex. routrar) kan SDN också användas i militära nät. Idag är det oklart vad det kommer att innebära avseende nya förmågor och risker. Frågan är vad det innebär avseende nya förmågor och risker? En annan fördel med SDN är att upphandling av kapacitet i civila operatörers 5G-nät förenklas där så kallad *Network Slicing* används för att kunna erbjuda en, för den militära kunden, avskild miljö samt anpassade tjänster. SDN kan illustreras som ett operativsystem för nät, se Figur 13.



Figur 13 SDN – ett gemensamt "nät operativsystem".

6.2 Multi-antennsystem

Utvecklingen inom radiokommunikationsområdet har under lång tid rört sig mot högre frekvenser och antenntutvecklingen har följt denna trend. En naturlig följd av detta är att gruppantennor (t.ex. *phased array* eller MIMO) används i högre utsträckning. Detta innebär i sig inte något paradigmskifte. Med 5G kommer däremot frekvenserna som används att vara så höga att det blir nödvändigt att använda antenner med riktverkan även

på handhållna enheter som t.ex. smartphones. Detta dels på grund av att rundstrålade antennelement blir mindre och därmed tar emot mindre energi och dels på grund av att signalen dämpas mer i atmosfären vid högre frekvenser vilket leder till ökade vågutbredningsförluster.

I [9] ges en översikt över olika typer av gruppantennstekniker och deras användbarhet för 5G-tillämpningar. Fokus är på stora gruppantennor och resultaten är därför mest relevanta för basstationer och större plattformar. Digitala gruppantennor, motsvarande de som används för mottagning av GPS-signaler idag, identifierades som den mest lovande tekniken. Dock medför de höga frekvenserna att ett antal utmaningar återstår i utvecklingen av fungerande hårdvara och systemimplementation, t.ex. vad gäller kapacitet och linjäritet hos ingående komponenter och ömsesidig koppling och synkronisering av antennelementen i gruppantennen.

Gruppantennor kommer att användas även på smartphones för att öka antennens riktverkan vid högre frekvenser. Detta analyseras i [10] där ett antal utmaningar relaterat till de små dimensionerna på smartphones identifieras. T.ex. kommer effektförlusterna på grund av elektriska komponenter och dielektriska material i telefonen samt på grund av användaren att vara betydligt större vid de aktuella frekvenserna (upp till 60 GHz) än vid lägre frekvenser. Även svårigheter relaterat till designen av plana gruppantennor som kan styras i alla riktningar, praktiska problem med hårdvaruintegration och tillverkningskostnaden anges som tydliga utmaningar som måste hanteras.

Sammanfattningsvis kan gruppantenn-teknik antas vara nödvändigt vid de frekvenser som kan vara aktuella i 5G. Det finns däremot betydande (dock inte oöverkomliga) svårigheter vid designen av praktiskt användbara gruppantennor för integration på små, handhållna enheter. Därför är största nyttan med tekniken sannolikt vid fast installation på olika större plattformar som fordon och fartyg.

Gruppantenn-teknik kan också ge stora fördelar vid användande som störsändare. Genom riktverkan mot den attackerade mottagaren kan påverkan av störning ökas avsevärt jämfört med en rundstrålade antenn (se [11] och referenser däri). För att sända störeffekt i rätt riktning mot målet krävs dock en noggrann estimering av kanalen mellan störsändaren och den attackerade mottagaren. En sådan kanalskattning kan göras genom att utnyttja att kanalen är likadan i båda riktningarna (reciprok) mellan mål och störare. Dessutom krävs ytterligare kunskap om signaler som målet sänder, antingen genom att målet sänder ut kända signaler (t.ex. synkroniseringssekvenser) eller genom kunskap om tidsintervall för sändning i TDD [11].

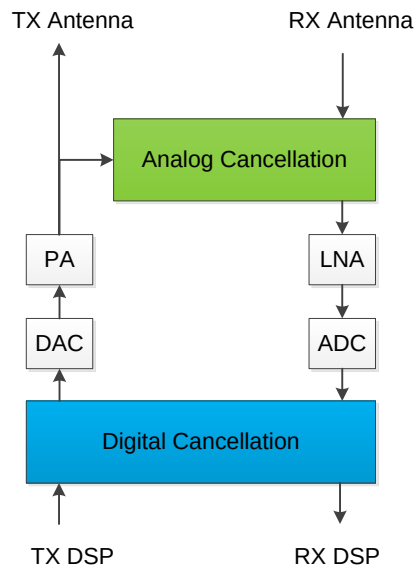
Flerantennsystem ger också möjlighet till ökat skydd mot störning och interferens, genom exempelvis undertryckning. Undertryckning av störning kan göras genom algoritmer speciellt anpassade för det, men maximering av mottagen effekt i riktning mot den egna sändaren ger, förutom ökad signalstyrka hos nyttsignalen, också minskad mottagen effekt från andra riktningar som störning och interferens skulle kunna komma från.

