

# Synlig ljuskommunikation och moduleringstekniker

Kandidatavhandling i datateknik

Daniel Saxén

Handledare: Jerker Björkqvist

Fakulteten för naturvetenskap på teknik

Åbo Akademi

Våren 2017

## Abstrakt

Det faktum att Wi-Fi är den enda brett använda teknologin för uppkopplingen av mobila apparater till internet har både sina för- och nackdelar. Diverse regleringar har orsakat att en stor del av nättrafiken ligger kring frekvensbandet 2,4 GHz. Detta frekvensband blir lätt stockat på grund av interferens. Största orsaken bakom denna interferens är den stora mängden närliggande accesspunkter. Hotspots stör varandras signaler eftersom radiovågorna från accesspunkterna når relativt långt (över 20 meter) och de har en bra genomträngningsförmåga.

I den här kandidatavhandlingen diskuteras en relativt ny teknologi för att åtgärda de problem som Wi-Fi har kämpat med. Visible light communication (synlig ljuskommunikation) är ett sätt av överföra data på kort avstånd med hjälp av sändande lysdioder och mottagande fotodioder. Det är lätt att avgränsa ett nätverk baserat på lysdioder; om man inte ser ljuset så kan man inte komma åt nätverket. Interferensen mellan ljusvågor och apparatur som använder sig av radiovågor är obefintlig, vilket gör synlig ljuskommunikation till en god kandidat för dataöverföring vid platser där radiovågor anses störa livsviktig elektrisk apparatur.

Speciellt mycket omsorg läggs på att undersöka lämplig modulering av ljuset för att uppnå höga dataöverföringshastigheter. Samtidigt måste man redan i planeringsskedet beakta interferens som beror på dagsljus och samtidigt ska man bibehålla möjligheten att styra lampornas ljusstyrka.

**Nyckelord:** synlig ljuskommunikation, dioder, modulering, MIMO

# Innehållsförteckning

1. Inledning.....	1
2. Bakgrund för VLC och modulering.....	2
2.1 Historia .....	2
2.2 Lysdioder .....	3
2.3 Fotodioder .....	4
2.4 Modulering .....	5
2.4.1 Standardiserade moduleringstekniker .....	5
2.4.2 Icke-standardiserade moduleringstekniker .....	8
3. Jämförelse av moduleringsteknikerna .....	12
4. Resultat.....	15
5. Slutsatser .....	16
Källförteckning.....	17
Figurer .....	18

## 1. Inledning

Användningen av snabba mobila nätverk har ökat kraftigt [3] under de senaste åren vilket har lett till en delvis stockning av radiofrekvensspektret. Människor vill se 4K-videon på sina trådlösa apparater utan störningar. Trådlösa förbindelser utsätts lätt för störningar under hård belastning och Ethernet är inte en möjlighet för mobila apparater. Trådlösa radiosignaler lider även av störning på grund av andra radiosignaler. Även elektromagnetisk interferens försvagar Wi-Fi-signaler. Wi-Fi-modem är inte energisnåla och Wi-Fi utsätts lätt för missbruk av utomstående.

Under 2000-talet har man börjat undersöka diverse nya teknologier och lösningar för att åtgärda de problemen som Wi-Fi har stött på. En av dessa lovande nya teknologier är VLC, vilket är den allmänt använda förkortningen för synlig ljuskommunikation. VLC går ut på överföringen av bitar genom att växla lysdioders intensitet [1] med en hög frekvens. Växlingen av ljusets intensitet kan sedan registreras med fotodetektorer som omvandlar intensitetsförändringarna till motsvarande förändringar i strömstyrkan och tillbaka till data i bit-form.

Lysdioden är en god kandidat för dataöverföring i och med att den tillämpats i många hus på grund av dess energieffektivitet, EU-regleringar och låga pris. Synliga ljusvågor lider inte av elektromagnetisk interferens och de är speciellt bra ur en säkerhetssynvinkel, eftersom det går lätt att avgränsa ett nätverk baserat på synligt ljus. Med andra ord är det möjligt att se ifall information läcker ut. Ljus stör inte andra elektriska apparater (t.ex. i flygplan eller på sjukhus). Dessutom har LED-teknologin gått mycket framåt under de senaste åren, vilket har möjliggjort en väldigt snabb växling mellan på och av-läget. MIMO-tekniker som går ut på att implementera en räcka av sändande lysdioder och mottagande fotodioder [5] har undersökts ivrigt.

Däremot har implementeringen av VLC också stött på många problem. Hur ska modulerings teknikerna planeras så att människoögat inte registrerar att lampan blinkar? Vad ska man ta i beaktande för att minimera störning orsakad av annat ljus? I denna avhandling undersöks olika möjliga modulerings tekniker som ger svar på dessa frågor.

## 2. Bakgrund för VLC och modulering

### 2.1 Historia

Redan i antikens Grekland och i Romarriket användes olika polerade metallplattor och sköldar [9] för att reflektera solljuset. Tanken bakom reflektionen var möjligheten att kunna signalera till exempel i strider. Den här typens kommunikation väldigt elementär, inga mer avancerade meddelanden kunde skickas utan någon vettig mottagarmekanism.

