

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Evidenčné číslo: FEI-183415-98288

**TECHNOLÓGIA LIFI
DIPLOMOVÁ PRÁCA**

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Evidenčné číslo: FEI-183415-98288

TECHNOLÓGIA LIFI
DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program:	Multimediálne informačné a komunikačné technológie
Študijný odbor:	Informatika
Školiace pracovisko:	Ústav multimediálnych informačných a komunikačných technológií
Vedúci diplomovej práce:	prof. Ing. Ivan Baroňák, PhD.



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Autor práce:	Bc. Matej Vanek
Študijný program:	multimediálne informačné a komunikačné technológie
Študijný odbor:	informatika
Evidenčné číslo:	FEI-183415-98288
ID študenta:	98288
Vedúci práce:	prof. Ing. Ivan Baroňák, PhD.
Vedúci pracoviska:	doc. Ing. Radoslav Vargic, PhD.
Miesto vypracovania:	Ústav multimediálnych informačných a komunikačných technológií

Názov práce: **Technológia LiFi**

Jazyk, v ktorom sa práca
vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania: Špecifikácia zadania:
1. Naštudujte koncepciu technológie LiFi a technológiu autonómnych vozidiel.
2. Navrhňte model komunikácie V2V a V2C.
3. Navrhňte model prezentujúci výhody a nevýhody z neho vyplývajúce.
4. Diskutujte možné návrhy na obmedzenie nedostatkov tejto technológie.

Rozsah práce: minimálne 2 AH a maximálne 3 AH okrem prípadnej ďalšej technickej dokumentácie

Termín odovzdania práce: 12. 05. 2023

Dátum schválenia zadania
práce: **07. 05. 2023**

Zadanie práce schválil: **prof. Ing. Gregor Rozinaj, PhD.**
garant študijného programu

PodĎakovanie

Rád by som sa poďakoval školiteľovi prof. Ing. Ivanovi Baroňákovi, PhD., za cenné rady a pomoc pri práci na tejto diplomovej práci. Naďalej chcem poďakovať kolegom a priateľom z mojej fakulty menovite: Milan Vrabel', Matej Výboh, Adam Vician, Adam Novotný, Gabriela Böhmer a Martin Drieňovský za každý rozhovor, radu a povzbudenie vďaka ktorým som nie len napísal túto prácu, no aj úspešne napredoval počas celého štúdia. Ďalej v neposlednej rade celej mojej rodine za oporu počas celého štúdia.

ANOTÁCIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

Slovenská technická univerzita v Bratislave
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný odbor: Informatika

Študijný program: Multimediálne Informačné a Komunikačné
Technológie

Autor: Bc. Matej Vanek

Diplomová práca: Technológia LiFi

Vedúci práce: prof. Ing. Ivan Baroňák, PhD.

Mesiac a rok odovzdania:

Kľúčové slová: LiFi, autonómne vozidlá, V2V, V2C, VLC

Diplomová práca sa zaoberá problematikou komunikácie autonómnych vozidiel využívajúcich technológiu LiFi. V analytickej časti práce sú popísané a vysvetlené technológie LiFi a jej podobné VLC technológie ako aj autonómne vozidlá. Sú tu popísané možné typy automobilovej komunikácie a je prebraný aj súčasný stav všetkých týchto technológií vo svete a ich možný vývoj v budúcnosti. V praktickej časti je navrhnutý model komunikácie medzi autami ako aj autom a cloud-om. Popísané sú tu výhody, ale aj nevýhody vyplývajúce z takejto komunikácie. V závere práce sú rozobrané možné návrhy na obmedzenie nedostatkov vyplývajúcich z predošlých bodov.

ABSTRACT OF THE DIPLOMA THESIS

Slovak University of Technology in Bratislava
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION
TECHNOLOGY

Study Programme: Information and Communication Technologies

Author: Bc. Matej Vanek

Master Thesis: LiFi Technology

Supervisor: prof.Ing. Ivan Baroňák, PhD

Submitted: May 2023

Keywords: LiFi, autonomous cars, V2V,V2C,VLC

The diploma thesis deals with the problematics of vehicular communication using LiFi technology. In the analytical portion of this thesis, LiFi and similar VLC technologies are described, as well as autonomous vehicles. Possibilities for vehicular communications are described there, as well as current state in the world of all the technologies mentioned above. In the practical portion, there is a model of such communication between cars and car with cloud. Both positives and negatives of this type of communication are listed and discussed. At the end of this work, there are suggestions on how to limit the shortcomings resulting from previous points.

Obsah

1	Úvod	12
1.1	Motivácia.....	13
2	Terajší stav technológií.....	14
2.1	Automobilové siete	14
2.1.1	Ad-hoc protokoly alebo protokoly riadené topológiou.....	16
2.1.2	Lokalizačné smerovacie protokoly	17
2.1.3	Protokoly založené na klastri	17
2.1.4	Broadcast protokoly	17
2.1.5	Geocast protokoly	17
2.2	Využitie sietí vo svete	18
2.3	Požiadavky na automobil / sieť	18
2.3.1	Automobil	18
2.3.2	Sieť.....	19
3	LiFi	20
3.1	Prenosové médium	21
3.2	Interakcie svetla s atmosférou	22
3.2.1	Molekulová absorpcia.....	23
3.2.2	Rayleighov rozptyl.....	24
3.2.3	Mieho rozptyl.....	25
3.2.4	Atmosférické turbulencie.....	25
3.3	Vysielač a prijímač.....	27
3.3.1	LED ako zdroj svetla	27
3.3.2	Vysielací čip.....	27
3.3.3	Prijímač	28
3.3.4	Transceiver.....	28
3.4	Modulácie.....	29
3.4.1	Modulácia s jedným nosičom (SCM)	29
3.4.2	Modulácie s viacerými nosičmi (MCM).....	29
3.4.3	Farebné modulácie (CSK).....	30
4	Autonómne vozidlá.....	31
4.1	Čo je to autonómne vozidlo	31
4.2	Úrovně autonómnosti	31

4.2.1	Úroveň 0 (Bez automatizácie)	31
4.2.2	Úroveň 1 (Asistencia vodiča).....	32
4.2.3	Úroveň 2 (Čiastočná automatizácia jazdy)	32
4.2.4	Úroveň 3 (Podmienená automatizácia jazdy)	32
4.2.5	Úroveň 4 (Vysoká automatizácia jazdy).....	32
4.2.6	Úroveň 5 (Úplná automatizácia jazdy)	32
5	Automobilové komunikácie	33
5.1	V2V	33
5.2	V2C	34
6	Praktická časť	36
6.1	Použité technológie	36
6.1.1	Virtual Box.....	36
6.1.2	Debian 11, Linux 5, GNOME.....	37
6.1.3	OMNeT++	37
6.1.4	SUMO	38
6.1.5	INET	39
6.1.6	Veins	39
6.1.7	Veins VLC	40
6.2	Postup Riešenia	41
6.2.1	Výber kompatibilných verzií	41
6.2.2	Import mapy.....	42
6.2.3	Mobilita.....	44
6.2.4	Komunikácia	47
6.2.5	Scenár.....	53
6.2.6	Zbieranie a vyhodnotenie výsledkov	58
6.3	Výhody a nevýhody takejto komunikácie.....	60
6.4	Minimalizovanie nevýhod.....	63
7	Záver.....	66
	Zdroje obrázkov	67
	Použitá literatúra	68
	Prílohy.....	72

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický názov	Slovenský názov
IoT	Internet of Things	Internet Vecí
WiFi	Wireless Fidelity	Bezdrôtová vernosť reprodukcie
LiFi	Light Fidelity	Svetelná vernosť reprodukcie
NGN	Next Generation Network	Sieť ďalšej generácie
FCC	Federal Communications Commission	Federálna Komunikačná Komisia
DSRC	Dedicated short-range communication	Komunikácia na krátky dosah
MAC	Media Access Control	Kontrola prístupu k médiám
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Inštitút elektrotechnických a elektronických inžinierov
PHY	Physical	Fyzická
VANET	Vehicular ad hoc network	Decentralizovaná automobilová sieť
MANET	Mobile ad hoc network	Decentralizovaná mobilná sieť
V2V	Vehicle to Vehicle	Vozidlo k vozidlu
V2I	Vehicle to Interface	Vozidlo k infraštruktúre
RSU	Roadside Unit	Jednotka pri ceste
BER	Bit Error Rate	Chyba na bit
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector	Decentralizovaný vektor vzdialenosti na požiadanie
DSR	Dynamic Source Routing	Dynamické smerovanie zdrojov
GPS	Global Positioning System	Globálny systém určovania polohy
CBR	Cluster Based Routing	Smerovanie na základe klastra
ZOR	Zone of Relevance	Zóna relevancie
LED	Light Emitting Diode	Svetelná dióda
V2C	Vehicle to Cloud	Vozidlo do cloud-u
WiGig	Wireless Gigabit Alliance	Bezdrôtová gigabitová aliancia
VLC	Visible Light Communication	Komunikácia vo viditeľnom svetle
PAM	Pulse Amplitude Modulation	Pulzová amplitúdová modulácia

OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing	Ortogonalný multiplex s frekvenčným delením
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor	Komplementárny kov-oxid-polovodič
IM/DD	Intensity modulation and direct detection	Intenzitná modulácia a priama detekcia
APD	Avalanche Photodiode	Avalanche fotodióda
SCM	Single Carrier Modulation	Modulácia s jedným nosičom
MCM	Multi Carrier Modulation	Modulácia s viacerými nosičmi
CSK	Color Shift Keying	Kľúčovanie farebného posunu
OOK	On-Off Keying	Zapnutie a vypnutie kľúčovania
PPM	Pulse-position modulation	Pulzne polohová modulácia
WDM	Wavelength division multiplexing	Multiplexovanie s delením vlnovej dĺžky
MIMO	multiple-input/multiple-output	viacnásobný vstup/výstup
RGB	Red/Green/Blue	Červená/zelená/modrá
OTA	Over the Air	Cez vzduch
OS	Operation System	Operačný systém
UNIX	UNiplexed Information Computing System	UNiplexný informačný počítačový systém
POSIX	Portable Operating System Interface	Rozhranie prenosného operačného systému
FSF	Free Software Foundation	Nadácia voľného softvéru
GNU	GNU's Not Unix	GNU nie je Unix
PHR	PHY1 layer header	Hlavička fyzickej vrstvy
PSDU	PHY1 service data unit	Dátová jednotka fyzickej vrstvy
NED	Network Description language	Sieťový popisný jazyk
DSL	Domain specific language	Špecifický doménový jazyk