6.3 Self-interference cancellation

Historiskt sett har radiokommunikation enbart fungerat i halv-duplex på en och samma kanal, dvs. antingen har det varit möjligt att sända eller ta emot på en och samma kanal. För att åstadkomma full-duplex, dvs. samtidig sändning och mottagning, har det varit nödvändigt att använda två kanaler, en för sändning och en för mottagning. *Self-interference cancellation* (SIC) är ett koncept som har kommit fram inom den civila forskningen och som diskuteras att införas i 5G. SIC möjliggör riktig full-duplex, dvs. att det nu är möjligt att sända och ta emot samtidigt på en och samma kanal.

Principen bakom SIC är väldigt enkel och bygger på att det som sänds i kanalen är känt. Eftersom det är känt vad som sänds, går det också att subtrahera det utsända från det som tas emot i samma kanal. På så vis har den utsända signalen undertryckts eller tagits bort

från den mottagna signalen och det som återstår är den önskade signalen. I praktiken är det mycket mer komplicerat och SIC brukar göras i tre olika steg, se Figur 14.



Figur 14. Principiell skiss av *self-interference cancellation* där undertryckningen sker i tre steg; först mellan antennerna, därefter analogt och sist digitalt.

Först utnyttjas den dämpning mellan sändande och mottagande antenn som fås genom att fysiskt separera dessa [12]. Om en och samma antenn ska användas används en cirkulator eller *electrical balanced duplexer* (EBD) för att erhålla dämpning mellan sändande och mottagande antenn [13].

Därefter sker en analog undertryckning som oftast görs efter effektförstärkaren (PA) i sändaren och innan den lågbrusiga förstärkaren (LNA) i mottagaren. Syftet med den analoga undertryckningen är att reducera effekten av den utsända signalen så att analog-till-digitalomvandlaren (ADC) inte överstyrs, då den ska sampla den mycket svagare önskvärda mottagna signalen. Grundidén med den analoga undertryckningen är att ta en kopia av den utsända signalen och subtrahera den från det som tas emot. Dessvärre distorderas den utsända signalen av både utbredningskanalen mellan sändare och mottagare samt av icke-linjäriteter orsakade av icke ideala hårdvarukomponenter [14]. Detta försvårar undertryckningen avsevärt eftersom de skillnader som uppstått mellan den mottagna signalen och kopian måste kompenseras för i analog hårdvara innan subtraktionen sker.

Till sist sker en digital undertryckning efter att signalen har samplats. Den digitala undertryckningen bygger också på att den utsända signalen subtraheras från den mottagna signalen. I undertryckningen krävs det att alla linjära och icke-linjära förändringar av utsignalen från digital-till-analogomvandlaren (DAC) till analog-till-digitalomvandlaren (ADC) modelleras och inkluderas [15].

I [16] nämns följande användningsområden av SIC inom 5G:

- Ökad länk-kapacitet: Teoretiskt sett så är det möjligt att dubblera länk-kapaciteten relativt den traditionella kapaciteten för halv-duplex.
- Spektrumvirtualisering: SIC kan användas som en mjukvarustyrd duplexer för att hantera fragmenterat spektrum mer kostnadseffektivt.
- Nya typer av reläfunktioner: Samtidig återanvändning av spektrum mellan kärnnätet och användare är möjligt med SIC, vilket möjliggör nya typer av små celler.

- Utökad interferenskoordinering: Samtidig mottagning av kontrollsignalering och sändning av data minskar fördröjningar och gör det möjligt med snabbare tids- och fassynkronisering för koordinerade interferenshanteringstekniker.

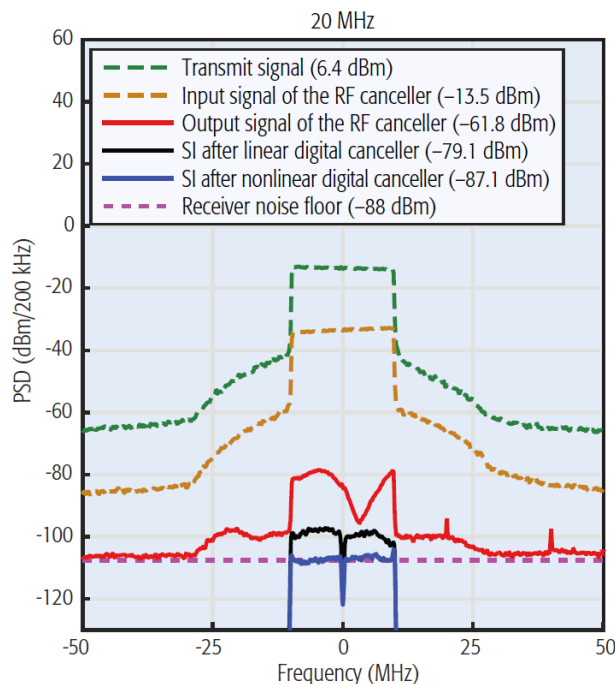
Tillämpningar med SIC för militär radiokommunikation samt nytta ur ett telekrigs-perspektiv har studerats, se [17]. Fördelarna med SIC som lyfts fram är:

- Förbättrad spektraleffektivitet,
- Effektivare sätt att hitta grannar i ett ad-hoc nät,
- Ett antal olika telekrigsscenarion presenteras bl.a.:
 - en störsignal kan skickas samtidigt som en kommunikationssignal kan tas emot,
 - samtidig signalspaning och störsändning på samma frekvens.