Egentligen härstammar den synliga ljuskommunikationsteknologin från 1880-talet. Alexander Graham Bell, mest känd för den omstridda titeln som telefonens uppfinnare, demonstrerade ett experiment den 3 juni 1880. Han lyckades överföra en röst trådlöst med hjälp av sin nya uppfinning, fotofonen [8]. Detta var faktiskt världens första trådlösa kommunikationsmedel, ett telegrafsystem som använde radiovågor demonstrerades först 1894 av Guglielmo Marconi.

Bell ansåg att fotofonen var hans bästa uppfinning, inte telefonen. Fotofonen består av en spegel gjord av flexibelt material. Prataren riktar sin röst mot spegeln, vilket orsakar att spegeln alternerande sprider och koncentrerar ljusstrålarna. På mottagarsidan finns en likadan spegel med en seleniummätare för ljusstyrkan. Seleniummätaren kan modulera strömmen i en elkrets beroende på ljusstyrkan och på det sättet kan man få ut information på mottagarsidan.

Själva konceptet av synlig ljuskommunikation med hjälp av lysdioder har sitt ursprung [9] i Japan. År 2003 lyckades Keiouniversitetets forskare i professor Nakagawas laboratorium för första gången överföra data med synligt ljus från lysdioder. År 2003 grundades också ett konsortium (VLCC) för synlig ljuskommunikation i Japan. Edinburghs universitet med professor Harald Haas i spetsen har även varit ett slags pionjär för synliga ljuskommunikationens utveckling under 2000-talet.

## 2.2 Lysdioder

För att förstå synlig ljuskommunikation måste ett par grundprinciper för dioder förklaras. En lysdiod består av halvledare med en positiv och negativ del (anod och katod). Vid gränsen mellan anoden och katoden finns en komponent kallad PN-övergång. Där möts laddningsbärare och fotonenergi frigörs, dvs. det uppstår det som människor uppfattar som ljus. Lysdioden kräver som följd av den existerande PN-övergången en rätt riktad likström, eftersom strömmen blir spärrad i ena riktningen och ledd i andra. Om likströmmen är fel riktad kan lysdioden förstöras, med andra ord måste moduleringen planeras på ett sätt som tar polariseringen i beaktande.

Den mest använda lysdioden är den vita, som fås genom att additivt blanda rött, grönt och blått eller alternativt genom att lägga ett fosforskikt på en blå lysdiod. Vita lysdioden är enligt flera undersökningar energieffektiv och hållbar [4] och påminner mest om dagsljus. När man har ett fosforskikt på den blåa lysdioden begränsas bandbredden till tiotals MHz. Vita lysdioden med fosforskikt är den billigare [5] varianten men den begränsade bandbredden [13] måste åtgärdas med en lämplig modulering – annars lider dataöverföringshastigheten.

En viktig egenskap som lysdioder har är möjligheten att justera intensiteten av ljuset. Detta måste tas i beaktande när man i följande skede planerar möjliga moduleringstekniker. Man måste kunna överföra information även om ljuset är till exempel 90% svagare till sin intensitet. Det är inte alltid man behöver stark belysning, under dagtid vill man ändå behålla möjligheten för datakommunikation.

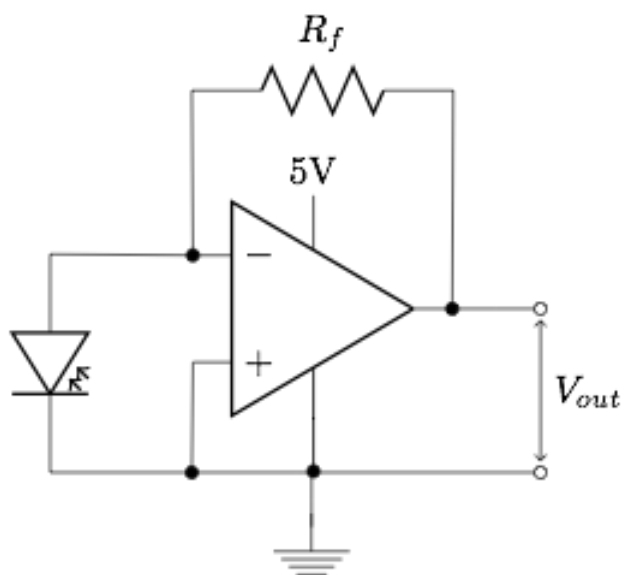
I vissa artiklar [7] föreslås användningen av elnätskommunikation (PLC) med lysdioder. På det sättet skulle man snabbt kunna integrera synlig ljuskommunikation med lampor i taket, istället för att tillämpa mera komplexa och tidskrävande system. Belysningen är planerad så att det ska nå varje hörn av ett rum. När lysdioderna är placerade på rätt sätt minskar även risken för störningar i synliga ljuskommunikationens dataöverföring. PLC har även svagheter; i vissa fall är data inte alls krypterat och elnätskommunikation lider av störningar orsakade av övrig elektrisk apparatur.

