



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Elektrotechnická fakulta
Katedra elektromagnetického pole**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv osob na komunikace ve viditelném světle (VLC)

Influence of people on Visible Light Communications (VLC)

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Sítě elektronických komunikací

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

Konzultant specialista: Ing. Petr Chvojka

Bc. David Komárek

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Komárek David**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Vliv osob na komunikace ve viditelném světle (VLC)**

Pokyny pro vypracování:

Analýzujte využití komunikace ve viditelné části elektromagnetického spektra (Visible Light Communications, VLC) využívajících LED jak k osvětlení místností, tak i ke komunikačním účelům. Zaměřte se zejména na pokrytí vnitřních prostor (indoor coverage) a na vliv pohybu osob (od jednotlivců po skupiny) na statistiky příjmu a pokrytí v různých prostředích (kancelář, chodba, hala). Na základě měření ve vybraných lokalitách odvoďte statistiky přijímaného optického signálu pro prázdné místnosti a jejich změny při pohybu osob i natočení optického přijímače.

Konzultant specialista: Ing. Petr Chvojka

Seznam odborné literatury:

- [1] Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., Optical wireless communications. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2012.
- [2] Jungnickel, V.; Pohl, V.; Nonnig, S.; Von Helmholtz, C., "A physical model of the wireless infrared communication channel," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.20, no.3, pp.631,640, Apr 2002
- [3] Burton, A.; Le-Minh, H.; Ghassemlooy, Z.; Rajbhandari, S.; Haigh, P.A., "Performance analysis for 180° receiver in visible light communications," Communications and Electronics (ICCE), 2012 Fourth International Conference on , vol., no., pp.48,53, 1-3 Aug. 2012

Vedoucí: prof. Stanislav Zvánovec Ing., Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 2. 2. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci 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.

A solid black rectangular box used to redact the student's signature.

.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu této práce prof. Ing. Stanislavu Zvánovci, Ph.D. a konzultantu Ing. Petru Chvojkovi za cenné rady a pomoc, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Dále bych rád poděkoval Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za pomoc s pokročilými metodami zpracování obrazu, celé mé rodině a všem ostatním, kteří mi jakýmkoliv způsobem pomáhali a podporovali mě nejen při tvorbě této práce, ale i během celého studia.

Anotace

V této diplomové práci je analyzováno využití komunikace ve viditelné části elektromagnetického spektra (VLC) využívající LED jak k osvětlení místností, tak i ke komunikačním účelům. Statistiky příjmu byly odvozeny na základě měření se sférickou kamerou AllSkyCam ASC-N1. V prostředí Matlab bylo určeno zastínění zorného pole vlivem proměnného počtu osob v místnosti. Byl zkoumán vliv natočení přijímače na zastínění a bitovou chybovost. Také byly určeny statistiky příjmu pro kombinovaný přijímač s rozšířeným zorným polem.

Klíčová slova

komunikace ve viditelném světle, FOV, zastínění, vliv osob, BER, komunikace uvnitř budov

Summary

In this thesis use of visible light communication (VLC), which uses LEDs simultaneously for room illumination and for providing data transmission, was analyzed. Received data statistics were derived by measuring with spherical camera AllSkyCam ASC-N1. The shadowing of the field of view due to the variable number of people in the room was processed in Matlab. The influence of rotation of the receiver on shadowing and bit error rate was tested. Received data statistics were also determined for receiver with extended field of view.

Keywords

visible light communication, field of view, shadowing, influence of people, BER, indoor communication

Obsah

1. Úvod	1
2. Optická bezdrátová komunikace.....	2
2.1. Optická vs. rádio frekvenční bezdrátová komunikace.....	2
2.2. Komunikace v infračerveném světle	3
2.3. Komunikace ve viditelném světle.....	3
3. Optické prvky.....	5
3.1. Optický zdroj	5
3.2. Optický detektor	7
3.2.1. Využití CMOS kamery.....	8
4. Model VLC	11
4.1. Možnosti šíření	11
4.2. Modulace	12
5. Pokrytí vnitřních prostor	14
5.1. Porovnání RF a VLC	14
6. Experimentální část - testovací scénáře	14
6.1. Prostory.....	15
6.2. Poloha a orientace přijímače.....	15
6.3. Počet osob.....	15
7. Měření s hemisférickou kamerou All Sky Cam	16
7.1. Určení zastínění	17
7.2. Místnost	17
7.2.1. Přijímač na stole	17
7.2.2. Přijímač ve vodorovné poloze.....	19
7.2.3. Nakloněný přijímač	21
7.3. Chodba.....	23
7.3.1. Přijímač ve vodorovné poloze.....	23
7.3.2. Nakloněný přijímač	25
8. Měření s mobilním telefonem Samsung.....	27
8.1. Určení zastínění	27
8.2. Měření náklonu.....	28

9. Statistiky příjmu	30
9.1. Výpočet BER.....	30
9.2. Vliv zastínění na bitovou chybovost BER.....	33
9.3. Segmentace snímku	35
9.4. Vliv náklonu přijímače	37
9.5. Vliv počtu osob.....	42
9.6. Kombinovaný přijímač	43
10. Závěr	46
Literatura.....	47
Seznam příloh	49

Seznam obrázků

Obr. 1 - Princip OWC - překresleno z [3]	2
Obr. 2 - Spektrum elektromagnetického záření - převzato z [5]	3
Obr. 3- Princip funkce LED diody – překresleno z [7]	5
Obr. 4 - Tvorba bílého světla modrou LED s fosforem - překresleno z [9]	6
Obr. 5 - Tvorba bílého světla RGB kombinací - převzato z [9]	7
Obr. 6 - Kombinovaný přijímač 180° - převzato z [11]	8
Obr. 7 - Schéma CMOS senzoru – překresleno z [12]	9
Obr. 8 - Princip rolovací závěrky – převzato z [12]	9
Obr. 9 - Příklad obrazu CMOS kamery (výsledek rolovací závěrky při 1,1 kBd) – převzato z [12]	10
Obr. 10 - Možnosti šíření: a) přímá LOS, b) nepřímá LOS, c) Rozptýlená konfigurace, d) tracked konfigurace- převzato z [3]	11
Obr. 11 - Struktura rámce OOK se stmíváním - překresleno z [14]	12
Obr. 12 - Princip regulace stmívání VPPM	13
Obr. 13 - Chromatický diagram xy - převzato z [15]	13
Obr. 14 - Pohyb osob a umístění přijímače a) místnost, b) chodba	16
Obr. 15 - Postup zpracování obrazu: a) stupně šedi, b) rozdíl, c) černá a bílá, d) vyhlazený ..	17
Obr. 16 - Měření místnosti (stůl) - Zastínění v čase	18
Obr. 17 - Měření místnosti (stůl) - Histogram zastínění	18
Obr. 18 - Měření místnosti (stůl) - Kumulativní relativní četnost zastínění	19
Obr. 19 - Měření místnosti (držení rovně) - Zastínění v čase	20
Obr. 20 - Měření místnosti (držení rovně) - Histogram zastínění	20
Obr. 21 - Měření místnosti (držení rovně) - Kumulativní relativní četnost zastínění	21
Obr. 22 - Měření místnosti (držení šikmo) - Zastínění v čase	22
Obr. 23 – Měření místnosti (držení šikmo) - Histogram zastínění	22
Obr. 24 - Měření místnosti (držení šikmo) - Kumulativní relativní četnost zastínění	23
Obr. 25 - Měření chodby (držení rovně) - Zastínění v čase	24
Obr. 26 - Měření chodby (držení rovně) - Histogram zastínění	24
Obr. 27 - Měření chodby (držení rovně) - Kumulativní relativní četnost zastínění	25
Obr. 28 - Měření chodby (držení šikmo) - Zastínění v čase	25
Obr. 29 - Měření chodby (držení šikmo) - Histogram zastínění	26
Obr. 30 - Měření chodby (držení šikmo) - Kumulativní relativní četnost zastínění	26
Obr. 31 - Měřené prostory: a) vestibul metra; b) nádražní hala	27
Obr. 32 – Ukázka úspěšného určení zastínění	28
Obr. 33 - Ukázka neúspěšného určení zastínění	28
Obr. 34 - Měření náklonu mobilního telefonu	29
Obr. 35 - Histogram měření náklonu mobilního telefonu	29
Obr. 36 - Závislost BER na SNR pro OOK-NRZ	31
Obr. 37 - Závislost přijatého výkonu P_{rx} na BER	32
Obr. 38 - Závislost FOV_{ef} na zastínění	34
Obr. 39 - Graf závislosti BER na FOV	34
Obr. 40 - Graf závislosti BER na zastínění	35
Obr. 41 - Rozdělení obrazu pro simulaci kombinovaného přijímače 180°	35
Obr. 42 - Výřez detektoru č. 1 kombinovaného přijímače 180°	36
Obr. 43 - Rozdělení obrazu ve vertikální rovině	37
Obr. 44 – BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem -30° s proměnným počtem osob v místnosti	38

Obr. 45 – BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem +60° s proměnným počtem osob v místnosti	38
Obr. 46 - Relativní doba BER>10 ⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače položeného na stole s proměnným počtem osob v místnosti	39
Obr. 47 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem +45° s proměnným počtem osob v místnosti	40
Obr. 48 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem -60° s proměnným počtem osob v místnosti	40
Obr. 49 - Relativní doba BER>10 ⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače drženého uživatelem s proměnným počtem osob v místnosti	41
Obr. 50 - Relativní doba BER>10 ⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače s proměnným počtem osob v místnosti	42
Obr. 51- Relativní doba BER>10 ⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače položeného na stole s různým počtem osob v místnosti: a) 1 osoba, b) 2 osoby, c) 3 osoby, d) 4 osoby	43
Obr. 52 - Detail časové závislosti zastínění jednotlivých detektorů	44
Obr. 53 – Množství současně zastíněných detektorů	44

Seznam tabulek

Tab. 1 - Parametry pro výpočet přijatého výkonu [11]	31
Tab. 2 - Vypočtené hodnoty přijatého výkonu	32
Tab. 3 - Parametry pro výpočet vysílaného výkonu	33
Tab. 4 - Vypočtené hodnoty vysílaného výkonu	33
Tab. 5 - Relativní doba BER>10 ⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače s proměnným počtem osob v místnosti	42
Tab. 6 - Relativní doba současného zastínění detektorů	45

Seznam zkratek

ADC	Analog Digital Converter	Analogově digitální převodník
APD	Avalanche Photo Diode	Lavinová fotodioda
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovost
CAP	Carrier-less Amplitude and Phase modulation	Amplitudová a fázová modulace bez nosné vlny
CCD	Charge-Coupled Device	Zařízení s vázanými náboji
CMOS	Complementary Metal-Oxid-Semiconductor	Komplementární kov-oxid-polovodič
CSK	Color Shift Keying	Klíčování změnou barvy
EB	Exabyte (10 ¹⁸ byte)	Exa bajt (10 ¹⁸ bajtu)
FOV	Field Of View	Zorné pole
FSO	Free Space Optics	Optika ve volném prostoru
GEV	Generalized Extreme Value	Generalizovaná extrémní hodnota
HD	High Definition	Vysoké rozlišení
IR	Infra Red	Infračervený
LAN	Local Area Network	Lokální síť
LD	Laser Diode	Laserová dioda
LED	Light Emitting Diode	Dioda emitující světlo
LOS	Line Of Sight	Přímá viditelnost
NRZ	Non Return to Zero	Bez návratu k nule
OOK	On-Off Keying	Klíčování zapnuto-vypnuto
OPN	-	Oblast Prostorového Náboje
OWC	Optical Wireless Communication	Optická bezdrátová komunikace
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadrurní amplitudová modulace
RF	Radio Frequency	Rádiová frekvence
SSL	Solid State Lighting	Polovodičové osvětlení
UV	Ultra Violet	Ultrafialový
VLC	Visible Light Communication	Komunikace ve viditelném světle
VPPM	Variable Pulse Position Modulation	Modulace proměnnou pozicí pulsu
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexování dělením vlnové délky

1. Úvod

Komunikace mezi lidmi i přístroji je nezbytnou součástí moderní společnosti. Bezdrátová komunikace tvoří velkou část především v lokálních sítích LAN a komunikací na kratší vzdálenosti. Rádiové komunikace jsou velmi spolehlivé, avšak podléhají mnoha normám a rádio frekvenční (RF) pásmo je do desítek GHz téměř přeplněno. U optických bezdrátových komunikací (OWC) je velikou výhodou především její nezávanost na normy a Český telekomunikační úřad. Optickou komunikaci ve viditelném světle (VLC) lze využít i k osvětlení místností a s jejím využitím může být dosaženo úctyhodných přenosových rychlostí, až řádově Gbit/s [1].

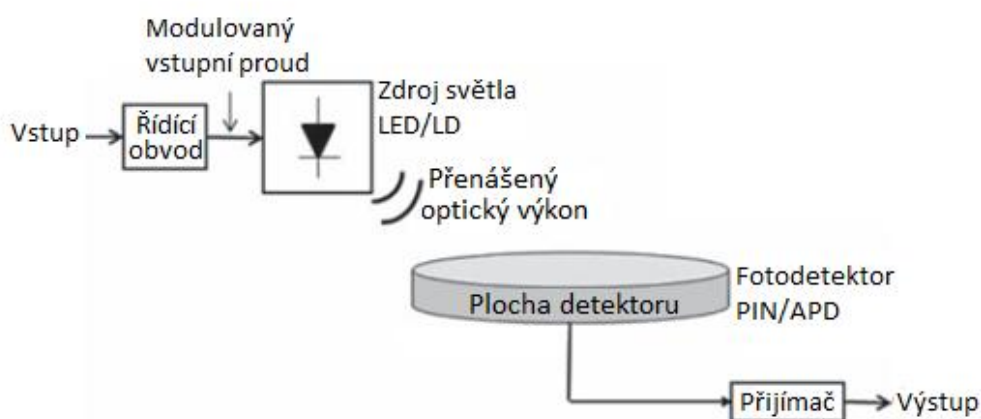
V posledních letech rapidně roste poptávka po bezdrátové datové komunikaci. Společnost Cisco předpokládá, že bude v roce 2018 přenášeno pomocí bezdrátových technologií 16 EB dat měsíčně (to odpovídá 1,8 milionu let dlouhému HD videozáznamu) [1]. S nasycením rádiové frekvenční kapacity se vyskytuje potřeba nalezení nového spektra pro datovou komunikaci [2]. To vedlo k hledání pásem mimo RF doménu. Optická bezdrátová komunikace, a především pak komunikace ve viditelném světle, se stala vhodným kandidátem pro doplnění konvenční RF komunikace zejména pro vnitřní (indoor) aplikace na krátkou vzdálenost (jednotky, maximálně desítky metrů).

Tato diplomová práce je nejprve zaměřena na krátké porovnání rádiového a optického bezdrátového přenosu a shrnuty jejich výhody a nevýhody. Dále jsou popsány základní charakteristiky optického bezdrátového spoje.

Hlavní část práce je věnována měření zastínění optického přijímače vlivem pohybu osob a odvození přenosových statistik pro takovéto případy. Je popsán vliv naklonění přijímače a vliv počtu osob na zastínění zorného pole přijímače. Na závěr je zkoumána možnost využití kombinovaného přijímače s rozšířeným zorným polem.

2. Optická bezdrátová komunikace

Optická bezdrátová komunikace spočívá ve vyzáření světla k poslání informace volným prostorem. Vlnová délka vyzářeného světla se pohybuje od 10 nm (UV-Ultraviolet) až do 10 μ m (IR-Infračervené), tedy i ve viditelném světle.



Obr. 1 - Princip OWC - překresleno z [3]

Na obr. 1 je zobrazen princip optické komunikace. Informace určená k přenosu vstupuje do řídicího obvodu, který moduluje zdroj světla. Ten transformuje elektrický signál na optický signál. Pro zdroj může být využito jak laserové diody (LD – Laser Diode), tak i světlo emitující diody (LED – Light Emitting Diode).

Vyslané světlo je na druhé straně zachyceno fotodiodou s intrinsickou vrstvou (PIN), případně lavinovou fotodiodou (APD – Avalanche Photo Diode). Proud vybuzený ve fotodiodě je zpracován v přijímači a převeden na původní informaci.

2.1. Optická vs. rádio frekvenční bezdrátová komunikace

Rádiový přenos nabízí vysokou mobilitu ve vnitřních i venkovních prostorech na krátké i dlouhé vzdálenosti. Rádiová technologie poskytuje výborné pokrytí na nižších datových rychlostech (přenos na 2,4 GHz nosné) vlivem difrakce a rozptylu rádiových vln. Je robustní vůči blokování a zastínění. Na vyšších frekvencích poskytuje rádiový přenos vysoké rychlosti, avšak stává se více závislý na přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem neboli je nutné LOS (Line Of Sight) a vyskytují se tu proto podobné problémy jako u optické bezdrátové komunikace. Na vyšších frekvencích jsou RF komponenty nákladné a hlavní výhody, jako pokrytí a mobilita, jsou již méně výrazné oproti OWC.

Naopak OWC systémy využívají široké nelicencované pásmo 700-10 000 nm a nabízí rychlosti přesahující 2,5 Gb/s na vlnovou délku na vzdálenost až 5 km [3]. Přesto, že má OWC velmi široké pásmo a dosahuje větší přenosové rychlosti než RF, je optická komunikace velmi závislá na LOS a proto je vhodná spíše pro doplnění RF, než jako jeho náhrada.

2.2. Komunikace v infračerveném světle

Přenos dat v infračerveném světle (IR) se již dlouho uplatňuje pro bezdrátovou optickou komunikaci, ať už pro dálkové ovládání, přenos dat mezi telefony, či jako spoje typu bod-bod na vzdálenosti až do 5 km.

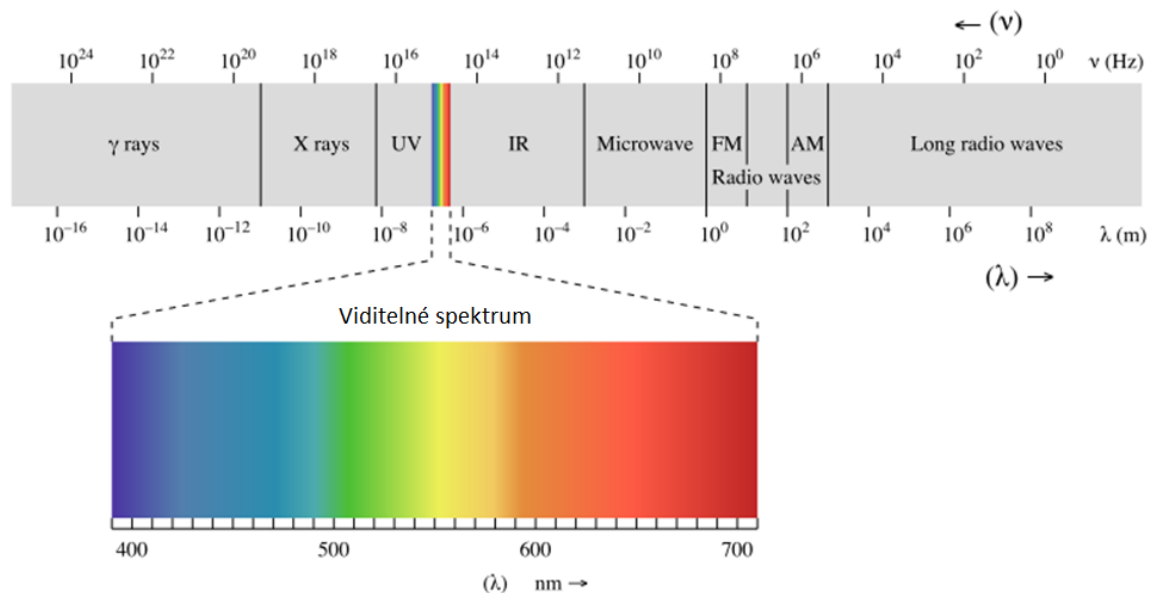
Infračervená část elektromagnetického spektra je rozdělena do několika částí:

- *Blízká IR (780-1400 nm)* – běžně využívána pro vláknové optické spoje
- *Krátkovlnná IR (1,4-3 μm)* – 1530-1560 nm je nejčastěji využívána pro komunikaci na dlouhou vzdálenost ve vláknové optice i FSO (Free Space Optic)
- *Střední IR (3-5 μm)*
- *Dlouhovlnná IR (8-15 μm)*
- *Vzdálená IR (15-1000 μm)*

Pro bezdrátovou optickou komunikaci je obvykle používána vlnová délka 900 nm - 3 μm , případně až 10 μm .

2.3. Komunikace ve viditelném světle

Myšlenka komunikace ve viditelném světle (VLC – Visible Light Communication) spočívá ve využití světla jak k osvětlení, tak k přenosu dat. Je využíváno viditelné spektrum na vlnových délkách 375 – 780 nm (400 – 800 THz) viz obr. 2. Šířka použitelného spektra je 10 000krát větší než u RF [4].



Obr. 2 - Spektrum elektromagnetického záření - převzato z [5]

Hlavní výhodou komunikace ve viditelném světle je, že osvětlení a komunikace probíhá zároveň a tudíž šetří energii. Je bezpečné používat ji i v místech, kde není povolena rádiová komunikace (např. v letectví či petrochemickém průmyslu). Další z mnoha výhod je cenová dostupnost světelných zdrojů a detektorů.

V dnešní době je na světě využíváno 7,3 miliardy tzv. „chytrých“ telefonů [1]. S rostoucím využitím polovodičového osvětlení (SSL – Solid-state Lighting) a integrací senzorů do mobilních telefonů a tabletů, roste i potenciální využití VLC.

K přenosu na rádiové frekvenci je zapotřebí antén a komplexních přijímačů. Naproti tomu je VLC mnohem jednodušší a používá jednoduché modulační metody podobné těm, jichž se využívá pro nízkonákladová IR zařízení, jako je dálkové ovládání. IR komunikace má výkonová omezení kvůli nebezpečí poškození zraku, kdežto LED světla mohou mít vysokou intenzitu a lze s nimi dosáhnout zároveň i vysokých rychlostí [6]. Paralelním použitím několika zdrojů a detektorů (MIMO – Multiple Input Multiple Output) lze zvýšit celkový výkon systému a tím i spektrální účinnost a zároveň snížit bitovou chybovost (BER – Bit Error Rate) [2].

Komunikace ve viditelném světle má celou řadu výhod, mezi něž patří zejména:

- *Široké, nelicencované pásmo* - volné k použití.
- *Vysoká hustota dat* - viditelné světlo může být použito k osvětlení velmi malých oblastí, kdežto RF se rozšiřuje a dochází k interferencím.
- *Vysoká rychlost přenosu dat* - díky nízké interferenci, širokému pásmu a vysoké intenzitě výkonu.
- *Jednoduché plánování kapacity* - dobrý, silný signál je doslova vidět.
- *Nízká cena* - vyžaduje méně součástek než RF.
- *Úspora energie* - LED světlo je využíváno k osvětlení místnosti a spotřeba energie na přenos dat je již nepatrná.
- *Nehazardní* - přenos světla na rozdíl od RF neinterferuje s elektrickými obvody (interference mohou být v některých prostředích nebezpečné, např. v letadle).
- *Bezpečnost* - přenos probíhá v malé oblasti a neprochází zdí, tudíž lze těžko odposlechnout.
- *Kontrola* - data mohou být přímo nasměrována a uživatel vidí, kam směřují.