Praktiska försök har genomförts för att demonstrera vinsterna med SIC. För en LTE-signal på 2,46 GHz har forskare visat att en total undertryckning på ca 90 dB är möjligt för momentana bandbredder upptill 80 MHz [15]. I Tabell 5 och Figur 15 visas resultat för undertryckningen för olika bandbredder samt hur mycket undertryckning som åstadkoms i de olika stegen i SIC [15]. Figur 15 visar att det i princip är möjligt att undertrycka en egen sändning ända ner till mottagarens eget brusgolv. Ytterligare undertryckning förbättrar inte signalbrusförhållandet något.

Tabell 5. Resultat från en experimentell uppkoppling av undertryckning av en LTE-signal vid centerfrekvensen 2.46 GHz [15].

	Bandbredd/Undertryckning [dB]		
	20 MHz	40 MHz	80 MHz
Antenn	19.9	22.1	22.2
Analog	48.3	44.6	40.9
Digital	25.3	23.8	24.7
Total	93.5	90.5	87.8



Figur 15. Resultat från en experimentell uppkoppling av undertryckning av en LTE-signal med bandbredden 20 MHz vid centerfrekvensen 2.46 GHz [15].

6.4 Hantering av flera samtidigt användare

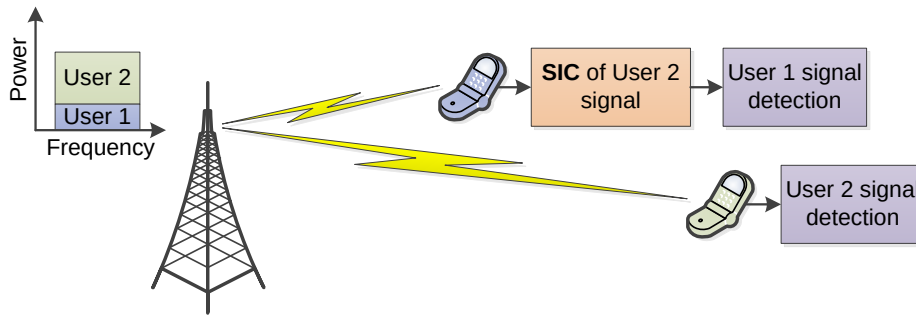
Tekniken för att hantera flera samtidigt användare på en och samma kanal, *multiple radio access technology*, har varierat mellan de tidigare generationerna av mobiltelefonin, 2G, 3G och 4G (LTE/LTE-A). Inom 3G används *Code Division Multiple Access* (CDMA), väldigt förenklat får varje användare en unik kod som används som en spridningssekvens vilket gör att flera användare kan använda samma kanal. I 4G (LTE) används *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) i nedlänken (SC-FDMA i upplänk) och varje användare tilldelas några *sub-carriers* av en kanal och på så sätt kan flera användare använda samma kanal.

Gemensamt för de olika generationerna och accessteknikerna är att användarna tilldelas resurser (kod, frekvens men även tid har använts) ortogonalt. Ortogonaliteten innebär en begränsning i hur många användare som kan allokeras per kanal. Även kanalens utbredningsförhållanden påverkar ortogonaliteten, så att det som mottagaren tar emot inte alltid är ortogonalt uppdelat. Inom 5G eftersträvas många flera användare per kanal och spektrumeffektivare tekniker. Därför har icke-ortogonala tekniker, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), studerats men är ännu inte införda. NOMA innebär dock mer komplexa mottagare.

Generellt sett finns det två grupper av NOMA. De använder antingen uteffekt eller kod för att skilja användarna åt [18]. Kod är sedan tidigare en resurs som används för att separera olika mottagare medan uteffekt kan anses vara en ny resurs i detta avseende. Kod-NOMA är influerat av den klassiska CDMA-tekniken med huvudskillnaden att nu används icke-ortogonala sekvenser med liten korskorrelation. Det finns en uppsjö olika varianter av kod-NOMA. Många av dessa beskrivs övergripande i [18].