Zoznam použitých veličín

Skratka	Veličina	Jednotka
H	Komplexná matica zisku kanála	dB
y	Komplexný prenášaný signál	dBm
n	Aditívny biely gaussovský šum	W/Hz
P_r	Výkon prijatý	W
P_t	Výkon vyslaný	W
G_r	Zisk na vysielacej anténe	dB
G_t	Zisk na prijímacej anténe	dB
R	Vzdialenosť dvoch antén	m
α_e	Extinkčný koeficient	Mol ⁻¹ .cm ⁻¹
α_a	Absorpcia	m ⁻¹
α_R	Rayleighov rozptyl	m ⁻¹
α_M	Mieho rozptyl	m ⁻¹
S	Intenzita molekulárneho prechodu	cm ⁻¹
$g(v - v_0)$	Tvarová funkcia	bezrozmerná
N	Počet molekúl v cm ³	bezrozmerná
P_a	Tlak absorpčného plynu	N.m ⁻²
$I_1(\lambda, t', x)$	Intenzita optického zväzku po prechode trasou o dĺžke	W.m ⁻²
λ	Vlnová dĺžka monochromatického svetla	m
t'	Potenciálne spomalenie šírením	s
φ, \emptyset	Index lomu svetla	bezrozmerná
φ, \emptyset	Sférické uhly polarizovaného svetla	rad
d	Priemer	m
V	Viskozita	m ² .s ⁻²
σ_R	rayleighov diferenciálny rozptylový koeficient	
V	Rýchlosť	m.s ⁻¹

1 Úvod

Každým dňom sa dozvedáme o nových objavoch, o nových vynálezoch, o nových technológiách, ktoré by mali obyčajnému človeku zjednodušiť každodenný život. Od vynálezu automobilu v roku 1885 cez prvý dotykový telefón vynájdený v 1992 (bolo to oveľa skôr – aj keď to neboli Smartfóny) až po najnovšie výdobytky v oblasti umelej inteligencie, človeku sa život každým dňom po malých krôčikoch zjednodušuje (?no dobre?). Prenosové rýchlosti internetového pripojenia sa zvyšujú, IoT je čím ďalej tým viac rozšírenejšie v bežnom živote. Bez smartfónu by sme si už život nevedeli predstaviť. Človek už nemusí pri každodennej doprave do práce vstávať hodinu pred odchodom, aby zakúril a rozohrial auto v zime, vďaka posilňovaču riadenia ho nemusia trápiť početné zákruhy, a ekologická stopa je tiež menšia ako kedykoľvek predtým. Naše technologické pokroky je zreteľne vidieť práve na autách akými jazdíme. Smart autá a autonómne vozidlá sú už v každom meste bežným javom. Čoraz viac zariadení v domácnosti je pripojených do domácej siete a zároveň do internetu, vytvárajúc toky dát skoro všade. V dnešnej dobe tieto zariadenia nekomunikujú len s používateľom, ale aj medzi sebou, a to väčšinou pomocou siete WiFi. Čím rozvinutejšie sú tieto technológie, tým rozvinutejší je aj dopyt po ich vylepšení. Všetko môže byť rýchlejšie, mať väčšiu pamäť a vyžadovať menej pozornosti človeka. Nie vždy na to stačia existujúce technológie, a preto musí ľudstvo neustále vynaliezať novšie a lepšie technológie. Práve nimi sa zaoberá táto diplomová práca. Technológia LiFi je prirodzeným nástupcom terajších komunikačných technológií. Autonómne vozidlá sú prirodzenými nástupcami klasických, človekom riadených vozidiel. Táto práca sa zaoberá technológiou LiFi a to práve ako komunikačný prostriedok v automobilovej doprave. Je to technológia nová, v bežnom živote nepoužívaná, no má veľmi perspektívnu budúcnosť. Nárast autonómnych vozidiel na cestách je nezadržateľný a LiFi ponúka ideálny kompromis medzi väčšími prenosovými rýchlosťami a nárokmi na priebeh samotnej komunikácie. V tejto práci bude čitateľ oboznámený s technológiami vyššie spomínanými, bude mu preložený a vysvetlený model komunikácie medzi autonómnymi vozidlami použitím technológie LiFi. Na záver budú prediskutované výhody aj nevýhody takejto komunikácie a aj návrh na zlepšenie, prípadne úplné potlačenie týchto nevýhod.

1.1 Motivácia

Motiváciu na spracovanie tejto diplomovej práce som mal hneď z niekoľkých zdrojov. Túto prácu by som vedel logicky rozložiť na dva základné smery. LiFi komunikácia a autonómne vozidlá. K LiFi komunikácii som sa dostal na predmete Koncepty, architektúry a Protokoly NGN. Na tento predmet som spracovával semestrálne zadanie na tému komunikácie so svetlom ako prenosovým médiom a táto téma ma veľmi oslovila a zaujala. Síce samotný protokol LiFi je stále len vo vývoji, no siete so svetlom ako prenosovým médiom sú už roky používané v špecifických prípadoch ako napr. v medicíne alebo v armáde. LiFi ponúka vyššie prenosové rýchlosti a nižšiu latenciu ako WiFi a podľa môjho názoru je to logickým krokom napred, ktorý za pár rokov podstúpime všetci, pričom štandard WiFi v bežnom použití pravdepodobne zanikne. Dlhšie som sa pohrával s myšlienkou hlbšieho porozumenia a spracovania tejto technológie na úrovni, ktorú si zasluhuje, nakoľko som plne presvedčený, že ešte v mojom živote to bude bežný štandard v každej domácnosti.

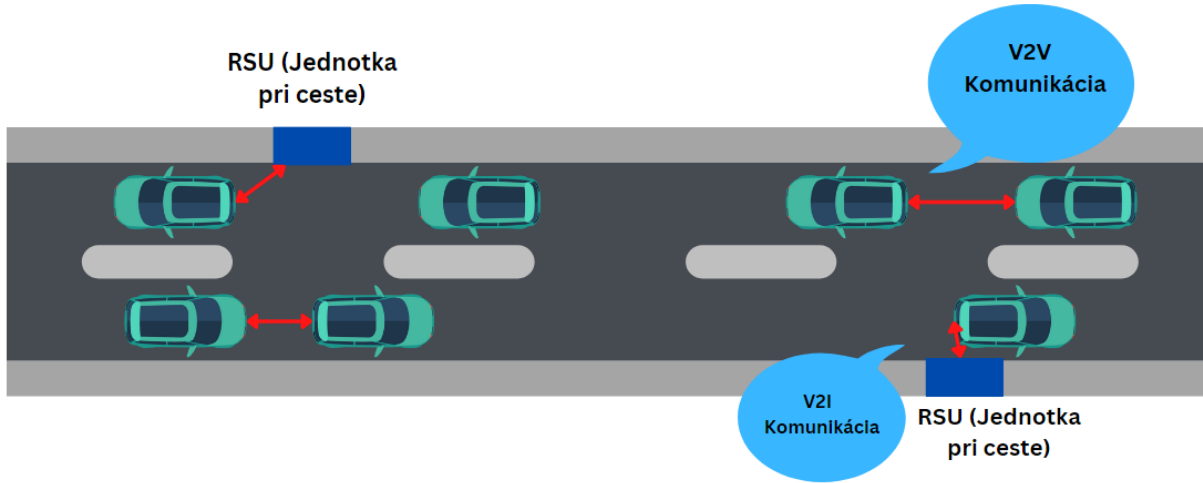
Čo sa týka autonómnych vozidiel, tak rozmach tejto technológie v posledných rokoch rastie exponenciálne. Už pomaly každý piaty automobil je plne elektrický a autonómne vozidlá momentálne existujúce sú všetky s elektrickým pohonom. Dokonca v Arizone už pracuje plne autonómna taxi služba [41]. Už aj na našich cestách je automobil značky Tesla celkom bežným zjavom. Záujem u mňa vzrástol, keď si priateľ kúpil už spomínaný automobil Tesla a boli sme sa previesť. Tesla síce vyžaduje, aby vodič mal ruky na volante, a ak ich tam nemá 30 sekúnd, tak senzory zaparkujú auto. No stále je to plne autonómna jazda. Bol som fascinovaný presnosťou a jemnosťou jazdy. Žiadne prudké zastavovania, žiadne prudké pridanie rýchlosti, aby vozidlo išlo normálnou rýchlosťou. Parkovanie presné „na centimeter“. A dojazd vozidla na jedno nabitie batérie je tiež v dobrom zmysle udivujúci. Vtedy som si uvedomil, že v blízkej budúcnosti budú riadiť vozidlo len tí, ktorých to vyslovene „baví“. Čím viac bude takýchto vozidiel na ceste, tým viac bude nutné, aby vedeli medzi sebou komunikovať a predchádzať dopravným nehodám. Vozidlá takto komunikujúce si vedia posielat' informácie o stave prevádzky a nebezpečenstve na cestách, alebo o dopravných zápchach a predísť tak úrazom a upchaniam ciest. Túto tému som sa rozhodol spracovať, pretože obe technológie ma v nedávnej minulosti zaujali, sú vylepšeniami terajších zaužívaných štandardov a trúfol by som si povedať, že sú našou prirodzenou budúcnosťou.

2 Terajší stav technológií

2.1 Automobilové siete

Automobilové siete nabrali v poslednom desaťročí na pozornosti ako zo strany akademickej, tak aj zo strany výrobcov. V USA Federálna Komunikačná Komisia (FCC) prideliла frekvenčné pásmo 5,850-5,925 GHz ako vyhradené pre komunikáciu na krátky dosah (DSRC) [1]. V Európe neziskové konzorcium pre dohľad nad komunikáciou medzi automobilmi bolo vytvorené európskymi výrobcami automobilov, aby dohliadalo na bezpečnosť systémov a pridružených aplikácií. V roku 2010 boli dokončené a publikované predpisy IEEE 802.11p MAC (Medium Access Control) a PHY (Physical Layer) pre podporu bezdrôtového prenosu v automobilových sieťach. Takýto vývoj viedol k zvýšenej pozornosti smerom k bezpečnej komunikácii, konkrétne výmene paketov pre upozornenie vozidiel na hroziacu kolíziu alebo nebezpečenstvo na ceste. Aby bola komunikácia bezpečná a účinná, je potrebné aby pracovala v reálnom čase. Je potrebné, aby zabezpečenie kompletnej distribúcie správ bolo v rámci veľmi krátkeho času zvyčajne v milisekundách. Jedna oblasť štúdia sa javí veľmi sľubne – konkrétne dopravné siete ad-hoc (VANET) – a očakáva sa, že bude poskytovať rôzne aplikácie. Výsledkom je vynikajúci sieťový výkon, no stále sa vyskytujú aj problémy, a to najmä s prenosovými rýchlosťami.