VLC je vhodná především pro vnitřní využití, kde je použita pro osvětlení prostor a přenos dat, mohla by však najít využití i pro venkovní aplikace. U městského osvětlení, využívajícího LED diod, představuje každá lampa potenciální vysílač, díky čemuž lze veřejné osvětlení využít pro přenos dat. Řada automobilů je vybavena LED světlomety, VLC by tak bylo možné využít i v dopravě, například jako protikolizní opatření. Brzdící automobil by brzdovými světly vyslal zprávu, načež by mohlo včas reagovat vozidlo jedoucí za ním. Další uplatnění v dopravě by mohla VLC nalézt ve využití semaforů k vysílání informací o dopravní situaci. [1]

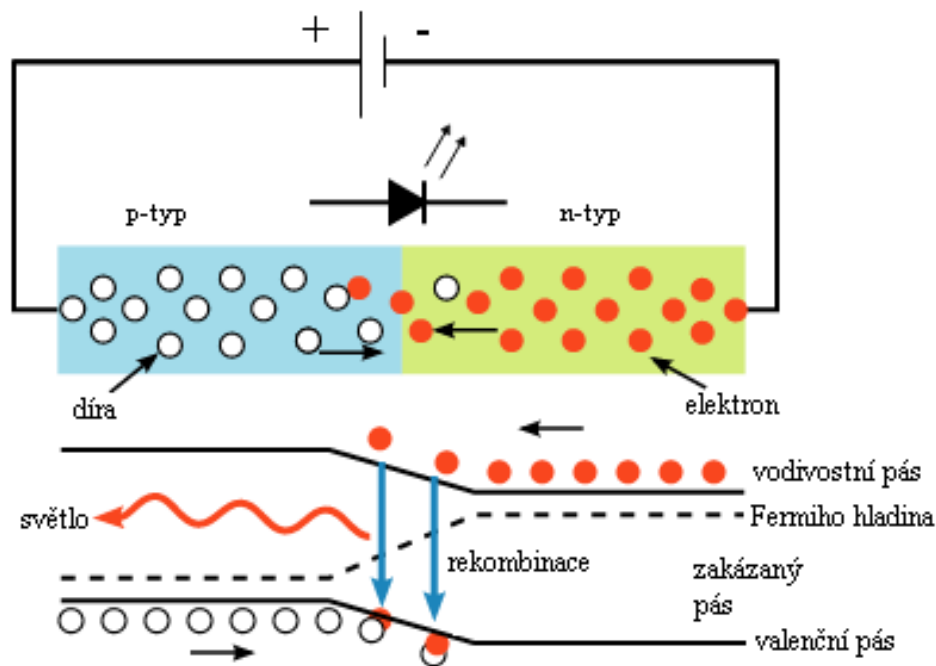
Zajímavou možností VLC je určování polohy, neboli VLP (Visible Light Positioning) [4]. To by mohlo být využito pro navigaci uvnitř větších budov, např. v nemocnicích, či k navigaci nevidomých osob ve vnitřních prostorech.

3. Optické prvky

3.1. Optický zdroj

Optický zdroj převádí elektrický signál na optický. Jako zdroj světla bývá nejčastěji využívána LED dioda.

LED dioda neboli elektroluminiscenční dioda, je polovodičová součástka s P-N přechodem, která je schopna generovat elektromagnetické záření ve formě UV, IR nebo viditelného světla. Princip funkce LED diody je zobrazen na obr. 3.



Obr. 3- Princip funkce LED diody – překresleno z [7]

Přiložením napětí v propustném směru dojde ke snížení energetické bariéry a zúžení OPN (oblast prostorového náboje). Díry ve valenčním pásu polovodiče P driftnou do oblasti P-N přechodu, kde překonají sníženou energetickou bariéru, což má za následek injekci děr do N oblasti [8]. V oblasti N se injektované díry stanou minoritními a zrekombinují s majoritními elektrony. Elektrony jsou vybudeny do vyšších energetických stavů. Po určité době zrekombinují a vrací se zpět do stabilního stavu, během čehož vyzáří část energie ve formě fotonu. Vlnová délka vyzářeného záření je dána šířkou zakázaného pásu.

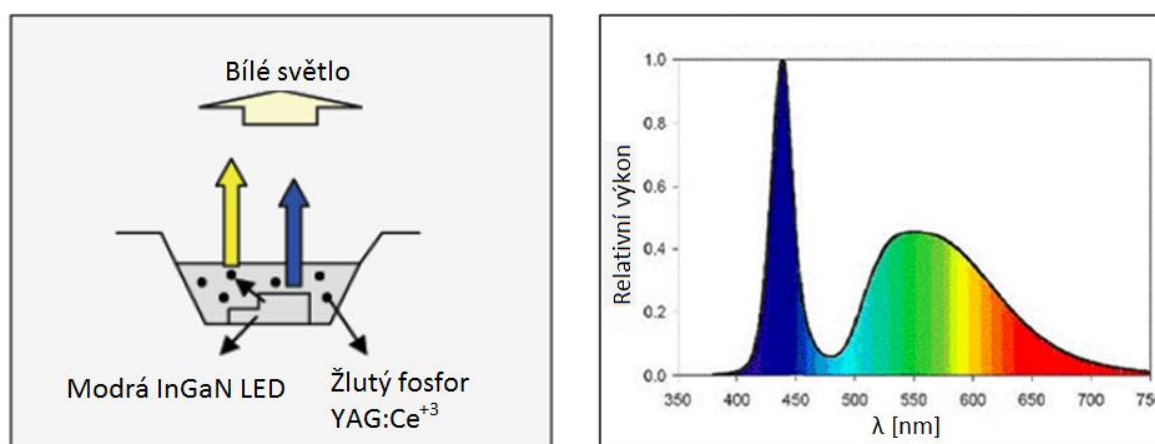
Přiložením konstantního proudu na LED diodu je vytvořen konstantní proud fotonů, pozorovatelný jako viditelné světlo. Pokud je proud měněn, výstupní intenzita fotonů kolísá a světlo se tlumí a rozsvěcí. Jelikož je LED polovodičová součástka, proud a tudíž i optický výstup může být modulován s extrémně vysokou rychlostí. Kolísání světla je nezatelné pro lidské oko, ale může být zaznamenáno fotodetektoem a převedeno zpět na elektrický proud.

VLC technologie primárně využívá komerčně dostupné LED zdroje, které jsou využívány ve vnitřních a venkovních zdrojích světla, ve většině displejů, v mobilních telefonech a dalších.

K osvětlení místností jsou stále častěji využívány bílé LED diody, které jsou díky rychlé odezvě vhodné pro přenos dat. Bílého světla lze dosáhnout dvěma způsoby. Prvním je využití modré diody s fosforem, druhým způsobem tvorby bílého světla je kombinace tří základních barev (červené, zelené a modré).

Modrá LED a fosfor

K vytvoření bílého světla je využita modrá LED, která je pokryta fosforem (YAG:Ce³⁺). Vrstva fosforu absorbuje část krátkých vlnových délek vyzařovaných modrou LED, světlo emitované luminoforem je posunuto k vyšším vlnovým délkám žlutého světla. Červená část spektra, která vznikla posunem, je navíc smíchána s neabsorbovaným modrým světlem, čímž dochází k vjemu bílého světla. Princip a spektrum tohoto světla jsou zobrazeny na obr. 4.

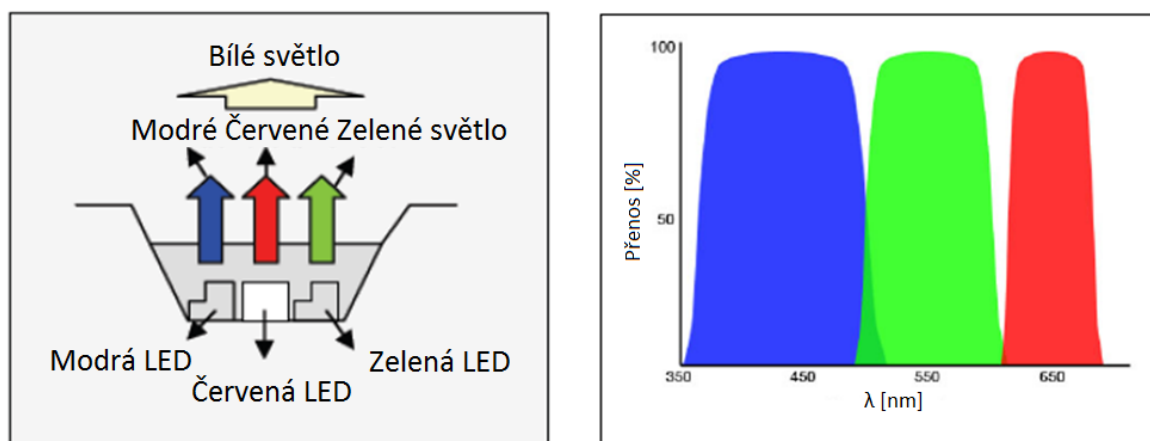


Obr. 4 - Tvorba bílého světla modrou LED s fosforem - překresleno z [9]

Hlavní výhodou této varianty bílé LED je nízká cena, nevýhodou je pak nižší přenosová rychlost. Odezva modré LED je rychlá a umožňuje šířku pásma modulace 20 MHz, avšak odezva fosforu je nižší a omezuje šířku pásma modulace na 2 MHz. [9] Pomalá odezva fosforu je tak jedním z hlavních limitních faktorů pro dosažení vyšších přenosových rychlostí. Dalším omezením této varianty bílé LED je nemožnost použití vlnového multiplexu (WDM – Wavelength Division Multiplexing).

Jednou z možností zvýšení přenosové rychlosti je z přijatého bílého světla ekvalizací extrahovat modré světlo neabsorbované fosforem. Při využití pouze modré části lze totiž obejít omezení šířky pásma modulace fosforem.

Kombinace barev



Obr. 5 - Tvorba bílého světla RGB kombinací - převzato z [9]

Bílé světlo může být tvořeno kombinací červené, zelené a modré (RGB) stejně jako u televizní obrazovky.

Tento způsob tvorby bílého světla umožňuje použití WDM a podporuje modulační šířku pásma až 15 MHz. Lze tak dosáhnout větších přenosových rychlostí, než v případě modré LED s fosforem. Hlavní nevýhodou je vyšší složitost a vyšší cena.

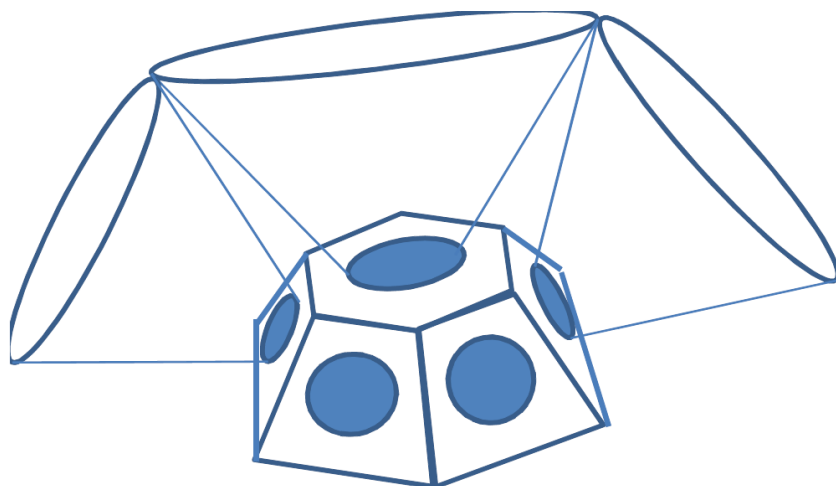
3.2. Optický detektor

Optický detektor převádí dopadající optický signál na elektrický. Nejčastěji bývá použita PIN fotodioda nebo APD fotodioda.

Fotodioda PD je polovodičová součástka, stejně jako LED dioda. Foton dopadající na přechod PN naráží do elektronu ve valenční vrstvě a předá mu svoji energii [10]. Elektron, který absorbuje energii fotonu, má dostatek energie pro přechod do vodivostního pásu. Z uvolněných elektronů se stanou nosiče náboje, což má za následek zvýšení vodivosti polovodiče, kterou můžeme detekovat.

Hlavní výhodou PIN fotodiody je nízká cena, velká oblast přijímaných vlnových délek, ale nevýhodou je omezená citlivost. V případech, kde je to nutné, lze proto použít lavinovou fotodiodu, která má vyšší citlivost. Výhodou VLC komunikace je možnost příjmu i pomocí obrazových senzorů CCD (Charge-Coupled Device). Ve speciálních případech tak může být pro tuto komunikaci použit i mobilní telefon se zabudovaným fotoaparát a LED diodou. Nevýhodou obrazového senzoru je omezená rychlost z důvodu sériového čtení.

K zajištění větší odolnosti proti blokaci a zastínění může být použit kombinovaný přijímač obr. 6. Tento přijímač se skládá ze sedmi samostatných detektorů, šest je rozloženo po obvodu s náklonem 30° a sedmý je uprostřed. Všechny tyto detektory mají FOV 60° a poskytují tak zorné pole 180° (hemisférické). Každý detektor přijímá přenášený signál, poté je vybrán ten s nejvyšším přijatým výkonem a ostatní jsou zahazeny.

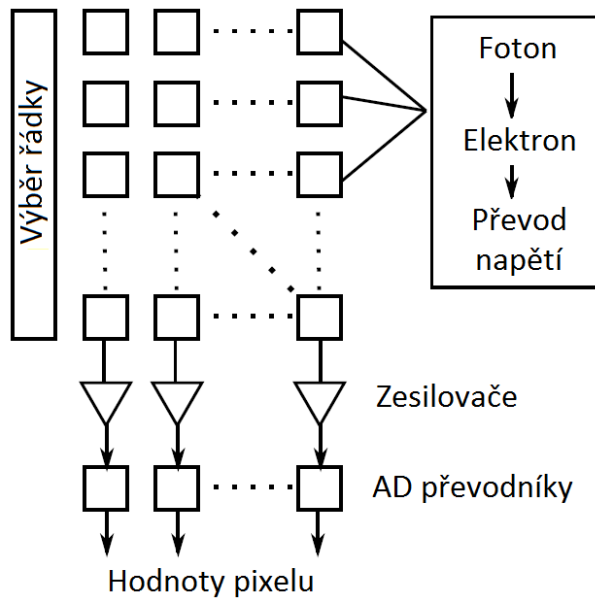


Obr. 6 - Kombinovaný přijímač 180° - převzato z [11]

3.2.1. Využití CMOS kamery

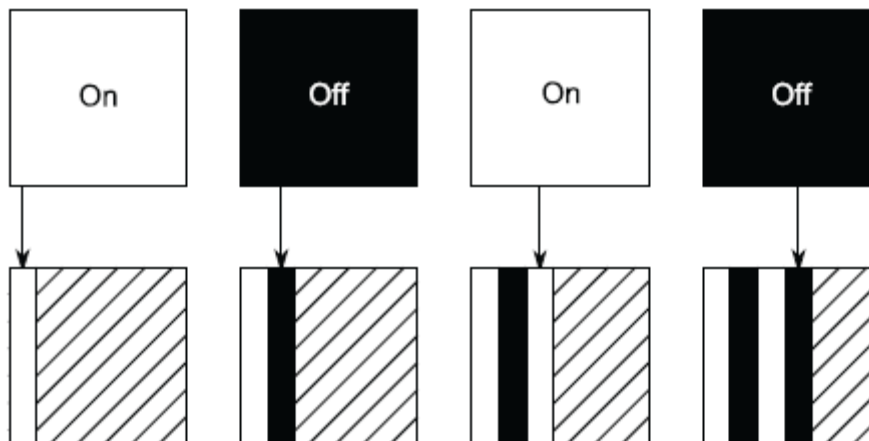
Je-li pro VLC použita modulace OOK (On-Off Keying), může být kamera s CMOS (Complementary Metal-Oxid-Semiconductor) senzorem použita jako přijímač tak, že zaznamenává nepřetržité změny stavu světla, pro lidské oko nezaznamatelné. Informace zachycená ve formě sekvence světlých a tmavých snímků je pak dekodována na původní vyslanou zprávu.

V posledních několika letech se mobilní telefony se zabudovanou kamerou staly naprosto běžnými, což vede k možnosti využití mobilního telefonu pro VLC. Možnosti využití CMOS kamery pro VLC jsou popsány v [12].



Obr. 7 - Schéma CMOS senzoru – překresleno z [12]

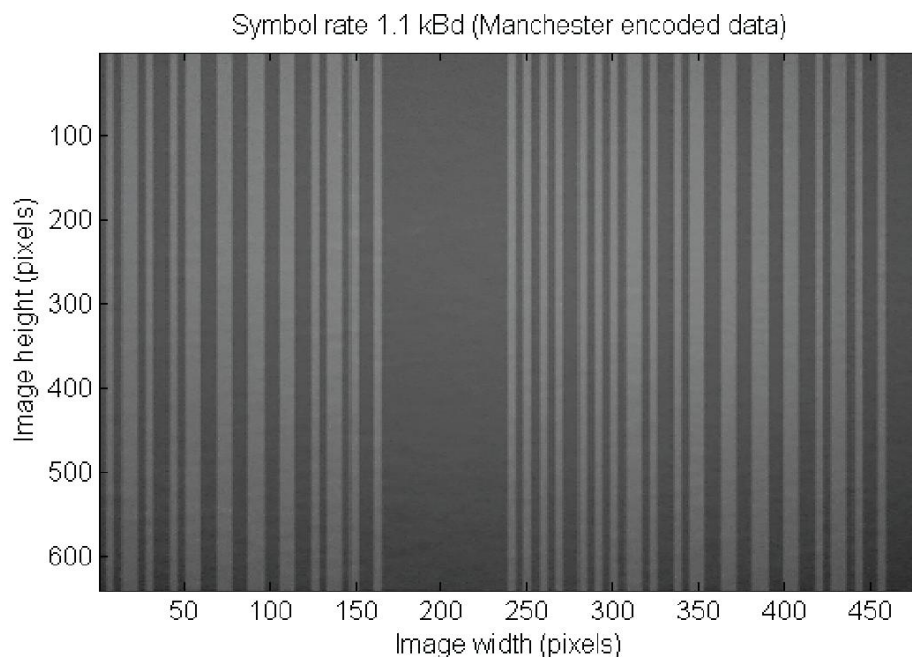
Rolovací závěrka (z ang. Rolling shutter) je metoda získání obrazu, používaná CMOS senzorem. Funkční schéma CMOS senzoru je ilustrováno na obr. 7. Pixely CMOS senzoru jsou postupně vystaveny dopadajícím fotonům a převádí je na elektrické napětí. To je zesíleno zesilovači a převedeno analogově digitálním převodníkem na hodnotu pixelu. Úroveň generovaného signálu závisí na množství dopadajících fotonů z hlediska intenzity a doby trvání. Většina CMOS senzorů obsahuje pixely, které jsou uspořádány do sekvenčně aktivovaných řad. Celý obraz tak není zachycen najednou, ale po řádcích [13]. Princip rolovací závěrky je znázorněn na obr. 8.



Obr. 8 - Princip rolovací závěrky – převzato z [12]

Horní čtverce indikují stav LED světla, spodní ukazují výstup CMOS kamery, jak čte po řádcích postupně časem. Když je LED světlo zapnuto, kamera vidí světlý snímek a CMOS senzor zachytí tuto změnu do prvního sloupce obrazu. Pokud vysílač zhasne a druhý řádek je aktivován, je v něm zaznamenána tato změna. Tento proces pokračuje

až do pořízení kompletního snímku. Příklad celého obrazu zaznamenaného při modulační rychlosti 1,1 kBd je zobrazen na obr. 9.



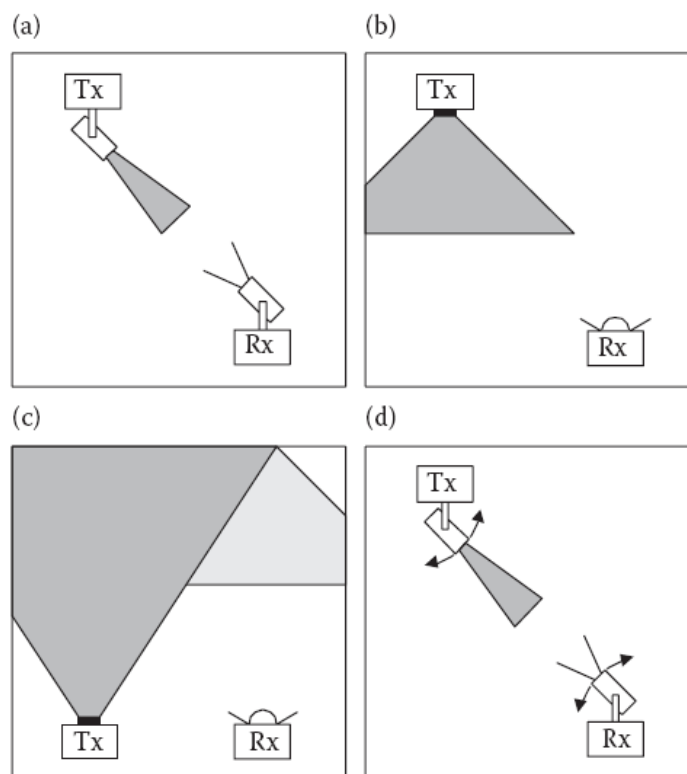
Obr. 9 - Příklad obrazu CMOS kamery (výsledek rolovací závěrky při 1,1 kBd) – převzato z [12]

Pomocí jednoduchých technik zpracování obrazu jsou tyto světlé a tmavé sloupce převedeny na binární data. Využitím rolovací závěrky CMOS senzoru je dosaženo mnohem vyšších datových toků (až několikanásobně), než je frekvence snímků kamery.

4. Model VLC

4.1. Možnosti šíření

Ve vnitřních prostorech je světlo rozptylováno a odraženo od zdí a ostatních předmětů v místnosti a neprochází skrz neprůhledné překážky. Je tedy důležité správné nastavení orientace vysílače i přijímače. Na obr. 10 jsou ilustrovány čtyři nejčastější konfigurace.



Obr. 10 - Možnosti šíření: a) přímá LOS, b) nepřímá LOS, c) rozptýlená konfigurace, d) tracked konfigurace- převzato z [3]

a) Přímá LOS

Světlo je soustředěno do velmi úzkého paprsku, díky čemuž je možné dosáhnout i velkých vzdáleností s nízkými energetickými náklady. Spoje s přímou LOS dosahují velmi vysokých rychlostí (až stovky Mbit/s) na vzdálenost od několika metrů až do 5 km. Nedochozí zde ke ztrátám vlivem více-cestného šíření a šum vlivem okolního světla může být při zvolení vhodného optického detektoru potlačen. Nejčastěji je tento způsob použit pro venkovní spoje FSO.

Pro vnitřní aplikace má přímá LOS omezené využití, neboť oblast pokrytí je velice malá a nepodporuje mobilitu přijímače. Je tak vhodná pouze při stacionární poloze přístrojů, např. přenos dat mezi televizí a datovým úložištěm.

b) Nepřímá LOS

Využívá vysílače s širokým paprskem a přijímače s velkým zorným polem (FOV – Field Of View). Vysílač pokrývá velkou oblast a podporuje tak mobilitu přijímače. Toto uspořádání kvůli velkému rozptylu dosahuje menších vzdáleností a je tak vhodné především pro vnitřní aplikace.

Spoje s nepřímou LOS jsou odolnější proti blokování a zastínění, protože je přijímáno světlo odražené od zdí a ostatních předmětů. Přenášené světlo je detekováno z několika různých směrů. Dochází zde k mezisymbolové interferenci (ISI), kvůli níž je datová rychlost omezena na několik Mbit/s [3].

c) Rozptýlená konfigurace

Jedná se o nepřímou non-LOS konfiguraci, kdy vysílač nemíří přímo na detektor, ale proti stěně, odkud se odráží. Je vysílán široký paprsek a přijímáno odražené světlo. Tento systém je téměř imunní proti blokování a je vhodný pouze pro vnitřní aplikace. Dochází zde k vysokým ztrátám šířením (50-70 dB). Tyto ztráty jsou ještě zvýšeny při zablokování hlavní cesty signálu, neboli zastínění. V místnosti 10x10x3 m³ lze dosáhnout typicky rychlosti okolo 16 Mbit/s [3].

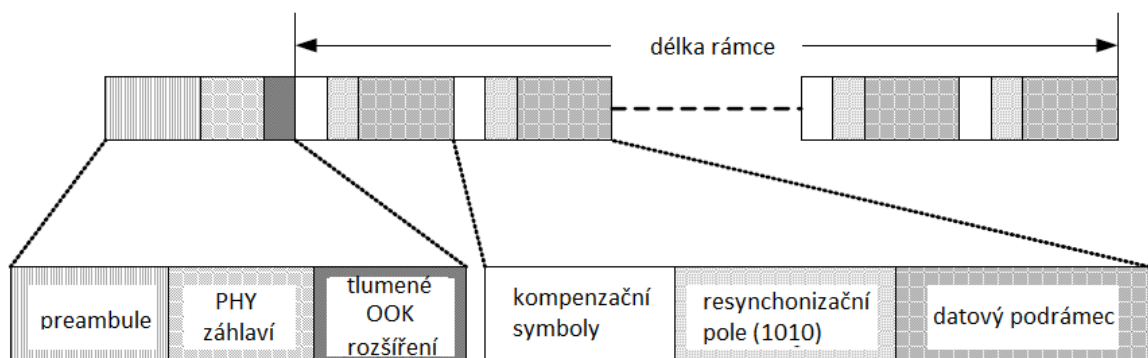
d) Tracked konfigurace

Tato konfigurace spojuje výhody LOS a non-LOS spoje. S využitím mechanicky říditelné optiky nabízí vysokou výkonovou účinnost a potenciální datovou rychlost až 1 Gbit/s. Základnová stanice s přijímačem a vysílačem je namontována na stropě místnosti a mobilní stanice jsou umístěny ve výšce stolu.