NOMA med uteffekt bygger på principen att sändaren (i huvudsak basstationen) skickar flera överlagrade signaler samtidigt, där uteffekten för var och en av signalerna viktas olika beroende på de olika mottagarna. Viktningen beror på den normaliserade kanalvinsten till var och en av mottagarna. Mottagaren med minst kanalvinst får mest uteffekt på sin signal av sändaren medan mottagaren med mest kanalvinst får den lägsta

uteffekten på sin signal av sändaren. Den optimala avkodningsordningen av signalerna med en mottagare av typ *Successive Interference Cancellation* (SIC)⁶ är att börja med signalen till mottagaren med den minsta kanalvinsten och sedan succesivt fortsätta med ökande kanalvinst [19]. Med den avkodningsordningen kan alla användare avkoda sin signal efter att de har subtraherat interferenser från starkare signaler. I Figur 16 illustreras NOMA med uteffekt där signalen för användare 2 får mest uteffekt, eftersom den har den minsta kanalvinsten. Användare 1 måste först avkoda signalen till användare 2 och subtrahera den signalen innan den kan avkoda sin egen signal. Användare 2 kan direkt avkoda sin signal eftersom den har tillräckligt signal-interferens förhållande.



Figur 16. Uteffekt NOMA med *Successive Interference Cancellation* (SIC) mottagare.

Fördelarna med NOMA i jämförelse med ortogonala *multiple access*-tekniker är [18]:

- Ökad spektraleffektivitet,
- Förbättrad dataakt i cell-kanterna,
- Många fler användare,
- Låg transmissionsfördröjning och signaleringskostnad,
- Förenklad kanalåterkoppling.

6.5 Bredbandiga mottagare och millimetervåg

Med begreppet millimetervåg (eng. mmWave) menas i allmänhet frekvenser mellan 30-300 GHz som har en våglängd mellan 1-10 millimeter. Den främsta anledningen till användandet av högre frekvenser är den stora tillgången till stor tillgänglig bandbredd (hundratals MHz), som möjliggör höga dataakt och systemkapacitet.

I 5G innebär millimetervåg i praktiken frekvenser över 24 GHz upp till ca 70 GHz. I ett första steg kommer frekvensband i området 24-40 GHz (24.25-27.5, 26.5-29.5, samt 37-40 GHz) att utnyttjas, med lite varierande delar av spektrumet i olika delar av världen. I Europa introduceras millimetervåg för 5G troligen i frekvensbandet 26.5-27.5 GHz. I nuvarande version av 5G-standarden (Release 15) finns stöd för bandbredder upp till maximalt 400 MHz, men diskussioner förs redan om att utöka detta ytterligare i kommande releaser av standarden.

Historiskt har millimetervåg inte använts för mobilt bredband p.g.a. stora vågutbredningsförluster och kraftig dämpning genom exempelvis byggnader eller väggar. Med nya avancerade antenntekniker är tanken att dessa bekymmer ska minskas. Tillämpningen för millimetervåg är dock p.g.a. vågutbredningsegenskaperna framförallt för kommunikation mellan användare och basstation som båda befinner sig utomhus. Kommunikation mellan inom- och utomhus kommer troligen inte att bli aktuellt, men

⁶ I litteraturen förekommer akronymen SIC för både *Self-Interference Cancellation* samt *Successive Interference Cancellation* vilket kan vara lite förvirrande och de ska inte förväxlas med varandra.

kommunikation enbart inomhus har också diskuterats och analyserats i viss utsträckning. En effekt av att kunna använda millimetervåg utomhus är dock att resurser frigörs för kommunikation mellan utomhus och inomhus på frekvensband under 6 GHz. På grund av den kraftiga länkdämpningen krävs för millimetervåg relativt tät placering av basstationer, på ca 150-200 meters avstånd från varandra för att ha kontinuerlig täckning. I vissa områden, exempelvis centrala delar av städer, är basstationer redan så tätt placerade att ytterligare förtätning av basstationer kanske inte blir nödvändig.

Tekniker för millimetervåg, i kombination med nya antenntekniker för massive MIMO, skulle kunna vara intressant för militära tillämpningar ur flera aspekter. Den främsta fördelen med millimetervåg är som tidigare nämnts en stor tillgänglig bandbredd som kan möjliggöra mycket hög dataakt och kapacitet inom ett begränsat område, vilket kan vara intressant för exempelvis sensorer som kräver mycket datakommunikation. Den, i normalatmosfär, kraftiga länkdämpningen av millimetervågssignaler kan även ge förbättrade smygegenskaper, där signalen bara är mätbar inom ett relativt begränsat avstånd från sändaren. I kombination med *beamforming*, där radiosignalen styrs i riktning mot mottagaren och undertrycks i andra riktningar förbättras dessa egenskaper ytterligare. Runt 60 GHz gäller detta utan undantag, för övriga millimetervågsfrekvenser kan troposfärsanomalier ge kraftiga överräckvidder, särskilt över hav, vilket delvis kan försämra smygegenskaperna.

