

ÅBO AKADEMI

KANDIDAT-UPPSATS

---

# Nya Wi-Fi standarder

---

*Författare*  
ALBERT VALEEV

*Handledare*  
Johan LILIUS

May 4, 2021

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sammanfattning</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Historisk bakgrund</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Utveckling av wifistandarder 1997-2019</b>	<b>6</b>
4.1	IEEE 802.11(1997) . . . . .	6
4.1.1	Motivering för skapandet av IEEE 802.11-standarden . . .	6
4.1.2	Beskrivning av standarden IEEE 802.11 . . . . .	7
4.2	IEEE 802.11b(1999) . . . . .	11
4.2.1	Motivering till att IEEE 802.11b-standarden skapades . .	11
4.2.2	Beskrivning av IEEE 802.11b-standarden . . . . .	11
4.3	IEEE 802.11a . . . . .	12
4.3.1	Motivering till att IEEE 802.11a-standarden skapades . .	12
4.3.2	Beskrivning av IEEE 802.11a-standarden . . . . .	12
4.4	IEEE 802.11g(2003) . . . . .	13
4.4.1	Motivering till att IEEE 802.11g-standarden skapades . .	13
4.4.2	Beskrivning av IEEE 802.11g-standarden . . . . .	14
4.5	IEEE 802.11n(2009) . . . . .	15
4.5.1	Motivering till att IEEE 802.11n-standarden skapades . .	15
4.5.2	Beskrivning av IEEE 802.11n-standarden . . . . .	15
4.6	IEEE 802.11ac(2014) . . . . .	17
4.6.1	Motivering till att 802.11ac-standarden skapades . . . . .	17
4.6.2	Beskrivning av 802.11ac-standarden . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Den nya 802.11ax-standarden</b>	<b>20</b>
5.0.1	Motivering till att IEEE 802.11ax-standarden skapades . .	20
5.0.2	Introduktion till IEEE 802.11ax-standarden . . . . .	20
5.0.3	Beskrivning av IEEE 802.11ax standarden . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>26</b>

# 1 Inledning

I det alltmera trådlösa samhälle är nuvarande lokala trådlösa nätverk alltför långsamma för att gå i takt med teknologier som behöver en lokal trådlös uppkoppling. Under de senaste 28 åren har lokala trådlösa nätverk som använder sig av wifistandarder blivit brett spridda. Samtidigt hotar det faktum att de tidigare nämnda standarder är så brett spridda teknikens framtida utveckling eftersom användarna enligt Khorov et al. (2018) ständigt har höjt kraven på prestanda av sina enheter. Det kan i sin tur leda till att tekniken inte kan erbjuda den prestanda kundbasen behöver. Spridningen av ny teknik som till exempel IoT orsakar kraftig tillväxt i antalet enheter som behöver ha tillgång till lokala trådlösa nätverk. I takt med detta växer antalet störningar, vilket minskar prestandan. Samtidigt blir energieffektiviteten en avgörande faktor.

Enligt Ciscos årsrapport för åren 2018-2021 så kommer totala mängden internettrafik vara större än den av de senaste 32 åren. Årsrapporten hävdar också att mera än hälften av den internettrafiken kommer att överföras med hjälp av lokala trådlösa nätverk, det vill säga wifi. Samtidigt kommer antalet wifisurfpunkter(hotspots) växa fyrfaldigt fram till år 2023(Ciscos årsrapport för åren 2018-2021,s. 13). I mars 2014 godkände IEEE Standards Assosiation(SA) IEEE 802.11ax, vars uppgift är att garantera stabil och snabb dataöverföring i omgivningar med hög densitet samt reducera energikonsumtionen som uppstår i processen. Standarden 802.11ax gör det med hjälp av revolutionerande tekniker som till exempel *OFDMA*-modulationsteknik och *BSS coloring*-metod som minskar störningar som uppstår när olika enheter hör varandra på samma kanal.

## 2 Sammanfattning

I denna uppsats hanteras först utvecklingen av internet och trådlös kommunikation och sedan utvecklingen av wifitekniken, anledningar och motiveringar till att wifitekniken skapades, olika faser av dess utveckling och de viktigaste teknikerna som den utvidgades med. För att skapa en sammanhängande bild av wifiteknikens utveckling hanteras de olika IEEE 802.11-standarder i kronologisk ordning. De standarder som beskrivs i uppsatsen valdes på grund av att de innebär stora och märkbara förändringar och förbättringar. Syftet med att lista och beskriva de föregående standarderna är att få läsare att bygga en helhetsbild om hur wifiteknikens utveckling försiggick före IEEE 802.11ax-standarden och att få läsare att inse betydelsen av de nya egenskaperna som standarden inför.

**Nyckelord:** Wifistandarder, Wi-Fi 6, 802.11ax, Evolutionen av wifistandarder

### 3 Historisk bakgrund

Trådlös kommunikation har en lång historia. Dess natur förklaras enligt Kleinrock(2008,s. 1) först i gammal litteratur som beskriver relationen mellan elektricitet och magnetism. Relationen märktes så tidigt som år 1820 när Hans Christian Orsted demonstrerade hur en elektriskt laddad kabel kan avleda en magnetiserad kompassnål.

En viktig milstolpe för utvecklingen av kännedom om relationen mellan elektrisitet och magnetism uppnåddes år 1864 när av radiovågornas existens förutsades av James Clerk Maxwell. År 1895 lyckades italienaren *Gugliermo Marconi* sända en trådlös signal på avstånd över en kilometer. Härefter kom en sekvens demonstrationer av sändningar på ett allt större avstånd. I början av 1900-talet utvecklades tekniken så långt att röstsändningar blev möjliga och så lyckades Reginald Fessenden sända röst med hjälp av radiovågor året 1900.

Kleinrock(2008, s.1) menar att den snabba utvecklingen och spridningen av radioteknologin till trots, så var det först i den digitala eran som den trådlösa teknikens grenar som till exempel trådlösa ad hoc-nätverk, digital mobiltelefoni osv. uppstod.

Uppskjutandet av den första artificiella satelliten i jordens omloppsbana skedde den 4 oktober 1957. Satelliten hette *Sputnik 1* och tillhörde Sovjetunionen. Uppskjutandet började det som skulle senare kallas för rymdkapplöpningen. Rymdkapplöpningen innebar att USA och Sovjetunionen konkurrerade i att utforska rymden och således hade intressen av att utveckla teknologier som skulle kunna vara till nytta i detta. Rymdkapplöpningen hade en viktig roll i utvecklingen av trådlösa nätverk.

Uppskjutandet skapade rubriker över hela världen och ledde till att amerikanska publiken var orolig över att USA skulle ligga efter i rymdkapplöpningen. Som svar till detta grundade president Eisenhower Advanced Research Projects Agency(ARPA) i februari 1958. ARPA:s syfte var att säkerställa USA:s ledande position i rymdkapplöpningen.

Information Processing Techniques Office(IPTO) var en avdelning av ARPA som finansierade olika undersökningar inom datavetenskap. Första ledaren för denna avdelning blev J.C.R. Licklider. Han hade en vision om ett globalt nätverk bestående av till varandra kopplade datorer som skulle ge dess användare tillgång till stor mängd information. Han kallade nätverket för Galactic Network och vidareutvecklade sin vision år 1960 i sin artikel Man-Computer Symbiosis (Licklider, 1960). Även om Licklider formulerade sin vision om Galactic Network, så erbjöd han inte någon konkret plan att implementera den. (Kleinrock, 2008)[s.10]

Kleinrock(2008) hävdar att likt tidiga pionjärer av trådlösa teknologin, så fanns det på den tiden en viss synkronicitet inom gemenskapen av forskare, som utvecklade grunden för Internet. Det fanns tre så kallade "trådar" som var ledande inom utvecklingen av trådlösa nätverk. I (Licklider, 1960) refereras de till som MIT-tråden, NPL-tråden och RAND-tråden. Enligt (Licklider, 1960)[s.11] var de tre trådarna omedvetna om varandra. I bakgrunden var ARPA beredd att utveckla det som de olika trådarna skapade till ett globalt nätverk som senare skulle bli Internet. MIT-tråden och ARPA sammansmälte under åren 1963-1964 då Licklider och Kleinrock blev medvetna om varandras verk och länken mellan dem förstärktes år 1966 då Bob Taylor av ARPA insåg

behovet av att skapa ett nätverk och bidrog till att Larry Roberts vid MIT fick en ledarposition i ett projekt som skulle förverkliga detta. Larry Roberts blev med hjälp av Kleinrocks verk om ett nätverk som baseras på paket övertygad att ett sådant nätverk skulle fungera.

I april 1967 organiserade Larry Roberts ett möte där detaljer gällande designen av ARPANET skulle diskuteras. Diskussioner som fördes på detta möte blev grunden till ARPANET design paper som Roberts skrev och framställde på ACM Symposium on Operating System Principles i oktober 1967. I juni 1968 skrev Roberts en ARPA-plan, där han underströk behovet av att skapa ett fungerande nätverk. Enligt hans vision skulle ett sådant nätverk ge forskare en möjlighet till att logga in på varandras datorer och få åtkomst till varandras forskning. Denna plan accepterades tre veckor senare av Bob Taylor. Snart efter detta skickade Roberts en förfrågan för att bygga nätverket till 140 olika entreprenörer. Till slut fick ett företag från Cambridge, Massachusetts kontraktet. Företaget hette Bolt, Beranek and Newman(BBN). UCLA(University of California, Los Angeles) blev utvald som första noden för nätverket och så fick BBN ett uppdrag att leverera första IMP(Interface Message Processor till UCLA på Labor day år 1969.(Kleinrock, 2008)(s.12).

Den tredje juni, året 1969 släppte ARPA ett meddelande där publiken informerades om att ARPANET snart skulle bli färdigt och sättas i bruk. Den stora milstolpen uppnåddes andra september året 1969 när IMP kopplades till UCLA:s värddator. I oktober levererades andra IMP till SRI(Stanford Research Institute). Därefter länkades SRI- och UCLA noder ihop med hjälp av ARPANET. Överföringshastigheten på just denna koppling ansågs vara väldigt hög : 50kbp/s. Ett annat märkbart genombrott skedde när det första så kallade host-to-host meddelande sändes med hjälp av nätverket från UCLA till SRI. Det hände klockan 22:30 den 29 oktober år 1969 och meddelandet bestod av ett ord, "log". De två första bokstäverna lyckades komma igenom till destinationspunkten men i samband med sändningen av bokstaven "g" så kraschade systemet. Andra försöket gick problemfritt och så blev "log" det första meddelandet som sändes med hjälp av ARPANET. År 1969 togs de fyra första noderna av ARPANET i bruk. Noderna blev placerade i UCLA, SRI, University of California at Santa Barbara och i University of Utah Näst kommer utvecklingen av internet från år 1969 när ARPANET blev färdig till år 1997 när första Wi-Fi standarderna släpptes sammanfattas.

