



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

Realizace LTE přenosů bezdrátovou a vláknovou optikou

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Bezdrátové komunikace

Vedoucí práce: Prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Konzultant specialista: Ing. Jan Bohata

Bc. Petr Pešek

Praha 2015

Zadání:

Anotace:

Tato diplomová práce má za cíl analyzovat přenos LTE technologie (Long Term Evolution) pomocí optických systémů. V experimentálním zapojení a v simulačním softwaru jsme změřili základní parametry přenosu LTE (zejména EVM parametry) pro optickou síť a zvolený testovací model. Simulace byly realizovány v prostředí programu Optisystem.

Klíčová slova:

Bezdrátový optický spoj, Technologie přenosu rádiových signálů, LTE technologie

Annotation:

The main aim of the diploma's thesis is to analyze transmission of LTE technology (Long Term Evolution) over optical systems. In the experimental connection and in the simulation software basic parameters of LTE were measured for optical network and for chosen test model. Simulation has been performed by Optisystem software.

Index Terms:

Free Space Optics, Radio over Fiber, Long Term Evolution

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 11. 5. 2015

.....

podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Prof. Ing. Stanislavu Zvánovcovi Ph.D. za užitečné rady při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi specialistovi Ing. Janu Bohatovi za cenné rady a ochotu, kterou mi věnoval během vypracování diplomové práce.

V Praze dne

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod	6
2. Technologie přenosu rádiových signálů	8
2.1. Typy přenosů:	10
3. LTE technologie	12
3.1 Síťová architektura LTE	12
3.2 Princip LTE	13
3.2.1 Rámcová struktura	13
3.2.2 Přístupové metody	14
3.3 Měřicí a testovací techniky pro LTE technologii	17
4. Měření přenosu LTE technologie přes optické systémy	21
4.1 Přenos LTE technologie - Schéma zapojení	21
4.1.1 RF vysílací část	22
4.1.2 RF přijímací část	23
4.1.3 Optická část	24
4.2 Vliv změny odstupu signálu k hladině šumu RF oblasti	31
4.2.1 Vliv změny odstupu signálu k hladině šumu pro SMF 5km	31
4.2.2 Vliv změny odstupu signálu k hladině šumu pro SMF 5km + FSO	34
4.3 Vliv změny odstupu signálu k hladině šumu v optické části	35
4.3.1 Vliv změny OSNR pro SMF 5km	36
4.3.2 Vliv změny OSNR pro SMF 5km + FSO	38
4.4 Vliv atmosférických turbulencí na EVM	38
4.4.1 Vliv turbulencí v zapojení s FSO	39
4.4.2 Vliv turbulencí v zapojení pro SMF 5km + FSO	40
4.4.3 Výsledky vlivu turbulencí na přenos LTE signálu	40
5. Simulace přenosu LTE technologie přes optické systémy	42
5.1 Simulace přenosu LTE technologie - Schéma zapojení	42
5.1.1 RF vysílací část	42
5.1.2 RF přijímací část	44
5.1.3 Optická část	45

5.2 Simulace vlivu změny odstupu signálu k hladině šumu	45
5.3 Simulace vlivu změny OSNR	47
6. Porovnání měření a simulací	48
6.1 Porovnání výsledků SNR na EVM.....	48
6.2 Porovnání simulovaných a naměřených výsledků OSNR na EVM	49
7. Závěr:	51
Seznam použité literatury:	52
Seznam příloh:	54

Seznam obrázků

Obr. 1 - Frekvenční spektrum České republiky	6
Obr. 2 - Schéma technologie přenosu rádiových signálů [4].....	8
Obr. 3 - Schéma bezdrátového vysílače digitálního přenosu technologie přenosu rádiových signálů [4]	9
Obr. 4 - Typy technologie přenosu rádiových signálů: (a) Rádiové frekvence, (b) Mezi frekvence, (c) Přenos v základním pásmu, (d) Digitální přenos rádiových signálů [6].....	10
Obr. 5 - Síťový model technologie LTE [10].....	13
Obr. 6 - Rámcová struktura FDD technologie [11]	14
Obr. 7 - Modulace OFDM a OFDMA	15
Obr. 8 - Zdrojová mřížka technologie LTE [11]	16
Obr. 9 - Porovnání modulací OFDMA a SC-FDMA [11].....	17
Obr. 10 - Konstelační diagram s parametrem EVM.....	18
Obr. 11 - Zobrazení EVM pro testovací model E-UTRA 3.2	19
Obr. 12 - Schéma experimentu LTE přenosu.....	22
Obr. 13 - Ukázka a) Konstelačního diagramu, b) Frekvenčního spektra měřeného signálovým analyzátorem FSV	23
Obr. 14 - Mach-Zehnderův interferometr	24
Obr. 15 - Polarizační splitter/combiner	25
Obr. 16 - Optická část experimentu	26
Obr. 17 - Páteřní buňková síť s využitím bezdrátových optických spojů.....	27
Obr. 18 - Scintilace laserového paprsku [19].....	28
Obr. 19 - Bezdrátový optický laboratorní spoj	29
Obr. 20 - Optické vlákno s GRIN čočkou	30
Obr. 21 - Optický bezdrátový spoj.....	30
Obr. 22 - Schéma zapojení vlivu SNR na EVM	32
Obr. 23 - Změřené EVM 4,1 % pro C/N 40dB	33
Obr. 24 - Změřené EVM 16,6% pro C/N 20dB	33
Obr. 25 - Změřené EVM 1,9 % pro C/N 30dB	35
Obr. 26 - Změřené EVM 10,5 % pro C/N 10dB	35
Obr. 27 - Schéma zapojení vlivu OSNR na EVM.....	36
Obr. 28 - Změřené EVM na OSNR a) 16-QAM, b) EVM 3,9 % pro OSNR 27,5 dB	37
Obr. 29 - Schéma zapojení pro zkoumání vlivu atmosférických turbulencí	39
Obr. 30 - Vliv atmosférických turbulencí.....	41
Obr. 31 - LTE generátor	42
Obr. 32 - Konstelační diagram - LTE generátoru	43
Obr. 33 - Spektrum LTE generátoru.....	43
Obr. 34 - Spektrum 16-QAM generátoru	44
Obr. 35 - LTE analyzátor	44
Obr. 36 - Optická přenosová část	45

Obr. 37 - Konstelační diagram LTE analyzátoru pro E-UTRA 3.2 a frekvenci 2,6 GHz a) pro C/N 40dB a b) pro C/N 10dB.....	46
Obr. 38 - Simulované konstelační diagramy pro OSNR 23,2 dB a) LTE signál, b) 16-QAM modulace..	47
Obr. 39 - Vliv SNR na EVM v zapojení se SMF pro 0,8 GHz	49
Obr. 40 - Vliv SNR na EVM v zapojení SMF + FSO pro 0,8 GHz.....	49
Obr. 41 - Vliv OSNR na EVM v zapojení SMF pro 2,6 GHz	50
Obr. 42 - Vliv OSNR na EVM v zapojení SMF + FSO pro 2,6 GHz	50

Seznam tabulek

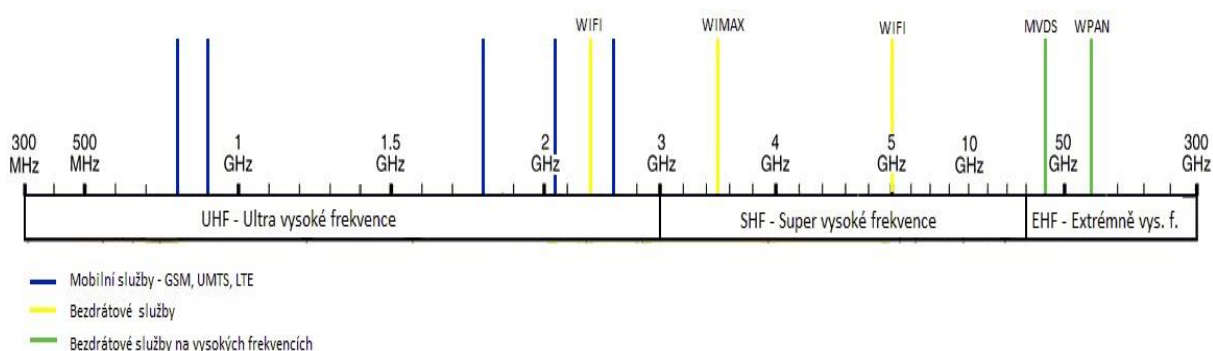
Tab. 1 - Typy režimů TDD technologie [11]	14
Tab. 2 - Počet přenášených zdrojových bloků [11]	16
Tab. 3 - Výkonová bilance.....	31
Tab. 4 - Závislost měřeného EVM na SNR pro SMF	32
Tab. 5 - Závislost měřeného EVM na SNR pro SMF + FSO	34
Tab. 6 - Závislost měřeného EVM na OSNR pro SMF	37
Tab. 7 - Závislost měřeného EVM na OSNR pro SMF + FSO	38
Tab. 8 - Nastavení teplotních fénů	39
Tab. 9 - Závislost měřeného EVM na atmosférických turbulencích pro FSO	40
Tab. 10 - Závislost měřeného EVM na atmosférických turbulencích pro kombinace SMF + FSO.....	40
Tab. 11 - Závislost simulovaných hodnot EVM na SNR pro zapojení SMF+FSO	46
Tab. 12 - Závislost simulovaných hodnot EVM na OSNR v zapojení SMF+FSO	47

Seznam zkratek

3GPP	3rd. Generation Partnership Project (Partnerský projekt třetí generace)
CP	Cyclic Prefix (Cyklický prefix)
CW laser	Continous Wave Laser (Laser s kontinuální vlnou)
DwPTS	Downlink Pilot Timeslot (Znak pro sestupný časový slot)
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier (Erbiem dotovaný vláknový zesilovač)
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (Vylepšený univerzální pozemní rádiový přístup)
eNB	E-UTRAN NodeB (E-UTRA síťový bod)
EPC	Evolved Packed Core Network (Rozvinuté paketové sítě)
FDD	Frequency Division Duplex (Frekvenční dělený duplex)
FSO	Free Space Optics (Bezdrátový optický spoj)
GP	Guard Period (Ochranný interval)
GSM	Global System For Mobile (Globální systém pro mobilní komunikace)
HSPA	High Speed Packet Access (Vysokorychlostní paketový přístup)
LTE	Long Term Evolution (Síť dlouhodobé evoluce)
MVDS	Microwave Video Distribution System (Mikrovlnný distribuční systém)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Ortogonalní frekvenční multiplex)
OLT	Optical Line Terminal (Optický linkový terminál)
ONU	Optical Network Unit (Optická síťová jednotka)
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence Generator (Generátor pseudonáhodné bitové posloupnosti)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (Kvadrurní amplitudová modulace)
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (Kvadrurní klíčování fázovým posunem)
RoF	Radio over Fiber (Přenos rádiových signálů po optických vláknech)
SMF	Single Mode Fiber (Jednovidové optické vlákno)
SNR	Signal To Noise Ratio (Odstup signálu k hladině šumu)
TDD	Time Division Duplex (Časové dělený duplex)
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System (Univerzální mobilní telekomunikační systém)
UpPTS	Uplink Pilot Timeslot (Znak pro vzestupný časový slot)
VLC	Visible Light Communication (Komunikace ve viditelné oblasti)
WPAN	Wireless Personal Area Network (Personální bezdrátová síť)

1. Úvod

V dnešní době, se zvětšujícím se počtem mobilních uživatelů a s jejich požadavky na rozšíření a zrychlení datových služeb, se stále častěji setkáváme s rostoucí potřebou rozšířit stávající šířku přenosových pásem či efektivnějším využitím kmitočtového spektra. Jednu z možností představuje technologie Radio over Fiber (přenos rádiových signálů na optické nosné vlně prostřednictvím optického vlákna) nebo Radio over FSO (přenos rádiových signálů pomocí bezdrátového optického spoje). K možnosti rozšíření těchto technologií vedl především vynález polovodičového laseru a vylepšení vlastností optických vláken v 60. letech 20 století [1]. Optická vlákna nabízejí velký potenciál z důvodu možnosti použití velké šířky pásma o dostatečné přenosové kapacitě média. Nejvhodnější aplikací je proto využití technologie přenosu rádiových signálů, jako páteřní mobilní sítě, bezdrátové sítě poskytující uživatelům velkou šířku přenášeného pásma nebo jako vnitřní anténní přenosový systém [2]. Pro realizaci současných bezdrátových přenosů se nejčastěji používají technologie pracující s frekvencemi nižšími než je 6 GHz, ať už se jedná o technologie GSM (Global System For Mobile), UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), LTE (Long Term Evolution), WIFI (Wireless Fidelity) nebo WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Frekvenční spektrum spravované Českým telekomunikačním úřadem je zobrazeno na obrázku 1. S rozšiřujícím se počtem nových uživatelů chytrých telefonů, přenosných počítačů a tabletů bylo potřeba se zaměřit na rozšíření přenosových kapacit a zrychlení mobilních a bezdrátových služeb [3]. Tento požadavek se v současné době s klesajícími cenami a se stále se zlepšujícími parametry optických vláken, kdy metalické vedení už je na okraji svých přenosových možností, dá zacetit pomocí technologie přenosu rádiových signálů přes optická vlákna nebo bezdrátové optické spoje.

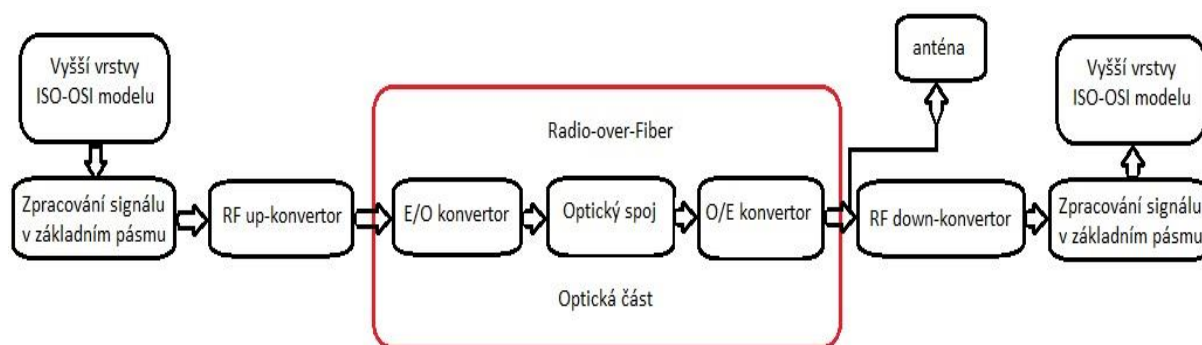


Obr. 1 - Frekvenční spektrum České republiky

Tato práce se zabývá přenosem LTE mobilních dat prostřednictvím optických vláknových a bezdrátových spojů mezi páteří sítí mobilního operátora a jeho základnovými stanicemi. Nejprve v této práci bude vysvětlen princip přenosu samotných rádiových signálů, v další kapitole bude podrobně popsán princip technologie LTE a její měřicí a testovací techniky a dále budou vysvětleny principy optických komponent používaných pro převod RF signálu do optické oblasti. Hlavní část práce se zabývá testováním vlivu atmosférických turbulencí na přenos LTE signálu prostřednictvím bezdrátového optického spoje. Další měření se pak zabývají vyšetřováním statistik přenosu rádiových signálů v závislosti na odstupu signálu k hladině šumu, jak pro optickou, tak i pro rádiovou část spoje. V kapitole 5 budou představeny simulace přenosu LTE signálu pro kombinace bezdrátového optického spoje a optického vlákna. Závěrečná kapitola přináší souhrnné porovnání naměřených výsledků s výsledky simulovanými v programu Optisystem.

2. Technologie přenosu rádiových signálů

Rozdíl technologie přenosu rádiových signálů od běžného přenosu po optickém vlákně je v přenášeném frekvenčním pásmu, kde u klasického přenosu se využívá takzvaného základního pásma, tak u technologie přenosu rádiových signálů se přenáší rádiový signál namodulovaný na subnosnou vlnu. Blokové schéma technologie přenosu rádiových signálů je zobrazeno na obrázku 2.

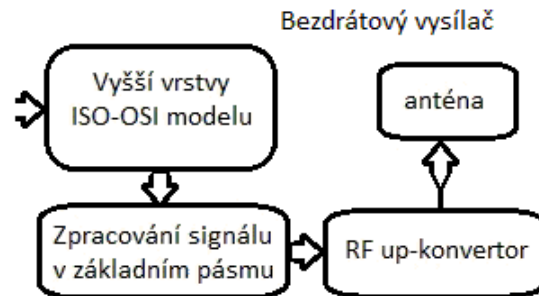


Obr. 2 - Schéma technologie přenosu rádiových signálů [4]

Technologie pracuje na vyšších vrstvách ISO-OSI modelu, kde jsou například datové rámce ze síťové vrstvy předány fyzické vrstvě a zpracovány v základním pásmu, poté se pracuje s různými typy kódování a modulacemi, ať už se jedná o typy QAM (Quadrature Amplitude Modulation), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) modulací nebo o modulaci OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5]. Následující blok zajišťuje převedení signálu ze základního pásma do IF (intermodulační frekvence) nebo do RF (rádiového pásma frekvencí) pásma (podrobněji vysvětleno v kapitole 2.1). Další částí technologie je optická část, kdy ve funkčním bloku elektro-optickém konvertoru dále jen E/O je elektrický signál nejčastěji převeden pomocí polovodičového laseru na optický signál. Pro modulaci signálu se využívá dvou základních typů optických modulátorů a to buď přímé modulace, kdy je signál přímo modulován samotným laserem (za pomoci zapínání a vypínání laseru) nebo nepřímou modulací, kdy se za laser připojí některý z typů optických modulátorů (nejčastěji Mach-Zehnderův, který pracuje na elektro-optickém jevu), více o optických modulátorech v kapitole 4.1.3. V O/E konvertoru je optický signál pomocí PIN fotodetektoru převeden zpět na elektrický signál. Poté je signál opět převeden do základního pásma ke zpracování nebo je přiveden na anténu a vysílán. Ve schématu nejsou pro přehlednost zobrazeny zesilovače a filtry, které reálné zapojení obsahuje.

Druhou možností je využití digitálního přenosu signálu (digital baseband fiber transport). Rozdíl obou technologií je, že optickou částí se přenáší signál v základním pásmu

(nejčastěji některou ze základních typů modulací např. On-off keying), poté je převeden na elektrický signál, ale tento signál nemůže být přímo poslán na anténu, proto je nejprve zpracován v základním pásmu, převeden do vyšších vrstev ISO-OSI modelu ke zpracování a poslán do bezdrátového vysílače viz obrázek 3 [4].



