



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

**Analýza využití komunikace ve viditelném světle
k lokalizaci osob**

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Bezdrátová komunikace

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

Konzultant specialista: Ing. Pet Chvojka

Bc. Filip Bartoš

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.

Datum: 11. 5. 2015

.....

podpis studenta

Anotace:

Tato diplomová práce pojednává o komunikaci ve viditelném světle (VLC). V prvních kapitolách je tato technologie popsána od historických počátků, přes novodobé základní zdroje bílého světla a detektory. Zároveň je popsán jeden z nejdůležitějších standardů IEEE 802.15.7, který popisuje použitelné modulace a jejich přenosové rychlosti

Druhá část práce je věnována určování polohy pomocí viditelného světla (VLP). Jsou zde uvedeny metody, které jsou vhodné pro tuto problematiku. Hlavní části práce jsou věnovány vytvoření modelu rozložení optického výkonu pro OLED zdroje a ověření teoretických lokalizací pomocí VLC s měřením.

Klíčová slova: Visible light communication, Visible light positioning, LED, OLED, IEEE 802.15.7

Annotation:

This diploma's thesis is dealing with visible light communication (VLC). In the initial chapters, the technology is described from historical origins through modern white light sources and detectors. There is described one of the most important standards IEEE 802.15.7 as well, which describes modulation and the transmission rate.

The second part is devoted to visible light positioning (VLP). There are introduced typical methods that are suitable for this issue. The main chapters are dedicated to development of the model of the distribution of optical power coming from the OLED source and verification of the theoretical VLC localization results by experimental data.

Index Terms: Visible light communication, Visible light positioning, LED, OLED, IEEE 802.15.7

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Prof. Ing. Stanislavu Zvánovcovi Ph.D. za cenné rady při korektuře. Mé poděkování patří i Ing. Petrovi Chvojkovi za poskytnutí odborných rad, ochotu a vstřícnost během zpracování této práce.

Zároveň bych rád poděkoval mé rodině za podporu a trpělivost během mého studia.

V Praze dne

.....

podpis autora

Seznam obrázků

Obr. 1: Elektromagnetické spektrum [1].....	1
Obr. 2: Principiální schéma VLC - překresleno z [4]	5
Obr. 3: PN přechod u LED.....	7
Obr. 4: Generování bílého světla pomocí RGB a využití fosforu [8,9].....	8
Obr. 5: Šířka pásma modulace s a bez modrého filtru [4].....	9
Obr. 6: Struktura OLED.....	11
Obr. 7: Princip fotodiody	12
Obr. 8: Řez fotodetektozem.....	13
Obr. 9: Podporované topologie.....	15
Obr. 10: Modulace OOK využívající Manchester kód	16
Obr. 11: VPPM s podporou stmívání.....	16
Obr. 12: Chromatický diagram [14].....	17
Obr. 13: Oddělení fyzických vrstev ve frekvenční oblasti.....	18
Obr. 14: Klasifikace spojů pro VLC	18
Obr. 15: Celulární topologie.....	19
Obr. 16: Difuzní konfigurace využívající odrazných bodů [4]	20
Obr. 17: Znázornění mnohacestného šíření.....	21
Obr. 18: Impulsová odezva systému (a) LOS spojení (b) Nepřímé spojení [4]	21
Obr. 19: Určení pozice pomocí trilaterace ve 2D prostoru	23
Obr. 20: Znázornění proměnných využitých ve výpočtech	26
Obr. 21: Typ N6SC30-F [27]	27
Obr. 22: N6SA30-B [28].....	27
Obr. 23: Rozsvícené OLED při měření.....	27
Obr. 24: Skutečná podoba OLED panelu.....	27
Obr. 25: Měřicí zapojení se dvěma OLED panely	28
Obr. 28: Rozložení opt. výkonu na desce.....	29
Obr. 26: Využitý fotodetektor [29].....	29
Obr. 27: Rozložení opt. výkonu na desce.....	29
Obr. 29: Rozložení opt. výkonu na desce.....	29
Obr. 30: Rozložení opt. výkonu na desce (shora).....	30
Obr. 31 Zobrazení rozdílu mezi naměřenými a simulovanými daty	30
Obr. 32: Rozložení opt. výkonu na desce (shora).....	30
Obr. 33: Rozložení opt. výkonu na desce.....	31
Obr. 34: Rozložení opt. výkonu na desce.....	31
Obr. 35: Rozložení opt. výkonu na desce.....	31
Obr. 36: Rozložení opt. výkonu na desce.....	31

Obr. 37: Zobrazení rozdílu mezi naměřenými a simulovanými daty	32
Obr. 38: Rozložení opt. výkonu na desce.....	32
Obr. 39: Rozložení opt. výkonu na desce.....	32
Obr. 40: Rozložení opt. výkonu na desce (shora).....	33
Obr. 41: Rozložení opt. výkonu na desce (shora).....	33
Obr. 42: Zobrazení rozdílu mezi naměřenými a simulovanými daty	33
Obr. 44: Zobrazení simulovaného rozložení s vysokým počtem bodů.....	34
Obr. 43: Četnost rozdílových hodnot.....	34
Obr. 45: Určování pozice pomocí trilaterace	35
Obr. 46: Výsledek lokalizace s následujícími parametry.....	36
Obr. 47: Výsledek lokalizace s následujícími parametry.....	37
Obr. 49: Výsledek lokalizace s následujícími parametry.....	38
Obr. 48: Výsledek lokalizace s následujícími parametry.....	38
Obr. 50: Výsledek lokalizace s následujícími parametry.....	39
Obr. 51: Zobrazení četnosti výsledků v závislosti na průměrné vzdálenosti odhadu	39
Obr. 52: Zobrazení četnosti výsledků v závislosti na střední odchylce odhadu.....	40

Seznam tabulek

Tab. 1: Klasifikace a vlastnosti zařízení	14
Tab. 2: Katalogové hodnoty využitých OLED panelů.....	27
Tab. 3: Parametry měřicí hlavice S 121C	29

Seznam použitých zkratk

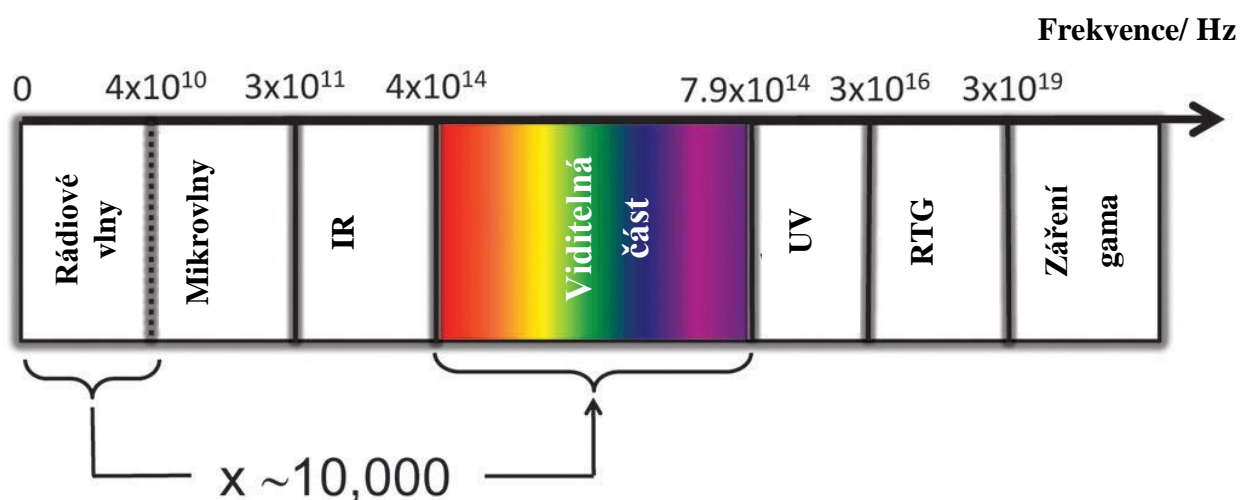
AOA	Angle Of Arrival (Úhel dopadajícího signálu)
ASE	Amplified Spontaneous Emission (Zesílená spontánní emise)
BER	Bit Error Rate (Bitová chybovost)
CSK	Color-shift keying (Klíčování barevným posunem)
FSO	Free Space Optic (Optický bezdrátový spoj)
GPS	Global Positioning System (Globální polohovací systém)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství)
JEITA	Japan Electronics and Information Technology Industries Association (Japonská průmyslová asociace elektroniky a informačních technologií)
LED	Light Emitting Diode (Elektroluminiscenční dioda)
LI-FI	Light Fidelity
LOS	Line of sight (Přímá viditelnost)
MIMO	Multiple-input multiple-output (Paralelní komunikace)
NLOS	Non-line of sight (Přímá viditelnost)
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing (Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením)
OLED	Organic Light Emitting Diode (Organická elektroluminiscenční dioda)
OWC	Optical wireless communications (Optická bezdrátová komunikace)
RF	Radio Frequency (Rádiové frekvence)
RSS	Receive signal Strength Intensity (Intenzita signálu)
SNR	Signal Noise Ratio (Odstup signál šum)
TDOA	Time Difference Of Arrival (Rozdíly v čase přicházejících signálů)
TOA	Time Of Arrival (Čas příchodu signálu)
VPAN	Visible light communication personal area network (Osobní síť)
VPPM	Variable pulse position modulation (Proměnlivá pulzně polohová modulace)
WDM	Wave Division Multiplexing (Vlnový multiplex)

Obsah

1. Úvod	1
2. Visible light communication	3
2.1. Historie	3
2.2. Komunikace ve viditelném světle	3
2.3. Zdroje.....	6
2.3.1. LED diody	6
2.3.1.1. Princip.....	6
2.3.2. OLED	10
2.4. Přijímače	12
2.4.1. Princip fotodetektoru	12
2.5. IEEE 802.15.7.....	14
2.5.1. Topologie sítě.....	15
2.5.2. Modulace	16
2.5.3. Fyzická vrstva	17
2.6. Druh spoje	18
2.6.1. Spoj na přímou viditelnost.....	19
2.6.2. Spoj na nepřímou viditelnost	20
Rozptýlené (difuzní) spojení.....	20
3. Určení polohy pomocí viditelného světla.....	22
3.1. Rozpoznání ID	22
3.2. Měření úhlu dopadu.....	23
3.3. Čas příchodu signálu	23
3.4. Rozdíl časů příchodu signálů	23
3.5. Síla přijatého signálu	24
4. Simulace a reálné měření výkonového rozložení	25
4.1. Simulace	25
4.2. Měření.....	27
4.3. Porovnání naměřených a simulovaných hodnot	29
5. Určování polohy uživatele.....	35
6. Závěr	41
Použitá literatura	42
Přílohy:.....	45

1. Úvod

V dnešní době jsme svědky neustále rostoucí poptávky uživatelů po rychlém datovém přenosu. Tradičně jsou požadavky vyřešeny pomocí metalického a optického vedení, u mobilních aplikací pomocí rádiových vln. Rádiové přenosy jsou uskutečňovány v elektromagnetickém spektru až do frekvencí 300GHz. V mnohých případech je toto pásmo zpoplatněno a z důvodu neustálého nárůstu počtu různých sítí i značně zarušeno. Se zarušeným pásmem neoddelitelně souvisí zvýšená chybovost přenosu a z toho vyplývající menší přenosová rychlost. Logickým vyústěním tohoto problému bylo hledání nových možností využití frekvenčního spektra. V současnosti jsou již hojně rozšířeny optické kabely, které využívají infračervenou oblast spektra a umožňují obrovské přenosové rychlosti až Tbit/s. Dalším relativně novým trendem v komunikacích se stává využití viditelného světla na vlnových délkách 390 až 700 nm, které nám nabízí přibližně 10 000 krát větší šířku pásma než rádiové vlny (viz obr. 1). Obecně platí, čím je pásmo přenosového kanálu širší, tím větší je přenosová rychlost, které lze dosáhnout. Dalším pozitivním bodem technologií využívajících viditelné spektrum je skutečnost, že se nacházejí v bezlicenčním pásmu. Využití této technologie je tedy bezplatné a nehrozí případné poplatky.



Obr. 1: Elektromagnetické spektrum [1]

Další výhodou je, že LED zdroje světla jsou dnes všudypřítomné (pouliční osvětlení, domácí osvětlení atd.). Jejich potenciál není stále plně využit a naskytuje se tedy možnost přenosu dat pomocí stávající infrastruktury. V některých oblastech, kde je rádio frekvenční pásmo (RF) zakázáno nebo nepoužitelné, je optika pro bezdrátové sítě mnohdy jediným řešením. Jako příklad si můžeme uvést prostory pracující s těkavými látkami, v nichž by případná jiskra mohla způsobit požár. Nedávný VLC výzkum úspěšně ukázal datový

přenos s rychlostí přesahující 3 Gbit/s s využitím komerčně dostupných RGB bílých LED [2]. Z uvedených důvodů se VLC jeví jako vhodná alternativa k současným typům komunikací. VLC spadá do kategorie OWC (Optical wireless communication), což je obecný termín, který se vztahuje ke všem typům bezdrátové optické komunikace pomocí infračerveného, ultrafialového a viditelného světla. Mimo již zmíněné VLC sem spadá i FSO (Free space optics), které lze využít pouze ke komunikačním účelům v infračervené oblasti převážně na delší vzdálenosti. Názorným příkladem je propojení naší elektrotechnické fakulty s kolejemi Bubeneč a Orlík. Přenosové rychlosti dosahují jednotek Gbit/s a vzdálenosti jednotek kilometrů.

Úkolem této práce je analyzovat využití VLC ve vnitřních prostorech a zároveň se zaměřit na problematiku lokalizace, která by měla být experimentálně ověřena a vyhodnocena.

2. Visible light communication

2.1. Historie

Využití viditelného světla ke komunikaci sahá až do dávné historie. Je zaznamenáno, že při dobývání města Tróje si Řečtí válečníci povolali na pomoc své krajany pomocí ohňového signálu a po dobytí informovali Řecko o svém vítězství, které bylo vzdálené přes 500km. Postupem času se oheň využíval jako signalizace k usnadnění lodní navigace. Alexandrijský maják byl pravděpodobně první stavbou tohoto typu a datuje se okolo roku 300 před naším letopočtem[4].

První pokročilé využití světla pro komunikaci je datováno do roku 1880 do města Washington DC, kde vynálezce telefonu Alexander Graham Bell úspěšně představil přenos hlasu pomocí slunečního svitu a zrcadla, které se rozvíbrovalo pomocí lidského hlasu. Toto zařízení bylo pojmenováno Photophone. Bell se svým asistentem dokázali hovořit na vzdálenost 213m[4]. Technický pokrok v oblasti optoelektroniky vedl v posledních desetiletích k obnovení myšlenky bezdrátové optické komunikace. První VLC se podařilo uskutečnit japonským vědcům v roce 2003[4]. Dalším důležitým bodem v historii VLC je rok 2009, kdy IEEE začala vytvářet standard pro VLC označen jako 802.15.7.

2.2. Komunikace ve viditelném světle

VLC je zkratka pro komunikaci ve viditelném světle, která využívá ideu užití světla jak pro osvětlení, tak pro komunikaci. Díky dvojí funkcionalitě VLC může být vytvořena celá řada zajímavých aplikací, například domácí vysokorychlostní připojení s využitím domácího osvětlení, komunikace mezi automobily, pokrytí signálem paluby letadel. Současný trend v osvětlení hraje do karet VLC. Celosvětově se nahrazují zdroje umělého světla, jako jsou klasické žárovky nebo fluorescentní zářivky LED diodami. LED disponují mnohými výhodami oproti jejich konkurenci kupříkladu delší životnost, vysoká šířka pásma a s tím související vysoká přenosová rychlost, malé rozměry a v neposlední řadě nízká spotřeba. Tyto vlastnosti vytvářejí z LED vhodného kandidáta pro osvětlení vnitřních i venkovních prostor a zároveň pro komunikační účely ve viditelném světle. Jelikož jsou LED diody primárně využívány k osvětlení, přidaná spotřeba elektrické energie k přenosu dat je minimální.

Důležitým faktorem VLC je přepínání mezi zapnutým a vypnutým stavem, jenž nám dovoluje přenášet data vyzařovaným světlem. Takováto modulace světla je méně složitá a levnější než modulace v RF pásmu. LED dioda má velmi krátkou dobu náběhu při zapnutí i vypnutí, která se pohybuje v desítkách nanosekund, tím pádem se dá přesně

ovládat. Světlo je modulováno pomocí vysokofrekvenčního vstupního proudu do diody, aniž by to lidské oko zaznamenalo. U klasické žárovky není možné zrealizovat přesné stmívání, jejíž wolframové vlákno má velkou setrvačnost záření. Této skutečnosti je využíváno pro osvětlení, kdy i při nízké síťové frekvenci není lidské oko schopno zaznamenat blikání, ale pro komunikační účely je toto naprosto nevyužitelné.

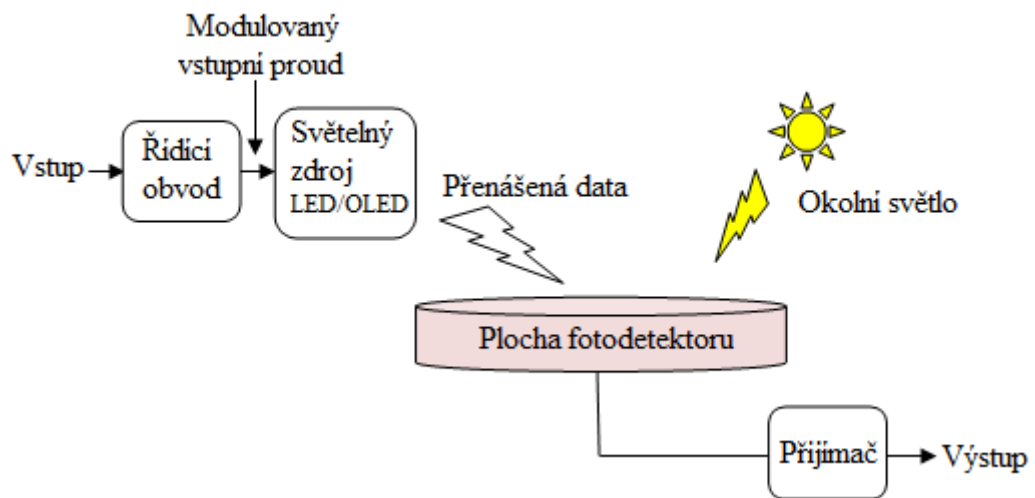
Díky těmto výhodám, jsou bílé LED ideálním zdrojem pro budoucí vnitřní či venkovní aplikace a s ohledem na dvojí funkcionalitu (osvětlení a komunikace) by mohla tato technologie přispět k významnému ušetření energie v celosvětovém měřítku [4]. Generování bílého světla u LED je dostupné ve dvou provedeních. První způsob kombinuje hlavní barvy (červená, zelená a modrá) a vytváří bílé světlo nebo druhý způsob využívající modré LED a luminoforu, který transformuje modré světlo na bílé. Detailní popis této problematiky se nachází v kapitole zaměřené na zdroje.

Od rychlého zapínání a vypínání (on-off režim) fosforescenčních bílých LED můžeme požadovat až rychlosti do 40 Mbit/s. Využití stejné techniky můžeme přesáhnout rychlostí 100Mbit/s s RGB LED [4]. Pro dosažení vyšších přenosových rychlostí dat, zejména u bílých LED diod se nabízí využití modulací s mnoha úrovněmi a vícero nosnými nebo MIMO techniku. Přes všechny výhody, které nám LED přinášejí, existuje řada problémů, technického i netechnického původu, které je potřeba stále řešit. Jedna z takových výzev je návrh levného zařízení s vysokou světelnou svítivostí a vynikající kvalitou barev. V následujících bodech jsou shrnuty důležité vlastnosti VLC

- Již nyní vidíme využití LED diod v automobilech, vlacích, semaforech. LED diody relativně rychle nahrazují zastaralé žárovky v domácnostech, kancelářích a dokonce i v pouličním osvětlení.
- Světelný paprsek je viditelný, uživatelé mohou bezpečně omezit pokrytí vysílání dat tím, že řídí oblast osvětlení, na rozdíl od rádiových signálů, které mohou unikat do sousedních místností nebo budov.
- Nepředstavuje nebo netrpí elektromagnetickým rušením a nabízí velmi široké neregulované pásmo mezi 400THz (780nm) a 800THz (375nm).
- VLC je bezpečné před možným odposloucháváním a jako viditelné světlo nám neproniká za překážky, tudíž neexistuje žádná interference s uživateli v jiných místnostech.
- Jelikož není v rozporu s některými technologiemi využívající rádiové vlny a nehrozí žádnými zdravotními problémy, tak je VLC technologie vhodná pro nemocnice a letadla.
- Nehrozí způsobení požáru, tudíž je vhodné do prostředí pracující s těkavými látkami.
- Přepínání obrovskou rychlostí, které není lidské oko schopné zachytit (tisíce přepnutí za sekundu)

Ze zmíněného úvodu se ukazuje, že VLC je perspektivní technologie, a to nejen pro zvýšení kapacity bezdrátové komunikace ale i bezpečnosti. Pronikání bílých LED diod je velmi rychlá, a mohou být použity pro osvětlení a komunikaci. VLC poskytuje nákladově efektivní techniku komunikace nejen pro domácí uživatele, ale také uspokojí požadavky malé LAN. Zároveň VLC představuje slibnou technologii k doplnění rádiové komunikace.

Na následujícím obrázku je znázorněno principiální schéma VLC systému. O některých částech je pojednáno v teoretické části této práce.



Obr. 2: Principiální schéma VLC - překresleno z [4]

2.3. Zdroje

V závislosti na aplikaci a bezpečnosti můžeme jako vysílač použít LED (OLED) nebo laser. Avšak diody jsou preferovány před laserem, pokud má vysílač sloužit i jako osvětlení jako v případě VLC. Podmínkou je, že osvětlení musí být 200-1000lx pro obvyklý kancelářský prostor[4]. V následujících letech bychom měli být svědky rostoucího výkonu LED. Z hlediska ochrany životního prostředí bude nezbytné využití LED diod pro významné úspory energie. Úroveň spotřeby a spolehlivosti dnes nabízených LED jsou daleko lepší v porovnání s tradiční žárovkovým zdrojem využívaný pouze pro svícení. Ačkoliv vysoce jasové bílé LED, které jsou nabízeny, jsou dnes stále o mnoho dražší než žárovky nebo fluorescentní zářivky. Je očekáváno, že časem cena půjde razantně dolů. Mezi další výhody LED technologie patří

- Žádná rtuť
- Menší rozměry a hmotnost
- Mnohem větší účinnost přeměny světla (70%) [5]
- Dostupné bílé LED s výkonem větším než 200 lm/W [4]
- Méně se zahřívají
- Nižší spotřeba
- Rychlé přepínání
- Nízké provozní napětí
- Okamžitý start
- Dlouhá životnost

2.3.1. LED diody

První praktická ukázka LED pracující ve viditelném spektru je datována do roku 1962, kdy americký vědec Nick Holonyak představil LED diodu vyzařující červené světlo a již tenkrát předpověděl, že tato technologie nahradí klasické Edisonovy žárovky.