- År 1970 publicerades The Network Working Group första host-to-host-protokollet, som blev första transportnivåprotokoll för ARPANET. Samma år skapade Norm Abramson Alohanet.
- År 1972 kopplades Alohanet till ARPANET. Som resultat skapades Packet Radio Net(PRNET). Det blev det första nätverket som kopplades till ARPANET.
- År 1973 kopplades The Packet Satellite Net(SATNET) till ARPANET med hjälp av en delad Intelsat IV kanal.
- År 1973 uppfann Bob Metcalfe Ethernet.
- År 1977 kopplade TCP-protokollet ihop de tre olika nätverk(ARPANET,ALOHANET och SATNET)

- År 1978 ansågs det vara nödvändigt att splittra TCP i två delar, där den ena skulle vara ansvarig för nätverkshanteringen och den andra för datatransporten. Härledes blev IP och TCP skilda protokoll. Kleinrock(2008,s.13) hävdar att drivande personer bakom splittrandet var Danny Cohen,David Reed och John Schoch. Motivationen bakom det var att de ovan nämnda ville stödja utvecklingen av UDP som är ett protokoll för realtidsapplikationer och som skulle använda sig av IP-protokollet.
- År 1980 introducerades Ethernet kommersiellt.
- År 1981 introducerade IBM första persondatorn(PC)
- Året 1983 blev TCP/IP den officiella standarden för ARPANET.
- År 1989 lade Tim Berners-Lee fram ett förslag om ett globalt hypertextprojekt, som senare skulle bli känd som hypertextprojekt World Wide Web.
- År 1993 skapades Mosaic en webbläsare designad av Marc Andreessen och Eric Bina. Mosaic skulle bli den första webbläsaren som blir populär.
- År 1996 träder The Telecom Act of 1996 i kraft, vilket omreglerade datornätverk.
- År 1997 släppte IEEE grundstandarden 802.11(Wifi)

## 4 Utveckling av wifistandarder 1997-2019

### 4.1 IEEE 802.11(1997)

#### 4.1.1 Motivering för skapandet av IEEE 802.11-standarden

I början av 1990 hade det skett tydliga framsteg i digital kommunikation, portabla datorer, teknik som involverar halvledare och relaterade tekniker. I och med detta uppstod både intresse och behov av att ha pålitliga och snabba trådlösa nätverk till hands. Tidiga användare av trådlösa nätverk var vanligtvis vertikala applikationer som behövde rörligheten som trådlösa nätverk erbjöd. Trådlösa LAN(Local Area Network) användes i allt större utsträckning i sådana faciliteter som universitet och sjukhus. I sådana omgivningar rör användare vanligtvis sig aktivt och således är användningen av trådlösa nätverk en logisk lösning.(LaMaire *et al.*, 1996, s.86)

Enligt Crow *et al.* (1997) kommer användare av trådlösa nätverk eventuellt vilja ha likadana tjänster och förmögöer som finns hos fasta nätverk. Det kan uppstå problem med att uppfylla dessa krav på prestandan eftersom det kan finnas vissa utmaningar och begränsningar som är exklusiva för trådlösa nätverk.

Frekvenstilldelning är enligt Crow *et al.* (1997) en problematisk process eftersom frekvensband för specifika ändamål ska bli godkända och licenserade. Det kan vara både resurs- och tidskrävande eftersom det finns en stor efterfrågan på tillgängligt radiospektrum.

Någonting trådlösa nätverk vanligtvis har problem med är interferens. Interferens uppstår när flera källor som delar ett och samma frekvensband transmitterar samtidigt. I sådana situationer händer kollisioner. Kollisioner är typiskt

ett resultat av att flera stationer försöker sända samtidigt på samma kanal. En orsak till att det sker kollisioner i ett trådlöst nätverk är så kallade "hidden terminal"-problem. Problemet uppstår när en station som tror att kanalen är ledig börjar transmitta utan att märka till att kanalen den försöker sända på är upptagen. Det finns också en risk för att både amplitud och fas kan fluktuera i mottagares ända, vilket också kan orsaka interferens.(Crow *et al.*, 1997, s.116)

En annan aspekt som är lättare att kontrollera och säkerställa på fasta nätverk är *säkerhet*. På ett fast nätverk kan det lätt kontrolleras vem som får tillgång till nätverket eftersom det behövs en fysisk koppling för att möjliggöra uppkoppling. Med trådlösa nätverk är det istället så att i princip vem som helst kan få tillgång till nätverk ifall den känner till lösenordet. För att säkerställa integriteten av data som överförs via trådlösa nätverk krypteras data med någon krypteringsalgoritm. När det gäller kryptering har balansen mellan säkerhet och prestanda en viktig roll eftersom ju svårare krypteringsalgoritmer är, desto mera tid krävs för att kryptera och dekryptera data.(Crow *et al.*, 1997, s.116)

En annan aspekt Crow *et al.*(1997) pekar ut som problematisk är energikonsumtion. Vid uppbyggande av fasta nätverk är inte energikonsumtion något att oroa sig över eftersom kabel ska ändå kopplas till enheter som behöver tillgång till nätverk och därför går det också att koppla enheterna till någon strömkälla. En väldigt fördel hos de trådlösa nätverken är att enheter som är kopplade till nätverken kan vara portabla. Med den fördelen kommer en nackdel som är att om en enhet är portabel så ska den ha ett batteri. Batteriet har en begränsad mängd energi som kan lagras och således ska energikonsumtion tas i beaktande när enheter och standarder för trådlösa nätverk skapas.

Ett ämne Crow *et al.* (1997) fokuserar sig mycket på är datagenomströmning. Crow *et al.* (1997) anvisar att kapaciteten av trådlösa LAN(WLAN) idealt borde motsvara kapaciteten hos dess fasta(kabelbaserade) motsvarigheter. Näst pöängterar Crow *et al.*(1997) att det är i princip omöjligt på grund av fysiska begränsningar som trådlösa nätverk har. Exempel på sådana begränsande faktorer är försvagningen av radiovågor och interferens. Som resultat var den dåvarande målsättningen att WLAN skulle kunna operera på hastigheter som är mellan 1 och 20 Mbit/s. För att stödja flera simultana transmissioner skulle flera spridningsspektrummetoder användas.(Crow *et al.*, 1997, s.117)

IEEE 802.11 standarden utvecklades av Institute of Electrical and Electronics Engineers(*IEEE*) som en internationell WLAN-standard. IEEE 802.11-kommittén hade börjat arbetet med att etablera en standard för trådlösa LAN i början av 1990. Målsättningen med att skapa standarden var att "utveckla MAC- och PHY-specifikationer för trådlös uppkoppling för fast installerade, portabla och rörande stationer inom ett lokalt område". Enligt Crow *et al.*(1997) var det två olika ändamål med att implementera standarden. Första målet var att förse maskiner, utrustning och stationer som är portabla och/eller behövdes tas i bruk så snart som möjligt med trådlös koppling till ett nätverk. Andra målet med standardiseringen var att förse tillsynsorgan med en standard som skulle användas till att standardisera tillgången till ett eller flera frekvensband.(Crow *et al.*, 1997, s. 117)

#### 4.1.2 Beskrivning av standarden IEEE 802.11

IEEE-projektet 802 berörde skikten PHY och MAC .(Hiertz *et al.*, 2010, s.62)  
Hiertz *et al.* (2010) menar att när begreppet av WLAN utformades så tänktes



det att det fysiska skiktet skulle tas från någon redan etablerad standard. Första kandidaten blev 802.3(Ethernet). Senare blev det dock klart att kabel och radiovågor skiljer åt sig så mycket att samma tekniker inte kan användas i båda. På grund av drastisk försvagning som sker även på korta distanser kommer inte kollisioner märkas. Eftersom 802.3 använder carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) så kunde inte det fysiska skiktet vara detsamma som hos 802.3. (Hiertz *et al.*, 2010, s.62)

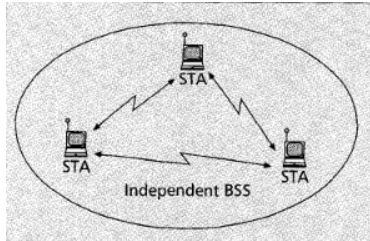
Standardutkastet IEEE 802.11 antar stöd för 1 Mb/s som obligatoriskt och stöd för 2 Mb/s som ett tillval. (Crow *et al.*, 1997, s. 117) Crow et al. (1997) anvisar att stöd för både asynkron data överföring och valfritt stöd för DTBS(distributed time-bounded services) blev definierade. Exempel på asynkron dataöverföring är till exempel e-post och filöverföring. Asynkron dataöverföring är överföring av data som inte är känslig till tidsfördröjningar. Å andra sidan tidsbunden trafik är känslig för tidsfördröjningar. Tidsbunden trafik kan till exempel vara överföring av paketerade röst- och videofiler.(Crow *et al.*, 1997, s. 117)

Crow et al. (1997) skriver att i den första standarden var det särskilt viktigt att specificera stöd för två fundamentalt olika MAC-scheman. Det första MAC-schemat hette (distributed coordination function)DCF. DCF var designat att vara ansvarig för asynkron dataöverföring och liknade äldre nätverk. Med DCF hade alla användare med data att transportera lika sannolikhet att få tillgång till nätverket. Det andra schemat var PCF(point coordination function. PCF är primärt för att sköta trafik som är relaterad till uppgifter som är känsliga till tidsfördröjningar. Dessa uppgifter kan till exempel vara Voice Over Ip(VoIP) eller videoströmning.(Crow *et al.*, 1997, s. 117)

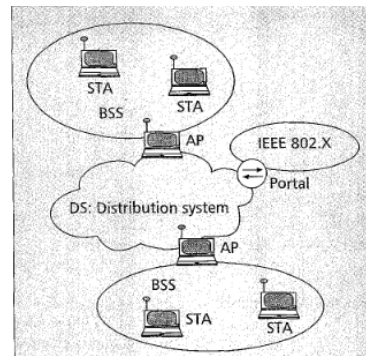
Näst beskriver Crow et al. (1997) arkitekturen för IEEE 802.11-standardutkastet. BSS som står för Basic Service Set är en grupp stationer som alla lyder under samma koordinerande funktion. Koordinerande funktion kan vara DCF eller PCF. BSS är enligt Crow et al.(1997) en fundamental byggsten av IEEE 802.11-arkitekturen. Crow et al. (1997) hävdar att alla stationer i BSS kan kommunicera med varandra. Detta kan inte alltid garanteras eftersom stationer som ligger nära till varandra använder samma frekvenser, spridningskoder och hoppmönster. Det orsakar att några stationer kan bli osynliga för andra på grund av interferens.