Obr. 3 - Schéma bezdrátového vysílače digitálního přenosu technologie přenosu rádiových signálů [4]

Výhody technologie přenosu rádiových signálů [6]:

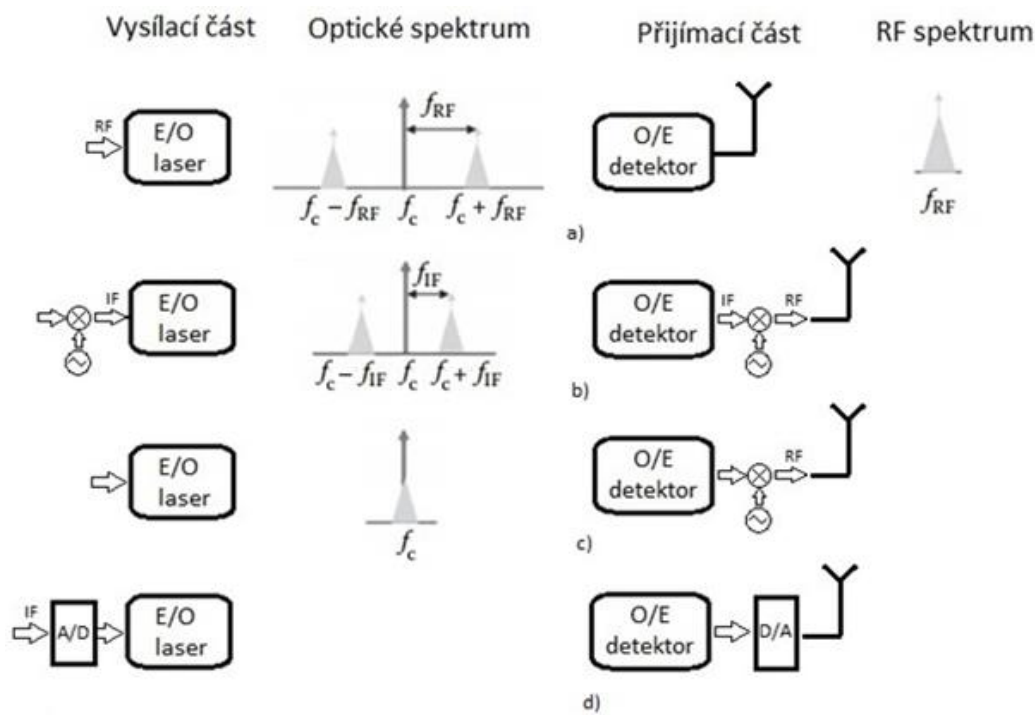
- Menší šířka přenosového pásma – Je dána tím, že modulace jako QAM, QPSK mají lepší spektrální účinnost.
- Centralizace – Pro připojení více antén není potřeba přidávat další bloky pro zpracování signálu v základním pásmu a ve vyšších vrstvách, stačí použít přepínání rádiových signálů.
- Vylepšení systému – Při případném budoucím zvýšení přenosové rychlosti je pro technologii přenosu rádiových signálů potřeba vyměnit jen část nalevo od optické části, kdežto u digitální technologie je potřeba vyměnit i část bezdrátového vysílače.
- Vysílací část – Technologie přenosu rádiových signálů potřebuje méně bloků na vysílací straně než digitální technologie, u které je potřeba využívat bezdrátový vysílač.

Nevýhody technologie přenosu rádiových signálů:

- Degradace signálu – U technologie přenosu rádiových signálů je signál přiveden na anténu po průchodu optickou částí, oproti digitální technologii, kde je signál nejprve obnoven a až poté je poslán na anténu.

2.1. Typy přenosů:

Pro přenos pomocí technologie přenosu rádiových signálů je možno využít některou z následujících možností ilustrovaných na obrázku č.4.



Obr. 4 - Typy technologie přenosu rádiových signálů: (a) Rádiové frekvence, (b) Mezi frekvence, (c) Přenos v základním pásmu, (d) Digitální přenos rádiových signálů [6]

Na obrázku 4a) je zobrazena technologie přenosu rádiových signálů, která využívá přímého přenosu rádiového spektra přes optické vlákno bez následného přetransformování na nižší nebo vyšší frekvence. Tato technologie je nejlepším řešením pro připojení více koncových antén, protože kontrola a dohled nad vysíláním může být zajištěn z centrální jednotky na vysílací straně. Přenos je zajištěn přivedením signálu na vstup E/O konvertoru, který pomocí laseru namoduluje signál na nosnou vlnu a je přes optické vlákno přenesen k O/E konvertoru, který využívá přímou fotodetekci a po zesílení a vyfiltrování signálu je anténou vysíláno RF spektrum, které je zobrazeno na obrázku 4a). Tento princip byl popsán pro sestupný směr (down-link), pro vzestupný směr (up-link) je princip obdobný. Technologie přenosu rádiových signálů se využívá pro frekvence menší než 6 GHz, což je dáno především z důvodu možnosti použití levnějších typů polovodičových laserů (Fabry-Perotův laser nebo DFB (Distributed feedback laser) laseru), které splňují požadovanou linearitu a dynamický rozsah spoje [7].

Druhým možným přístupem je technologie IF (zobrazená na obrázku 4b), kdy je signál přetransformován na nižší frekvence. Tento přístup se využívá převážně pro technologie, které pracují v oblasti mikrovlnných vln (MVDS (Microwave Video Distribution Systém), WPAN (Wireless Personal Area Network)), kdy polovodičový laser i PIN fotodetektor pracují s nižšími frekvencemi a je tedy potlačena chromatická disperze. Nevýhodou technologie IF přenosu rádiových signálů je komplikovanější anténní část, kdy je potřeba přetransformovat IF signál zpět na vyšší frekvence pomocí lokálního oscilátoru a mixéru.

Třetím možným přístupem je přenos v základním pásmu. Tato technologie je znázorněna na obrázku 4c). Výhodou této technologie je možnost využití již postavené páteřní sítě pro přenos dat k anténní části, protože se jedná o přenos v základním pásmu a přenášený signál je namodulován blízko nosné vlny, téměř se zde téměř neprojevuje chromatická disperze. Nevýhodou je složitá anténní část, kdy je potřeba nejprve přetransformovat signál ze základního pásma do IF pásma a poté ještě přetransformovat na RF signál, který je vhodný pro bezdrátový přenos. Z tohoto důvodu, kdy je anténní část velmi složitá a drahá, se tato technologie téměř nevyužívá.

Posledním čtvrtým přístupem je digitální přenos rádiových signálů, která je zobrazena na obrázku 4d). Tato technologie je v podstatě převedená IF technologie do digitální formy. Výhody této technologie spočívají především v přenosu informací v optické části spoje, ať už se jedná o jednodušší modulace, větší odolnost proti přeslechům než analogově modulovaný signál nebo o zlepšení vlastností přenosové trasy (intermodulační zkreslení vzniklé v E/O konvertoru). Proti těmto výhodám převládá jeden zásadní problém a to jsou nároky na A/D a D/A převodníky. I když je tato technologie převedena do IF přístupu a tedy subnosná je blízko nosné vlně, tak se zvětší šířka přenášeného frekvenčního pásma natolik, že by bylo potřeba používat rychlé převodníky (čímž se cena několikrát zvyšuje) [6].

3. LTE technologie

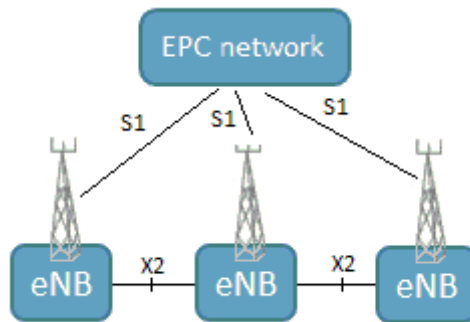
LTE (Long Term Evolution) technologie, někdy též nazývaná E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), byla vytvořena skupinou 3GPP (Generation Partnership Project), která se zabývá vývojem standartů v oblasti mobilních služeb. Její vydání se datuje do března roku 2009, kdy byl vydán tzv. release 8 [8], který popisuje specifika technologie LTE určené pro vysokorychlostní mobilní internet, jakož to nástupce technologie UMTS. Přičemž technologie LTE stále představuje jen síť 3. generace a až její nástupce LTE-Advanced splňuje požadavky sítě 4. generace (musí pracovat kompletně na paketovém přenosu a splňovat přenosové rychlosti pro nepohyblivé objekty 1 Gbit/s a pro pohyblivé mobilní objekty 100 Mbit/s, obě přenosové rychlosti platí pro sestupný směr datového přenosu) [9].

Přínos LTE technologie [10]:

- Paketové přepínání – LTE technologie využívá paketového přepínání okruhů, na kterém pracují služby jako Voice over IP.
- Datové rychlosti – Oproti dříve používaným technologiím jako je HSPA (High Speed Packet Access), UMTS je přenosová rychlost 3-4 krát rychlejší, což je způsobeno především lépe využitým frekvenčním spektrem (dáno použitou modulací 64-QAM, 16-QAM nebo QPSK).
- Šířka přenášeného pásma – Technologie byla původně vytvořena pro šířku pásma 20 MHz. Nicméně toto pásmo nebylo vhodné k aplikaci a tak byly přidány postupně pásma 15 MHz, 10 MHz, 5 MHz, 3 MHz a 1,4 MHz.
- Broadcast vysílání – Později v release 9 byla doplněna služba broadcast vysílání, která pracuje na principu point-to-multipoint vysílání.
- Dva režimy přenosu – Časové dělení TDD (Time division duplex) a frekvenční dělení FDD (Frequency division duplex).

3.1 Síťová architektura LTE

Systém síťové architektury LTE technologie byl navržen k optimalizaci paketového přenosu dat, k snížení odezvy systému, k přenosu dat v řádech Mbit/s a samozřejmě pro kompatibilitu s mobilními sítěmi 2. a 3. generace. Tento síťový model se nazývá EPC (Evolved packed core network) a je zobrazen na obrázku 5.



Obr. 5 - Síťový model technologie LTE [10]

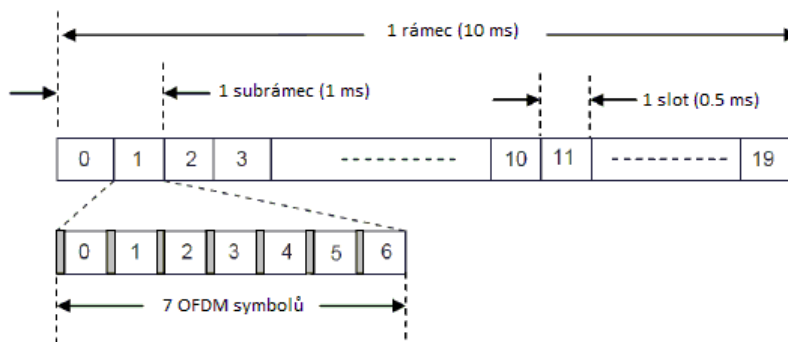
Oproti technologii UMTS je síťová architektura jednodušší, protože u LTE není žádný centrální kontrolér a jednotlivé eNB (základnové stanice) mohou komunikovat navzájem mezi sebou přes logické rozhraní X2 a nebo přes fyzické rozhraní S1. Veškeré kontroléry a logické jednotky musí být uloženy v základnových stanicích, což vede ke zrychlení mezistaniční komunikace a tím se zlepšuje odezva připojení handoveru, které je pro zákazníka jednou z priorit mobilní komunikace [10].

3.2 Princip LTE

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, LTE technologie využívá dvou typů přenosu v časové a frekvenční doméně. Oba typy se neliší jen ve využití různých domén, ale i v odlišných rámcových strukturách, přenosových rychlostech a typech přenosových konfigurací.

3.2.1 Rámcová struktura

V režimu FDD je časová osa reprezentována rámcovou strukturou, která má délku 10 ms, přičemž tento úsek se nazývá 1 rádiový rámeček. Tento rádiový rámeček je rozdělen na 10 menších částí, které se nazývají subrámečky, kdy doba jednoho subrámečku je 1 ms. Jeden subrámeček je ještě rozdělen na dvě části označené jako sloty s dobou trvání 0,5 ms. Celá rámcová struktura pro FDD technologii je zobrazena na obrázku 6.



Obr. 6 - Rámcová struktura FDD technologie [11]

Z obrázku je patrné, že jeden časový slot obsahuje 7 OFDM symbolů (při normálním cyklickém prefixu) více v kapitole 3.2.2.

Pro režim TDD se jedná o velice podobnou rámcovou strukturu, jediný rozdíl je v tzv. speciálním subrámcu, který trvá 1 ms a skládá se ze 3 částí DwPTS (Downlink pilot timeslot) v tabulce označen písmenem D, GP (Guard period) v tabulce označen písmenem S a UpPTS (uplink pilot timeslot) v tabulce označen písmenem U, které rozhodují o přepínání směru přenášených dat, jestli se bude jednat o sestupný nebo vzestupný režim datového přenosu. Pro režim TDD je možné vybrat jednu ze 7 konfigurací rámcové struktury, které jsou zobrazeny v tabulce 1.

typ konf.	interval speciál. symbolu	číslo subrámce									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

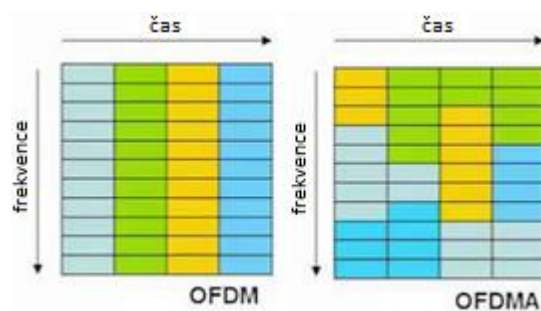
Tab. 1 - Typy režimů TDD technologie [11]

3.2.2 Přístupové metody

Pro začátek je důležité představit si technologii LTE ve frekvenční doméně. K tomu je zapotřebí se zabývat použitým typem přístupové metody (OFDMA pro sestupný směr nebo SC-FDMA pro vzestupný směr datového přenosu).

OFDMA

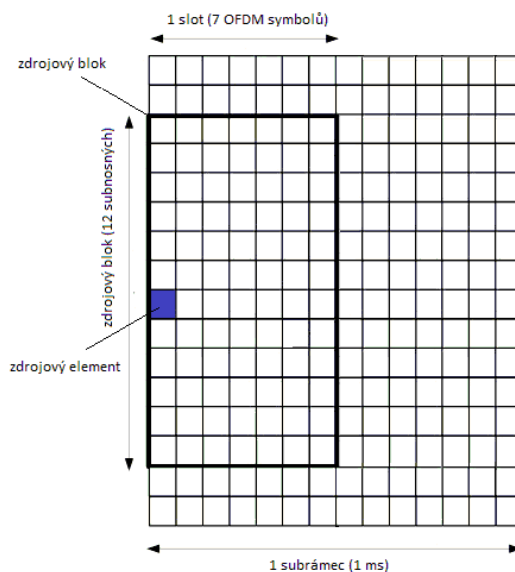
Metoda OFDMA je tzv. přístupová metoda, která dokáže lépe využívat frekvenční pásmo, protože vysílaná data může přenášet pro více uživatelů současně (u OFDMA se dá plánovat přenos v obou doménách, jak ve frekvenční tak i v časové). Rozdíl těchto metod je zobrazen na obrázku 7, kde jednotlivé barvy představují koncové uživatele.



Obr. 7 - Modulace OFDM a OFDMA

Pro přístupovou metodu OFDMA v technologii LTE je standardní dostupná vysílací přenosová šířka pásma rozdělena na subnosné frekvence o šířce pásma jedné subnosné 15 kHz. Tyto subnosné mohou být nezávisle modulovány některou z modulací (64-QAM, 16-QAM nebo QPSK). Datový tok je tedy rozdělen do několika menších datových toků, které oproti technologii SC-FDMA využívají delší dobu šíření symbolu. Tento přístup vede k tomu, že přístupová metoda OFDMA je méně náchylná na vícecestné šíření a tím se redukuje mezisymbolová interference [12], to je také dáno tím, že je zde využíván ochranný interval CP (cyclic prefix), který na začátek každého OFDM symbolu překopíruje část konce symbolu. Cyklická předpona tvoří tedy v časové oblasti ochranný interval mezi dvěma sousedními OFDM symboly a udržuje jejich ortogonalitu a synchronizaci. Cyklická předpona se dělí na dva typy. Na normální cyklickou předponu, která zajišťuje, že se v každém slotu bude vysílat 7 OFDM symbolů a na rozšířenou cyklickou předponu, ve které se šíří jen 6 OFDM datových symbolů [11].

Na obrázku 8 je zobrazena zdrojová mřížka technologie LTE používaná pro oba typy přenosů TDD i FDD.



Obr. 8 - Zdrojová mřížka technologie LTE [11]

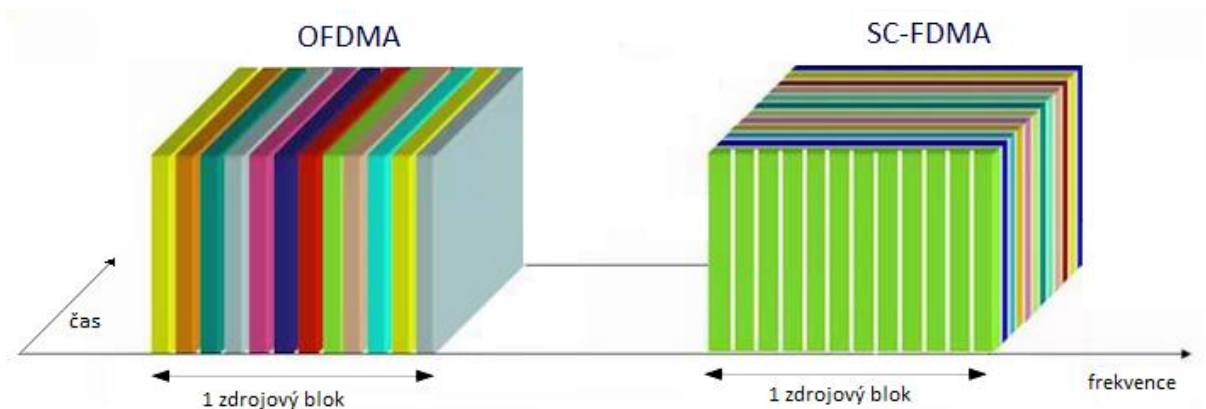
Tato mřížka je zobrazena s normální cyklickou předponou a jedním zdrojovým blokem, který se skládá ze 12 sousedních subnosných vln, protože šířka pásma jedné subnosné vlny je 15 kHz. Celková šířka přenášeného pásma zdrojového bloku je tedy 180 kHz. Zdrojový blok je nejmenší jednotka, kterou může vysílací stanice přenášet. V tabulce č.2 jsou zobrazeny počty zdrojových bloků pro různá frekvenční pásma (počet zdrojových bloků neodpovídá přesně přenášenému pásmu, k přenosu je přidána ještě 10 % rezerva).

Šířka přenášeného pásma [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Počet zdrojových bloků	6	15	25	50	75	100

Tab. 2 - Počet přenášených zdrojových bloků [11]

SC-FDMA

SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) je přístupová metoda podobná technologii OFDMA s jedním rozdílem. Přístupová metoda OFDMA využívá vstupní data k vytvoření signálu pro jednotlivé subnosné, tak technologie SC-FDMA rozprostře tyto vstupní data mezi všechny subnosné. Tento rozdíl je patrný z obrázku 9.



Obr. 9 - Porovnání modulací OFDMA a SC-FDMA [11]

Hlavní důvod, proč se využívá na vzestupném směru datového přenosu princip SC-FDMA spočívá v tom, že je snížena hodnota poměru špičkového a průměrného výkonu PAPR (Peak to Average Power Ratio), která u OFDMA může dosahovat až 10 dB, což vede k neefektivnímu využití výkonových zesilovačů [13]. Proto mobilní zařízení využívají principu SC-FDMA zejména z důvodu úspory baterie.

3.3 Měřicí a testovací techniky pro LTE technologii

Vzhledem k rozšíření technologie LTE o nové přenosové prvky, jako jsou přístupové metody OFDMA, SC-FDMA, rozšíření přenosové šířky pásma až na 20 MHz, nebo z důvodu použití robustních modulací jako 64-QAM, bylo potřeba zavést minimální přenosové parametry a nové testovací metody, které byly standardizovány skupinou 3GPP v technické specifikaci 36.521 [14]. Následující kapitola se zabývá představením testovacích metod a vysvětlením některých z důležitých přenosových parametrů (základnových stanic a mobilních terminálů), které jsou zahrnuty ve vysílací, přijímací nebo testovací části LTE technologie.

Maximální výstupní výkon

Maximální vysílací výkon mobilního terminálu je důležitou charakteristikou k zajištění správné funkce sítě a vyhnutí se vzájemným interferencím. Maximální vysílací výkon je stanoven na 23 dBm, jako kompromis pro dostatečný výkon a zajištění výdrže baterie.