VANET siete vznikli použitím MANET (Mobile ad hoc network) technológie na pohybujúce sa vozidlá [2]. VANET je skratka pre Vehicular ad hoc Network. Hlavným cieľom siete VANET je vytvorenie a udržanie komunikácie medzi vozidlami na ceste bez použitia bázevej stanice alebo kontroléra. Veľkou výhodou VANET sietí je kritické prenášanie informácií o blížiacom sa mieste nehody alebo nebezpečenstve na ceste bez prídavnej infraštruktúry na ceste. Komunikácia bez využívania prídavnej infraštruktúry vo VANET sieti prenáša všetku zodpovednosť na vozidlá. Každé vozidlo sa stáva súčasťou siete a tiež spravuje a kontroluje komunikáciu na tejto sieti spolu s vlastnou komunikáciou. Automobilové ad-hoc siete sú zodpovedné za komunikáciu medzi pohybujúcimi sa vozidlami v určitom priestore. Vozidlo môže komunikovať s druhým vozidlom priamo, toto sa nazýva Vehicle to Vehicle (V2V) komunikácia. Alebo vozidlo môže komunikovať s infraštruktúrou, ako je jednotka na strane cesty (RSU), takáto komunikácia je známa ako medzi Vehicle to Infrastructure (V2I). Obr. 1 ukazuje typický scenár VANET.



Obr. 1 VANET sieť

Jednou z najzložitejších a najzaujímavejších častí VANET je samotný prenos signálu [3]. Bezdrôtový kanál, ktorým sa signál prenáša je veľmi dynamický, často sa menia objekty nachádzajúce sa v ňom a tým pádom aj veľa nových, neustále sa meniacich signál odrážajúcich plôch. Preto je kladená vysoká priorita na správne modelovanie signálu, čo vo výsledku pomôže správnej rekonštrukcii prijatého signálu. Keďže je vysielaný signál viaccestný, treba kombinovať prijaté signály. Uvažujme, že $y \in \mathbb{C}^{N_r}$ je komplexný prijatý Gaussiansky signál s nulovou odchýlkou a je daný funkciou (2.1).

$$y = Hx + n, \quad (2.1)$$

kde:

$H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ je komplexná matica zisku kanála,

$x \in \mathbb{C}^{N_t}$ je komplexný prenášaný signál a

$n \in \mathbb{C}^{N_t}$ je aditívny biely gaussovský šum.

Aby bola minimalizovaná chybovosť na bit (BER) a zachovaná kvalita služby, jeden z týchto koeficientov musí zmenšovať účinky bezdrôtového kanála. Kvôli tejto problematike vzniklo viacero modelov bezdrôtového kanála, ako napríklad *Free Space Model*, *Nakagami Model* alebo *Log Normal Shadowing Model*. Najviac využívaný je *Free Space Model*, ktorého prenosový rozsah vieme vyrátať Friisovou prenosovou rovnicou (2.2).

$$P_r = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4 \pi R)^2} P_t, \quad (2.2)$$

kde:

P_r a P_t sú výkon prijatý a výkon vyslaný,

G_r a G_t sú zisk na vysielacej a prijímacej anténe,

λ je vlnová dĺžka a

R je vzdialenosť dvoch antén.

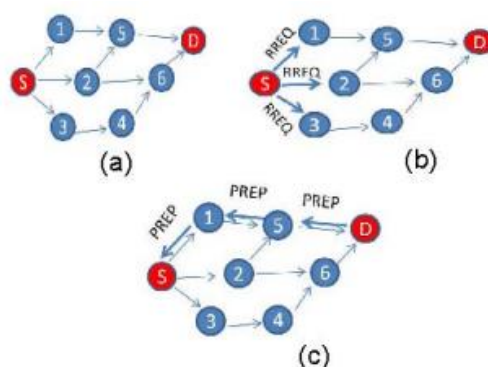
Smerovanie vo VANET predstavuje jeden z najväčších problémov. Väčšina smerovacích protokolov vo VANET je blízko prepojená s topológiou používanou v sieti. Architektúra a výkon sa odchyľujú vždy, keď existuje zmena topológie siete. Protokoly smerovania používané vo VANET sa dajú rozdeliť do piatich kategórií a to :

2.1.1 Ad-hoc protokoly alebo protokoly riadené topológiou

Tento typ smerovania vieme ešte rozdeliť na proaktívne, reaktívne a hybridné [4].

Pri proaktívnom smerovaní uzly (vozidlá), neustále obnovujú svoju smerovaciu tabuľku s novými smermi v ich okolí. Tieto informácie sú neustále vysielané okoliu pomocou HELLO paketov.

Pri reaktívnych smerovaniach ako napr. AODV, DSR, uzly vysielajú informácie len vtedy, keď je to nutné. Hybridné smerovanie je zmes proaktívneho a reaktívneho. Tento prístup však stále kladie zbytočné náklady na zdroje, ako je údržba použitých/nevyužitých trás. Náklady vznikajúce pri reaktívnych protokoloch sú spojené s objavovaním cesty k posielaniu informácií. Proces hľadania cesty sa iniciuje odoslaním určitého typu správy s názvom Route Request (žiadosť o trasu), skratkou RREQ.



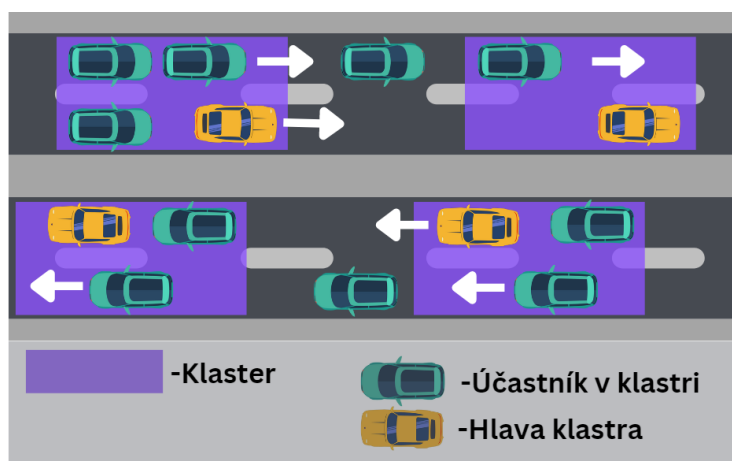
Obr. 2 Hľadanie trasy reaktívnych smerovaní pomocou záplavy(flooding)

2.1.2 Lokalizačné smerovacie protokoly

Pri tomto prístupe sa získavajú informácie o polohe vozidiel zo zdrojov ako Globálny pozičný systém (GPS a iné). Tieto informácie sa zlučujú s tradičnými smerovacími protokolmi ako AODV alebo DSR a výsledky sú lepšie ako pri topologickom smerovaní. Výhodou je aj to, že nie je potreba údržba smerovacích tabuliek a trasu možno vytvoriť kedykoľvek je potrebné.

2.1.3 Protokoly založené na klastri

Hlavnou myšlienkou CBR (Cluster Based Routing) je vytvorenie sieťovej architektúry založenej na malých skupinách vozidiel, tzv. klastrov. V klastri zohráva jedno z vozidiel úlohu hlavy klastra. Veľkosť klastra závisí od návrhu smerovacieho algoritmu, ktorý môže veľkosť rátať na základe počtu vozidiel v zoskupení, alebo podľa geografickej polohy vozidiel.



Obr. 3 Klastrové smerovanie

2.1.4 Broadcast protokoly

Broadcast smerovanie bolo jedným z tradičných smerovacích techník používaných vo VANET. Primárne vysielací prístup sa používa vtedy, keď je potrebné odoslať správu do vozidla a to je mimo dosahu. Pakety sa prenášajú pomocou zaplavovacej techniky. Tým sa zabezpečí doručenie informácií, ale využíva rozsiahle zdroje šírky pásma. Táto zaplavovacia technika sa používa pri mnohých dobre známych protokoloch, hlavne v štádiu objavovania trasy k finálnej destinácii.

2.1.5 Geocast protokoly

Geocast smerovanie je klasifikácia smerovania, ktorá sa zaoberá so šírením informácií v špecifickej oblasti relevantnosti. Od skorého uvedenia VANET, bolo prezentovaných

pomerne veľa prístupov k Geocast smerovaniu. Kľúčovou myšlienkou smerovania Geocastu je zúžiť vyhľadávanie ďalšieho skoku na konkrétnu zónu relevancie (ZOR). Predstava môže vychádzať z možnosti mať mechanizmus, v ktorom, ak sa vozidlo stane účastníkom nehody, bude automaticky hlásiť nehodu blížiacim sa vozidlám v tejto zóne.

2.2 Využitie sietí vo svete

Automobilové siete naberajú na popularite a to vďaka ich mnohým využitiam. Momentálne prebieha veľká štandardizácia v Európe, v USA a Japonsku. Tieto siete idú „ruka v ruke“ s pribúdaním smart vozidiel na ceste. Medzi hlavné využitia týchto sietí patria [5] :

- **elektronické brzdivé svetlá** : Umožňujú spomalenie auta detekciou brzdivých svetiel.
- **radenie**: Umožňuje vozidlám tesne nasledovať vedúce vozidlo bezdrôtovým prijímaním informácií o zrýchlení a radení, čím sa vytvárajú elektronicky spojené „cestné vlaky“.
- **dopravný informačný systém**: Informácie o dianí na ceste pred autom, prekážky, nehody.
- **pohotovostné služby**: Automatizované upozornenia záchranným službám.
- **služby na ceste** : Jedná sa o komfort cestujúcich, ako napr. dostupnosť internetu, streamovacích služieb, upozornenie na zaujímavé udalosti v okolí, najbližšie reštaurácie a hotely, atď.

2.3 Požiadavky na automobil / sieť

2.3.1 Automobil

Aby mohol byť autonómne vozidlo súčasťou premávky, v ktorej komunikácia prebieha pomocou LiFi, musí byť vybavený sadou LiFi prijímačov a vysielačov ako vpredu, tak aj vzadu vozidla. Tieto jednotky môžu byť spojené do jednej a to vysielačo-prijímacej jednotky s názvom Transceiver [6]. V mnohých štátoch sú povinné predné svetlomety aj počas dňa, takže predná časť auta bude takmer nezmenená, no na zadnej časti bude treba umiestniť LED diódu ktorá bude neustále zapnutá aby komunikácia mohla prebiehať aj z tejto strany automobilu.