## 2.3 Fotodioder

Fotodioden är en halvledardiod helt som lysdioden. Fotodioder har liksom lysdioder en PN-övergång. När lysdiodens ljusstrålar träffar fotodiodens PN-övergång frigörs en elektron mot katoden och elektronhål mot anoden. Således flödar en ström i fotodioden som är proportionell mot ljusstyrkan.

En möjlig implementering av en fotodiodkrets är presenterad i Figur 1 nedan: Det är vettigare att avläsa strömmen ur fotodioden, eftersom den beter sig mera linjärt än spänningen. Därför måste man konvertera strömmen till en mätbar spänning med en transimpedansförstärkare, vilken syns i figuren direkt under motståndet. Spänningen  $V_{out}$  kan vid behov förstärkas genom att justera motståndet  $R_f$ .

För att filtrera ljus som inte överför data kan man tillämpa högpasfilter, som oftast är ett elektroniskt filter. Högpasfilter låter höga frekvenser flöda igenom och förhindrar låga frekvenser, det vill säga att komma in i mottagaren. Ett filter kan till exempel konstrueras med ett motstånd och en spole eller med ett motstånd och en kondensator.



Figur 1. En krets där fotodiodens utgående ström omvandlas till en mätbar spänning  $V_{out}$

Ett problem som fotodioder har när det handlar om att kommunicera med synligt ljus utomhus är att direkt solljus försämrar överföringshastigheten, fotodioden blir bombarderad av ljus utan data. Därför är en stor del av nuvarande undersökningar [4] fokuserade på synlig ljuskommunikation inomhus.

## 2.4 Modulering

Inom datakommunikation måste man skicka signalen så att den kan tolkas rätt. Med modulering avses sättet man förändrar på en bärvåg för att överföra digital information på ett förståeligt sätt. I synlig ljuskommunikation uppstår bärvågen från lysdiodernas ljus. Bärvågen i sig förmedlar ingen information utan den måste påverkas med en inputsignal ur någon sorts mikrokontroller.

Många av de moduleringstekniker som presenteras till följande grundar sig på IM/DD, som översätts till intensitetsmodulering med direkt detektering. Med IM/DD avser man att det är lysdioden som moduleras med hjälp av att variera intensiteten av ljuset och den modulerade signalen avläses direkt av fotodioden. IEEE 802.15.7-standarden från 2012 presenterar 3 stycken standardiserade moduleringstekniker för synlig ljuskommunikation. I denna del av avhandlingen går först igenom dessa tre tekniker och sedan mera komplicerade tekniker som dock inte är standardiserade.

### 2.4.1 Standardiserade moduleringstekniker

Den enklaste moduleringstekniken som finns i IEEE 802.15.7-standarden för synlig ljuskommunikation heter On-Off-Keying (OOK). Enligt OOK [1] överförs informationen med en ljuskälla på följande sätt: När inkommande databiten är 1, lyser lysdioden med full styrka och när inkommande databiten är 0 är lysdiodens styrka så mycket lägre att det går att urskilja skillnaden. I många fall [1] används någon sorts RLL-kodning för att undvika att klockor går ur synk och för att minska antalet fel som orsakas av obalanserat antal digitala 1:or och 0:or. Klockan kan byggas



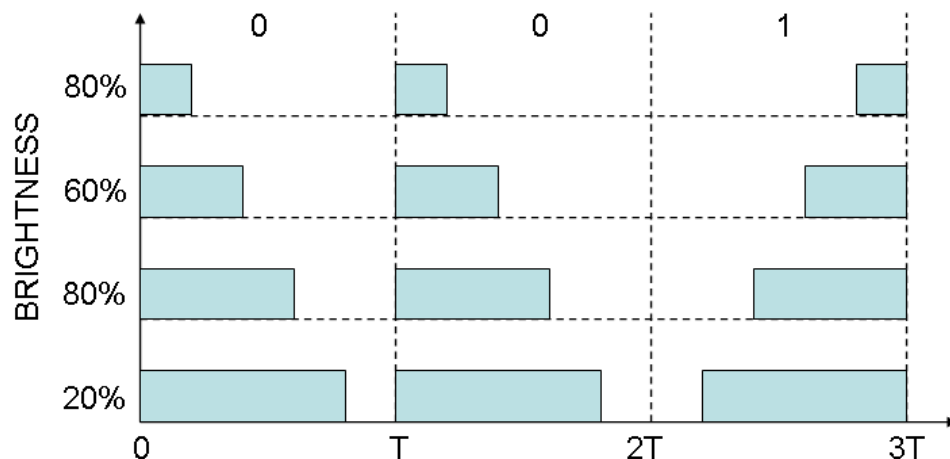
in i dataströmmen genom att beskriva databiten 0 som 01 och databiten 1 som 10, detta kallas för Manchester-linjekodning.

OOK kan även användas med dimrar, men det har lett till försämrade dataöverföringshastigheter [1]. En moduleringssteknik som åtgärdar detta problem presenteras också i IEEE 802.15.7-standarden. Tekniken kallas för variabel pulspositionsmodulering (VPPM). Det är en relativt ny moduleringssteknik [1] som stöder både dataöverföring och styrning av ljusets intensitet. Den baserar sig på pulspositionsmodulering (PPM). I PPM är det mellanrummet mellan pulserna som representerar digitala nollor och ettor. Alla pulser har identisk bredd och amplitud.