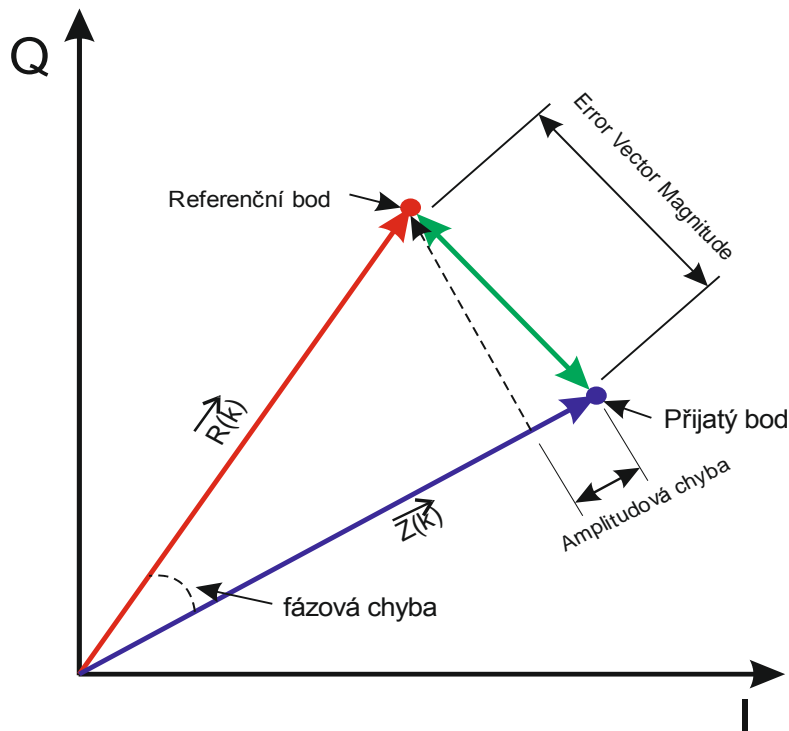
Maximální možný vysílací výkon základnových stanic se testuje při normálním zatížení a při extrémní zátěži, přičemž hodnota maximálního vysílací výkonu musí zůstat v toleranci ± 2 dB od normálního zatížení.

Frekvenční chyba

Frekvenční chyba je parametr nacházející se ve skupině kvality vysílaného signálu. Pro vzestupný směr je frekvence nosné odvozena ze signálu přijatého základnovou stanicí, kde minimální frekvenční chyba je dána na ± 0.1 miliontiny získané nosné frekvence na jednu periodu časového slotu.

EVM – Error vector magnitude

EVM je další parametr přenosu nacházející se ve skupině kvality vysílaného signálu, jeho hodnota udává kvalitu přenášeného modulačního formátu. EVM je určen jako euklidovská vzdálenost mezi referenčním modulačním symbolem a symbolem, který je měřen. Tomuto rozdílu se říká chybový vektor a jeho amplituda je obecně udávána v procentech. Na obrázku 10 je zobrazen konstelační diagram s ukázkou parametru EVM a fázové chyby.



Obr. 10 - Konstelační diagram s parametrem EVM

Výpočet euklidovské vzdálenosti parametru EVM je možné stanovit z rovnice 1.

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M |Z(k) - R(k)|^2}{\sum_{k=1}^M |R(k)|^2}} \quad (1)$$

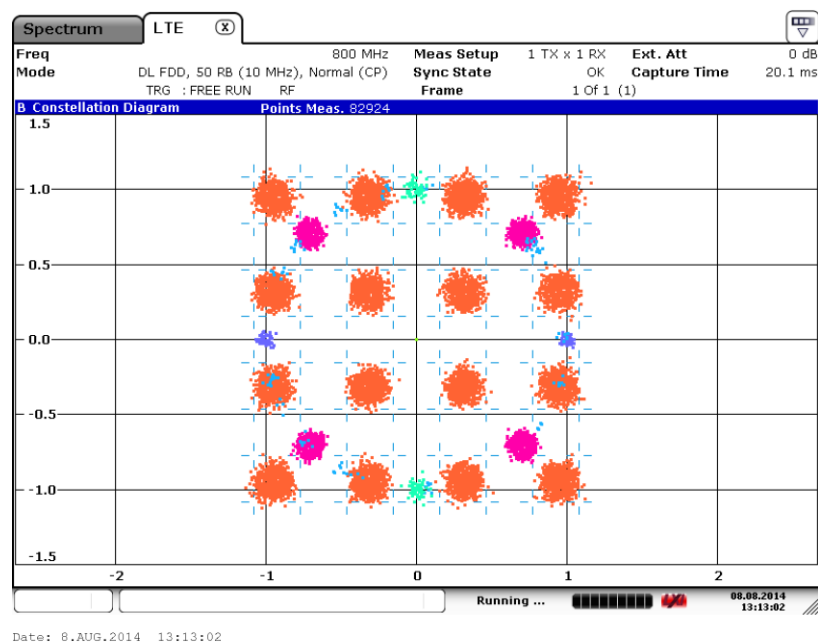
Kde:

$R(k)$ – Ideální referenční signál bez úrovně šumu

$Z(k)$ – Přijatý signál ovlivnění úrovní šumu a frekvenčním offsetem

M – Počet symbolů přijatého signálu

Parametr EVM pro technologii LTE je posuzován z PDSCH (Physical Downlink Shared Channel). Pro různé typy modulací má rozdílné mezní parametry (pro QPSK nesmí překročit hranici 17,5 %, pro 16-QAM 12,5 % a pro 64-QAM 8 %). Pro zobrazení EVM je možné zvolit jeden ze tří způsobů. Za prvé zobrazení hodnoty EVM v závislosti na měření subnosných vln (frekvenční doména) nebo za druhé jako závislost EVM na přenášených subrámcích (časová doména). Obě tyto zobrazení vykreslují maximální, minimální a průměrné hodnoty. Poslední možnost zobrazení je vykreslení EVM v konstelačním diagramu. Na obrázku 11 je zobrazen testovací přenosový model E-UTRA 3.2, kde hodnota EVM je počítána z oranžových bodů (modulace 16-QAM), zbylé body slouží pro synchronizační účely (více v kapitole 4.1.1).



Obr. 11 - Zobrazení EVM pro testovací model E-UTRA 3.2

Využitá šířka pásma

Tato měřicí technika je ve skupině výstupního vyzařovacího spektra. Využitá šířka pásma je určena jako 99 % z celkové střední hodnoty výkonu vysílaného spektra, což odpovídá přibližně 90 % celkového frekvenčního pásma. Tato technika je určena pro všechny používaná frekvenční pásma 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz a 20 MHz.

Minimální úroveň přijatého signálu

Jedná se o minimální hodnota středního výkonu přijatého přijímačem, který zajišťuje propustnost ≥ 95 % maximální propustnosti v referenčním kanálu. Pro LTE signál s šířkou pásma 10 MHz, který je složen z 25 referenčních resource bloků, je možné dosáhnout minimální úrovně přijímaného výkonu až -101.5 dBm.

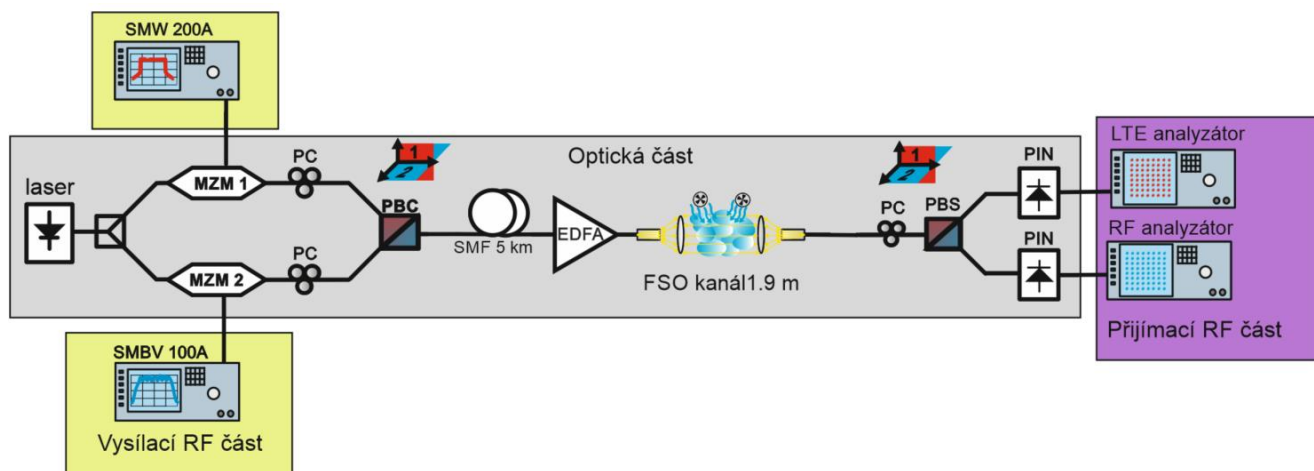
4. Měření přenosu LTE technologie přes optické systémy

Cílem diplomové práce bylo experimentálně i pomocí simulačního software vyšetřit statistiky přenosu LTE signálu pro různá schémata (vliv odstupe úrovně signálu k hladině šumu v RF části, vliv odstupe úrovně signálu k hladině šumu v optické části spoje a vliv turbulentního prostředí na kvalitu přenosu) přes kombinace vláknového a bezdrátového optického spoje. V kapitole 4.1 je zobrazeno celkové schéma zapojení, jsou zde vysvětleny principy některých z optických komponent. Navazující kapitola 4.2 se zabývá vlivem změn vysílaného LTE signálu v RF vysílací části. Kapitola 4.3 zachycuje přenosové parametry změnou odstupe signálu od hladiny šumu v optické přenosové části a kapitola 4.4 se zabývá vlivem atmosférických turbulencí na kvalitu přenosu LTE signálu.

Pro stále se zvyšující nároky na přenosové rychlosti a objemy dat v páteřních částech sítí při využití minimálního počtu optických vláken, jsme se rozhodli otestovat jednu z méně využívaných technik pro zvýšení přenosové rychlosti RF přenosu jedním optickým vláknem, konkrétně se jedná o možnost šíření signálu optickým vláknem ve dvou navzájem ortogonálních polarizačních stavech. Tato technika multiplexace se nejčastěji v dnešní době vyskytuje v páteřních sítích, kdy se využívá modulace typu DP-QPSK pro přenos velkých objemů dat. V tomto experimentu není cílem přenést pomocí ortogonálních polarizačních stavů co nejvíce informací, ale využít separovaných větví pro přenos dvou rozdílných typů signálů. V našem případě na jednu osu polarizace je namodulován LTE signál a na druhou osu polarizace obecný signál (pro co největší ovlivnění byl zvolen stejný typ modulačního formátu 16-QAM nebo 64-QAM o stejné šířce pásma, podle zvoleného E-UTRA modelu).

4.1 Přenos LTE technologie - Schéma zapojení

Pro lepší přehlednost je celkové schéma spoje zapojení rozděleno do 3 oddělených částí (vysílací RF části, přijímací RF části a optické části), které budou postupně vysvětleny v následujících kapitolách, přičemž v této práci bude největší pozornost věnována optické části experimentu. Schéma zapojení experimentu je zobrazeno na obrázku 12.



Obr. 12 - Schéma experimentu LTE přenosu

Optická přenosová část se skládá z vysílacího laseru, děliče výkonu 50/50, dvou Mach-Zehnderových modulátorů, polarizačních kontrolérů (PC), polarizačního slučovače (PBC), 5 km jednojádrového optického vlákna (SMF – 5 km), erbiem dopovaného vláknového zesilovače (EDFA), bezdrátového optického spoje (FSO), polarizačního kontroléru (PC), polarizačního rozdělovače (PBS) a dvou PIN detektorů.

4.1.1 RF vysílací část

Elektrická vysílací část se skládá ze dvou signálových generátorů. Pro přenos na jedné ose polarizace byl použit model signálového generátoru od firmy Rohde & Schwarz typ SMW200A, který podporuje všechny používané mobilní formáty. Pro přenos v druhé ose polarizace bylo využito signálového generátoru od firmy Rohde & Schwarz typ SMIQ 03B, jedná se o starší typ generátoru, který bohužel neposkytuje některý z dnes používaných mobilních přenosových formátů jako UMTS nebo LTE, proto byl pro měření použit podobný typ modulace se stejnou šířkou přenášeného pásma, jako ve druhém generátoru.

V tomto experimentu byly měřeny 4 typy nastavení 10 MHz LTE signálu, dále dvě frekvenční pásma 0,8 GHz a 2,6 GHz, které jsou využívány českými mobilními operátory pro přenos LTE signálu, a 2 různé typy testovacích přenosových schémat vytvořených skupinou 3GPP. Jedná se o modely E-UTRA, které jsou všeobecně využívány k testování mobilních přenosových sítí.

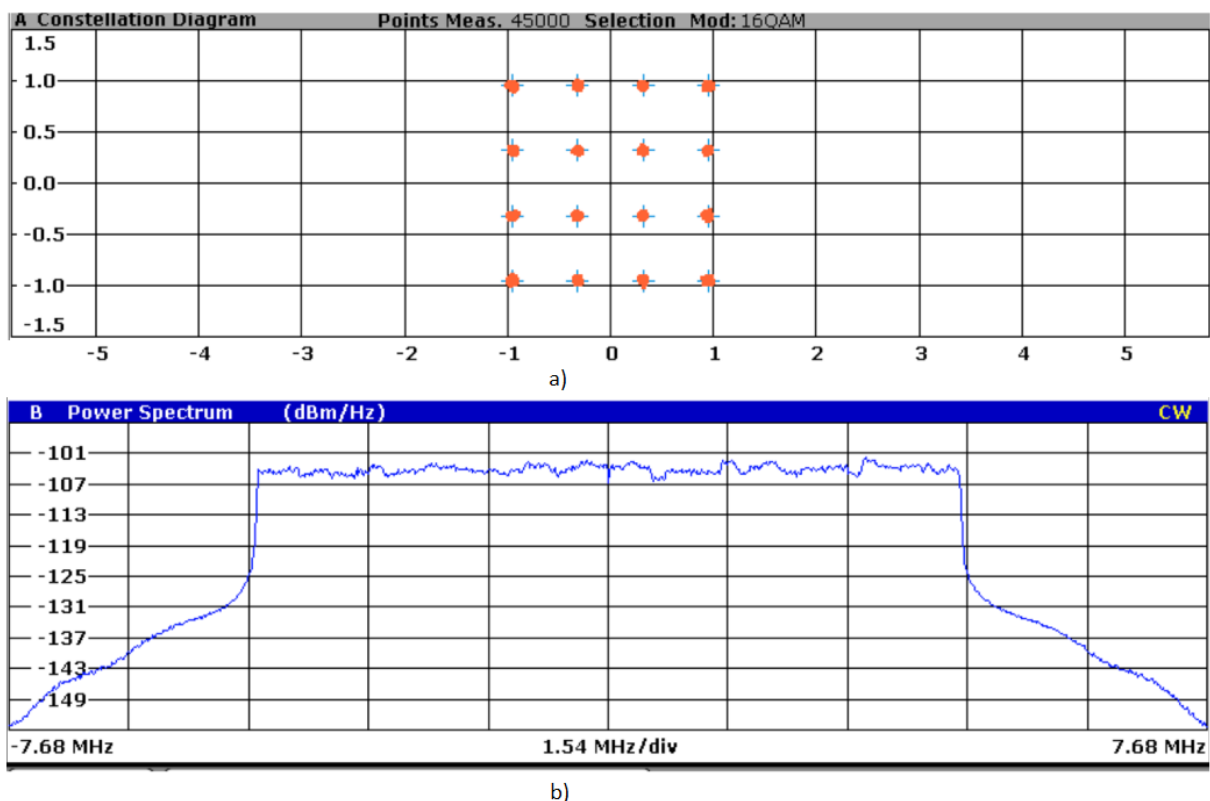
- E-UTRA Test Model 2 (E-TM2) se zabývá dynamickým rozsahem signálu (při minimálním výkonu OFDM symbolů). Měřenými parametry jsou EVM pro 64-QAM modulaci s limitem EVM 8 % a s definovanou frekvenční odchylkou

vysílaného signálu. Více informací o tomto modelu je uvedeno na straně 62 v 3GPP TS 36.141 [15] nebo v příloze C této diplomové práce.

- E-UTRA Test Model 3.2 (E-TM3.2) se zabývá kvalitou přenášeného signálu. Měřenými parametry jsou EVM pro 16-QAM modulaci s limitem EVM 12,5 % a s definovanou frekvenční odchylkou od vysílaného signálu. Podrobnější informace na straně 64 v 3GPP TS 36.141 [15] nebo v příloze D této diplomové práce.

4.1.2 RF přijímací část

Elektrická přijímací část se skládá ze dvou signálových analyzátorů, první analyzátor je od firmy Rohde & Schwarz FSV Signal and Spectrum Analyzer, který je plně kompatibilní s generátorem signálu LTE SMW200A. Jako druhý analyzátor byl použit typ E4440A od firmy Agilent, kterým se měří přenášené spektrum generátoru SMIQ 03B, bohužel není možné zjistit přenášenou konstelaci, protože tyto dva typy přístrojů nejsou kompatibilní. Pro testování LTE signálu bylo měřeno frekvenční spektrum přenášeného signálu a parametry EVM (ukázka měřených dat je na obrázku 13).



Obr. 13 - Ukázka a) Konstelačního diagramu, b) Frekvenčního spektra měřeného signálovým analyzátozem FSV

4.1.3 Optická část

Pro přenos RF signálů s minimální chybovostí přes optickou přenosovou soustavu je důležité vhodně modulovat elektrická data. Proto je zapotřebí využít kvalitního laseru se stabilní frekvencí (minimální frekvenční chyba) a úzkou spektrální čarou, a dále pak použít vhodného optického modulátoru.

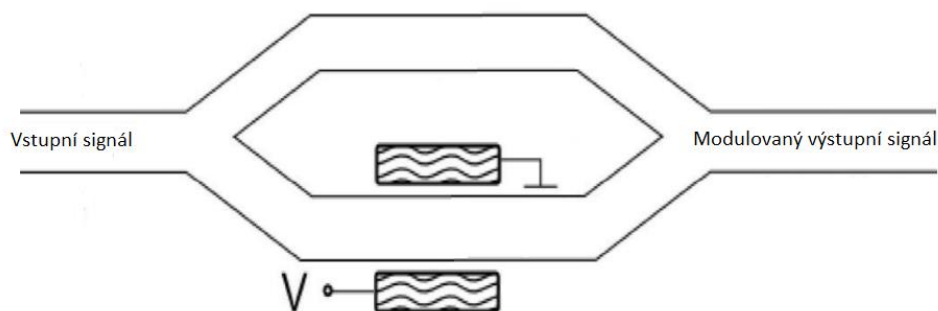
Laser

Jako laser byl použit COBRITE řady DX4 v kontinuálním režimu, který nabízí 4 optické výstupy ve dvou frekvenčních pásmech C a L, garantuje úzkou spektrální čáru <100 kHz, frekvenční stabilitu (± 0.05 GHz za 1 hodinu) s maximálním výstupním výkonem 16 dBm. Pro měření byly použity následující parametry laseru:

- Výstupní výkon 6 dBm
- Vlnová délka 1550 nm

Mach-Zehnderův modulátor

Mach-Zehnderův modulátor pracuje na elektro-optickém jevu, kdy je nejprve optický paprsek rozdělen do dvou větví a po přivedení napětí na jednu nebo obě větve modulátoru se mění index lomu materiálu, čímž je zpožděn procházející paprsek (mění se fáze vlny). Na výstupu modulátoru tedy v bodě spojení obou větví dochází k interferenci vlnění a dochází ke změnám výstupního výkonu. Vnitřní uspořádání Mach-Zehnderova interferometru je zobrazeno na obrázku 14.