LED diody jsou zástupci elektroluminiscenčních zdrojů světla. Světlo nevzniká pomocí žhavení vlákna, jak je tomu u žárovek nebo výbojem plynu v zářivkách. Jedná se o pevný látkový P-N přechod, který je zapojen v propustném směru a přeměňuje elektrickou energii na elektromagnetické záření. Ať už infračervené, ultrafialové nebo viditelné. V závěrném směru k elektroluminiscenci nedochází.

2.3.1.1. Princip

Při spojení materiálu typu N a P se Fermiho hladiny vyrovnají a budou představovat energetickou bariéru, pokud není přivedeno externí napájení. Nacházejí se zde dva

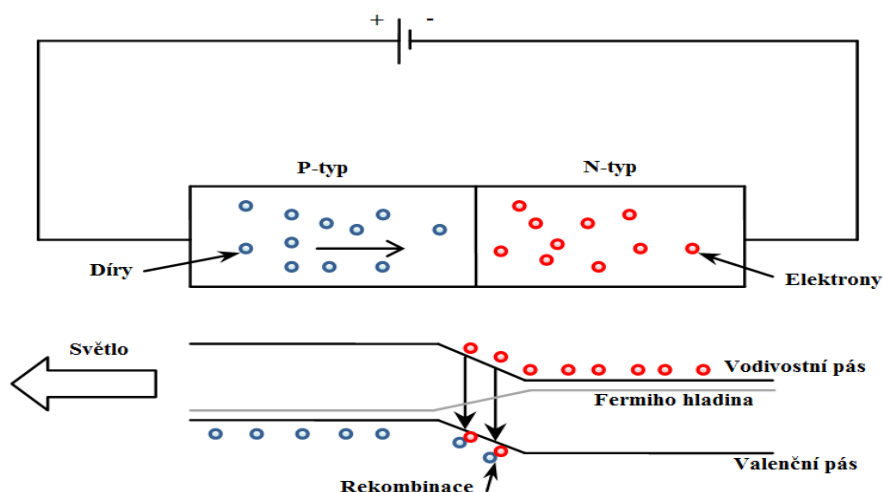
energetické pásy: valenční a vodivostní. Tyto pásy jsou odděleny zakázaným pásmem. Ve vodivostním pásmu nejsou elektrony vázány na jednotlivé atomy a mohou se volně pohybovat. Ve valenčním pásmu se nacházejí nevázané díry, které mají kladný náboj. Volné elektrony a díry nemohou projít zakázané pásmo bez dodané vnější energie. Při aplikování vnější energie (eV) mohou elektrony z vodivostního pásma rekombinovat s dírou ve valenčním pásmu. Elektron při přechodu z vodivostního pásu do valenčního musí odevzdat část své energie, která je uvolněna buď ve formě fotonu, což se jeví jako zářivý přeskok anebo může být absorbována mřížkou, při čemž dochází k zahřátí krystalu. Rozdíl energií mezi vodivostním a valenčním pásem odpovídá vyzářené energii. Vlnová délka je nepřímo úměrná vyzářené energii, která odpovídá šířce zakázaného pásu [6].

$$W = h \cdot \nu \quad (1)$$

kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence fotonu

Pomocí příměsových hladin v zakázaném pásmu můžeme docílit přechodu, při kterém bude mít emitované záření menší energii respektive delší vlnovou délku [7].

Jedná se o tzv. spontánní (samovolný) přechod, který je zároveň doprovázen spontánní emisí. Z toho plyne, že vyzářené světlo z LED diody je nepolarizované a má náhodnou fázi.



Obr. 3: PN přechod u LED

Na výrobu P-N přechodů se využívají různé polovodičové materiály. Podle výběru materiálu dělíme diody na LED a OLED (viz. dále). V LED diodách se využívají anorganické materiály jako například GaAsP, GaP, GaAlAs, InGaP, SiC.

Výběrem vhodného materiálu můžeme určovat vlnovou délku vyzářeného světla. Z principu je patrné, že dioda dokáže vyzařovat na konkrétní vlnové délce. Při komunikaci ve viditelném světle požadujeme, aby výsledná barva byla bílá. Je těžko představitelné, že

bychom osvětlovali domov, ulice... pomocí barevných LED diod, ačkoliv z hlediska komunikace by v tom problém nebyl. Bílá barva je superpozicí celého viditelného spektra. V současnosti existují dva způsoby, jak generovat bílé světlo pomocí LED:

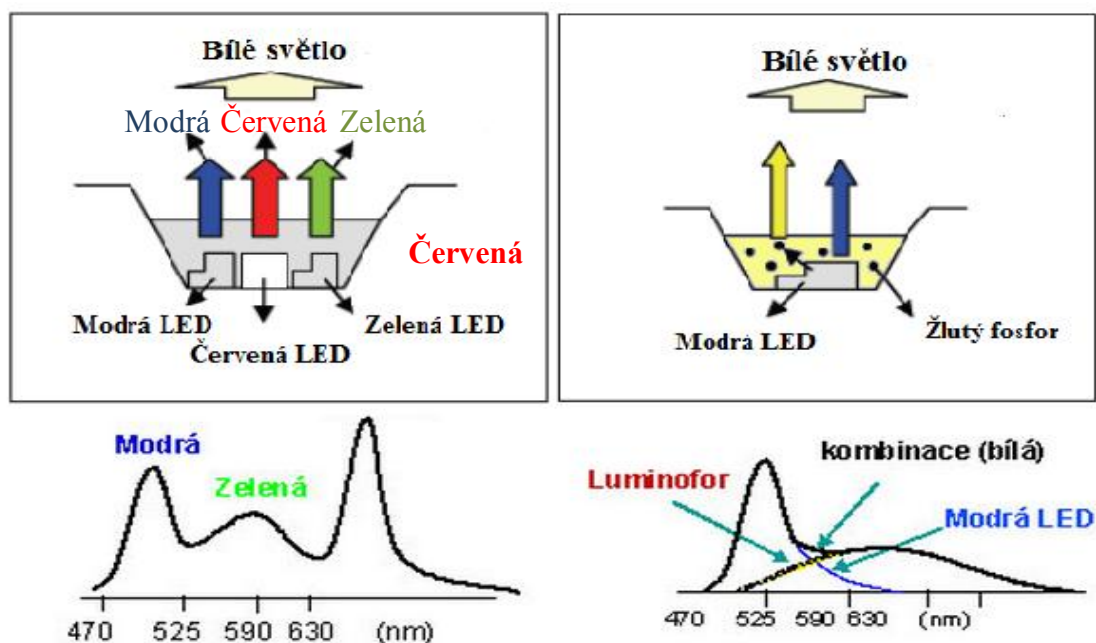
RGB LED

Kombinací červené (~625nm), zelené (~ 525nm) a modré (~470nm) označeno jako RGB (red, green, blue) ve správném poměru, podobně jako je tomu v televizorech, může být vytvořeno požadované bílé světlo. Takovýto způsob je atraktivní pro VLC využívající vlnový multiplex (WDM). Toto provedení je dražší na druhou stranu nám poskytuje vyšší šířku pásma cca 15MHz na LED čip [8].

LED využívající fosfor

V 90. letech minulého století byla představena první LED dioda využívající luminofor k transformaci na bílé světlo. Během několika dalších let, byla technologie transformace světla vylepšena z méně než 0,1 lm/W na více než 230 lm/W a dobu svítivosti vyšší než 100 000 hodin. V porovnání s tradiční žárovkou (52 lm/W) a zářivkou (90lm/W) je vrchol účinnosti bílé LED výše než 260lm/W [4].

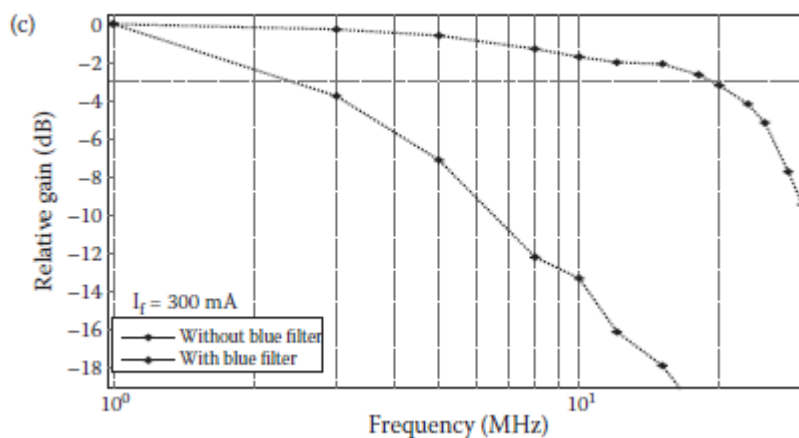
Tato technologie je založena na využití modré LED diody pokryté fosforem, který emituje žluté světlo. Fosforová vrstva absorbuje část krátkých vlnových délek emitovány modrou LED a poté je vyzářeno světlo, které je frekvenčně posunuto na delší vlnové délky odpovídající žlutému světlu. Vyzářené spektrum je složeno z luminiscence modrého světla a fosforence žlutého světla a dohromady tvoří bílou. V současnosti je tento způsob často upřednostňován díky menší složitosti a nižším nákladům.



Obr. 4: Generování bílého světla pomocí RGB a využití fosforu [8,9]

Konverze světla je nevhodná pro vysokorychlostní přímé modulace, protože doba odezvy fosforu je mnohem delší než LED čipu a přímá rychlost modulace je obvykle omezena na několika MHz. Jedním z přístupů, jak zlepšit rychlost modulace je použít modrý optický filtr na straně přijímače a odstranit pomalé odezvy žlutého světla z fosforu. Nicméně, tento postup zavádí snížení celkového výkonu dopadajícího na plochu detektoru a tím je omezena přenosová vzdálenost VLC. Zároveň nám snižuje odstup signál šum (SNR) [10].

Na obrázku je znázorněn relativní zisk vůči frekvenci při a bez modré filtrace. Je jasné vidět, že mezní frekvence pro pokles o 3dB je bez filtrace okolo zmíněných 2MHz a s filtrací se zvýší přibližně desetkrát.



Obr. 5: Šířka pásma modulace s a bez modrého filtru [4]

Další přístup pro zvýšení rychlosti modulace dat je použití pokročilých modulačních formátů, kde může být přenášeno více bitů jedním symbolem např. QAM s optickým OFDM - ortogonálním kmitočtovým dělením. Při skombinování s modrou filtrací může být dosaženo až stovek Mbit/s [4]. Využití paralelní komunikace (MIMO) nám také zaručí zvýšení přenosové rychlosti.

Při využití vícestavových modulací nastává problém, že je na přijímači požadován vysoký odstup signál šum (SNR). Tudíž zůstává velkou výzvou dosáhnout přenosových rychlostí v řádech Gbit/s.

2.3.2.OLED

OLED (Organic light emitting diode), již z názvu patrné, že využívá organické materiály a v češtině nese název: organická elektroluminiscenční dioda. Jedná se o zařízení, jejíž svítící elektroluminiscenční látka je složena z vrstvy nebo vrstev organické sloučeniny, která jsou vložena mezi dvěma elektrodami (katoda, anoda) z nichž je alespoň jedna průhledná. Vše je nanášeno na nosném materiálu využívající sklo nebo pružné plasty. Princip vyzařování je obdobný jako u klasické LED, tudíž při přivedení elektrického napětí dochází k rekombinaci nábojů a následné excitaci fotonu. OLED mohou emitovat bílé světlo pouze metodou míchání barev (RGB) [11]. Tudíž se používají různé materiály a příměsi ke generování různých barev a jejich kombinace umožňuje vytvoření bílého světelného zdroje. OLED má relativně malou světelnou účinnost (naměřená hodnota přes 100lm/W) a krátkou dobu životnosti, která je spojena s degradací organické vrstvy zejména modré barvy. Dalším nedostatkem je šířka využitelného frekvenčního pásma, která je omezena kapacitou samotného OLED panelu a pohybuje se v kHz [11]. OLED se chová jako kapacitor a vykazuje chování jako dolní propust, kde maximální frekvence je dána vzorcem[12]:

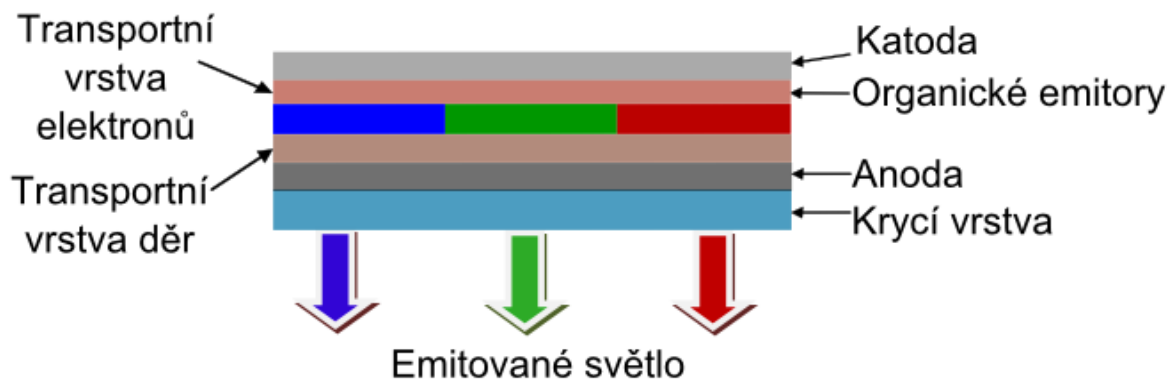
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

Kde $R (\Omega)$ je efektivní rezistence a $C (F)$ kapacita panelu, kde C je dáno vztahem[13]:

$$C = \frac{A\varepsilon_0\varepsilon_r}{d} \quad (3)$$

$A (m^2)$ je aktivní plocha OLED, $d (m)$ je tloušťka, $\varepsilon_0 (F/m)$ je permitivita vakua, $\varepsilon_r (-)$ relativní permitivita

Již byly představeny metody pro zvýšení šířky pásma přibližně na 1MHz pomocí ekvalizace[12]. Dokonce byl vytvořen OLED panílek s šířkou pásma větší než 60MHz, ale jeho plocha byla $S=0.018mm^2$ [11]. To je zjevně nedostačující plocha pro osvětlení místnosti. Bylo by žádoucí vyrobit velkou plochu, umožňující rychlé přepínání mezi zapnutým a vypnutým stavem. Bohužel toto přání je v současnosti nerealizovatelné.



Obr. 6: Struktura OLED

Z debat odborníků lze vypožorovat, že rozšíření OLED bude závislé do značné míry na ceně. OLED mají potenciál extrémně nízkých nákladů na výrobu, kvůli možnosti tisknout velké, tenké panely. Nicméně dnes nejrozšířenější metoda na výrobu je vakuová depozice nebo odpařování požadující velmi drahé zařízení [11]. Nicméně je víra, že OLED se rozšíří a cena průmyslové výroby bude klesat. Většina výzkumných prací na VLC je zaměřena na zvyšující se rychlost přenosu dat a je běžně prováděna pomocí zvyšování počtu LED za účelem zvýšit jas. Tento přístup se může v budoucnu stát příliš složitý a nákladný. Vhodnějším řešením by bylo řídit jednu jednotku s velkou plochou. Plocha OLED panelu je limitována pouze rozměry výrobního zařízení. To znamená, že bychom mohli vytvořit osvětlení na celý strop, čímž by se dosáhlo výborného osvětlení s možností využití VLC, která by byla řízena z jednoho vstupu [11]. OLED displeje jsou lehčí, tenčí a flexibilnější než krystalické vrstvy u LED a jsou v současnosti využívány v displejích s vysokým rozlišením. Díky nízké velikosti pixelů a vysokému kontrastu se využívají u televizorů vyšší třídy a objevují se i aplikace využití OLED jako osvětlení.

Bohužel větší plocha zářiče přináší větší kapacitu panelu, která nám omezuje šířku modulace. Nicméně pro některé méně náročné aplikace je to dostačující a v budoucnu bychom se mohli dočkat zajímavých OLED aplikací. Avšak v současné době si myslím, že LED diody budou hrát prim ve VLC.

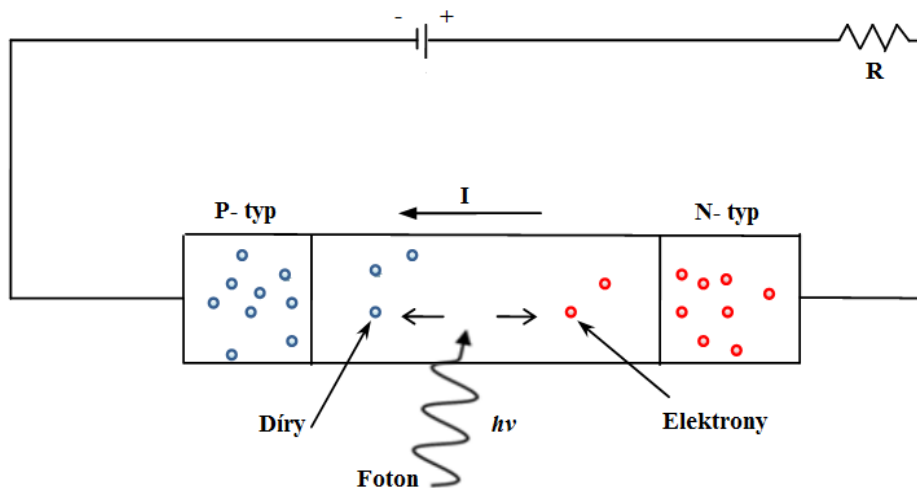
2.4. Přijímače

Další podstatnou součástí VLC systému je přijímač, který nazýváme fotodetektor. Jedná se o optoelektronické zařízení, které generuje elektrický signál, který je úměrný přijatému optickému výkonu. Jde o součástku, jejíž protékající proud je závislý na osvětlení. Optický signál dopadající na fotodetektor je často silně utlumen přenosovou trasou, tudíž by detektor měl splňovat určité požadavky, aby nám nedegradoval komunikační systém př. vysoká citlivost v požadovaném pásmu, nízký šum, rychlá odezva, stabilita, minimální vliv teploty.

V některých případech bude postačovat i telefon s digitálním fotoaparátem, který dokonce dokáže rozpoznat prostorové rozložení světelných zdrojů.

2.4.1. Princip fotodetektoru

Fotodetektory využívají fotoelektrický jev. Při dopadu fotonu na aktivní polovodičovou strukturu je pohlcen elektronem a energie fotonu je využita pro přenos elektronu do vodivostního pásu s vyšší energií. V tomto pásmu vzniká pár elektron-díra. Potřebná vlnová délka k excitaci elektronu je stejně jako u LED dána šířkou zakázaného pásma respektive využitým materiálem. Vzniklý elektron-díra zvyšuje vodivost a přiložené závěrné napětí může procházet. Teoreticky by každý dopadající foton měl vygenerovat elektron, ale v reálných podmínkách toto neplatí a elektron je generován s určitou pravděpodobností η .



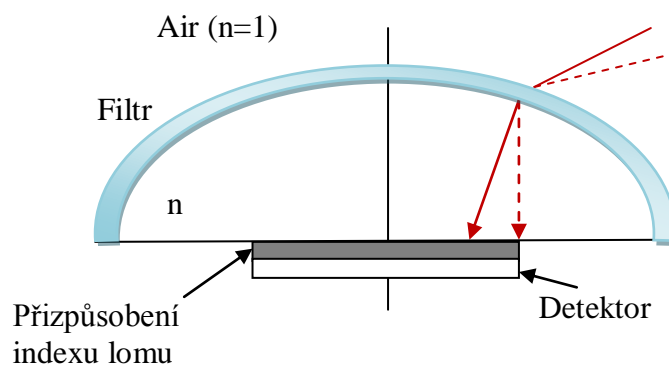
Obr. 7: Princip fotodiody

Ve VLC technice se nejčastěji setkáme s detektory typu:

- PIN fotodioda
- Lavinová fotodioda
- Obrazový senzor

PIN fotodioda obsahuje intrinzičnou vrstvu o veľkej elektrickej pevnosti, tudíž môže pracovať s vysokými intenzitami elektrického poľa v oblasti prechodu a je využiteľná pre vyššiu prenosovú rýchlosť.

Lavinové fotodiody tiež obsahujú intrinzičnou vrstvu a tiež vyššie priložené napätie v blízkosti prúrazu. Uvoľnené elektrony sú urýchľované priloženým napätím a díky lavinovému efektu strhávajú i ďalšie elektrony. Z tohto dôvodu majú veľký zisk a sú využívané tam, kde predpokladáme slabý signál.



Obr. 8: Řez fotodetektorem

Optický filtr- nepropustí jiné než požadované vlnové délky

Koncentrátor- shromažďuje a zaměřuje záření na detektor

Detektor- převod optické energie na elektrickou

Zesilovač- často umístěn za detektor, kde zvyšuje úroveň signálu z detektoru

2.5. IEEE 802.15.7

V roce 2009 IEEE založila výzkumnou skupinu zabývající se VLC a roku 2011 tato skupina definovala první standart fyzické a MAC vrstvy pro bezdrátovou komunikaci využívající viditelné světlo na krátké vzdálenosti v transparentním prostředí. Standard IEEE 802.15.7 [13] udává přenosovou rychlost postačující pro uspokojení audio a video služeb a také hledí na šum a interferenci z okolního světla. Zároveň udává platné oční bezpečnosti předpisy a rychlost blikání zářičů. Účel vytváření těchto norem je vytvoření celosvětového standardu pro krátké bezdrátové optické komunikace využívající nelicencované pásmo. Tento krok má přímý dopad na již stávající trh okolo LED, který je vhodný na využití ve VLC a otevřel dveře komunitě, která může vyvíjet produkty, které budou v souladu s mezinárodní normou. Další důvod vytváření světového standardu je zajištění kompatibility, tedy koexistenci nebo spolupráci s jinými zařízeními a zároveň definují vlastnosti produktu samotného. V následujících řádcích se pokusím shrnout některé klíčové parametry standardu 802.15.7, který je dostupný na [13].

Architektura standardu je definována na základě několika vrstev a podvrstev, jejichž cílem je zjednodušení standardu a rozložení problematiky na jednotlivé vrstvy. Každá vrstva je odpovědná za část standardu a poskytuje služby vyšším vrstvám. IEEE 802.15.7 definuje jak fyzickou, tak i MAC vrstvu, což je podvrstva linkové vrstvy. Poznávacím bodem ve srovnání s jinými specifikacemi (např. JEITA specifikace) je podpora pro řízení jasu a frekvence blikání [13].

Ve VPAN (Visible-light communication personal area network) sítích má každé zařízení uděleno zkrácenou 16 bitovou adresu nebo rozšířenou 64bitovou adresu. Standard definuje 3 druhy topologií sítě: klient-klient, hvězda a všesměrovou. Navíc klasifikuje zařízení do třech tříd jmenovitě: infrastruktura, mobil a vozidlo. Zařízení jsou řazeny podle svých fyzických vlastností a schopností jako například limitace mobility, napájení a přenosové rychlosti. Pouze třída infrastruktura neumožňuje žádnou mobilitu na druhou stranu, nabízí vysokorychlostní přenosy. Vlastnosti jednotlivých zařízení zobrazeny v tabulce.