2.3.2 Sieť

Čo sa týka požiadaviek na cestnú sieť, tak môže nastať problém pri malej, až žiadnej premávke. Napr. ak by sa stala nehoda a v okolí by nebolo žiadne vozidlo, bolo by vhodné mať pri ceste určitú jednotku, ktorej by vozidlo odovzdalo informácie a táto jednotka by ich preposielala ďalej, aby kvôli bezpečnosti vozidlo po nehode nemuselo byť pod prúdom a vysielat' signál. Táto jednotka by potom slúžila ako maják pre autá v oboch smeroch, upozorňujúci na nehodu v jeho blízkosti. Takéto jednotky sa už používajú vo VANET pod názvom „jednotka na strane cesty“, alebo anglicky „road side unit (RSU). Tieto jednotky by mohli byť využívané aj v mestách alebo husto obývaných oblastiach, na prudkých deväťdesiat stupňových zákrutách, kde roh budovy prekáža v šírení svetla. Vo všeobecnosti by bolo treba z ciest odstrániť všetky prekážky, ktoré blokujú prenos svetla, alebo postavenie zrkadiel na „problémové“ pozície, aby svetelné lúče mali odrazový povrch. Aj keď veľmi nepravdepodobné, je taktiež potrebné sa uistiť, že pri ceste nie je žiadny zdroj svetla, ktorý by mohol pôsobiť interferenciu s LiFi. LiFi signál je detekovaný vďaka špecifickým rýchlym zmenám v intenzite, takže je skoro nemožné si ho zameniť s bežným zdrojom svetla, pretože tie svietia s konštantnou intenzitou.

3 LiFi

LiFi je bezdrôtová optická technológia, ktorá na prenos dát využíva LED diódy a svetlo ako prenosové médium. Vieme o LiFi uvažovať ako o WiFi, ktoré používa svetlo namiesto rádiových vln. Svetlo ako prenosové médium prináša niekoľko výhod, ako napr. vyššie prenosové rýchlosti, činnosť s väčšou šírkou pásma a môže sa využívať v oblastiach náchylných na rádiové vlny ako napr. nemocnice alebo lietadlá. Technológiu LiFi v súčasnosti vyvíjajú mnohé organizácie na celom svete. Vďaka tejto technológii žiarovka LED vyžaruje svetelné impulzy, ktoré sú pre ľudské oko nedetekovateľné, a v rámci týchto vyžarovaných impulzov môžu dáta „putovať“ do prijímačov a z prijímačov. Prijímače potom zhromažďujú informácie a interpretujú prenášané údaje. Koncepčne je to podobné dekódovaniu Morseovej abecedy, ale oveľa rýchlejšie – niekoľko miliónkrát za sekundu. Prenosová rýchlosť LiFi môže presiahnuť 100 Gbit/s, čo je 14-krát viac ako WiGig, známa aj ako najrýchlejšia WiFi na svete. LiFi je súčasťou VLC technológií. VLC je skratka pre Visible Light Communications, čo je skupina protokolov pod IEEE 802.15.7 [7].

Technológia LiFi je založená na protokoloch vytvorených pracovnou skupinou IEEE 802. Definuje fyzickú vrstvu (PHY) a vrstvu riadenia prístupu k médiu (MAC) pre VLC/LiFi[8]. MAC vrstva podporuje 3 technológie viacnásobného prístupu: peer-to-peer, hviezdicový model a broadcast. Taktiež spracováva otázky správy fyzickej vrstvy, ako je adresovanie, predchádzanie kolíziám a protokoly potvrdzovania dát. Fyzická vrstva sa delí na 3 typy: PHY I, II, III a využíva kombináciu rôznych modulačných schém.

- **PHY I** : verzia je vyvinutá tak, aby spĺňala požiadavky na nízku rýchlosť prenosu dát od 12 do 267 Kbit/s. Ideálne sa používa na vonkajšie aplikácie.
- **PHY II** : verzia je vyvinutá tak, aby spĺňala požiadavky na strednú rýchlosť prenosu dát od 1,25 Mbit/s do 96 Mbit/s. Ideálne sa používa na vnútorné aplikácie.
- **PHY III** : verzia je vyvinutá tak, aby spĺňala požiadavky na rýchlosť prenosu dát od 12 Mbit/s do 96 Mbit/s. Používa sa v systémoch, v ktorých sa vo veľkej miere používa zdroj farieb založený na RGB a detektoroch.

V nasledujúcej tabuľke sú porovnané základné vlastnosti LiFi technológie voči WiFi technológii [9].

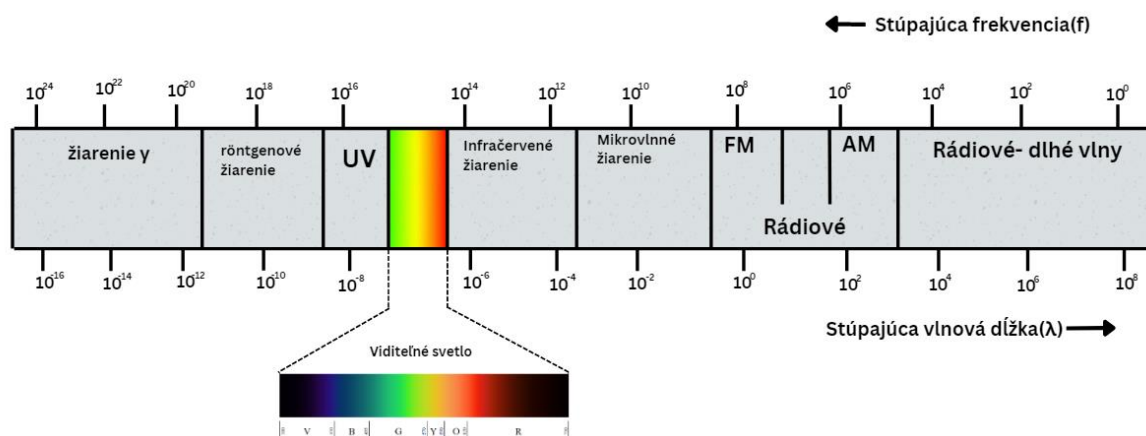
Tab. 1 LiFi voči WiFi

Parameter	Lifi	WiFi
Rýchlosť	do 224 Gb/s	do 1300 Mb/s
Spektrum	10000 širšie než WiFi	úzke
Hustota dát	vysoká	nízka
Bezpečnosť	vysoká, svetlo neprejde cez steny	menej bezpečná kvôli transparentnosti
Spoľahlivosť	stredná	stredná
Šírka pásma	široká vďaka spektru	nízka
Vyslaný/prijatý výkon	vysoký	stredný
Ekologický dopad	nízky	stredný
Konektivita k zariadeniam	vysoká	vysoká
Rušenie prekážkami	vysoké	nízke
Odozva	μ s	ms

3.1 Prenosové médium

Ako je vyššie spomínané, tak prenosové médium pre technológiu LiFi je svetlo.

Svetlo ako také je elektromagnetická vlna. Konkrétne sa jedná o časť svetla ktorú vieme vnímať ľudským okom a nazýva sa viditeľné spektrum. WiFi využíva na činnosť rádiové vlny, ktoré majú dlhšiu vlnovú dĺžku a sú pre človeka nepostrehnuteľné. Viditeľné svetlo má vlnovú dĺžku od 380 nm do 750nm, čo odpovedá frekvenčnému spektru od 430THz do 790THz. Gama žiarenie pochádza z rádioaktívnych elementov, röntgenové žiarenie sa využíva v zdravotníctve, ultrafialové žiarenie je nebezpečné pre ľudí. Infračervené svetlo sa nepoužíva kvôli bezpečnosti ľudských očí, mikrovlnné žiarenia trpia útlmom spôsobeným atmosférickými podmienkami a sú drahé. Rádiové vlny sú tiež ekonomicky náročné (licencie a pod.) , obmedzené a menej bezpečné [10].



Obr. 4 Elektromagnetické spektrum

Keďže sme schopní vnímať viditeľné spektrum, tak je pre človeka úplne neškodné pokiaľ osoba nepozera priamo do intenzívneho zdroja dlhšiu dobu a preto je ním možné bez akýchkoľvek obáv prenášať dáta. Rádiové vlny majú dlhšiu vlnovú dĺžku a nižšiu frekvenciu, kdežto gama žiarenie má kratšiu vlnovú dĺžku a vyššiu frekvenciu. Viditeľné svetlo má však pre prenos a vysielanie vhodnú vlnovú dĺžku a frekvenciu, preto sa berie do úvahy.

3.2 Interakcie svetla s atmosférou

Atmosféra je považovaná za tekutinu, zloženú z plynov a častíc, ktorých chemické a fyzikálne vlastnosti sa menia vplyvom nadmorskej výšky, polohy alebo aj času. Atmosféra sa tým pádom značne mení v závislosti od vyššie spomenutých vlastností, no veľa optických vlastností atmosféry vieme popísať vlastnosťami takzvanej štandardnej atmosféry. Pri každej prenosovej technológii musíme brať v úvahu straty. Šírenie svetla v atmosfére závisí na pôsobení atmosférických javov a na vlastnostiach samotnej atmosféry. Najviac na optický zväzok pôsobí absorpcia, rozptyl a turbulencia [11].

Lineárny prenos monochromatického svetla v atmosfére môže byť približne vyjadrený Beer-Lambertovým zákonom (3.1).

$$I_1(\lambda, t', x) = I_0(\lambda, t, x)e^{\alpha_e(\lambda)x}, \quad (3.1)$$

kde:

$I_1(\lambda, t', x)$ je intenzita optického zväzku po prechode trasou o dĺžke x ,

$\alpha_e(\lambda)$ je extinkčný koeficient(koeficient útlmu),

λ je vlnová dĺžka monochromatického svetla a

Parameter t' vyjadruje potenciálne spomalenie šírením.

Celkový extinkčný koeficient je možno rozpísať, ako súčet koeficientov popisujúcich rôzne javy, ktoré pôsobia tlmenieoptického zväzku. Najviac sa v atmosfére prejavuje Rayleighov rozptyl (nedochádza k zmene vlnovej dĺžky svetla), lineárna absorpcia a Mieho rozptyl. Celkový extinkčný koeficient $\alpha_e(\lambda)$ [m^{-1}] je daný rovnicou (3.2).

$$\alpha_e(\lambda) = \alpha_a(\lambda) + \alpha_R(\lambda) + \alpha_M(\lambda), \quad (3.2)$$

kde:

jednotlivé zložky reprezentujú absorpciu, Rayleighov a Mieho rozptyl.