Ad hoc-nätverk är enligt Crow et al. (1997) avsiktligt grupperande av stationer till en BSS för att möjliggöra direkt kommunikation med varandra utan att kanalisera all trafik genom någon centraliserad (Access Point)AP.(Figur 1)

Näst säger Crow et al.(1997) att i kontrast till ad hoc-nätverk så är infrastrukturnätverks uppgift att förse användare av trådlösa nätverk med specifika tjänster och räckviddsförlängning. Infrastukturnätverk (Figur 2) i kontexten av IEEE 802.11 etableras genom att använda AP.Crow et al.(1997) hävdar att en AP i sådan kontext kan liknas med en basstation i mobilkommunikationsnätverk. AP möjliggör räckviddsförlängning genom att förse nätverk med integrationspunkter som är nödvändiga för nätverksanslutning mellan olika BSS. Denna helhet som består av flera BSS kallas för (Extended Service Set) ESS. Således består ESS av flera BSS som är integrerade med varandra med hjälp av ett gemensamt distributionssystem(DS,Distribution System). DS agerar enligt Crow et al.(1997) som ett ryggradnätverk, vars uppgift är att sköta leverering av MAC-servicedataenheter (MSDUS) på MAC-nivån. Enligt IEEE 802.11-standarderna kan DS implementeras fritt och därför kan den vara en trådlig IEEE



Figur 1: ad hoc-nätverk (Crow *et al.*, 1997, s.118)



Figur 2: infrastruktur nätverk (Crow *et al.*, 1997, s.118)

802.3 Ethernet LAN, IEEE 802.4 token bus LAN, IEEE 802.5 token ring LAN, Fiber Distributed Data Interface( FDDI) eller något annat trådlöst medium av IEEE 802.11. (Crow *et al.*, 1997, s.118). Crow *et al.* (1997) pekar på att fastän DS kan ha samma medium som BSS, så är de logiskt olika eftersom DS används ensidigt för att leverera paket mellan olika BSS i ESS.

#### 4.1.2.1 Det fysiska skiktet

Det fysiska skiktet sänder och mottar radiovågor samt ansvarar för modulering. Det fysiska skiktet som definierades i IEEE 802.11 innebär krav på tre olika implementationer: en så kallad frekvenshoppningsspridning(FHSS,frequency hopping spread),spektrum med direkt sekvensspridning DSSS,direct sequence spread spectrum) och infraröd strålning(IR,Infrared Radiation).FHSS är en metod för transmittering av radiovågor genom att snabbt ändra på bärvågsfrekvensen. FHSS använder sig av 2.4 GHz-bandet. FHSS används för att minska effekten av interferens och försvåra tjuvlyssning. Enligt Crow *et al.* (1997) specificerades 79 olika kanaler i en hoppande uppsättning(hopping set) i USA på den tiden. Separationen mellan olika kanaler var 1 MHz av bandbredd. Centralfrekvensen av första kanalen hade frekvens av 2.402 GHz. (Crow *et al.*, 1997, s.118) Det etablerades 3 olika hoppingssekvenser per en uppsättning. Olika hoppingssekvenser tillåter flera BSS att vara på samma område utan att olika BSS störs av varandras signaler(interferens). Crow *et al.*(1997) anvisar att vanlig åtkomsthastighet är 1 Mb/s och använder sig av (Gaussisk frekvensskiftnyckling,(Gaussian frequency shift keying,GFSK) där logiska ettor kodas med hjälp av frekvens  $F_c + f$  och logiska nollor med hjälp av frekvens  $F_c - e$ . Den avancerade åtkomsthastigheten är 2 Mb/s och för att åstadkomma den används GFSK med fyra nivåer där 2 bitar kodas på en gång med hjälp av fyra frekvenser.(Crow *et al.*, 1997, p.118)

DSSS använder sig enligt Crow *et al.*(1997) av 2.4 GHz-frekvensbandet där det används differentiell binär fasförskjutning (DBPSK,differential binary phase shift keying) för att uppnå åtkomsthastighet av 1 Mb/s och differentiell kvadratur fasförskjutning (DQPSK,differential quadrature phase shift keying) för att uppnå en avancerad åtkomsthastighet av 2 Mb/s. Spridningen uppnås enligt Crow *et al.* (1997) genom att dela tillgänglig bandbredd i 11 olika subkanaler som alla är

11 MHz breda och med hjälp av 11-chip Barker sekvens sprida varje datasymbol. Maximal kanalkapacitet i sådana fall är 1 Mb/s. Crow et al(1997) skriver att ifall flera BSS finns på ett område så kan interferens undvikas genom att separera centrala frekvenser av närliggande BSS med minst 30 MHz.

IR-implementationen används enligt Crow et al.(1997) på våglängder vars storlek sträcker sig från 850 nm till 950 nm. IR kan endast användas inomhus och för att hantera icke-direkta transmissioner.

#### 4.1.2.2 MAC-underskiktet

MAC-skiktet är ansvarigt för kanaltilldelning, adressering av PDU(Protocol Data Unit), formatering, fragmentering och återmontering av dataramar(data frames). Överföringsmedier kan enligt Crow et al. (1997) fungera i princip helt i ett så kallad tvistläge som också kallas för CP(contention period). I ett sådant tillstånd ska varje station be om tillgång till kanal för att sända ett paket. Medier kan också byta mellan CP och CFP(Contention Free Period). Under CFP kontrolleras medier av AP varpå stationer inte längre behöver tävla om tillgång till kanal. IEEE 802.11 stödjer enligt Crow et al. (1997) tre olika typer av dataramar: data-, kontroll- och förvaltningsramar(data frames,control frame,management frames). Förvaltningsramar används för att associera stationer med AP, synkronisering, tajmning och autentisering. Kontrollramar används under handskakningsprocessen av CP och för att sluta CFP. Dataramar används för överföring av data.(Crow *et al.*, 1997, s.118)

## 4.2 IEEE 802.11b(1999)

### 4.2.1 Motivering till att IEEE 802.11b-standarden skapades

Den originella standarden hade maximal datagenomströmningskapacitet av bara 2 Mbp/s. En så låg datahastighet sänkte QoS(Quality of Service) kraftigt särskilt med hänsyn till att 2 Mbp/s delas i praktiken mellan alla användare av en åtkomstpunkt.(Gast, 2005, s.194) År 1999 offentliggjordes ett nytt tillägg till IEEE 802.11-standarden. Tillägget hette IEEE 802.11b och den utvidgade PHY-nivån av den originella standarden med direkt sekvens spritt spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum,DSSS) och kompletterande kodnyckling (CCK,Complementary-Code Keying). Standarden 802.11b skulle operera på 2.4 GHz-bandet. Det möjliggjorde högre datagenomströmning av upp till 11 Mbp/s jämfört med 1 Mbps/s och 2 Mbp/s av den originella standarden. Högre datahastigheter kan nås på grund av att 802.11b använder höghastighets direkt sekvens spritt spektrum (HR DSSS,High Rate Direct Sequence Spread Spectrum)(Gast, 2005, s.194). Den förbättrade prestandan av IEEE 802.11b ledde enligt Gast(2005) till en avsevärd kommersiell framgång.

IEEE 802.11b standarden lägger till ytterliggare en PHY-nivå. Den nivån använder samma MAC-underskikt som alla andra fysiska nivåer och grundar sig på direktsekvensmodulation.(Gast, 2005, s.194) Den största nackdelen med IEEE 802.11b-standarden är enligt Khanduri Rattan(2013) att 2.4 GHz-frekvensbandet blir alltmera populärt och därmed förekommer det ofta interferens.

### 4.2.2 Beskrivning av IEEE 802.11b-standarden

#### 4.2.2.1 Det fysiska skiktet

Den originella IEEE 802.11-standarden använder sig av direct-sequence(DS) modulationsteknik med hastighet av 11 miljon chips per sekund. DS PHY delar chipströmmen i serier av 11-bit Barker-ord och sänder en miljon Barker-ord per sekund. Varje ord kodar antingen en bit eller två bitar. På så sätt uppnås datahastigheter av 1 Mbit/s och 2 Mbit/s. För att uppnå högre datahastigheter ska varje kodsymbol bära mera information än en eller två bitar.(Gast, 2005, s.194)

Gast(2005) hävdar vidare att *Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)* kräver att mottagaren ska märka till fasskillnader så små som  $1/4$ . Ifall mängden bitar per en symbol växer så ska mottagaren märka till ännu mindre fasskillnader som till exempel  $1/8$  och  $1/16$ . Det skulle enligt Gast(2005) kräva mera sofistikerad elektronik, vilket i sin tur betyder högre kostnad.

Istället för att öka mängden bitar per symbol fokuserade IEEE 802.11b-arbetsgruppen sig på andra aspekter av kodningen. Kompletterande kodnyckling(Complementary Code Keying,CCK) delar chipströmmen i serier av 8-bitar långa kodsymboler. Gast(2005) skriver att CCK grundar sig på sofistikerade matematiska transformationer som tillåter kodning av 4 eller till och med 8 bitar per ett kodord. Med hjälp av detta kan datahastigheter av 5- och 11 Mbps uppnås.(Gast, 2005)

## 4.3 IEEE 802.11a

### 4.3.1 Motivering till att IEEE 802.11a-standarden skapades

Gast(2005) skriver att vid tiden när 802.11a börjades utvecklas, användes 2.4 GHz-bandet på så många enheter att 2.4 GHz-bandet blev "överbefolkad" och interferens som orsakades av detta började sänka prestandan. I ett försök att undvika interferensen och garantera högre datahastighet började 802.11-arbetsgruppen undersöka olicenserade band kring 5 GHz.(Gast, 2005, s.204)

Hårdvaran som implementerade 802.11a standarden kom år 2001. Gast(2005) säger att dess många fördelar till trots blev inte standarden en kommersiell succé. Han förklarar detta med att högre frekvenser leder till högre "path losses". "path losses" betyder i detta fall försvagning av elektromagnetiska vågor i samband med deras spridning i utrymme. Det skulle eventuellt betyda att en åtkomstpunkt som stödjer 802.11a inte kan garantera tillfredsställande prestanda på större områden. En annan stor nackdel hos 802.11a var enligt Gast(2005) att 802.11a är icke-kompatibel med system som använder sig av mobila batterier.