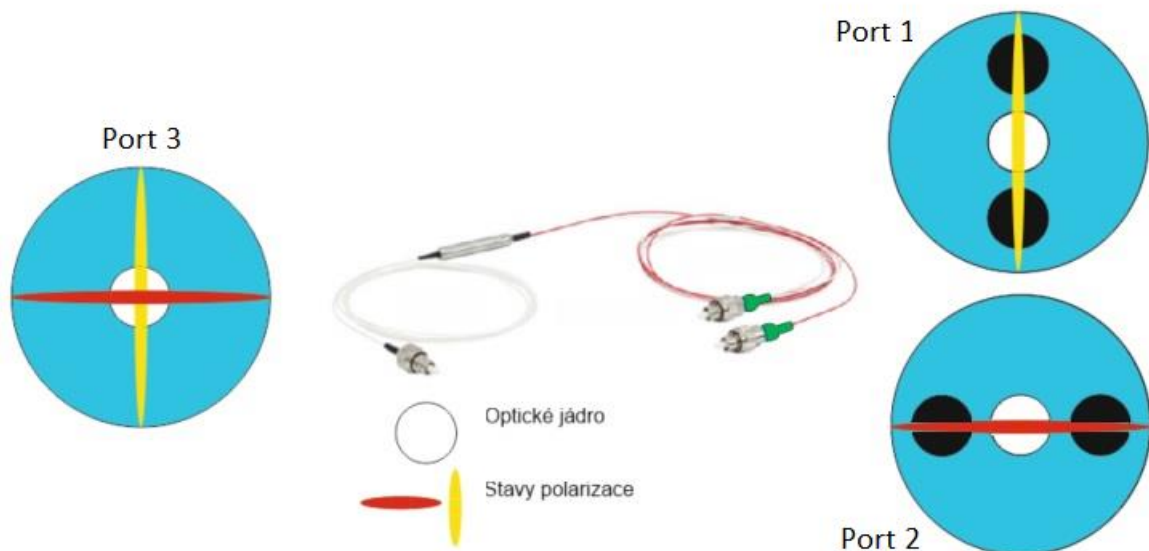


Obr. 14 - Mach-Zehnderův interferometr

Pro LTE přenos byl použit Single drive Mach-Zehnder modulátor a pro přenos obecné modulace byl použit Dual drive Mach-Zehnder modulátor s využitím pouze jedné modulační větve. Oba optické modulátory byly nastaveny do tzv. Q-bodu, který zajišťuje maximální přenos signálu.

Pro modulovaný elektrický signál na optické nosné vlně, je nutné vhodně nastavit správný stav polarizace vlny předtím, než signál zašleme do polarizačního slučovače, aby nedocházelo k interferencím. Pro nastavení definovaného stavu polarizace slouží polarizační kontrolér, který pracuje na dvou různých principech. První z principů využívá mechanické namáhání optického vlákna v části, kde je vlákno chráněno pouze primární ochranou. Pomocí šroubu je deformováno optické vlákno, čímž dochází ke změně stavu polarizace. Druhý z principů využívá změny polarizace pomocí čtvrtvlnných a půlvlnných destiček, kde první čtvrtvlnná destička transformuje obecnou polarizaci do lineární polarizace, půlvlnná destička zajišťuje rotaci lineární polarizace a poslední čtvrtvlnná destička zajišťuje požadovanou výstupní polarizaci.

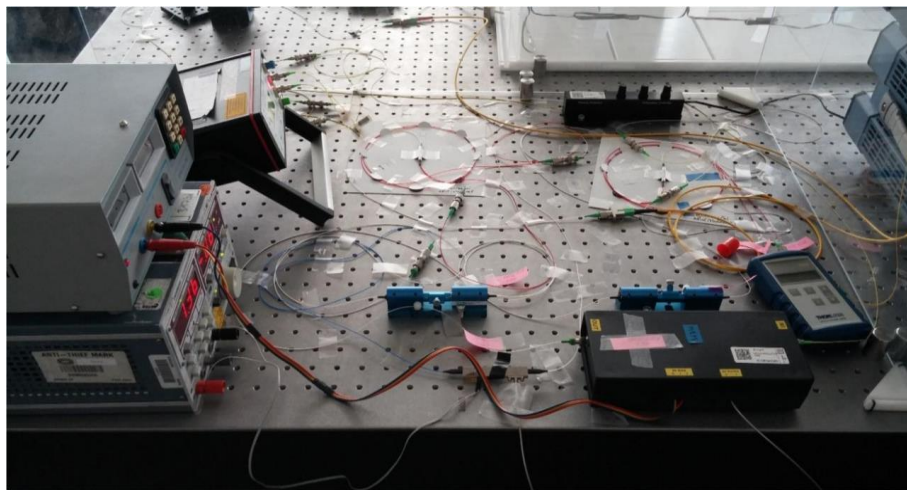
Pomocí polarizačních kontrolérů je tedy zajištěn vhodný polarizační stav přenášené optické vlny. Následně jsou obě promodulované ortogonální složky přivedeny na vstupní porty polarizačního slučovače (porty 1 a 2), kde se navzájem ortogonální polarizační stavy pomocí polarizačního krystalu přetransformují do jednoho výstupního portu (port 3). Princip polarizačního slučovače je zobrazen na obrázku 15.



Obr. 15 - Polarizační splitter/combiner

Protože v tomto experimentu bylo použito jednovidové optické vlákno SMF-28 o délce 5 km (nahrazující přenos optickou vláknovou soustavou) a EDFA zesilovač pro zesílení

optického signálu, nastával problém s možnou změnou polarizace vlny vlivem mikroposuvu a ohybu optického vlákna. Proto celé zapojení muselo být pevně zafixováno, aby se vlákna v důsledku turbulencí nebo nastavování polarizačních kontrolérů nemohla samovolně pohnout, čímž by docházelo ke změně polarizace a tím i ke zkreslení měřených výsledků. Problém s vlivem mikroposuvů a ohybu optického vlákna by mohl být odstraněn použitím PM vláken (polarizačně zachovávajících vláken), které dokáží zachovat definovaný polarizační stav i při mechanické manipulaci s vláknem. Řešení druhého problému v podobě EDFA zesilovače už není tak jednoduché, protože samostatná erbiová vlákna obecně nezachovávají polarizační stav. Jediným řešením je zpětná korekce polarizace uvnitř EDFA, ale tyto zesilovače jsou velmi drahé, proto byl v zapojení použit ještě jeden polarizační kontrolér. Optická část spoje je zobrazeno na obr. 16.



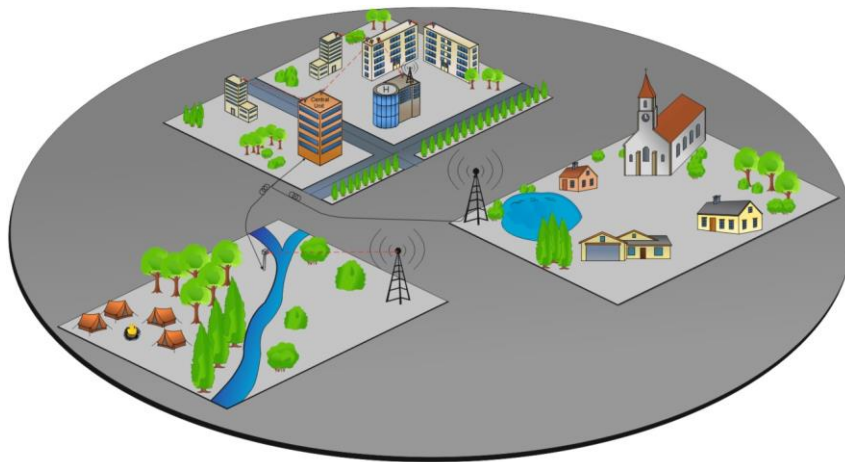
Obr. 16 - Optická část experimentu

4.1.3.1 Bezdrátová optika

Experiment byl testován ve dvou konfiguracích (samostatné optické vlákno a kombinace optického vlákna a bezdrátové optiky). Jak už název napovídá, jedná se o technologii, kdy se data přenášejí volným prostorem mezi dvěma stacionárními body. Tato technologie se využívá v případech, kdy je instalace optického vlákna příliš drahá nebo není dokonce možná. Jako přenosové médium se využívá úzkého optického svazku volně se šířícího prostředím s divergencí v jednotkách miliradiánů.

Bezdrátová optika se společně s technologií VLC (Visible Light Communication), stává jednou z nejperspektivnějších bezdrátových přenosových technologií [16]. V dnešní době se technologie bezdrátové optiky rozšiřuje do oblastí heterogenních sítí, bezdrátových spojů mezi budovami, satelitních spojů nebo dokonce slouží k propojování integrovaných obvodů. Tento rozvoj je zapříčiněn především přenosovou rychlostí až 10 Gb/s mezi dvěma

pevnými body na vzdálenost několika kilometrů [17]. Technologie bezdrátové optiky zajišťuje přenos v bez licenčním pásmu. Jednou z dalších možných aplikací je páteřní buňkový systém, který už svou přenosovou kapacitou nestačí novým přenosovým technologiím, jako je LTE z důvodu propojení pouze metalickým vedením mezi jednotlivými základnovými stanicemi. Další využití lze nalézt v [18]. Pro přehlednost ukázka páteřního buňkového systému je zobrazena na obrázku 17.



Obr. 17 - Páteřní buňková síť s využitím bezdrátových optických spojů

Pro návrh FSO spoje vycházíme z doporučení ITU-R P.1817-1 [19]. Při návrhu bezdrátového optického spoje je zapotřebí zvážit mnoho proměnných faktorů jako jsou ztráty atmosférickou absorpcí, rozptyl, turbulence, délka spoje nebo geometrické ztráty. Pro FSO spoj je důležitým parametrem rezerva spoje, která odpovídá výkonu nad minimální úroveň přijatého signálu.

$$M_{rezerva} = P_v - P_{min} - L_{geo} - L_{atm} - L_{turb} - L_{syst} \quad (2)$$

Kde:

P_v [dBm] : Celkový vysílaný výkon

P_{min} [dBm] : Minimální přijatý výkon přijímače závislý na šířce pásma

L_{geo} [dB] : Geometrické ztráty šířícího se paprsku

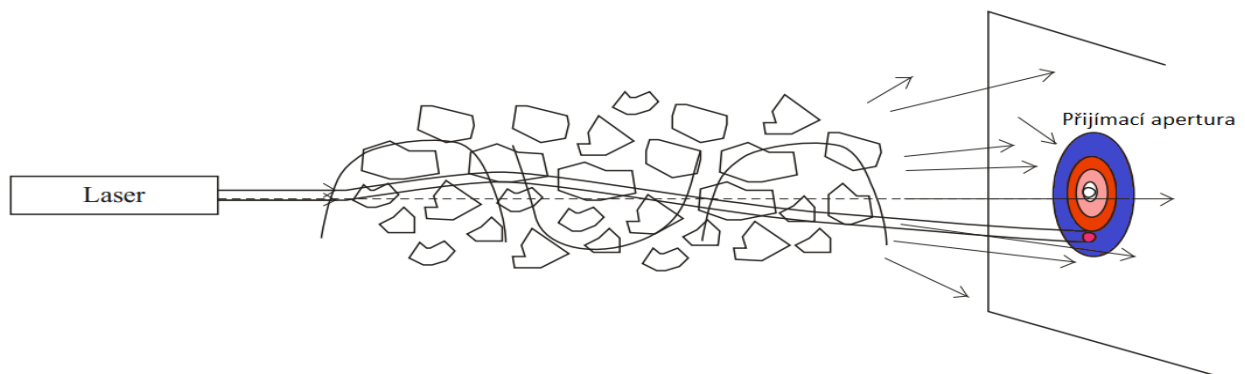
L_{atm} [dB] : Atmosférický útlum vlivem absorpce a rozptylu

L_{turb} [dB] : Ztráty způsobené atmosférickými turbulencemi

L_{syst} [dB] : Zbylé ztráty způsobené například ztrátami v přijímači, redukcí citlivosti přijímače z důvodu okolního záření, ztráty nezarováním přímého paprsku

Atmosférické turbulence

Zemská atmosféra se vyznačuje velice proměnným prostředím, kde dochází k některým meteorologickým dějům, jako jsou mlha, déšť, sněžné přehánky nebo turbulence. Tato diplomová práce se zabývá chováním optického spoje v turbulentním prostředí. Atmosférické turbulence vytvářejí dočasné vzdušné vrstvy s rozdílnou teplotou a rozdílným indexem refrakce. Vlivem těchto faktorů může být optický svazek vychýlen mimo detektor a tím dochází ke zvýšení chybovosti přenosu. Význam jednotlivých vlivů závisí na velikosti turbulentních buněk v závislosti na průměru paprsku. U větších turbulentních buněk se paprsek zakříví a část paprsku dopadá mimo přijímací aperturu. Běžnější je případ, kdy velikost turbulentních buněk je malá vůči průměru stopy paprsku a tak dochází k rozptylu signálu [20]. Spojením těchto dvou vlivů pozorujeme scintilace signálu (obrázek 18).



Obr. 18 - Scintilace laserového paprsku [19]

Pojem scintilace popisuje kolísání intenzity přijímaného signálu na detektoru. Pro určení hodnoty scintilace je nutné nejprve určit strukturní parametr indexu lomu C_n^2 , který vyjadřuje míru turbulencí. Strukturní parametr indexu lomu závisí na teplotě, geografické poloze, nadmořské výšce a síle větru. Pro nižší nadmořské výšky je hodnota indexu refrakce větší z důvodu větších teplotních změn způsobených zahříváním zemského povrchu. Typické hodnoty C_n^2 se pohybují v blízkosti zemského povrchu v rozmezí od $10^{-17} m^{-2/3}$ pro slabé turbulence až po hodnoty v řádu $10^{-12} m^{-2/3}$ a více, které odpovídají silným turbulencím [21]. Pro výpočet síly atmosférických turbulencí vycházíme z Kolmogorovi teorie. Z rovnice 3 můžeme vypočítat strukturní parametr teploty.

$$D_T(R) = \langle (T1 - T2)^2 \rangle = C_T^2 R^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

Kde:

$T1$ a $T2$ [K]: Teploty ve dvou bodech ve vzdálenosti R

C_T : Teplotní konstanta

Vztah mezi strukturálním parametrem indexu lomu a strukturálním parametrem teploty je:

$$C_n^2 = (79 * 10e^{-6} \frac{P}{T^2})^2 C_T^2 \quad (4)$$

Kde:

P [hPA]: Atmosférický tlak okolí

T [K]: Teplota okolí

Pro zkoumání vlivu atmosférických turbulencí ovlivňujících bezdrátové optické spoje je potřeba dopočítat vliv fluktuací přijímaného signálu, který se nazývá scintilace. Scintilační index lze stanovit z:

$$\sigma_i^2 = 1,23 * C_n^2 * k^{\frac{7}{6}} * L^{\frac{11}{6}} \quad (5)$$

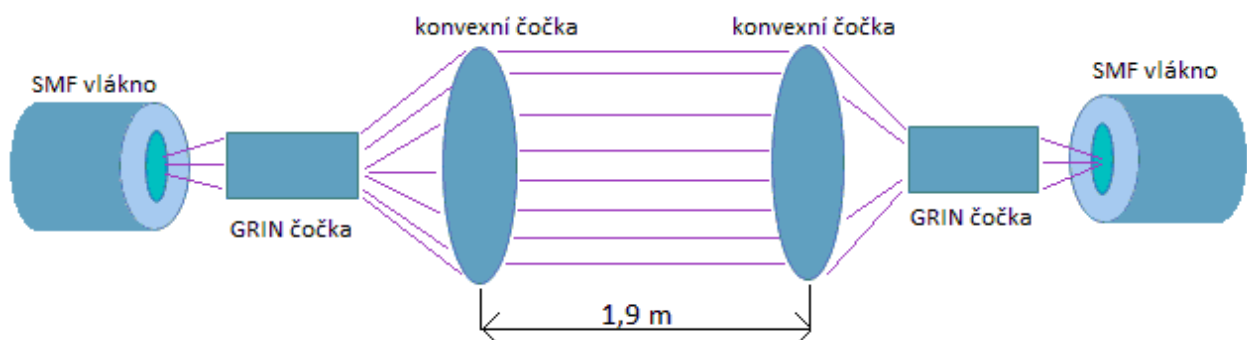
Kde,

k [m^{-1}] : Vlnové číslo

L [m] : Délka optického spoje

C_n^2 [$m^{-2/3}$] : Strukturální parametr indexu lomu

Atmosférické turbulence se mohou zkoumat i v laboratorních prostorách (turbulentní komoře). Bezdrátový laboratorní spoj se skládá ze soustavy čoček, která je zobrazena na obrázku 19.



Obr. 19 - Bezdrátový optický laboratorní spoj

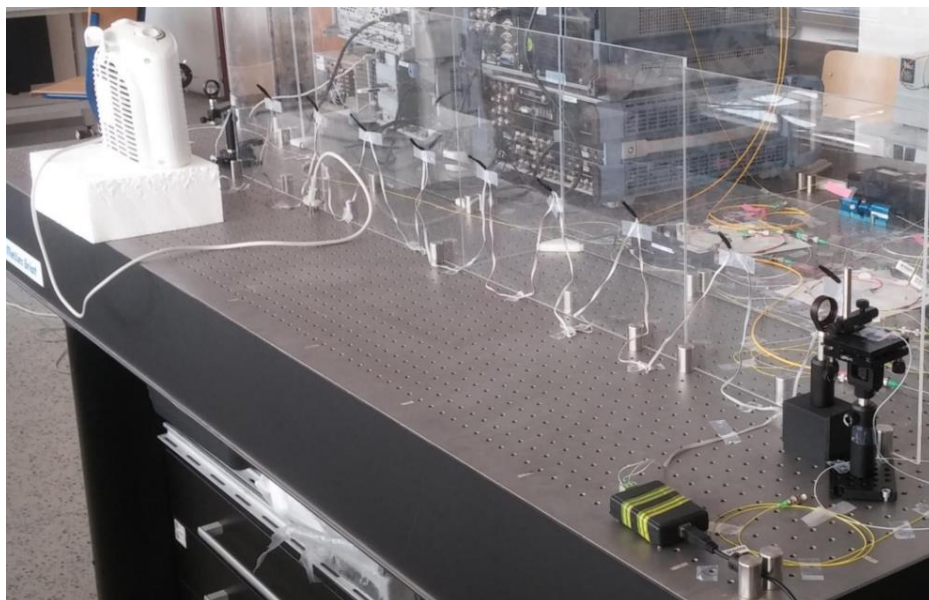
Tato soustava se skládá ze dvou jednovlákových vláken (na vysílací a přijímací straně), na které je napojena objímka s GRIN čočkou umístěnou do odpovídající ohniskové vzdálenosti. Optické vlákno s GRIN čočkou je znázorněno obrázku 20.



Obr. 20 - Optické vlákno s GRIN čočkou

GRIN čočky typ 50-1550A-APC od firmy Thorlabs jsou v tomto experimentu využity kvůli schopnosti lepší fokusace optického svazku při malých ohniskových vzdálenostech. Dále byly použity konvexní čočky (od firmy Thorlabs o průměru 25,4 mm a s ohniskovou vzdáleností 10 cm) ke kolimaci optického paprsku do volného prostoru.

Protože se jedná o fokusování optického paprsku z nebo do jednojádřového optického vlákna s průměrem jádra $8.2 \mu\text{m}$, dochází i na krátkých vzdálenostech k útlumu. U našeho nastavení bylo dosaženo hodnoty útlumu 15 dB pro 1,9 m dlouhý spoj. Optický bezdrátový spoj je zobrazen na obrázku 21, více informací bude vysvětleno v kapitole 4.4.