VPPM går ut på att ändra på pulskvoten kontinuerligt för att ta i beaktande ljusets intensitet. Olika sorters linjekodningar kan tillämpas för VPPM. Till exempel 4B6B tar 4 databitar på slumpen och omvandlar det till 6 databitar som ser till att inte mera än 3 nollor kan komma efter varandra, vilket håller strömmen balanserad. På detta sätt minskar man antalet fel i bitsekvensen.

Figur 2 nedan visar grundkonceptet för VPPM. De blåa rektanglarna är pulskvoterna och  $T$  är tidsintervallet för klockan i mottagaren. Under tidsintervallet kan man uttrycka en bit med en puls av valfri längd. I figur 2 börjar positiva pulsen för biten 0 i början av tidsintervallet och ju kortare pulsen är desto ljusare lyser lampan. För biten 1 slutar positiva pulsen i slutet av tidsintervallet och ju tidigare den börjar desto mörkare lyser lampan.

Varje intervall för signalen kan delas in  $T/x$  stycken lika stora luckor, och endast en av dessa luckor måste ha en puls. Det är viktigt att välja  $x$  tillräckligt lågt så att pulsen hinner detekteras av mottagaren. Problemet med att ha pulskvotens startpunkt beroende på både sändarens och mottagarens klocka går igenom i avsnitt 3.



Figur 2. VPPM

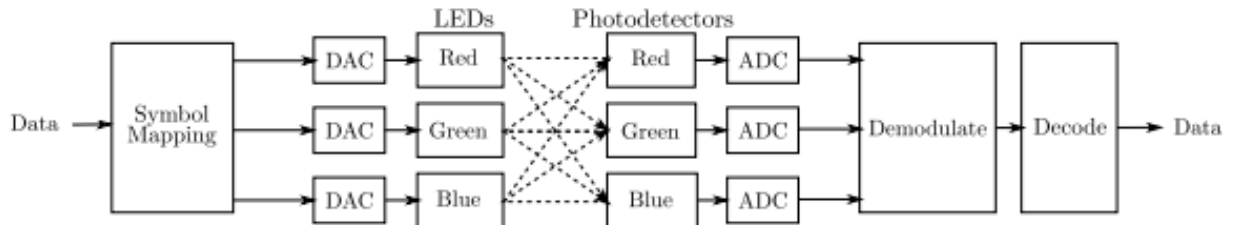
Den sista modulerings-tekniken som IEEE 802.15.7 presenterar [1] för synlig ljuskommunikation är CSK, det vill säga color shift keying. I grunden är CSK annorlunda än de två andra standardiserade teknikerna, eftersom CSK använder sig av röda, blåa och gröna lysdioder. Motiveringen bakom användningen av RGB är att vitt ljus som fås med blått ljus och ett fosforskikt är långsammare.

De inkommande digitala bitarna 0 och 1 kan uttryckas i CSK med olika färgs ljus. Till exempel 4-CSK ordnar datat i bit-par. Bit-paren är 00, 01, 10 och 11 så det behövs ljus av 4 olika färger för att förmedla informationen. I standarden är ljusspektret indelat i 7 olika färgband och dessa färgband har definierade x-y-koordinater. IEEE 802.15.7 har standarder för 4-CSK, 8-CSK och 16-CSK.

Till skillnad från VPPM går det mycket lättare att styra ljusets intensitet med CSK. Det går att styra intensiteten av ljuset genom att endast ändra på strömmen genom lysdioderna. Inget mera (berörande modulering) måste tas i beaktande när man vill ändra på ljusets intensitet eftersom man inte tillämpar någon komplex modulering på själva ljusvågorna utan i det skedet när man väljer vilken färgs ljus man ska skicka.

Figur 5 är tagen ur en artikel [30] från Journal of Lightwave Technology. I figuren illustreras ett blockdiagram av color shift keying. I diagrammet mappas data och går efter analog-till-digital-konverteringen till motsvarande färgs lysdiod.

Fotodioder tar emot informationen, data omvandlas tillbaka till digital form och demoduleras och till sist igenom en dekodare.



Figur 3. Ett blockdiagram av CSK. Källa: Journal of Lightwave Technology

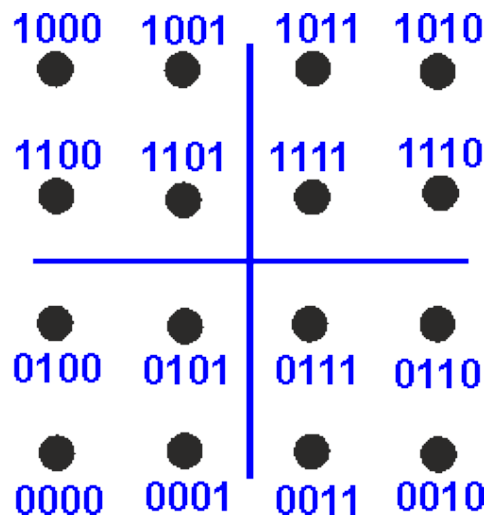
## 2.4.2 Icke-standardiserade moduleringsmetoder

Följande moduleringsmetoder är inte standardiserade för synlig ljuskommunikation. En mängd artiklar presenterar dessa nya moduleringsmetoder. En stor del av dem har sin grund i gamla moduleringsmetoder inom telekommunikation. Ändå måste moduleringsmetoderna ofta modifieras eftersom radiovågor beter sig annorlunda än ljusvågor på grund av radiovågornas avsevärt mycket lägre frekvens.