	Infrastruktura	Mobil	Vozidlo
Pevný koordinátor	Ano	Ne	Ne
Napájecí zdroj	Dostatečný	Limitovaný	Průměrný
Světelný zdroj	Intenzivní	Slabý	Intenzivní
Mobilita	Ne	Ano	Ano
Dosah	Malý/ velký	Malý	Velký
Přenosové rychlosti	Vysoké/ nízké	Vysoké	Nízké

Tab. 1: Klasifikace a vlastnosti zařízení

2.5.1. Topologie sítě

Klient- klient topologie

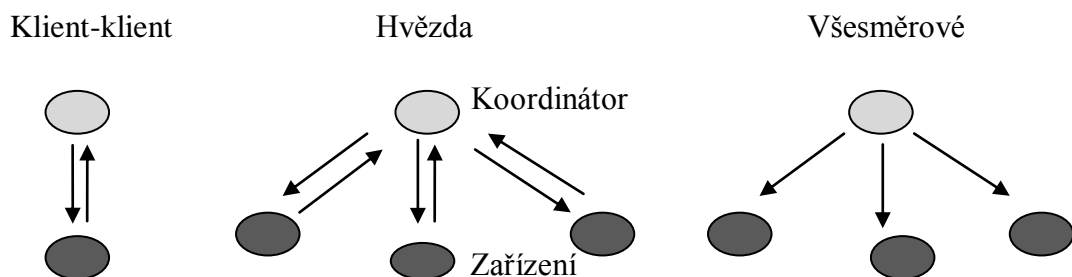
Základ struktury topologie klient-klient je zobrazena na obrázku 10. V tomto uspořádání je každé zařízení schopno komunikovat s ostatními zařízeními uvnitř pokryté oblasti. Jedno ze zařízení je defaultně nastaveno jako koordinátor, například tím, že začalo komunikovat dříve [13]

Hvězdicová topologie

Všechny sítě typu hvězda pracují nezávisle na všech ostatních současně pracujících sítích. Toho je dosaženo výběrem VPAN identifikátoru, který není využíván žádnou jinou sítí v oblasti pokrytí. Jakmile je identifikátor VPAN zvolen, koordinátor umožní ostatním zařízením připojit do své sítě a následně mají všechna zařízení obousměrnou komunikaci s koordinátorem viz. obrázek 10.

Všesměrová topologie

Všesměrová topologie je založená na princip, kdy koordinátor vysílá data a zařízení nacházející se v ozářené oblasti je mohou přijímat, aniž by se vytvářelo nějaké spojení. Tento přenos je pouze jednosměrný a princip je znázorněný na obrázku 10.



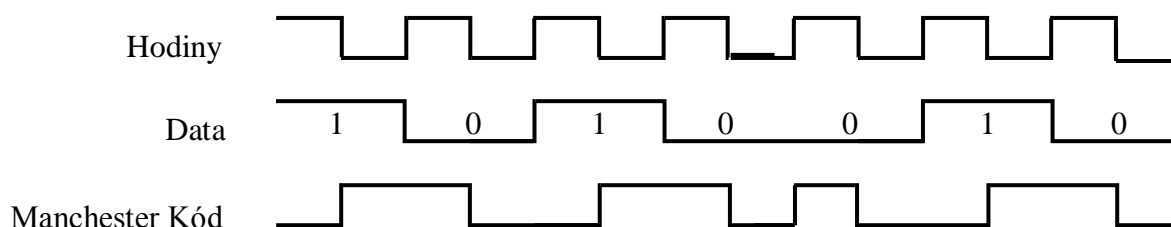
Obr. 9: Podporované topologie

2.5.2. Modulace

Pro přenos dat standart definuje trojici modulací.

ON- OFF klíčování

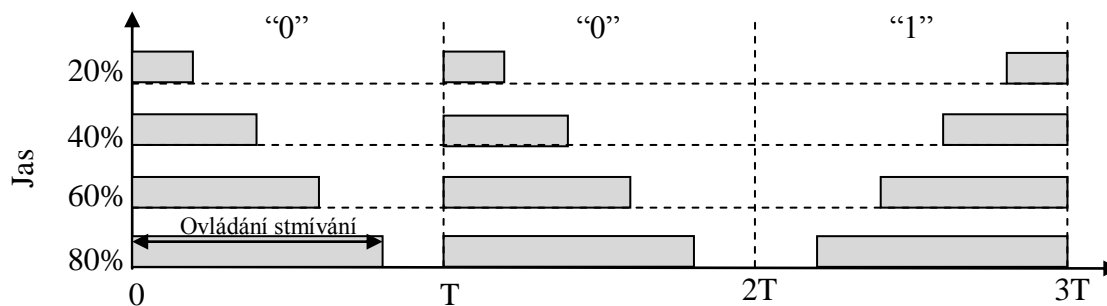
Jak již název napovídá, data jsou reprezentovány zapnutým stavem-„ON” (svícením) a vypnutím-„OFF“ LED. Pozitivum metody je její jednoduchost generování a dekódování signálu. Standart využívá Manchester kódování pro zajištění stejné doby kladných a negativních impulsů. Nastavení výstupní intenzity zdroje může být zajištěno využitím rozšířeného OOK, která nastavuje správnou úroveň výstupu pomocí rozdělení hlavního rámce na podrámce o vhodné délce a každému podrámci jsou přidány kompenzační symboly [13].



Obr. 10: Modulace OOK využívající Manchester kód

Proměnlivá pulzně polohová modulace

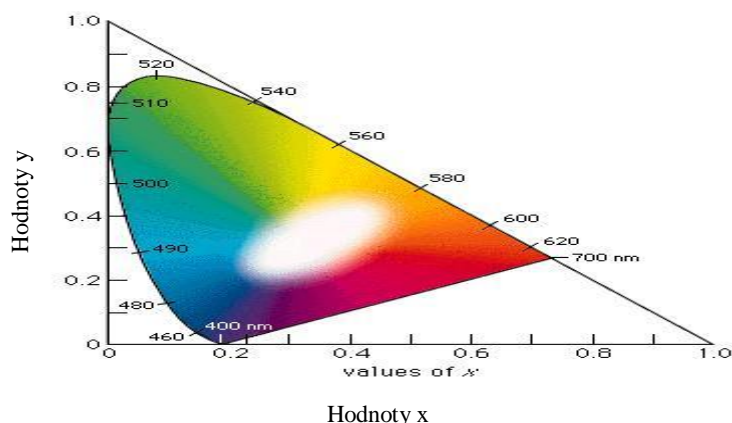
VPPM (Variable pulse position modulation) modulace kóduje data pomocí délky pulzu v jedné periodě, přičemž amplituda pulzů je konstantní. Doba trvání periody musí být dostatečně dlouhá, aby bylo možné rozeznat 2 stavy [13]. Například logická „0” je reprezentována kladným pulsem na začátku periody a následuje nulový puls. VPPM umožňuje nastavovat jas, jak je zobrazeno na obrázku 12 pomocí šířky pulzů.



Obr. 11: VPPM s podporou stmívání

Klíčování barevným posunem

CSK (Color shift keying) modulace lze využít pouze při využití zářičů využívající RGB princip. Data jsou zakódovány pomocí míchání červené, zelené a modré led vyzařující ze zdroje přičemž každá nepatrná změna může znamenat bitovou posloupnost. Standard definuje 4, 8 a 16 stavovou CSK. Výhoda tkví, že se mění pouze barevné složení a výkonová obálka je konstantní, tudíž snižuje zdravotní komplikace lidí v souvislosti s výkyvy intenzity světla jako je například epilepsie.



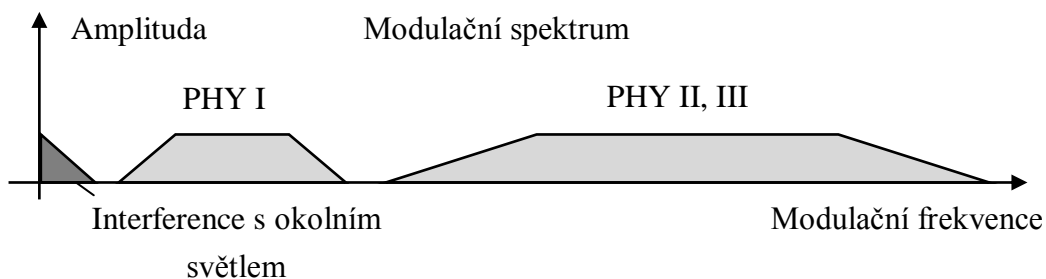
Obr. 12: Chromatický diagram [14]

2.5.3.Fyzická vrstva

IEEE specifikuje fyzickou vrstvu, což je nejnižší vrstva síťové architektury. Je odpovědná za převod proudu bitů, v našem případě, na světelný signál a obráceně, tedy signál na posloupnost bitů. Standard rozděluje vrstvu na tři typy podle jejich přenosových rychlostí.

- PHY I- Je definována pro venkovní nízko rychlostní aplikace (komunikace mezi automobily). Rozsah přenosových rychlostí se pohybuje 12- 267 kbit/s. Můžou být využity konvoluční Reedovy-Solomonovy kódy pro korekci chyb. Definované modulace OOK a VPPM [15].
- PHY II- Je navržena pro vnitřní přenosy v rozmezí 1.25- 96 Mbit/s. Reedovy-Solomonovy kódy mohou být využity a OOK a VPPM modulace [15].
- PHY III- Využití v aplikacích využívající RGB zdroje a detektory. Umožňuje přenosy 12- 96Mbit/s. Využívá Reedovy-Solomonovy kódy a CSK modulaci se 4, 8, 16 barevnými konstelacemi [15].

Jednotlivé PHY typy nespolupracují, ale musejí spolu koexistovat. Na obrázku je patrné vidět, že PHY I a PHY II obsazují různé spektrální regiony, respektive PHY I a PHY III. To umožňuje paralelního využití, aniž by docházelo k ovlivňování. Nicméně PHY II a III se dělí o stejnou část spektra. Je patrné, že PHY I využívá nižší frekvence (delší vlnové délky), zatímco PHY II, III využívá vyšších frekvencí. Vyšší přenosové rychlosti PHY II, III potřebují širší využívané spektrum.

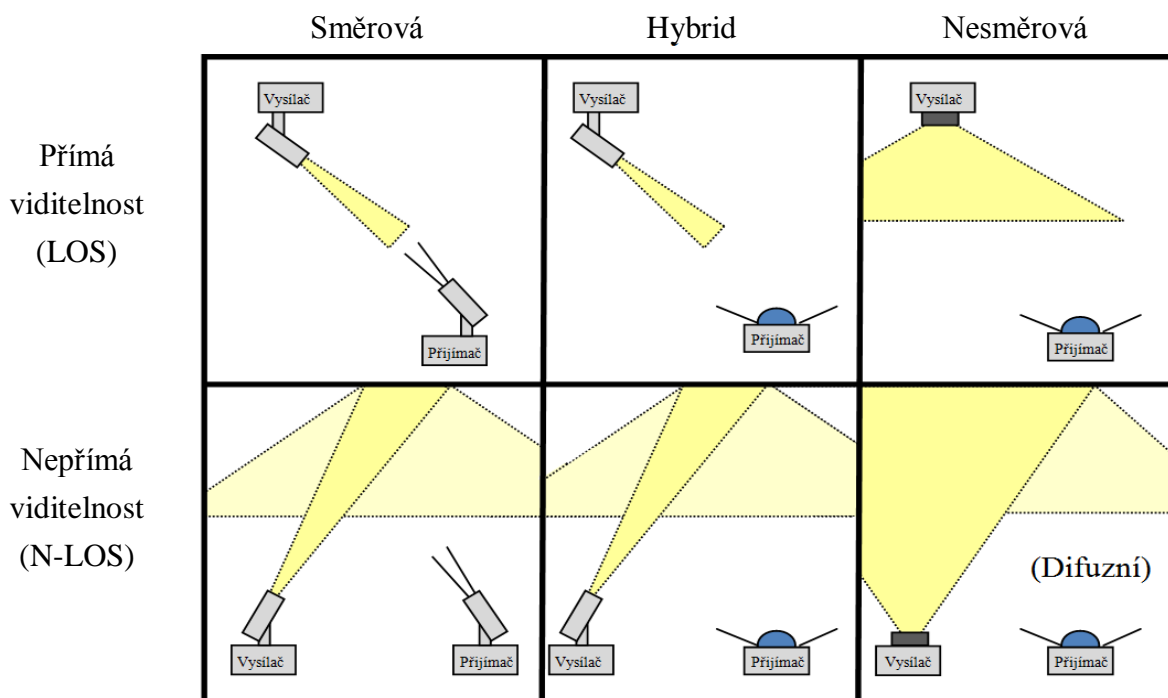


Obr. 13: Oddělení fyzických vrstev ve frekvenční oblasti

2.6. Druh spoje

Přenos dat pomocí světla přináší mnoho problémů, s kterými se musíme vypořádat. V uzavřeném prostředí se bude světlo odrážet od stropu, stěn a většiny dalších objektů v místnosti, ale neprojde skrz neprůhledné překážky. Zatímco ve venkovním prostředí světlo bude rozptylováno a absorbováno díky atmosférickým podmínkám. Existuje několik metod, jakými mohou být optické spoje navrženy. Proto je dobré si je klasifikovat.

- První hledisko se zabývá stupněm směrovosti vysílače a přijímače. Směrové spoje využívají úzko svazkové vysílače a přijímače, které musejí být nastaveny takovým způsobem, aby umožňovali spojení. Zatímco nesměrové spoje využívají širokoúhlých vysílačů i přijímačů. Je také možno definovat tzv. hybridní spoje, které využívají vysílače a přijímače s různými stupni směrovosti.
- Druhé kritérium se zaměřuje, zda spoj spoléhá na nepřerušovaný přímý spoj (Line of sight). Přímé spojení spoléhá na čistou viditelnost mezi prvky, zatímco u nepřímého spojení tato podmínka neplatí a přenos spoléhá na odrazy.

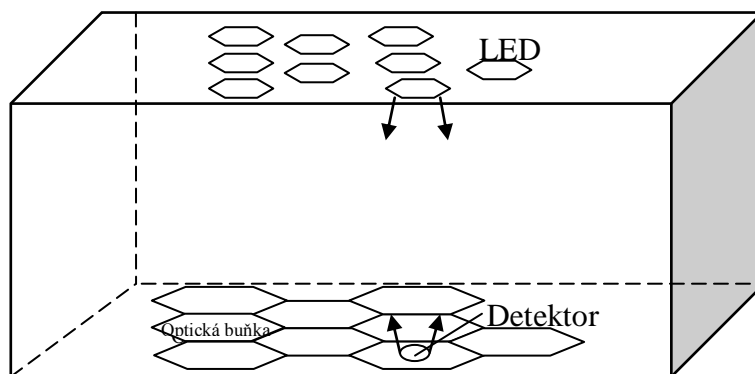


Obr. 14: Klasifikace spojů pro VLC

2.6.1.Spoj na přímou viditelnost

Směrové spojení

Typicky se jedná o bod-bod komunikaci. V angličtině a i v češtině rozšířené označení LOS (Line of sight). Jedná se o nastavení přijímače a vysílače takovým způsobem, aby jejich spojnice a její blízké okolí nebylo ničím zastíněno. Po splnění této podmínky je paprsek koncentrován do úzkého svazku, což umožňuje vytvořit vysokou hustotu světelného toku na přijímači a zároveň může snížit napájecí nároky. Navíc LOS spoje minimalizují vícestředné šíření a tím pádem nedochází k disperzi signálu. S tím je spojená přenosová rychlost, které je v tomto případě nejvyšší z uvedených konfigurací. Díky, malému zornému poli detektoru je propuštěno malé množství okolního světla, které nám tvoří nežádoucí šum. V některých případech může být světelné pokrytí velmi malé, což je problém pro větší místnosti či mobilní přijímač. Tudíž je tato konfigurace vhodná pro komunikace, které jsou statické a nehrozí zastínění jejich spojnice. Avšak pro domácí, kancelářské aplikace se hodí spíše jiné nastavení. V takovýchto případech je žádoucí využít větší počet zářičů, jak je zobrazeno na obrázku 16. Rozmístění a pokrytí oblastí jednotlivými zářiči připomíná celulární topologii z mobilních sítí. Vysílač komunikuje s přijímačem, který se nachází uvnitř jeho buňky. Další podrobnosti o tomto spoji lze nalézt na [16].



Obr. 15: Celulární topologie

Nesměrové spojení

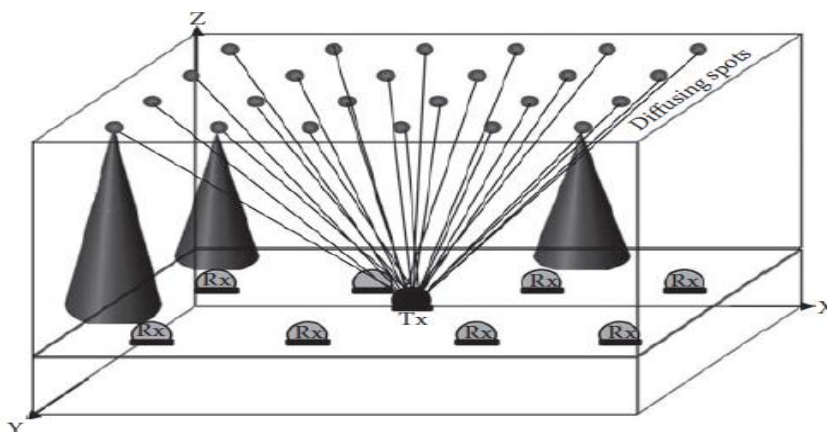
Pro vnitřní aplikace je považováno za nejvíce přizpůsobivou konfiguraci, využívající široký paprsek vysílače, široké zorné pole přijímače a případný rozptyl na povrchu pro dosažení širší oblasti pokrytí. Zapojení nevyžaduje speciální nastavování vysílače s přijímačem. Nesměrový spoj je vhodný pro komunikaci s více přijímači (Point to multipoint) nebo mobilním terminálem. Přijímač se může vyskytnout za překážkou, která brání LOS přenosu. Tento problém se překonává s využitím odrazů od povrchů. Z tohoto

důvodu je využití nesměrových spojů dominanta vnitřních prostorů, kde se nachází více předmětů, od kterých by se světlo mohlo odrážet. Fotodetektor přijímá světlo z mnoha směrů, avšak počet různých směrů zvyšuje útlum trasy a tím pádem je potřeba vyšší výkon zdroje záření. Kvůli vícecestnému šíření se může uplatnit disperze a následná mezisymbolová interference, což má za následek snížení rychlosti přenosu dat. Avšak využití kombinace nesměrového spojení s celulární topologií se jeví jako vhodný kandidát pro vnitřní vysokorychlostní aplikace [4].

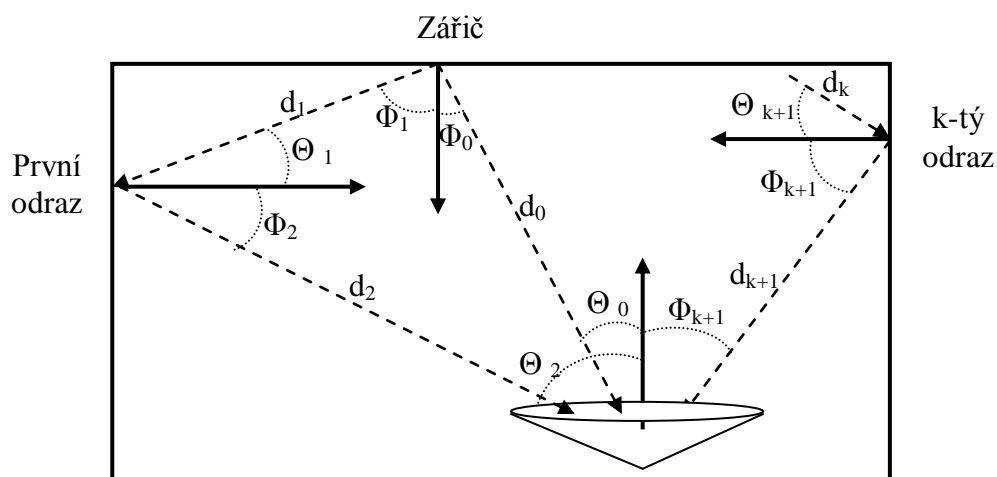
2.6.2.Spoj na nepřímou viditelnost

Rozptýlené (difuzní) spojení

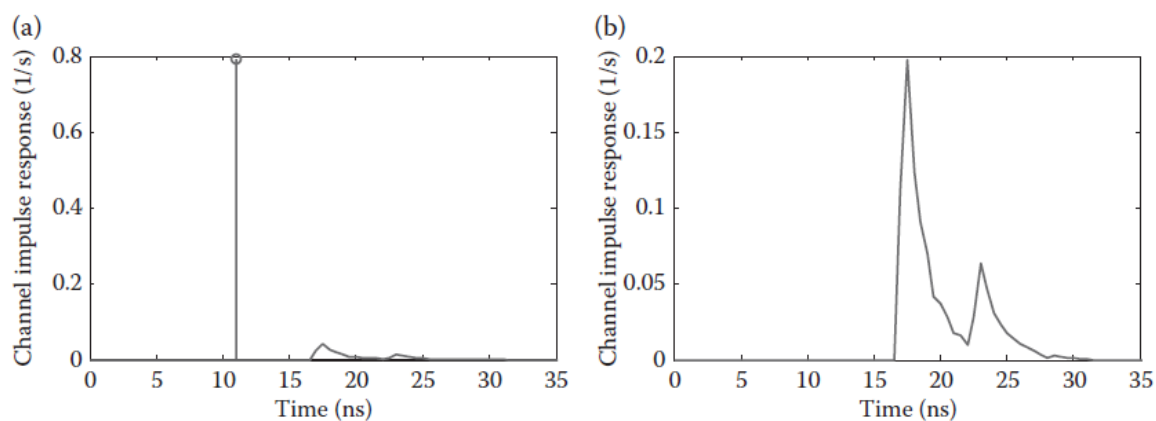
Difuzní konfigurace, také známé jako Nondirected Non-LOS se typicky skládá z vysílače, který míří přímo na strop a vysílá široký paprsek a využívá odrazu od stropu, který zachytává přijímač se širokoúhlým zorným polem. Toto zapojení nabízí také vysokou flexibilitu a robustnost proti zastínění, avšak s nutností vysílání vysokých výkonů, kvůli využití odrazů, které jsou příčinou vysokých útlumů přenosové trasy. Signál netrpí pouze vysokým útlumem, ale zároveň je náchylný na disperzi, kde vyslaný puls je roztažen v časové oblasti, díky různým trasám, které signál musel projít při cestě k detektoru. Disperze nám zároveň ovlivňuje intersymbolou interferenci a BER, tudíž tato konfigurace není vhodná pro aplikace využívající vysokorychlostní přenosy. Toto zapojení může být vylepšeno sítí malých odrazných bodů na stropě místnosti, které nám pomohou snížit vložený útlum (zobrazeno na obrázku 17). Testování tohoto spojení a jeho podrobný popis lze nalézt na [17].