3.2.1 Molekulová absorpcia

Absorpcia optického žiarenia molekulami v atmosfére súvisí s absorpčnými prechodmi povolenými kvantovými energetickými hladinami v molekule[11]. Energetické hladiny v molekule vieme rozdeliť na elektrónové, vibračné a rotačné. Prechody medzi týmito energetickými hladinami vykonávajú molekuly každá v inej vlnovej dĺžke. Absorpčné prechody medzi elektrónovými hladinami nastávajú v ultrafialovej a viditeľnej spektrálnej oblasti (300 až 700 nm). Prechody medzi vibračnými hladinami nastávajú v blízkej infračervenej (2 až 20 μm), a prechody medzi rotačnými absorpčnými hladinami nastávajú v ďalekej infračervenej až mikrovlnnej oblasti. Tieto tri prechody môžu byť a v praxi aj často bývajú kombinované. Najvýznamnejšie absorpčné čiary molekúl sú rotačno-vibračné a nastávajú v infračervenej oblasti. Celkovú molekulovú absorpciu je možno vyjadriť rovnicou (3.3).

$$\alpha_a(\lambda)N(x, t) = Sg(v - v_0)NP_a, \quad (3.3)$$

kde:

S je intenzita molekulárneho prechodu,

$g(v - v_0)$ je tvarová funkcia,

N je počet molekúl v cm^3 pri tlaku 1 atm a

P_a je tlak absorpčného plynu.

Absorpcia je závislá na vlnovej dĺžke svetla. Keďže poznáme rôzne absorpcie, tak pozdĺž spektra vznikajú atmosférické okná v ktorých je absorpcia malá, takže sa využívajú k prenosu signálu. Tieto atmosférické okná poznáme pod názvom prenosové okná.

3.2.2 Rayleighov rozptyl

Rayleighov rozptyl je elastický, to znamená, že pri ňom nedochádza k posunu vlnovej dĺžky dopadajúceho svetla [11]. Rayleighov rozptyl vzniká v dôsledku posunu slabo viazaných elektrónových oblakov, ktoré obklopujú molekuly plynu, ktorý je ovplyvnený dopadajúcim elektromagnetickým (optickým) poľom. Tento rozptyl vzniká v prípade, že dopadajúci lúč má oveľa väčšiu vlnovú dĺžku ako je priemer častíc, na ktoré dopadá. Z toho logicky vyplýva že Rayleighov rozptyl vzniká na molekulách. Tento rozptyl spôsobuje, že farba oblohy je modrá cez deň, no pri východe alebo západe slnka je červená. Rayleighov diferenciálny rozptylový koeficient je daný vzťahom (3.4).

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega} = \left[\frac{\pi^2(n^2-1)^2}{N^2\lambda^2} \right] [\cos^2\varphi \cos^2\varnothing + \sin^2\varphi], \quad (3.4)$$

kde:

n je index lomu atmosféry,

N je hustota molekúl,

λ je vlnová dĺžka optického žiarenia a

φ a \varnothing sú sférické uhly polarizovaného svetla.

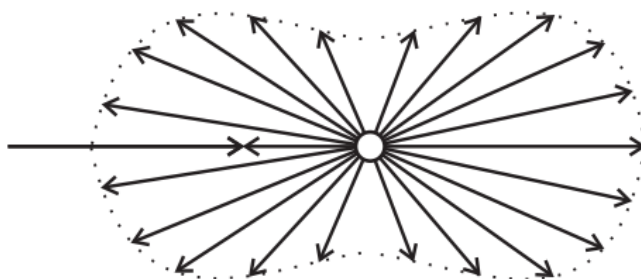
Z rovnice (3.4) vyplýva že svetlo s kratšou vlnovou dĺžkou (modré) je viac rozptýlené ako svetlo s dlhšou vlnovou dĺžkou (červené / žlté). Rayleighov rozptyl je potom daný finálnym vzťahom (3.5)

$$\alpha_R(\lambda)N(x, t) = N\sigma_R \quad (3.5)$$

kde:

σ_R je rayleighov diferenciálny rozptylový koeficient a

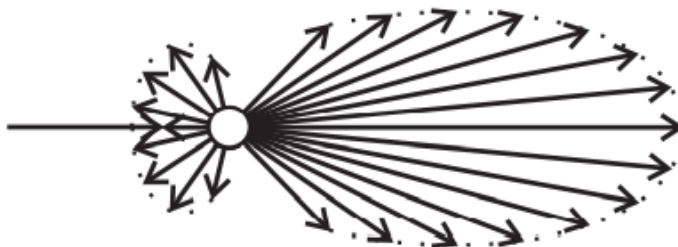
N je hustota molekúl.



Obr. 5 Rayleighov rozptyl [1]

3.2.3 Mieho rozptyl

Mieho rozptyl je veľmi podobný s Rayleighovým rozptylom. Takisto ako Rayleighov aj Mieho rozptyl je elastický [11]. Jediný rozdiel medzi nimi spočíva vo veľkosti molekúl a vlnových dĺžok svetla ktoré na tieto molekuly dopadá. Pri Rayleighovom rozptyle je vlnová dĺžka dopadajúceho svetla oveľa väčšia ako priemer molekuly, no pri Mieho rozptyle je vlnová dĺžka porovnateľná s priemerom molekuly. Mieho rozptyl je spôsobovaný jemnými časticami v atmosfére a aerosólmi.



Obr. 6 Mieho rozptyl [1]

3.2.4 Atmosférické turbulencie

Prúdenie v atmosfére vzniká kvôli termálnym zmenám a nestálej rýchlosti vzduchu. Prúdenie plynov v atmosfére vychádza z prúdenia kvapalín, a preto sa delia tak isto ako kvapaliny na turbulentné a laminárne prúdenie. O tom, či je prúdenie laminárne alebo turbulentné rozhoduje takzvané Reynoldsovo číslo (3.6)

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (3.6)$$

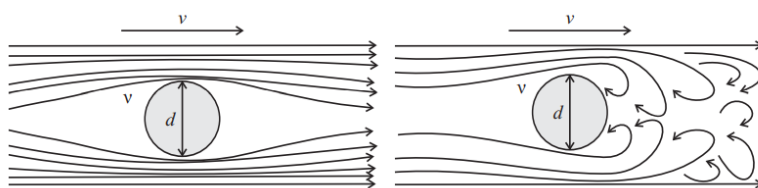
kde:

d je priemer otvoru alebo vstupu cez ktorý lúč prúdi [m^2],

v je rýchlosť ktorou vzduch prúdi [$m \cdot s^{-1}$] a

V je viskozita vzduchu [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Toto Reynoldsovo číslo je používané iba približne, pretože hodnoty sa môžu líšiť v závislosti od tlaku alebo teploty, prípadne nadmorskej výšky. Približne ale platí že ak $Re < 2300$, tak sa jedná o laminárne prúdenie a ak $Re > 4000$, tak sa jedná o turbulentné prúdenie.



Obr. 7 Laminárne a Turbulentné prúdenie [1]

Turbulentné prúdenie spôsobuje chaotické, nepredvídané zmeny teploty, rýchlosti a iných vlastností atmosféry. Tým pádom sa neustále mení atmosféra a takisto sa musí meniť aj index lomu. Optický zväzok, ktorý je vystavený takýmto nepredvídateľným podmienkam je negatívne ovplyvňovaný a dochádza k fluktuácii intenzity alebo k zmenám smeru lúča.

Laminárne prúdenie sa vyskytuje pri kvapalinách s vysokou viskozitou a nízkou rýchlosťou, pri tomto type sa toky nemiešajú ale zostávajú rovnobežné v smere šírenia.

Poznáme dva hlavné prípady turbulencie a to:

- **termická turbulencia:** vzniká pri zemskom povrchu, kde sa vzduch ohrieva, následne stúpa vyššie a tak prispieva k fluktuácii indexu lomu atmosféry,
- **mechanická turbulencia:** vzniká prúdením vzduchu medzi prekážkami ako napríklad výškové budovy, stromy.

Pri strete optického lúča s turbulenciou v atmosfére samozrejme záleží aj na veľkosti samotnej turbulencie. Pokiaľ je veľkosť turbulencie väčšia ako polovička šírky optického zväzku, prichádza k odkloneniu zväzku. Ak je veľkosť turbulencie porovnateľná s šírkou optického zväzku, tak sa smer nezmení, len sa jemne zväčší uhol putovania a ak je turbulencia menšia ako je šírka zväzku, dochádza k rozptylu.

3.3 Vysielač a prijímač

3.3.1 LED ako zdroj svetla

Pri komunikácii využívajúcej svetlo ako prenosové médium je potrebné si správne vybrať zdroj svetla. Najdôležitejšou požiadavkou na zdroj svetla pri LiFi je možnosť opakovane vypínať a zapínať svetelný zdroj v krátkych intervaloch [12]. Na výber je viacero možností ako napr. laser, fluorescenčné žiarovky alebo LED diódy. LED diódy majú oproti zvyšným svetelným zdrojom výhody a to najmä dlhšiu životnosť, lepší výkon, vyššiu účinnosť, no v neposlednom rade je aj ich výroba šetrnejšia k životnému prostrediu. LED diódy vyžarujú svetlo keď v ich polovodičovej dióde nastane zmena úrovne energie. Táto zmena generuje fotóny, ktoré sú vysielané a interpretované ako signál. Vlnová dĺžka tohto svetla koreluje s rozdielom energetických hladín a aj od typu polovodiča použitého na vytvorenie tejto LED diódy. LED dióda je odolná voči otrasom, poškodeniu častým vypínaním a zapínaním a jej životnosť zvyčajne presahuje 10 000 hodín. V LiFi technológii sú veľmi dôležité rozdiely v rýchlosti prenosu dát. Rôzne rýchlosti prenosu dát sa dajú dosiahnuť pomocou LED diód rôznych veľkostí. LED žiarovky bežnej veľkosti môžu byť zmenšené na mikro-LED, ktoré zvládajú milióny zmien intenzity svetla v priebehu jednej sekundy. Mikro-LED žiarovka môže prenášať 3,5 Gbit/s a je možné dosiahnuť prenosovú rýchlosť dát viac ako 10 Gbit/s. Mikro-LED žiarovky umožňujú paralelné vysielanie svetelného toku, čím prenášajú obrovské množstvo dát v Gbit/s.