Obr. 21 - Optický bezdrátový spoj

Pro vhodné nastavení optického spoje bylo nezbytné změřit výkonovou bilanci. Výkonová bilance je zobrazena v tabulce 3.

komponenta	ztráty [dB]
Bezdrátová optika	15
Jednovidové vlákno 5 km	1,78
Dělič 50/50	4,2
MZM dual drive	1,5
MZM single drive	2,4
Polarizační dělič	5
Polarizační slučovač	4

Tab. 3 - Výkonová bilance

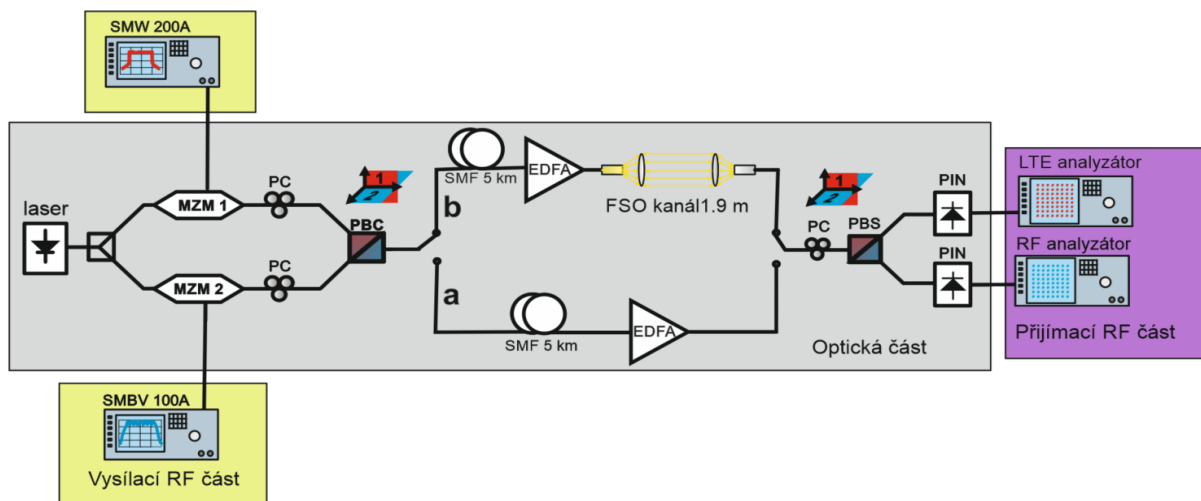
4.2 Vliv změny odstupu signálu k hladině šumu RF oblasti

Pro celkovou analýzu chování přenosu LTE signálu přes optické spoje je důležité zkoumat i vliv změny LTE signálu v RF vysílací části. Veškerá měření v následujících kapitolách 4.2 - 4.4 jsou analyzována ve směru od poskytovatele k zákazníkovi (sestupný směr). Pro tuto část diplomové práce byla v generátoru LTE signálu záměrně zvyšována úroveň hladiny šumu, což může sloužit operátorovi k simulaci kvality signálu nebo částečně může vyšetřovat vliv reálného přenosu signálu od základnové stanice k zákazníkovi.

Byly postupně testovány dvě konfigurace optického zapojení se čtyřmi odlišnými modely přenosu v RF části (frekvence 0,8 a 2,6 GHz a Test modely E-UTRA 2 a E-UTRA 3,2). Naměřené výsledky budou společně se simulovanými výsledky porovnány v kapitole 6.

4.2.1 Vliv změny odstupu signálu k hladině šumu pro SMF 5km

První z testovaných schémat je konfigurace 5 km jednovidového optického vlákna SMF-28 (obrázek 22 větve a).



Obr. 22 - Schéma zapojení vlivu SNR na EVM

Z naměřených výsledků z tabulky 4 je patrné, že pro model E-UTRA 2 je možné přenášet LTE signál v dostatečné kvalitě (EVM menší než 8 %) od hodnoty odstupu signálu k hladině šumu 15 dB. Pro testovací model E-UTRA 3.2 (limit EVM 12.5 %) je možný přenos od hodnoty 25 dB.

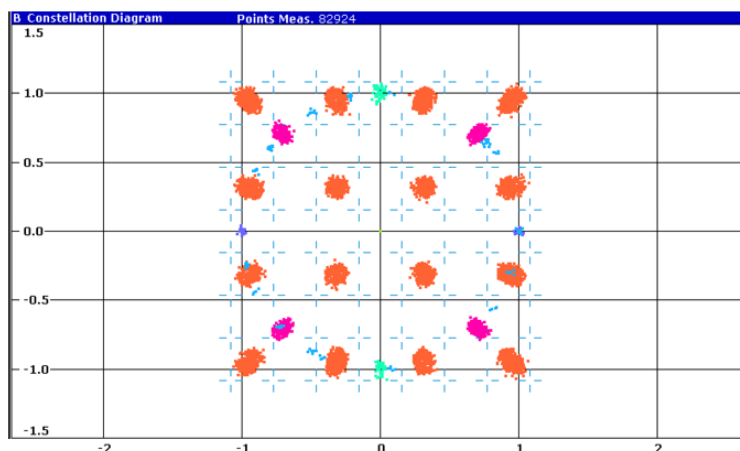
f [GHz]	Test Model	C/N [dB]	EVM [%]
0,8	2	40	1,6
		35	1,7
		30	2
		25	2,7
		20	4,1
		15	6,8
		10	10,5
		5	16
0,8	3,2	40	4,1
		35	4,8
		30	6,6
		25	9,9
		20	16,6
		15	23,9
		10	37

f [GHz]	Test Model	C/N [dB]	EVM [%]
2,6	2	40	1,4
		35	1,5
		30	1,8
		25	2,5
		20	4
		15	6,7
		10	10,3
		5	15,5
2,6	3,2	40	3,1
		35	3,9
		30	5,9
		25	9,8
		20	16,6
		15	24
		10	36

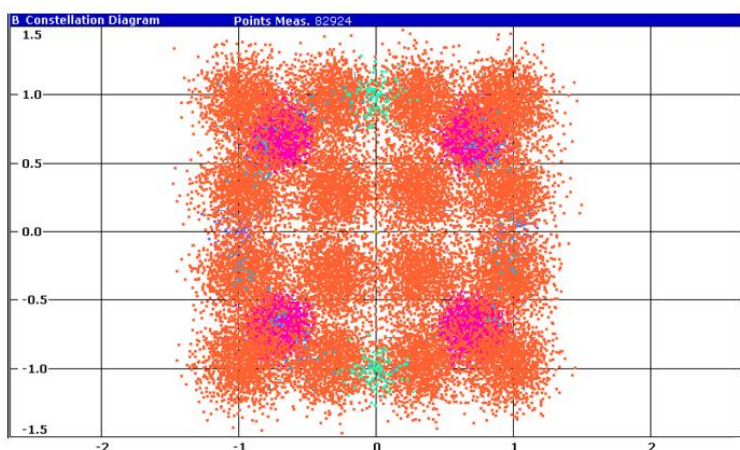
Tab. 4 - Závislost měřeného EVM na SNR pro SMF

Na obrázcích 23 a 24 jsou zobrazeny ukázky konstelačních diagramů E-UTRA test modelu 3.2 získané signálovým analyzátozem Rohde & Schwarz FSV. Pro test model E-UTRA 3.2 je EVM měřeno pouze na datových symbolech modulace 16-QAM (v obrázku oranžová

barva). Pozn. QPSK modulace (v obrázku fialovou a symboly se světle zelenou barvou) slouží jen pro synchronizační účely, které se do hodnoty EVM se nezapočítávají.



Obr. 23 - Změřené EVM 4,1 % pro C/N 40dB



Obr. 24 - Změřené EVM 16,6% pro C/N 20dB

Na obrázku 24 je ilustrován konstelační diagram při překročení maximálního povoleného limitu EVM pro modulaci 16-QAM. Při takovémto případě by docházelo na straně uživatele k výpadkům služby nebo až ke ztrátě spojení.

4.2.2 Vliv změny odstupů signálu k hladině šumu pro SMF 5km + FSO

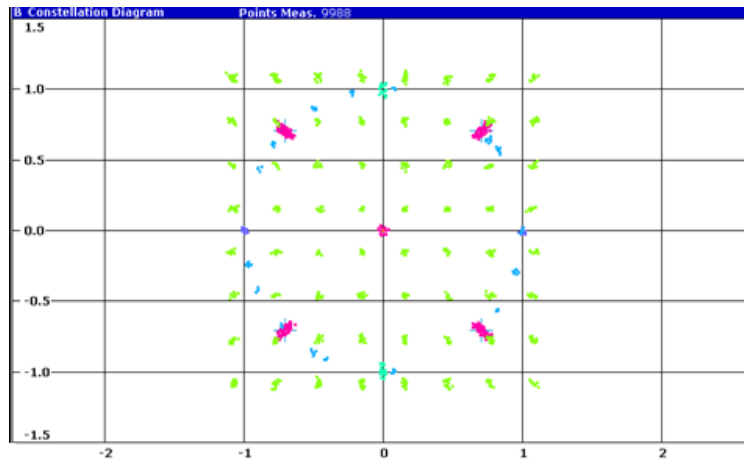
Poté byl zkoumán vliv změny odstupů signálu k hladině bílého šumu v konfiguraci 5 km jednovidového optického vlákna SMF-28 a bezdrátové optického spoje (v tomto experimentu ještě nebyly zkoumány atmosférické turbulence). Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 22 větev b.

Z výsledků z tabulky 5 vyplývá, že pro model E-UTRA 2 je možný přenos LTE signálu (EVM menší než 8 %) od hodnoty odstupů signálu k hladině šumu 15 dB. Pro testovací model E-UTRA 3.2 (limit EVM 12.5 %) je možný přenos od hodnoty 25 dB.

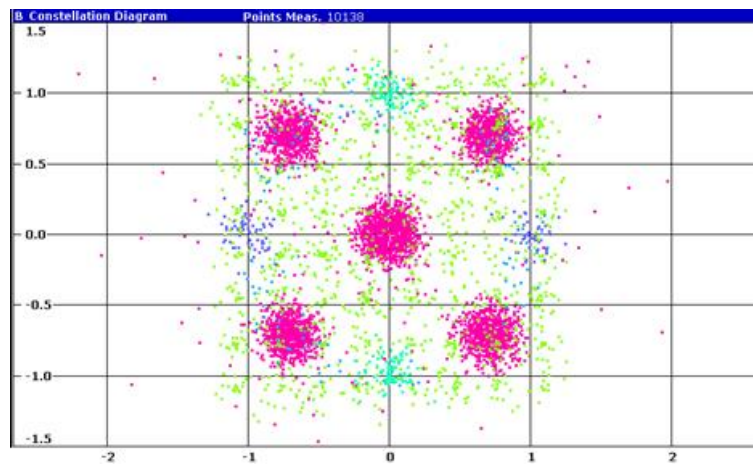
f [GHz]	Test Model	C/N [dB]	EVM [%]
0,8	2	40	2,5
		35	2,6
		30	2,9
		25	3,4
		20	4,6
		15	6,9
		10	10,5
		5	16,5
0,8	3,2	40	2,4
		35	3,4
		30	4,6
		25	9,6
		20	16,5
		15	24,6
		10	36,4
		2,6	2
35	1,6		
30	1,9		
25	2,5		
20	4		
15	6,7		
10	10,5		
2,6	3,2		
		35	3,7
		30	4,7
		25	9,7
		20	16,6
		15	23,7
		10	38,4

Tab. 5 - Závislost měřeného EVM na SNR pro SMF + FSO

Na následujících dvou obrázcích (obr. 25 a obr. 26) jsou znázorněny konstelační diagramy E-UTRA test modelu 2, který využívá k přenosu informací modulaci 64-QAM (v obrázku zelená barva). Fialové a modré body v konstelačním diagramu jsou opět pouze synchronizační symboly.



Obr. 25 - Změřené EVM 1,9 % pro C/N 30dB



Obr. 26 - Změřené EVM 10,5 % pro C/N 10dB

4.3 Vliv změny odstupu signálu k hladině šumu v optické části

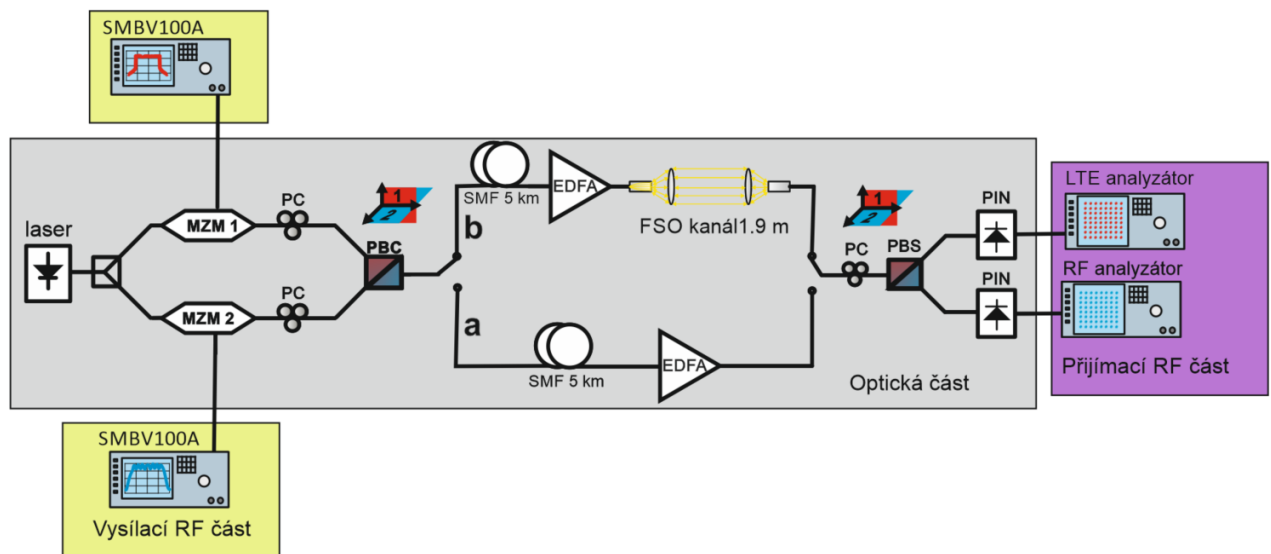
Druhé z testovaných schémat se zabývalo změnou odstupu signálu od hladinu šumu v optické části, dále jen OSNR. Tento scénář byl testován z důvodu případné korekce výkonové bilance optické části, může dále sloužit poskytovateli přenosové služby k vyhodnocení mechanickému poškození optického spoje.

V této kapitole byl vyšetřován vliv OSNR pro frekvenci 2,6 GHz a E-UTRA testovací model 2. Pro přenos byla zvolena zapojení s jednovidovým optickým vláknem a kombinace optického vlákna a bezdrátové optiky (bez vlivu atmosférických turbulencí). Změny OSNR bylo dosaženo pomocí proměnného atenuátoru, který byl pro obě zapojení vložen za EDFA zesilovač. V experimentu byly použity vektorové signálové generátory

SMBV100A od firmy Rohde & Schwarz, které jsou kompatibilní s FSV analyzérem, bohužel pouze jeden měl nainstalovaný modul pro LTE technologii. Na druhé polarizaci byla posílána 16-QAM modulace o stejné šířce pásma, jako LTE signál.

4.3.1 Vliv změny OSNR pro SMF 5km

Nejprve byl zkoumán vliv změny odstupu optického signálu k hladině šumu v konfiguraci 5 km jednovidového optického vlákna SMF-28 (obrázek 27 větev a).



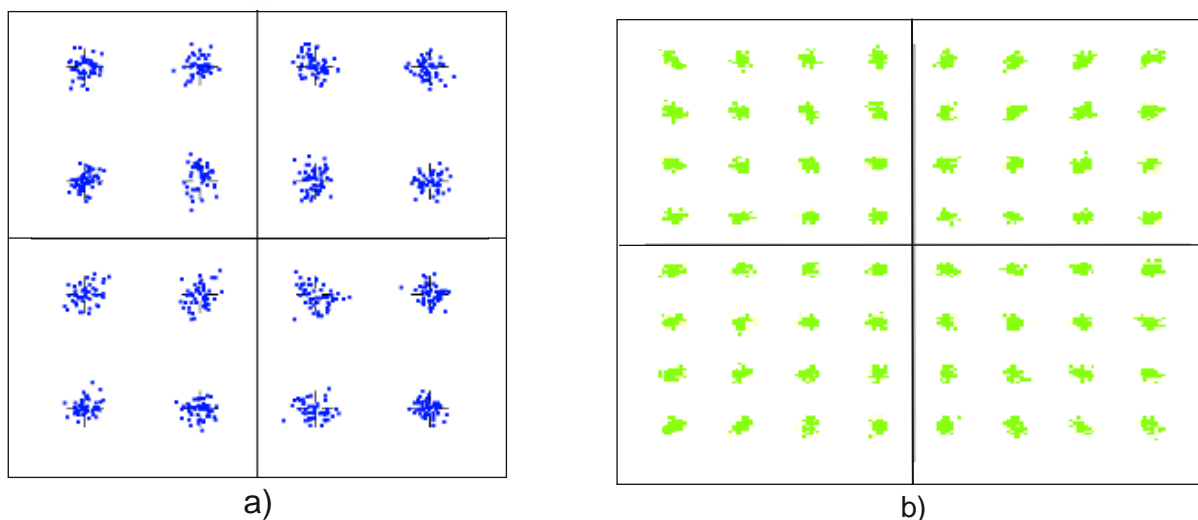
Obr. 27 - Schéma zapojení vlivu OSNR na EVM

Z výsledků měření vlivu odstupu optického signálu k hladině šumu vyplývá, že pro model E-UTRA 2 je možný přenos LTE signálu v dostatečné kvalitě (EVM menší než 8 %) od hodnoty odstupu optického signálu k hladině šumu 24,5 dB. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 6.

f [GHz]	Test Model	Útlum [dB]	OSNR [dB]	EVM [%]
2,6	2	0	36	2,1
		1	35,5	2,2
		2	34,5	2,3
		3	33,5	2,3
		4	32,5	2,4
		5	32	2,4
		6	31	2,5
		7	30,3	2,6
		8	29,6	2,9
		9	28,8	3,3
		10	27,5	3,9
		11	26,6	4,6
		12	25,6	5,6
		13	24,5	6,9
		14	23,6	8,5
		15	22,8	10,2
		16	21,9	12,2
17	21	13,8		

Tab. 6 - Závislost měřeného EVM na OSNR pro SMF

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny konstelační diagramy E-UTRA test modelu 2. Obrázek 28 b) využívá k přenosu informací modulaci 64-QAM. Na obrázku 28 a) je zobrazen konstelační diagram modulační 16-QAM přenášený na druhé polarizaci.



Obr. 28 - Změřené EVM na OSNR a) 16-QAM, b) EVM 3,9 % pro OSNR 27,5 dB

4.3.2 Vliv změny OSNR pro SMF 5km + FSO

Poté byl zkoumán vliv změny odstupů optického signálu k hladině bílého šumu v konfiguraci 5 km jednojádrového optického vlákna SMF-28 a bezdrátové optického spoje (v tomto experimentu nebyly zkoumány atmosférické turbulence). Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 27 větev b.

Z výsledků z tabulky 7 vyplývá, že pro testovací model E-UTRA 2 je možné přenášet LTE signál (EVM menší než 8 %) od hodnoty odstupů optického signálu k hladině šumu 24 dB.

f [GHz]	Test Model	Útlum [dB]	OSNR [dB]	EVM [%]
2,6	2	0	29	3,1
		1	28	3,3
		2	27,2	4
		3	26,2	4,7
		4	25,1	5,6
		5	24	7
		6	23,2	8,5
		7	22,3	10,2
		8	21,3	11,9
		9	20,4	13,5
		10	19,3	15,3

Tab. 7 - Závislost měřeného EVM na OSNR pro SMF + FSO

4.4 Vliv atmosférických turbulencí na EVM

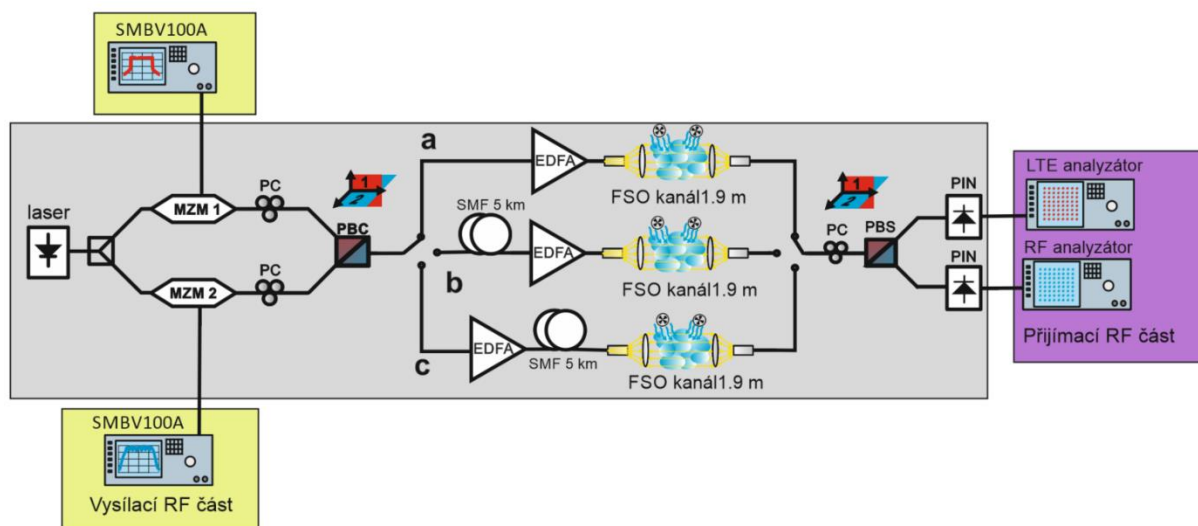
Další část diplomové práce se zabývala analýzou vlivu atmosférických turbulencí na přenášený LTE signál. Vliv fluktuací je lépe patrný pro silnější typy turbulencí, proto experiment zkoumal vliv tří optických zapojení se čtyřmi úrovněmi turbulencí (čistý kanál, střední turbulence, silné a velmi silné turbulence). Generování turbulencí bylo dosaženo pomocí dvou teplotních fénů. Pro měření síly turbulencí vycházíme z Kolmogorovi teorie o teplotních turbulencích, která je popsána v kapitole 4.1.3.1. Pro výpočet síly turbulencí bylo potřeba měřit rozdíly teplot podél bezdrátového optického spoje, k tomuto účelu posloužilo 20 teplotních senzorů vzdálených od sebe 10 cm. Pro nastavení úrovně turbulencí byly použity dva teplotní fény umístěné vedle sebe, jejich nastavení je definováno v tabulce 8.