Nya antenntekniker som möjliggörs genom massive MIMO, i kombination med millimetervåg, kan även innebära att elektromagnetisk störning, både avsiktlig och oavsiktlig, kan undertryckas mer effektivt. Även om undertryckning av interferens med antenntekniker inte definieras av 5G-standarden, så kan *beamforming* i sig själv användas för interferensundertryckning. Den geografiskt begränsade och riktade sändningen möjliggör också en tätare geografisk återanvändning av frekvensspektrum och därmed ett mer effektivt frekvensutnyttjande.

Teknikutvecklingen för millimetervåg driver också utvecklingen av hårdvara och signalbehandling för att hantera stora bandbredder. Att kunna hantera stor bandbredd kan vara värdefullt även för kommunikation på lägre frekvensband. Det är därför inte omöjligt att nyutvecklade tekniker för bredbandiga mottagare inom millimetervåg i förlängningen kan ge nya möjligheter också på lägre frekvensband.

6.6 Multikonnektivitet vid flera bärvågor

Med så kallad multikonnektivitet är det möjligt för en mobil *User Equipment* (UE) att ansluta sig till radionätverket via flera bärvågor. På senare år har flera varianter på detta tema definierats av 3GPP för LTE/LTE-A. För LTE låg fokus på att öka dataakt och kapacitet i näten. 3GPP har nyligen bytt fokus och nu handlar det istället om att öka pålitligheten i transmissionen.

I Release 15 används både *Carrier Aggregation* (CA) och *Dual Connectivity* (DC) som en metod för att förbättra överföringssäkerheten på högre lager, utöver pålitlighetsförbättringar avsedda för det fysiska lagret (PHY). DC skapar också förutsättningar för integration mellan NR och LTE.

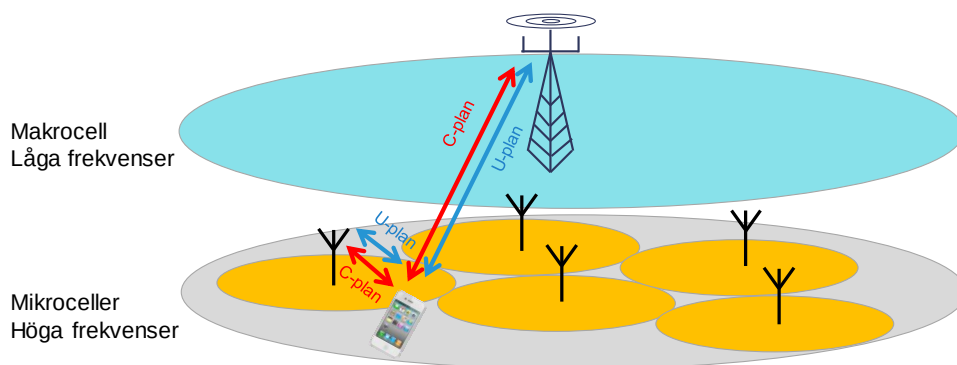
6.6.1 Carrier Aggregation för ökad bandbredd

Med Carrier Aggregation (CA) menas, förenklat, att en bärvåg byggs upp av flera bärvågor som kan komma från samma frekvensband eller från ett annat band. På så vis skapas en bärvåg med en total bandbredd som är mycket större än vad som annars kan åstadkommas med kontinuerligt spektrum. Normalt körs CA både i upplänk och nedlänk men det förekommer även att sammanlagringen sker antingen på nedlänk eller på upplänk, och detta arrangemang benämns då som *Supplementary Down Link* (SDL) eller *Supplementary Up Link* (SUL).

6.6.2 Dual Connectivity för förbättrad effektivitet

Ett annat sätt att förbättra effektiviteten hos det nya 5G-radiogränssnittet är att separera kontroll och användarplan. Kontrollplanet hanterar konnektiviteten mellan UE och det övriga 5G-nätet samt mobiliteten hos användaren. Användarplanet tillhandahåller datatransporten. Separeringen gör det möjligt för en mobil att upprätthålla anslutningen med två olika basstationer samtidigt. Detta är en teknik som i olika varianter nyttjas i *Dual Connectivity* (DC).