Obr. 16: Difuzní konfigurace využívající odrazných bodů [4]



Obr. 17: Znárodnění mnohacestného šíření



Obr. 18: Impulsová odezva systému (a) LOS spojení (b) Nepřímé spojení [4]

Na obrázku 18 je zobrazena podstata mnohacestného šíření typického pro nepřímé spojení. Paprsek se nám při cestě k detektoru odráží a šíří se mnoha směry. Určení útlumu přenosové cesty je složité a je závislé na mnoha faktorech, jako jsou například rozměry místnosti, odrazivost stěn, stropu, předmětů v místnosti, umístění a orientace vysílače s přijímačem. Odrazivost objektů závisí opět na několika faktorech, jako jsou vlnová délka, materiál povrchu překážek, úhel dopadu signálu...

Obrázek 19 znázorňuje impulsovou odezvu přenosové cesty pro LOS a N-LOS spojení. Impulsová odezva může být vypočtena integrací všech dopadajících výkonů na detektor. Přijatý signál v případě nepřímého spoje se skládá z různých složek přicházejících z odlišných tras. Tyto trasy nám roztahují vyslaný impuls v čase. Při přímém spoji je zřetelně vidět, že impulsová odezva dosahuje jednoho maxima a není ovlivněna disperzí.

3. Určení polohy pomocí viditelného světla

Určování polohy pomocí viditelného světla zkráceně VLP (Visible light communication). Vnitřní určování polohy je v současnosti v hledáčku mnoha výzkumných skupin. Důkazem je již vydaný standart JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) CP-1222 popisující protokol přenos identifikační zprávy z LED k přijímači[18].

Představy jsou takové, že pomocí ručního zařízení (mobilní telefon,..) bude možné získat přesnou polohu uživatele a pomoci mu například s vyhledáním požadovaného zboží nebo nabídnout atraktivní cenové akce v závislosti na jeho pozici ve velkém nákupním středisku. Další uplatnění je ve skladech, nemocnicích, letištích.. k navigaci a lokalizaci předmětů respektive osob. Na takto atraktivní aplikace jsou věnovány peníze z obřích korporací a je pravděpodobné, že se s podobnými aplikacemi v budoucnu setkáme [19].

Nejrozšířenějším systémem pro určení polohy je bezesporu GPS. Bohužel díky slabému pokrytí vnitřních prostor není možné se k družicím připojit. Mimo GPS existují i odlišné přístupy určování polohy. Je možné využít techniku založenou na rádiových frekvencích (bezdrátové lokální sítě, mobilní sítě..), která má potíže s vícecestným šířením, interferencí, šumem a tudíž nedosahuje dostačující přesnosti pro účely uvedeny výše [19]. Anebo techniku založenou na jiných principech jako je ultrazvuk, infračervené záření, laser [20]. V porovnání s výše uvedenými technikami má VLP vyšší přesnost určení polohy. Některé články udávají, že nasimulovaná přesnost určení dosahuje centimetrové hodnoty kupříkladu článek [21]. Proto se tato technologie jeví jako atraktivní alternativa k současným systémům, ačkoliv je omezena pouze na místnosti, které obsahují vhodné osvětlení. U VLP hraje negativní roli i okolní světelný šum, který může být zdrojem nepřesností při lokalizaci. K hlavním zdrojům šumu patří sluneční záření a jiné zdroje světla v okolí, jako jsou kupříkladu žárovky. Technik k určení polohy je více. Pokusím se je stručně představit.

3.1. Rozpoznání ID

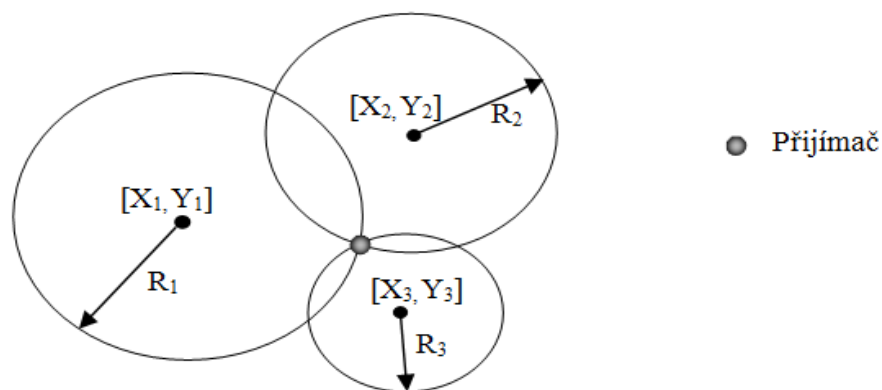
Systém může být složen z buňkové sítě LED zářičů, kde každá buňka vysílá unikátní ID klíč. Pozice jednotlivých ID je uložena v databázi a při rozpoznání identifikační sekvence přijímačem je možné získat polohu. Přesnost záleží na hustotě mříže zářičů a na ozářené ploše. Pokud bychom chtěli zvýšit přesnost, musíme využít hustější mříže světla a rovný vyzařovaný paprsek k omezení interferencí mezi světly. Menší přesnost, která je rovna velikosti buňky je pro použití v některých aplikacích dostačující (obrazárna).

3.2. Měření úhlu dopadu

Měření úhlu dopadu neboli AOA (Angle of arrival) je nejvíce slibná metoda založená na triangulaci. Základ je měření úhlu dopadajícího záření z několika referenčních zdrojů. Lokalizace je určována pomocí hledání průsečíků přímého spoje mezi vysílačem a detektorem [22]. Typicky jsou dva zářiče potřeba pro určení 2D pozice a tři zářiče pro 3D. Jednou z výhod je, že přesnost závisí na schopnosti identifikovat jednotlivé zdroje a nezáleží na frekvenci modulovaného signálu [18] a není potřeba žádné časové synchronizace. Dosahuje velmi dobré přesnosti, ale je nutné mít na straně přijímače obrazový senzor, který má spojení se zdrojem na přímou viditelnost. Rozšíření kamer na přední straně chytrých telefonů a tabletů předurčuje tuto metodu k širokému využití v oblasti VLP. V článku [23] bylo dosaženo průměrné přesnosti odchylky 7 cm.

3.3. Čas příchodu signálu

Metoda měřící čas příchodu signálu označena jako TOA (Time of arrival). Princip založený na trilateraci. Signály z více zdrojů jsou vyslány přesně ve známou dobu. Znalosti času příchodu signálu od vysílače k přijímači dovoluje výpočet vzdálenosti od jednotlivých zdrojů. Pokud vyneseme koule o vypočteném poloměru se středem v jednotlivých zářičích, získáme průnik koulí, který udává pozici detektoru ve 3D prostoru. Při požadavku na 2D lokalizaci stačí hledat průsečík kružnic. Ve VLC je tato metoda velmi obtížně řešena, kvůli nutnosti synchronizace přijímače s vysílačem. Dobrým příkladem využití této techniky je GPS systém.



Obr. 19: Určení pozice pomocí trilaterace ve 2D prostoru

3.4. Rozdíl časů příchodu signálů

Metoda označena jako TDOA (Time difference of arrival) získává polohu díky odlišnému času přicházejících signálů. Potřebná synchronizace pouze mezi vysílači. LED panely v místnosti využívají stejné synchronizační hodiny. Obtížné rozlišení přijatých signálů. V referenci [24] dokázali pomocí této metody dosáhnout přesnosti určení na 3,9 cm.

3.5. Síla přijatého signálu

RSS (Received signal strength) je oblíbená metoda pro svou jednoduchost, nevyžaduje synchronizaci a není pro ni nutný přenos žádných dat mezi vysílačem a přijímačem. Princip je založen na známém rozložení optického výkonu v prostoru. Metoda určuje vzdálenost od zdroje jako funkci intenzity přijímaného signálu. Obecně se dá říci, že čím větší je vzdálenost od zdroje, tím je intenzita záření menší. Pokud známe vlastnosti optického kanálu a vysílaný výkon jednotlivých zářičů, může být vytvořen odpovídající model, pomocí kterého jsme schopni dosáhnout velmi přesného určení polohy, která se v laboratorních podmínkách pohybuje v řádu centimetrů, viz [21]. Stejně jako v TOA metodě je využita trilaterace, která slouží k odhadnutí pozice detektoru.

V praxi je bohužel rozložení světelného výkonu nepředvídatelné díky dynamicky se měnícím podmínkám a dosažení ideálních podmínek je tedy těžko realizovatelné. Dále záleží na jednotlivých LED a zastínění, které v praxi bývá proměnné [18]. Simulační model je navržen pro určité prostředí obsahující stěny, překážky atd. V případě provedení změn ovlivňující přenos optického výkonu se musí model kalibrovat, aby odpovídal pozměněným podmínkám a poskytoval důvěryhodné výsledky.

Jak vidno pro vnitřní určování polohy pomocí viditelného světla existuje více přístupů. RSS a ID metody jsou implementačně jednoduché, ale při skombinování ještě s metodou AoA by mohlo být dosaženo velmi přesných výsledků. ID a AOA metody jsou využitelné moderními chytrými telefony, tudíž se dá předpokládat, že využití VLP má slibnou budoucnost.

Další část práce je věnována praktické části, která je zaměřena na metodu RSS. Na následujících stranách lze nalézt návrh algoritmu v prostředí Matlab, který vytvoří model, vyzářeného výkonu z OLED na podložku, využitelný k lokalizaci. Následně jsou výsledky ověřeny pomocí reálného měření.

4. Simulace a reálné měření výkonového rozložení

4.1. Simulace

Tato kapitola je věnována popisu hlavní myšlenky vytvořeného algoritmu. Algoritmus slouží k simulaci výkonového rozložení na vodorovné desce v určité vzdálenosti od zářiče. Vytvořený model pro jednotlivé LED se skládá z obrovského množství bodů. S využitím výsledků simulace jsme při znalosti přijatého výkonu detektorem schopni získat přibližnou polohu přijímače.

LED i OLED představují téměř ideální Lambertovský nebo též nazývaný kosinový zdroj [11]. Pro ověření této skutečnosti uvádím datasheet využitých OLED dostupný na [24]. V případě Lambertovského zdroje je vyzářená intenzita na ploše vyjádřen rovnicí (4):

$$I(\Phi) = I(0) \cdot \cos^{m_l}(\Phi) \quad (4)$$

kde I je svítivost (lm/sr), Φ je úhel vyzáření od kolmice z povrchu zářiče, $I(0)$ je intenzita v centru zářiče, m_l je Lambertovské číslo závislé na úhlu, při kterém naměříme poloviční výkon než je maximální hodnota, označeného $\Phi_{1/2}$. Lambertovské číslo je vypočteno pomocí rovnice (5):

$$m_l = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos(\Phi_{1/2}))} \quad (5)$$

Pro bezdrátový optický spoj využívající jeden zdroj může přijatý výkon být popsán rovnicí (6) [26]:

$$P_r = P_t \cdot H(d) \quad (6)$$

kde P_t je vyzářený výkon ze zdroje, $H(d)$ je přenosová funkce kanálu, která je spojená se vzdáleností přijímače od vysílače. Ve skutečnosti zisk není pouze funkcí vzdálenosti, ale závisí také na úhlu ozáření a na sklonu přijímače. Čím větší vzdálenost nebo úhel natočení, tím je dopadající výkon slabší. Při využití vícero zářičů je celková intenzita záření rovna sumě jednotlivých příspěvků.

Přenosová funkce LOS kanálu je vyjádřena vztahem (7) [26]:

$$H_{LOS} = \frac{(m_l+1) \cdot A \cdot \cos^{m_l}(\Phi) \cos(\theta) G_r(\theta) T_s(\theta)}{2\pi d^2} \quad (7)$$

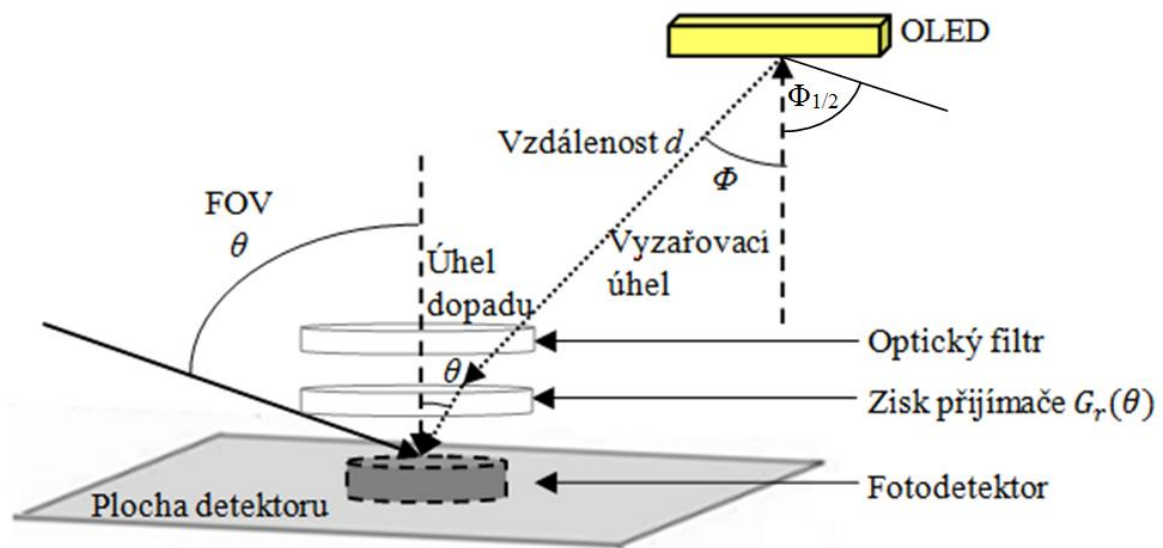
kde d je vzdálenost přijímače a zářiče, A je plocha detektoru, T_s zisk optického filtru

Tudíž je přijatý výkon přijímačem dán rovnicí (8) [4]:

$$P_r = P_t \cdot \frac{(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\Phi) \cos(\theta) \cdot G_r(\theta) T_s(\theta) \quad (8)$$

kde θ je úhel dopadu na detektor vztaženo ke kolmici roviny detektoru, P_t vyzářený výkon, G_r je zisk přijímače. Uvedený vzorec je platný pro $0 \leq \theta \leq FOV$ (Field of View), pokud je úhel větší než FOV detektoru (úhel dopadu záření, který dokáže přijímač detekovat), je přijatý výkon generovaný pouze šumovým pozadím.

Pro snazší představení využitých proměnných přikládám obrázek 21, ve kterém jsou tyto proměnné zřetelně znázorněny. Jedná se o vyzařovací úhel, úhel dopadu a úhel polovičního výkonu $\Phi_{1/2}$.



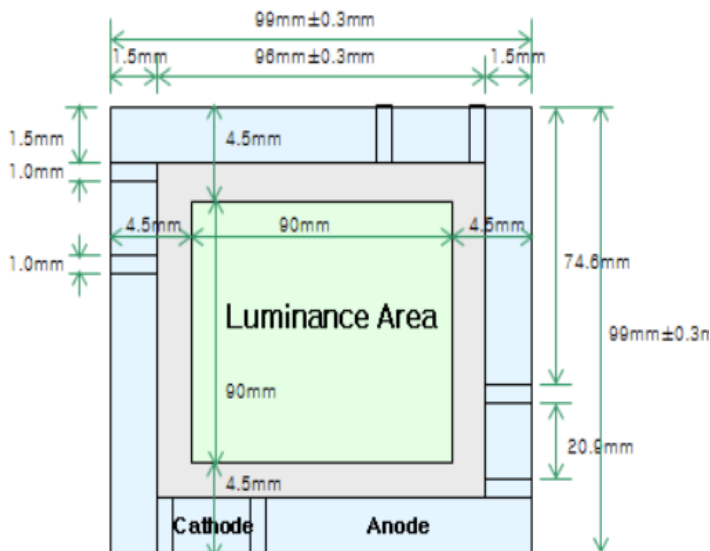
Obr. 20: Znázornění proměnných využitých ve výpočtech

4.2. Měření

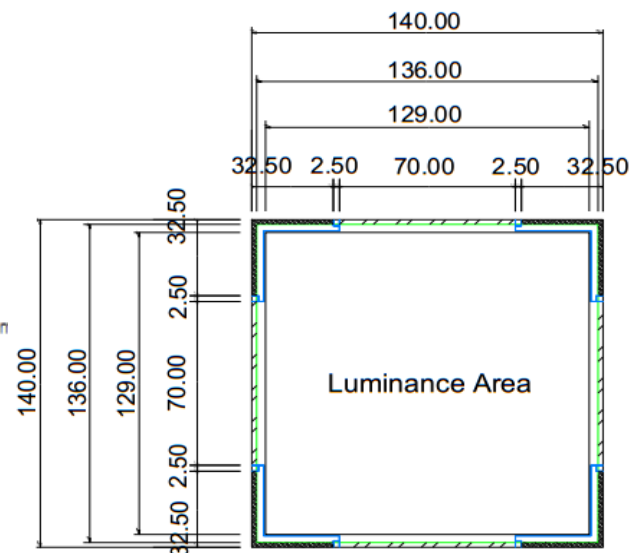
Tato část je věnována proměření výkonového rozložení dopadajícího optického signálu z OLED panelů a následnému využití získaných dat za účelem lokalizace pomocí VLC. Bylo využito dvou zářičů za účelem určení hledané pozice. V tabulce 2 jsou uvedeny základní parametry OLED zářičů. Na obrázku 22 a 23 jsou znázorněny velikosti zářičů. Všechny údaje jsou vyčteny z datasheetů od výrobce dostupného na [27] [28].

Typ	Rozměry [mm]	Max. napětí [V]	Max. proud [mA]	Účinnost [lm/W]	Hmotnost [g]	Životnost [hod.]
N6SA30-B	99x99x1.97	10	200	60	43	40000
N6SC30-F	140x140x0.93	10	500	60	60	40000

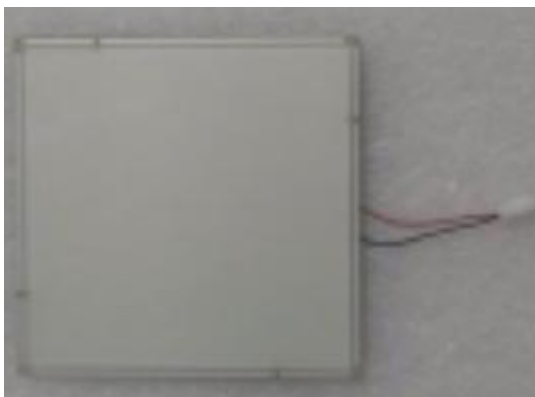
Tab. 2: Katalogové hodnoty využitých OLED panelů



Obr. 22: N6SA30-B [28]



Obr. 21: Typ N6SC30-F [27]

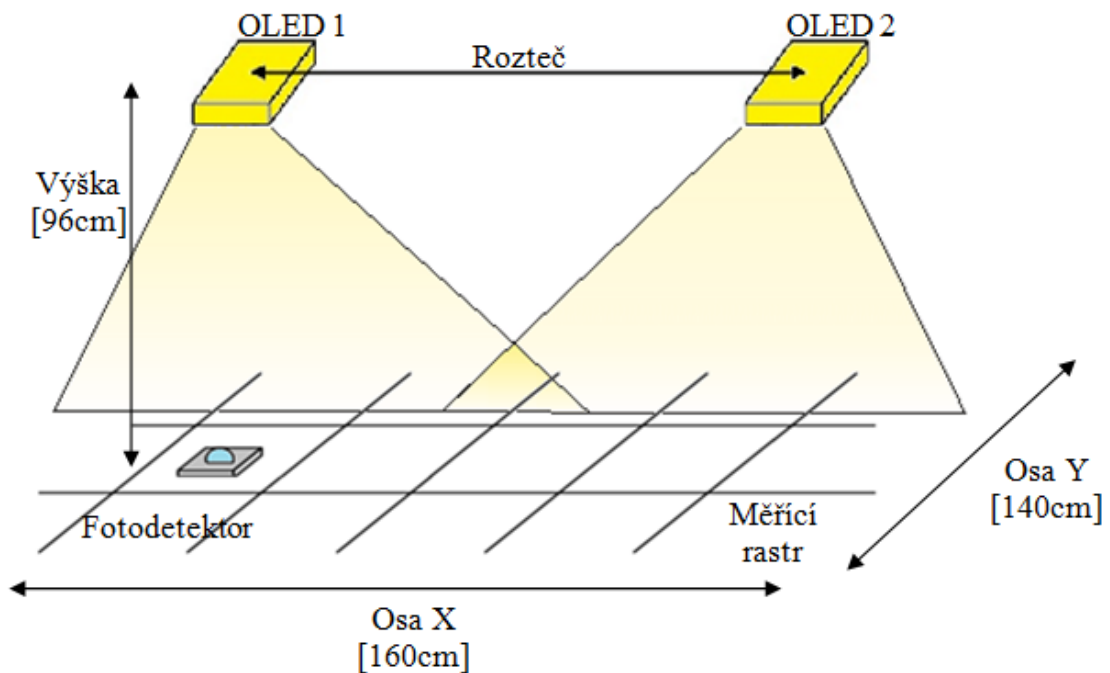


Obr. 24: Skutečná podoba OLED panelu
N6SA-30-B [25]



Obr. 23: Rozsvícené OLED při měření

Jednotlivé OLED panely byly připevněny na konstrukci, která byla ve výšce 0,96 centimetrů nad podložkou o rozměrech 160 x 140cm. Na desce byl narýsovaný pomocný rastr, který sloužil k měření výkonu v ekvidistantních krocích pomocí detektoru. Nejprve bylo provedeno měření pro jednotlivé OLED, abych získal přesnou charakteristiku zářičů. V tomto případě bylo umístění zářičů vycentrováno na střed podložky. V dalším kroku byl přidán druhý zářič a sestava musela být přenastavena. Umístění OLED zářičů se muselo odsadit od středu podložky, aby bylo dosaženo vhodného světelného pokrytí desky, jak je zobrazeno na obrázku 25.



Obr. 25: Měřicí zapojení se dvěma OLED panely

K naměření hodnot jsem využil fotodetektor od firmy Thorlabs s označením PM100A Analog Power Meter Console znázorněný na obrázku číslo 26. Který byl vybavený měřicí hlavicí s označením S121C, která je schopna měřit celé spektrum viditelného světla. Při měření byl detektor využíván na vlnové délce 635nm . Na této vlnové délce OLED panely vyzařují nejvíce světelné energie[25]. Více detailů ohledně detektoru je zobrazeno v tabulce 3, případně v datasheetu dostupného na [29].