4.2. Modulace

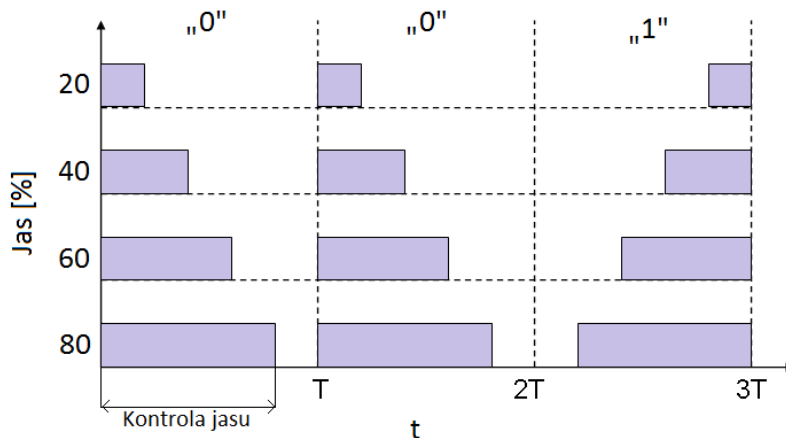
Pro VLC je nejčastěji používána modulace OOK (On-Of Keying) bez návratu k nule (NRZ- Non-Return to Zero). Mohou být použity i modulace VPPM (Variable Pulse Position Modulation) a CSK (Color-Shift Keying). Tyto tři modulace jsou specifikovány standardem IEEE 802.15.7 [14]. Lze však využít i kvadrurní amplitudovou modulaci (QAM – Quadrature Amplitude Modulation), CAP modulaci (Carrier-less Amplitude and Phase modulation) a další. Každá modulace by měla splňovat určité požadavky, jako je například kontrola stmívání (dimming), jakožto řízení jasu podle požadavků uživatele.

OOK modulace značí nejjednodušší amplitudovou modulaci (ASK – Amplitude Shift Keying), jelikož reprezentuje digitální data jako přítomnost a nepřítomnost nosné vlny. Vzhledem k tomu, že OOK modulace je vždy posílána se symetrickým symbolem Manchester, může být zapotřebí vložit kompenzační čas do datového rámce pro přizpůsobení průměrné intenzity zdroje [14]. Struktura rámce OOK se stmíváním je zobrazena na obr. 11. Rámec je rozdělen na podrámce a každý podrámec může být předcházen resynchronizačním polem, které pomáhá znovu nastavit datové hodiny po kompenzačním čase.



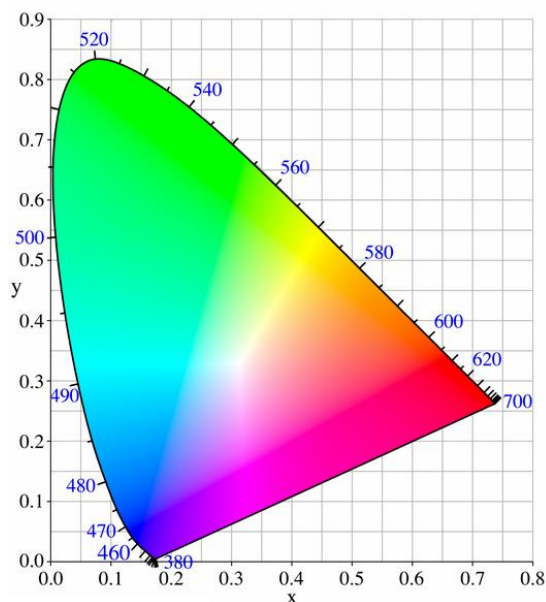
Obr. 11 - Struktura rámce OOK se stmíváním - překresleno z [14]

VPPM je modulační schéma adaptované pro stmívání světla pomocí šířky pulsu, který má vždy stejnou amplitudu. Bity „0“ a „1“ jsou odlišeny pozicí uvnitř periody a mají stejnou šířku. Intenzita světla a stmívání je dána nastavením šířky pulsu, při kterém světlo svítí [14]. Princip kontroly stmívání je zobrazen na obr. 12. Pro nastavení požadovaného jasu je možné upravit šířku pulsu. Čím větší je délka pulsu, tím vyšší je jas světla.



Obr. 12 - Princip regulace stmívání VPPM

CSK podporuje pouze VLC používající více barevné zdroje a detektory, neboť moduluje informaci mícháním barev. Informace je zpětně získána prostřednictvím barevných souřadnic z přidělené palety barev (obr. 13). CSK reguluje jas změnou proudu procházejícího zdrojem světla [14].



Obr. 13 - Chromatický diagram xy - převzato z [15]

5. Pokrytí vnitřních prostor

Neprostupnost OWC komunikace zdmi a ostatními překážkami je sice výhodou pro bezpečnost přenosu, ale velkou nevýhodou této vlastnosti je nižší pokrytí. Pro kompletní pokrytí vnitřních prostor je zapotřebí větší množství vysílačů než v případě RF, minimálně jeden na každou místnost.

5.1. Porovnání RF a VLC

Minimální množství femtobuňkových přístupových bodů (AP – Access Point) na podlaží je uvedeno v [16]. Požadavkem pro VLC systém je splnění světelných podmínek v místnosti.

RF komunikační sítě se musejí vypořádat s rostoucím požadavkem na vysoké datové toky v mobilních službách a aplikacích, a to převážně uvnitř budov, kde probíhá většina mobilní komunikace [16]. Vhodným řešením tohoto problému je využití femtobuněk, které jsou energeticky nenáročné a levné. Femtobuňky poskytují bezdrátové připojení uživatelů na vzdálenost až několika desítek metrů a vylepšují pokrytí a kapacitu díky možnosti opětovného použití rádiových zdrojů.

Alternativním nebo spíše doplňujícím řešením může být VLC, které je schopné odlehčit provoz z přetížené RF komunikace.

Studie ukázaly, že vysíláním světla s širokým FOV, lze dosáhnout pokrytí a osvětlení celé místnosti [16]. S využitím faktu, že světelné vlny se nešíří skrz zdi, je možné v rámci budovy vytvořit několik na sobě nezávislých buněk, čímž je dosaženo větší bezpečnosti a díky možnosti snadného znovuvyužití pásma i zvýšené hustoty datového toku.

Přístupové VLC body jsou umístěny v každé místnosti v budově a každá místnost tak představuje jednu buňku. Je rovněž uvažována různá hustota RF femtobuňkových přístupových bodů na patro, pro určení, jak se zvyšuje výhoda použití femtobuněk s jejich hustotou penetrace.

Minimální požadované osvětlení pro čtení je podle Evropského světelného standardu 400 lx [17]. Toho je docíleno použitím 576 vysoce svítivých (28 cd) [18] OSRAM bílých LED s výstupním výkonem 189 mW ve velké místnosti s rozměry 10 m×10 m×3 m. Pro místnost 5 m×5 m×3 m je zapotřebí 144 LED a pro místnost 2.5 m×5 m×3 m 72 LED [16].

6. Experimentální část - testovací scénáře

Pro komunikaci ve viditelném světle je hlavním problémem zastínění přijímače. V místnosti může být instalováno několik vysílačů, proto je jedním ze zajímavých aspektů měření optické komunikace zastínění FOV přijímače. Dále by mohlo být sledováno zastínění FOV jednotlivých fotodiód kombinovaného přijímače s rozšířeným zorným polem.

Měření by měla co nejlépe vystihovat typické vlastnosti vnitřních prostor, uvažovat reálné možnosti pohybu osob po místnostech i různá umístění a orientace přijímače.

6.1. Prostory

Pro komplexní otestování vlivu nejen velikosti místnosti, ale i vlivu tvaru a možností pohybu osob, by musela být posuzována celá řada prostor. Nejen od malých kanceláří až po rozlehlé sály, ale i s různými geometrickými vlastnostmi, čtvercové, obdélníkové nebo atypické místnosti. Dále by muselo být uvažováno různé rozmístění nábytku i jiných překážek, které ovlivňují rozložení pohybu osob. Pro měření byly vybrány tyto prostory:

- *Obdélníková místnost s nábytkem* – větší prostor s rozměry 9,4 m×6,55 m×3,3 m a omezeným prostorem pro pohyb osob
- *Chodba* – úzký prostor s rozměry 9,4 m×1,35 m×3,3 m s obousměrným pohybem osob

6.2. Poloha a orientace přijímače

Vliv polohy a držení bude testován ve třech variantách:

- Položen na stole
- Držen uživatelem ve vodorovné poloze
- Držen uživatelem s náklonem

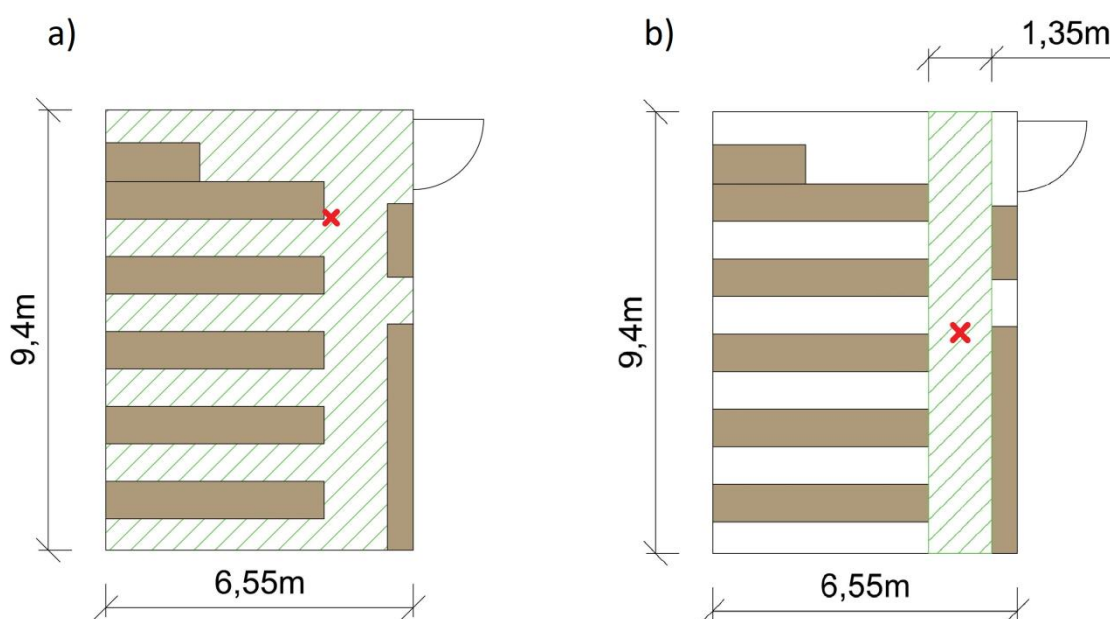
6.3. Počet osob

Nejdůležitější částí testování bude vliv osob na navržené scénáře. Počet osob v testovaném prostoru bude od 1 do 4 či více, ale měl by být neměnný pro jednotlivá testování, případně by měl být počet osob náhodný pro celé testování.

7. Měření s hemisférickou kamerou All Sky Cam

Pro měření byla využita kamera All Sky Cam ASC-N1 společnosti Moonglow Technologies se 190° hemisférickým zorným polem [19]. Kamera zaznamenává i plastový okraj okolo čočky, tato část snímku nemá pro měření žádnou vypovídací hodnotu a pouze zanáší falešnou informaci v podobě stínů a odlesků. Oříznutím této části snímku dosáhneme zorného pole 180°.

Všechna měření probíhala na Fakultě elektrotechnické ČVUT v místnosti T2:B2-621 s rozdílnou hustotou pohybu osob. Oblast pohybu osob je vyznačena zeleným šrafováním, umístění přijímače je označeno červeným křížkem. V případě měření vlivu osob v místnosti, byl pohyb osob rozložen po celé místnosti obr. 14 a). Při měření zastínění přijímače v chodbě se osoby pohybovaly pouze v úzkém úseku místnosti obr. 14 b), čímž byl simulován pohyb po chodbě. Tuto simulaci chodby je možno uvažovat pouze pro měření s kamerou a se striktně vymezenými hranicemi pohybu osob. Pro měření s reálným datovým přenosem by toto zjednodušení nebylo možné, neboť by kvůli absenci stěny nedocházelo k odrazům světla a to by se tak šířilo stejně jako v místnosti.



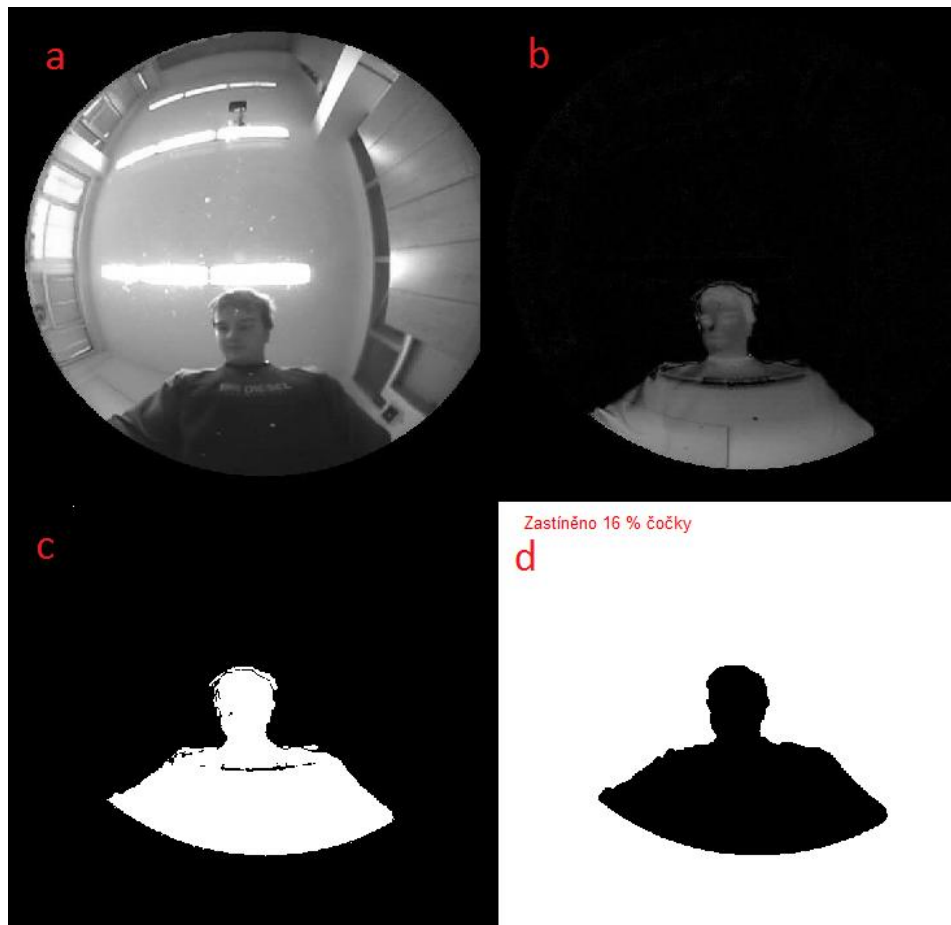
Obr. 14 - Pohyb osob a umístění přijímače a) místnost, b) chodba

Bylo uskutečněno 18 měření, každé trvalo 5 minut, během kterých se zvolený počet osob pohyboval po prostoru. Pro místnost byly zvoleny tři varianty nastavení přijímače: položen na stole, držen uživatelem ve vodorovné poloze a držen uživatelem s náklonem 30°. Pro simulaci chodby byla vynechána první varianta, neboť se stůl na chodbě typicky nenachází.

Program dodávaný ke kameře neumožňuje ukládání obrázků s dostatečnou frekvencí, proto byl pořízen videozáznam (25 snímků/s) a ten dále zpracován. Z videozáznamu byl vyextrahován každý pátý snímek, což odpovídalo 5 snímkům/s a celkovému počtu 1500 snímků z každého měření.

7.1. Určení zastínění

Pro každé měření byl vždy pořízen referenční snímek, na kterém je místnost prázdná. Ten byl v prostředí MATLAB pomocí vytvořené funkce *shadowing* porovnán s každým snímkem extrahovaným z videa. Tato funkce nejprve převede obraz (referenční i extrahovaný) do stupňů šedi. Referenční a extrahovaný obraz je porovnán pomocí funkce *imabsdiff*. Rozdílový obraz je funkcí *im2bw* se zvoleným prahem převeden na černou a bílou. Získaný obraz je vyhlazen pomocí eroze (fce *imerode*) a dilatace (fce *imdilate*). Z vyhlazeného obrazu je spočten počet černých bodů, který je roven velikosti stínu. Celý postup je ilustrován na obr. 15.



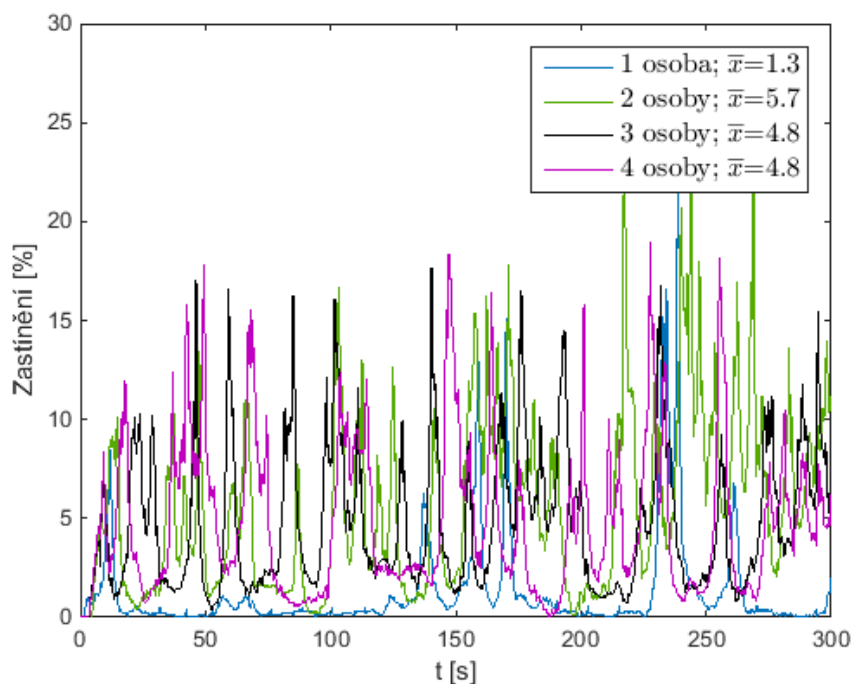
Obr. 15 - Postup zpracování obrazu: a) stupně šedi, b) rozdíl, c) černá a bílá, d) vyhlazený

7.2. Místnost

Souprava byla umístěna poblíž dveří (viz obr. 14a), kde byl odhadován zvýšený pohyb osob.

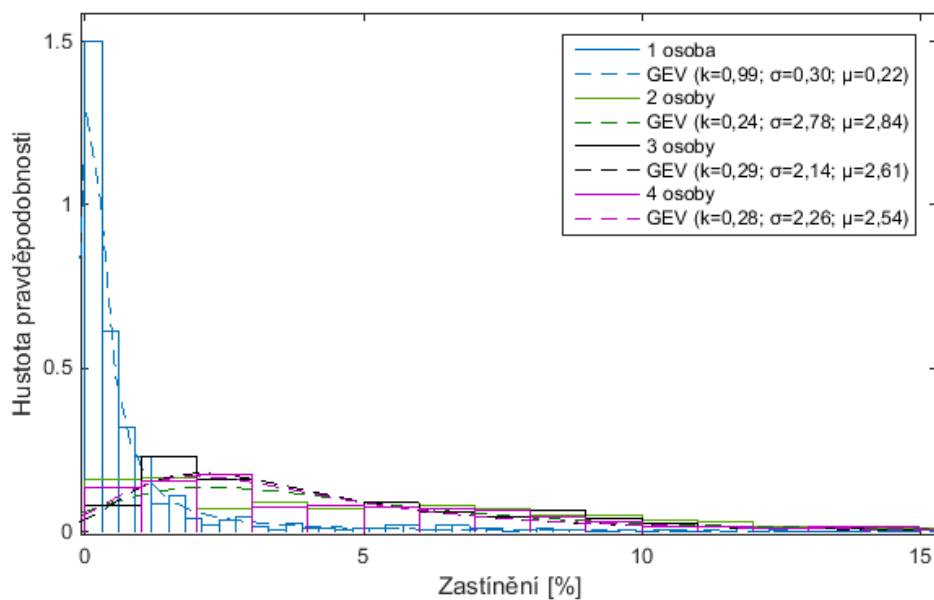
7.2.1. Přijímač na stole

Přijímač byl uchycen na stativu vertikálně ve výšce 80 cm tak, aby kopíroval výšku běžného stolu. S tímto nastavením přijímače byly uskutečněny čtyři oddělená měření, při kterých byl postupně navyšován počet osob v místnosti. Pohyb osob byl náhodný po celé místnosti.

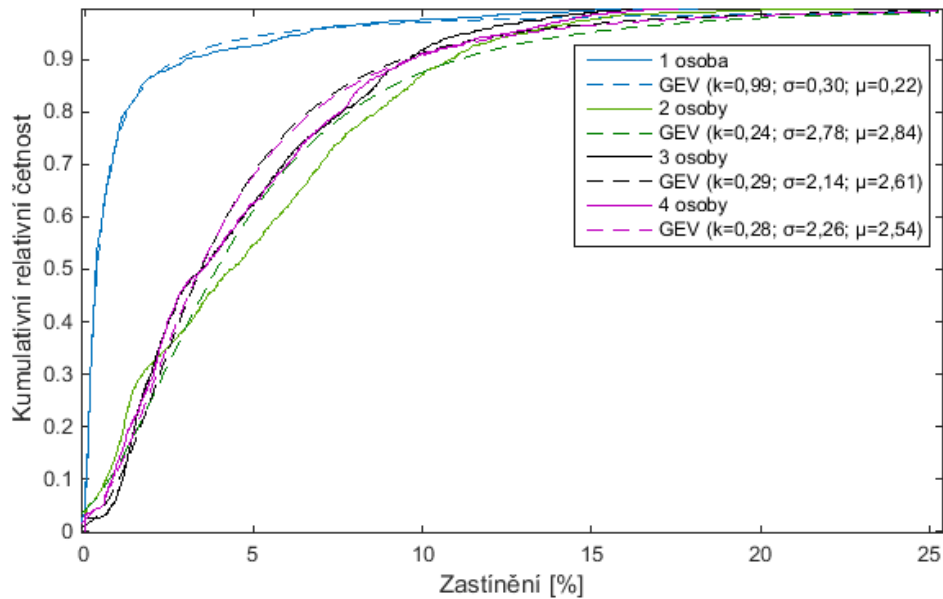


Obr. 16 - Měření místnosti (stůl) - Zastínění v čase

Graf na obr. 16 zobrazuje procentuální zastínění plochy přijímače v čase s pohybem osob. Histogram tohoto zastínění je na obr. 17.



Obr. 17 - Měření místnosti (stůl) - Histogram zastínění

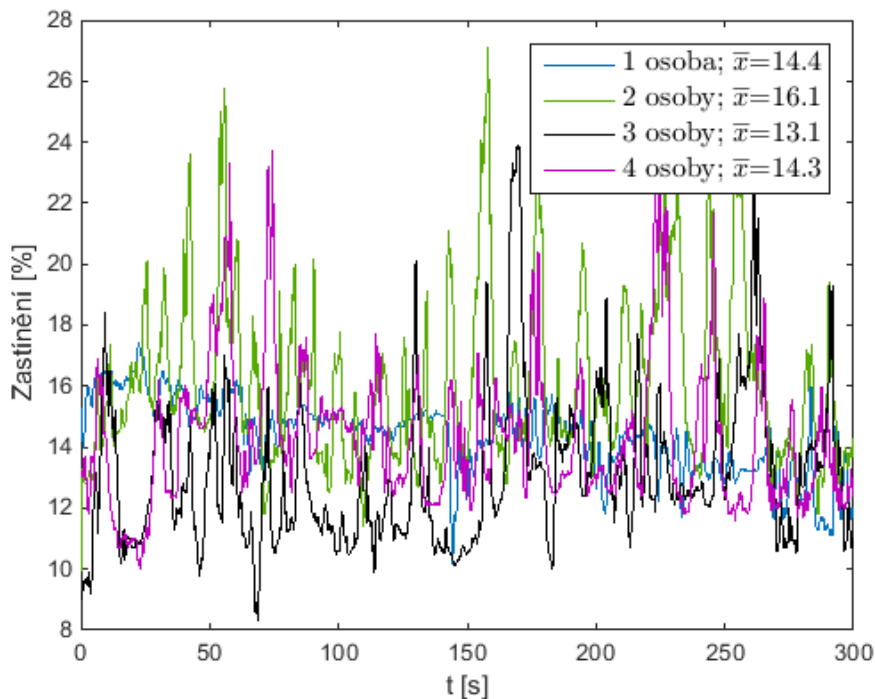


Obr. 18 - Měření místnosti (stůl) - Kumulativní relativní četnost zastínění

Z grafu kumulativní relativní četnosti obr. 18 je jasně patrné, že při pohybu pouze jedné osoby v místnosti je zastínění velmi malé. V ostatních případech jsou křivky téměř totožné, to je dané především pseudonáhodným pohybem osob.