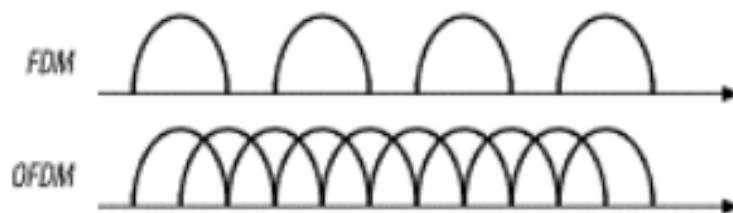
### 4.3.2 Beskrivning av IEEE 802.11a-standarden

#### 4.3.2.1 Det fysiska skiktet

Standarden 802.11a blev den första att introducera ortogonal frekvensdelningsmultiplexering(OFDM,Orthogonal Frequency division multiplexing) tekniken. Mekanismen av OFDM kan beskrivas på ett följande sätt: OFDM delar en stor frekvenskanal i flera subkanaler som kan användas parallellt för att uppnå högre datagenomströmning.



Figur 3: Vaktband i FDM (Gast, 2005, s.204)



Figur 4: Jämförelse mellan OFDM och FDM (Gast, 2005, s.204)

OFDM är enligt Gast(2005,s.204) väldigt likt en äldre teknik som kallas för frekvensdelningsmultiplexering(FDM,Frequency Division Multiplexing). OFDM och FDM båda delar en frekvenskanal i flera subkanaler. Gast(2005,s.204) skriver att problemet med FDM är att de så kallade "vaktbanden" (Figur 3) slösar mycket bandbredd och som resultat försämras prestandan. OFDM väljer de kanaler som överlappar men inte stör varandra.(Figur 4) (Gast, 2005, s.204)

## 4.4 IEEE 802.11g(2003)

### 4.4.1 Motivering till att IEEE 802.11g-standarden skapades

Den originella IEEE 802.11-standarden definierar datahastigheter av 1- och 2 Mb/s. Standarden 802.11 använder sig av flera olika modulationstekniker: direkt sekvens sprittspektrum(DSSS), frekvenshoppningsspridning(FHSS) och IR. I den originella standarden definierades FHSS och DSSS för 2.4 GHz-bandet. Vassis et al. (2005) skriver att DSSS blev den mest använda av alla . Enligt Vassis et al. (2005) blev DSSS så populär på grund av att den kunde utvidgas för att åstadkomma högre datahastighet. Utvecklingen av den trådlösa LAN-tekniken och krav på högre datahastighet ledde till att det skapades nya standarder IEEE 802.11a och IEEE 802.11b. De nyare standarderna skulle operera på både 5.4- och 2.4 GHz-frekvensbandet. IEEE 802.11b erbjöd datahastigheter upp till 11 Mb/s och IEEE 802.11a-standarden hade 54 Mb/s som sin maximala datahastighet. Vassis et al(2005) skriver att fast 802.11a-standarden definierade relativt hög datahastighet jämfört med den originella standarden 802.11 så finns det en stor nackdel hos den standarden. Nackdelen var att 802.11a-standarden använde 5 GHz-bandet och kan således inte erbjuda kompatibiliteten med de enheter som använder sig av 802.11- och 802.11b-standarden.

År 2003 publicerades en ny IEEE 802.11g-standard som försåg användare med 802.11a-standardens datahastighet men istället för att använda 5 GHz-bandet skulle den nya standarden använda 2.4 GHz-frekvensbandet, vilket möjliggjorde kompatibiliteten med de enheter som använder sig av de äldre standarderna.

IEEE 802.11g har en del nya egenskaper som till exempel 4 olika fysiska nivåer, obligatoriskt stöd för en kort inledning(preamble), en ny PHY med utökad hastighet(Extended Rate PHY,ERP) nätverk attribut, nya försvarsmekanismer som skulle ta hand om kompatibiliteten och "CTS-to-self"-mekanismen.(Vassis et al., 2005, s.21)

Physical layer	Supported rates (Mb/s)	PLCP preamble + header delay		PLCP preamble + header length	
		Long	Short	Long	Short
ERP-DSSS (mandatory)	1, 2, 5.5, 11	192 $\mu$ s	96 $\mu$ s	192 bits	120 bits
ERP-OFDM (mandatory)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	20 $\mu$ s		40 bits <sup>1</sup>	
ERP-PBCC (optional)	1, 2, 5.5, 11, 22, 33	192 $\mu$ s	96 $\mu$ s	192 bits	120 bits
DSSS-OFDM (optional)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	192 $\mu$ s	96 $\mu$ s	192 bits	120 bits

<sup>1</sup> This is the length of the PLCP header only. The PLCP preamble, which is used for synchronization, is a pure time interval equal to 16 ms that does not contain any bits.

Figur 5: Egenskaper av olika fysiska nivåer av 802.11g-standarden (Vassis *et al.*, 2005, s.22)

#### 4.4.2 Beskrivning av IEEE 802.11g-standarden

##### 4.4.2.1 Det fysiska skiktet

Vassis et al. (2005) hävdar att medan IEEE 802.11b endast använder DSSS-tekniken så använder 802.11g DSSS, OFDM eller de båda samtidigt för att garantera hög datahastighet av upp till 54 Mb/s. Kombinerad användning av två olika tekniker är möjlig eftersom 802.11g-standarden definierar fyra olika fysiska nivåer. Dessa nivåer som kallas för fysiska nivåer med utökad hastighet (extended rate physicals, ERP) existerar oberoende av varandra under sändningen av ramar så att både sändaren och mottagaren kan välja en av de 4 teknikerna så länge de både stödjer den. (Vassis *et al.*, 2005, s.21)

Näst kommer beskrivning av de 4 fysiska nivåer som definieras i IEEE 802.11g-standarden. ERP-DSSS/CCK är en fysisk nivå som användes i IEEE 802.11b. På den nivån används DSSS-tekniken i par med en modulationsmetod som kallas för kompletterande kodnyckling (complementary code keying, CCK). Datahastighet är i så fall samma som hos 802.11b-standarden. En annan nivå är ERP-OFDM. ERP-OFDM är en ny fysisk nivå som först introduceras i 802.11g-standarden. ERP-OFDM erbjuder samma datahastighet som 802.11a samtidigt som den fungerar på 2.4 GHz-frekvensbandet. Tredje nivå som definieras i 802.11g-standarden är ERP-DSSS/PBCC. ERP-DSSS/PBCC introducerades först i 802.11b-standarden. IEEE 802.11g utvidgar den originella ERP-DSSS/PBCC-nivån med stöd för datahastigheter av 22 Mb/s och 33 Mb/s. Sista fysiska nivån som introduceras i IEEE 802.11g är DSSS-OFDM. DSSS-OFDM-nivån använder sig av en kombination av DSSS och ortogonal frekvens-

delningsmultiplexering(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing,OFDM). Packets header sänds med hjälp av DSSS och payload sänds med hjälp av OFDM. Det görs för att möjliggöra interoperabilitet mellan IEEE 802.11g och de äldre standarderna. Beskrivning av datahastigheter som olika fysiska nivåer stödjer kan betraktas på Figur 5. (Vassis *et al.*, 2005, s.21)

#### 4.4.2.2 MAC-underskiktet

Vassis et al. (2005) skriver att pålägget(overhead) av 802.11-standardens fysiska nivå består av två delar. Första delen är konvergensprotokoll för fysiskt skikt (Physical Layer Convergence,PLCP) som används för synkronisering och andra delen är PLCP huvud(PLCP header) som innehåller den information om paket som har att göra med den fysiska nivån. Vassis et al. (2005) skriver vidare att det redan under utvecklingen av IEEE 802.11b insågs att PLCP-preambeln är för lång och att den bidrar till påläggets längd. Av denna anledning introducerade 802.11g-standarderna en kortare version av preambel som skulle kallas för en kort preambel. Det gjordes för att minska påläggets längd och på så sätt få högre datahastighet. Den korta preambeln används ifall bägge mottagaren och sändaren stödjer den. Standarden 802.11g rekommenderar användningen av den korta preambeln. Skillnader i längden och tidsfördröjningar mellan de olika typerna av preambel kan betraktas på Figur 5 i kolumner 3 och 4.(Vassis *et al.*, 2005, s.22)

## 4.5 IEEE 802.11n(2009)

### 4.5.1 Motivering till att IEEE 802.11n-standarderna skapades

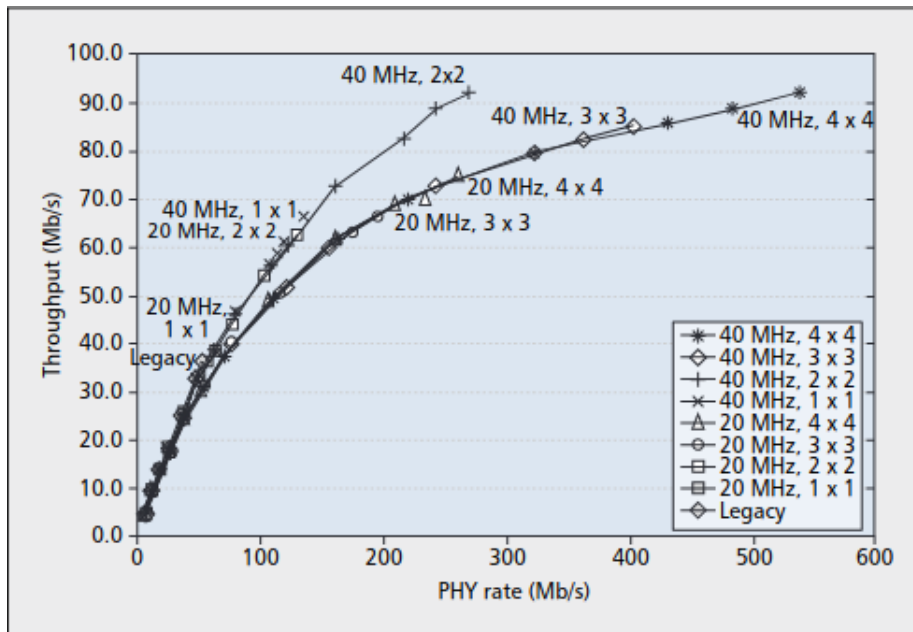
Perahia(2008) skriver att diskussioner om att förbättra datagenomströmning av 802.11-standardens fysiska skikt fördes redan år 2002. Målsättningen var att ha högre datahastighet än den av IEEE 802.11g. I januari 2002 hölls en presentation till Wire-less Next Generation Standing Committee(WNG SC) där det uttrycktes intresse för att ha en förlängning till IEEE 802.11a-standarderna. Intresset motiverades med dels den ökade datahastigheten av fasta nätverk som grundar sig på Ethernet, dels med att nya applikationer och tillämpningar krävde högre datahastigheter. Perahia(2008) poängterar att det är viktigt att presentationens kärna var beskrivningen av MIMO-prototyp (Multipel-ingång Multipel-utgång,Multiple Input Multiple Output) och riktiga mätningar. Målsättningen med att utveckla den nya standarderna var enligt Perahia(2008) att växa nya kommersiellt lyckade marknader med hjälp av interoperabla produkter och inte att utföra forskning.