S121C	
Typ detektoru	Křemíková fotodioda
Rozsah vlnových délek	400-1100 nm
Výkonový rozsah	500nW-500mW
Plocha detektoru	9,7x9,7 mm
Typ zdroje	Diody, He-Ne,..
Nejistota měření	±3% (451 – 1000 nm)

Tab. 3: Parametry měřící hlavičky S 121C



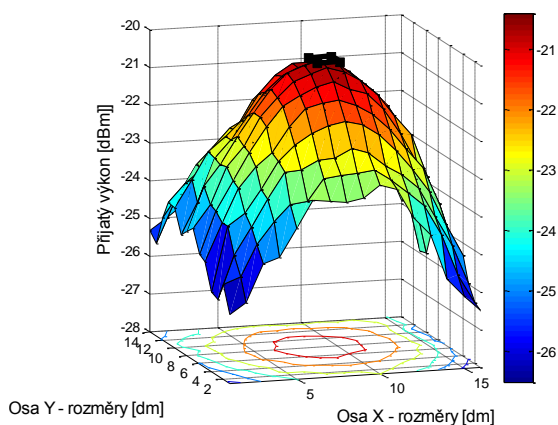
Obr. 26: Využitý fotodetektor [29]

4.3. Porovnání naměřených a simulovaných hodnot

V následující kapitole jsou zobrazeny výsledky simulačního algoritmu vytvořeného v MATLABu. Simulace jsou porovnány s naměřenými daty a rozdíl hodnot je na závěr vyobrazen v grafu. Výsledky jsou uvedeny jak pro jednotlivé panely, tak i pro jejich kombinaci, kdy simulovaný průběh vznikl sloučením hodnot z dílčích měření. Černé čtverce v grafech znázorňují pozice OLED panelů.

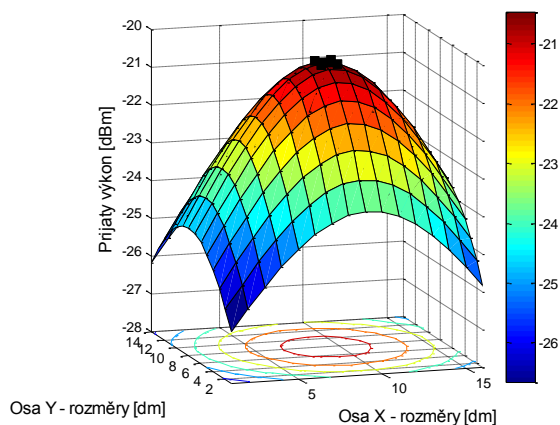
Panel N6SA30-B (10x10 cm)

Naměřené

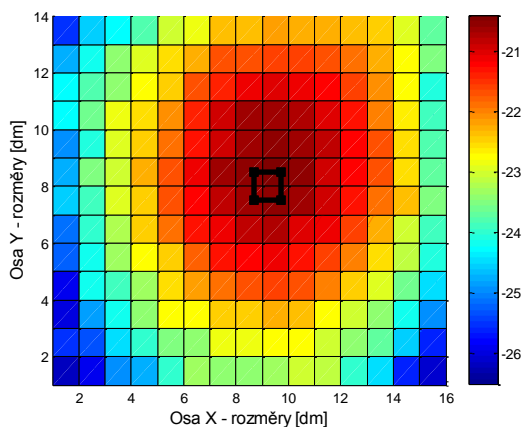


Obr. 27: Rozložení opt. výkonu na desce

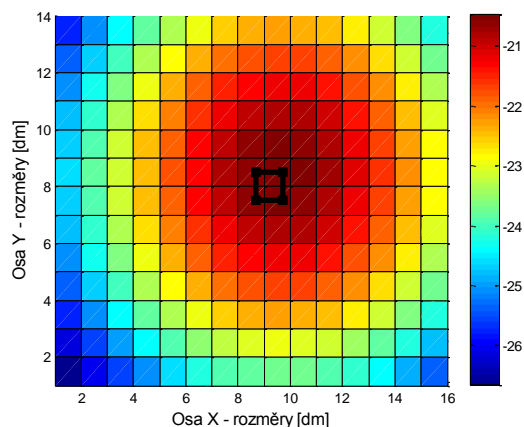
Simulované



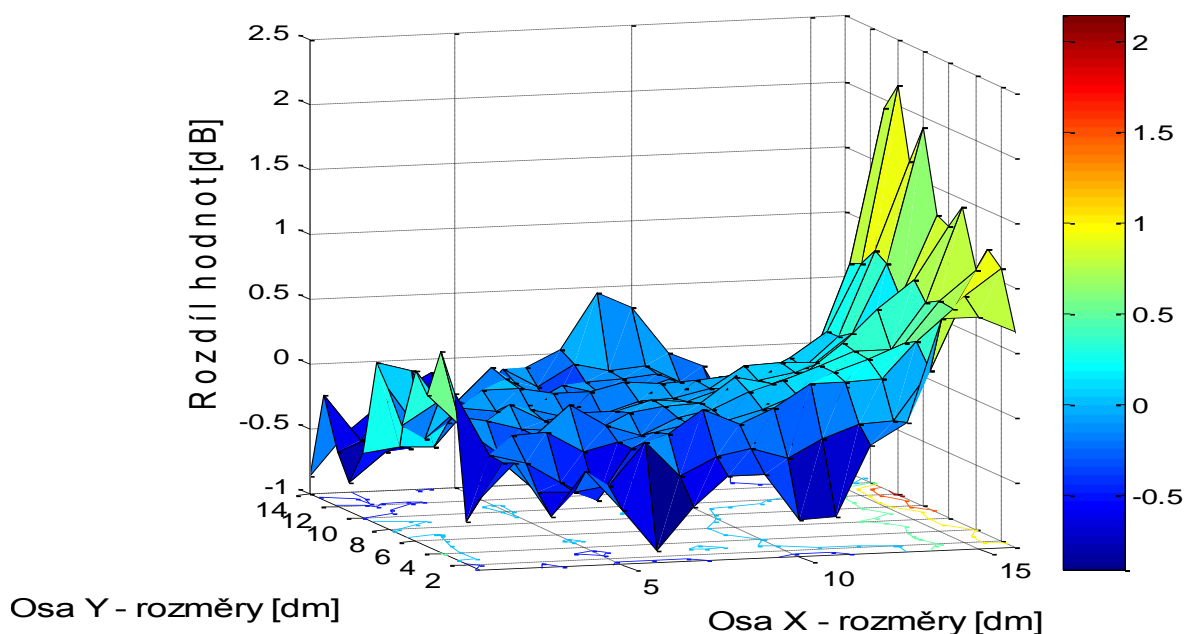
Obr. 28: Rozložení opt. výkonu na desce



Obr. 30: Rozložení opt. výkonu na desce (shora)



Obr. 32: Rozložení opt. výkonu na desce (shora)

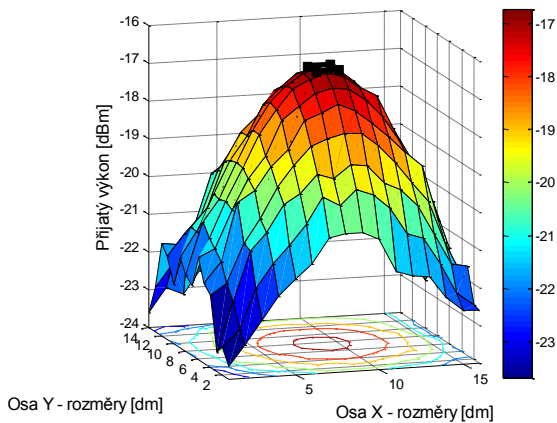


Obr. 31 Zobrazení rozdílu mezi naměřenými a simulovanými daty

Na obrázku 31 je znázorněn rozdíl simulovaných a naměřených hodnot v dB. Je patrně vidět, že většina grafu se pohybuje v rozmezí desetin dB. Z toho vyplývá, že se nám simulace velice dobře shoduje s naměřenými daty. Pouze v pravé části grafu výrazně stoupá odchylka. Odchylku přisuzují konstrukci našeho experimentálního stanoviště, která lehce zastiňovala desku při pravém okraji. Tato skutečnost nebyla do simulace zanesena, a tudíž se odchylka pohybuje okolo dvou dB. Průměrná hodnota rozdílu simulovaných a naměřených dat je rovna -0.0080 dB a směrodatná odchylka je 0,17 dB.

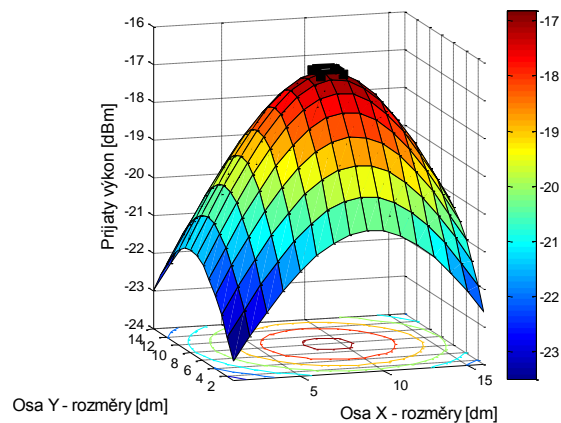
Panel N6SC30-F (14x14 cm)

Naměřené

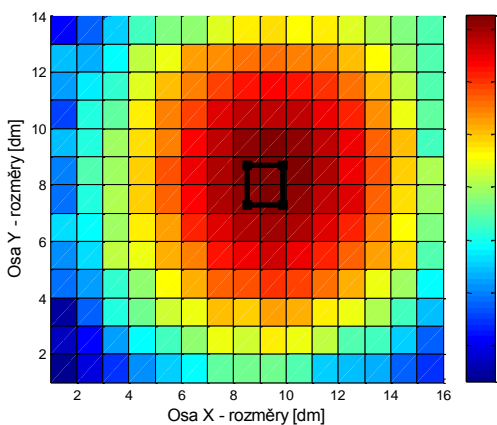


Obr. 36: Rozložení opt. výkonu na desce

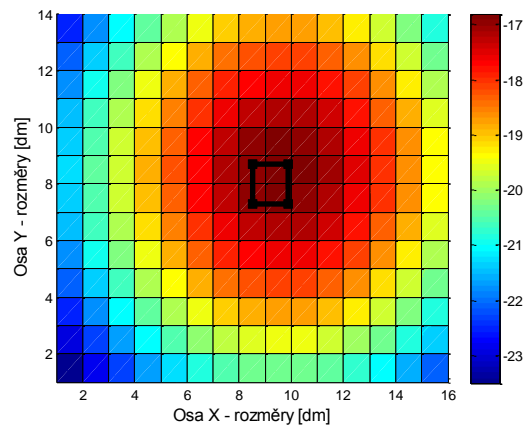
Simulované



Obr. 35: Rozložení opt. výkonu na desce

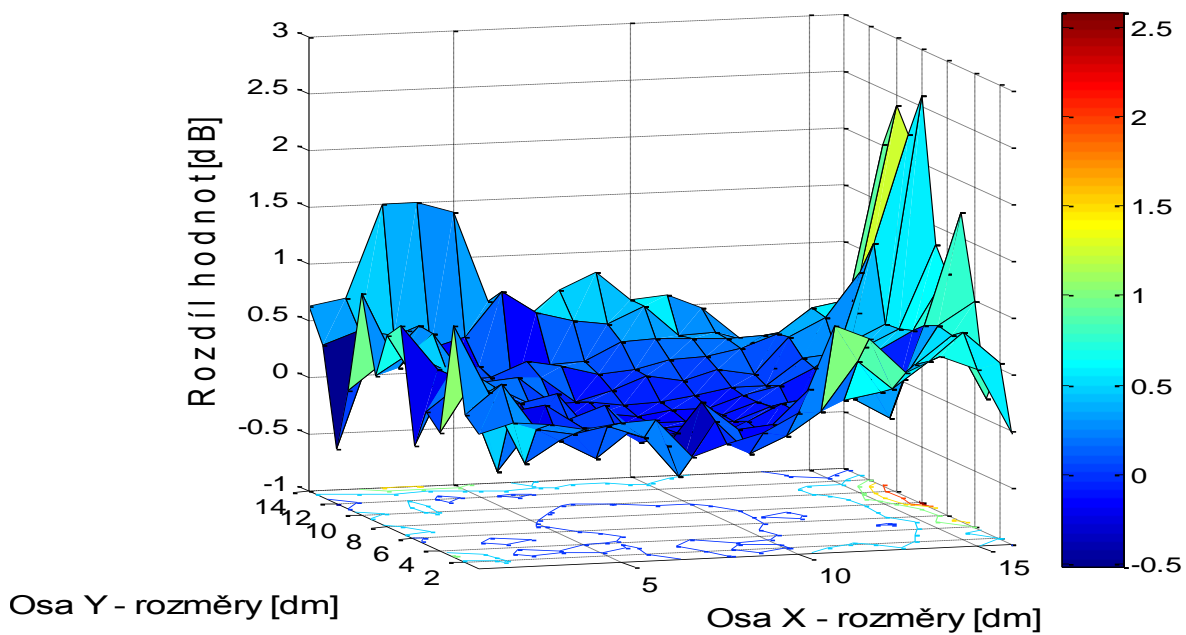


Obr. 34: Rozložení opt. výkonu na desce (shora)



Obr. 33: Rozložení opt. výkonu na desce (shora)

Obrázek 37 zobrazuje rozdílové hodnoty simulovaných a naměřených hodnot. Můžeme vypočítat, že odchylky se po většinu plochy pohybují okolo desetin dB. Pravý okraj se nám bohužel opět oddaluje díky zastínění podložky konstrukcí. Zároveň je zde vidět relativně velký nárůst přijatého výkonu v levém horním rohu s hodnotou 1,5 dB. Tento skok přisuzujeme nedokonalosti měření, která může být způsobena například lehkým natáčením detektoru z důvodu neideálně rovné měřicí desky, na které detektor ležel. Průměrná hodnota rozdílu simulovaných a naměřených dat je rovna 0,297 dB a směrodatná odchylka je 0,185 dB. Tento výsledek už není tak přesný jako u menšího panelu, ale stále se to dá považovat za přijatelný.

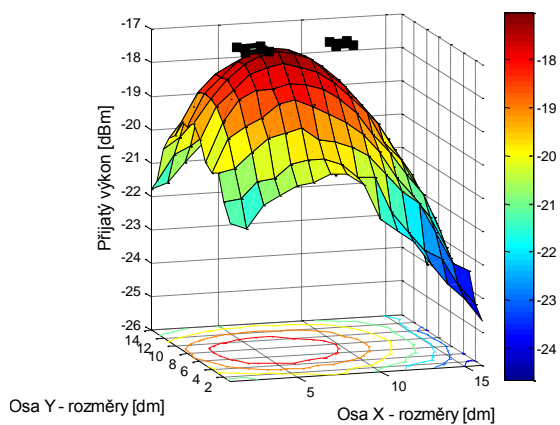


Obr. 37: Zobrazení rozdílu mezi naměřenými a simulovanými daty

Kombinace zářičů (14x14 cm a 10x10 cm)

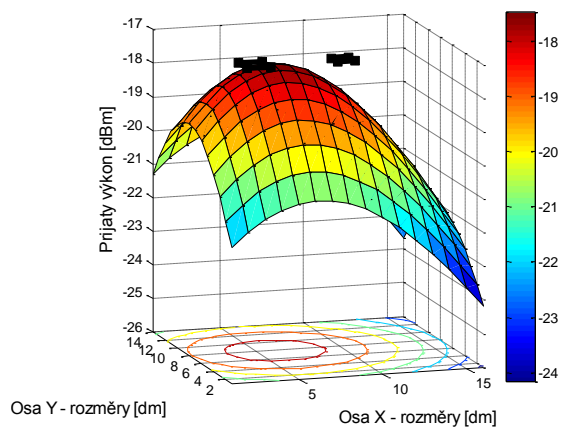
V tomto případě byly využity oba dva zářiče N6SA30-B a N6SC30-F současně.

Naměřené

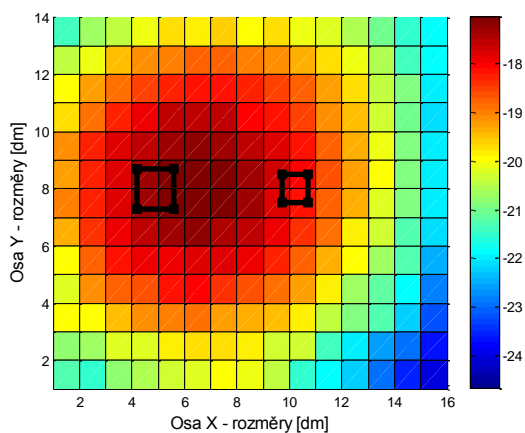


Obr. 39: Rozložení opt. výkonu na desce

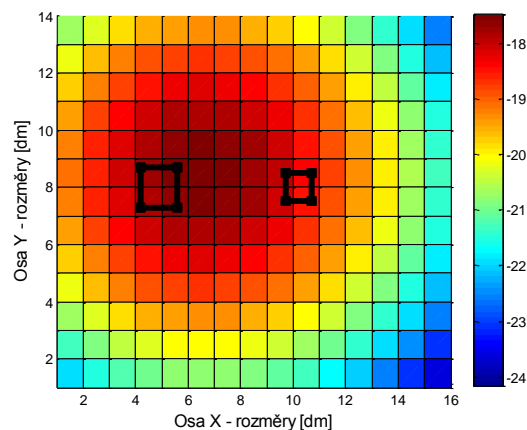
Simulované



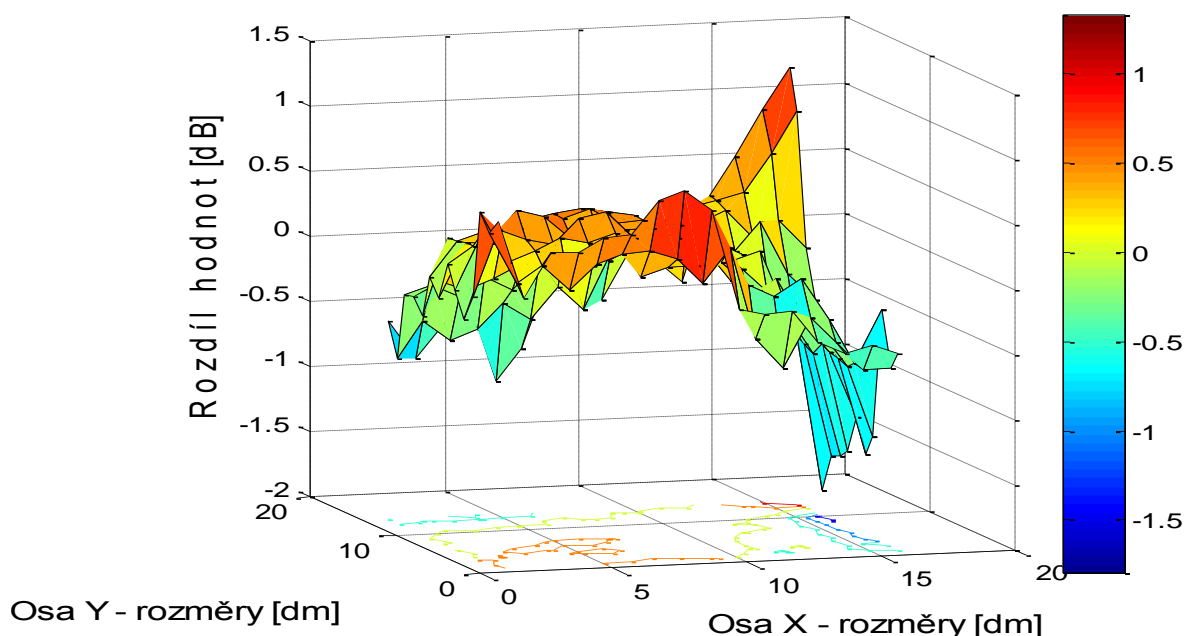
Obr. 38: Rozložení opt. výkonu na desce



Obr. 40: Rozložení opt. výkonu na desce (shora)



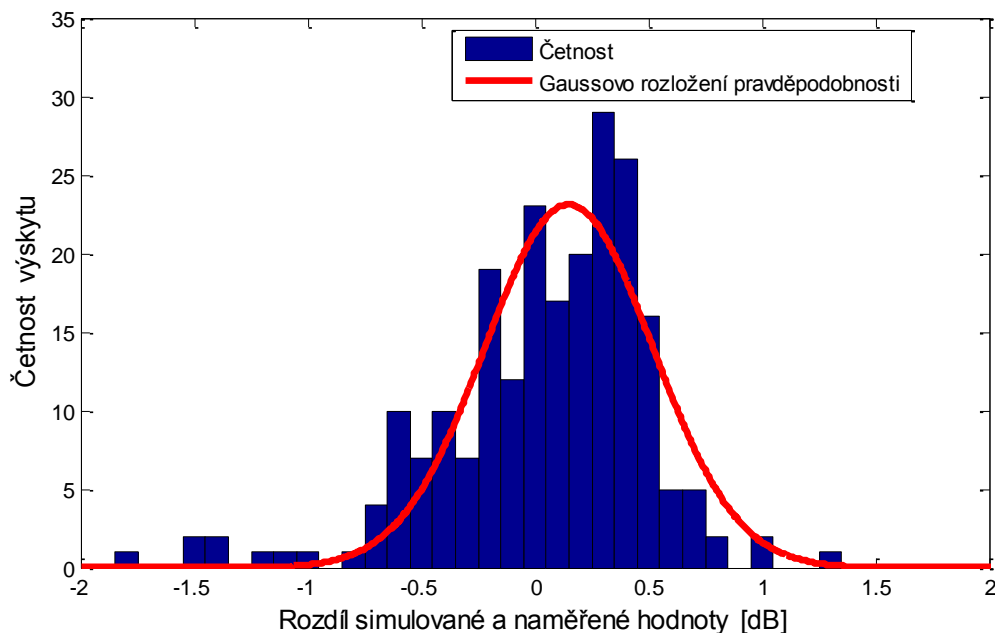
Obr. 41: Rozložení opt. výkonu na desce (shora)



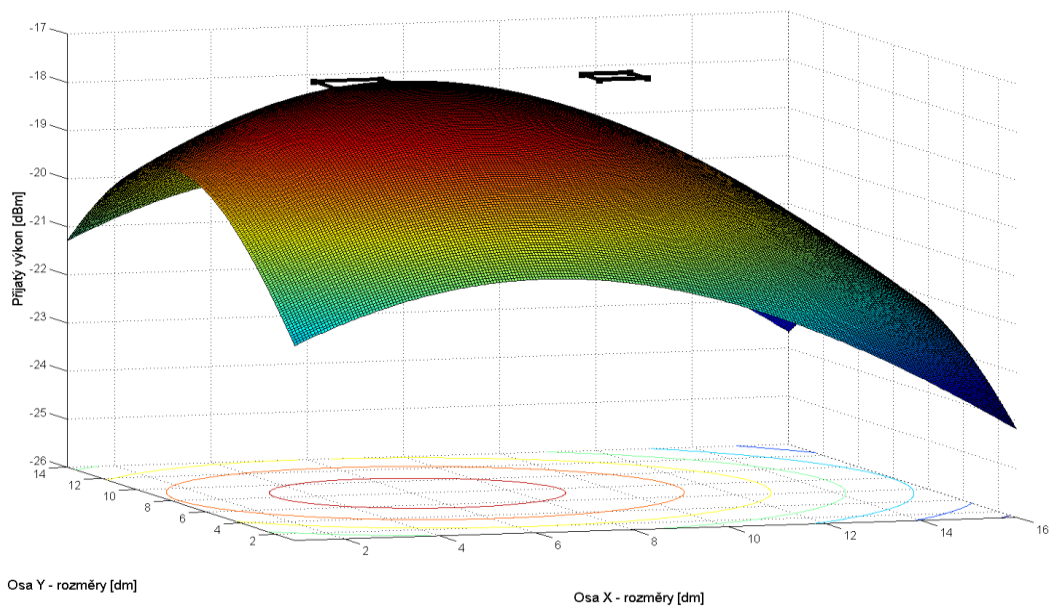
Obr. 42: Zobrazení rozdílu mezi naměřenými a simulovanými daty

V této části byl zobrazen přijatý výkon od dvou zářičů, které byly umístěny ve stejné výšce nad podlahou. Levý zářič (14x14cm) byl větší a zároveň vyzařoval větší množství optické energie, tudíž je v grafu vidět jeho převaha nad druhým zářičem (10x10cm). Při použití jednoho osvětlení mají výkonové „vrstevnice“ tvar soustředných kružnic. Pomocí druhého zářiče se z kružnic stávají elipsy, což je patrné z obrázků číslo 40 a 41. Simulovaný průběh vznikl součtem průběhů jednotlivých OLED zářičů. Z rozdílového grafu (Obr. 42) můžeme vypočítat, že ve středu měřicí desky hodnoty souhlasí a rozdíl je nepatrný, avšak během přibližování ke krajům desky rozdíl roste a dosahuje maximální hodnoty okolo 1,5 dB. Průměrná hodnota rozdílu odpovídá 0,042 dB a směrodatná odchylka je rovna 0,190 dB. Tyto hodnoty jsou uspokojivé a můžeme simulace využít

k určení polohy. Na obrázku 43 jsou názorně vyobrazeny četnosti výskytu jednotlivých rozdílových hodnot, které jsou proloženy Gaussovým rozložením pravděpodobnosti. Maximální pravděpodobnost je vyznačena okolo hodnoty 0,1 dB.