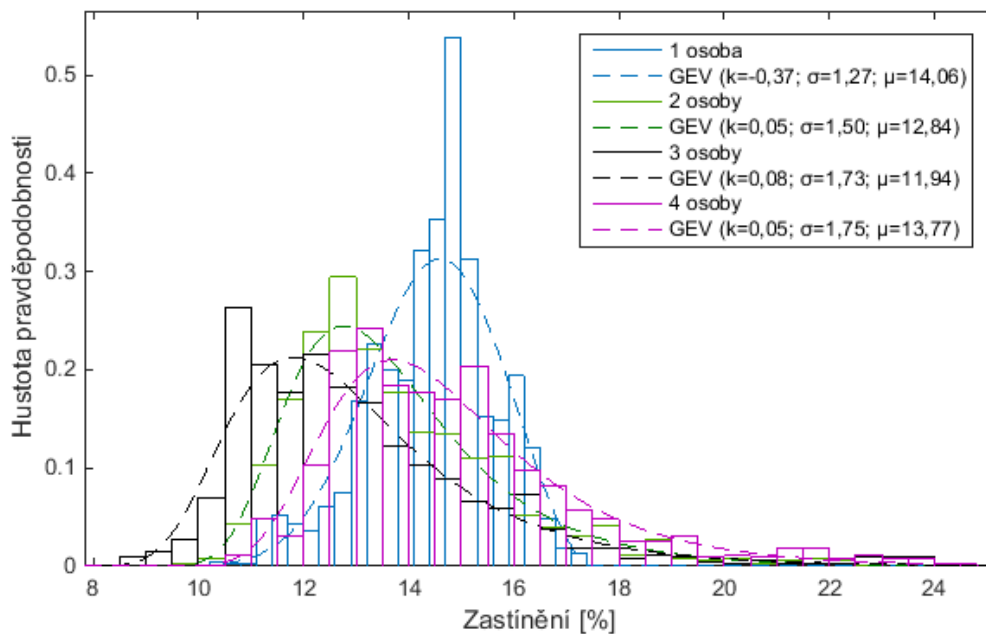
7.2.2. Přijímač ve vodorovné poloze

Přijímač byl uchycen na stativu vertikálně ve výšce 1 m. Toto nastavení simuluje průměrnou výšku držení mobilního telefonu běžným uživatelem při prohlížení textových zpráv či multimediálního obsahu. Pro docílení imitace držení telefonu je jedna osoba postavena před přijímač po celou dobu měření.

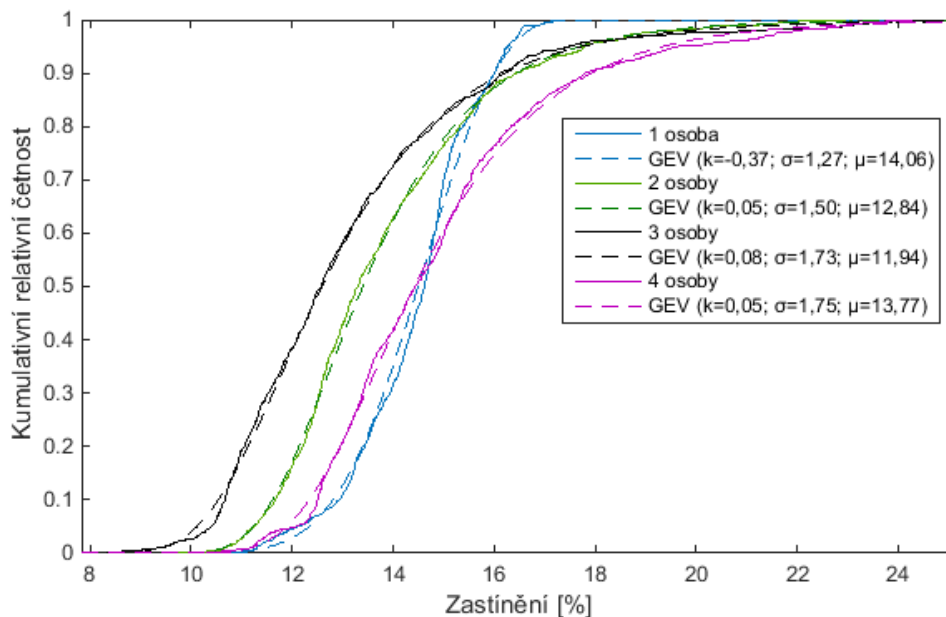


Obr. 19 - Měření místnosti (držení rovně) - Zastínění v čase

Graf na obr. 19 zobrazuje procentuální zastínění plochy přijímače v čase s pohybem osob. Histogram tohoto zastínění je na obr. 20.



Obr. 20 - Měření místnosti (držení rovně) - Histogram zastínění

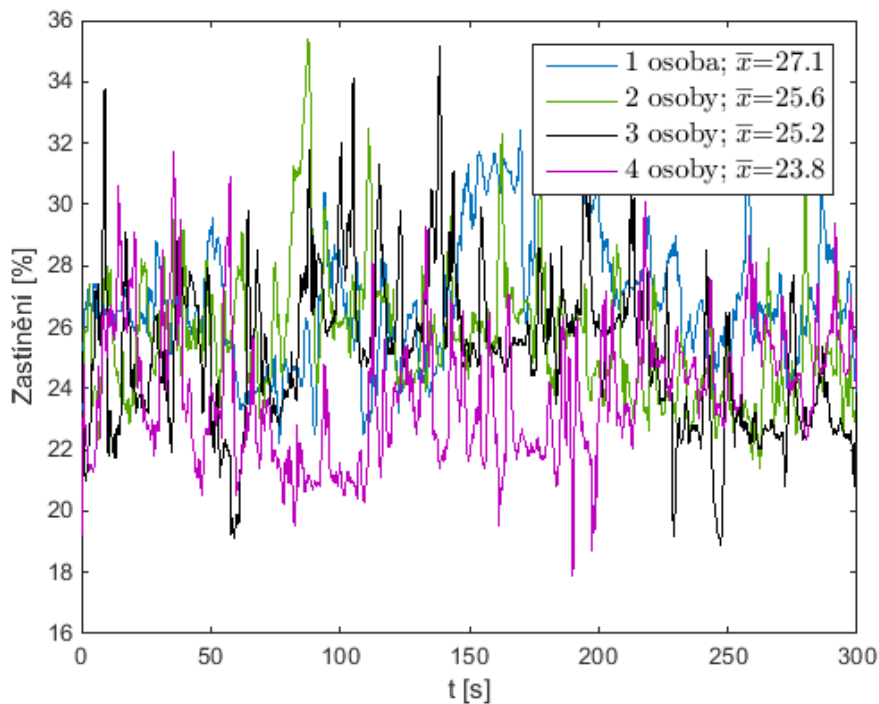


Obr. 21 - Měření místnosti (držení rovně) - Kumulativní relativní četnost zastínění

V případě, kdy byla v místnosti pouze jedna osoba, neboli uživatel, je nárůst kumulativní četnosti strmější (obr. 21), protože zastínění se měnilo pouze v závislosti na drobných pohybech tohoto uživatele. Posunutí ostatních křivek směrem doleva je způsobeno větším odstupem uživatele od přijímače, čímž se snížilo celkové zastínění.

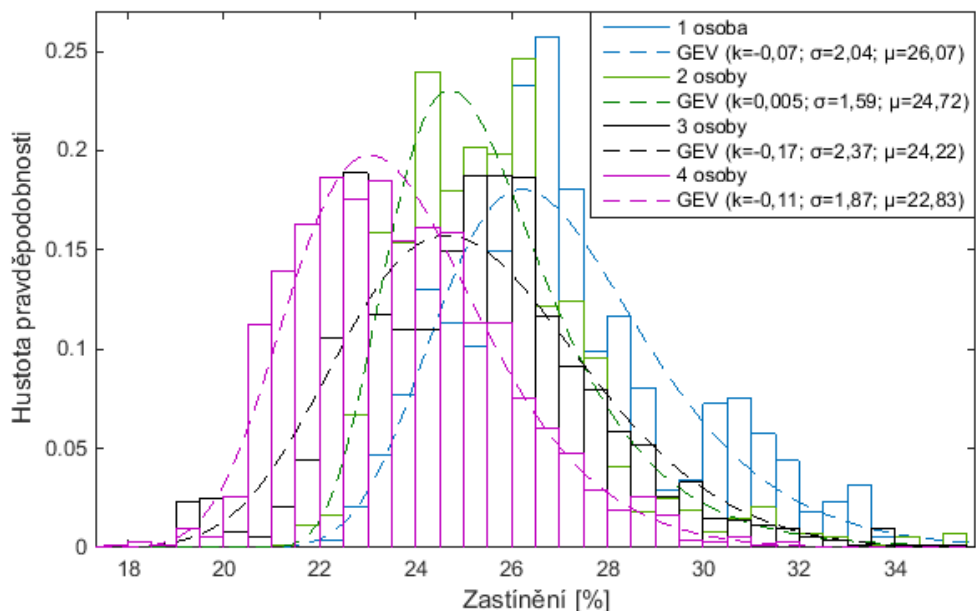
7.2.3. Nakloněný přijímač

Nastavení přijímače je stejné jako v předchozím případě, pouze s rozdílem v naklonění o 30° směrem k uživateli.

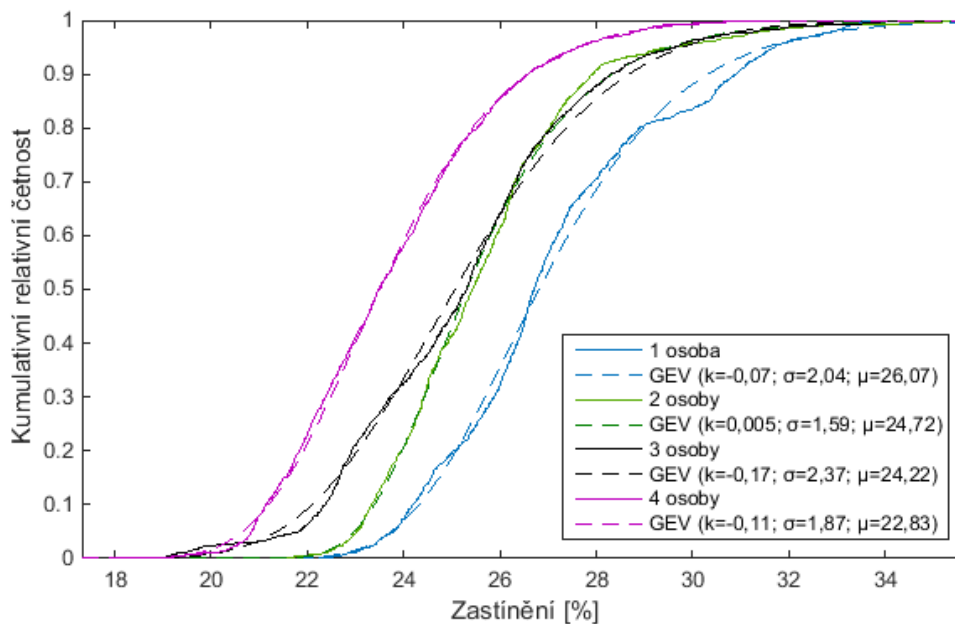


Obr. 22 - Měření místnosti (držení šikmo) - Zastínění v čase

Graf na obr. 22 zobrazuje procentuální zastínění plochy přijímače v čase s pohybem osob. Histogram tohoto zastínění je na obr. 23.



Obr. 23 – Měření místnosti (držení šikmo) - Histogram zastínění



Obr. 24 - Měření místnosti (držení šikmo) - Kumulativní relativní četnost zastínění

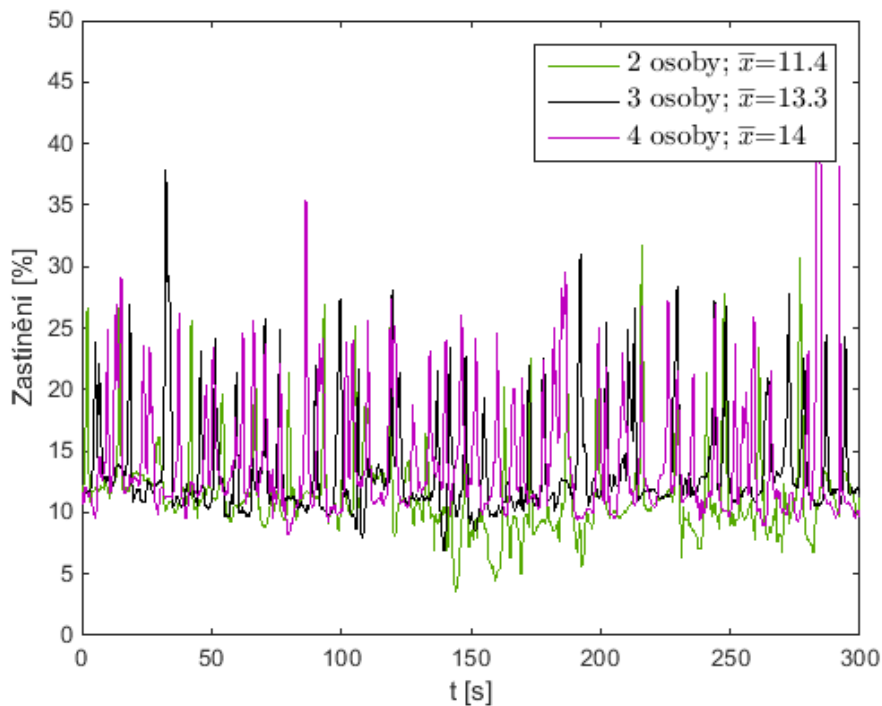
V tomto případě má již uživatel na zastínění takový vliv, že ostatní osoby v místnosti neovlivňují ani sklon křivky kumulativní relativní četnosti (obr. 24).

7.3. Chodba

Souprava byla umístěna uprostřed simulované chodby (viz obr. 14b). Byla vynechána měření s jedním člověkem (uživatel), protože se shodují s měřením v místnosti.

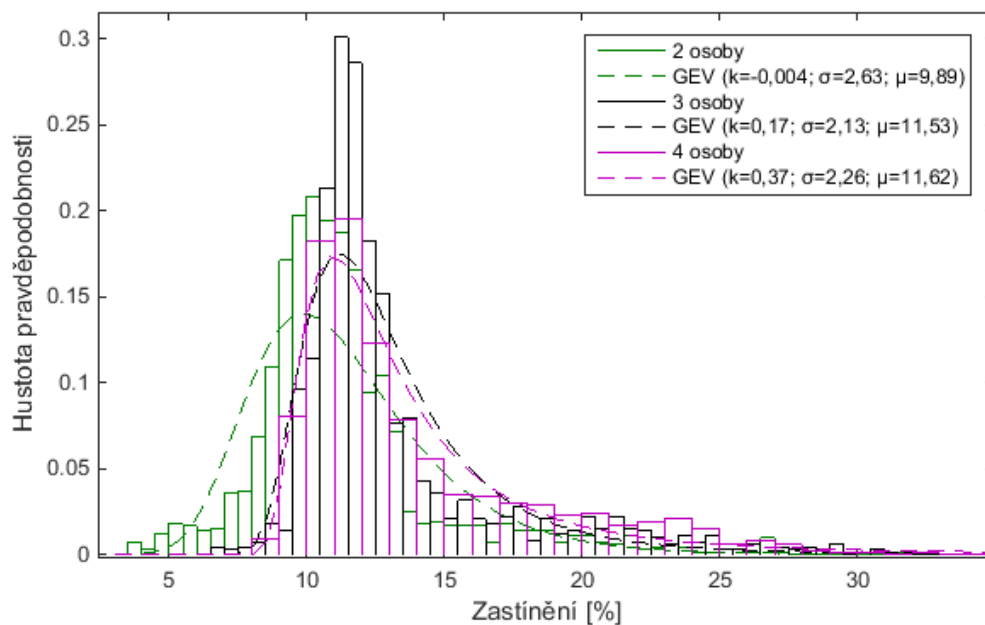
7.3.1. Přijímač ve vodorovné poloze

Přijímač byl uchycen na stativu vertikálně ve výšce 1 m, stejně jako v kapitole 7.2.2.

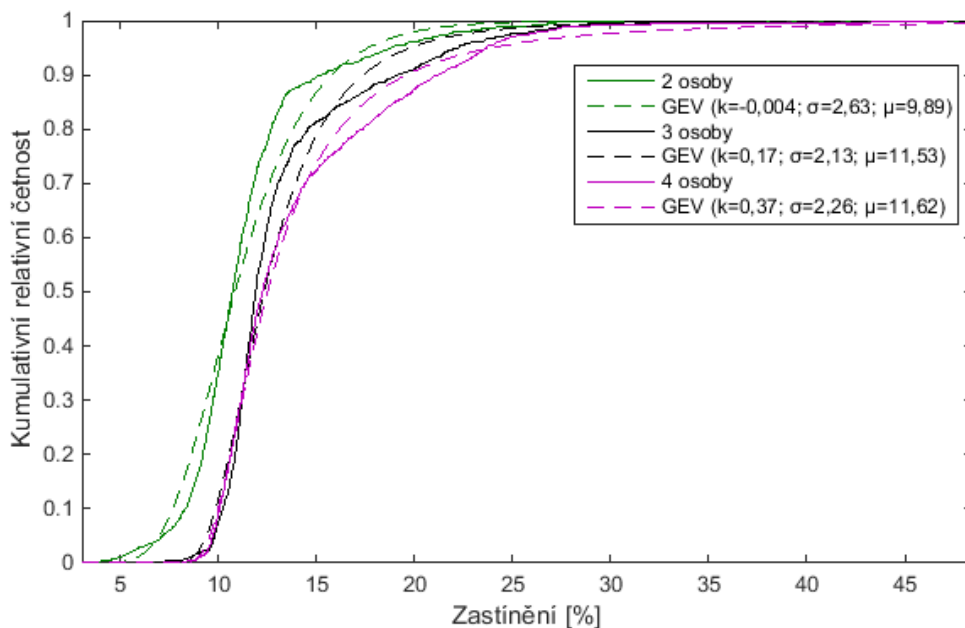


Obr. 25 - Měření chodby (držení rovně) - Zastínění v čase

Graf na obr. 25 zobrazuje procentuální zastínění plochy přijímače v čase s pohybem osob. Histogram tohoto zastínění je na obr. 26.



Obr. 26 - Měření chodby (držení rovně) - Histogram zastínění

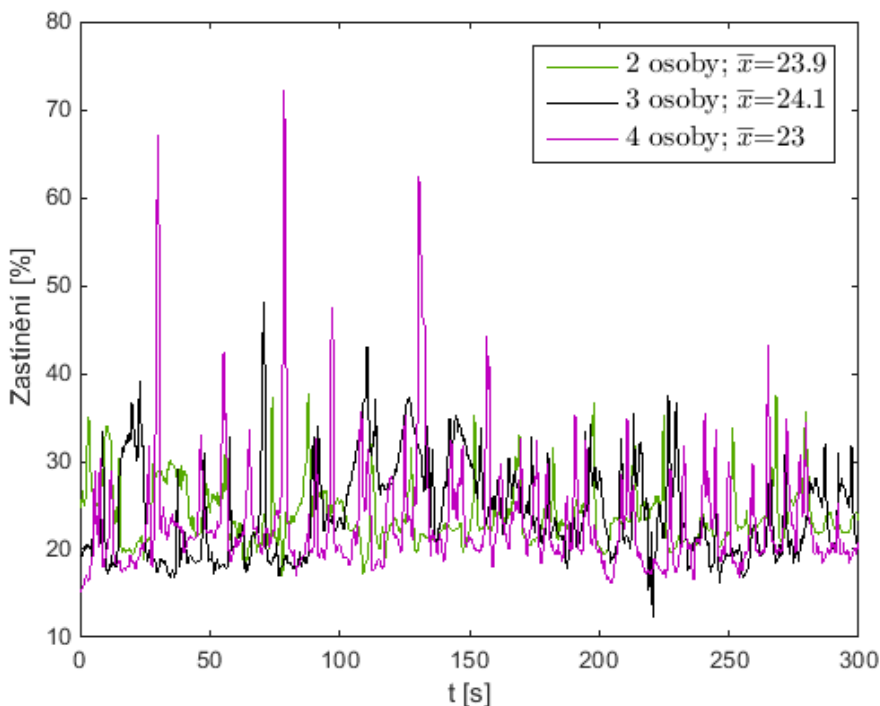


Obr. 27 - Měření chodby (držení rovně) - Kumulativní relativní četnost zastínění

V chodbě procházely osoby těsně kolem přijímače, a proto výrazněji ovlivnily velikost zastínění. V grafu kumulativní četnosti (obr. 27) je vidět větší rozptyl zastínění se zvyšujícím se počtem osob.

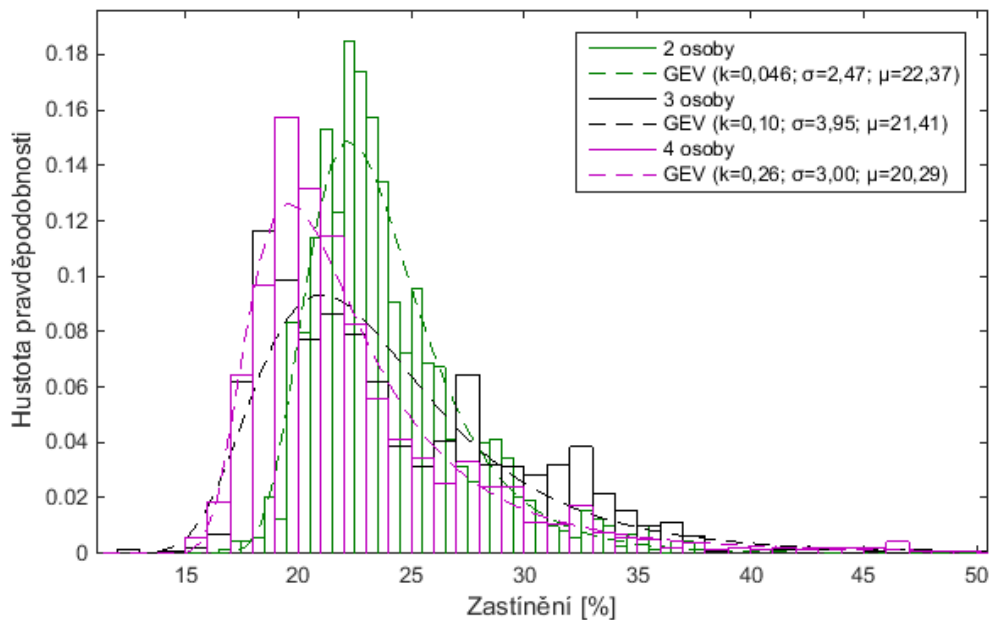
7.3.2. Nakloněný přijímač

Nastavení přijímače je opět stejné jako v předchozím případě, pouze s rozdílem v naklonění přijímače o 30° směrem k uživateli.