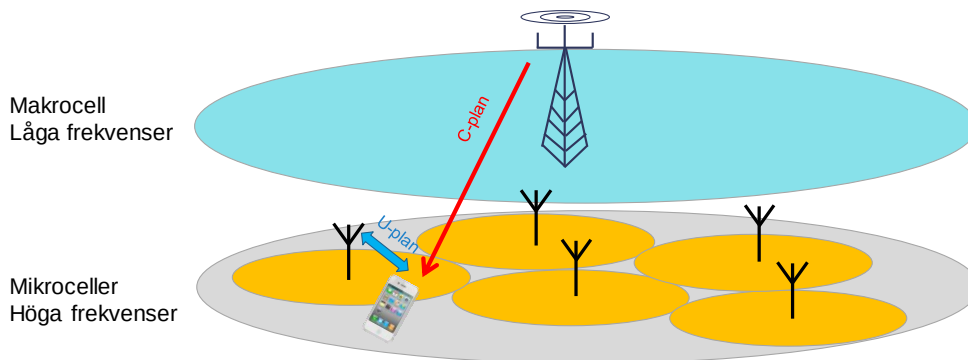
I CA är aggregeringspunkten av data förlagd till MAC (*Medium Access Control*). I *Dual Connectivity* har däremot aggregeringspunkten flyttat upp till PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*). På detta sätt kan två MAC-protokoll med sina respektive schema-läggare (*scheduler*) köras i två skilda noder utan några stora krav på sammankoppling mellan noderna. Figur 17 visar en förenklad bild av DC. Observeras bör att bilden endast beskriver en av flera varianter av DC. Maximalt antal CA/DC är 16 och max aggregerad bandbredd i fas 1 av standarden är runt 1 GHz.



Figur 17 Ett (förenklat) exempel på funktionen *Dual Connectivity* (DC). I detta exempel skickas användardata ut till mobilen i två olika frekvensband och där makrocellen (även kallad paraplycell) kan kontrollera flera mikroceller. Observera att makrocellen i detta exempel minst täcker den geografiska yta som mikrocellerna täcker.

6.6.3 Fantomceller för högre överföringskapacitet

I en variant av DC hanteras kontrollplanet endast via makrocellen som normalt använder ett lägre frekvensband, medan användarplanet endast hanteras via mindre, lokala celler på ett högre frekvensband och med en hög överföringskapacitet, så kallade fantomceller.



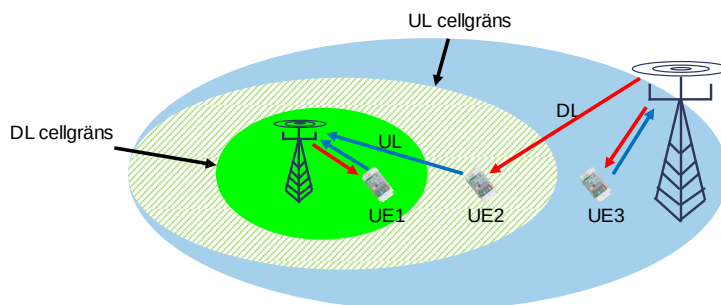
Figur 18 Ett (förenklat) exempel med separation av kontrollplan och användarplan. Observera att mikrocellerna i detta exempel täcker samma geografiska yta som makrocellen (paraplycell).

Ett motiv bakom denna separering är de äldre 3GPP-standarder där det sker en ständig sändning av olika (cell-specifika) referenssignaler. Dessa referenssignaler sänds oberoende av om det finns användardata att sända eller inte. Med en separering av kontrollplan och användarplan kan basstationen för dataplanet stängas av när det inte finns användardata att

sända. Separeringen av kontroll- och användarplan i detta fall förväntas ge en högre genomströmning av användardata, upp till 70 procent, samtidigt som energiförbrukningen ska kunna minskas med cirka 20 procent. Detta arrangemang kallas därför ibland även för *green cells*.

6.6.4 Separation av upp- och nedlänk

En ytterligare möjlig variant på samma tema som ovan är med en separation av upplänk och nedlänk enligt Figur 18. I de flesta fall har den mindre cellen (den gröna i figuren) betydligt högre frekvens än den större cellen och de fördelar som anges är högre kapacitet/datatakt och bättre täckning i cellgränserna. Till nackdelarna hör ökade fördröjningar och ett ökat behov av processorkraft. Om denna variant verkligen kommer att definieras fullt ut i standarden är för närvarande oklart.



Figur 19 Systembild för separation av upplänk och nedlänk.

6.7 Felrättande kodning

De nya 5G-scenarierna utökar kravbilderna på den felrättande kanalkodningen. Den behöver förutom att vara effektiv med bra prestanda stödja variabel kodtakt, variabel kodlängd, hög datatakt, låg fördröjning, låg energiförbrukning och en låg avkodningskomplexitet. Dessa krav stöds bara delvis i det existerande LTE-systemet (4G) med de koder som används; Turbokoder och TBCC (*Tail-Biting Convolutional Codes*). I november 2016 kom 3GPP därför överens om ny kodning till eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*) för gränssnittet 5G NR (New Radio). Till datakanalerna används LDPC-koder och till (de flesta) kontrollkanalerna används polära koder. Vilken kodning de andra 5G-scenariernas radiogränssnitt kommer att använda är ännu inte fastställt.