Typ turbulencí	fén 1	fén 2
Čistá komora	vypnutý	vypnutý
Střední turbulence	střed. výkon	vypnutý
Silné turbulence	max. výkon	vypnutý
Velmi silné turbulence	max. výkon	max. výkon

Tab. 8 - Nastavení teplotních fénů

4.4.1 Vliv turbulencí v zapojení s FSO

Při prvním zkoumání vlivu turbulencí na vlastnosti přenášeného LTE signálu bylo testováno zapojení z obrázku 29 ve větvi a (konfigurace erbiem dopovaného vláknového zesilovače a bezdrátového optického spoje).



Obr. 29 - Schéma zapojení pro zkoumání vlivu atmosférických turbulencí

LTE signál byl přenášen v testovacím modelu E-UTRA 2 s modulací 64-QAM. Pro měření č. 1 byl rozdíl nosných vln LTE signálu a obecné modulace 30 dB, pro měření č. 2 byl rozdíl 40 dB.

Z naměřených výsledků z tabulky 9 je patrné, že střední hodnota parametru EVM nepřekročí hranici 8 %. Problém nastává s teplotními fluktuacemi signálu způsobenými atmosférickými turbulencemi, které vychylují optický svazek mimo detektor. V měření č. 1 při velmi silných turbulencích docházelo vlivem teplotních fluktuací překročení hranice E-UTRA modelu.



Měření č.	Typ turbulencí	EVM [%]	Odchylka EVM ± [%]	$C_n^2 [m^{-2/3}]$	$\sigma_i^2 [-]$
1	Čistá komora	4	0,1	4,95E-14	1,010E-05
	Střední turbulence	4,2	0,5	9,80E-12	2,000E-03
	Silné turbulence	5,3	2	4,91E-11	1,002E-02
	Velmi silné turbulence	6	2,8	8,10E-11	1,653E-02
2	Čistá komora	2,3	0	7,81E-14	1,594E-05
	Střední turbulence	2,8	0,5	1,50E-11	3,062E-03
	Silné turbulence	3,6	1,8	6,33E-11	1,292E-02
	Velmi silné turbulence	5,2	2,5	8,16E-11	1,665E-02

Tab. 9 - Závislost měřeného EVM na atmosférických turbulencích pro FSO

4.4.2 Vliv turbulencí v zapojení pro SMF 5km + FSO

V této kapitole byl testován vliv atmosférických turbulencí pro dvě různé kombinaci 5 km jednovidového optického vlákna, erbium dopovaného vláknového zesilovače a bezdrátového spoje (obrázek 29 větev b a větev c).

Z výsledků z tabulky 10 vyplývá, že střední hodnota parametru EVM překročí hranici 8 % pro obě testované konfigurace a při velmi silných turbulencích. Horší výsledky zapojení EDFA+SMF+FSO jsou způsobeny menším odstupem optického signálu k hladině šumu než pro druhé zapojení.

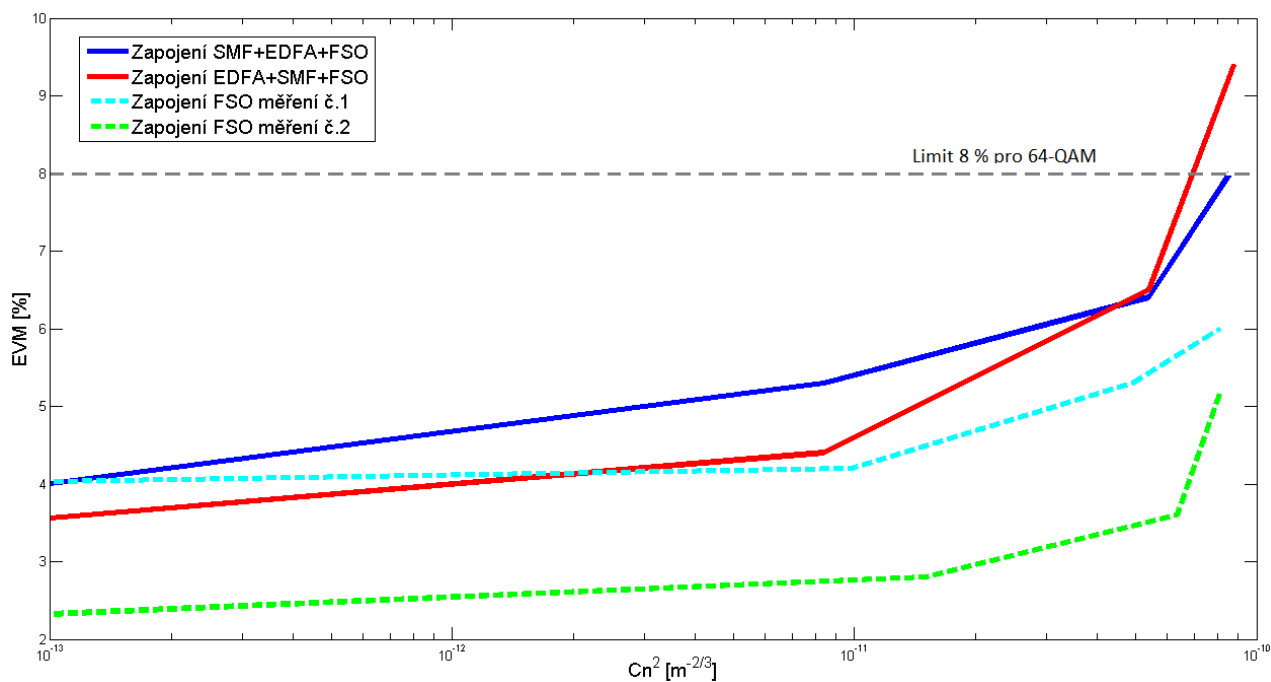
Typ zapojení	Typ turbulencí	EVM [%]	Odchylka EVM ± [%]	$C_n^2 [m^{-2/3}]$	$\sigma_i^2 [-]$
	Čistá komora	3,6	0	2,41E-14	4,919E-06
	Střední turbulence	5,3	1	8,40E-12	1,714E-03
	Silné turbulence	6,4	1,5	5,38E-11	1,098E-02
	Velmi silné turbulence	8	3	8,58E-11	1,751E-02
	Čistá komora	3,3	0	2,60E-14	5,307E-06
	Střední turbulence	4,4	0,5	8,40E-12	1,714E-03
	Silné turbulence	6,5	2	5,40E-11	1,102E-02
	Velmi silné turbulence	9,4	3	8,80E-11	1,796E-02

Tab. 10 - Závislost měřeného EVM na atmosférických turbulencích pro kombinace SMF + FSO

4.4.3 Výsledky vlivu turbulencí na přenos LTE signálu

Z teoretických základů z kapitoly 4.1.3.1 o bezdrátové optice je patrné, že na přenos optického signálu budou působit jak útlum turbulencí, tak především fluktuace signálu v turbulentním prostředí. Z výsledků měření síly turbulencí v rozmezí hodnot strukturního parametru indexu lomu od hodnoty $2,41e-14 m^{-2/3}$ do $8,80e-11 m^{-2/3}$ je patrné, že se zvyšující se silou turbulencí roste hodnota EVM a také roste hodnota scintilací. Měřená odchylka EVM způsobená fluktuací signálu je pro všechny zapojení stejná, což se dalo

předpokládat, protože se neměnila délka bezdrátového optického spoje. Vliv turbulencí na průměrné hodnoty EVM je zobrazen na obrázku 30, kde je možné porovnat 3 různé zapojení. Jako nejlepší varianta se jeví samotný bezdrátový optický spoj. Naměřené hodnoty bohužel nemohly být porovnány s hodnotami ze simulací, protože program Optisystem nedokáže vhodně simulovat turbulence pro OFDM modulaci.



Obr. 30 - Vliv atmosférických turbulencí

5. Simulace přenosu LTE technologie přes optické systémy

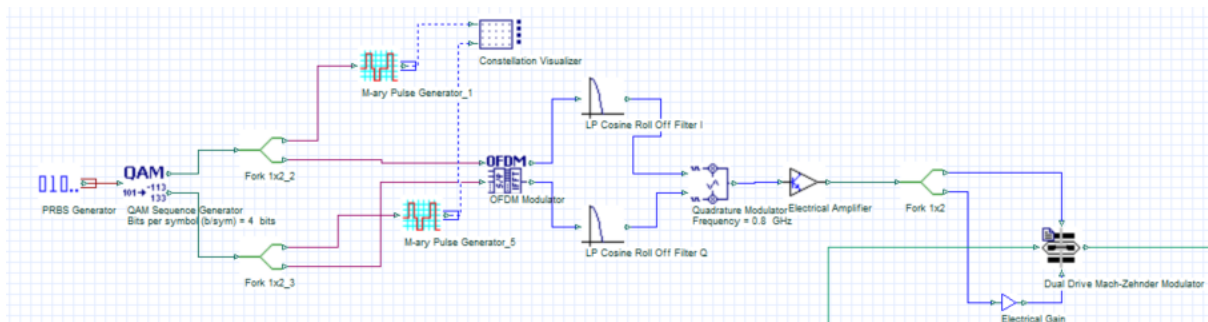
Pro simulace byl použit program Optisystem verze 12.2 od firmy Optiwave. Jedná se o program k návrhu schémat, plánování a testování moderních optických sítí. Simulace byla rozdělena do tří částí (RF vysílací části, RF přijímací části a optické části).

5.1 Simulace přenosu LTE technologie - Schéma zapojení

Pro všechny části platí stejné nastavení globálních parametrů programu (simulace probíhá v režimu bit rate s vhodně nastavenými parametry z hlediska doby simulace a dosažených výsledků. Pro simulace byly nastaveny parametry délky sequence na 8192 bitů a 128 vzorků na bit. V následujících kapitolách je pro veškerá schémata použit simulační model E-UTRA Test Model 3.2 na frekvenci 0,8 GHz. Všechna zapojení jsou zobrazena kvůli přehlednosti bez měřících komponent.

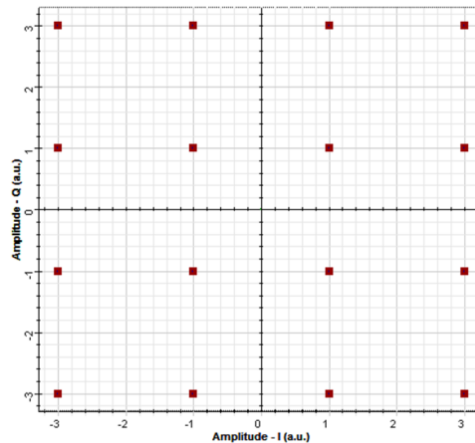
5.1.1 RF vysílací část

RF vysílací část se skládá ze dvou signálových generátorů. První z nich je generátor 10 MHz LTE signálu, který je zobrazen na obr. 31.



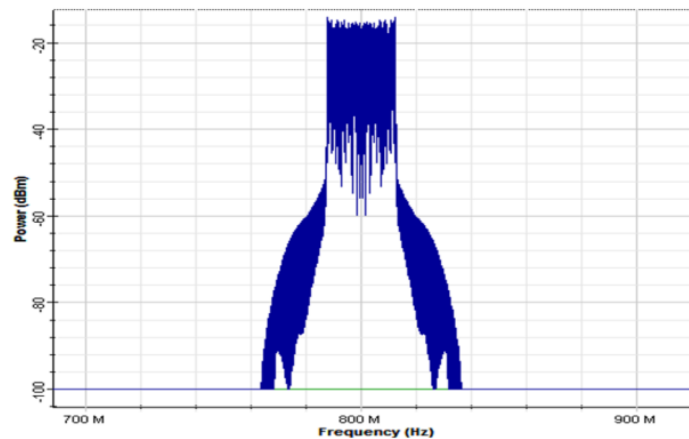
Obr. 31 - LTE generátor

Na vstup generátoru jsou přiváděna náhodně generovaná data z komponenty PRBS Generator, která jsou postupně posílána jako bitová posloupnost do 4 bitového QAM generátoru, který data přetransformuje do dvou bitových posloupností, soufázové a kvadrurní. Výstupní data 16-QAM modulátoru jsou zobrazena na obrázku 32.



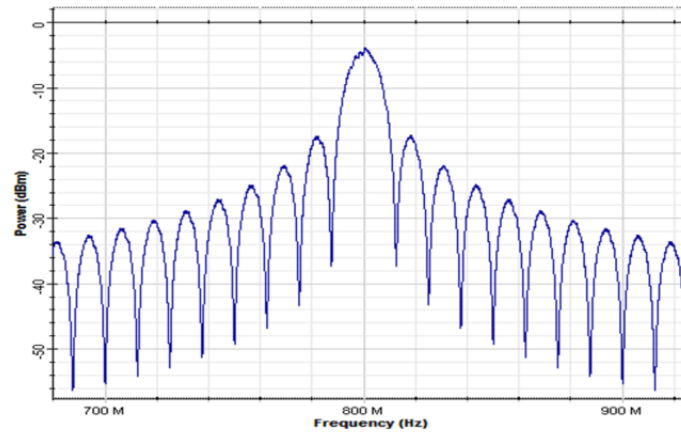
Obr. 32 - Konstelační diagram - LTE generátoru

V další části se v OFDM modulátoru namoduluje bitová posloupnost z QAM generátoru na jednotlivé subnosné. V nastavení pro 10 MHz LTE se jedná o 600 subnosných vln s využitím normálního cyckického prefixu. Poté jsou elektrická data ořezána ve filtru a namodulována pomocí Qadrature Modulatoru na nosnou vlnu o frekvenci 0,8 GHz. Ukázka výstupního elektrického spektra je na obrázku 33.



Obr. 33 - Spektrum LTE generátoru

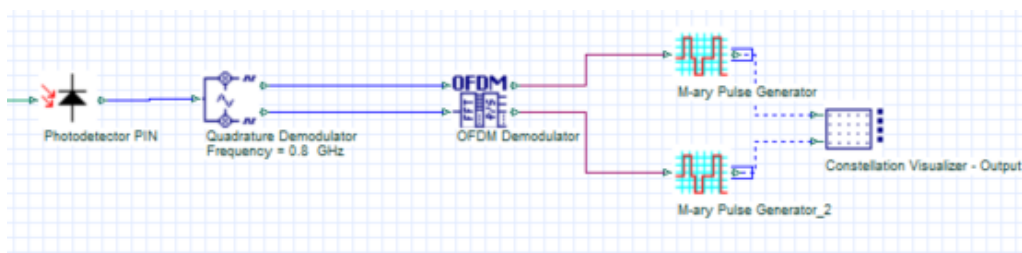
Pro simulaci druhého signálové modulátoru bylo použito obdobné schéma se stejnými parametry, bez použití OFDM modulátoru (pro co nejbližší podobnost k naměřeným datům). Spektrum druhého generátoru je zobrazeno na obrázku 34.



Obr. 34 - Spektrum 16-QAM generátoru

5.1.2 RF přijímací část

RF přijímací část se skládá ze dvou signálových analyzátorů. První z nich je analyzátor LTE signálu, který je zobrazen na obrázku 35.

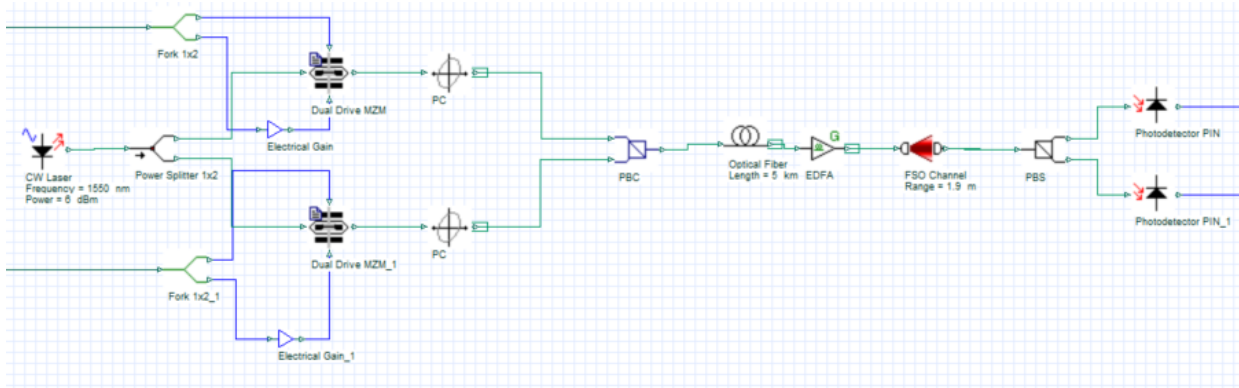


Obr. 35 - LTE analyzátor

Jedná se o inverzní princip vysílací části, kdy je zde po převedení optického signálu do elektrické domény nejdříve přijatý modulovaný signál v Quadrature Demodulátoru demodulován do základního pásma a v OFDM demodulátoru o stejném nastavení jako ve vysílací části je poté získána bitová posloupnost kvadrurní a fázové složky. Druhý analyzátor využívá obdobné schéma se stejnými parametry, akorát nebyl použit OFDM demodulátor.

5.1.3 Optická část

Optická přenosová část je zobrazena na obrázku 36.



Obr. 36 - Optická přenosová část

Jako laser byl zvolen CW Laser, který pracuje v kontinuálním režimu s výkonem 6 dBm, na vlnové délce 1550nm s definovanou výstupní lineární polarizací s azimutem 45°. Signál je poté rozdělen děličem výkonu 50/50 do dvou větví. Na optický svazek jsou namodulována RF data pomocí Mach-Zehnderova modulátoru, který musel oproti měření pracovat v režimu dual drive (pozn. je to z důvodu simulace optického vlákna, pro kterou konfigurace se single drive modulátor nefunguje). Napětí modulátoru bylo nastaveno do takzvaného Q-bodu, ve kterém se přenáší signál lineárně. Za modulátorem je upravena polarizace pomocí polarizačního kontroléru, který propustí jen definovanou osu polarizace. V tomto případě pro vrchní větev lineární polarizaci s azimutem 0 a v dolní větvi lineární polarizaci o 90° otočenou. Polarizační slučovač slouží k definovanému sloučení dvou polarizací. Nyní se signál dostává do testované optické trasy, která se skládá z 5 km jednovidového optického vlákna SMF-28, které má definovaný měrný útlum na 0,2 dB/km a disperzi 16,75 ps/nm/km. Signál je za vláknem potřeba zesílit EDFA zesilovačem o 8 dB z důvodu velkého vložného útlumu laboratorního bezdrátového optického spoje. Signál je poté rozdělen polarizačním děličem, které zachovává definované polarizační stavy do dvou větví, ve kterých je optický signál PIN fotodetektorem s citlivostí 0.8 A/W převeden na elektrický signál.