Obr. 43: Četnost rozdílových hodnot



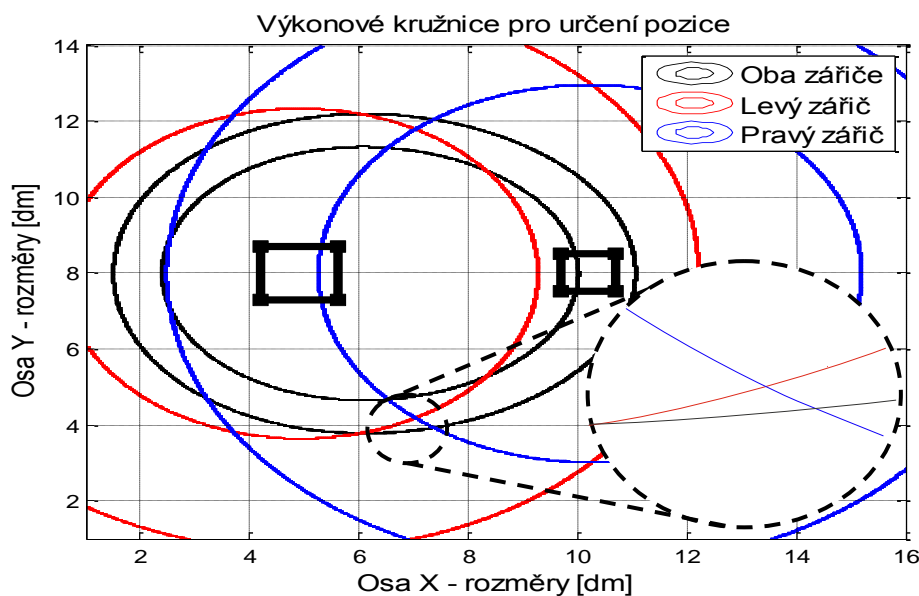
Obr. 44: Zobrazení simulovaného rozložení s vysokým počtem bodů

Obrázek 44 znázorňuje nasimulovaný průběh vyzářování dvojice zářičů. V tomto případě je síť bodů 15 krát zahuštěná oproti naměřeným datům. Při určování polohy detektoru je využíváno šedesátinásobné zahuštění sítě z důvodu kompromisu mezi výpočetní náročností a přesností lokalizace.

5. Určování polohy uživatele

Nyní když máme nasimulované výkonové rozložení pro jednotlivé OLED i pro případ, že je využíváme současně, můžeme této skutečnosti využít pro určení lokalizace detektoru, který nám naměří přijatý výkon pro všechny tři možné scénáře. Tudíž známe přijatý výkon od 1. zdroje, 2. zdroje a zároveň přijatý výkon od obou současně. Při znalosti těchto tří výkonů (vzdáleností) pro jednu pozici detektoru můžeme pomocí modelů určit přibližnou pozici detektoru pomocí trilaterace.

Samostatné měření probíhalo následovně. Na měřicí podložce bylo zvoleno 30 bodů o známé poloze, pro které byly změřeny všechny tři výkony, všechny odděleně. Tudíž přijatý výkon pro levý zářič se měřil pouze při zapnutém levém OLED panelu. Nápodobně pro pravý zářič a nakonec pro oba zapnuté OLED současně. Předpokládám, že toto měření by bylo možno zrealizovat pro kontinuální svícení obou zářičů s využitím přenosu dat charakterizující ID zářiče a schopnosti rychle měnit svůj stav ze zapnutého do vypnutého. Do algoritmu můžeme vložit detektorem naměřené hodnoty a nechat si vykreslit vrstevnice těchto hodnot, které nám znázorňují odpovídající vzdálenost od zářiče. Pokud nemáme přijatý výkon nasimulovaný nekonečným počtem bodů, volíme rozumný interval v okolí naměřené hodnoty, aby hledané číslo model obsahoval. Tento interval nám zároveň zvyšuje pravděpodobnost, že se předpokládané oblasti jednotlivých zářičů budou protínat v jednu bodě a tím nám naznačovat polohu detektoru, avšak při moc vysokém intervalu nám plocha předpokládané pozice může vyjít velice velká. V tomto případě by určení nebylo příliš přesné. Na následujícím obrázku je znázorněn princip popsané metody. Obrázek číslo 45 obsahuje 3 kruhy (modrý, červený a černý) od jednotlivých zářičů. V místě protnutí těchto kruhů se nachází předpokládaná pozice detektoru.

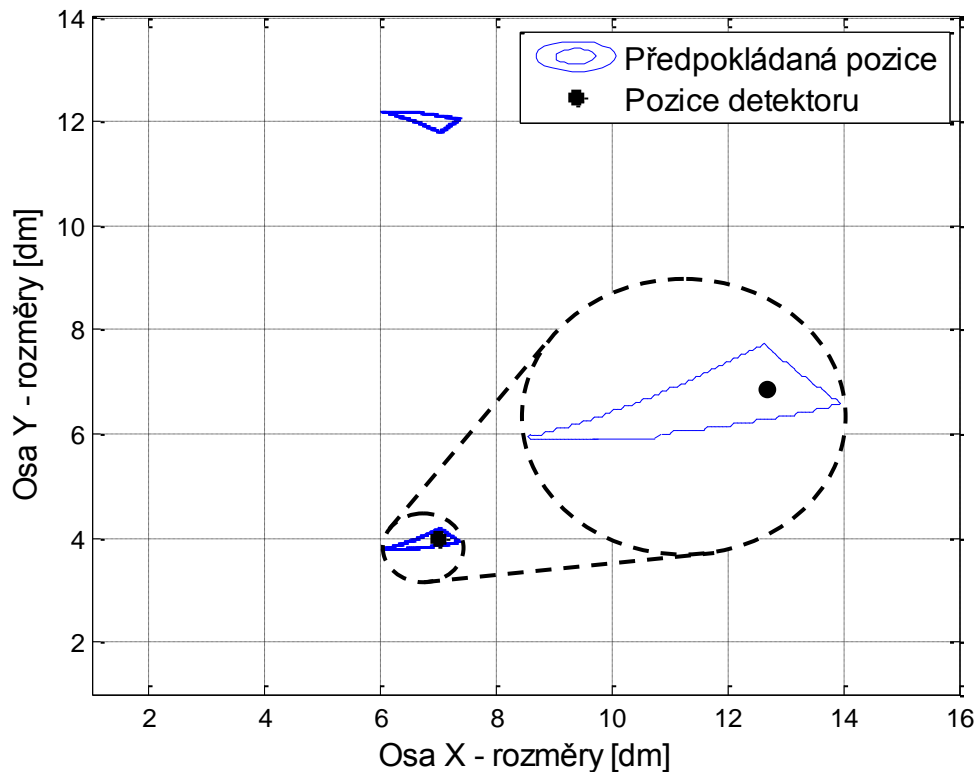


Obr. 45: Určování pozice pomocí trilaterace

Na obrázku 46 je již znázorněn výsledek lokalizace. Je zde znázorněna skutečná pozice detektoru (černý bod) a modrý obrazec, vzniklý z průniku tří kruhů, jenž nám ohraničuje předpokládanou oblast, ve které by se detektor měl vyskytovat. V popisku pod grafem jsou zároveň vypsány hodnoty, které nám dávají představu o přesnosti určení. Jedná se o průměrnou vzdálenost odhadu od skutečné pozice detektoru a její směrodatnou odchylku. Zároveň je vypočten Cramer- Rao limit (CRB- Cramer- Rao bound), který nám stanovuje dolní mez pro rozptyl odhadu. CRB je vypočten pomocí vztahu (9) [30].

$$\sqrt{\text{var}(d)} \geq \frac{\sqrt{3}c}{2\sqrt{2}\pi R_p \eta \sqrt{E_x/N_0} f_c} \quad (9)$$

Kde c je rychlost světla, η je útlum přenosu, R_p je citlivost fotodiody, E_x je elektrická energie signálu $x(t)$, N_0 je šumové pozadí a f_c odpovídá frekvenci signálu $x(t)$.

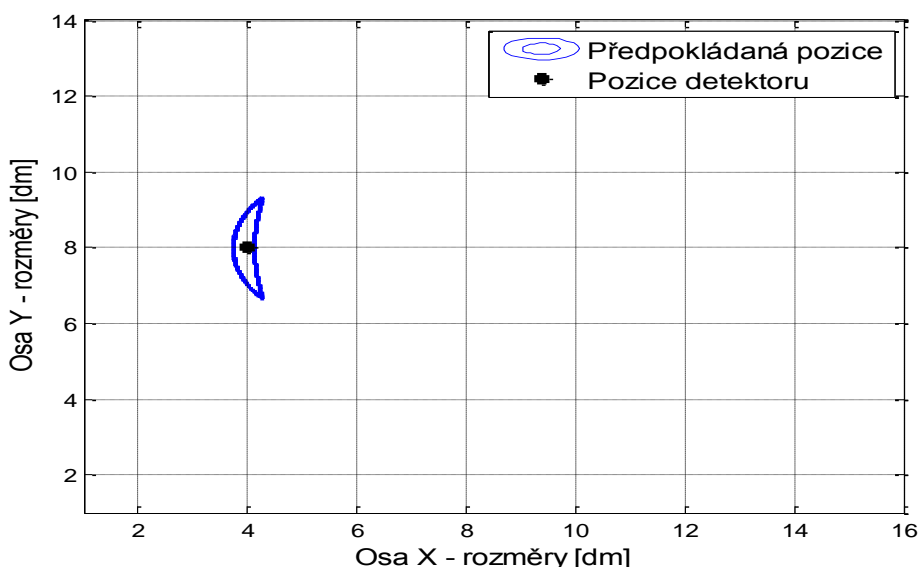


Obr. 46: Výsledek lokalizace s následujícími parametry
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 3,07 cm

Směrodatná odchylka odhadu: 2,26cm; CRB- směrodatná odchylka: 1,19 cm

V tomto případě je průměrná vzdálenost odhadu od skutečné pozice detektoru bezmála 2 cm a detektor se nachází ve vyobrazené oblasti. Zároveň si můžeme všimnout i druhé modré oblasti zobrazující předpokládanou pozici, která je umístěna v horní části grafu. Tento jev je dán umístěním zářičů. Byly využity dvě světla, která ležela přibližně uprostřed grafu na ose X. Tím pádem je simulované rozložení výkonu symetrické podle osy X, což vysvětluje skutečnost, že vidíme dvě modré oblasti zrcadleny podle osy X. Tento negativní úkaz by mohl být odstraněn pomocí přidaného zářiče, který by byl umístěn na vhodném místě, aby fiktivní oblast vyrušil. Při výpočtech vzdálenosti a odchylek je využíváno pouze oblasti, která je poblíž hledané pozice. V opačném případě by hodnoty byly i řádově vyšší.

Na obrázcích 47,48,49 a 50 jsou znázorněny další zajímavé lokalizace. Zbytek výsledků je zobrazen v příloze.

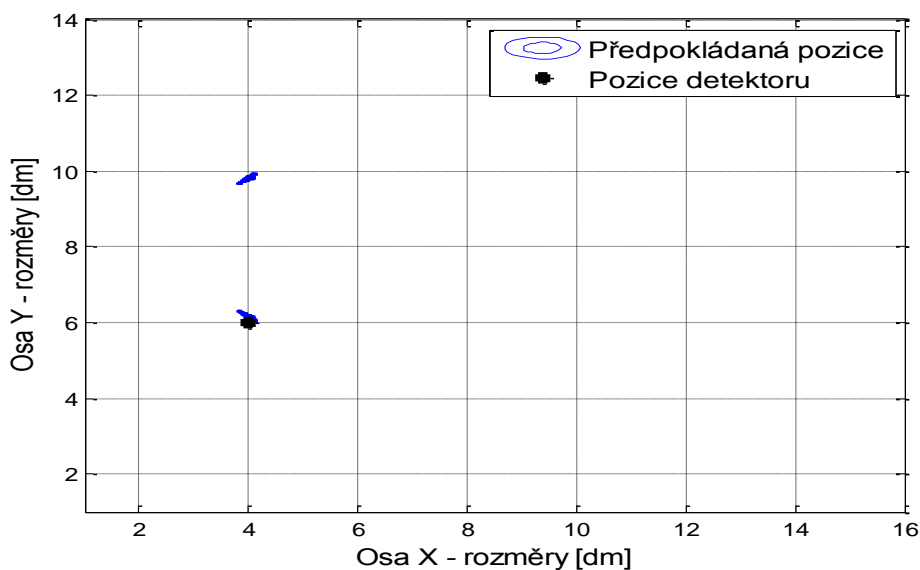


Obr. 47: Výsledek lokalizace s následujícími parametry
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 5,79 cm

Směrodatná odchylka odhadu: 3,38 cm; CRB- směrodatná odchylka: 0,96 cm

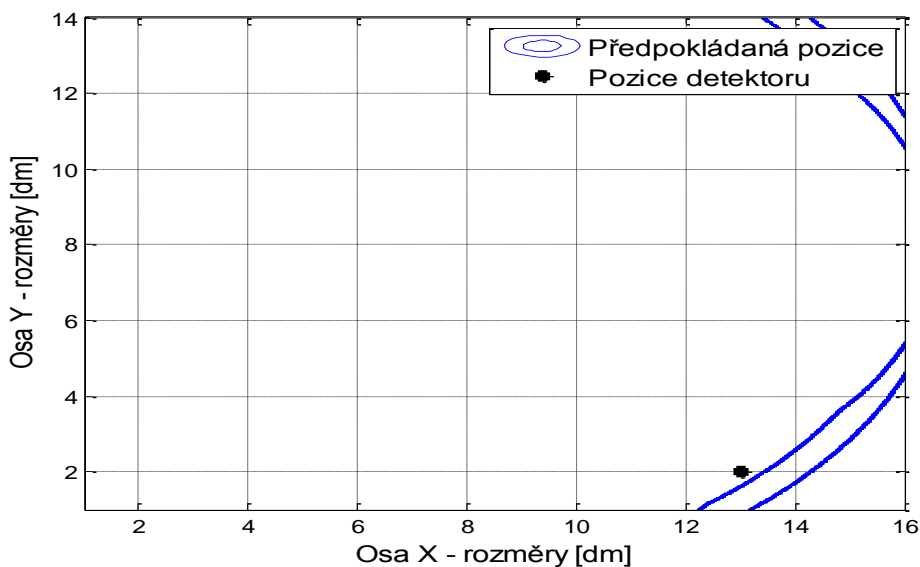
Na obrázku 47 vidíme výsledek lokalizace, který se skládá pouze z jedné předpokládané oblasti. To je dáno tím, že se detektor nachází na ose zářičů. Vyznačená oblast je tedy spojitá a není tvořena vícero částmi, avšak opět platí, že je symetrická podle osy X.

Nastaly dva případy, kdy předpokládaná plocha výskytu byla tak malá, že směrodatná odchylka předpokladu vyšla menší než C-R limit. Jeden z případů je uveden na obrázku 48, kde směrodatná odchylka vyšla o 3 mm menší. V případě, že by se do výpočtu zařadila druhá vyznačená oblast, odchylka by vyskočila téměř na 20cm.



Obr. 48: Výsledek lokalizace s následujícími parametry
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 2,14 cm

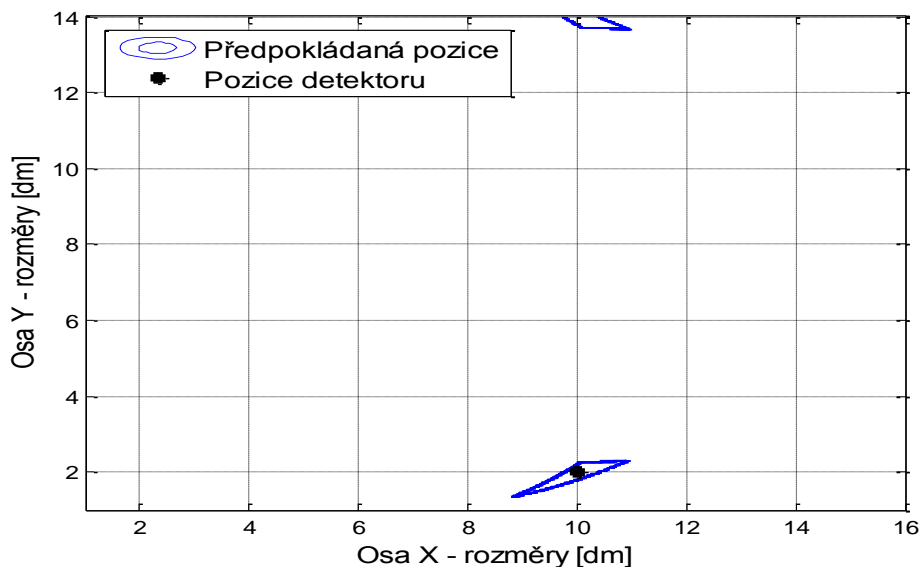
Směrodatná odchylka odhadu: 0,70cm; CRB- směrodatná odchylka: 1,05 cm



Obr. 49: Výsledek lokalizace s následujícími parametry
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 19,69 cm

Směrodatná odchylka odhadu: 11,98; CRB- směrodatná odchylka: 2,62 cm

Krajní pozice vycházejí s velkou odchylkou od detektoru, což je dáno chybou simulačního modelu, který v těchto místech dosahoval vyšší odchylky od naměřených dat a chybou způsobenou umístěním zářičů. Vzdálenost mezi detektorem a OLED se zvětšuje, čímž se též zvětšuje oblast průniku kružnic, z důvodu relativně malého rozdílu poloměrů jednotlivých kružnic. Názorný případ znázorněn na obrázku 49, kdy průměrná vzdálenost odhadu od detektoru je bezmála 20 cm.

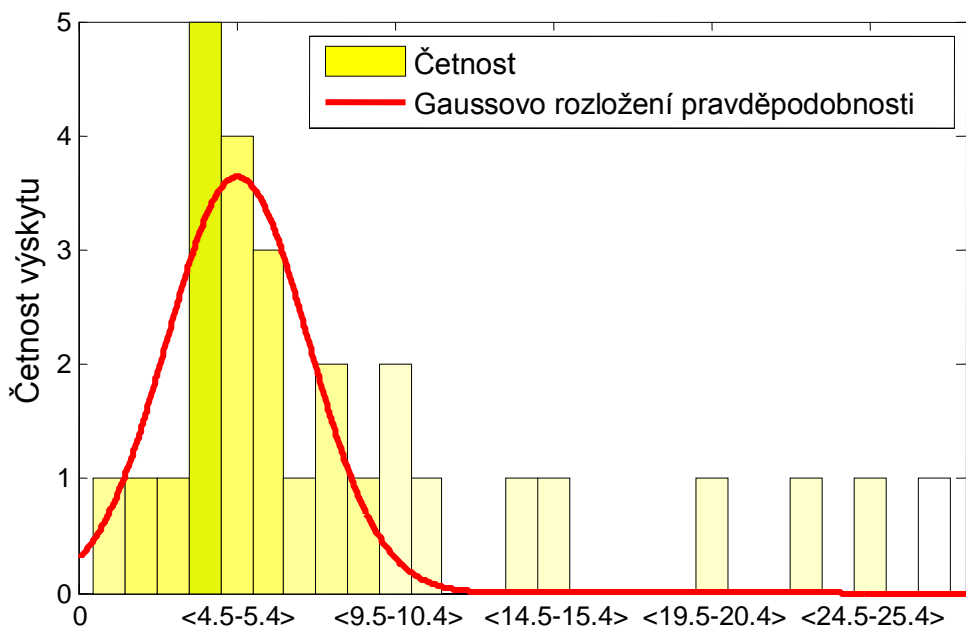


Obr. 50: Výsledek lokalizace s následujícími parametry
 Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 4,44 cm

Směrodatná odchylka odhadu: 2,89; CRB- směrodatná odchylka: 1,92 cm

Na obrázku 50 je vyobrazena situace, kdy u strany desky vychází lokalizace v centimetrových hodnotách. V tomto konkrétním případě je průměrná vzdálenost odhadu rovna 4,44 cm a směrodatná odchylka 2,89 cm.

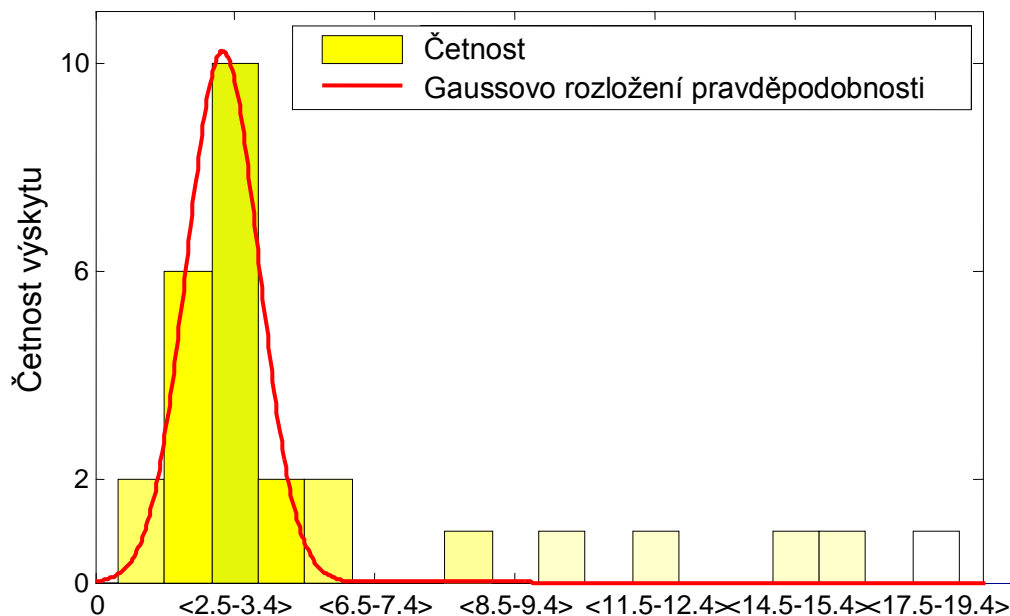
Ostatní případy lokalizace jsou uvedeny v příloze. Nyní jsou uvedeny souhrnné grafy zobrazující výslednou statistiku všech výsledků měření.