Kvadraturamplitudmodulering, förkortad i vetenskapliga texter till QAM, är en moduleringsmetod som har visat sig användbar [5] även för system med synlig ljuskommunikation. QAM finns både i analog och digital form men i synlig ljuskommunikation ska digitala formen användas. Ordet kvadratur [6] kommer från fasförskjutningen mellan två olika bärvågor som är 90 grader, det vill säga en sinus- och en cosinusvåg. De två bärvågorna moduleras samtidigt både till sin fas och amplitud vilket leder till fördubblad dataöverföringshastighet per bärvåg.

I grund och botten fördelar QAM data i olika mängd bitar. Till exempel i 16-QAM fördelas två bitar till sinusvågen och två bitar till cosinusvågen. Fyra stycken bitar ger givetvis  $2^4 = 16$  olika kombinationer. En bit både i sinus- och cosinusvågen bestämmer faser, likaså bestämmer en bit i båda vågorna amplituden. Figur 4

presenterar ett konstellationsdiagram med olika tillstånd för en 16-QAM signal. Med hjälp av diagrammet kan man lätt visualisera tillstånden.



Figur 4. 16-QAM konstellationsdiagram

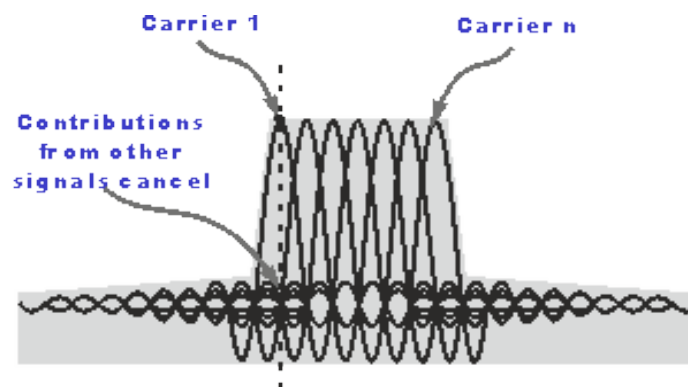
QAM kan användas i synlig ljuskommunikation även i kombination med andra modulerings tekniker. I en artikel [5] demonstreras ett realtidssystem med synlig ljuskommunikation som använder sig av två lysdioder (MIMO) och bland annat 256-QAM för modulering. I artikeln jämfördes metoderna *spatial diversity* och *spatial multiplexing* och det konstaterades i experiment att med *spatial diversity*, med vilken man skickar samma data över båda lysdioderna, uppnår man mera stabila resultat. Det vill säga ifall man prioriterar felfrihet i dataöverföringen är *spatial diversity* ett bättre alternativ. Prioriterar man felfrihet lider överföringshastigheten och *spatial multiplexing* är avsevärt mycket snabbare på att överföra data än *spatial diversity*.

I Figur 12 i artikeln kan man avläsa att för bland annat 16-QAM är den effektiva bandbredden dubbelt större med *spatial multiplexing*. När man vill mäta hur noggrant data överförs har man i artikel [5] mätt EVM, felvektormagnituden. Den mäter hur långt ifrån ett idealt tillstånd (exempelvis 1111 i 16-QAM) ett tillstånd på riktigt är. Med *spatial diversity* förekommer en tydligt lägre felvektormagnitud än med *spatial multiplexing*. Skillnaden mellan de två metodernas magnitud ökar när man ökar på antalet tillstånd i konstellationsdiagrammet.

CAP (Carrier-less amplitude and phase modulation) är en moduleringssteknik som är en variant av QAM i och med att man med CAP genererar en QAM-signal. CAP modulerar inte bärvågen, därifrån härstammar namnet carrier-less. Istället används filter [28] för att åtskilja dataströmmarna. Orsaken varför CAP undersöks i synlig ljuskommunikation är att man kan använda sig av analoga filter för att skapa cap-signalen. Det faktum att analoga filter konsumerar avsevärt lite elenergi är perfekt med tanke på lysdiodernas hållbarhet. Dessutom är CAP ett relativt enkel moduleringssteknik som inte kräver komplexa överföringsfunktioner och därför går det snabbt att implementera ett system baserat på CAP. Bland annat artikel [2] presenterar en modell av CAP för synlig ljuskommunikation.