3.3.2 Vysielací čip

Bežné čipy ktoré podporujú PAM a OFDM moduláciu majú integrovanú jednotku na prevod signálu z digitálneho na analógový [7]. Takéto čipy dokážu dodávať prúd len 30 mA, čo je nedostačujúce pre LED diódy. V roku 2015 bol vytvorený zosilňovač na báze CMOS technológie, ktorý pridáva potrebný prúd. Tento špecifický obvod navyšuje prúd až na 225 mA, a preto je možné napájať aj LED diódy. Digitálne analógový prevodník má dve vetvy, na ktorých môže pracovať. Ak použijeme obe, tak je možné napájať až dve LED diódy na jeden prevodník za predpokladu, že každá svieti alebo preklikáva inou farbou. Toto zdvojnásobuje efektivitu aj počet možných vysielaných signálov. Najmodernejšie čipy majú štyri rozdielne kanály ovládača a každý kanál je schopný riadiť dve LED diódy pri využití oboch vetiev prevodníka. Toto umožňuje CSK moduláciu, nastavenie farby a teploty osvetlenia a využitie MIMO technológie.

3.3.3 Prijímač

Ako prijímač pre LiFi signály sa používa fotodióda [7]. Fotodióda sa občas nazýva aj fotosenzor a je to zariadenie, ktoré je schopné zaznamenať a zmeniť energiu svetelného fotónu na elektrický signál. LiFi systém pracuje na báze modulácie intenzity a priamej detekcie (IM/DD). Kvôli tejto vlastnosti je výkon vysielaného signálu rovný jeho amplitúde a elektrická strata výkonu signálu prenosom je dvojnásobná oproti optickej. Preto pre LiFi systémy chceme čo najcitlivejšie fotodiódy. V praxi sa používajú APD (avalanche photodiode). LiFi prijímací čip sa skladá zo 49 takýchto APD, usporiadaných v 7x7 detekčnom poli, pričom jedno APD má rozmery 200 μm x 200 μm .

00	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41
42	43	44	45	46	47	48

Obr.8 Rozloženie APD v fotodióde

3.3.4 Transceiver

Transceiver je blok, ktorý pracuje ako vysielateľ a prijímač zároveň. Tento transceiver sa skladá z LED diódy na vysielanie svetla a fotodiódy na prijímanie svetla [13]. Zosilňovač je zabudovaný na posilnenie výkonu svetla prijatého z fotodiódy. Modem sa používa na moduláciu a demoduláciu signálu. Signál, ktorý prichádza z fotodiódy, je analógový a v modeme sa konvertuje na digitálny. Zatiaľ čo signál, ktorý je pripravený na vysielanie sa v modeme premení na analógový signál a odošle sa LED. Ovládač pred LED pracuje na riadenie prúdu LED, aby sa dosiahlo blikanie. Blikanie je funkciou LED na prenos údajov, ak je LED zapnutá, potom vysielá digitálnu "1". Ak je vypnutá, prenáša digitálnu "0".

3.4 Modulácie

Modulácia v LiFi signáloch sa používa na riadenie blikania LED diódy pri rôznych frekvenciách, ktoré obsahujú prenášané dáta. Táto frekvencia blikania spolu s intenzitou tohto blikajúceho svetla závisí čisto na správe, ktorú chceme odoslať. Modulačné techniky pokračujú v modulácii a vysielaní signálu aj v prípade, že intenzita svetla nie je dostupná. Ako je vyššie uvádzané, tak LiFi pracuje na systéme IM/DD, a preto by tieto modulačné techniky mali najprv spĺňať požiadavky predtým, ako budú nasadené na LiFi. Napr., modulačné techniky by mali podporovať tlmené osvetlenie, aby bola komunikácia stále dostupná. Keď je osvetlenie, nie je potrebná. V LiFi sa používajú tri typy modulácie a to modulácia s jedným nosičom (SCM), modulácie s viacerými nosičmi (MCM) a Farebné modulácie (CSK) [14].

3.4.1 Modulácia s jedným nosičom (SCM)

SCM modulácie sú také, v ktorých je možno prijať hocikaký počet signálov, no každý je modulovaný zvlášť vo vlastnej frekvencii. SCM sú viac použiteľné pre aplikácie s malými dátovými tokmi. Pre LiFi sa používajú 3 SCM modulácie a to ON-OFF keying (OOK), pulzne-amplitúdová modulácia (PAM) a pulzne-pozíčná modulácia (PPM)[15].

- **on-off keying (OOK):** pri OOK modulácii dáta sú reprezentované stavmi LED diódy. Ak je dióda zhasnutá tak to predstavuje hodnotu 0 a ak je zapnutá tak to predstavuje 1. Tieto dáta sú potom prenášané blikaním LED diódy.
- **pulzne-amplitúdová modulácia(PAM):** pri tejto modulácii sú dáta uložené v amplitúde neustále prenášaných signálových bliknutí.
- **pulzne-pozíčná modulácia(PPM):** v PPM modulácii amplitúda a šírka signálu sa nemení a pozícia pulzu sa mení podľa referenčného pulzu vstupného signálu. PPM je výkonovo efektívnejšia ako OOK

3.4.2 Modulácie s viacerými nosičmi (MCM)

OOK, PAM a PPM nie sú usposobené pre vysoký dátový tok, takže pri LiFi sieťach tieto modulácie často majú problémy. Signifikantnejšie z týchto problémov sú nelineárne skreslenie alebo vnútorné interferencie symbolov. Pre tieto dôvody sú modulácie s viacerými nosičmi populárnejšie a častejšie využívané. Ďalej aj efektívnejšie pracujú so šírkou pásma. Najpoužívannejšie MCM modulácie sú ortogonálny multiplex s frekvenčným delením(OFDM), multiplexovanie s delením vlnovej dĺžky (WDM) a technika viacerých vstupov a výstupov (MIMO) [15].

- **ortogonálny multiplex s frekvenčným delením (OFDM):** OFDM je založený na rýchlej fourierovej transformácii. Dátový tok v OFDM je prenášaný pomocou pomocných ortogonálnych nosičov.
- **multiplexovanie s delením vlnovej dĺžky (WDM):** pri WDM je signál multiplexovaný pomocou vlnovej dĺžky, čo umožňuje poslať viacero vlnových dĺžok naraz.
- **technika viacerých vstupov a výstupov (MIMO):** MIMO využíva viaccestnú propagáciu použitím viacerých výstupov a viacerých vstupov. Je to protokol ktorý sa využíva skoro v každej bezdrôtovej komunikácii.

3.4.3 Farebné modulácie (CSK)

Používa sa, ak systém používa LED diódy typu RGB na osvetlenie a prenos signálu. Kombináciou rôznych farieb svetla môžu byť výstupné údaje prenášané len samotnou farbou a teda intenzita výstupu môže byť takmer nemenná, nakoľko kombinácií farieb je dostatočne veľa. Miešaním primárnych farieb RGB, to jest R-červená (red), G-zelená (green), B-modrá (blue) sú vytvárané rôzne farby, ktoré sú kódované ako informačné bity. Nevýhodou je, že sa značne zvyšuje zložitosť vysielateľov a prijímateľov [16].

4 Autonómne vozidlá

4.1 Čo je to autonómne vozidlo

Autonómne vozidlo je vozidlo, ktoré je schopné skenovať a vyhodnocovať svoje okolie a pracovať bez zasahovania vodiča. Pasažier nemusí nikdy prevziať kontrolu nad vozidlom alebo zasahovať do riadenia, dokonca pasažier nemusí byť ani prítomný vo vozidle. Autonómne vozidlo má všetky vlastnosti klasického vozidla, no nevyžaduje vodiča. Dôležité je si uvedomiť, že pojem vozidlo sa nevzťahuje výlučne na automobily. V súčasnej dobe sa výskum autonómnych vozidiel zameriava najmä na autá, no môžu to byť takisto aj motorky, bicykle, autobusy a rôzne iné [17]. Naďalej sa ale bude pod pojmom vozidlo pre zjednodušenie myslieť auto. Naďalej je nutné si uvedomiť, že každé autonómne vozidlo musí spĺňať všetky zákonom dané nariadenia o cestnej premávke. Tieto nariadenia sa samozrejme líšia od štátu k štátu, takže to znamená že autonómne vozidlo, ktoré môže jazdiť napr. v USA, nebude automaticky povolené pre používanie v EU a naopak.



Obr. 9 Autonómne vozidlo [2]

4.2 Úrovně autonómnosti

Medzinárodná spoločnosť automobilových inžinierov (SAE) definuje 6 úrovní automatizácie jazdy od 0 (plne manuálna jazda), až po 5 (plne autonómna jazda). Tieto úrovne boli schválené a prijaté americkým ministerstvom dopravy [18].

4.2.1 Úroveň 0 (Bez automatizácie)

Väčšina vozidiel v súčasnosti na cestách je na úrovni 0: ručne ovládané. Vodič zabezpečuje kontrolu nad vozidlom, no môžu existovať pomocné systémy pre vozidlo. Jedným z takýchto pomocných systémov môže byť systém núdzového brzdenia – keďže technicky „nepoháňa“ vozidlo, nie je považovaný za automatizáciu.

4.2.2 Úroveň 1 (Asistencia vodiča)

Ide o najnižšiu úroveň automatizácie. Vozidlo využíva jeden automatizovaný systém na asistenciu vodiča, napr. na riadenie alebo zrýchľovanie (tempomat). Adaptívny tempomat, pri ktorom sa vozidlo môže udržiavať v bezpečnej vzdialenosti za nasledujúcim vozidlom, sa zaraďuje do úrovne 1, pretože človek - vodič kontroluje zvyšné aspekty jazdy, ako napr. udržiavanie sa v pruhu alebo predbiehanie.

4.2.3 Úroveň 2 (Čiastočná automatizácia jazdy)

Pri tejto úrovni je vozidlo vybavené pokročilými asistenčnými systémami. Vozidlo dokáže, zatáčať, držať sa v prúde a aj riadiť zrýchľovanie/spomaľovanie. V tomto prípade automatizácia nie je na úrovni samostatnej jazdy, nakoľko na mieste vodiča musí sedieť vodič a dokáže kedykoľvek prevziať kontrolu nad vozidlom. Príkladom úrovne 2 sú systémy Tesla Autopilot alebo Cadillac Super Cruise.