Průměrná vzdálenost odhadu od skutečné pozice detektoru rozdělena na intervaly [cm]

Obr. 51: Zobrazení četnosti výsledků v závislosti na průměrné vzdálenosti odhadu

Na obrázku 51 je zobrazena četnost střední vzdálenosti odhadu od skutečné pozice detektoru. Je patrné, že nejvyšší zastoupení patří hodnotě <3.5-4.4>cm, která se vyskytla v pěti případech z 30 měření. Další významnou skupinou jsou hodnoty <4.5-6.5>, které jsou zastoupeny 7krát. S přesností do 10,5 cm se podařilo určit 22 pozic z 30.



Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru rozdělena na intervaly [cm]

Obr. 52: Zobrazení četnosti výsledků v závislosti na střední odchylce odhadu

Dále je zde vyobrazena směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od skutečné pozice detektoru. Nejvyšší četnost směrodatné odchylky je přiřazena intervalu <2.5-3.4>cm, která je zastoupena v 10 případech. Další významný počet výskytu zaujímá odchylka v intervalu <1.5-2.4>cm, která byla naměřena v šesti případech. Směrodatná odchylka v rozmezí <0-5.4>cm byla naměřena v 22 případech z 30.

6. Závěr

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část je věnována teoretickému popisu; jsou především vysvětleny základní principy VLC technologie a její pozitiva oproti rádiovým vlnám. Dále jsou diskutovány zdroje bílého světla, jejich omezení a principy generování bílého světla. Navazující kapitola pojednává o fotodetektorech, které také tvoří nedílnou součást VLC systému. Zároveň je uvedeno shrnutí standardu IEEE 802. 15.7, který definuje fyzickou vrstvu. Následuje část popisující přednosti a zápory spojů, kterých VLC využívá. V druhé části je uvedena lokalizace osob ve vnitřních prostorech. Jsou zde nastíněny principy jednotlivých metod využívající viditelné světlo k určování polohy. Hlavní část práce byla zaměřena na praktické měření lokalizace. Výsledky byly rovněž nasimulovány pomocí algoritmu vytvořeného v prostředí Matlab. V naměřených hodnotách je drobné kolísání úrovně signálu, které může být způsobeno mnoha faktory, zejména pak mírným zastíněním nebo pootočením detektoru.

V poslední části byla využita RSS metoda k přesné lokalizaci uživatele. Nasimulovaný model, posloužil jako reference k nalezení pozice detektoru, na základě vyzařování několika zdrojů OLED. Výsledné obrázky obsahují vypočtené hodnoty, které slouží k posouzení přesnosti určení. U většiny výsledků se střední vzdálenost předpokládané polohy pohybovala v řádu centimetrů od skutečné pozice detektoru. Nastalo pouze 8 případů, kdy střední vzdálenost byla větší než 10 cm. Myslím, že výsledky jasně prokázaly, že zvolená metoda je relativně jednoduchá na implementaci. Na druhou stranu model funguje pouze pro vybranou lokalitu a při jakékoliv změně je potřeba mírné konfigurace algoritmu. Práce ukázala, že VLP je relativně přesné a pozice se dá určit s odchylkami v řádu centimetrů. Z toho usuzuji, že se v budoucnu setkáme se zajímavými aplikacemi využívajícími viditelné světlo za účelem lokalizace ve vnitřních prostorech.

Použitá literatura

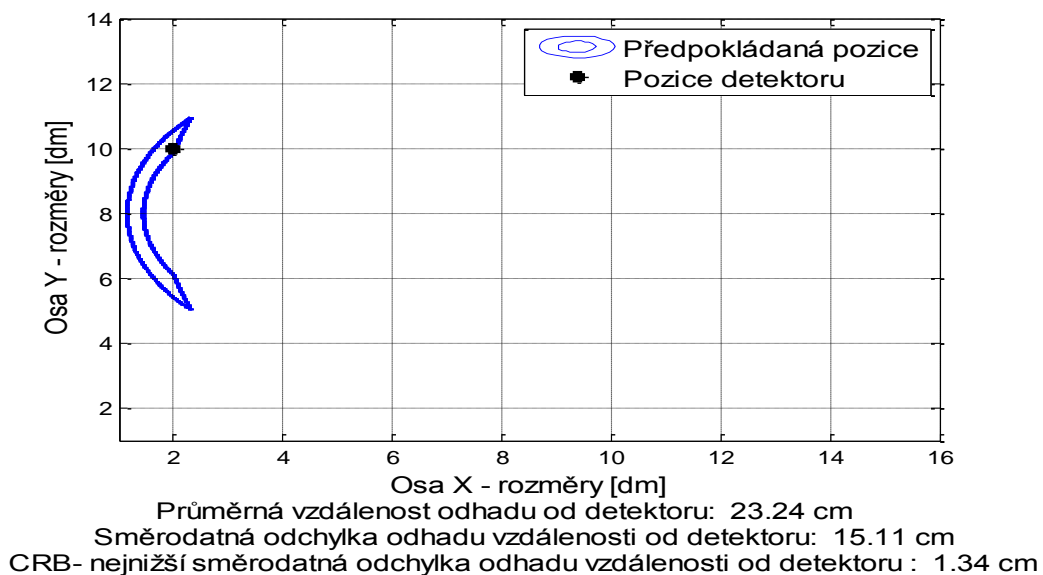
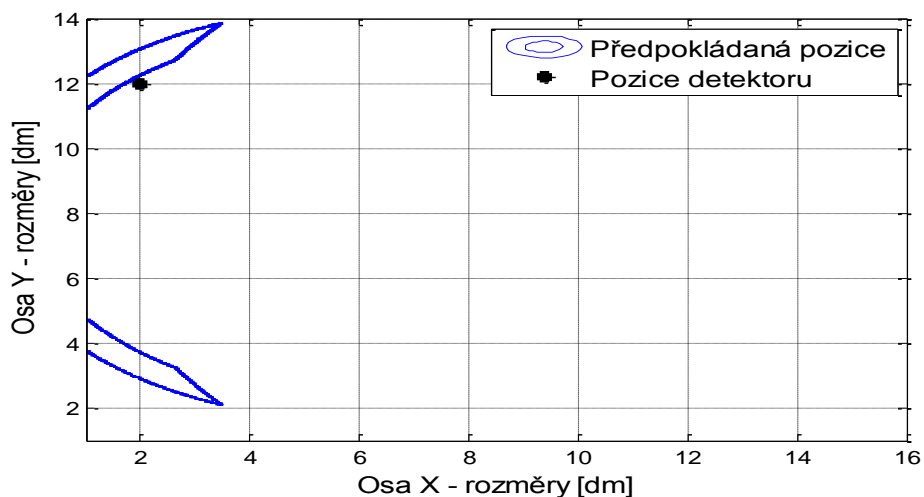
- [1] COSSU, G., A. M. KHALID, P. CHOUDHURY, R. CORSINI a E. CIARAMELLA. 34 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED. *Optics Express*[online]. 2012, vol. 20, issue 26, DOI: 10.1364/oe.20.00b501
- [2] HAAS, Harald. High-speed wireless networking using visible light. *SPIE Newsroom* [online]. 2013-04-19, s. DOI: 10.1117/2.1201304.004773. Dostupné z: <http://www.spie.org/x93593.xml>
- [3] POHLMANN, Christian. Visible Light Communication. *Visible Light Communication* [online]. Dostupné z: http://www.academia.edu/5379322/Visible_Light_Communication
- [4] GHASSEMLOOY, Zabih, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3.
- [5] MATĚJKA, Roman. *LED diody* [online]. 13.7.2014 Dostupné z: <http://popular.fbmi.cvut.cz/elektrotechnika/Stranky/LED%20diody.aspx>
- [6] GUJJARI, Durgesh. *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION* [online]. Halifax, 2012 . . . Diplomová práce. Dalhousie University Dostupné z: <http://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/15478/Gujjari,%20Durgesh,%20MAsc,%20ECED,%20September,%202012.pdf?sequence=1>.
- [7] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005, 220 s. ISBN 80-247-1241-5.
- [8] JUNGnickEL, Volker. *High-speed Optical Wireless Communications Technologies*. San Francisco, 2014. ISBN 10.1364/ofc.2014.th1f.5. Presentace. Franhofer. Dostupné z: ftp://ftp.hhi.de/jungnickel/OFC2014/Jungnickel_OFC_March2014.pdf
- [9] NIESIG, Petr. *LED - světelné diody (Light Emitting Diodes)* [online]. Dostupné z: <http://www.elkovo-cepelik.cz/led-svetelne-diody-light-emitting-diodes>
- [10] CHOW, C, C. YEH a Y LIU. Digital Signal Processing for Light Emitting Diode Based Visible Light Communication. *Digital Signal Processing for Light Emitting Diode Based Visible Light Communication* [online]. roč. 2012. Dostupné z: http://photonicsociety.org/newsletters/oct12/RH_DigitalSignal.html

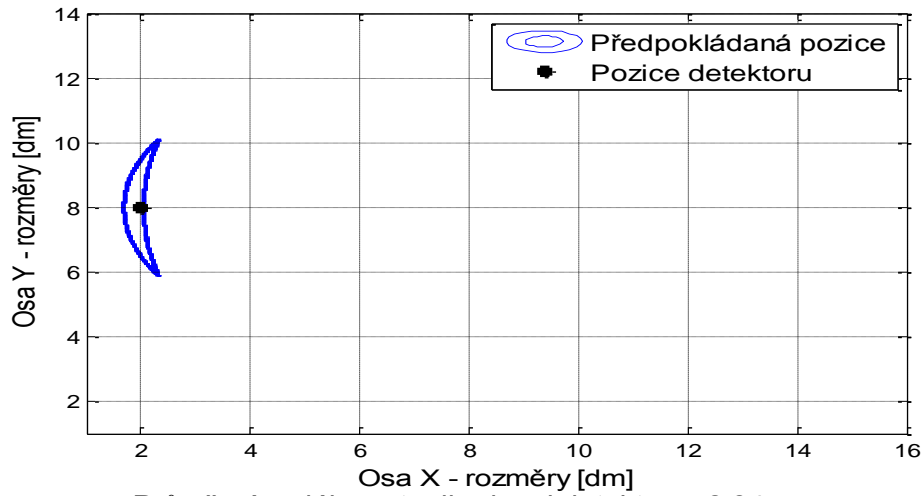
- [11] HAIGH, P. A., Z. GHASSEMLOOY, S. RAJBHANDARI a I. PAPAKONSTANTINOY. Visible light communications using organic light emitting diodes. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2013, vol. 51, issue 8, s. 148-154. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6576353. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6576353>
- [12] CHUN, Hyunchae a Chien-Jung CHIANG. *2012 International Workshop on Optical Wireless Communications* [online]. Piscataway: IEEE, 2012. ISBN 978-146-7327-336. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6349685>
- [13] SPONSOR, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. *IEEE standard for local and metropolitan area networks*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. ISBN 9780738166650
- [14] Encyclopædia Britannica Online. NASSAU, Kurt. [online]. 10-22-2014. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/126658/colour/images-videos/47312/chromaticity-standard-chromaticity-diagram>
- [15] POVEY, Gordon. *An IEEE Standard for Visible Light Communications* [online], 4.7.2014. [cit. 2015-06-04] Dostupné z: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>
- [16] KAIYUN, Cui. 2010. Line-of-sight visible light communication system design and demonstration [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?arnumber=5580360&tag=1>.
- [17] Cui, Kaiyun. (2012). *Physical Layer Characteristics and Techniques for Visible Light Communications*. UC Riverside: Electrical Engineering. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/4q24>
- [18] ARMSTRONG, Jean, Y. SEKERCIOGLU a Adrian NEILD. Visible light positioning: a roadmap for international standardization. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2013, vol. 51, issue 12, s. 68-73.
- [19] ZHANG, Weizhi, M. I. Sakib CHOWDHURY a Mohsen KAVEHRAD. Asynchronous indoor positioning system based on visible light
- [20] Xueli Zhang, Jingyuan Duan, Yuegang Fu, and Ancun Shi. 2014. Theoretical Accuracy Analysis of Indoor Visible Light Communication Positioning System Based on Received Signal Strength Indicator. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6880333>

- [21]Se-Hoon Yang; Hyun-Seung Kim; Yong-Hwan Son; Sang-Kook Han, "Three-Dimensional Visible Light Indoor Localization Using AOA and RSS With Multiple Optical Receivers," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.32, no.14, pp.2480,2485, July15, 1 2014
- [22]ZHANG, Weizhi, M. I. Sakib CHOWDHURY a Mohsen KAVEHRAD. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications. *Optical Engineering*[online]. 2014, vol. 53, issue 4. DOI: 10.1117/1.oe.53.4.045105. Dostupné z: <http://cictr.ee.psu.edu/facstaff/kavehrad/Papers/Positioning-Zhang.pdf>
- [23]YE, Sheng Kuo a Pat PANNUTO. 2014. *Luxapose: Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <https://web.eecs.umich.edu/~prabal/pubs/papers/kuo14luxapose.pdf>
- [24]DO, Trong-Hop a Myungsik YOO. TDOA-based indoor positioning using visible light. *Photonic Network Communications* [online]. 2014, vol. 27, issue 2, s. 80-88 DOI: 10.1007/s11107-014-0428-4. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6614860
- [25]*OLED Light Panel: User Guide v1.0* [online]. [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: http://www.lgoledlight.com/resources/LG_Chem_OLED_Light_User_Guide.pdf
- [26][HOSTED BY: SCHOOL OF COMPUTING, Engineering and Information Sciences. 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010): Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 21 - 23 July 2010. Piscataway, NJ: IEEE, 2010. ISBN 9781861353696.
- [27]*N6SC30 Technical data sheet* [online]. 2014. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: https://www.maritex.com.pl/media/uploads/PRODUKTY_PDF/opto/OLP-N6SC30.pdf
- [28]*N6SA30 Technical data sheet* [online]. 2014. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.neumueller.com/datenblatt/lg_chem/N6SA30%20Technical%20datasheet.pdf
- [29] *Compact Photodiode Power Head with Silicon Detector* [online]. 2013. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3341&pn=S121C
- [30]Wu, D. - Ghassemlooy, Z. – Zhong, W. - Khalighi, M.A. - Minh, H. L. – Chen, Ch. – Zvanovec, S. - Boucouvalas, A.C., Effect of Optimal Lambertian Order on the Performance of Cellular Indoor Optical Wireless Communications and Positoning, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, submitted...

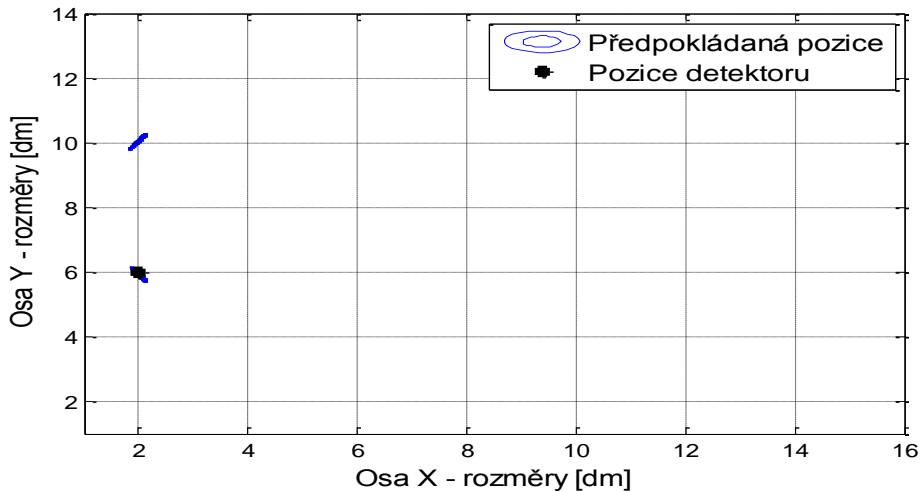
Přílohy:

V této části jsou uvedeny zbylé výsledky určování polohy. Výsledek lokalizace je ohraničený modrou křivkou. Pod grafem jsou vyobrazeny hodnoty udávající přesnost určení polohy.

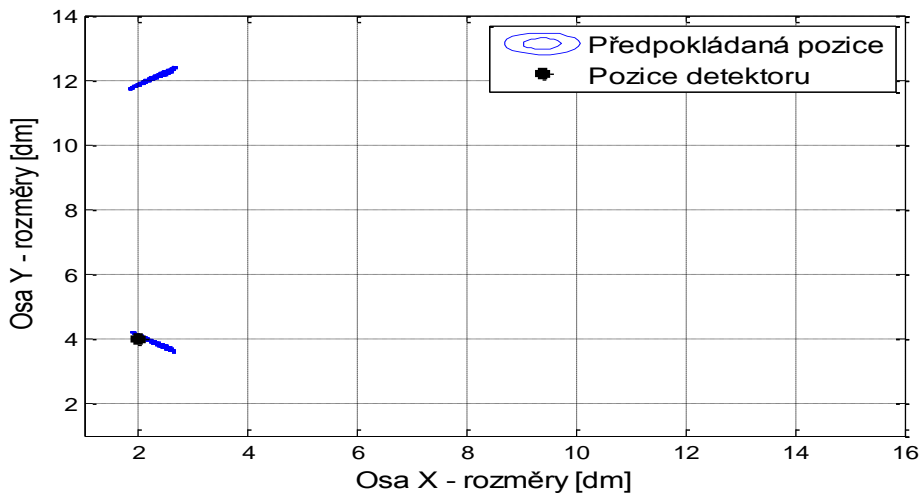




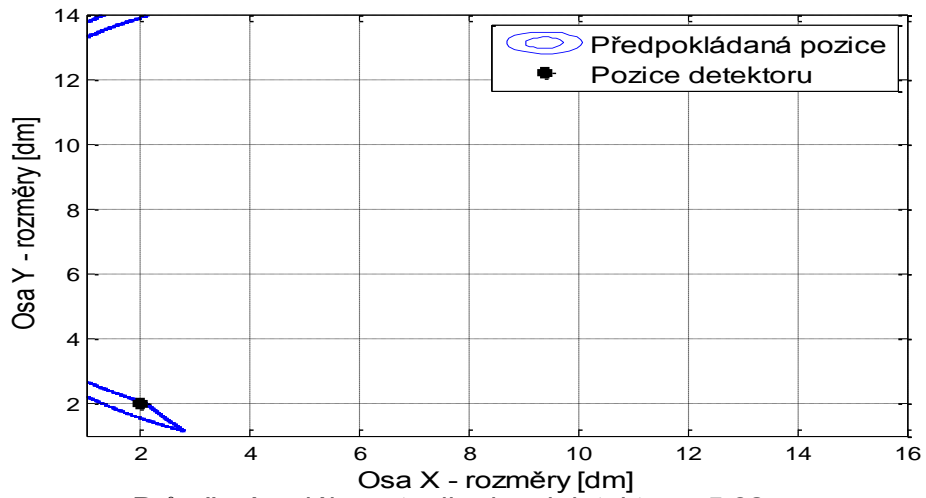
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 8.94 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 5.32 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.23 cm



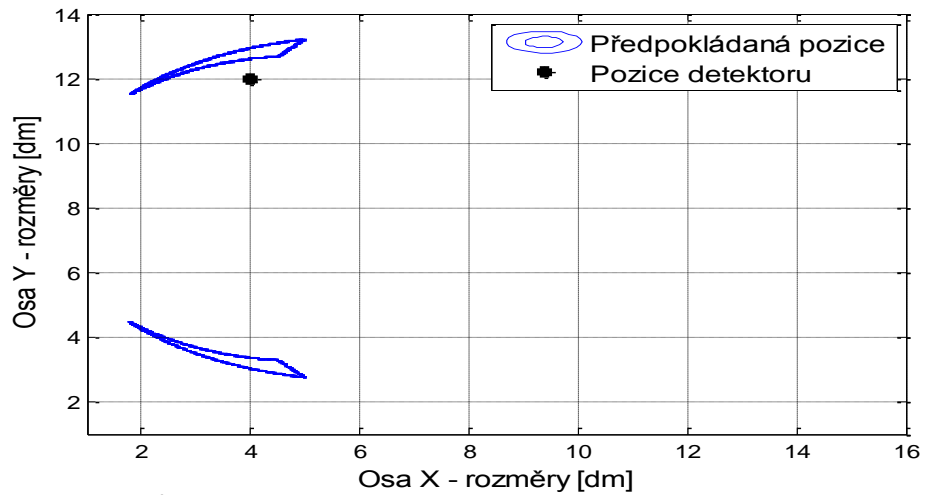
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 1.49 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 0.73 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.34 cm



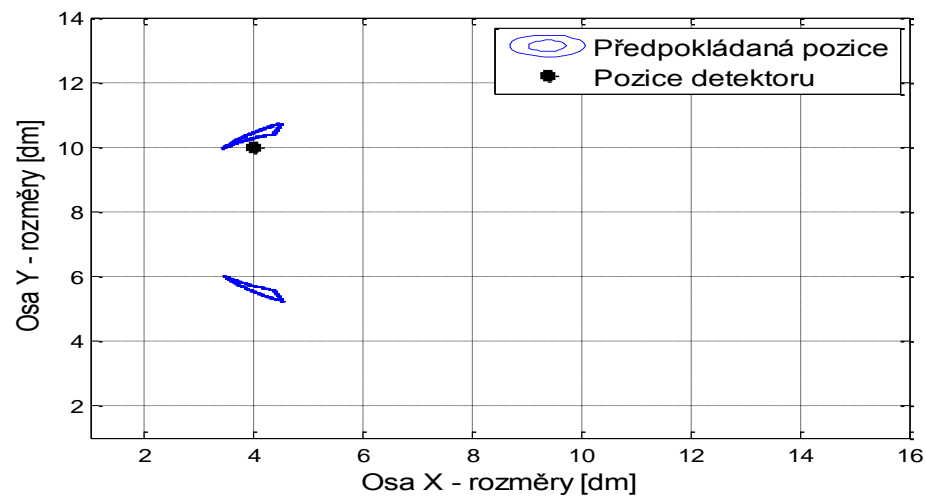
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 4.03 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 1.97 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.68 cm