Ortogonal frekvensdelningsmultiplex, även förkortad till OFDM, är en brett använd metod [12] som tillämpats speciellt mycket inom telekommunikation. Tillämpningsområden för OFDM i dag är bland annat WLAN, ADSL, LTE samt digital television och radio. Även artiklar [14] berörande OFDM för synlig ljuskommunikation har publicerats och det har visat sig vara möjligt att tillämpa OFDM med lysdioder.

OFDM grundar sig på konceptet av multipla [12] bandkanaler. När man vill skicka data, indelas signalen i flera bandkanaler som sedan måste var och en enskilt tolkas i mottagaren. Ingen interferens sker eftersom kanalernas vågor är ortogonala (vinkelräta) mot varandra och således överlappar bandkanalerna inte varandra i sidled, se Figur 3. Ortogonaliteten tar bort behovet att ha så kallade vaktband mellan varje bandkanal, vilka minskar dataöverföringshastigheten. Därför är OFDM effektivare än sin föregångare FDM som inte tillämpar ortogonalitet.



Figur 5. OFDM bandkanaler

Att få data indelat snyggt i ortogonala bandkanaler är en relativt komplicerad metod som förklaras härnäst. Först kodas data i frekvensdomänen med någon modulering, QAM till exempel. Efter det man gör en invers snabb Fourier-transform (IFFT) för att konvertera data till tidsdomänen. Sedan konverteras signalen från digital till analog. Nu är utgående OFDM-signalen färdig. När signalen kommer in i mottagaren, konverteras den först till digital, sedan med Fourier-transform återhämtas frekvensdomänen och data demoduleras enligt motsvarande moduleringsmetod.

OFDM för synlig ljuskommunikation behandlas bland annat i artikel [13]. OFDM har varit svårt att tillämpa för synlig ljuskommunikation på grund av stora skillnader mellan ljuskommunikation och radiokommunikation. I den samma artikeln presenteras de grundläggande skillnaderna mellan ett typiskt OFDM-system med radiovågor och ett typiskt optiskt system. Största skillnaderna berör bärvågorna; till exempel i WLAN överförs data på elektriskt fält medan i synlig ljuskommunikation är det oftast genom optisk intensitet. I optiska system kan inte signalen bli negativ som följd av användningen av ljusvågor som bärvågor, medan radiovågornas signal kan vara både positiv och negativ.

I samma artikel [13] presenteras olika tekniker för OFDM med synlig ljuskommunikation. Gemensamt för dem är att signalen måste representeras positiv på grund av ljusvågornas unipolaritet. Olika lösningar föreslås, bland annat DC-bias och assymetriskt avklippande av OFDM:s negativa signaler.

Diskussion går även av möjlig MIMO-OFDM-implementering, det vill säga OFDM med multipla lysdioder och fotodioder. I artikel [13] diskuteras möjligheten att antingen öka på dataöverföringshastigheten eller felsäkerheten, påminnande om strukturer i artikel [5] med QAM. Speciellt tolkas MIMO-OFDM som en vettig framtida lösning när man vill öka på ljuskommunikationens synfält.

### 3. Jämförelse av modulerings teknikerna

I detta avsnitt analyseras de tidigare presenterade modulerings teknikerna OOK, VPPM, CSK, QAM, OFDM och CAP på basis av deras enskilda styrkor och svagheter. Det viktigaste och mest intressanta måttet på modulerings tekniken är dataöverföringshastigheten. Den mäts i bps, bit per sekund. Oftast används trots allt kbps och Mbps i vetenskapliga texter eftersom överföringshastigheterna är sällan så låga att det skulle löna sig att uttrycka dem i bps.

Ett annat viktigt mått på en modulerings teknik är BER, bitfelsfrekvensen. Det mäter andelen felaktiga bitar per bitsekvens. Till exempel om sekvensen som sänds är 1 1 0 0 1 0 1 men sekvensen som mottas är 1 0 0 0 1 0 1 räknas bitfelsfrekvensen som  $BER = \frac{1}{7} = 0.14$ . BER ger värdefull information av sändaren, mottagaren och mediet mellan dem. Med hjälp av BER kan man få något mätbart som ger en helhetsblick av systemets prestanda.

Den först presenterade tekniken OOK har naturligtvis den fördelen att den är en standardiserad teknik för synlig ljuskommunikation. OOK är därtill väldigt lättförståelig för människor som inte är så insatta i ämnet och det är lätt att bygga ett system med OOK. I artikeln [1] visas att den standardiserade versionen av OOK kan uppnå en hastighet på 96 Mbps, men utan felrättande kod. OOK lider också av interferens orsakat av andra ljus som inte skickar data.

VPPM, som grundar sig på PPM, har många styrkor som modulerings teknik för synlig ljuskommunikation. I optiska system behöver man inte i samma bemärkelse beakta flervägsfel som i radiovågssystem. PPM-tekniker har i radiokommunikation lidit av flervägsfel, men i synlig ljuskommunikation är avstånden ofta små eftersom de mest användbara och således undersökta området för ljuskommunikationen är inomhus. VPPM har även en rätt lättförståelig standardiserad teknik för dimrar.