### 4.5.2 Beskrivning av IEEE 802.11n-standarderna

#### 4.5.2.1 Det fysiska skiktet

Enligt Perahia(2008) var det två grundläggande koncept i 802.11n som tänktes öka datahastigheten av det fysiska skiktet: *MIMO* och 40 MHz breda kanaler. Med hjälp av *MIMO* ökar antalet antenner samt antalet spatiella strömmar från 1 till 4. Det betyder en fyrfaldig ökning i datahastigheten på den fysiska nivån. På grund av högre kostnad av ett större antal antenner blev det inte obligatoriskt





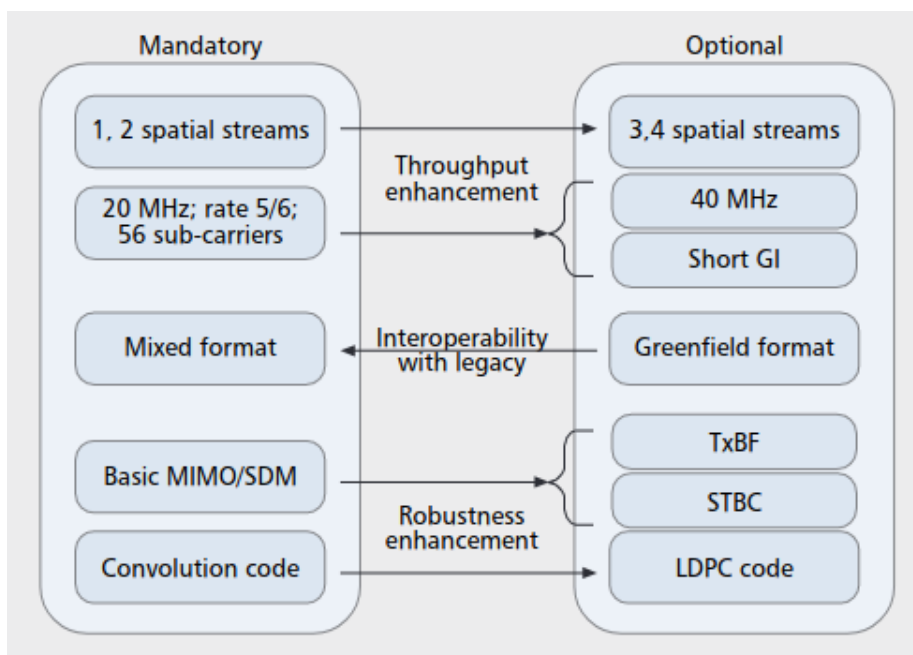
Figur 6: Maximal datagenomströmning ifall MAC-underskiktet förblir oförändrad (Vassiss *et al.*, 2005, s.22)

att använda 3 eller 4 antenner. Två antenner och således två spatiella strömmar blev obligatoriska endast för *åtkomstpunkter* (*Access Point, AP*).

40 MHz breda kanaler blev inte obligatoriska i standarden på grund av att det var osäkert om interoperabiliteten mellan enheter som använder kanaler av olika bredd skulle vara möjlig. Oavsett detta blev 40 MHz en viktig egenskap av standarden tack vare att på så sätt gick det att med relativt låga kostnader höja datahastigheten. Den fysiska nivån förbättrades också med hjälp av mindre ändringar. Kodningshastigheten växte från  $3/4$  som den var i 802.11a-standardens till  $5/6$ , vilket resulterade i 11% högre datahastighet. Framsteg som skedde i RF-tekniken (Radio Frequency) möjliggjorde att två extra frekvensunderbärare kunde tryckas in på bägge sidorna av ett vaktband. Det höjde datahastigheten med ytterligare 8%. Slutligen definierades det ett alternativt tillstånd där interval mellan olika OFDM symboler var 400 ns. Motsvarande interval i IEEE 802.11g-standardens är 800 ns. Det alternativa tillståndet ökade datahastigheten med 11%. En sammanfattning av valfria och obligatoriska egenskaper kan hittas på Figur 7. (Vassiss *et al.*, 2005, s.52)

#### 4.5.2.2 MAC-underskiktet

Perahia (2008) understrycker att utvecklingen av standarden styrdes av ett krav på högre datagenomströmningsskapitet på MAC-nivån. Ändamålet var att uppnå 100 Mb/s. Perahia (2008, s.51) skriver att med hänsyn till att datagenomströmningsskapiteten av 802.11a/g var 25 Mb/s så skulle det betyda en fyrfaldig ökning i datahastighet. Figuren (6) visar den nåbara datagenomströmningen ifall MAC-underskiktet förblir oförändrad. Perahia (2008) skriver vidare att det



Figur 7: Valfria och obligatoriska egenskaper av IEEE 802.11n standarden (Vassiss *et al.*, 2005, s.22)

var oförmågan att uppnå 100 Mb/s med oförändrad *MAC-underskiktet* som orsakade behovet av att optimisera *MAC-underskiktet* och höja dess effektivitet.

För att nå 100 Mb/s blev *ram aggregation* tekniken introducerat för att minska andelen av onödig information som behövs för att en sändning skulle lyckas (*overhead*) av *MAC-underskiktet*. *Ram aggregation* blev enligt Perahia (2008) den viktigaste tekniken i försöket att maximera effektiviteten av *MAC-underskiktet*. Perahia (2008) poängterar att samtidigt som datahastigheten av den fysiska nivån ökar minskar tiden som krävs för att överföra den delen av MAC-ram som innehåller data. Oavsett detta förblir antalet information som behövs vid till exempel handskakningar samt montering/demontering av ramar oförändrad. Detta minskar prestandan. *Ram aggregation* ökar datas andel av en ram för att förbättra den totala effektiviteten. (Vassiss *et al.*, 2005, s.22)

## 4.6 IEEE 802.11ac(2014)

### 4.6.1 Motivering till att 802.11ac-standarderna skapades

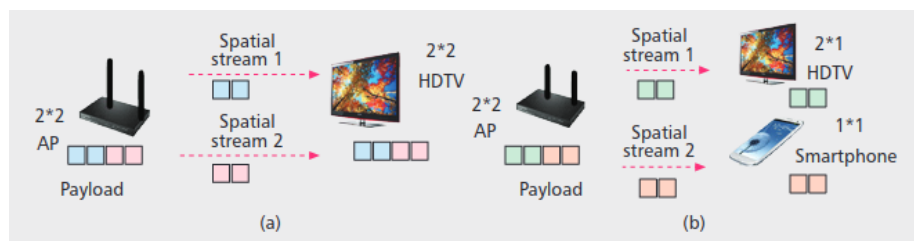
Bejarano *et al.* (2013) skriver att mobil datatrafik förutsågs växa 18-faldigt under åren 2011-2016 på grund av enorm tillväxt i antalet användare och populariteten av bandbreddskrävande applikationer. Bejarano *et al.* (2013) påstår att det resulterade i ett intresse för enheter och standarder som skulle vara tillräckligt effektiva och pålitliga att stödja videoströmning, gaming i realtid, överföring av stora filer och andra bandbreddskrävande applikationer som blev aktuella vid den tiden. Intresset resulterade i utvecklingen av IEEE 802.11ac-standarderna som siktade på att nå datahastigheter högre än 1 Gbit/s. Enligt Bejarano *et al.*

(2013) planerade 802.11ac-arbetsgruppen öka MAC-underskiktets datagenomströmning till 500 Mb/s för en enskild användare, vilket skulle betyda en femfaldig ökning jämfört med tidigare standarder. Bejarano et al.(2013) påstår att i kontrast till de tidigare standarderna skulle 802.11ac-standarden öka den totala genomströmningen av ett nätverk och datahastigheten av en enskild länk.

Två nycklegenskaper som pekas ut av Bejarano et al.(2013) som ansvariga för att 802.11ac når 1 Gb/s datahastighet är statisk och dynamisk kanalbindning och MIMO-tekniken(Multiple-Input and Multiple-Output,Multipel Ingång Multipel Utgång). För att möjliggöra implementeringen av egenskaperna skulle substantiella förändringar göras på PHY-nivån. De förändringar som 802.11ac inför på MAC-nivån har till syfte att garantera kompatibiliteten med den modifierade fysiska nivån av 802.11ac-standarden.(Bejarano *et al.*, 2013)

## 4.6.2 Beskrivning av 802.11ac-standarden

### 4.6.2.1 Det fysiska skiktet



Figur 8: a)SU-MIMO b) nerlänk MU-MIMO (Verma *et al.*, 2013, s.32)

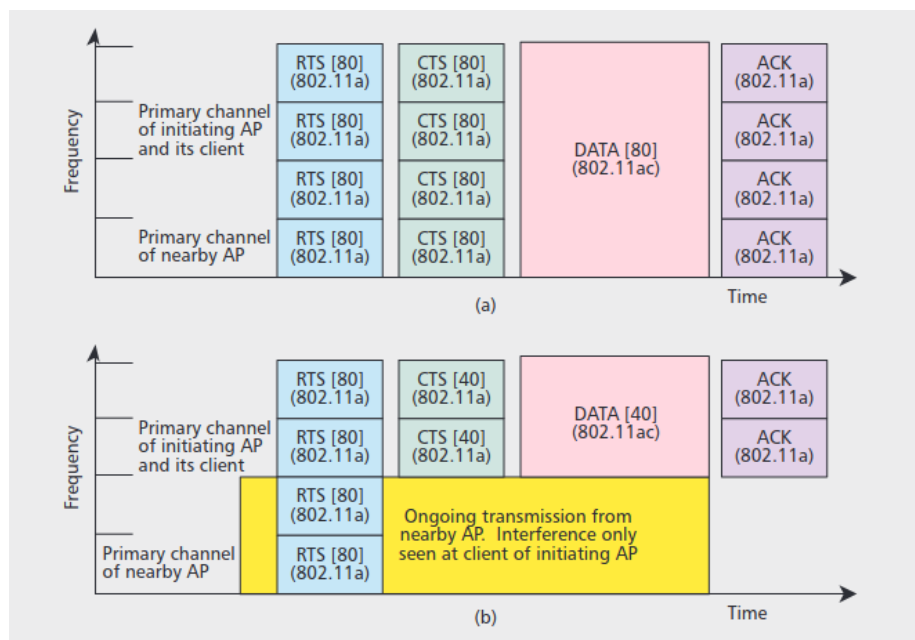
En av 802.11ac-standarden fysiska skiktets egenskaper som tillåter 802.11ac-standarden att erbjuda en extremt hög datahastighet är det frekvensbandet som den använder. Standarden 802.11ac använder sig av 5 GHz-frekvensbandet, vilket tillför en kraftig minskning av interferens jämfört med 2.4 GHz-frekvensbandet. Den interferens som uppstår när 2.4 GHz-bandet används kan enligt Verma et al(2013) förklaras med det stora antalet enheter som stödjer de standarder som använder 2.4 GHz-frekvensbandet.