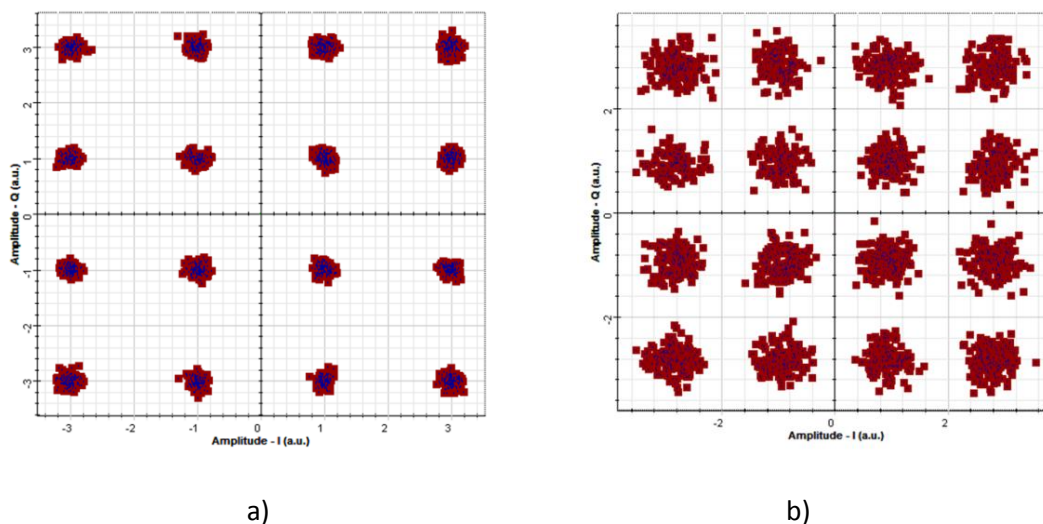
5.2 Simulace vlivu změny odstupů signálu k hladině šumu

V rámci simulací byla testována závislost EVM na SNR. Tyto hodnoty byly získány simulací v programu Optisystem a následným zpracováním získaných dat v programu Matlab. Simulované hodnoty pro zapojení jednovidového optického vlákna a bezdrátové spoje jsou zobrazeny v tabulce 11.

f [GHz]	Test Model	C/N [dB]	EVM [%]
0,8	2	40	3,02
		35	3,31
		30	3,63
		25	3,91
		20	4,64
		15	7,28
		10	12,30
		5	16,29
0,8	3,2	40	3,50
		35	3,51
		30	3,65
		25	5,15
		20	9,24
		15	16,36
		10	33,64
		2,6	2
35	2,29		
30	2,78		
25	3,78		
20	5,61		
15	8,51		
10	13,66		
2,6	3,2		
		35	3,83
		30	4,15
		25	4,82
		20	6,57
		15	13,88
		10	25,22

Tab. 11 - Závislost simulovaných hodnot EVM na SNR pro zapojení SMF+FSO

Pro ukázkou jsou na obrázku 37 zobrazeny konstelační diagramy simulované v programu Optisystem pro E-UTRA model 3,2 a frekvenci 2,6 GHz.



Obr. 37 - Konstelační diagram LTE analyzátoru pro E-UTRA 3.2 a frekvenci 2,6 GHz a) pro C/N 40dB a b) pro C/N 10dB

Kompletní tabulka s nasimulovanými hodnotami odstupe LTE signálu k hladině šumu pro zapojení s jednovidovým optickým vláknem je uvedena v příloze E.

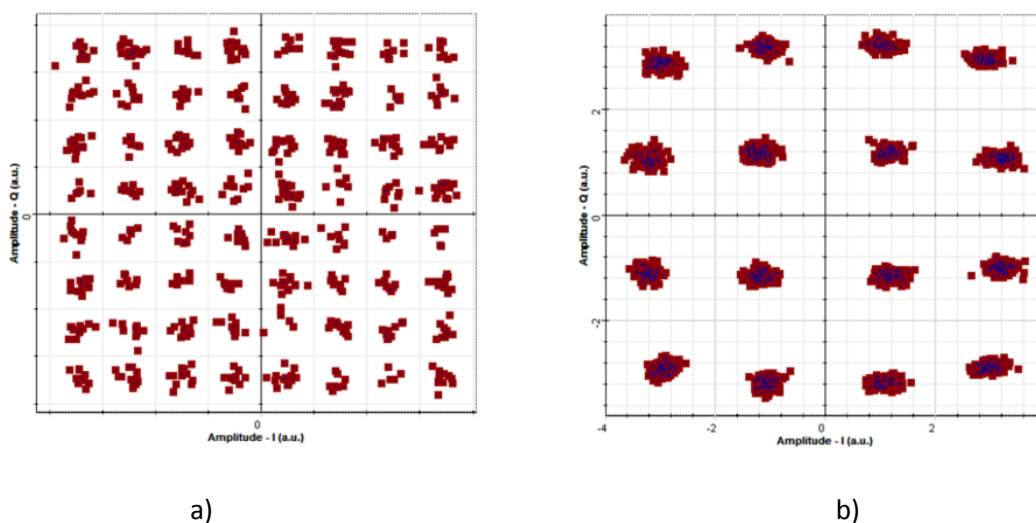
5.3 Simulace vlivu změny OSNR

Následně byl simulován vliv odstupů LTE signálu k optické hladině šumu. Schéma zapojení je stejné jako v kapitole 5.1. Změny OSNR bylo v simulacích docíleno změnou hladiny šumu v erbiovém zesilovači, protože optický attenuátor v simulacích ovlivňuje, jak parametry úrovně LTE signálu tak i hladinu šumu. Výsledné hodnoty pro zapojení jednovidového vlákna s bezdrátovým optickým spojem jsou zobrazeny v tabulce 12. Pro zapojení se samotným optickým vláknem jsou nasimulované hodnoty uvedeny v příloze F.

f [GHz]	Test Model	Útlum [dB]	OSNR [dB]	EVM [%]
2,6	2	0	29	3,11
		1	28	3,30
		2	27,2	4,05
		3	26,2	4,78
		4	25,1	5,63
		5	24	7,04
		6	23,2	8,50
		7	22,3	10,21
		8	21,3	11,94
		9	20,4	13,54
		10	19,3	15,33

Tab. 12 - Závislost simulovaných hodnot EVM na OSNR v zapojení SMF+FSO

Na obrázku 38 jsou zobrazeny konstelační diagramy LTE signálu a 16-QAM modulace simulované v programu Optisystem pro hodnotu OSNR 23,2 dB. Z obrázků je patrné, že pomocí programu Optisystem je možné zkoumat vliv EVM i v druhé polarizační větvi.



Obr. 38 - Simulované konstelační diagramy pro OSNR 23,2 dB a) LTE signál, b) 16-QAM modulace

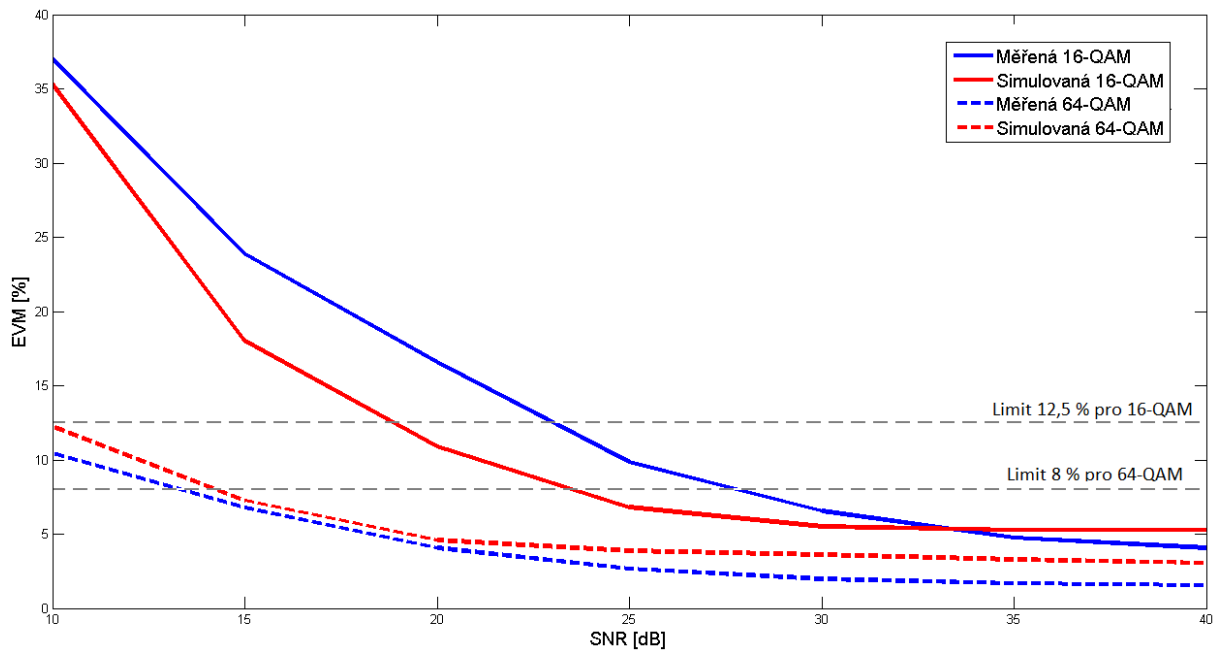
6. Porovnání měření a simulací

V závěrečné části diplomové práce bylo provedeno porovnání výsledků naměřených a simulovaných hodnot kvality přenosu LTE signálu. První část je věnována odstupu signálu k hladině šumu v elektrické části experimentu a druhá část se zabývá změnou odstupu signálu od hladiny šumu v optické části.

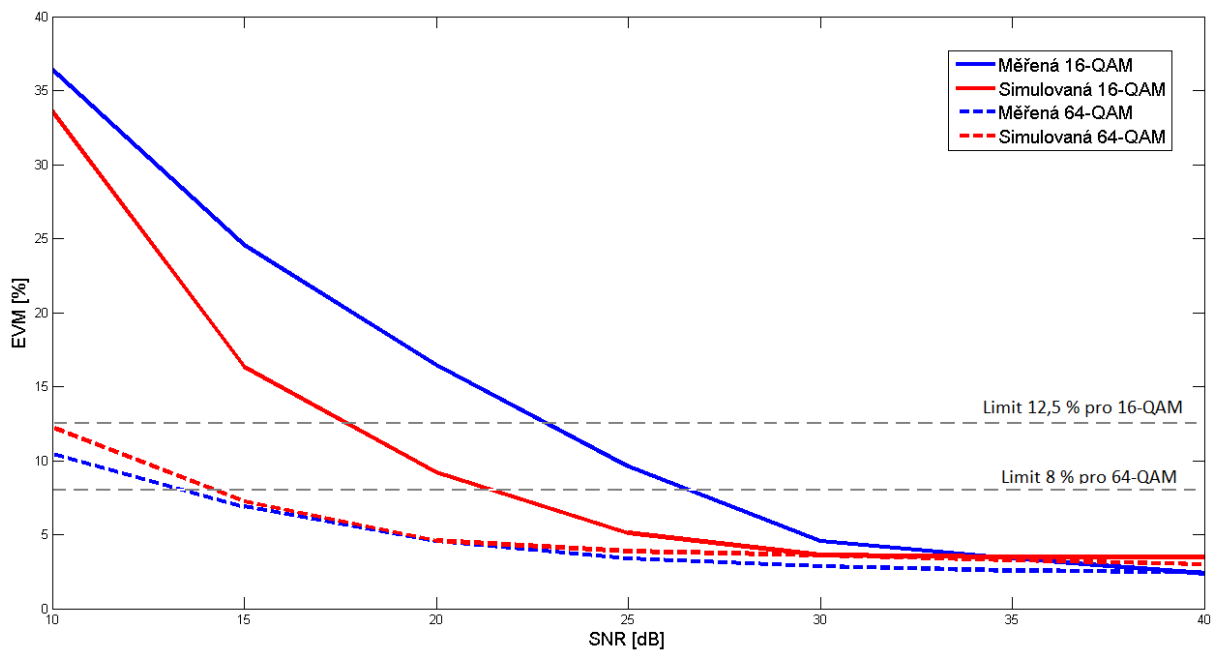
6.1 Porovnání výsledků SNR na EVM

Z porovnání výsledků naměřených dat s daty simulací zobrazených na obrázcích 39 a 40 je patrné, že pro model E-UTRA 2 rozdílové hodnoty EVM získané simulací odpovídají naměřeným hodnotám pro oba typy zapojení. Pro model E-UTRA 3.2 nenabývají nasimulované hodnoty parametru EVM tak rychlé strmosti, což je způsobeno tím, že parametry tohoto modelu nejdou v simulačním programu přesně nastavit. Výsledné hodnoty naměřených a simulovaných dat EVM E-UTRA modelu 3.2 se při hodnotě SNR 15 dB od sebe liší až o 8%. Pro model E-UTRA 2 se simulované a naměřené hodnoty liší maximálně o jednotky procent.

Z naměřených hodnot je patrné, že spoj pro model E-UTRA 3.2 je možné využívat bez výpadků spojení až do hodnoty SNR 25 dB poté je překročena hodnota 12,5%, která je zapotřebí pro bezchybný přenos. Pro model E-UTRA 2 využívající 64-QAM modulaci je možné dosáhnout stálého spojení až do hodnoty SNR 15 dB. Z toho je patrné, že testovací model E-UTRA 2 je odolnější vůči šumu. Změna frekvence z 0,8 na 2,6 GHz nemá na parametry kvality spojení téměř žádný vliv. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými a simulovanými pro frekvenci 2,6 GHz, je zřejmě způsoben nedokonale navrženou dolní propustí v QAM demodulátoru, což je možné vidět na grafech v příloze G a H.



Obr. 39 - Vliv SNR na EVM v zapojení se SMF pro 0,8 GHz

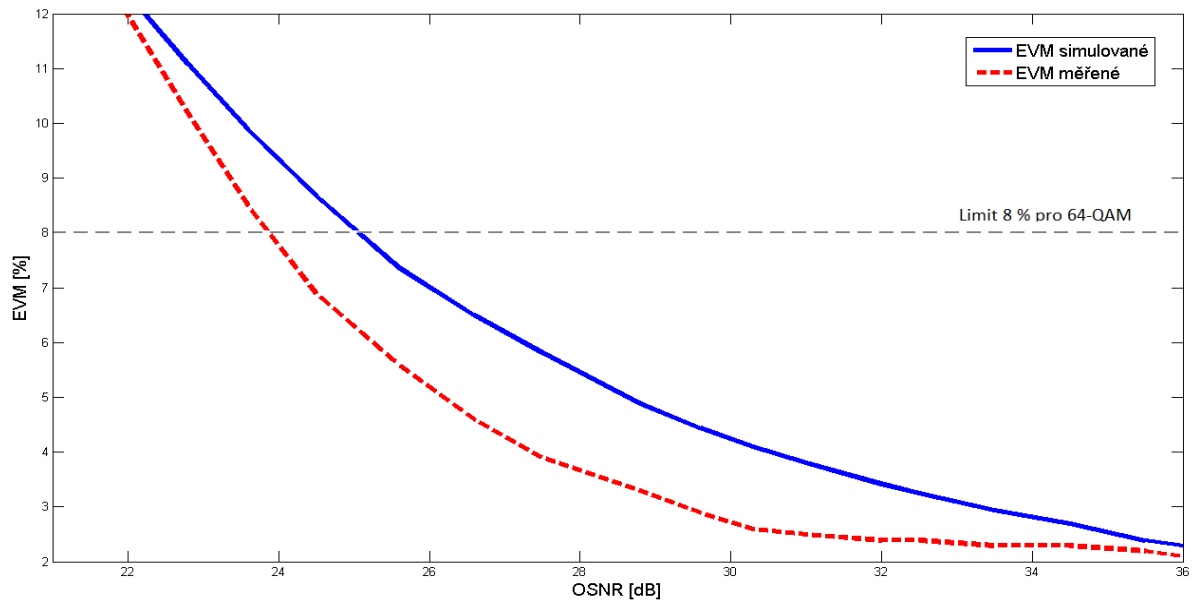


Obr. 40 - Vliv SNR na EVM v zapojení SMF + FSO pro 0,8 GHz

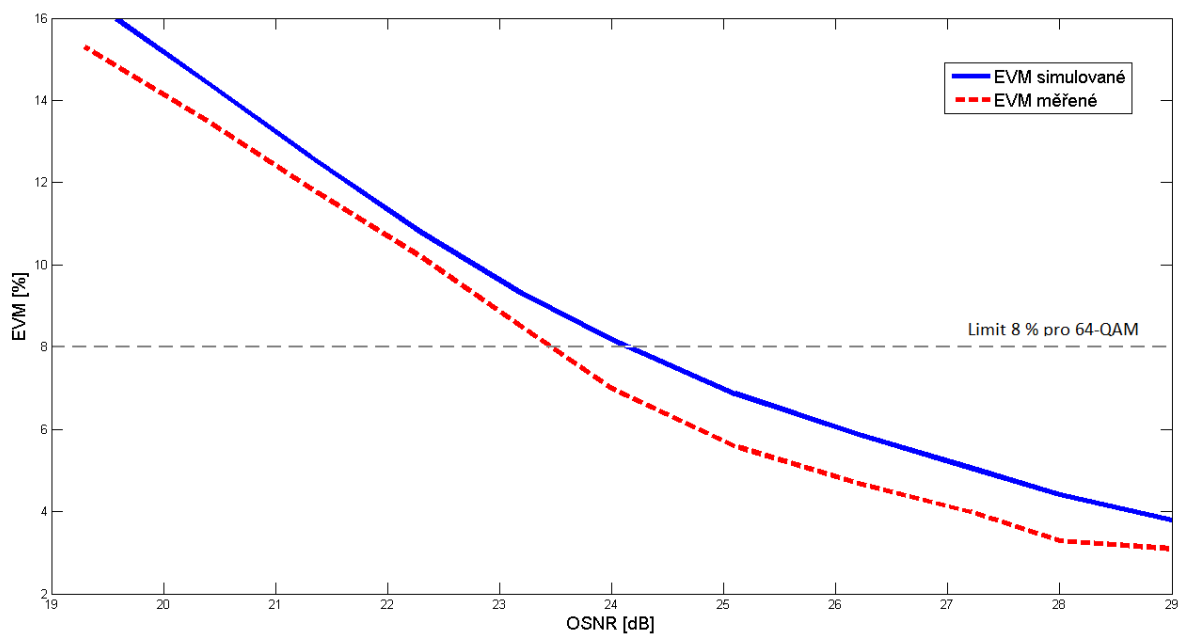
6.2 Porovnání simulovaných a naměřených výsledků OSNR na EVM

Vliv odstupů signálu k hladině optického šumu byl vyšetřován pro frekvenci 2,6 GHz a testovací model E-UTRA 2. Schéma zapojení má na kvalitu přenášeného signálu jen nepatrný vliv, kdy lépe vychází zapojení s kombinací jednovlákenného optického vlákna

a bezdrátového spoje, což je možné vidět na obrázcích 41 a 42. Z naměřených hodnot je patrné, že spoj pro model E-UTRA 2 je možné využívat bez výpadků spojení až do hodnoty OSNR 24 dB poté je překročena hodnota 8%, která je potřebná pro bezchybný přenos.



Obr. 41 - Vliv OSNR na EVM v zapojení SMF pro 2,6 GHz



Obr. 42 - Vliv OSNR na EVM v zapojení SMF + FSO pro 2,6 GHz

7. Závěr:

Technologie přenosu rádiových signálů prostřednictvím optických infrastruktur je možné využít při přenosu velkých objemů dat mezi základnovými stanicemi mobilních operátorů nebo pro zajištění rozšíření mobilních technologií jako je LTE.