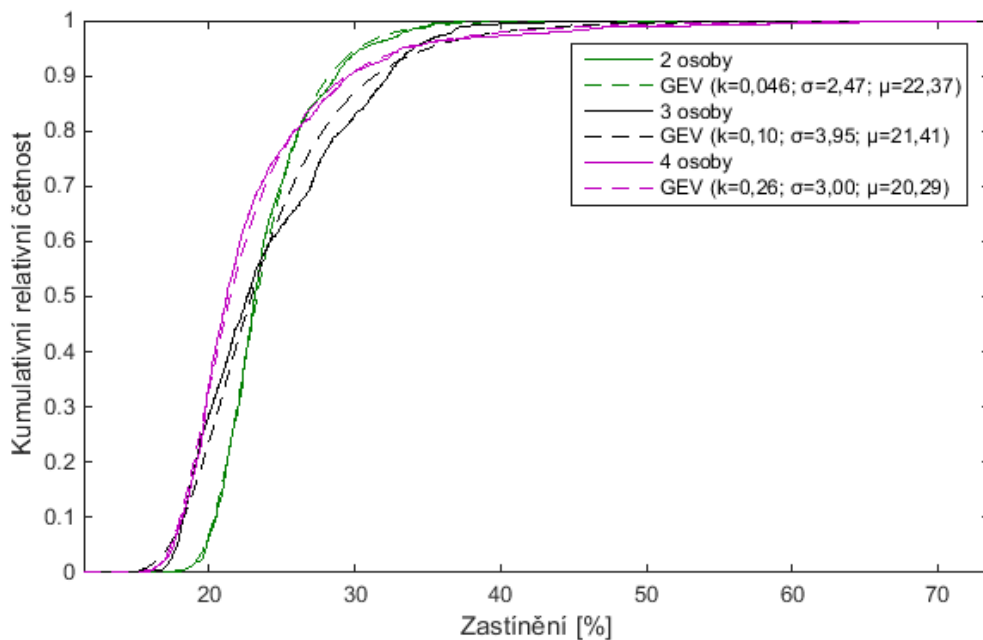


Obr. 28 - Měření chodby (držení šikmo) - Zastínění v čase

Graf na obr. 28 zobrazuje procentuální zastínění plochy přijímače v čase s pohybem osob. Histogram tohoto zastínění je na obr. 29.



Obr. 29 - Měření chodby (držení šikmo) - Histogram zastínění



Obr. 30 - Měření chodby (držení šikmo) - Kumulativní relativní četnost zastínění

8. Měření s mobilním telefonem Samsung

Při měřeních s hemisférickou kamerou All Sky Cam byl hlavní problém v mobilitě. Kamera musela být napájena ze sítě a vyžadovala připojení počítače. Z toho důvodu byla provedena měření s mobilním telefonem Samsung Galaxy SIII (GT-I9300), pro který byla vytvořena aplikace umožňující automatické ukládání obrazu přední kamery a informace ze senzorů, zejména z gyroskopu do textového souboru.

Měření s mobilním telefonem umožňovala reálná měření ve veřejných prostorech. Byla provedena sada měření ve vestibulu metra Petřiny a v hale Hlavního nádraží v Praze s vysokou hustotou pohybu osob (obr. 31)

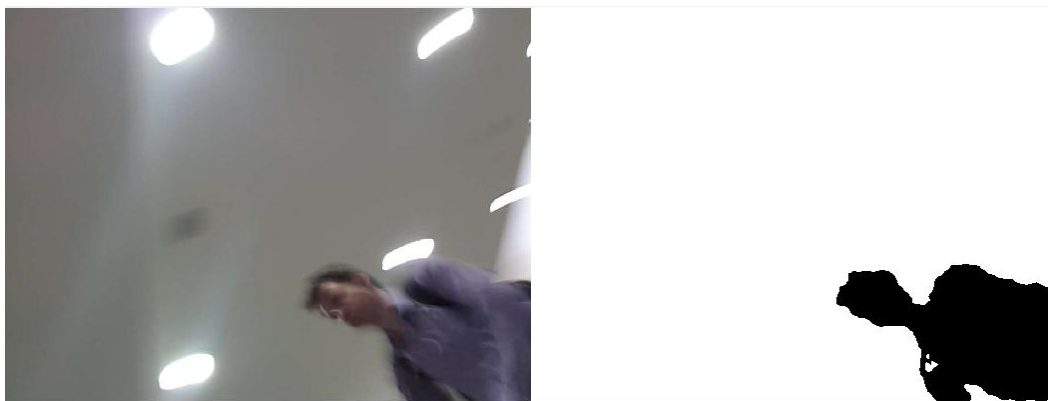


Obr. 31 - Měřené prostory: a) vestibul metra; b) nádražní hala

8.1. Určení zastínění

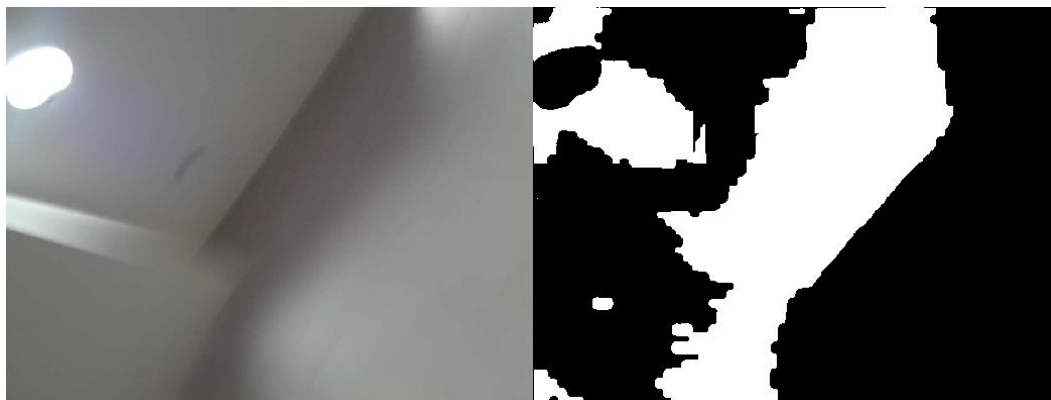
Určení zastínění bylo realizováno pomocí aplikace vytvořené pro android. Zpracování obrazu vzhledem k mobilitě a tudíž nemožnosti porovnání s referenčním snímkem bylo výpočetně náročné a kvůli nedostatečnému výkonu telefonu tak musela být ukládána pouze data a ta zpětně analyzována v prostředí Matlab.

Přesnost určení zastínění vlivem osob však nebyla ani touto metodou dostatečná. Odchylka v extrémních případech, způsobených především nerovnoměrným osvětlením či členitým prostředím, činila i více než 30 %. Ukázky úspěšného a neúspěšného určení zastínění jsou na obr. 32 a obr. 33. Další ukázky jsou zobrazeny v příloze B (obr. 67 a obr. 68).



Obr. 32 – Ukázka úspěšného určení zastínění

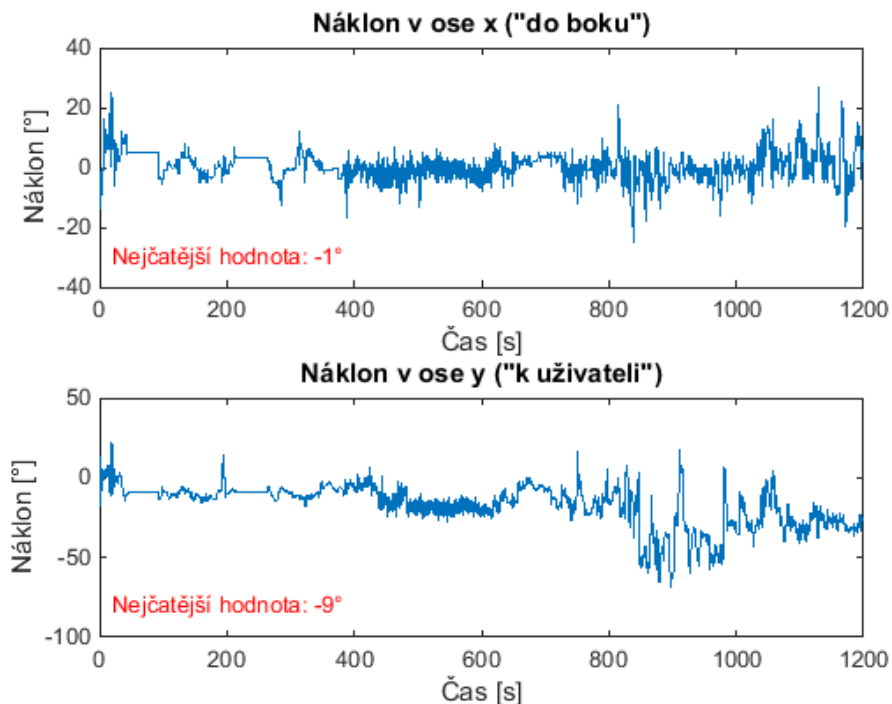
V tomto případě (obr. 32) bylo správně určeno zastínění 10 %. Naopak v druhém případě (obr. 33) bylo zastínění nesprávně určeno na 34 %, přestože v záběru není žádná osoba.



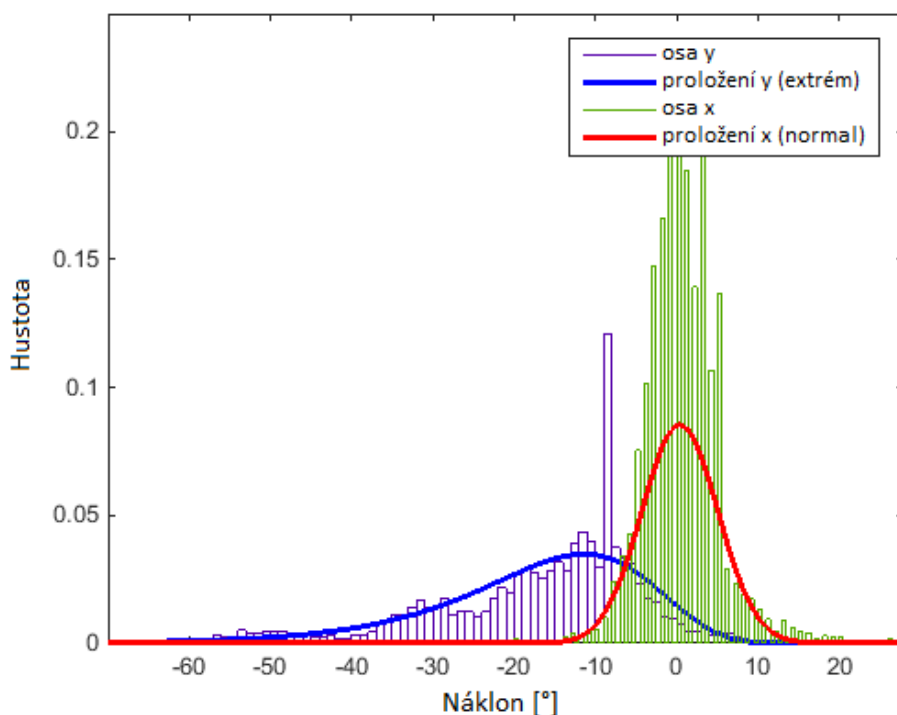
Obr. 33 - Ukázka neúspěšného určení zastínění

8.2. Měření náklonu

Pro analýzu náklonu mobilního telefonu během používání bylo provedeno 20 minutové měření, během něhož byla ukládána informace o náklonu několikrát za sekundu. Byla testována orientace mobilu drženého na výšku. Průběh měření při pohybu uvnitř budovy Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze a jeho histogram je zobrazen na obr. 34 a obr. 35.



Obr. 34 - Měření náklonu mobilního telefonu



Obr. 35 - Histogram měření náklonu mobilního telefonu

V histogramu je jasně patrná špička v bodě -9° . Z časové závislosti je poznat, že se nejedná o statické držení. Můžeme tedy usuzovat, že úhel 9° směrem k uživateli je daným uživatelem preferován. V ose y („do boku“) je držení soustředěno kolem úhlu 0° .

9. Statistiky příjmu

V této kapitole jsou odvozeny parametry přenosu a popsány statistiky příjmu z naměřených hodnot.

9.1. Výpočet BER

Elektrické SNR (Signal to Noise Ratio) na přijímači vypovídá o tom, zda je výkon signálu dostatečně velký v porovnání se šumem, pro přenos dat s danou maximální chybou. SNR je dáno vztahem [20]:

$$SNR = \frac{(R P_{rx})^2}{\sigma_{total}^2} \quad (1)$$

kde R je rezpozivita fotodiody, P_{rx} je přijatý výkon, σ_{total}^2 je variance celkového šumu je dána vztahem [20]:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2 \quad (2)$$

Variance výstřelového šumu σ_{shot}^2 je a je dána vztahem [20]:

$$\sigma_{shot}^2 = 2 q R (P_{rx} + P_n) B_n \quad (3)$$

kde q je náboj elektronu, P_n je výkon okolního světla, B_n je šířka pásma šumu a je dána vztahem [20]:

$$B_n = I_2 R_b \quad (4)$$

kde I_2 je faktor šířky pásma šumu a R_b je rychlost přenosu dat.

Variance šumu zesilovače $\sigma_{amplifier}^2$ je dána vztahem [20]:

$$\sigma_{amplifier}^2 = i_{amplifier}^2 B_a \quad (5)$$

kde $i_{amplifier}^2$ je druhá mocnina hustoty šumu zesilovače a B_a je šířka pásma zesilovače.

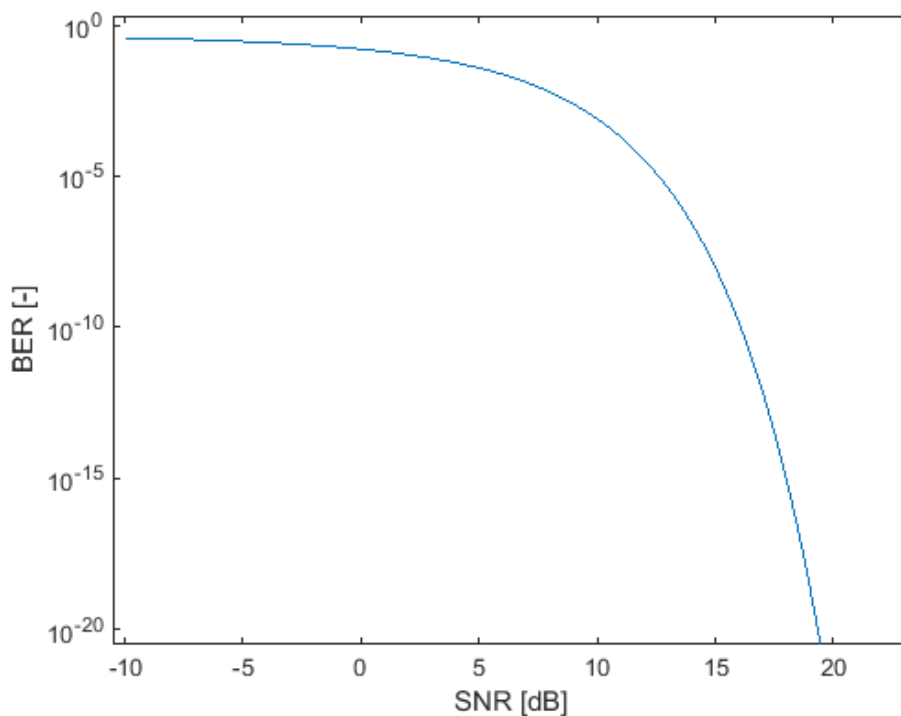
Ve všech typech komunikačních systémů je zásadní hodnotou pravděpodobnost výskytu chybných bitů BER. Pro OOK-NRZ modulaci je BER dáno vztahem [20]:

$$BER = Q(\sqrt{SNR}) \quad (6)$$

kde je Q funkce dána vztahem [20]:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (7)$$

Závislost BER na SNR pro OOK-NRZ modulaci vypočtená podle vztahu (6) a (7) je zobrazena na obr. 36.



Obr. 36 - Závislost BER na SNR pro OOK-NRZ

Ze vztahů (1), (2) a (3) můžeme vyjádřit vztah pro výpočet přijatého výkonu P_{rx} :

$$P_{rx}(P_{rx} - y) = y * P_n - \frac{SNR \sigma_{amplifier}^2}{R^2} \quad (7)$$

kde $y = 2 q B_n SNR 1/R$

Všechny parametry pro výpočet minimálního přijatého výkonu v našem měření jsou uvedeny v tab. 1.

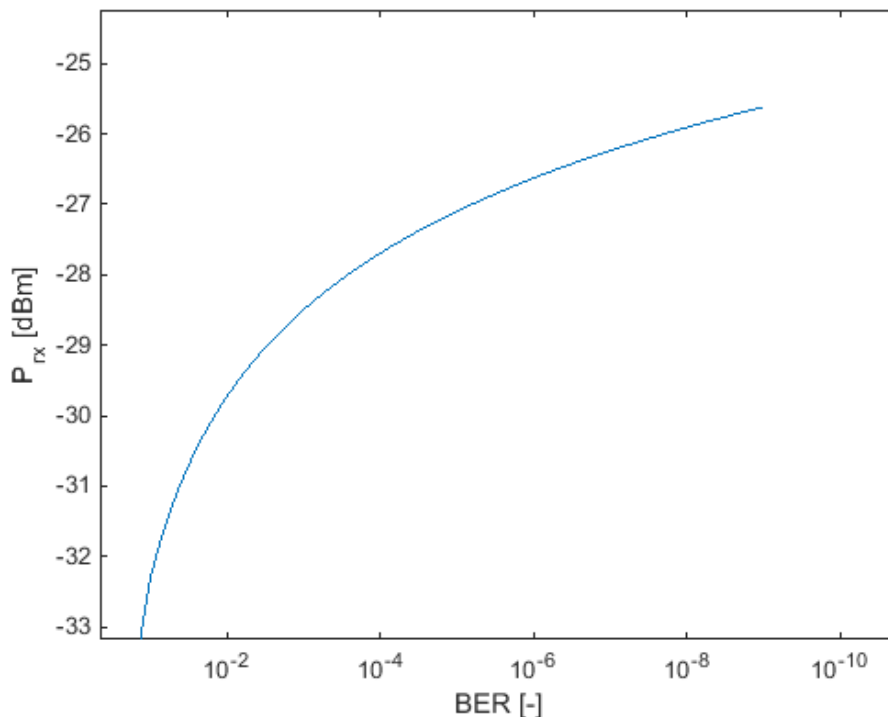
Responzivita PD (R)	0,2 [A/W]
Faktor šířky pásma šumu (l_2)	0,562
Rychlost přenosu dat (R_b)	10 [Mbit/s]
Elektrický náboj (q)	$1,602177 \cdot 10^{-19}$ [C]
Hustota šumu zesilovače ($i_{amplifier}$)	3 [pA/ \sqrt{Hz}]
Šířka pásma zesilovače (B_a)	240 [MHz]
Výkon okolního světla (P_n)	0,0292 [W]

Tab. 1 - Parametry pro výpočet přijatého výkonu [11]

V tab. 2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty minimálního přijatého výkonu pro různé požadavky na bitovou chybovost BER, grafické znázornění závislosti přijatého výkonu na BER je na obr. 37.

BER	0,5	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
SNR	0	1,6	5,4	9,6	13,8	18,2	22,6	27	31,5	36
SNR [dB]	-	2,2	7,3	9,8	11,4	12,6	13,5	14,3	15,0	15,6
P _{rx} [μW]	0	0,58	1,06	1,41	1,70	1,95	2,17	2,38	2,57	2,74
P _{rx} [dBm]	-	-32,3	-29,7	-28,5	-27,7	-27,1	-26,6	-26,2	-25,9	-25,6

Tab. 2 - Vypočtené hodnoty přijatého výkonu



Obr. 37 - Závislost přijatého výkonu P_{rx} na BER

Vydeme-li ze vztahu [9] pro ztráty šířením odraženého signálu, můžeme vyjádřit potřebný vysílaný výkon:

$$P_{tx} = \frac{A_{room}}{A_{rx} \sin^2\left(\frac{FOV}{2}\right)} \frac{1-\langle\rho\rangle}{\langle\rho\rangle} P_{rx} \quad (8)$$

kde A_{room} je plocha místnosti, A_{rx} plocha detektoru, FOV je zorné pole detektoru a $\langle\rho\rangle$ je průměrná reflektivita.

Všechny parametry pro výpočet minimálního přijatého výkonu jsou uvedeny v tab. 3. Vypočtené hodnoty vysílaného výkonu pro oba typy místností, v závislosti na přijatém výkonu, jsou uvedeny v tab. 4.

Rozměry	místnost	9,4 m×6,55 m×3,3 m
	chodba	9,4 m×1,35 m×3,3 m
Plocha detektoru (A_{rx})		15 mm ²
FOV		60°
Reflektivita zdí (ρ)		0,7

Tab. 3 - Parametry pro výpočet vysílaného výkonu

P_{rx} [μ W]	0,0	0,6	1,1	1,4	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,7
P_{tx} [W] místnost	0,0	95,5	173,4	230,3	277,2	317,9	354,3	387,5	418,3	447,1
P_{tx} [W] chodba	0,0	21,5	39,0	51,8	62,4	71,5	79,7	87,2	94,1	100,6

Tab. 4 - Vypočtené hodnoty vysílaného výkonu

Závislost vysílaného výkonu na přijímaném je lineární a je přímo úměrná ploše místnosti.

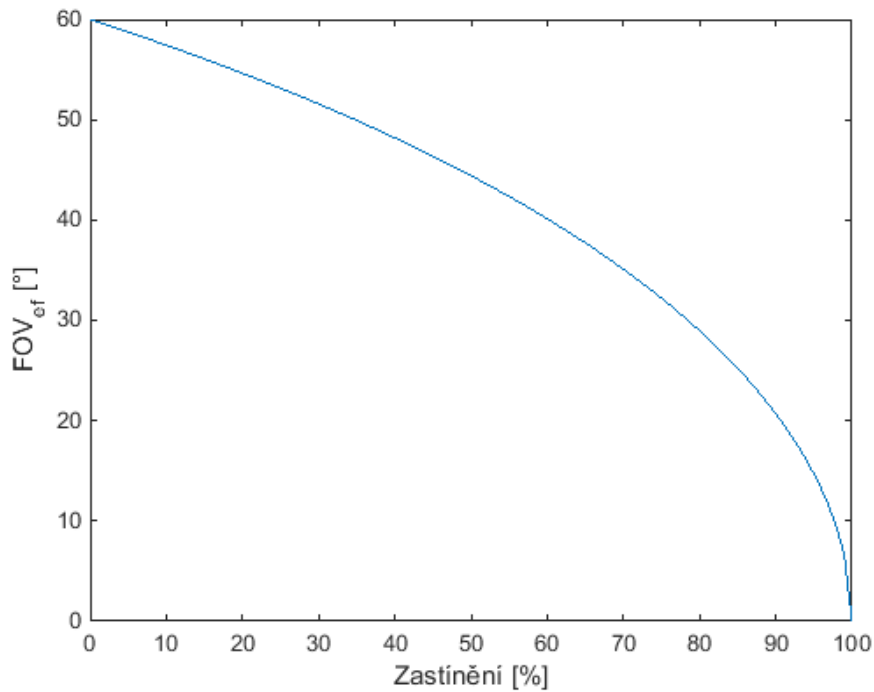
9.2. Vliv zastínění na bitovou chybovost BER

Pro spolehlivou komunikaci je běžně požadováno BER minimálně 10^{-6} , pro výpočty si zvolíme $BER=10^{-9}$, to pro OOK-NRZ odpovídá 15,6 dB SNR. Pomocí vztahů (7) a (8) vypočteme potřebný přijímaný a následně vysílaný výkon. Vysílaný výkon je konstantní a přijímaný výkon je přímo úměrný $\sin^2\left(\frac{FOV}{2}\right)$. Pro nezastíněný obraz je přijímaný výkon resp. BER maximální. Zastíněním pořízeného obrazu vlivem osoby se zmenší užitečný FOV detektoru a tím i přijatý výkon. Velikost užitečného úhlu spočteme podle vztahu (10). Nejprve je však nutné určit plochu zaznamenanou detektorem bez zastínění S_{ref} .

$$S_{ref} = \pi \tan^2\left(\frac{FOV_{orig}}{2}\right) \quad (9)$$

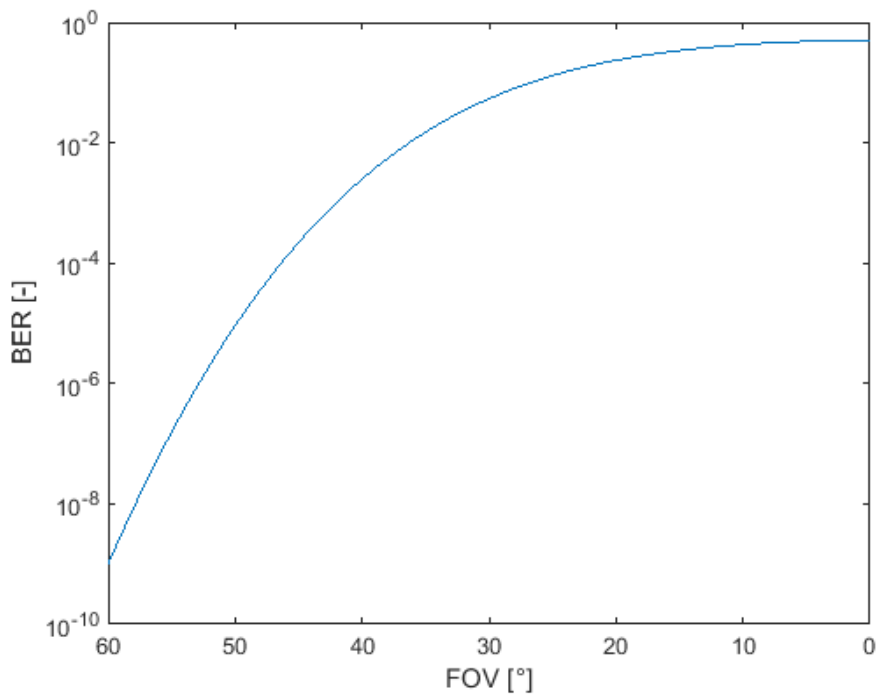
$$FOV_{ef} = 2 \arctan\left(\sqrt{\frac{S_{ref} \beta}{\pi 100}}\right) \quad (10)$$

β je procentuální zastínění plochy zaznamenané detektorem. Závislost FOV_{ef} na zastínění je zobrazena na obr. 38, kde velikost FOV_{ef} klesá se zastíněním pozvolna (průměrně o 0,25° na procento zastínění) až do polovičního zastínění. Od 50 % zastínění klesá FOV_{ef} čím dál strměji a při zastínění > 90 % klesá již rapidně k nule (2° na procento zastínění).