LDPC (*Low-Density Parity-Check*) är en idag välkänd klass av koder som har börjat användas inom ett stort antal tillämpningar. Det bör nämnas att konceptet bakom koderna utvecklades redan 1960 utav Robert Gallager så koderna är också kända som "Gallager codes". Till exempel används LDPC i standarden DVB-S2 för satellitöverföring av digital-TV. Vid olika jämförelser har LDPC-koder visat sig ha bättre prestanda, speciellt lägre avkodningskomplexitet, för stora blocklängder och höga kodtakter än turbokoder. Detta gör att LDPC-koder passar till de flesta av datakanalerna, stora block med data som ska överföras med hög datatakt.

Polära koder används till de flesta av kontrollkanalerna, där ofta mindre datamängder ska överföras med en låg kodtakt, d.v.s. innehållet behöver ett bra skydd. Polära koder "Polar codes" introducerades 2009 av Erdal Arikan [20]. Polära koder är en ny klass av linjära binära koder baserade på konceptet "Polarisering av kanalen", därav namnet. Koderna har flera önskvärda egenskaper såsom utsökt prestanda, en explicit kodkonstruktion och en enkel avkodning med låg komplexitet. Koderna kan punkteras och kortas så att olika kodtakter och längder kan åstadkommas. Polära koder jämförs i [21] med LDPC, TBCC och turbokoder. Blocklängder från 20 upp till 1000 bitar och kodtakterna 1/12, 1/6 och 1/3 undersöks. För korta blocklängder och låg kodtakt har

Polära koder klart bättre prestanda än LDPC. För den största blocklängden 1000 bitar och kodtakt 1/3 är prestandan jämförbar med LDPC. För korta blocklängder är polära koder dessutom bättre än turbokoder. För scenarierna URLLC och mMTC behövs enligt [21] ofta låga kodtakter och relativt korta blocklängder vilket gör polära koder intressanta.

6.8 Säkerhetsarkitekturer

Det finns en möjlighet att säkerhetsteknik på fysiska lagret, en form av TRANSEC, kan införlivas i 5G-standard. Sådana säkerhetsmetoder kan utnyttja *Channel State Information* (CSI) från mätningar på MIMO-system tillsammans med antaganden om CSI. Det antas att CSI mellan basstationen och UE är unik och okänd (kan inte mätas direkt) för en angripare. I analogi med kryptering kan CSI-matrisen därför behandlas som en nyckel och grunden för ett antal randomiseringsscheman som kan implementeras av basstationen. Säkerhetsteknik baserad på fysiska lagret kan implementeras tillsammans med traditionell datakryptering. De två metoderna är oberoende vilket ökar svårighetsgraden för en angripare. För att komma åt önskad information behöver en angripare förutom den korrekta CSI-matrisen även känna till detaljer om det fysiska lagrets säkerhetsmetod i drift.

7 Slutsatser

Rapporten sammanfattar några av de tekniska alternativ som har tagits fram inom 5G-utvecklingen och hur de eventuellt skulle kunna användas för militär radiokommunikation. Det är inte bara nya kommunikationstekniker som utvecklas utan 5G kräver även nya och förbättrade komponenter såsom effektivare batterier, mikrovågskretsar, miniatyrisering av kretsar, etc. Sådana nya komponenter kommer också att få påverkan på Försvarsmaktens kommunikationslösningar i framtiden.

Generellt kommer 5G att bli mera adaptivt, flexibelt och stödja fler typer av kommunikation jämfört med vad 3G och 4G gör/gjort. Dessutom kommer fler basstationer och nya typer av basstationer att adderas till kommunikationsinfrastrukturen vilket ökar redundansen. Detta tillsammans med kraftigt ökad flexibilitet gör att 5G kommer att bli relativt svår att störa. Dessutom kan ytterligare redundans åstadkommas genom att använda flera operatörer. Om en viss basstation är utstörd, kan en annan användas. I glesbygd kan det dock vara så att det bara finns en fysisk basstation som ska täcka ett visst område, i detta fall ökar sårbarheten.

Utvecklingen inom området mjukvarudefinierade nät (SDN) kommer att erbjuda nya möjligheter. Att använda SDN för rent militära nät studeras inom t.ex. EDA och NATO. SDN kommer eventuellt i ett första skede att användas i den fasta militära kommunikationsinfrastrukturen, men i ett senare skede kanske också för mobila taktiska nät. SDN effektiviserar och förenklar i första hand drift, underhåll och hantering av näten. En annan fördel med SDN är att det kan förenkla för Försvarsmakten att upphandla kapacitet i 5G-näten. Kapacitet skulle kunna upphandlas i (flera) civila operatörers 5G-nät där så kallad *Network Slicing* används för att kunna erbjuda en, för den militära kunden, avskild miljö samt anpassade tjänster. En sådan lösning skulle kunna stå för den huvudsakliga militära kommunikationskapaciteten samt för en landsomfattande yttäckning.