Det finns ett fundamentalt problem i själva tekniken för VPPM. Mottagaren måste ha en klocka som är synkroniserad perfekt med sändaren, annars

blir det svårt för mottagaren att tolka när under tidsintervallet sändaren ville att pulsen skulle vara positiv. Det är omöjligt med PPM att skicka information av klockan. VPPM kan inte heller lätt komma åt sändarens klocka eftersom ljusstyrkan varierar. Vissa tekniker [14] för att åtgärda problemet har emellertid presenterats.

CSK är den sista modulerings-tekniken i IEEE 802.15.7 - standarden. Den visar sig vara den snabbaste av de tre metoderna i artikel [1] på lägre frekvenser. Orsaken bakom detta är att man med hjälp av CSK kan skicka flera bitar per klocka. Till exempel kan man med 16-CSK skicka 4 bitar per klocka med hjälp av 16 olika färgkombinationer. Färgkoordinatsystemet garanterar att man får ut exakt den färg ur lysdioderna som man vill ha.

Det går enkelt att dimra lysdioderna med CSK; det räcker med att ändra på strömmen genom lysdioden. Eftersom ljusets färg avgör informationen hålls amplituden konstant och därför hålls den totala effekten som konsumeras av lysdioderna så gott som konstant. Från ett hälsoperspektiv är även CSK väldigt nyttig eftersom människoögat är väldigt känslig för intensitetsförändringar och CSK är en modulerings-teknik där intensiteten inte ändras. Däremot är själva strukturen av CSK mera avancerad och kräver komplexa sändare och mottagare. För tillfället är RGB-lysdioder inte de vanligaste på marknaden, eftersom de är dyrare än de blå lysdioderna med fosforskikt [5].

CSK använder ganska långt samma idé som QAM eftersom man kan jämföra de olika färgtillstånden med de olika tillstånden som existerar i ett motsvarande QAM-konstellationsdiagram. QAM har den fördelen till CSK att färgen inte ändras när data varierar, vilket gör den mera attraktiv ifall man vill ha enbart vit belysning i ett rum. I en undersökning [5] uppnåddes med ett system baserat på 2 stycken lysdioder med 256-QAM en dataöverföringshastighet på 160 Mbps och  $2 \times 10^{-5}$  BER, vilket är 64 Mbps snabbare än de snabbaste teknikerna som presenteras i IEEE 802.15.7 - standarden.

Med användningen av QAM förekommer även problem man måste åtgärda. Ett exempel är när man ökar på antalet tillstånd i konstellationsdiagrammet



för att uppnå högre hastigheter. Eftersom tillstånden ökar, är de närmare varandra. Detta ökar risken för brus och höjer bitfelsfrekvensen.

OFDM är känd som en väldigt effektiv metod i och med att den delar data i multipla bandkanaler och garanterar genom att ha bandkanalerna ortogonala mot varandra att interferens mellan strömmarna är minimal. OFDM är också en brett använd metod inom radiokommunikationen och det har visat sig vara fungerande för trådlösa applikationer. Med OFDM har man uppnått höga hastigheter inom radiokommunikationen och med vettig planering kan OFDM möjligen göras till en bra teknik även inom synlig ljuskommunikation.

OFDM har emellertid sina problem. En teknik som fungerar bra för radiokommunikation behöver inte fungera på samma sätt för ljuskommunikation. Fundamentala skillnader, såsom radiokommunikationernas bipolaritet och ljuskommunikationens unipolaritet (0 eller positiv) samt det faktum att radiovågor överförs med elektriska fält och ljusvågor oftast med variering av den optiska intensiteten, orsakar att systemet i ljuskommunikation måste bland annat planeras så att alla negativa komponenter av OFDM-signalen filtreras bort. Enligt artikel [13] har dessa fundamentala skillnader bromsat tydligt upp ivrigheten för att använda OFDM i synlig ljuskommunikation.

OFDM har även grundläggande problem inom radiokommunikationen vilka kan anses vara möjliga problem för synlig ljuskommunikation med OFDM. Största enskilda problemet som hittills har undersökts är att OFDM har hög PAPR, peak-to-average power ratio. PAPR berättar hur höga momentana toppar det finns i effektkonsumtionen. OFDM orsakar dessa toppar när multipla bandkanaler är i fas med varandra. Hög PAPR kräver att komponenterna måste ha tillräckligt dynamisk räckvidd; till exempel om medeleffekten som överförs är 0.3 Watt men PAPR är 15, måste systemet kunna hantera  $0,3 \text{ W} \times 15 = 4,5 \text{ W}$ . Detta leder till avsevärt mycket högre effektkonsumtion, vilket inte är önskvärt i mobila applikationer. Dessutom kan hög PAPR i synlig ljuskommunikation leda till olinjära störningar [15].

CAP har visat sig vara till och med en snabbare teknik för ljuskommunikation än OFDM enligt [35] och har en lägre PAPR på grund av att CAP

använder sig av två filter i sändaren och mottagaren. I artikel [15] uppnåddes en dataöverföringshastighet på 94 Mbps med 32-QAM och BER på  $3,8 \times 10^{-3}$ . Enligt samma artikel var peak-to-average power ratio för CAP i vissa fall rentav 10 gånger mindre än för OFDM. En jämförelse gjord mellan OFDM:s och CAP:s dataöverföringshastigheter [16] med en RGB-lysdiod gav rentav snabbare dataöverföringshastigheter för CAP.