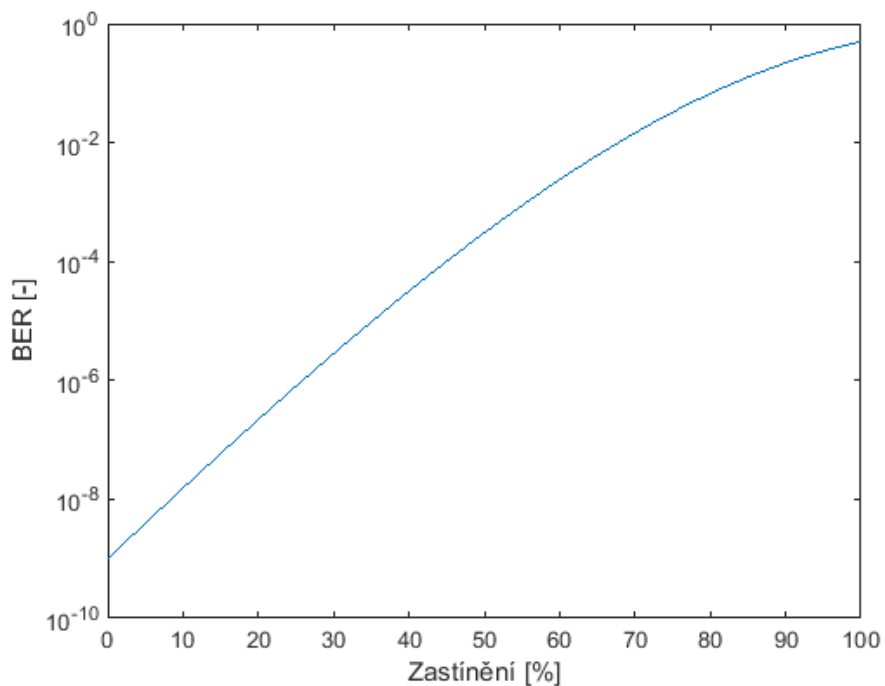


Obr. 38 - Závislost FOV_{ef} na zastínění

Výkon přijatý zastíněným detektorem můžeme spočítat obráceným postupem ze vztahu (8) a následně ze vztahů (1), (6) i odstup užitečného signálu od šumu SNR a bitovou chybovost BER. Výsledná závislost BER na FOV detektoru či na jeho zastínění je zobrazena na obr. 39 a obr. 40.



Obr. 39 - Graf závislosti BER na FOV

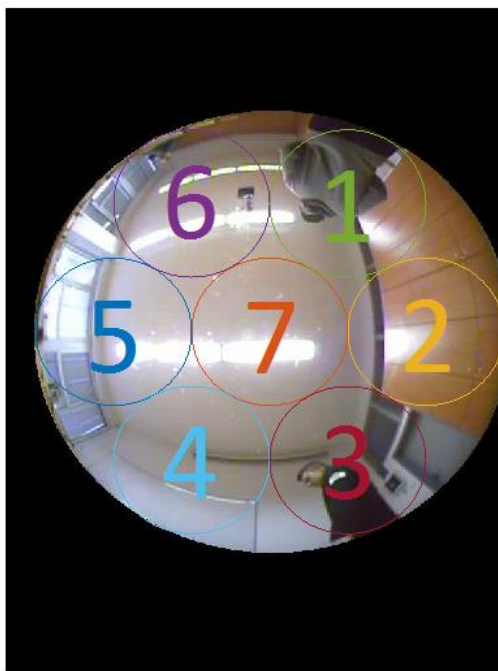


Obr. 40 - Graf závislosti BER na zastínění

Bitová chybovost BER je logaritmičticky závislá na FOV. Na zastínění je BER do 70 % téměř lineárně závislé.

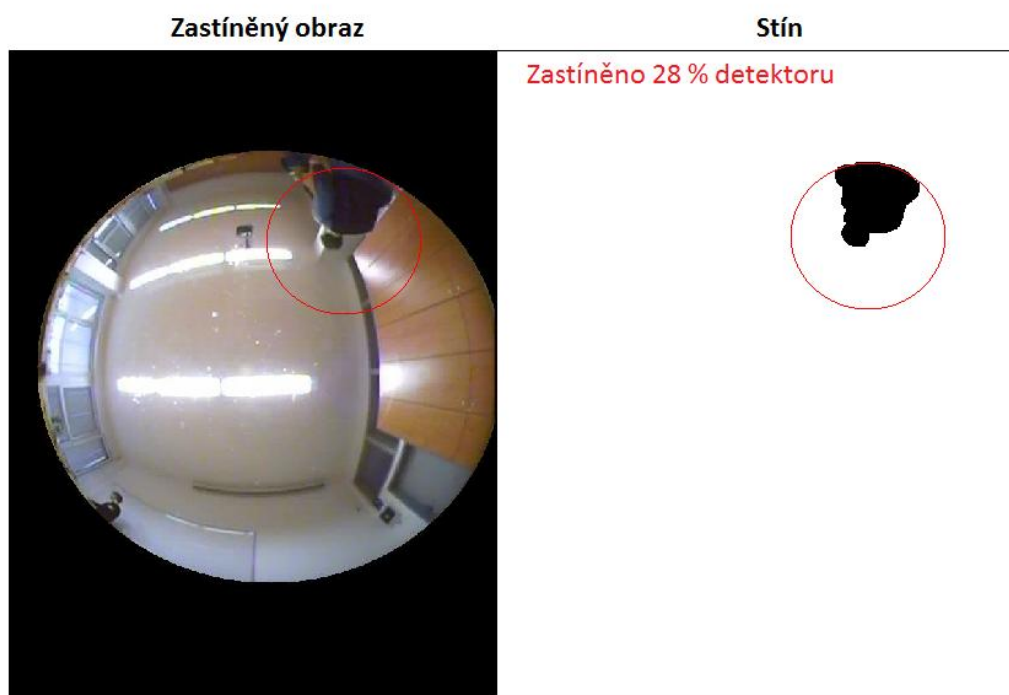
9.3. Segmentace snímku

Rozdělením snímku do sedmi segmentů lze simulovat kombinovaný přijímač 180° (popsaný v kapitole 3.2.2.). Toto rozdělení je ilustrováno na obr. 41.



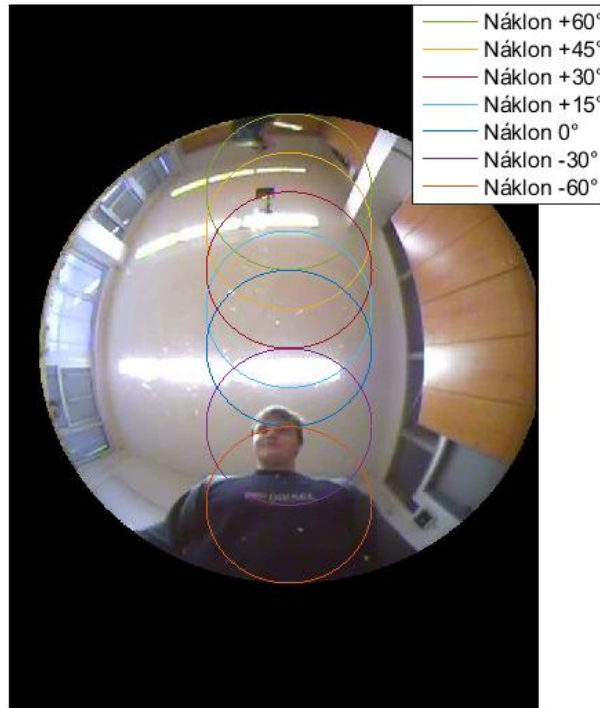
Obr. 41 - Rozdělení obrazu pro simulaci kombinovaného přijímače 180°

Ukázka výřezu detektoru č. 1 z kombinovaného přijímače 180° je na obr. 42.



Obr. 42 - Výřez detektoru č. 1 kombinovaného přijímače 180°

Další možností je rozdělení zaznamenaného obrazu ve vertikální rovině, čímž lze dosáhnout simulace libovolného náklonu přijímače. Na obr. 43 je zobrazeno rozdělení obrazu do sedmi různých náklonů směrem k uživateli i od uživatele.



Obr. 43 - Rozdělení obrazu ve vertikální rovině

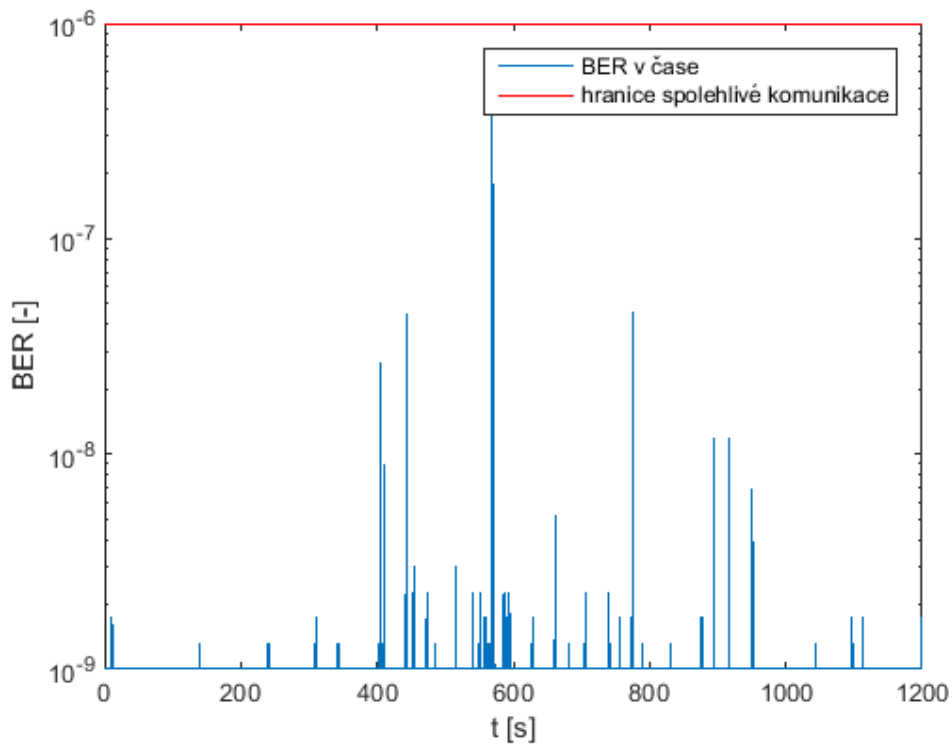
Tímto výřezem by bylo možné nastavit libovolný měřicí úhel v rozmezí -60° až $+60^\circ$ ve smyslu k uživateli nebo od uživatele.

9.4. Vliv náklonu přijímače

Segmentací pořízených snímků podle obr. 43 a následným výpočtem procentuálního zastínění je získána informace o zastínění přijímače v čase s různým náklonem. Tuto informaci je možné převést na bitovou chybovost v čase (viz obr. 40). Přesáhne-li pak BER určitou mez, můžeme hovořit o výpadku služby. Pro prázdnou místnost byly zvoleny parametry přenosu pro dosažení $BER 10^{-9}$. Tuto hodnotu lze snadno snížit vyšším výkonem vysílače, či větší plochou detektoru. Pro spolehlivý přenos dat je limit $BER 10^{-6}$, dále je komunikace stále možná, ale s chybami [21].

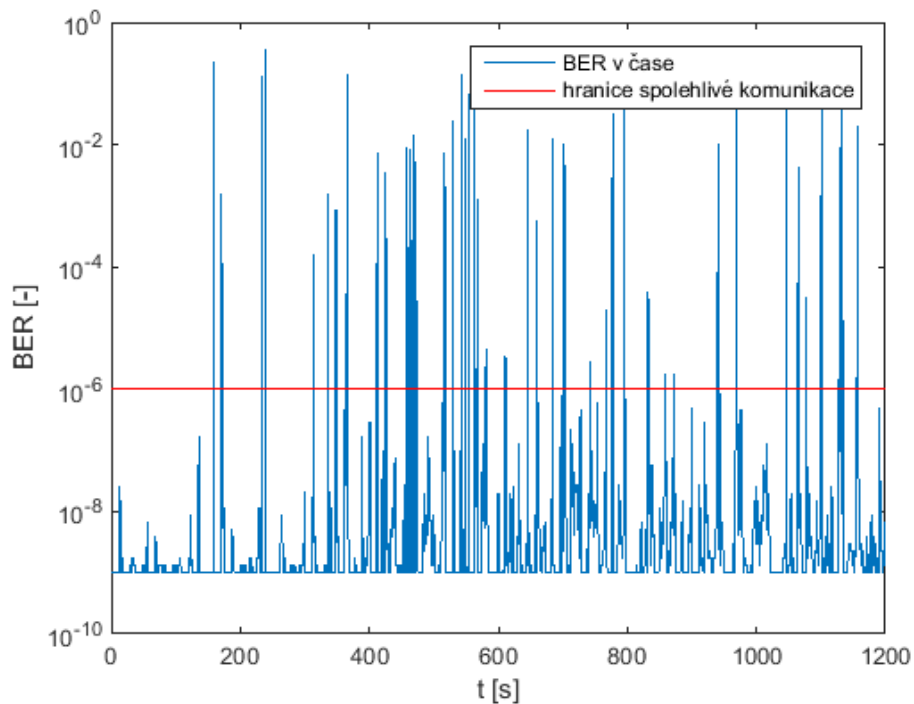
Přijímač položen na stole

Obrázky 44 a 45 ukazují nejnižší a nejvyšší BER podle naměřených hodnot zastínění pro různý úhel náklonu. Měření s různým počtem osob jsou v tomto případě poskládána za sebou a tvoří tak nepřetržité 20 minutové měření. Z počátku je v místnosti pouze jedna osoba a každých 5 minut přibude další.



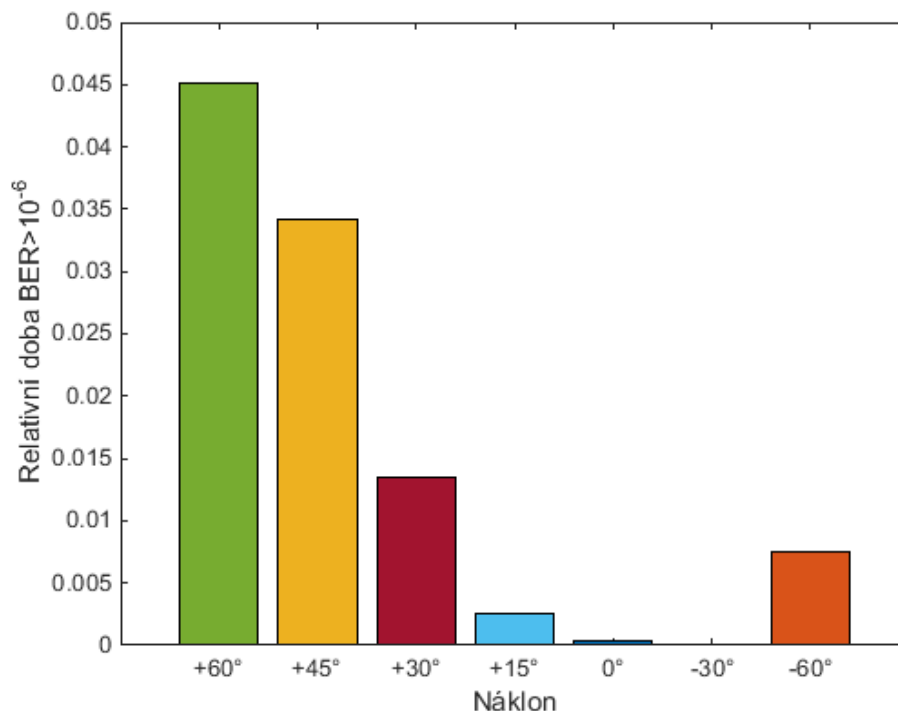
Obr. 44 – BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem -30° s proměnným počtem osob v místnosti

Hodnota BER v případě náklonu přijímače o -30° nepřesáhne hranici 10^{-6} a proto se jedná o spolehlivou komunikaci po celou dobu měření.



Obr. 45 – BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem $+60^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti

Při náklonu přijímače o $+60^\circ$ hodnota BER často přesahuje hodnotu 10^{-6} a dochází zde k větší chybovosti, případně i výpadkům komunikace. Doba, kdy je hodnota $BER > 10^{-6}$, vztažená k celkovému času měření pro tento, ale i další úhly naklonění přijímače je zobrazena na obr. 46.

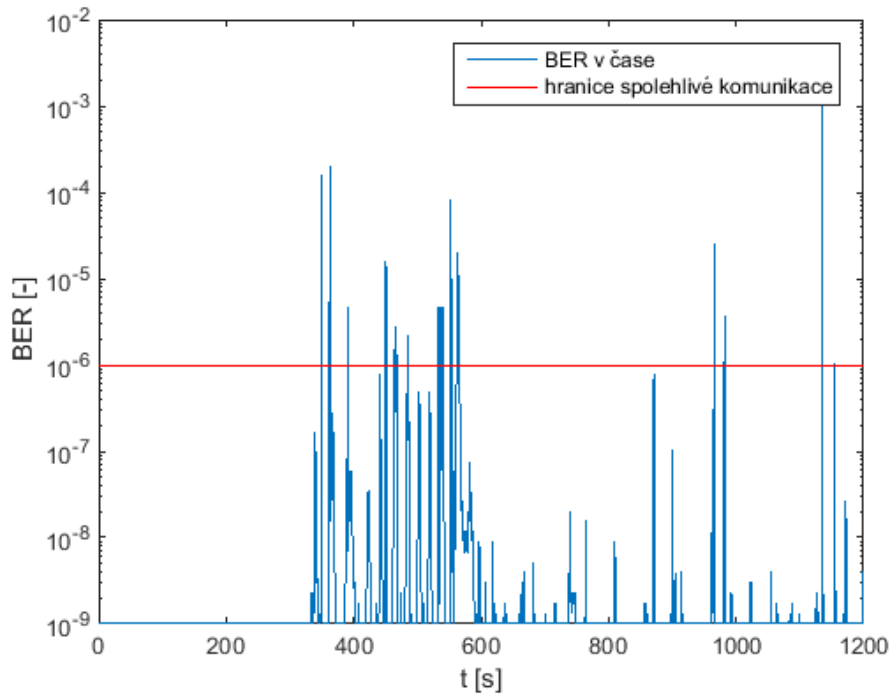


Obr. 46 - Relativní doba $BER > 10^{-6}$ pro různý úhel náklonu přijímače položeného na stole s proměnným počtem osob v místnosti

Nejvyšší relativní doba překročení $BER 10^{-6}$ pro úhel náklonu $+60^\circ$ činí 0,045. Přenos je tedy pro toto naklonění nespolehlivý 4,5 % z celkového času měření. Naopak při náklonu o -60° je tato doba šestkrát menší. Spolehlivost komunikace je tedy závislá nejen na úhlu náklonu, ale i na orientaci přijímače vzhledem k místnosti. V tomto případě by byl nejspolehlivější přenos pro nakloněný přijímač o -30° . Vezmeme-li v potaz i orientaci přijímače, je nejvhodnější nenakloněný přijímač s téměř nulovou dobou nespolehlivosti komunikace. Průběhy BER pro jednotlivé úhly jsou uvedeny v příloze A (obr. 54 - 58).

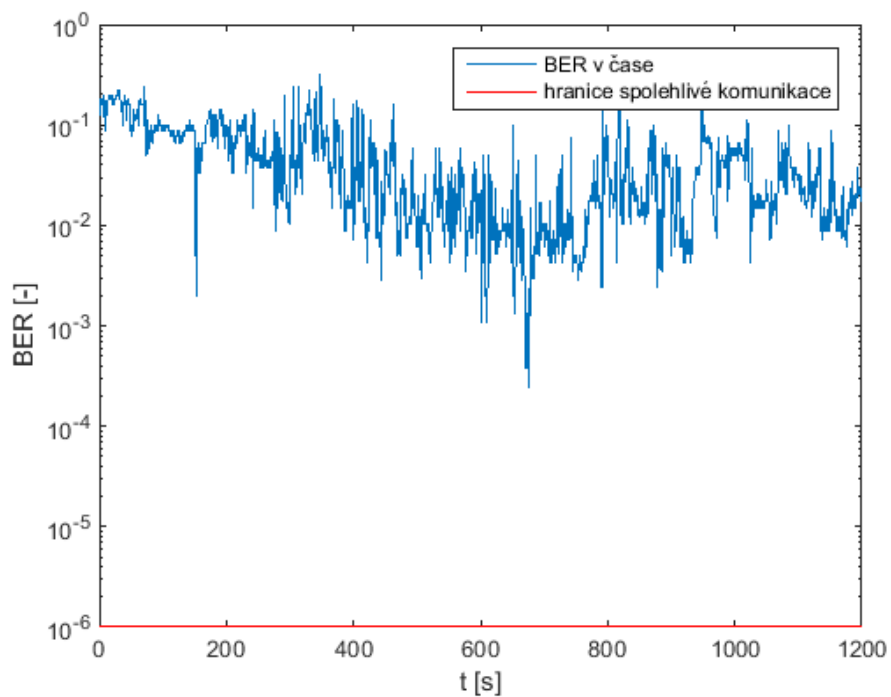
Přijímač držen uživatelem

Obrázky 47 a 48 ukazují nejnížší a nejvyšší BER podle naměřených hodnot zastínění pro různý úhel náklonu. Měření s různým počtem osob jsou v tomto případě poskládána za sebou a tvoří tak nepřetržitě 20 minutové měření. Z počátku je v místnosti pouze uživatel držící přijímač a každých 5 minut přibude v místnosti jedna osoba.



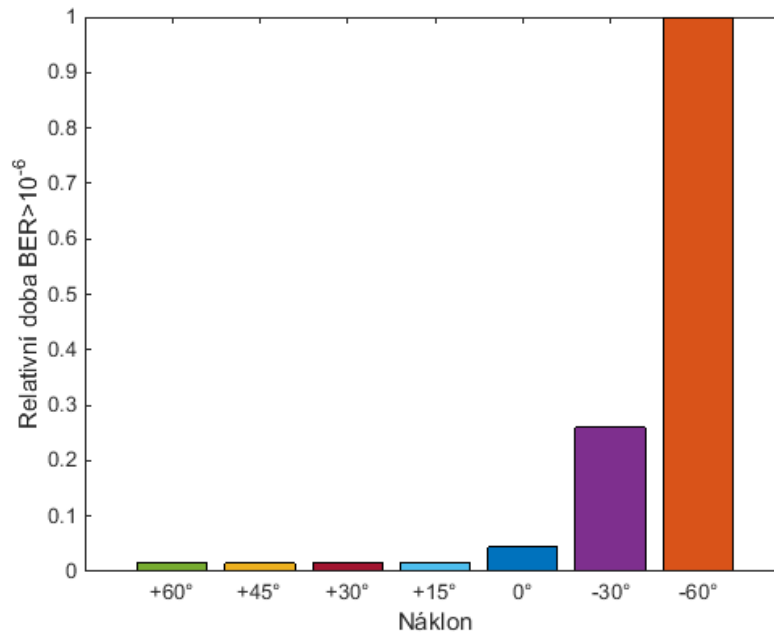
Obr. 47 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem +45° s proměnným počtem osob v místnosti

V prvních pěti minutách je přijímač s náklonem +45° zcela nezastíněn, jelikož jde o náklon směrem od uživatele, který je v místnosti sám. Komunikace v tomto intervalu by proto byla maximálně spolehlivá. S další osobou v místnosti je již BER proměnlivé a často překračuje hranici 10^{-6} nehledě na počet osob v místnosti.