En annan nycklegenskap av 802.11ac-standarden fysiska skikte som Verma et al(2013) anser vara viktig är bredare kanaler. Standarden 802.11ac stödjer 20 MHz,40 MHz, 80 MHz och 160 MHz breda kanaler. De kanaler som är 80 MHz och 160 MHz breda fås genom att slå ihop två närliggande 40 MHz och 80 MHz kanaler. IEEE 802.11g stödjer i sin tur 20 MHz och 40 MHz breda kanaler. De bredare kanalerna och minimeringen av interferensen är svåra att uppnå om det är 2.4 GHz-bandet som används. Orsaken till detta är att många åtkomstpunkter använder icke-överlappande kanaler i omgivningar med en hög enhetsdensitet. Standarden 802.11ac erbjuder mera spektrum och kanalbandbredd genom att använda en teknik som kallas för dynamiskt frekvensval. På den tiden då 802.11ac-standarden kom ut fanns det ett relativt litet antal åtkomstpunkter som hade stöd för dynamiskt frekvensval. (Verma *et al.*, 2013, s.31)

En annan innovation av IEEE 802.11ac-standarden fysiska nivå är en teknik som kallas för flera användare,flera ingångar,flera utgångar(Multiple-User Mul-

multiple Input Multiple Output, MU-MIMO). Singel användare, flera ingångar, flera utgångar (Single-user Multiple Input Multiple Output, SU-MIMO) implementerades redan i IEEE 802.11n-standarden. SU-MIMO-tekniken använder flera antenner för att sända och motta signaler. Standarden 802.11n stödjer upp till 4 spatiella strömmar och således 4 antenner. Standarden 802.11ac ökar antalet spatiella strömmar för SU-MIMO från 4 till 8. En station som endast stödjer SU-MIMO kan kommunicera med en annan station på en gång. MU-MIMO möjliggör samtidig kommunikation med flera andra stationer. Skillnaden mellan MU-MIMO och SU-MIMO visualiseras på Figur 8. MU-MIMO definieras i 802.11ac-standarden som en teknik där flera stationer med flera antenner kan sända eller motta dataströmmar samtidigt. Standarden 802.11ac stödjer SU-MIMO för både ner- och upplänken och MU-MIMO för nerlänken. (Verma *et al.*, 2013, s.87)

#### 4.6.2.2 MAC-underskiktet



Figur 9: a) Den modifierade RTS/CTS-mekanismen a)interferens inträffar b)ingen interferens (Bejarano *et al.*, 2013, s.87)

Om en 802.11ac-åtkomstpunkt och en åtkomstpunkt av en äldre standard ligger nära varandra så är det möjligt att en primär kanal av en åtkomstpunkt som stödjer någon äldre standard ligger inom en 802.11ac-kanal som kan vara 80 eller 160 MHz bred. Det betyder att olika åtkomstpunkter och deras stationer kan sända samtidigt på olika underkanaler, vilket kan leda till kollisioner. För att fixa problemet definierar 802.11ac-standarden en handskakning för att hantera både statisk och dynamisk kanaltilldelning. Den handskakningen innebär en modifierad RTS/CTS-mekanism (Request To Send/Clear To Send). Mekanismens syfte är att informera om antalet bandbredd som är tillgänglig.

Visualiseringen av mekanismen kan betraktas på Figur 9.

## 5 Den nya 802.11ax-standarden

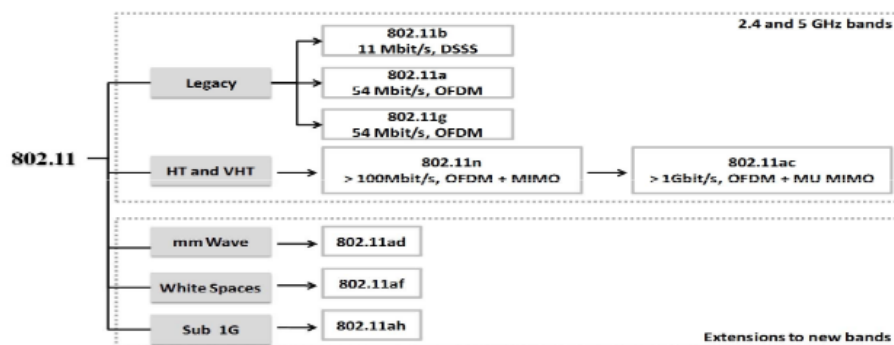
### 5.0.1 Motivering till att IEEE 802.11ax-standarden skapades

Den enorma tillväxten i mängden av data som överförs med hjälp av Wi-Fi resulterade i krav på större bandbredd och högre datahastigheter. Standarden 802.11ac hade som mål att nå datagenomströmningskapacitet på 1 GB/s och maximal datagenomströmningskapacitet av en länk på 500 Mb/s. Hittills har wifistandarder koncentrerat sig mest på att förbättra datagenomströmningskapaciteten av en singel länk. En kortfattad evolution av wifistandarder kan ses på Figur 8. Att förbättra användarupplevelse och minska latens hade inte ansetts vara lika viktigt. I det moderna samhället ligger wifi-åtkomstpunkter väldigt tätt intill varandra. Samtidigt växer antalet wifi-åtkomstpunkter ständigt. Denna trend kommer förstärkas i närmaste framtiden på grund av att sakernas internet (Internet of Things, IoT) blir mera populär. Det leder till att de AP som ligger nära varandra interfererar med varandra, vilket i sin tur påverkar effektiviteten av sändning och mottagning av data. Det leder till att moderna tillämpningar som fungerar i realtid och kräver trådlös uppkoppling okapabla att leverera tillfredställande prestanda. Det finns således ett behov av en ny standard som skulle förbättra användarupplevelse och svara på utmaningar som moderna omgivningar med ett flertal AP utgör. Den standarden behöver koncentrera sig på att förbättra prestandan i situationer där flera användare sänder/mottar data. Latens, tidfördröjningar och medelnsnitts datagenomströmning per en användare ska det sättas fokus på istället för att försöka förbättra den maximala datagenomströmningskapaciteten av en station i ett läge där den är den enda som sänder/mottar data. (Bellalta, 2016)

Samtidigt som det finns ett krav på bättre användarupplevelse och mindre latens så finns det också ett krav på högre datagenomströmningskapacitet. Det kravet orsakas av att högupplöst videostreaming, molntjänster som behöver ständig uppkoppling och andra realtidsapplikationer blir alltmera populära.

### 5.0.2 Introduktion till IEEE 802.11ax-standarden

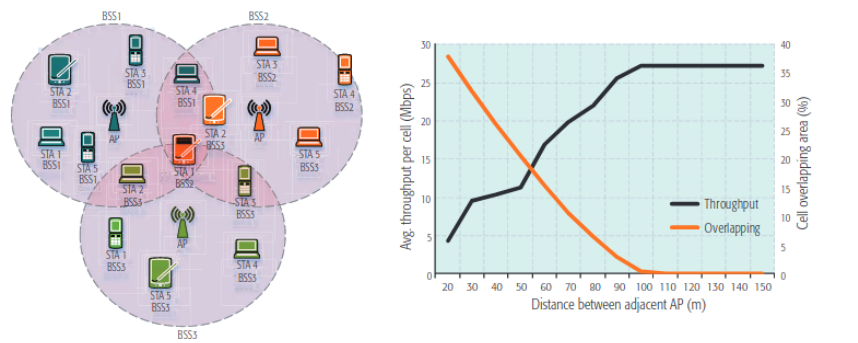
För att svara på de utmaningar och krav som det moderna samhället ställer på trådlösa nätverk godkände IEEE Standards Association (IEEE-SA) IEEE 802.11ax-standarden i mars 2014. Standarden 802.11ax tänktes definiera standardiserade tillägg till både det fysiska skiktet och MAC-underskiktet. Tilläggen skulle erbjuda högeffektiva operationer på frekvensbandet mellan 1 GHz och 6 GHz och målet var att förbättra användarupplevelsen så att medelnsnitts datagenomströmning per en användare skulle växa fyrfaldigt. Standarden innehåller fyra nyckelegenskaper: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA), nerlänk/upplänk multi-user multiple-input multiple-output (DL/UL MU MIMO), (SR)-tekniken (Spatial Reuse), energisparande TWT-tekniken (Target Wake Time), randomiserad OFDMA tillgång (OFDMA random access) och station-till-station (STA2STA) tekniken. (Deng *et al.*, 2017)



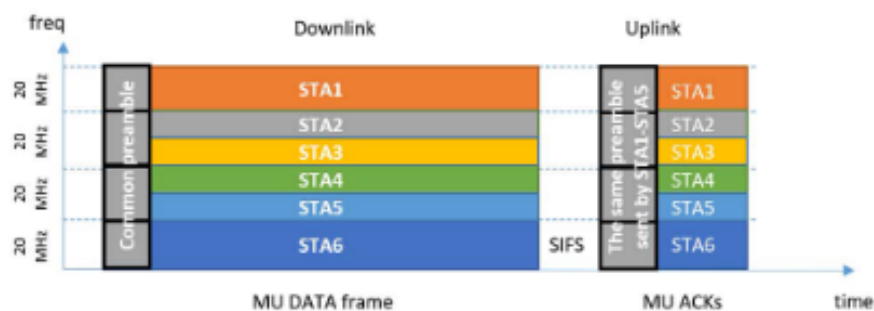
Figur 10: Evolitionen av wifitekniken (Deng *et al.*, 2014, s.78)