## 4. Resultat

Jämförelsen av diverse modulerings tekniker inom synlig ljuskommunikation visar att alla modulerings tekniker har sina egna fördelar. De tre första teknikerna har den fördelen att de är standardiserade, vilket gör dem lätta att förstå och diskuteras av olika parter. Speciellt OOK och VPPM är enkelt implementerbara modulerings tekniker med relativt höga dataöverföringshastigheter. CSK har som koncept en fördel eftersom med CSK moduleras inte intensiteten av ljuset utan olika färgkombinationer motsvarar olika bitsekvenser. CSK visar sig vara den snabbaste standardiserade modulerings tekniken för synlig ljuskommunikation.

De standardiserade modulerings teknikerna är emellertid planerade för höga dataöverföringshastigheter inomhus och låga överföringshastigheter [1] utomhus. Ifall man ville skapa synlig ljuskommunikation utomhus är inte de standardiserade teknikerna de bästa alternativen. Kvadraturamplitudmodulering, även förkortad QAM, har visat sig användbar på långa distanser, till exempel kabel-TV använder QAM-teknik. Dessutom har undersökningar visat att QAM uppnår högre hastigheter i synlig ljuskommunikation än CSK [5].

I undersökningar [13] har det kommit fram att OFDM har en stor potential att vara en ledande teknik för väldigt snabb ( $> 1$  Gbps) dataöverföring, men det krävs fortfarande mycket arbete för att man uppnå en teknik för OFDM inom synlig ljuskommunikation som skulle kunna bli standardiserad. En jämförelse [16] gav resultat som visade att CAP kan vara en mycket bra alternativ lösning för synlig ljuskommunikation.

## 5. Slutsatser

I den här kandidatavhandlingen undersöktes synlig ljuskommunikation, möjliga tillämpningsområden och tekniker som är nödvändiga för att kunna tillämpa ett dataöverföringssystem med lysdioder. Grundläggande koncept gällande lys- och fotodioder förklarades och även en del av synliga ljuskommunikationens historia gick igenom.

Speciellt mycket fokus sattes i den här avhandlingen på att presentera modulerings teknikerna. Ur jämförelse av modulerings teknikerna kom det fram att alla tekniker har sina styrkor: Vissa tekniker som OOK och VPPM är lättförståeliga och enkla att implementera medan andra såsom QAM och CSK kräver mera planering, men är även de alternativen som ger högre dataöverföringshastigheter. Det kom även fram att vissa tekniker såsom OFDM har fungerat bra inom radiokommunikation såsom LTE och WLAN, men det är fråga om ett helt annat tankesätt i synlig ljuskommunikation för överföringen av data. De fundamentala skillnaderna som existerar mellan radio- och ljusvågor orsakar problem i planeringen av optisk OFDM.

Det blir intressant att observera ifall synlig ljuskommunikation kommer att bli en allmänt använd dataöverföringsteknik på 2020-talet. Otaliga fördelar med synlig ljuskommunikation är bland annat följande: höjd säkerhet, så gott som obegränsat och helt oreglerat frekvensband, omstridda hälsorisker associerade med radiovågor, möjlig implementering av synlig ljuskommunikation i strikt reglerade miljöer såsom i flygplan och på sjukhus, möjlighet till väldigt noggrann lokalisering av kundernas rutter i affärer samt möjliga implementeringar i olika ljus i trafiken.

## Källförteckning

1. Modulation schemes and dimming support  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6163585/>
2. A new concept of multi-band carrier-less amplitude and phase modulation for bandlimited visible light communication  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7573916/>
3. Infographic: Global 4G-LTE forecasts: 2012-2020  
<https://www.gsmainelligence.com/research/2017/02/infographic-global-4g-lte-forecasts-2012%E2%80%932020/605/>
4. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/1277847/>
5. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7486354/>
6. <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/what-is-qam-tutorial.php> avhämtad 20.3.2017
7. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6011734>
8. <http://visiblelightcomm.com/the-photophone-%E2%80%93-worlds-first-wireless-communications/>
9. [http://www.purevlc.com/pureVLC\\_RadioTech\\_v1.0.pdf](http://www.purevlc.com/pureVLC_RadioTech_v1.0.pdf)
10. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6626568>
11. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6780585/>
12. [https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn\\_11fall/ofdm\\_new.pdf](https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn_11fall/ofdm_new.pdf)
13. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4785281>
14. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6261654>
15. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7342257>
16. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6549123/>

## Figurer

Figur 1: <https://outsidescience.files.wordpress.com/2012/09/untitled9.png>

Figur 2: <http://visiblelightcomm.com/wp-content/uploads/2011/04/VPPM.png>

Figur 3: sida 2054 med url

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6780585>

Figur 4: <http://www.radio-electronics.com/images/modulation-constellation-16gam-bit-mapping.gif>

Figur 5: <http://www.radio-electronics.com/images/ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing-01.gif>