Obr. 48 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem -60° s proměnným počtem osob v místnosti

Při náklonu -60° , tedy směrem k uživateli, je přijímač téměř kompletně zastíněn uživatelem po celou dobu měření, což má za následek velmi vysoké hodnoty BER a komunikace by byla prakticky nemožná.

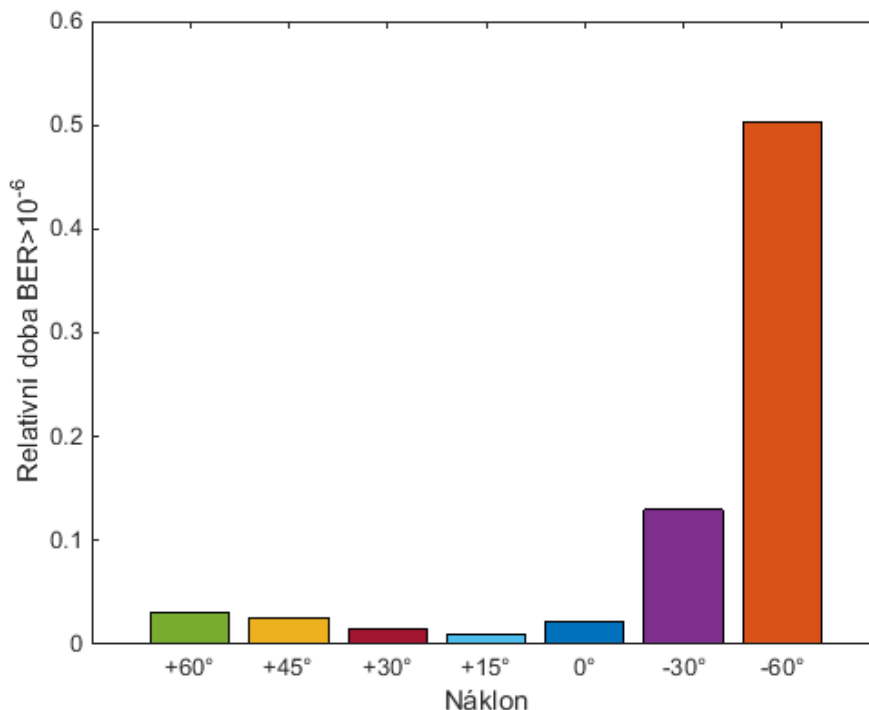


Obr. 49 - Relativní doba BER > 10⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače držného uživatelem s proměnným počtem osob v místnosti

Relativní doba překročení BER 10^{-6} je pro úhel náklonu -60° rovna jedné. Přenos je tedy pro toto naklonění nespolehlivý po celou dobu měření. Pro náklon od $+15^\circ$ do $+60^\circ$ je relativní doba nespolehlivosti vyrovnaná a nepřesahuje hodnotu 0,02. Průběhy BER pro jednotlivé úhly jsou uvedeny v příloze A (obr. 59 - 63).

Volba nejvhodnějšího náklonu

Sjednocením relativní doby BER > 10⁻⁶ s přijímačem položeným na stole a držným uživatelem (obr. 46 a obr. 49) získáme představu o nejvhodnějším náklonu přijímače.



Obr. 50 - Relativní doba BER > 10⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače s proměnným počtem osob v místnosti

Na obr. 50 je zobrazena relativní doba BER > 10⁻⁶, kdy byl polovinu času měření přijímač položen na stole a druhou polovinu měření držen uživatelem. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.

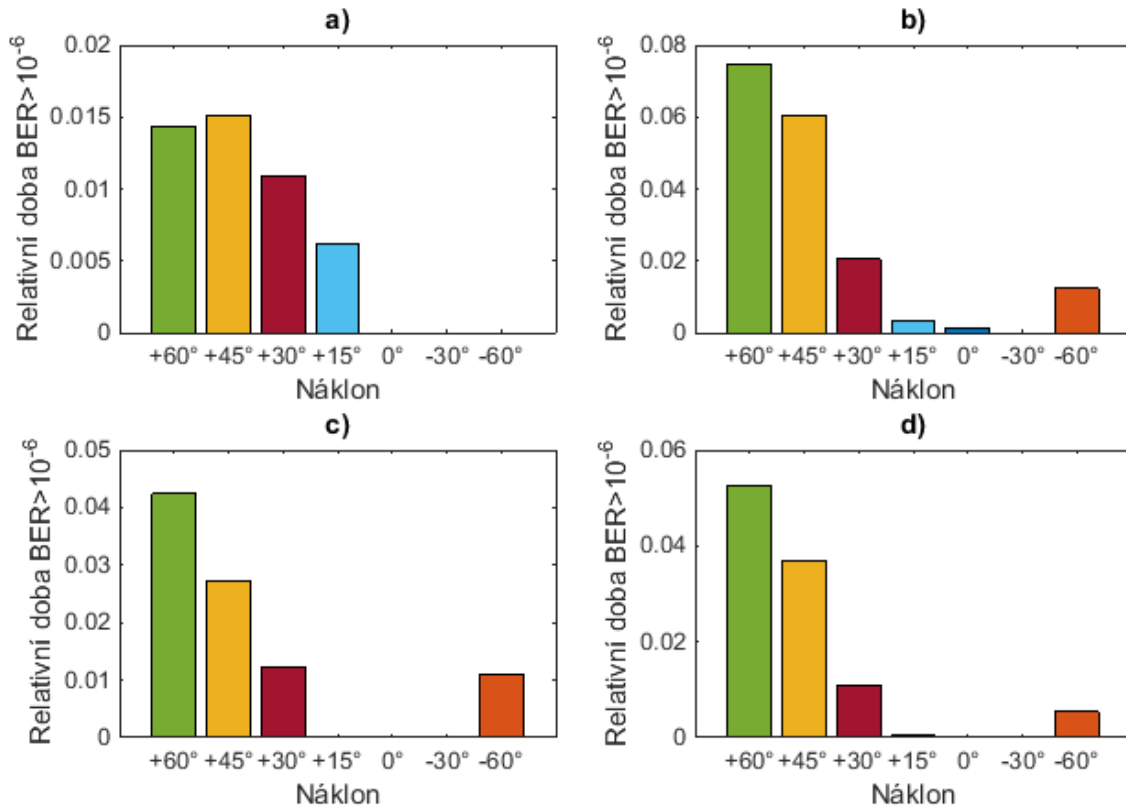
Náklon	+60°	+45°	+30°	+15°	0°	-30°	-60°
Relativní doba BER > 10 ⁻⁶	0,0307	0,0251	0,0150	0,0098	0,0221	0,1299	0,5036

Tab. 5 - Relativní doba BER > 10⁻⁶ pro různý úhel náklonu přijímače s proměnným počtem osob v místnosti

Z naměřených hodnot se ukázalo, že nejvhodnější náklon přijímače je +15°, tedy odkloněn od uživatele o 15°.

9.5. Vliv počtu osob

Vliv osob na zastínění přijímače byl již popsán v kapitolách 7.2 a 7.3. Zde je zobrazen vliv osob na zastínění pro různý náklon přijímače.



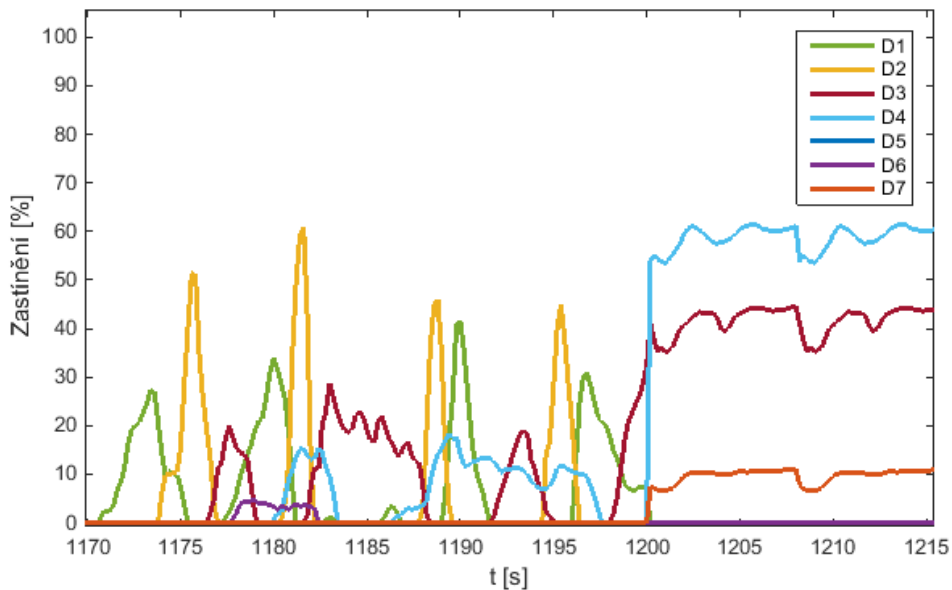
Obr. 51- Relativní doba $BER > 10^{-6}$ pro různý úhel náklonu přijímače položeného na stole s různým počtem osob v místnosti: a) 1 osoba, b) 2 osoby, c) 3 osoby, d) 4 osoby

Na obr. 51 je zobrazena relativní doba $BER > 10^{-6}$ s různým počtem osob v místnosti. Přijímač je položen na stole a z vykreslených dat je zřetelně patrný nárůst relativní doby $BER > 10^{-6}$ mezi grafy a) a b), kde je v místnosti jedna osoba a dvě osoby. Tento nárůst je pro náklon $+60^\circ$ více než pětinašobný, nicméně s vyšším počtem osob v místnosti grafy c) a d) navzdory očekávání poklesne. Z toho plyne, že zastínění je mnohem podstatnější ovlivněno konkrétním rozložením pohybu osob po místnosti, než na počtu osob.

9.6. Kombinovaný přijímač

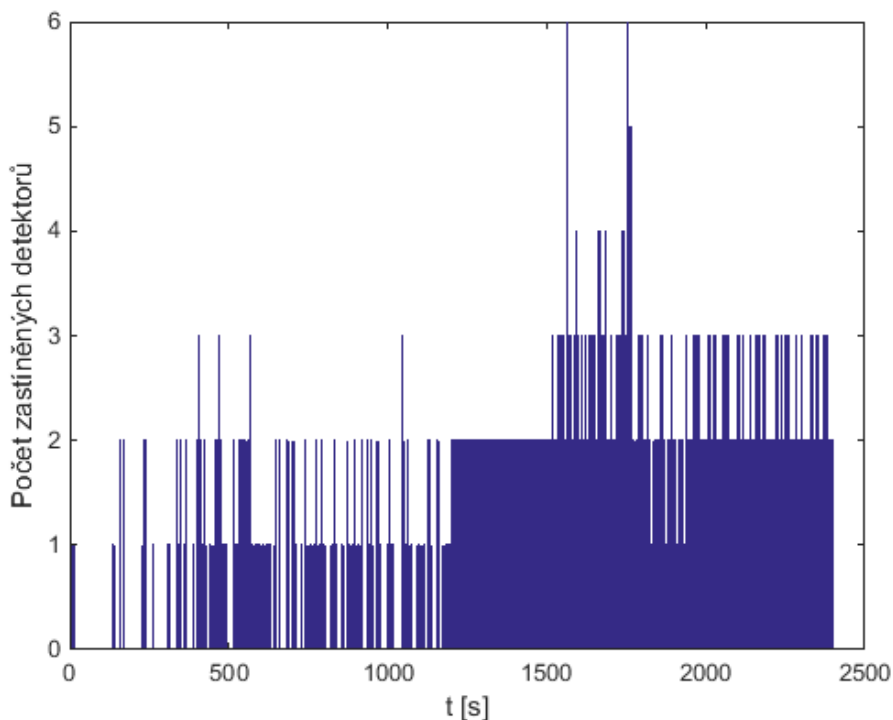
V kap. 8.1 bylo změřeno nejčastější naklonění přijímače drženého uživatelem. Tato hodnota činila 9° směrem k uživateli. Budeme-li kompenzovat tento náklon u určeného nejvhodnějšího náklonu, který činí 15° , dosáhneme nejlepšího příjmu pro komunikaci, kdy je přijímač držen uživatelem. Pro náklon $+24^\circ$ se nám ale naopak zhorší parametry příjmu v případě, že je přijímač položen na stole. Vhodnou variantou se tedy jeví použití kombinovaného přijímače.

Relativní doba $BER > 10^{-6}$ a zastínění v čase pro jednotlivé detektory kombinovaného přijímače, který byl polovinu času měření položen na stole a druhou polovinu měření držen uživatelem, je zobrazeno v příloze A (obr. 64 a obr. 65). Na obr. 52 je zobrazen 45s výřez časové závislosti zastínění.



Obr. 52 - Detail časové závislosti zastínění jednotlivých detektorů

Z detailu časové závislosti zastínění jednotlivých detektorů je patrné, že jsou při průchodu osoby kolem přijímače zastiňovány postupně. V případě, že je přijímač držen uživatelem (od času 1200 s), jsou z velké části zastíněny dva detektory současně. Pokud je však přijímač položen na stole, dochází k současnému zastínění čtvrtiny plochy dvou a více detektorů spíše výjimečně.



Obr. 53 – Množství současně zastíněných detektorů

Obr. 53 ukazuje kolik detektorů je v daný moment současně zastíněno natolik, že překračují hranici BER 10^{-6} . V tab. 6 jsou uvedeny relativní doby současného zastínění.

Počet současně zastíněných detektorů	1	2	3	4	5	6	7
Relativní doba BER > 10^{-6}	0,6375	0,467	0,05017	0,00483	0,00158	0,0005	0

Tab. 6 - Relativní doba současného zastínění detektorů

Více než třetinu času je k dispozici 6 nezastíněných detektorů. Téměř polovinu času měření jsou zastíněny dva detektory. To je způsobeno především uživatelem v druhé části měření. Tři detektory jsou zastíněny pouze v 5 % času. Po celou dobu měření je vždy nezastíněný alespoň jeden detektor. Díky tomu je tento přijímač velice vhodný pro komunikaci ve viditelném světle, neboť vždy může být vybrán nezastíněný detektor a může být dosaženo spolehlivé komunikace.

10. Závěr

VLC je velmi perspektivní metodou vysokorychlostní bezdrátové komunikace. Její největší výhodou je současné využití pro přenos dat i osvětlení. Další obrovskou výhodou je široké nelicencované pásmo pro přenos dat, které poskytuje volné využití kdekoli.

V rámci této práce byla popsána bezdrátová optická komunikace včetně porovnání s RF komunikací. Byly popsány nejen základní optické prvky používané ve VLC komunikaci a jejich principy, ale i možnost využití kamery telefonu či kombinovaného přijímače s rozšířeným zorným polem. Byly navrženy testovací scénáře pro měření komunikace ve viditelném světle.

Během této práce byly provedeny dvě série měření. První série využívala sférickou kameru AllSkyCam ACS-N1 a probíhala v učebně na fakultě elektrotechnické. V učebně byla provedena měření ve dvou scénářích s různou oblastí pohybu osob. Při prvním scénáři se osoby pohybovaly po celé ploše místnosti, kdežto při druhém scénáři byl pohyb omezen na 1,35m široký pruh, čímž byl simulován pohyb na chodbě. V obou případech byl postupně navyšován počet lidí v místnosti a zkoumán vliv na zastínění. Procentuální zastínění FOV vlivem osob bylo určeno v prostředí Matlab porovnáním s referenčním snímkem, který byl pořízen na začátku každého měření.

Druhá série měření využívala mobilní telefon Samsung Galaxy SIII a vytvořenou android aplikaci pro ukládání dat ze senzorů a probíhala ve veřejných prostorech vestibulu metra a v hale vlakového nádraží. Určení zastínění vlivem osob bez referenční hodnoty bylo nepřesné, a proto nebyly pro tato měření zpracovány statistiky příjmu. S mobilním telefonem byla navíc provedena analýza náklonu, která ukázala, že nejběžnější náklon telefonu je 9° směrem k uživateli.

Statistiky příjmu byly odvozeny pro konfiguraci s nepřímou viditelností (NLOS) na základě měření se sférickou kamerou AllSkyCam ASC-N1. Byl vyhodnocen vliv náklonu přijímače na bitovou chybovost. Z toho byl určen nejvhodnější úhel náklonu 15° směrem od uživatele. Nakonec byla provedena statistika příjmu pro kombinovaný přijímač se 180° zorným polem. Z té vyplynulo, že byl po celou dobu měření vždy alespoň jeden detektor přijímače nezastíněný a byl by zaručen spolehlivý přenos.

VLC komunikace je při nadimenzování dostatečného odstupů signálu od šumu pro NLOS konfiguraci odolná proti zastínění vlivem osob. Při vhodné volbě náklonu nebo použití kombinovaného přijímače se 180° FOV nabízí VLC spolehlivou komunikaci i bez nutnosti přímé viditelnosti.

Dalším postupem práce by mohlo být vylepšení algoritmu pro určení zastínění vlivem osob pro měření s mobilním telefonem či reálné měření VLC komunikace s přenosem dat.

Literatura

- [1] HAAS, Harald. 2014. My Li-Fi Revolution [video]. Tam Dalyell Prize Lecture [online]: The University of Edinburgh. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=WRG9iXZbuAc>
- [2] FAHAMUEL, P., J. THOMPSON a H. HAAS. 2014. Improved indoor VLC MIMO channel capacity using mobile receiver with angular diversity detectors. In: 2014 IEEE Global Communications Conference. IEEE, s. 2060-2065. DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037111. ISBN 978-1-4799-3512-3.
- [3] Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., Optical wireless communications. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2012.
- [4] HAAS, Harald. 2011. *Wireless data from every light bulb* [video]. TEDGlobal [online]: TED. Dostupné z: http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb
- [5] Electromagnetic radiation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation
- [6] PureLiFi: How does VLC work? 2014. *PureLiFi: Light becomes data* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: http://purelifi.com/what_is_li-fi/how-does-vlc-work/
- [7] GUJJARI, Durgesh. 2012. *Visible Light Communication*. Dalhousie University Halifax, Nova Scotia.
- [8] VOBECKÝ Jan; ZÁHLAVA Vít. 2005. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. Praha: Grada Publishing, s. 70-73. ISBN 80-247-1241-5.
- [9] JUNGnickel, Volker, Jelena VUCIC a Klaus-Dieter LANGER. 2014. High-speed Optical Wireless Communications. In: *Fraunhofer: Heinrich Hertz Institute* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: ftp://ftp.hhi.fraunhofer.de/jungnickel/OFC2014/Jungnickel_OFC_March2014.pdf
- [10] HORÁK, Jaroslav. 2009. *Optické pojítka* [online]. Brno [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15812. Diplomová práce. VUT Brno.
- [11] Burton, A.; Le-Minh, H.; Ghassemlooy, Z.; Rajbhandari, S.; Haigh, P.A.; „Performance analysis for 180° receiver in visible light communications“, Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), pp.48,53, 13 Aug. 2012
- [12] DANAKIS, Christos, Mostafa AFGANI, Gordon POVEY, Ian UNDERWOOD a Harald HAAS. 2012. Using a CMOS camera sensor for visible light communication. In: *2012 IEEE Globecom Workshops*. IEEE, s. 1244-1248. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477759. ISBN 978-1-4673-4941-3.

- [13] Chia-Kai Liang, Yu-Chun Peng and Homer Chen, Rolling shutter distortion correction. 2005, SPIE Visual Communications and Image Processing, vol. 5960, pp. 59603V–1
- [14] IEEE 802.15.7: Part 15.7. *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. NY 10016-5997; 6 September 2011; American National Standards Institute; ISBN 978-0-7381-6665-0
- [15] POVEY, Gordon. 2011. An IEEE Standard for Visible Light Communications. *Visible Light Communications* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>
- [16] STEFAN, Irina, Harald BURCHARDT a Harald HAAS. 2013. Area spectral efficiency performance comparison between VLC and RF femtocell networks. In: *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, s. 3825-3829. DOI: 10.1109/ICC.2013.6655152. ISBN 978-1-4673-3122-7.
- [17] European Standard EN 12464-1, Lighting of Indoor Work Places; 2009.
- [18] Datasheet: LCW W5SM Golden Dragon white LED, [online]. Osram Opto Semiconductors. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00169640_0.pdf/LCW%20W5SM.pdf
- [19] Specification: All Sky Cam ASC-N1, [online]. Moonglow Technologies. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.moonglowtech.com/products/AllSkyCam/Specifications.shtml>
- [20] ZENG, Lubin, Dominic O'BRIEN, Hoa LE-MINH, Kyungwoo LEE, Daekwang JUNG a Yunjie OH. 2008. Improvement of Data Rate by using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System. In: *2008 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications*. IEEE, s. 678-682. DOI: 10.1109/ICCSC.2008.149. ISBN 978-1-4244-1707-0.
- [21] MANEA, Viorel, Radu DRAGOMIR a Sorin PUSCOCI. 2011. OOK and PPM modulations effects on bit error rate in terrestrial laser transmissions. In: *TELECOMUNICAȚII* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.agir.ro/buletine/1578.pdf>

Seznam příloh

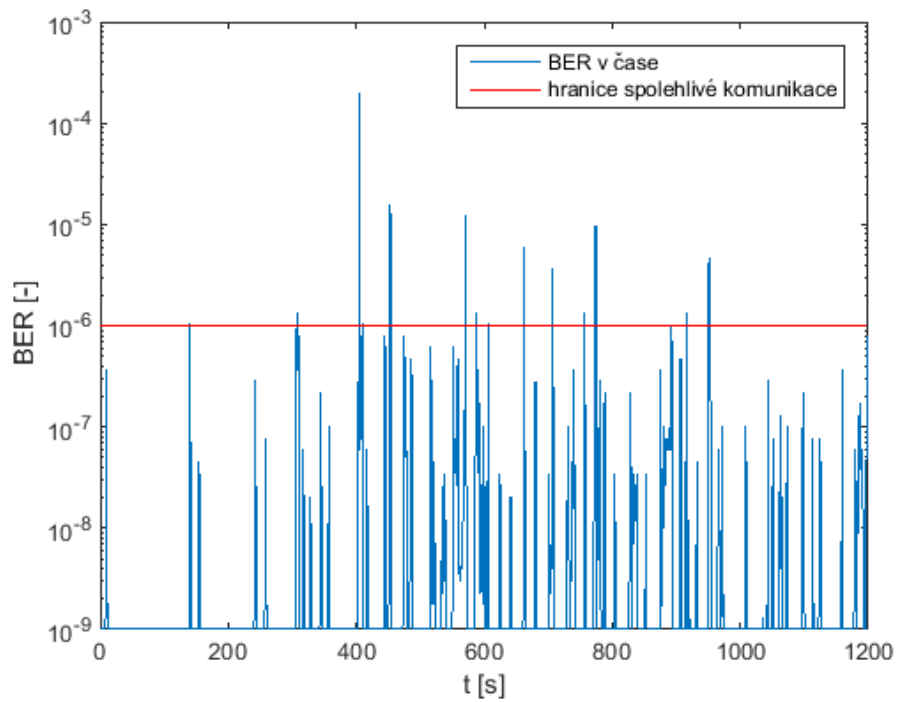
Příloha A: Grafy

Obr. 54 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem -60° s proměnným počtem osob v místnosti.....	50
Obr. 55 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem 0° s proměnným počtem osob v místnosti.....	50
Obr. 56 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem $+15^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti.....	51
Obr. 57 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem $+30^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti.....	51
Obr. 58 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem $+45^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti.....	52
Obr. 59 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem -30° s proměnným počtem osob v místnosti.....	52
Obr. 60 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem 0° s proměnným počtem osob v místnosti.....	53
Obr. 61 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem $+15^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti.....	53
Obr. 62 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem $+30^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti.....	54
Obr. 63 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem $+60^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti.....	54
Obr. 64 - Časová závislost zastínění jednotlivých detektorů	55
Obr. 65 - Relativní doba $BER > 10^{-6}$ pro jednotlivé detektory přijímače položeného na stole i drženého uživatelem.....	55