### 5.0.3 Beskrivning av IEEE 802.11ax standarden

#### 5.0.3.1 Anledningar till att äldre standarder presterar dåligt i omgivningar med flera AP



Figur 11: Beskrivning av en situation där flera BSS ligger nära varandra (Afaqui *et al.*, 2017, s.132)



Figur 12: Visualisering av OFDMA-modulationsschemat (Khorov *et al.*, 2018, s.201)

Bristfälligheten av de äldre 802.11-standarderna som orsakar dålig prestanda i omgivningar där olika wifi-åtkomstpunkter ligger tätt intill varandra beror på att de använder CSMA/CA-accessmetoden för att undvika och hantera de kollisioner som uppstår när flera stationer försöker sända på samma kanal. CSMA/CA står för carrier sensing multiple access with collision avoidance. CSMA/CA-accessmetoden tenderar att ha hög sannolikhet att kollisioner inträffar och att kanalens prestanda degraderar när flera åtkomstpunkter fungerar i ett relativt litet område. Detta sker på grund av att CSMA/CD naivt väljer en kort tidsperiod som en station ska vänta före den kan försöka sända igen (back-off window) och antar att det inte finns många stationer som håller på att sända. Andra orsaken till den dåliga prestandan av de äldre standarderna i omgivningar med hög enhetsdensitet är att CSMA/CA kan leda till rättviseproblem (fairness problem). Rättviseproblemet uppstår på grund av att binär exponentiell backoff

(binary exponential backoff, BEB) algoritmen som CSMA/CA använder för att hantera kollisioner föredrar alltid den sista station som lyckades att transmitta.

Request To Send / Clear To Send (RTS/CTS) mekanismen blev föreslagen som en lösning på det så kallade dolda terminalproblemet (hidden terminal problem). Deng et al. (2014) påstår att forskning visar att RTS/CTS-mekanismen inte kan lösa problemet helt och dessutom orsakar den en märkbar försämring i prestandan och sjunker den totala datagenomströmningskapaciteten. Försämringen av prestandan beror på att implementeringen av RTS/CTS förutsätter att ytterligare information som krävs för implementeringen ska läggas till MAC-ramar. Deng et al. (2014) hävdar också att *RTS/CTS* är okapabel till att lösa ett problem som uppstår när en närliggande station som är relaterad till en annan åtkomstpunkt (AP) upptäcker en transmission och signaleras att inställa sin egen transmission och vänta en viss *backoff* tid enligt *RTS/CTS* mekanismen. Ett sådant problem kallas för *exposed terminal problem*. Deng et al. (2014) understrycker att enligt den forskningen som den utförde så visar det sig att användningen av RTS/CTS-mekanismen gynnar prestandan endast i ett fåtal situationer som till exempel i de omgivningar där det finns flera tillgängliga datahastigheter (multi-rate). (Deng et al., 2014, 79)

### 5.0.3.2 Det fysiska skiktet

Standarden 802.11ax kommer att implementera nya tekniker samtidigt som den ska vara kompatibel med de äldre standarderna. Till exempel kommer protokoll dataenheter (Protocol Data Unit, PPDU) av konvergensprotokollet för det fysiska skiktet (PLCP) inkludera en äldre preamble i varje 20 MHz-subkanal för att stödja interoperabiliteten med de enheter som stödjer äldre standarder. (Afaqui et al., 2017, s.132)

802.11ax stödjer både 2.4- och 5.0 GHz-bandet samt kanalbredden av upp till 40 MHz på 2.4 GHz-bandet och kanalbredden av upp till 160 MHz på 5 GHz band. (Afaqui et al., 2017, s.132)

En viktig teknik som implementeras i IEEE 802.11ax är paritetskontroll med låg densitet (low density parity check, LDPC). LDPC är en teknik som märker till och korrigerar de misstag som uppstår vid sändning av data. Tekniken som används i 802.11n- och 802.11ac-standarderna grundar sig på binär faltningsskodning (binary convolutional coding, BCC). Standarden 802.11ax definierar LDPC som ett valfritt alternativ det vill säga den är inte obligatorisk. En sådan lösning valdes delvis på grund av att LDPC kräver mycket beräkningsresurser. Detta till trots så är det bevisat att LDPC kan bidra till högre effektivitet jämfört med BCC. Standarden 802.11ax föreslår användningen av LDPC i samband med användning av de bredare bandbredderna. (Afaqui et al., 2017, s.132)

En aspekt som prioriteras i IEEE 802.11ax standarden är enligt Afaqui et al. (2017) att hålla energikonsumtion på en så låg nivå som möjligt. Energikonsumtionen får inte vara högre än hos de äldre standarderna. Detta är en svår uppgift eftersom samtidigt ska en fyrfaldig ökning i datagenomströmningskapacitet uppnås. (Afaqui et al., 2017, s.132)

En annan innovation som kommer förbättra datagenomströmningskapaciteten av 802.11ax-standardens fysiska skikt är nya modulationstekniker som till exempel **1024-QAM**, där varje symbol kodar ett stort antal bitar. Jämfört med 802.11ac som använder 256-QAM så erbjuder 1024-QAM modulationstekniken



en 25% tillväxt i datagenomströmningskapaciteten. Detta beror på att 256-QAM kodar 8 bitar med en symbol medan 1024-QAM kodar 10 bitar.

En av de viktigaste egenskaperna av 802.11ax-standarden är ett modulatio-  
nosschema som kallas för orthogonal frekvensuppdelning multipel åtkomst  
(Orthogonal frequency-division multiple access, OFDMA).  
OFDM-tekniken introducerades först i de äldre standarderna. Kärnan av OFDMA  
är att spektrumet delas i ett flertal olika  
underbärare(subcarriers) och de underbärarna grupperas ihop i både tids- och  
frekvensdomänen. Grupperna kallas för resursenheter(Resurs Unit). En kortare  
resursenhet av 802.11ax-standarden innehåller 26 underbärare. Den kortare  
resursenheten är 2 MHz bred. Det kan finnas högst 9 olika resursenheter i en  
20 MHz bredd kanal.(Muhammad *et al.*, 2021)

OFDMA-modulationsschemat låter flera användare att både sända och motta  
data samtidigt. Visualiseringen av en OFDMA-sändning kan betraktas på  
Figur 12. Standarden 802.11ac definierade stöd för samtidig mottagning av data  
för flera användare, men saknade stöd för samtidig sändning av data. I ett  
nerlänkstillsstånd sänder en åtkomstpunkt ett flertal ramar till olika stationer  
med hjälp av flera resursenheter som tidigare tilldelades till olika stationer. I ett  
upplänkstillsstånd transmitteras olika stationers data simultant till åtkomstpunkten  
med hjälp av de olika resursenheter. Åtkomstpunkten är i ett sådant fall en  
station som styr både upplänk och nerlänk kommunikation och tilldelningen  
av resursenheter. Åtkomstpunkten sänder en fyrkam(beacon frame) som in-  
formerar de olika stationerna om antalet resursenheter, längden av sändningen  
och antalet spatiella strömmar som ges åt en given station. (Muhammad *et al.*,  
2021)

En annan viktig MU-teknik som 802.11ax-standarden definierar är MU-  
MIMO för både upplänken och nerlänken. MU-MIMO är en teknik som tillåter  
överföring av data med hjälp av flera antenner för att dra nytta av  
flervägsutbredning(multipath propagation). Flervägsutbredningen är en teknik  
som ökar överföringshastighet på den fysiska nivån genom att använda flera  
olika spatiella strömmar.(Oughton *et al.*, 2021)

Standarden 802.11ax använder en teknik som kallas för selektiv frekvenss-  
chemaläggning(Frequency Selective Scheduling,FSS). FSS ökar den totala  
datagenomströmningskapaciteten genom att tilldela de fysiska resurser som försvagas  
minst till transmissioner som sänds till stationer som ligger relativt långt ifrån  
åtkomstpunkten.(Afaqui *et al.*, 2017)

En egenskap av 802.11ax-standarden som har en nyckelroll i att möjliggöra  
den höga datagenomströmningskapaciteten är mycket större antal Fast Fourier  
transform(FFT) samt en fyrfaldig minskning i bredden av utrymme mellan olika  
underbärare. En stor skillnad mellan 802.11ax-standarden och de äldre stan-  
darderna är antalet underbärare. Standarden 802.11ax stödjer 25 underbärare  
medan den äldre 802.11ac-standarden stödjer 64 underbärare. Standarden 802.11ax  
har ett mycket högre antal underbärare och således blir duration av en FFT sym-  
bol längre. Bredden av utrymme mellan de olika underbärare reducerades till  
78.125 kHz och durationen av en FFT symbol ökades till 12.8 $\mu$ s

### 5.0.3.3 MAC-underskiktet

Deng et al.(2017) skriver att implementeringen av OFDMA-tekniken på det fy-  
siska skiktet medför högre effektivitet av det fysiska skiktet och en problemfri

integration med cellulära system, men samtidigt ställs hårda krav på MAC-underskiktet eftersom flera användare delar samma frekvensband, vilket lägger en stor börda på carrier sense-tekniken. Således behövs det göras förändringar på MAC-underskiktets nivå för att garantera både interoperabiliteten med den originella MAC-underskiktet som grundar sig på CSMA/CA-tekniken och stödet för fleranvändare-OFDMA för både upp- och nerlänken. Enligt Deng et al.(2017) så är grundidén att utnyttja koncepten av en 4-vägs handskakning genom att etablera en så kallad triggerramar för att möjliggöra effektiva operationer för ett fleranvändare-PHY.(Deng *et al.*, 2017, s.55)

De äldre 802.11-standarderna använder fysiska kanalbedömningsmoduler (physical channel assessment,PHYCCA) för att få information om kanalens tillstånd genom att mäta den energi som modulerna mottar. Arbetsgruppen för 802.11ax-standarden införde ändringar på MAC-underskiktet för att formellt stödja och dra nytta av dynamiska PHYCCA-modifikationer. Modifikationerna möjliggör flera simultana transmissioner och förbättrar datagenomströmningskapaciteten. Problemet som dynamiska PHYCCA-modifikationerna tänks lösa uppstår när stationer som befinner sig i en överbefolkad omgivning (det vill säga en sådan omgivning där det finns ett stort antal stationer i ett relativt litet område) agerar som om kanalen de använder skulle vara upptagen trots att så är inte fallet och flera simultana transmissioner skulle kunna ske. Arbetsgruppen har aktivt planerat designen av PHYCCA-modifikationsschemat där dynamisk känslighetskontroll-algoritmen (dynamic sensitivity control,DSC) har en nyckelroll. Grundidén av DSC-algoritmen är att försöka optimera uppförandet av stationer så att de är varken för aggressiva eller för konservativa när de strider om tillgång till kanalen. Detta åstadkoms genom att manipulera bäraravkänningsgränsen(carrier sense threshold,CST).(Deng *et al.*, 2017)