V této diplomové práci bylo postupně popsáno několik typů technologie přenosu rádiových signálů prostřednictvím optických vláken a bezdrátových optických spojů, ať už se jednalo o přenosy v základním pásmu, rádiovém pásmu nebo v digitální podobě a jejich využití. Poté byly vysvětleny principy LTE technologie z hlediska struktury rámců, popsány E-UTRA testovací modely a techniky přenosu (pro uživatele i vysílače).

Dále byly realizovány tři experimentální měření parametru EVM. Z měření atmosférických turbulencí vyplynulo, že zásadní vliv na přenášený LTE signál mají především teplotní fluktuace, které dokáží ovlivnit hodnotu EVM až o 3 %, což by vedlo k častým výpadkům spojení. Konfigurace optického zapojení má na bezdrátový spoj jen nepatrný vliv. Pro zkoumání vlivu SNR na LTE signál bylo zjištěno, že zvolená nosná frekvence LTE signálu má na kvalitu přenosu jen minimální vliv. Z naměřených hodnot je patrné, že spoj v konfiguraci jednovláknového vlákna s bezdrátovým optickým spojením pro model E-UTRA 3.2 je možné využívat bez výpadků spojení až od hodnoty SNR 25 dB, pro menší hodnoty je překročena hodnota 12,5 % potřebná pro bezchybný přenos. Pro model E-UTRA 2 využívající 64-QAM modulaci je možné dosáhnout stálého spojení již od hodnoty SNR 15 dB. Z měření vlivu OSNR vyplývá, že je možné provozovat spojení až od hodnoty OSNR 24 dB, poté je překročen limit 8 % pro E-UTRA model 2. Rozdíl v konfiguraci jednovláknového vlákna a spojení bezdrátového spoje a jednovláknového vlákna je minimální. Závěrem byly provedeny simulace a jejich porovnání s měřením. Výsledky simulací E-UTRA modelu 2 odpovídají naměřeným průběhům, pro model E-UTRA 3.2 nebylo možné dosáhnout naměřených hodnot z důvodu omezenosti nastavení přesných parametrů testovací modelu v programu Optisystem.

Seznam použité literatury:

- [1] Hall, R.N., Fenner, G.E., Kingsley, J.D. et al., Coherent light emission from GaAs junctions. *Phys. Rev.*, 1962
- [2] OGAWA, H. Millimeter-wave wireless personal area network (WPAN) and its standardization activity within IEEE802.15. In: *ICMMT 4th International Conference on, Proceedings Microwave and Millimeter Wave Technology, 2004*
- [3] M. Suzuki and T. Otani, "High Speed (40-160Gbit/s) WDM Transmission in Terrestrial Networks," in *Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest, Optical Society of America, 2003*
- [4] Gomes, Nathan J., Paulo Monteiro, and Atilio Gameiro. *Next generation wireless communications using radio over fiber*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2012.
- [5] Prasad, Ramjee. *OFDM for wireless communications systems*. Boston: Artech House, 2004
- [6] Lee, Chi H. *Microwave photonics*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013
- [7] P. Hartmann, X. Qian, R. V. Penty, and I. H. White, "High Performance Uncooled 1.3 μ m VCSELs for RF-over-Fiber Applications," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications Systems Technologies, Technical Digest, Optical Society of America, 2005*
- [8] 3GPP Release 8, [online], [cit. 2014-12-16], dostupný z WWW: <<http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>>
- [9] H. Holma and A. Toskala, "LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access," John Wiley & Sons Ltd., 2009
- [10] *IWCMC 2011 the 7th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference, Istanbul, Turkey, July 4-8, 2011*. Piscataway, IEEE, 2011.
- [11] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation, [online], [cit. 2014-12-16], dostupný z WWW: <<http://www.3gpp.org/dynareport/36211.htm>>
- [12] Modulace OFDM, [cit. 2014-12-17], dostupný z WWW: < [cit. 2014-12-16], dostupný z WWW: <coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=7982>
- [13] R. O'Neill and L. N. Lopes, "Envelope variations and spectral splatter in clipped multicarrier signals," in *Proc., PMRC'95, Sept 1995*

- [14] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification, [online], [cit. 2014-12-16], dostupný z WWW: <
<http://www.3gpp.org/dynareport/36521-1.htm>>
- [15] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) conformance testing, [online], [cit. 2014-12-16], dostupný z WWW: <
<http://www.3gpp.org/dynareport/36141.htm>>
- [16] D. Killinger, "Free space optics for laser communication through the air," Opt. Photon. News, vol. 13, no. 10, Oct. 2002.
- [17] D. Rodewald, "MRV introduces industry's first 10G ethernet wireless point-to-point system," MRV Communications, Inc., Chatsworth, CA, USA, 2008.
- [18] Khalighi, M.A., Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2236, 2014
- [19] Recommendation ITU-R P.1817, [online], [cit. 2014-12-20], dostupný z WWW: <
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-1-201202-I!!PDF-E.pdf>
- [20] Recommendation ITU-R P.1814, [online], [cit. 2014-12-20], dostupný z WWW: <
<http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.1814-0-200708-I!!PDF-E.pdf>>
- [21] D. S. Kim, "Hybrid Free Space and Radio Frequency Switching", Master Degree Thesis, University of Maryland, 2008.
- [22] R. H. Khandekar, "Advanced Wavefront Manipulation Technologies In Optical Systems", Dissertation Thesis, University of Binghamton, 2008.
- [23] Gradientní optické prvky, [online], [cit. 2015-04-22], dostupný z WWW: <
http://www1.fs.cvut.cz/cz/U12110/vyzkum/Zeliv08/cd/PMO/Zeliv_PMO_03.pdf>
- [24] Generation of Vector Signals at Microwave Frequencies, [online], [cit. 2014-12-22], dostupný z WWW: <
http://cdn.rohdeschwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1gp76/1GP76_1E.pdf>
- [25] LTE Frequency Bands & Spectrum Allocations, [online], [cit. 2014-12-22], dostupný z WWW: <
<http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/lte-long-term-evolution/lte-frequency-spectrum.php>>

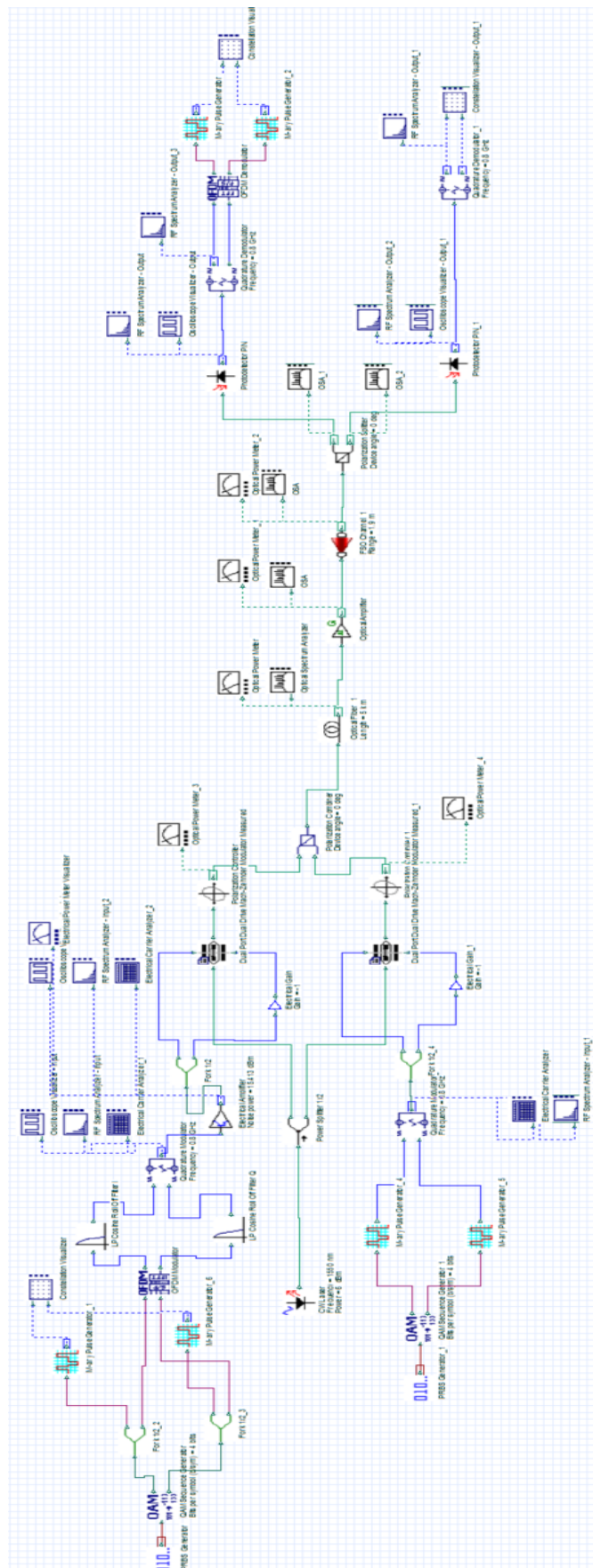
Seznam příloh:

- A: Tabulka frekvenčních pásek LTE
- B: Celkové schéma zapojení v programu Optisystem
- C: Parametry fyzické vrstvy E-UTRA modelu 2
- D: Parametry fyzické vrstvy E-UTRA modelu 3.2
- E: Simulované hodnoty vlivu SNR na EVM pro zapojení s SMF
- F: Simulované hodnoty vlivu OSNR na EVM pro zapojení s SMF
- G: Vliv SNR na EVM v zapojení SMF pro 2,6 GHz
- H: Vliv SNR na EVM v zapojení SMF+FSO pro 2,6 GHz

Příloha A: Frekvenční pásma LTE [25]

E-UTRA Band	Uplink (UL) eNode B receive UE transmit			Downlink (DL) eNode B transmit UE receive			UL-DL Band separation	Duplex Mode
	FUL_low	–	FUL_high	FDL_low	–	FDL_high	FDL_low - FUL_high	
1	1920 MHz	–	1980 MHz	2110 MHz	–	2170 MHz	130 MHz	FDD
2	1850 MHz	–	1910 MHz	1930 MHz	–	1990 MHz	20 MHz	FDD
3	1710 MHz	–	1785 MHz	1805 MHz	–	1880 MHz	20 MHz	FDD
4	1710 MHz	–	1755 MHz	2110 MHz	–	2155 MHz	355 MHz	FDD
5	824 MHz	–	849 MHz	869 MHz	–	894 MHz	20 MHz	FDD
6	830 MHz	–	840 MHz	875 MHz	–	885 MHz	35 MHz	FDD
7	2500 MHz	–	2570 MHz	2620 MHz	–	2690 MHz	50 MHz	FDD
8	880 MHz	–	915 MHz	925 MHz	–	960 MHz	10 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	–	1784.9 MHz	1844.9 MHz	–	1879.9 MHz	60 MHz	FDD
10	1710 MHz	–	1770 MHz	2110 MHz	–	2170 MHz	340 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	–	1452.9 MHz	1475.9 MHz	–	1500.9 MHz	23 MHz	FDD
12	[TBD]	–	[TBD]	[TBD]	–	[TBD]	[TBD]	FDD
13	777 MHz	–	787 MHz	746 MHz	–	756 MHz	21	FDD
14	788 MHz	–	798 MHz	758 MHz	–	768 MHz	20	FDD
...								
33	1900 MHz	–	1920 MHz	1900 MHz	–	1920 MHz	N/A	TDD
34	2010 MHz	–	2025 MHz	2010 MHz	–	2025 MHz	N/A	TDD
35	1850 MHz	–	1910 MHz	1850 MHz	–	1910 MHz	N/A	TDD
36	1930 MHz	–	1990 MHz	1930 MHz	–	1990 MHz	N/A	TDD
37	1910 MHz	–	1930 MHz	1910 MHz	–	1930 MHz	N/A	TDD
38	2570 MHz	–	2620 MHz	2570 MHz	–	2620 MHz	N/A	TDD
39	1880 MHz	–	1920 MHz	1880 MHz	–	1920 MHz	N/A	TDD
40	2300 MHz	–	2400 MHz	2300 MHz	–	2400 MHz	N/A	TDD

Příloha B: Schéma zapojení s přístroji v programu Optisystem



Příloha C: Parametry fyzické vrstvy E-UTRA modelu 2 [15]

Parameter	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Reference, Synchronisation Signals						
RS boosting, $P_B = E_B/E_A$	1	1	1	1	1	1
Synchronisation signal EPRE / E_{RS} [dB]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Reserved EPRE / E_{RS} [dB]	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf
PBCH						
PBCH EPRE / E_{RS} [dB]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Reserved EPRE / E_{RS} [dB]	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf
PCFICH						
# of symbols used for control channels	2	1	1	1	1	1
PCFICH EPRE / E_{RS} [dB]	0	0	0	0	0	0
PHICH						
# of PHICH groups	1	1	1	2	2	3
# of PHICH per group	2	2	2	2	2	2
PHICH BPSK symbol power / E_{RS} [dB]	-3.010	-3.010	-3.010	-3.010	-3.010	-3.010
PHICH group EPRE / E_{RS} [dB]	0	0	0	0	0	0
PDCCH						
# of available REGs	23	23	43	90	140	187
# of PDCCH	1	1	1	1	1	1
# of CCEs per PDCCH	1	1	2	2	2	2
# of REGs per CCE	9	9	9	9	9	9
# of REGs allocated to PDCCH	9	9	18	18	18	18
# of <NIL> REGs added for padding	14	14	25	72	122	169
PDCCH REG EPRE / E_{RS} [dB]	0	0	0	0	0	0
<NIL> REG EPRE / E_{RS} [dB]	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf
PDSCH						
# of 64QAM PDSCH PRBs within a slot for which EVM is measured	1	1	1	1	1	1
PRB $P_A = E_A/E_{RS}$ [dB]	0	0	0	0	0	0
# of PDSCH PRBs which are not allocated	5	14	24	49	74	99
PRB $P_A = E_A/E_{RS}$ [dB]	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf

Príloha D: Parametry fyzickej vrstvy E-UTRA testovacieho modelu 3.2 [15]

Parameter	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Reference, Synchronisation Signals						
RS boosting, $P_B = E_B/E_A$	1	1	1	1	1	1
Synchronisation signal EPRE / E_{RS} [dB]	0.000	1.573	2.426	2.426	3.005	2.426
Reserved EPRE / E_{RS} [dB]	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf
PBCH						
PBCH EPRE / E_{RS} [dB]	0.000	1.573	2.426	2.426	3.005	2.426
Reserved EPRE / E_{RS} [dB]	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf
PCFICH						
# of symbols used for control channels	2	1	1	1	1	1
PCFICH EPRE / E_{RS} [dB]	3.222	0	0	0	0	0
PHICH						
# of PHICH groups	1	1	1	2	2	3
# of PHICH per group	2	2	2	2	2	2
PHICH BPSK symbol power / E_{RS} [dB]	-3.010	-3.010	-3.010	-3.010	-3.010	-3.010
PHICH group EPRE / E_{RS} [dB]	0	0	0	0	0	0
PDCCH						
# of available REGs	23	23	43	90	140	187
# of PDCCH	2	2	2	5	7	10
# of CCEs per PDCCH	1	1	2	2	2	2
# of REGs per CCE	9	9	9	9	9	9
# of REGs allocated to PDCCH	18	18	36	90	126	180
# of <NIL> REGs added for padding	5	5	7	0	14	7
PDCCH REG EPRE / E_{RS} [dB]	0.792	2.290	1.880	1.065	1.488	1.195
<NIL> REG EPRE / E_{RS} [dB]	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf	-inf
PDSCH						
# of 16QAM PDSCH PRBs within a slot for which EVM is measured	4	7	15	30	50	60
PRB $P_A = E_A/E_{RS}$ [dB]	-3 (*)	-3	-3	-3	-3	-3
# of QPSK PDSCH PRBs within a slot for which EVM is not measured (used for power balancing only)	2	8	10	20	25	40
PRB $P_A = E_A/E_{RS}$ [dB]	3.005 (*)	1.573	2.426	2.426	3.005	2.426

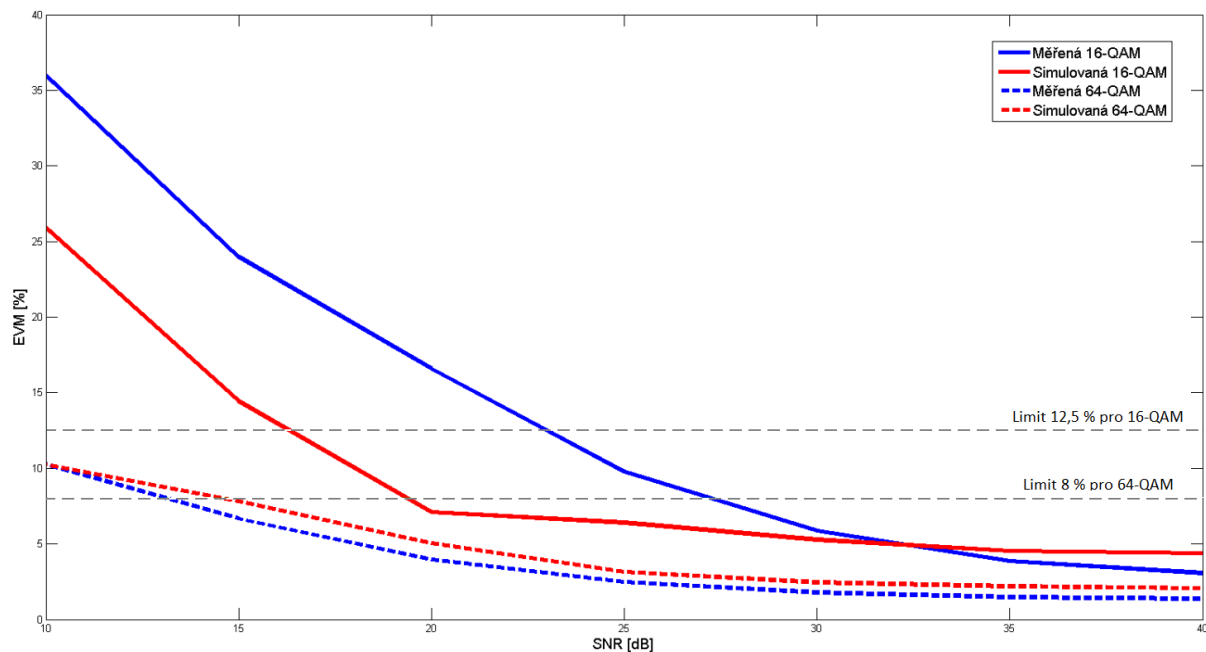
Příloha E: Simulované hodnoty vlivu SNR na EVM pro zapojení s SMF

f [GHz]	Test Model	C/N [dB]	EVM [%]	f [GHz]	Test Model	C/N [dB]	EVM [%]
0,8	2	40	3,10	2,6	2	40	2,10
		35	3,31			35	2,21
		30	3,63			30	2,47
		25	3,92			25	3,16
		20	4,64			20	5,06
		15	7,29			15	7,85
		10	12,30			10	10,25
		5	16,30			5	18,86
0,8	3,2	40	5,30	2,6	3,2	40	4,40
		35	5,31			35	4,55
		30	5,55			30	5,31
		25	6,85			25	6,43
		20	10,94			20	7,12
		15	18,04			15	14,48
		10	35,34			10	25,92

Příloha F: Simulované hodnoty vlivu OSNR na EVM pro zapojení s SMF

f [GHz]	Test Model	Útlum [dB]	OSNR [dB]	EVM [%]
2,6	2	0	36	2,10
		1	35,5	2,20
		2	34,5	2,50
		3	33,5	2,74
		4	32,5	3,06
		5	32	3,23
		6	31	3,61
		7	30,3	3,91
		8	29,6	4,24
		9	28,8	4,69
		10	27,5	5,62
		11	26,6	6,30
		12	25,6	7,17
		13	24,5	8,49
		14	23,6	9,69
		15	22,8	10,89
		16	21,9	12,33
17	21	13,90		

Příloha G: Vliv SNR na EVM v zapojení SMF pro 2,6 GHz



Příloha H: Vliv SNR na EVM v zapojení SMF+FSO pro 2,6 GHz