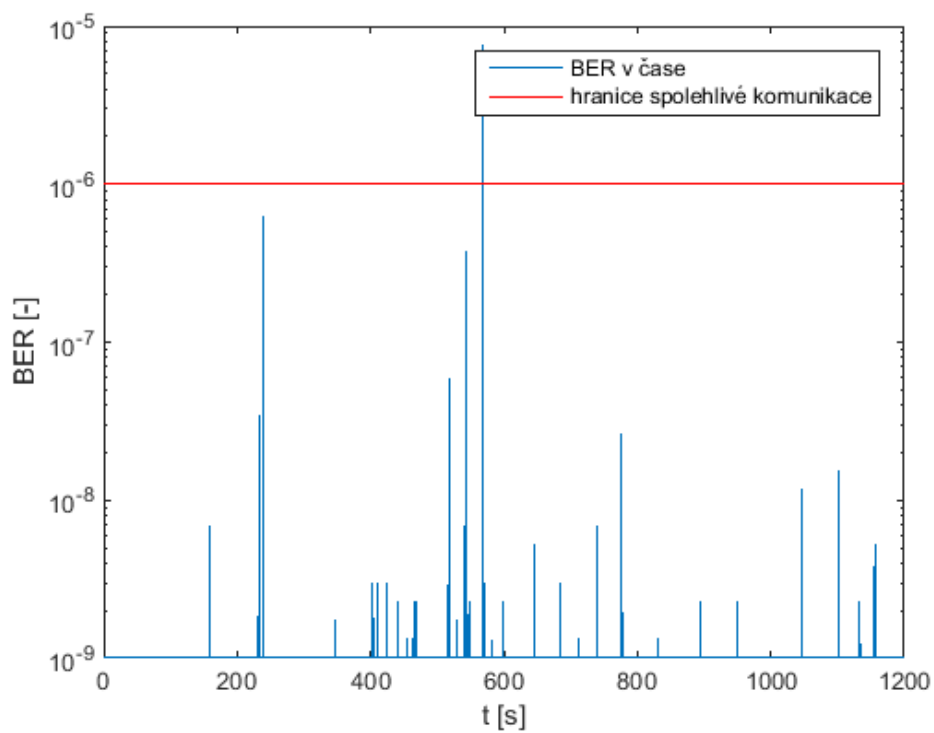
Příloha B: Fotografie

Obr. 66 - Měření v učebně s kamerou AllSkyCam ACS-N1	56
Obr. 67 - Ukázka určení zastínění	56
Obr. 68 - Ukázka určení zastínění	56

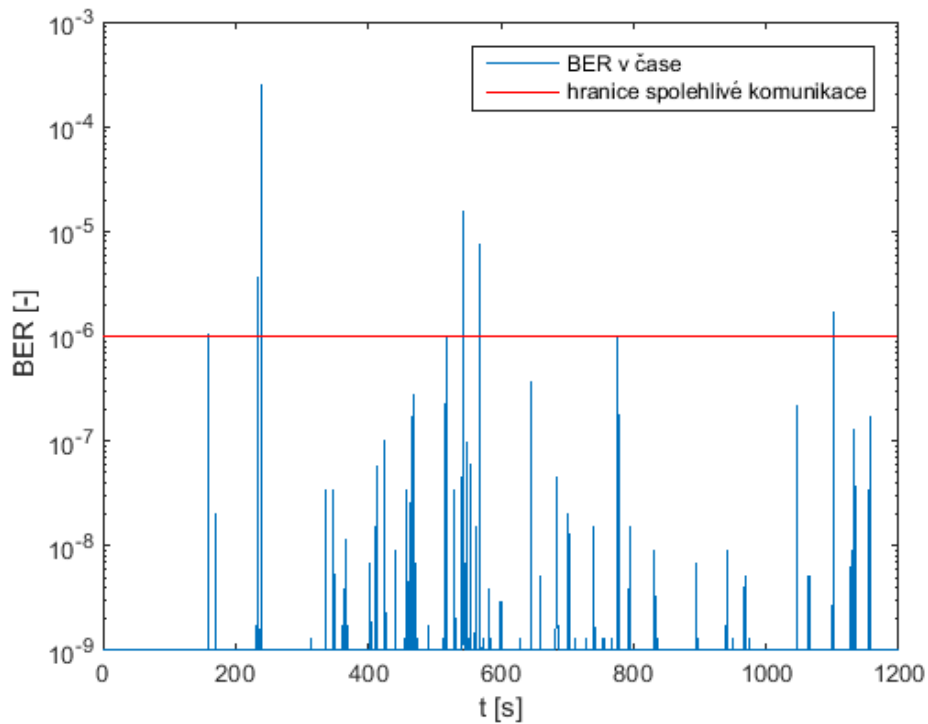
Příloha A: Grafy



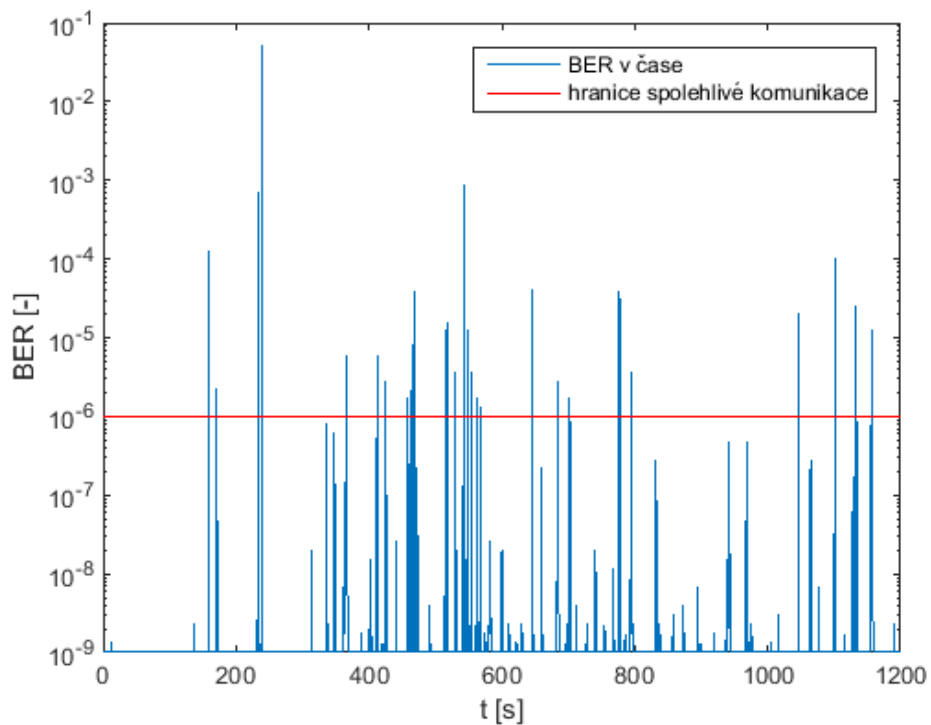
Obr. 54 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem -60° s proměnným počtem osob v místnosti



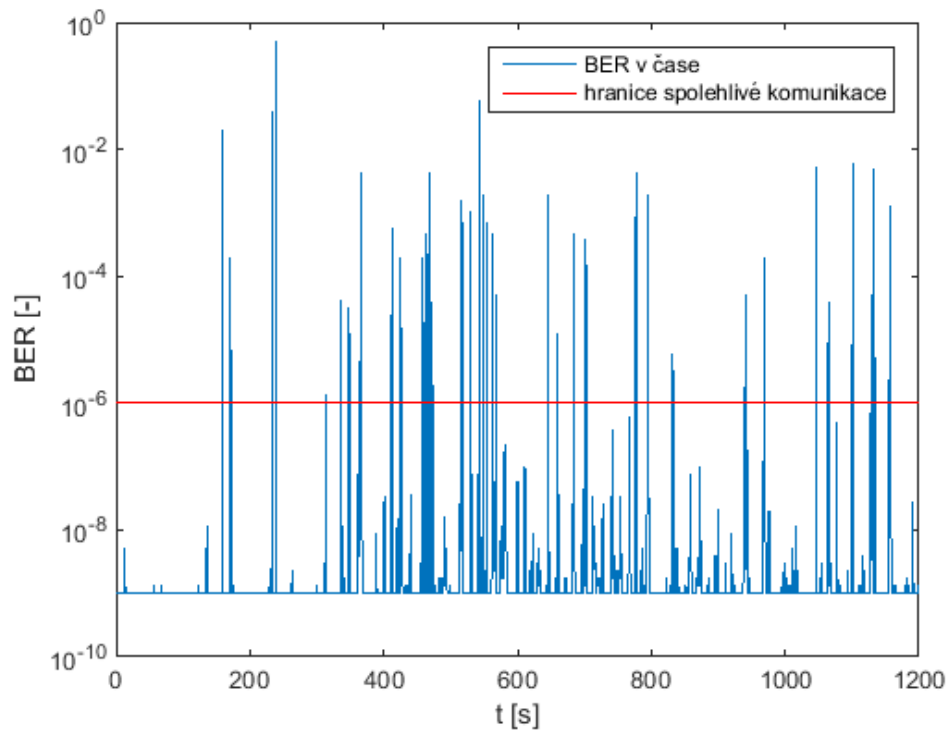
Obr. 55 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem 0° s proměnným počtem osob v místnosti



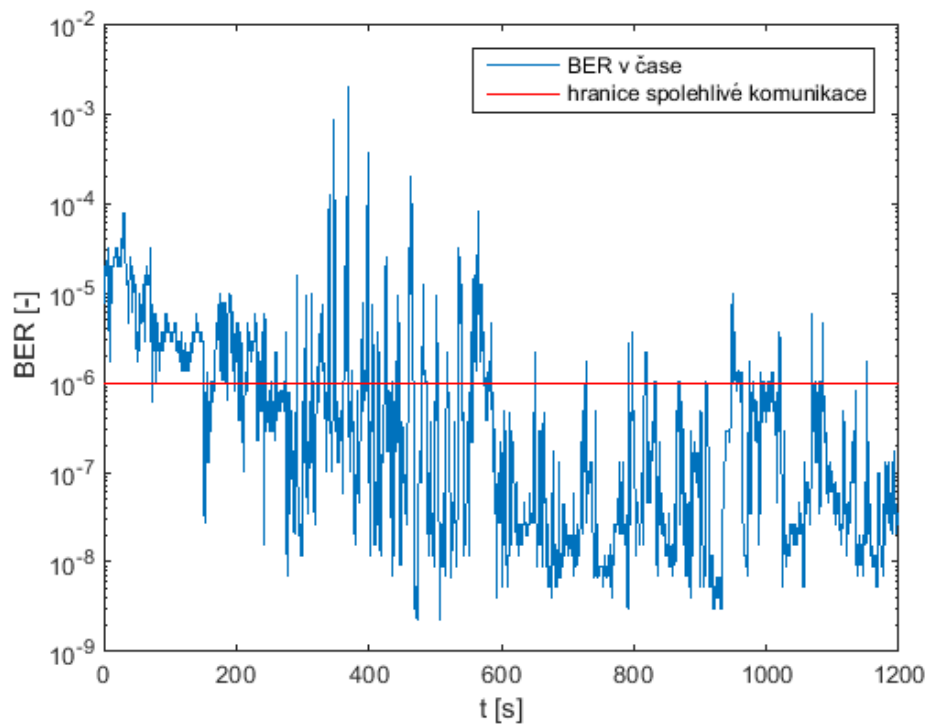
Obr. 56 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem $+15^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti



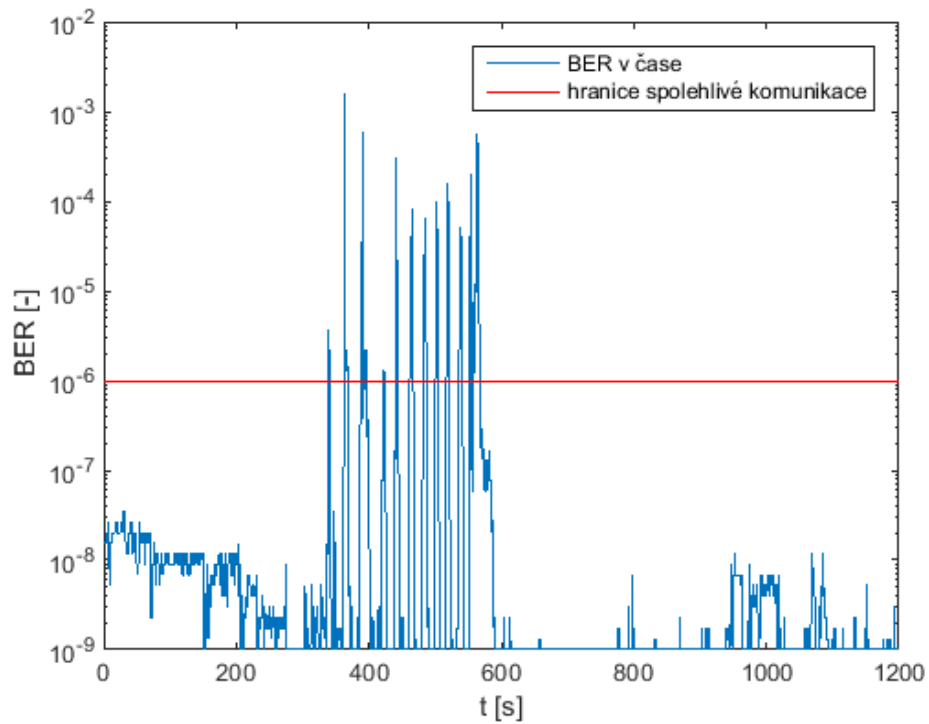
Obr. 57 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem $+30^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti



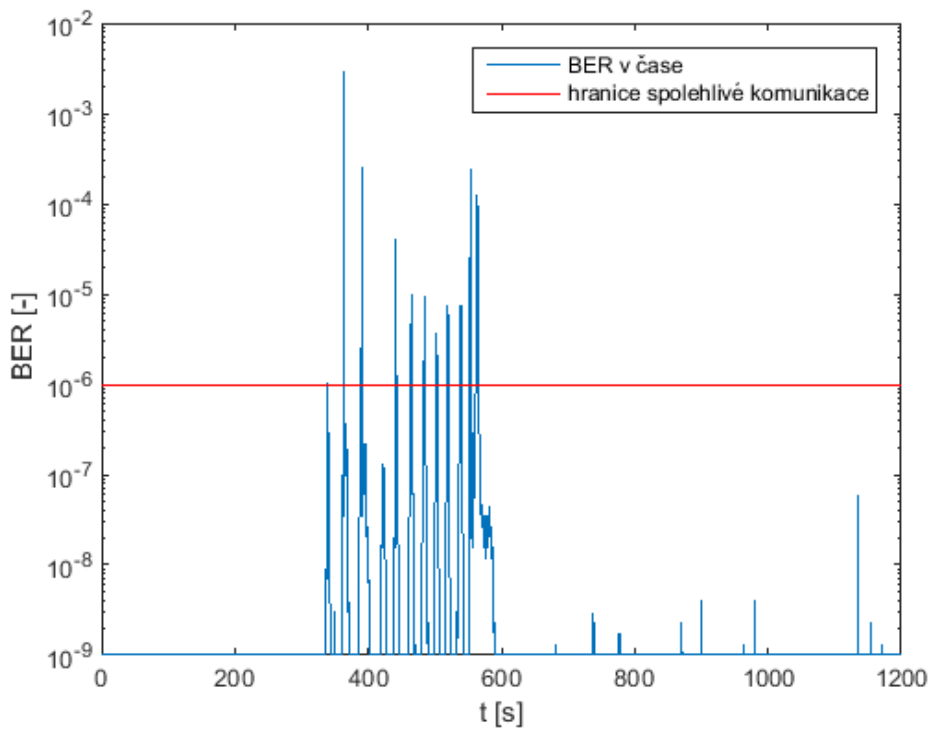
Obr. 58 - BER v čase pro přijímač položený na stole s náklonem $+45^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti



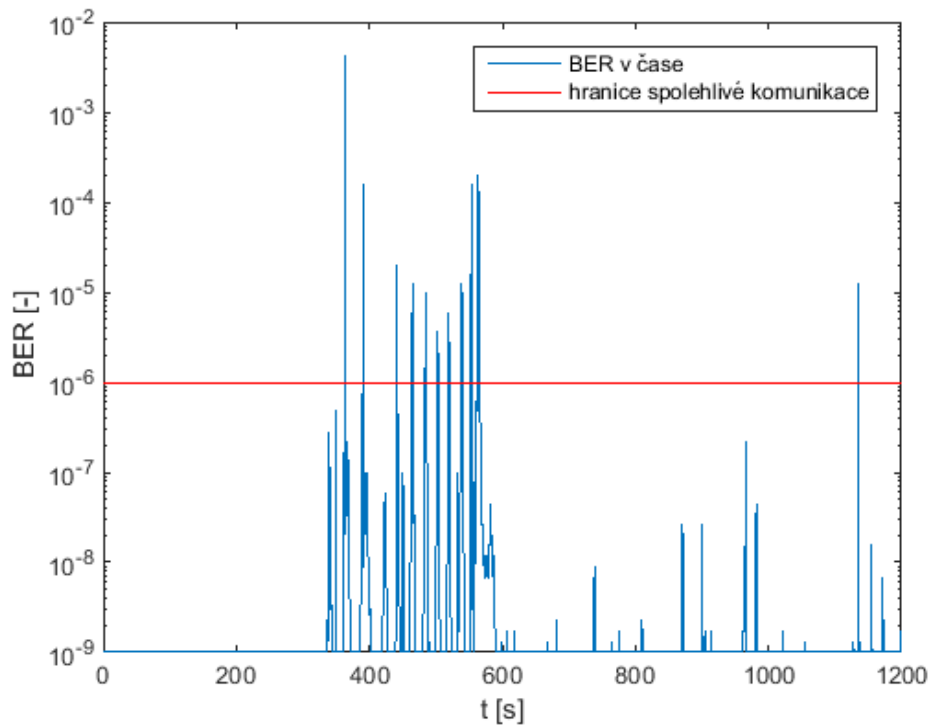
Obr. 59 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem -30° s proměnným počtem osob v místnosti



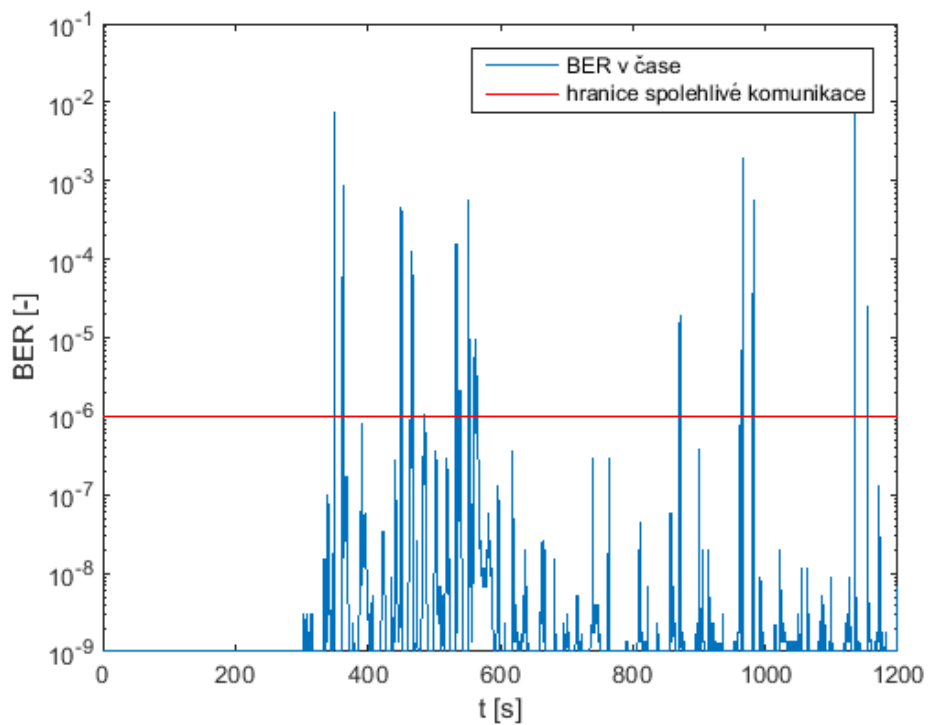
Obr. 60 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem 0° s proměnným počtem osob v místnosti



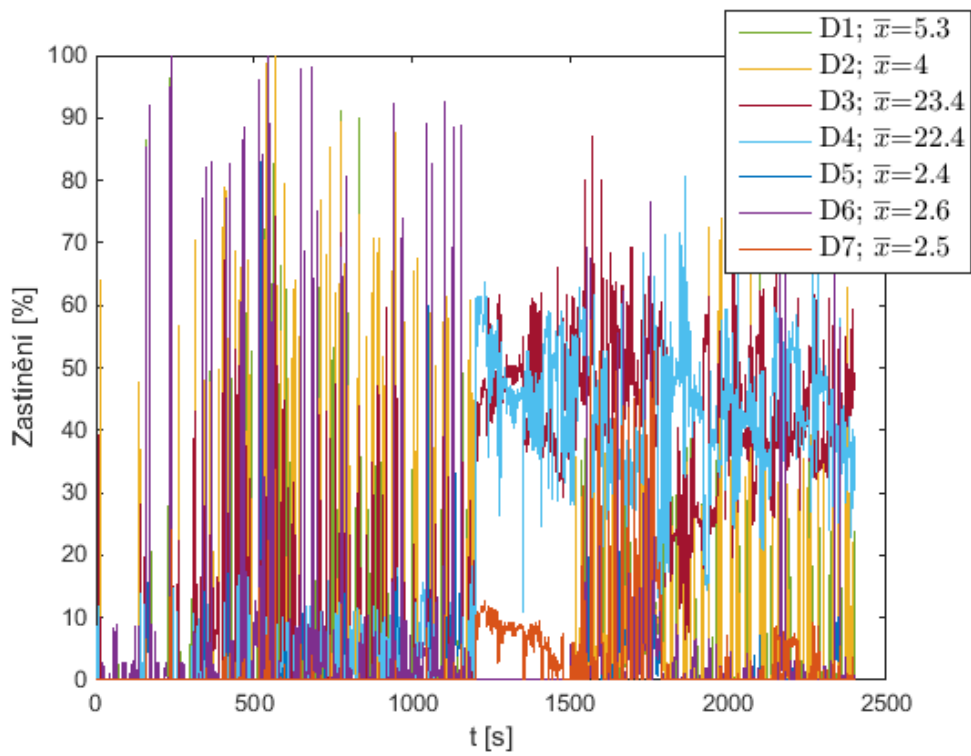
Obr. 61 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem $+15^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti



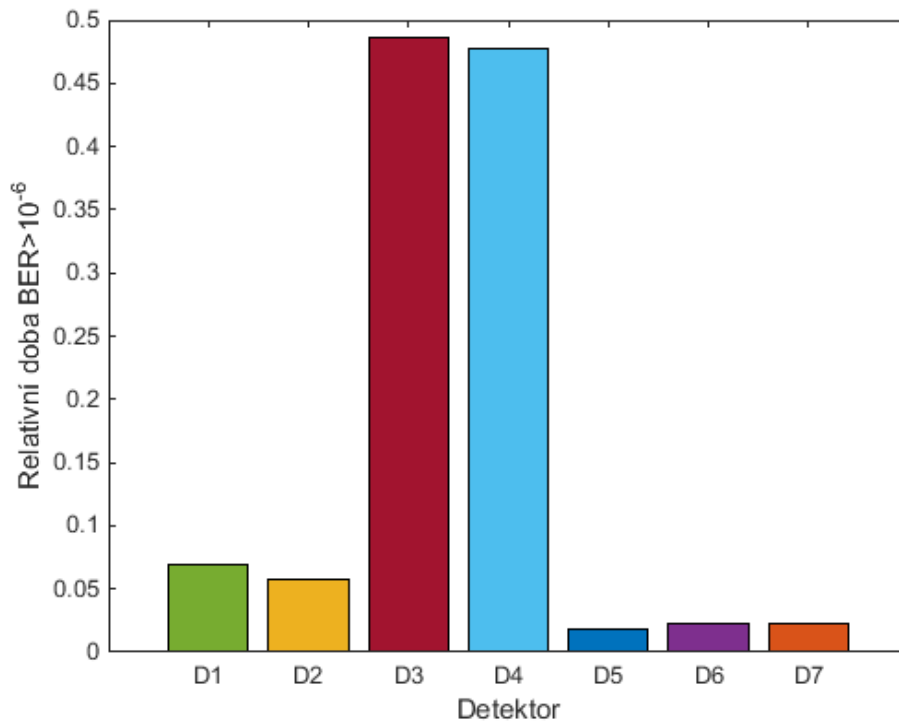
Obr. 62 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem $+30^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti



Obr. 63 - BER v čase pro přijímač držený uživatelem s náklonem $+60^\circ$ s proměnným počtem osob v místnosti



Obr. 64 - Časová závislost zastínění jednotlivých detektorů



Obr. 65 - Relativní doba BER > 10⁻⁶ pro jednotlivé detektory přijímače položeného na stole i držného uživatelem

Příloha B: Fotografie



Obr. 66 - Měření v učebně s kamerou AllSkyCam ACS-N1



Obr. 67 - Ukázka určení zastínění



Obr. 68 - Ukázka určení zastínění