BSS färgläggning(BCC Coloring) introduceras i IEEE 802.11ax för att förbättra prestandan i moderna omgivningar med ett stort antal åtkomstpunkter och stationer. I sådana omgivningar kan stationer bli störda av stationer från andra grundläggande serviceuppsättning(Basic Service Set,BSS). Standarden 802.11ax låter stationerna kontrollera att ramar tillhör deras BSS. Om en dataram inte tillhör egen BSS så ignoreras den av stationen och på så sätt minskas interferensen. Tillhörigheten av en dataram kontrolleras med hjälp av en färgbit, det vill säga en bit i ramens huvud(header) som uppger vilken BSS ramen tillhör.(Muhammad *et al.*, 2021)

#### 5.0.3.4 Energisparande tekniker

Standarden 802.11ax innebär enligt Deng et al.(2017) många energisparande scheman för att garantera tillfredställande prestanda av mobila enheter. Dessa scheman är till exempel target wake time(TWT), opportunistiskt sparande av energi och operation tillstånd indikation(OMI).(Deng *et al.*, 2017, s.58)

TWT-mekanismen designades i 802.11ah-standarden för att stationer skulle hålla sig i ett energisparande tillstånd(power saving,PS) utan att lyssna på fyrmeddelanden under längre tidsperioder. Det finns två olika typer av TWT i 802.11ax-standarden: en individuell TWT och broadcast TWT. Individuella TWT behöver en överenskommelese mellan två stationer. Till skillnad från detta så kräver inte en broadcast TWT en överenskommelse mellan en station som sköter TWT-schemaläggningen och de stationer som lyder under TWT-schemat. I broadcast TWT behöver en station i PS-tillstånd endast lyssna på ett

fyrmeddelanden som innehåller en TWT-informationselement (Information Element, IE). När en station hittar sig själv i en TWT-informationselement så ska den vakna på en viss tid för att lyssna på en triggerram av andra nerlänksramar. Annars vaknar inte stationen PS-tillståndet upp förrän den får nästa fyrmeddelande med TWT IE. (Deng *et al.*, 2017, s.58)

En opportunistisk energisparande mekanism grundar sig på broadcast TWT. Mekanismen splittrar intervallen mellan meddelanden i flera broadcast serviceperioder (service periods, SP). I början av varje SP skickas information gällande tidschemat till alla stationer med hjälp av en TIM-ram (trafikindikeringskarta, traffic indication map) eller en FILS-ram (Fast Initial Link Setup) som innehåller en TIM-element. (Deng *et al.*, 2017, s.58)

Intra-PPDU PS är en mekanism som hjälper stationer att reducera energikonsumtionen för korta tidsperioder men väldigt frekvent. När en station märker att PPDU (Fysiska nivåns protokoll dataenhet, Physical Layer Protocol Data Unit) som den fick har en fel BSS-färg eller att den inte är sig själv så sätts stationen in i ett så kallad doze-läge tills den PPDU tar slut. (Deng *et al.*, 2017)

Operation mode indication (OMI) är enligt Deng *et al.* (2017) en mekanism som sparar energi i samband med transmittering eller mottagning av data genom att manipulera några fysiska skiktets parametrar som bandbredden och antalet spatiella strömmar. OMI kan tillämpas på både mottagarens och sändarens sida. (Deng *et al.*, 2017)

## 6 Diskussion

Standard	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
Max. datahastighet av PHY-nivån	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	600 Mbps	6.8 Gbps	10 Gbps
Frekvensband	11 Mbps	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz/ 5 GHz	5 GHz	2.4/5 GHz
Bandbredd av en kanal	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz/ 40 MHz	20/40/80/160 MHz	20/40/80/160 MHz
Modulationsteknik	FHSS och DSSS	DSSS, CCK	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
MIMO	—	—	—	—	4 x 4	MU- MIMO(DL)	MU- MIMO(DL/UL)
Spektral effektivitet	0.1 bps/Hz	0.55 bps/Hz	2.7 bps/Hz	2.7 bps/Hz	15 bps/Hz	42.5 bps/Hz	62.5 bps/Hz
Utrymme mellan underbärare	—	—	312.5 kHz	312.5 kHz	312.5 kHz	312.5 kHz	78.125 kHz

I denna kapitel kommer jag ge kommentarer och sammanfatta mina tankar kring hur wifiteknikens utveckling har gått hittills och hur den kommer att gå i framtiden. Utvecklingen av wifistandarder hittills kan betraktas i tabellen ovan.

Wifitekniken har en lång historia som sträcker sig över 20 års tidsperiod. Under den tidsperioden har den utvecklats ständigt. Datahastigheten har växt 5000 gånger sedan den originella standarden. En mängd nya tekniker integrerades i wifitekniken med tiden för att anpassa tekniken till de nya krav som

digitaliseringen ställer. Wifitekniken har med tiden fått en viktig roll i dagens digitala värld. Under 20 år av ständig utveckling har fokus primärt legat på att förbättra datahastighet. Standarden 802.11ax är den första standarden att fokusera sig på att optimisera användningen av radiospektrum. Några av tekniker som används för att genomföra det är MU-MIMO, BSS färger och OFDMA.

Idag har wifi-routers som stödjer 802.11ax-standarderna inte ännu blivit populära på marknaden. Anledningar till detta är bland annat 802.11ax-routers höga kostnad och ett litet antal enheter som stödjer standarderna. Enligt Ciscos årsrapport för åren 2018–2023 kommer 66.8% enheter stödja 802.11ac. Andelen enheter som stödjer 802.11ax-standarderna kommer enligt årsrapporten vara 27.4%. Jag tycker att 802.11ax-standarderna kommer att dominera marknaden i framtiden eftersom användare kommer att kräva högre prestanda än den som erbjuds av 802.11ac-standarderna i takt med den växande enhetsdensiteten.

Jag är av den åsikt att wifiteknikens roll i framtidens digitala samhälle kommer att vara extremt viktig. IoT (Internet of Things) kommer att växa och utvidgas. I morgondagens samhälle kommer smarta hem vara en ny normalitet och sådana säkerhetskritiska faciliteter som sjukhus, militära faciliteter och fabriker kommer alla bli ”smarta”, det vill säga de kommer att förses med en internetuppkoppling för att effektivisera deras verksamhet. Detta betyder att säkerheten kommer att ha en mycket stor betydelse. Samtidigt kommer det ställas nya krav på prestandan. Kortfattat kan det sägas att i framtida standarder kommer säkerhet ha en mycket stor roll och sådana tekniker som MU-MIMO kommer att utvecklas vidare på grund av det växande antalet enheter som kommer finnas i morgondagens smarta samhälle. En sak jag är säker om är att maskininlärningsalgoritmer kommer att ha en enormt stor roll i framtidens wifiteknik eftersom de kan optimisera olika variabler som till exempel backoff-window för en enskild åtkomstpunkt och dess omgivning.

## Referenser

- AFAQUI, M. S., GARCIA-VILLEGAS, E., & LOPEZ-AGUILERA, E. 2017. IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency WiFi. *IEEE Wireless Communications*, **24**(3), 130–137.
- BEJARANO, O., KNIGHTLY, E. W., & PARK, M. 2013. IEEE 802.11ac: from channelization to multi-user MIMO. *IEEE Communications Magazine*, **51**(10), 84–90.
- BELLALTA, B. 2016. IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANS. *IEEE Wireless Communications*, **23**(1), 38–46.
- CROW, B. P., WIDJAJA, I., KIM, J. G., & SAKAI, P. T. 1997. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Magazine*, **35**(9), 116–126.
- DENG, D., CHEN, K., & CHENG, R. 2014. IEEE 802.11ax: Next generation wireless local area networks. *Pages 77–82 of: 10th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness*.
- DENG, D., LIN, Y., YANG, X., ZHU, J., LI, Y., LUO, J., & CHEN, K. 2017. IEEE 802.11ax: Highly Efficient WLANS for Intelligent Information Infrastructure. *IEEE Communications Magazine*, **55**(12), 52–59.
- GAST, MATTHEW. 2005. *802.11 wireless networks: the definitive guide*. ” O’Reilly Media, Inc.”.
- HIERTZ, G. R., DENTENEER, D., STIBOR, L., ZANG, Y., COSTA, X. P., & WALKE, B. 2010. The IEEE 802.11 universe. *IEEE Communications Magazine*, **48**(1), 62–70.
- KHOROV, EVGENY, KIRYANOV, ANTON, LYAKHOV, ANDREY, & BIANCHI, GIUSEPPE. 2018. A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANS. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **21**(1), 197–216.
- KLEINROCK, L. 2008. History of the Internet and its flexible future. *IEEE Wireless Communications*, **15**(1), 8–18.
- LAMAIRE, R. O., KRISHNA, A., BHAGWAT, P., & PANIAN, J. 1996. Wireless LANs and mobile networking: standards and future directions. *IEEE Communications Magazine*, **34**(8), 86–94.
- LICKLIDER, J. C. R. 1960. Man-Computer Symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, **HFE-1**(1), 4–11.
- MUHAMMAD, S., ZHAO, J., & REFAI, H. H. 2021. An Empirical Analysis of IEEE 802.11 ax. *Pages 1–6 of: 2020 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*.
- OUGHTON, EDWARD J, LEHR, WILLIAM, KATSAROS, KONSTANTINOS, SELINIS, IOANNIS, BUBLEY, DEAN, & KUSUMA, JULIUS. 2021. Revisiting wireless internet connectivity: 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy*, **45**(5), 102127.
- VASSIS, D., KORMENTZAS, G., ROUSKAS, A., & MAGLOGIANNIS, I. 2005. The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANS. *IEEE Network*, **19**(3), 21–26.
- VERMA, L., FAKHARZADEH, M., & CHOI, S. 2013. Wifi on steroids: 802.11AC and 802.11AD. *IEEE Wireless Communications*, **20**(6), 30–35.