Det bedöms som troligt att *Mission Critical*-tjänsten inom 5G kommer användas av blåljusmyndigheter och andra organisationer inom samhällskritiskinfrastruktur, men det ligger några år framåt i tiden. 5G-baserad *Mission Critical* kan komma att komplettera, eventuellt ersätta, TETRA i dagens Rakel-system och då berörs Försvarsmakten i högsta grad.

Undertryckning av egengenererade signaler, med tekniken *Self-Interference Cancellation* möjliggör in-band full-duplex, d.v.s. samtidig sändning och mottagning på en och samma kanal samtidigt. Teoretiskt innebär det en fördubblad kapacitet. Det finns olika typer av nya militära scenarion som skulle bli möjliga om SIC realiseras t.ex. effektivare sätt att hitta grannar i ad hoc-nät, undertryckning av utombandsemissioner, inom telekrig; störa och signalspana samtidigt eller störa samtidigt som man tar emot en egen kommunikationssignal.

Den främsta fördelen med millimetervåg är stor tillgänglig bandbredd som möjliggör mycket hög kapacitet inom ett begränsat område. Den kraftiga länkdämpningen av millimetervågssignaler kan, speciellt i kombination med gruppantenn tekniker, även ge mer effektivt frekvensutnyttjande genom tätare geografisk frekvensåteranvändning. I militära tillämpningar kan detta vara av intresse för korthållskommunikation med hög dataakt, exempelvis inom en stab eller för distribuerade sensorer av olika slag.

8 Referenser

- [1] H. Tullberg, P. Popovski, Z. Li, M. A. Uusitalo, A. Höglund, Ö. Bulakci, M. Fallgren and J. F. Monserrat, "The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 132-139, 2016.
- [2] Ericsson, "5G Systems," Ericsson white paper, UEN 284 23-3251 rev B, 2017.
- [3] NGMN Alliance, "NGMN 5G White paper," 2015.
- [4] 3GPP TS 22.280, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Mission Critical Services Common Requirements (MCCoRe); Stage 1 (Release 16)," 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [5] 3GPP TS 23.283, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Mission Critical Communication Interworking with Land Mobile Radio Systems; Stage 2 (Release 16)," 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [6] 3GPP TS 22.179, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Mission Critical Push to Talk (MCPTT); Stage 1 (Release 16)," 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [7] 3GPP TS 22.282, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Mission Critical Data service Release 16," 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [8] 3GPP TS 22.281, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Mission Critical Video services (Release 16)," 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [9] W. Hong, Z. H. Jiang, C. Yu, J. Zhou, P. Chen, Z. Yu, H. Zhang, B. Yang, X. Pang, M. Jiang, Y. Cheng, M. K. T. Al-Nuaimi, Y. Zhang, J. Chen och S. He, "Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, nr 12, pp. 6231-6249, 2017.
- [10] W. Hong, K.-H. Baek och S. Ko, "Millimeter-wave 5G antennas for smartphones: overview and experimental demonstration," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, nr 12, pp. 6250-6261, 2017.
- [11] M. Karlsson, E. Björnson och E. G. Larsson, "Jamming a TDD Point-to-Point Link Using Reciprocity-Based MIMO," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 12, nr 12, pp. 2957-2970, 2017.
- [12] E. Everett, A. Sahai and A. Sabharwal, "Passive Self-Interference Suppression for Full-Duplex Infrastructure Nodes," *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS*, vol. 13, no. 2, pp. 680-694, 2014.

- [13] T. Dinc, A. Nagulu and H. Krishnaswamy, "A Millimeter-Wave Non-Magnetic Passive SOI CMOS Circulator Based on Spatio-Temporal Conductivity Modulation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 12, pp. 3276-3292, 2017.
- [14] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan and R. Wichman, "In-Band Full-Duplex Wireless: Challenges and Opportunities," *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, vol. 32, no. 9, pp. 1637-1652, 2014.
- [15] D. Korpi, M. Tamminen, J. Turunen, T. Huusari, Y.-S. Choi, L. Anttila, S. Talwar and M. Valkama, "Full-duplex mobile device: pushing the limits," *IEEE Communications Magazines*, vol. 54, no. 9, pp. 80-87, 2016.
- [16] S. Hong, J. Brand, J. I. Choi, M. Jain and J. Mehlman, "Applications of Self-Interference Cancellation in 5G and Beyond," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 114-121, 2014.
- [17] T. Riihonen, D. Korpi, O. Rantula, H. Rantanen, T. Saarelainen and M. Valkama, "Inband Full-Duplex Radio Transceivers: A Paradigm Shift in Tactical Communications and Electronic Warfare?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 30-36, 2017.
- [18] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen and L. Hanzo, "A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, 2018.
- [19] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li and K. Higuchi, "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access," *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013.
- [20] E. Arikan, "Channel polarization: A method for constructing capacity achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 7, p. 3051–3073, 2009.
- [21] M. S. A. Sharma, "Polar Code: The Channel Code Contender for 5G," in *2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics*, Jaipur, 2017.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se