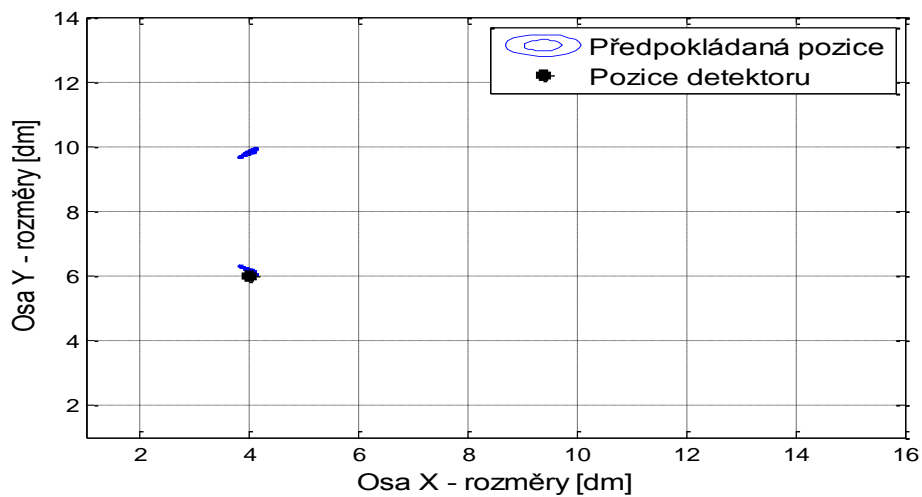
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 5.62 cm
 Směrodatná odchyłka odhadu vzdálenosti od detektoru: 3.00 cm
 CRB- nejnížší směrodatná odchyłka odhadu vzdálenosti od detektoru : 2.35 cm



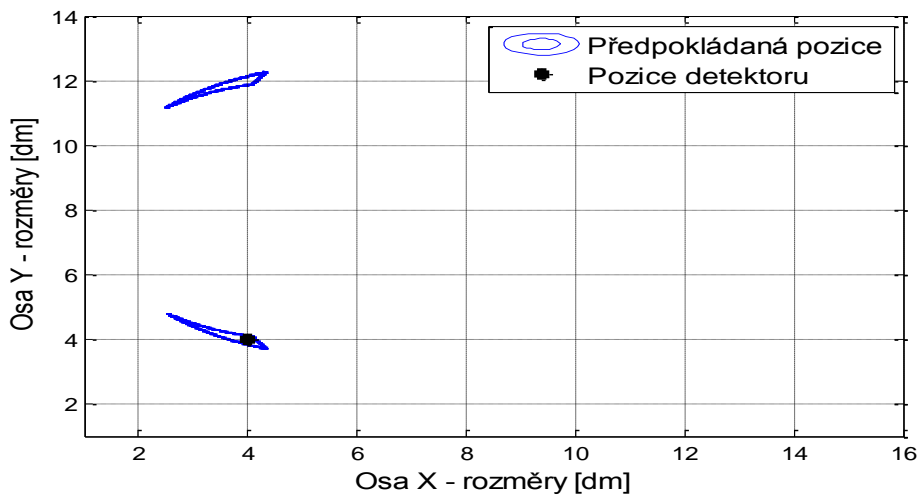
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 10.96 cm
 Směrodatná odchyłka odhadu vzdálenosti od detektoru: 3.06 cm
 CRB- nejnížší směrodatná odchyłka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.34 cm



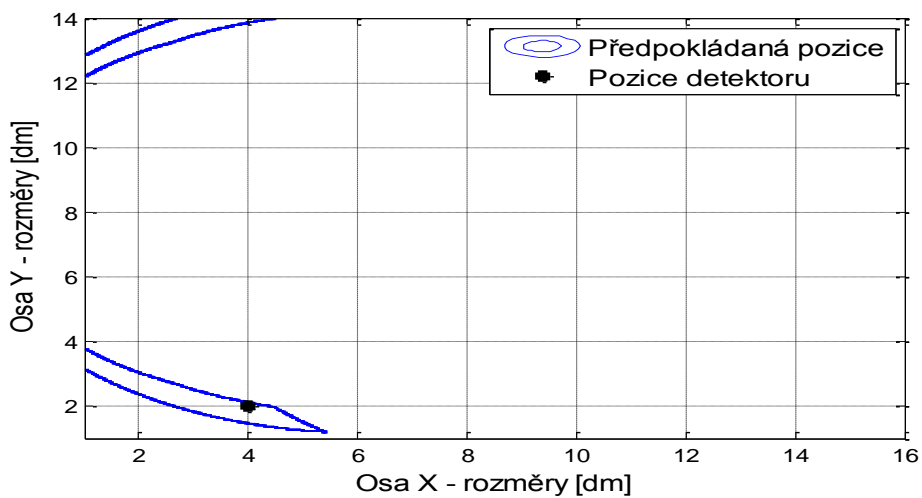
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 5.34 cm
 Směrodatná odchyłka odhadu vzdálenosti od detektoru: 1.55 cm
 CRB- nejnížší směrodatná odchyłka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.05 cm



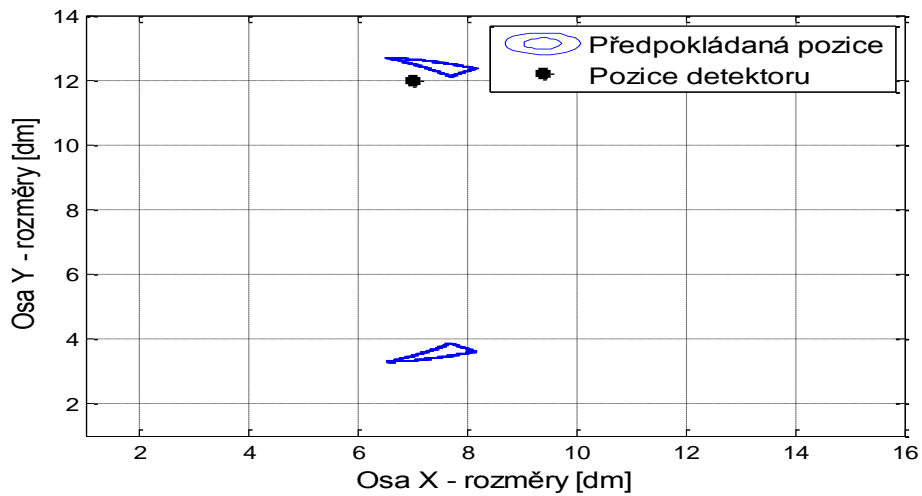
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 2.14 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 0.70 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.05 cm



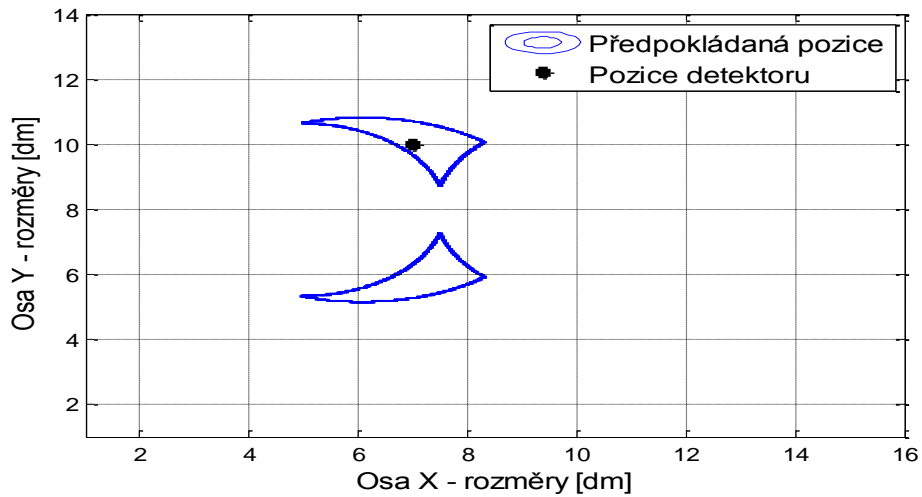
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 5.22 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 4.23 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.34 cm



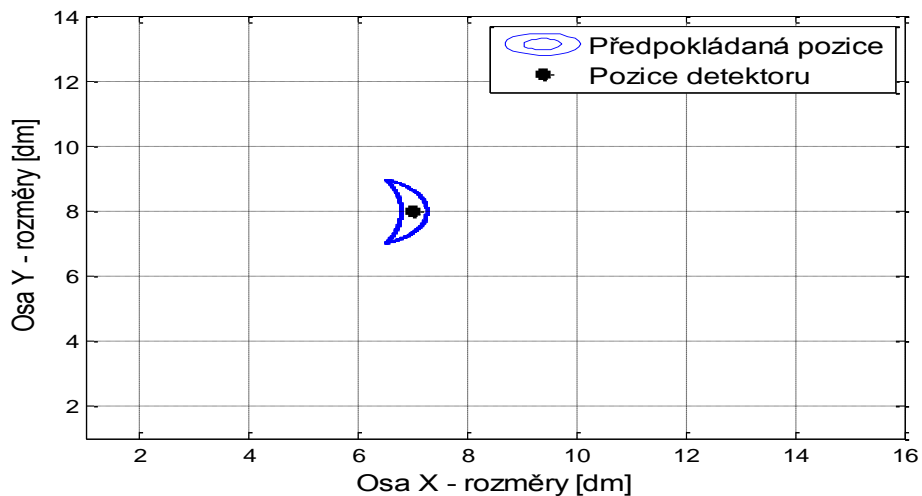
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 14.88 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 9.89 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.92 cm



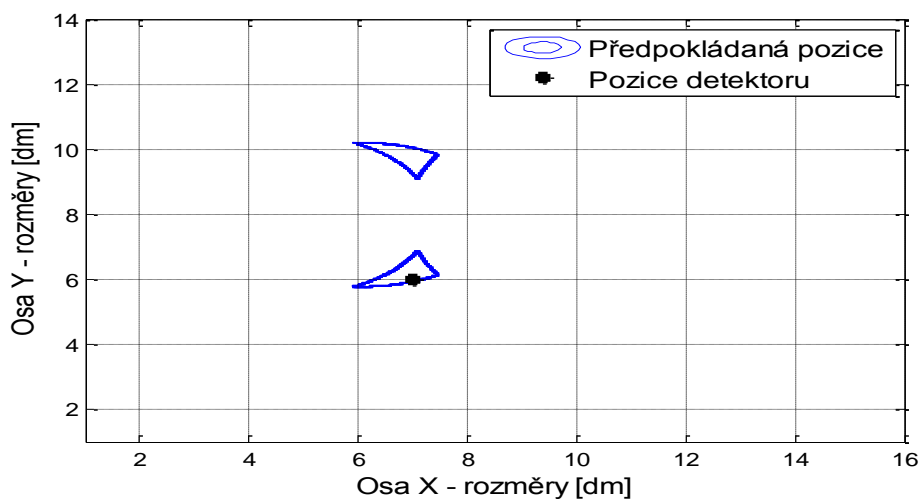
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 7.52 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 1.62 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.19 cm



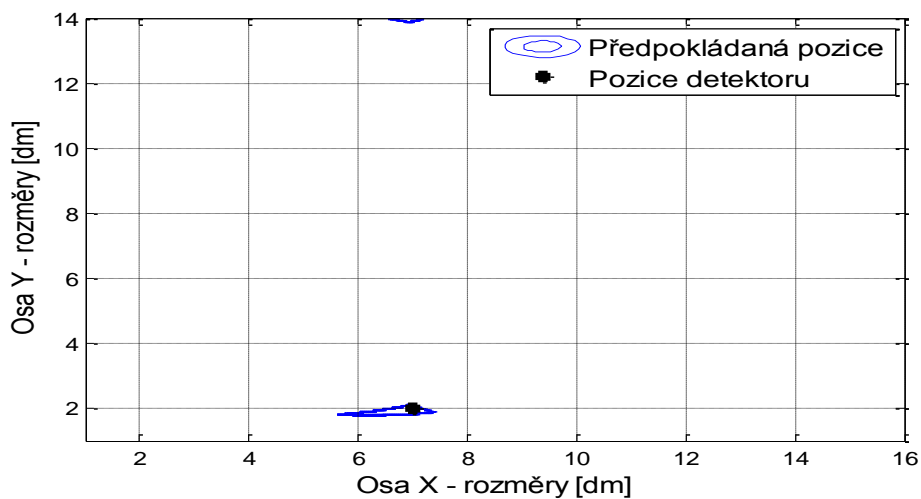
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 7.81 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 4.00 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 0.92 cm



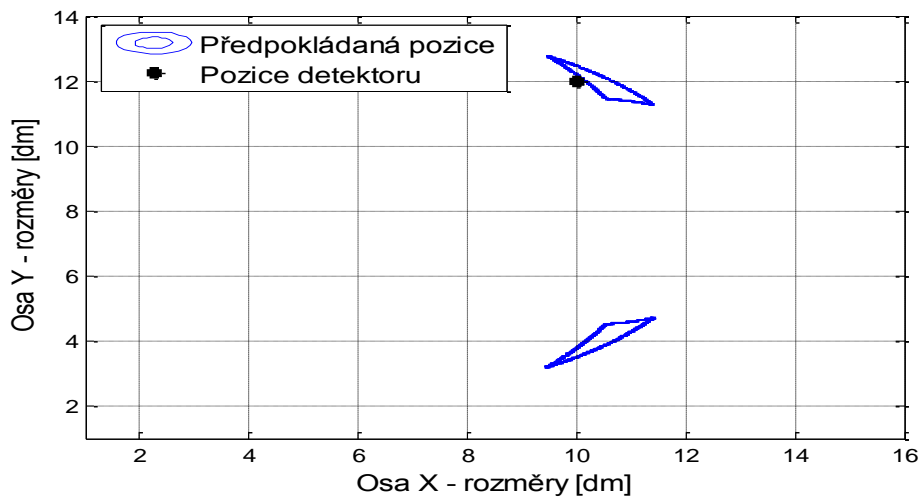
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 4.73 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 2.66 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 0.85 cm



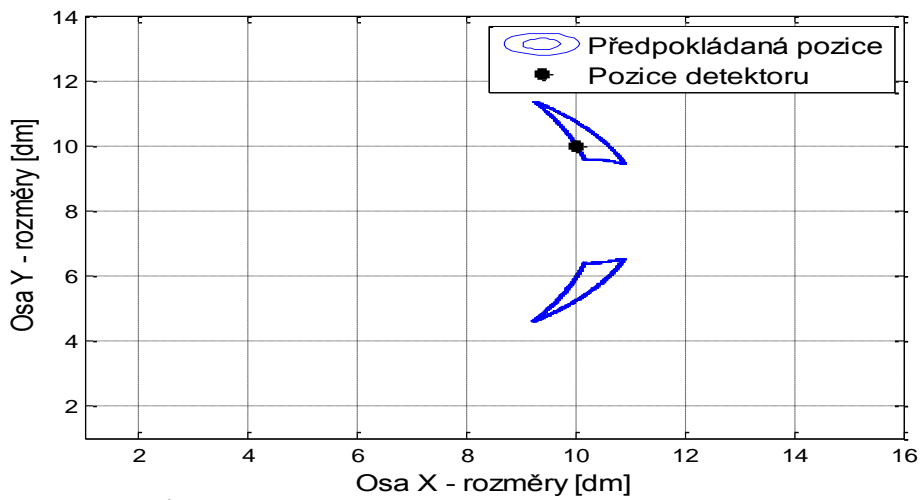
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 4.65 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 2.20 cm
 CRB- nejnížší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 0.92 cm



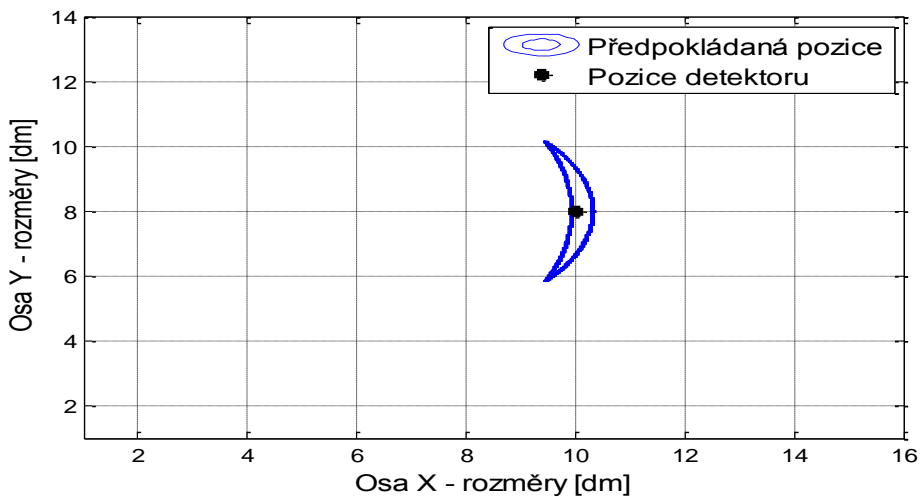
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 4.43 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 3.37 cm
 CRB- nejnížší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.72 cm



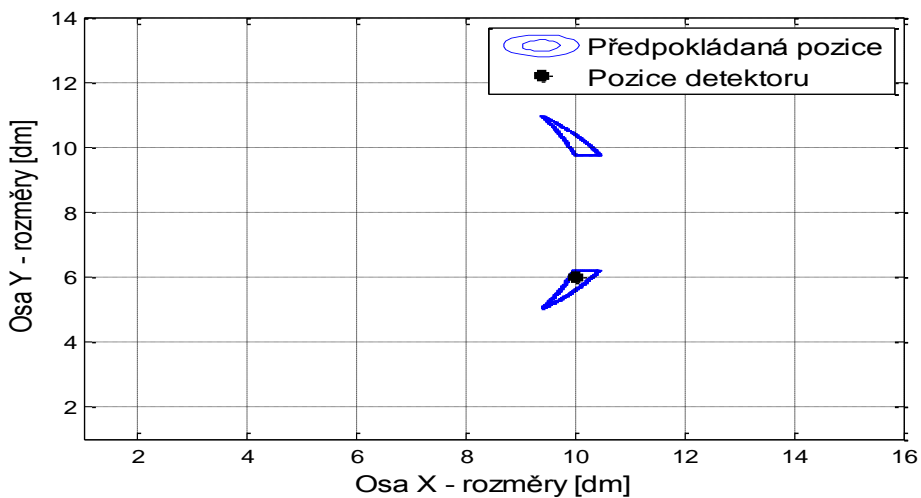
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 6.88 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 3.35 cm
 CRB- nejnížší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.35 cm



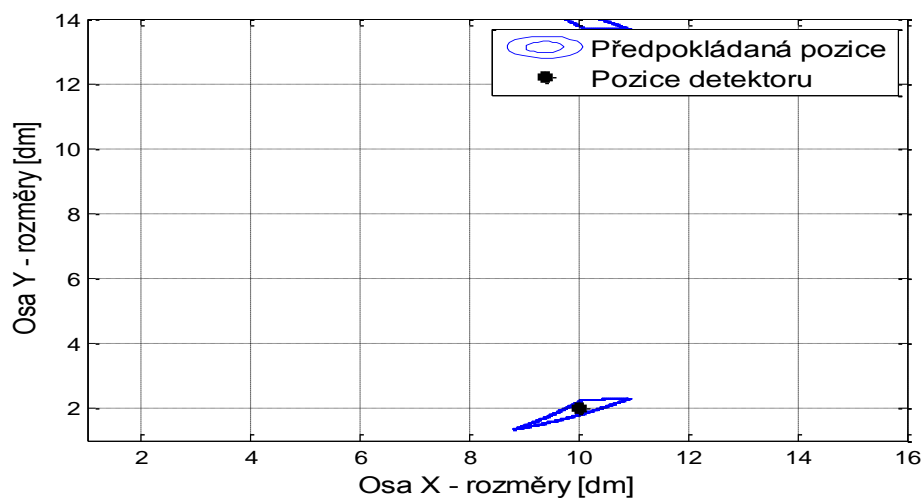
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 5.93 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 3.18 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.06 cm



Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 9.17 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 5.62 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 0.98 cm



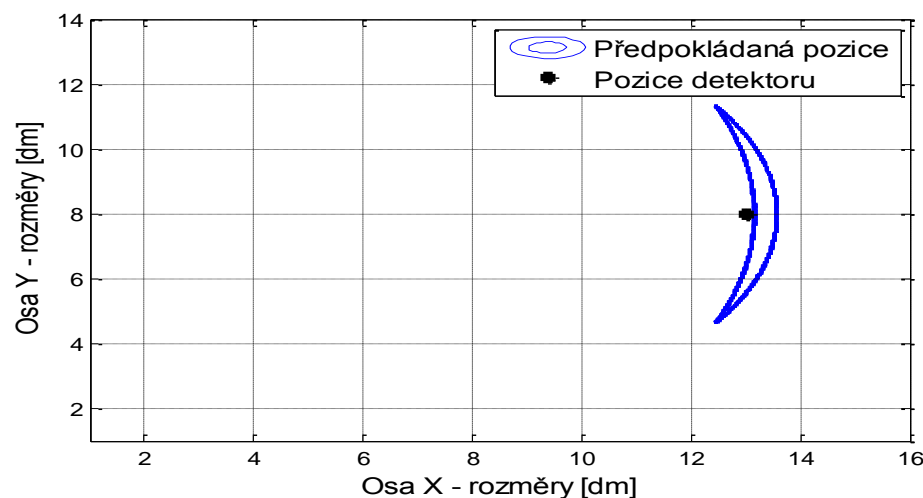
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 3.68 cm
 Směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru: 2.58 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylna odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.06 cm



Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 4.44 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 2.89 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.92 cm



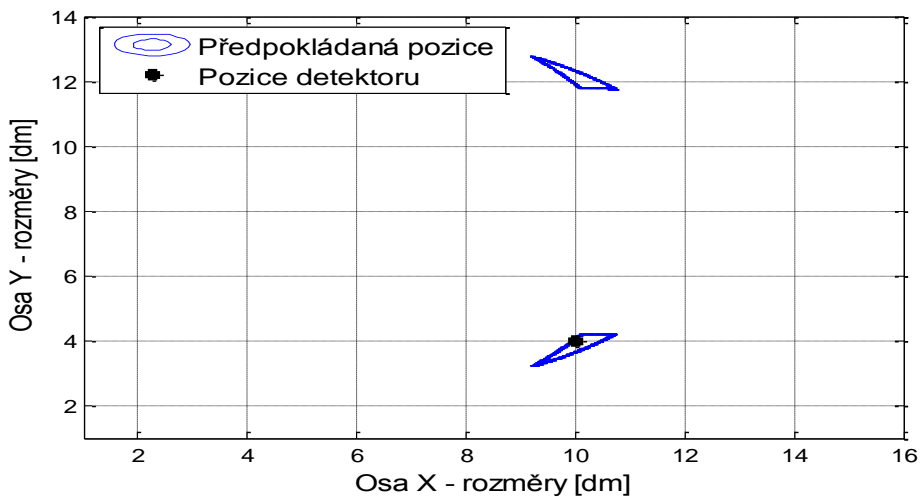
Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 25.68 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 16.09 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.55 cm



Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 14.46 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 8.28 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.44 cm



Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 27.37 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 17.52 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.55 cm



Průměrná vzdálenost odhadu od detektoru: 3.82 cm
 Směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru: 2.34 cm
 CRB- nejnižší směrodatná odchylka odhadu vzdálenosti od detektoru : 1.35 cm