4.2.4 Úroveň 3 (Podmienená automatizácia jazdy)

Rozdiel medzi úrovňami 2 a 3 je z technického hľadiska značný, no z pohľadu ľudského je takmer zanedbateľný. Rozdiel je v tom, že autá tretej úrovne majú systémy detekcie prostredia a to im umožňuje napríklad predbehnúť pomalé vozidlo pred nimi. Stále ale je potrebný vodič v prípade, že systém zlyhá. V roku 2022 bolo na Európsky trh uvedené prvé vozidlo s takouto funkčnosťou a to Audi A8L. V Spojených štátoch sa zmenili zákony o autonómnych vozidlách, takže v USA je na trhu bez tejto funkcionality a je považované za úroveň 2.

4.2.5 Úroveň 4 (Vysoká automatizácia jazdy)

Rozdiel medzi automatizáciou úrovne 3 a úrovne 4 je v tom, že vozidlá úrovne 4 môžu zasiahnuť, ak zlyhá systém, alebo dôjde k poruche. Vďaka tejto vlastnosti vozidlá úrovne 4 väčšinu času nevyžadujú žiaden ľudský zásah, no vodič si však stále môže zvoliť manuálnu kontrolu nad vozidlom.

4.2.6 Úroveň 5 (Úplná automatizácia jazdy)

Vozidlá 5 úrovne už nevyžadujú žiadnu ľudskú pozornosť - úloha vodiča je úplne eliminovaná. Vozidlá 5 úrovne ani nebudú vybavené akceleračnými pedálmi alebo volantom. Jazda takýchto vozidiel bude nerozoznateľná od jazdy klasickým vozidlom so skúseným vodičom. Pri úrovni 5 nebudú existovať ani žiadne geografické ani terénne obmedzenia. Vo viacerých častiach sveta už prebiehajú testy na plne autonómnych vozidlách, no žiadne ešte nie je pripravené na masové používanie širokou verejnosťou.

5 Automobilové komunikácie

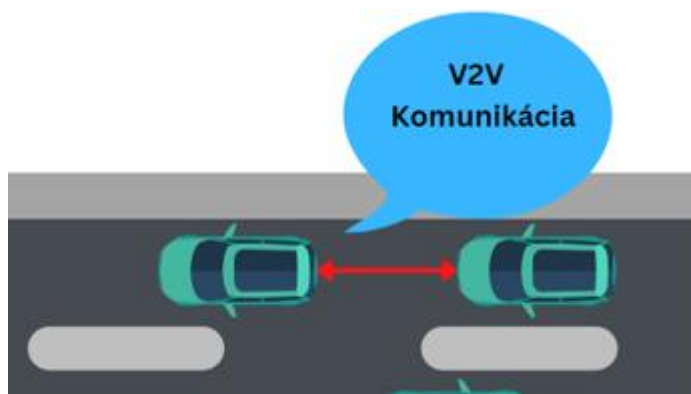
Tento pojem zahŕňa všetky komunikácie, ktoré prebiehajú medzi autom a okolím[19]. V skratke sa všade píše ako V2X, čo je skratka pre „vehicle to X“. Týchto typov poznáme viacero, a to:

- vozidlo k vozidlu (V2V- Vehicle to vehicle),
- vozidlo k cloud-u (V2C- Vehicle to cloud),
- vozidlo k infraštruktúre (V2I- Vehicle to infrastructure),
- vozidlo k zariadeniu (V2D -Vehicle to device),
- vozidlo k sieti (V2N- Vehicle to network),
- vozidlo k chodcovi (V2P- Vehicle to pedestrian).

5.1 V2V

Pri komunikácii typu V2V dochádza ku komunikácii medzi dvoma vozidlami, či už idúcim v protismere alebo v tom istom smere. Pri LiFi komunikácii je to jeden z najdôležitejších typov komunikácie nakoľko vysielače a prijímače spracúvajú svetlo, najčastejšie vozidlá budú komunikovať pomocou svetlometov. Je to priamy spôsob podania komunikácie a môže byť obmedzená napr. vzdialenosťou od udalosti, na ktorú vozidlá upozorňujú. Komunikácia medzi vozidlami musí byť rýchla, pretože informácie odovzdávané medzi vozidlami zodpovedajú za bezpečnosť cestujúcich. Preto je LiFi dobrým spôsobom komunikácie, nakoľko je rýchla, má veľký dosah, nízku spotrebu a vysokú efektívnosť. V2V môže zachytiť a odoslať tieto vstupy, ktoré možno považovať za dôležité:

- rýchlosť vozidla,
- poloha vozidla a smer jeho jazdy,
- zapnutie a vypnutie plynu (akcelérátora) vozidla,
- zmeny jazdného pruhu,
- poloha prevodového stupňa,
- informácie týkajúce sa riadenia /kontroly stability, riadenia /kontroly trakcie,
- informácie týkajúce sa brzd a proti-blokovacieho systému.



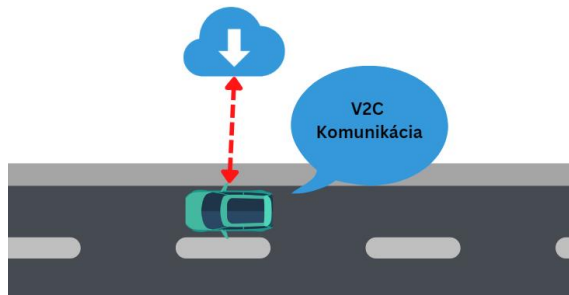
Obr. 10 V2V Komunikácia

5.2 V2C

Pojem V2C predstavuje komunikáciu medzi vozidlom a cloud-om [20]. Cloud je server, ktorý slúži ako úložné alebo výpočtové stredisko, ku ktorému sa používateľ dostane pomocou Internetu. Autonómne vozidlá cloud využívajú na spracovanie a výpočty z mnohých senzorov, ktorými sú vozidlá vybavené, ale ako aj záznamy kamier, ktorými sú tieto autá vybavené a nahrávajú aj počas toho, ako je auto zaparkované. Autonómne vozidlá potrebujú veľa úložného priestoru a výpočtového výkonu a cloud je jednoduchým riešením. Komunikácia medzi vozidlom a cloud-om (V2C) využíva prístup V2N k širokopásmovým mobilným sieťam na výmenu údajov s cloud-om. Niektoré aplikácie tejto technológie zahŕňajú:

- aktualizácie softvéru vozidiel cez vzduch (OTA),
- redundancia komunikácie DSRC,
- diaľková diagnostika vozidiel,
- obojsmerná komunikácia s domácimi spotrebičmi, ktoré sú tiež pripojené ku cloud-u (IoT),
- obojsmerná komunikácia s digitálnymi asistentmi.

Vďaka komunikácii V2C majú vozidlá prístup k množstvu údajov a informácií v reálnom čase, ktoré sa dajú využiť na zlepšenie bezpečnosti, efektívnosti a celkového zážitku z jazdy. V blízkej budúcnosti by V2C mohla zohrávať dôležitú úlohu aj v zdieľanej mobilite. Napr. preferencie vodičov by sa mohli ukladať do cloud-u a používať pri zdieľaní vozidiel na automatické nastavenie polohy sedadla, zrkadiel, rozhlasových staníc a podobne.



Obr. 11 V2C Komunikácia

6 Praktická časť

Predošlé kapitoly tejto práce spadajú pod analytickú časť. V analytickej časti boli podrobne prebrané technológie LiFi, čím sa odlišuje od konvenčných technológií, stavby vysieláčov a prijímačov ako aj prípadne javy, ktoré môžu tento signál narúšať. Ďalej bola časť venovaná autonómnym vozidlám a ich zaradeniu, ako aj terajšiemu stavu automobilových sietí vo svete, ich využitiu a typom automobilových komunikácií. V nasledujúcej časti tejto práce, s názvom praktická časť, bude popísaný technický model, ktorý spája technológie popísané v analytickej časti. Jedná sa o model komunikácie autonómnych automobilov pomocou technológie LiFi, čo vo výsledku vytvára možnú automobilovú sieť budúcnosti. V tejto časti budú rozobrané použité technológie, postup modelovania, výsledky ako aj prediskutovanie výhod a nevýhod a prípadných obmedzení - nevýhod.

6.1 Použité technológie

Nakoľko podľa [21] je Veins VLC jediná platforma s verejným zdrojovým kódom, ktorá pracuje s VLC protokolom pre komunikáciu v automobilovej sfére, Veins VLC sa stal základom pre túto časť diplomovej práce. V tejto kapitole budú rozobrané použité technológie pri vývoji praktickej časti tejto diplomovej práce a ich funkcionality a schopnosť spolupracovať bude popísaná v siedmej kapitole.

6.1.1 Virtual Box

[VirtualBox](#) je univerzálny plnohodnotný virtualizátor pre hardvér x86 určený na serverové, stolové a vstavané použitie. Tento softvér je bezplatne k dispozícii a má aj otvorený zdrojový kód pre nahliadnutie. Tento softvér umožňuje používateľom vytvárať a spúšťať virtuálne počítače. Virtuálny počítač je počítačový systém, ktorý pracuje nad iným operačným systémom, čím poskytuje virtualizované prostredie, ktoré možno použiť na spustenie viacerých operačných systémov súčasne [22] .

Pomocou programu VirtualBox môžu používatelia vytvárať virtuálne počítače a inštalovať širokú škálu operačných systémov vrátane systémov Windows, Linux a MacOS. To im umožňuje testovať softvér, spúšťať staršie aplikácie alebo experimentovať s novými operačnými systémami bez potreby ďalšieho hardvéru. Vďaka tomuto softvéru je možno sa vyhnúť plnej inštalácii požadovaného operačného systému na nový hardvér alebo preinštalovaniu používaného hardvéru kvôli jednému projektu.

6.1.2 Debian 11, Linux 5, GNOME

[Debian11](#) GNU/Linux je konkrétna distribúcia operačného systému Linux a početných balíkov, ktoré na ňom pracujú. Linux 5 je verzia na, ktorom operuje Debian a GNOME je používateľské rozhranie tejto distribúcie[24]. Linux je jadro operačného systému, ktoré je stavané na Unix-e. Okrem jadra Linux poskytuje aj súborový systém, ktorý sa riadi štandardom FHS a taktiež širokú škálu unix-ových nástrojov, z ktorých mnohé boli vyvinuté projektom GNU a nadáciou Free Software Foundation. Kombinácia jadra Linuxu, súborového systému, nástrojov GNU a FSF a ostatných nástrojov je navrhnutá tak, aby sa dosiahol súlad so štandardom POSIX (IEEE 1003.1). Standard Debian je verzia Linux-u a pôsobí ako operačný systém, na ktorom pracujú simulačné programy. Tento operačný systém je spustený ako virtuálny počítač vo vyššie spomínanom VirtualBoxe, čo je aplikácia pracujúca na počítači s operačným systémom Windows 11 [23] .

Dôvody výberu Debian-u pre prácu so simulačnými programami sú jeho spoľahlivosť, bezpečnosť a všeobecná popularita. Pod popularitou je myslené veľké množstvo aplikácií, ktoré Debian podporuje, ako aj veľké množstvo aplikácií vyvíjaných priamo na Debian. Výber však najviac ovplyvnil tvorca rámca Veins, ktorý túto distribúciu používa v predpripravených balíčkoch pre VirtualBox.

6.1.3 OMNeT++

OMNeT++ je rozšíriteľná, modulárna, škálovateľná na komponentoch založená simulačná knižnica a rámec v jazyku C++, primárne slúžiaci na modelovanie a simuláciu komunikačných sietí, protokolov a iných distribuovaných systémov. Tento rámec umožňuje používateľom vytvárať vlastné simulačné modely pomocou jazyka C++ a poskytuje bohatú knižnicu predpripravených simulačných modelov pre širokú škálu sieťových technológií. Pojmom sieť sa berie v širšom zmysle, ktorý zahŕňa drôtové a bezdrôtové komunikačné siete, ad-hoc siete, siete senzorov a pod. Funkcionalitu špecifickú pre danú oblasť, ako je podpora senzorových sietí, bezdrôtových ad-hoc sietí, internetových protokolov, modelovania výkonnosti, fotonických sietí atď. poskytujú modelové rámce, vyvíjané ako nezávislé projekty. V tejto diplomovej práci sú používané práve tri takéto projekty a to INET, Veins a Veins VLC [25].

Hlavnými komponentami OMNeT++ sú:

- jazyk na opis topológie NED,
- interaktívne grafické používateľské rozhranie v ktorom bežia simulácie (QtEnv),
- simulačné IDE vybudované na platforme Eclipse,

- rozhranie príkazového riadku na vykonávanie simulácie (Cmdenv),
- knižnica simulačného jadra (C++),
- pomocní nástroje (vytváranie makefile atď.).

Simulátor OMNeT++ poskytuje NED [27], čo je vlastný jazyk na opis topológie. Syntax je jednoduchá a NED je veľmi výkonný, pokiaľ ide o opis pravidelných topológií, ako je napr. stromová štruktúra, sieť alebo kruhová topológia.

OMneT++ obsahuje používateľské rozhranie (GUI) založené na Eclipse IDE[26]. Eclipse je integrované vývojové prostredie používané v počítačovom programovaní a je to jedno z najpopulárnejších programovacích prostredí. Toto používateľské rozhranie slúži na vytváranie a konfiguráciu simulačných modelov, vizualizáciu výsledkov simulácií a ladenie simulačných modelov. Obsahuje tiež rôzne nástroje na analýzu a vizualizáciu výsledkov simulácie, ako sú skalárne grafy, vektorové grafy a histogramy.

Vďaka faktom, že OMNeT++ je bezplatný, s otvoreným zdrojovým kódom, vydaný pod GNU verejnou licenciou a poskytuje výsledky vo forme datasetov, z ktorých možno vytvoriť grafy, je OMNeT++ výbornou voľbou. Je používaný vo výskume a vzdelávaní na vývoj a hodnotenie nových sieťových technológií, protokolov a algoritmov. OMNeT++ je stále udržiavaný komunitou, ktorá zahŕňa vývojárov, výskumníkov a používateľov po celom svete.

6.1.4 SUMO

SUMO (Simulation of Urban MObility) je bezplatný softvér s otvoreným zdrojovým kódom na simuláciu dopravy. Používa sa na simuláciu a analýzu dopravných systémov v mestách vrátane osobných a nákladných automobilov, autobusov, chodcov a bicyklov.

SUMO simuluje pohyb vozidiel a osôb v danej dopravnej sieti a umožňuje používateľom analyzovať dopravný tok, dopravné zápchy a cestovný čas. Môže tiež simulovať rôzne stratégie riadenia dopravy, ako sú semaforey, premenlivé dopravné značky a inteligentné dopravné systémy. SUMO podporuje rôzne modely simulácie dopravy vrátane mikrosimulácie a mezosimulácie, ktoré používateľom umožňujú simulovať dopravu na rôznych úrovniach podrobnosti [28].

SUMO poskytuje nástroj s názvom NETEDIT (NetworkEditor), čo je nástroj používaný ako na vytváranie vlastnej dopravnej siete, tak aj upravovanie sietí z rozdielných vstupov. Jeden z týchto najpopulárnejších vstupov je zo stránky OpenStreetMap.org, na ktorej si používateľ

vymedzí hranice a môže si stiahnuť všetky reálne dáta o cestnej sieti v týchto vymedzených hraniciach [29].

SUMO vytvorili a spracúvajú ho najmä pracovníci Inštitútu dopravných systémov Nemeckého centra pre letectvo a kozmonautiku. SUMO je licencované pod EPL 2.0. SUMO sa široko používa vo výskume, vzdelávaní a priemysle na štúdium a optimalizáciu dopravných systémov a je podporovaný komunitou vývojárov a používateľov.

6.1.5 INET

INET Framework je modelová knižnica s otvoreným zdrojovým kódom pre simulačné prostredie OMNeT++. Je to jeden z projektov vytvorených pre simulátor OMNeT++, ktorý sa používa pri simulovaní sietí. Poskytuje protokoly, agentov a ďalšie modely pre výskumníkov a študentov pracujúcich s komunikačnými sieťami.

INET podporuje obrovskú škálu sietí ako napr. bezdrôtové, drôtové, ad-hoc alebo mobilné siete. V INETe je zabudovaný a pripravený na použitie celý zásobník internetových protokolov ako napríklad TCP, UDP, IPv4, IPv6, BGP a mnohé ďalšie. Takisto aj protokoly dátovej vrstvy ako Ethernet, IEEE 802.11, rôzne MAC protokoly, dá sa v ňom pracovať s bezdrôtovou fyzickou vrstvou, obsahuje MANET smerovacie protokoly a rôzne iné. INET je jeden z najpopulárnejších modulov OMNeTu vďaka obrovskému množstvu preddefinovaných technológií pripravených na použitie [30].

Rámec INET sa široko používa v akademickom a priemyselnom prostredí na výskum, testovanie a vývoj sieťových protokolov a aplikácií. Je k dispozícii ako softvérový balík s otvoreným zdrojovým kódom a jeho zdrojový kód je voľne dostupný na GitHub.

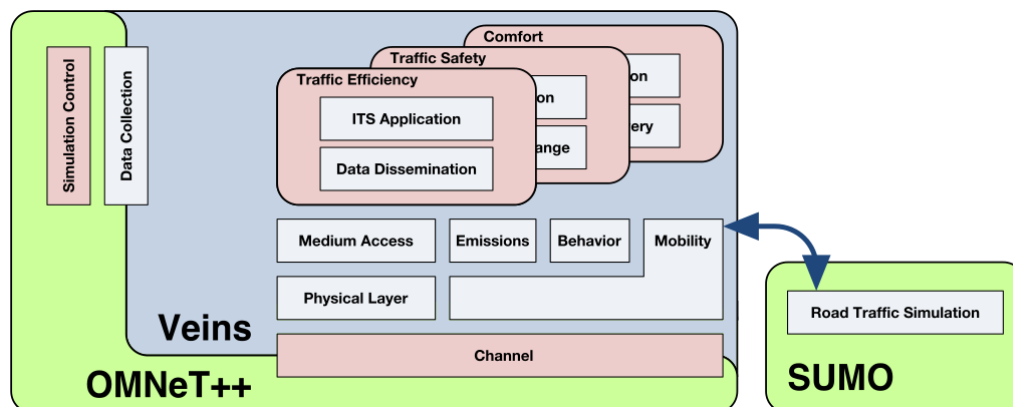
6.1.6 Veins

Veins (Vehicles in Network Simulation) [31] je sieťový simulátor s otvoreným zdrojovým kódom, ktorý sa používa na modelovanie komunikačných sietí vozidiel. Je postavený nad sieťovým simulátorom OMNeT++ a INET rámcom a poskytuje súbor nástrojov a modelov na simuláciu a analýzu vozidlových sietí. Veins kombinuje mobilitu vozidiel poskytovanú simulátorom SUMO s komunikačnými protokolmi poskytnutými rámcom INET. Ako INET, tak aj Veins je projekt v simulátore OMNeT++, no primárne pracuje ako most na prepojenie Suma a INETu.

Nakoľko sa Veins sústreďuje priamo na komunikáciu medzi viacerými vozidlami alebo vozidlami a infraštruktúrou, tak sa jedná o čisto bezdrôtovú komunikáciu. Veins obsahuje

navyše oproti INETu modely pre bezdrôtový štandard IEEE 802.11p, ktorý sa používa na komunikáciu medzi vozidlami v inteligentných dopravných systémoch (ITS).

Veins obsahuje aj modely mobility vozidiel, ktoré umožňujú používateľom simulovať pohyb vozidiel v danej sieti. Podporuje rôzne typy modelov mobility vrátane modelov sledovania vozidiel a modelov zmeny jazdného pruhu.



Obr. 12 Veins [3]

6.1.7 Veins VLC

Veins VLC (Visible Light Communication) je rozšírenie rámca Veins, ktoré umožňuje simulovať komunikáciu využívajúcu viditeľné svetlo ako prenosové médium. Komunikácia viditeľným svetlom je forma bezdrôtovej komunikácie, ktorá na prenos údajov využíva viditeľné svetlo. Keďže je to rozšírenie rámca Veins, tak sa jedná o knižnicu, ktorá sa zaoberá priamo komunikáciou medzi vozidlami.

Veins VLC obsahuje modely pre fyzickú vrstvu aj dátovú vrstvu komunikácie s využitím viditeľného svetla. Podporuje rôzne modulačné a kódovacie schémy, ako aj rôzne typy vysieláčov a prijímačov. Veins VLC obsahuje aj modely vplyvu okolitého svetla a rušenia na kvalitu komunikácie [32].

Dôležitou časťou tohto rozšírenia pre Veins sú modely poklesu výkonu signálu so vzdialenosťou pri žiarení prednými a zadnými svetlometmi. Tieto hodnoty boli empiricky namerané pokusmi s reálnymi vozidlami a následne importované do tohto projektu.

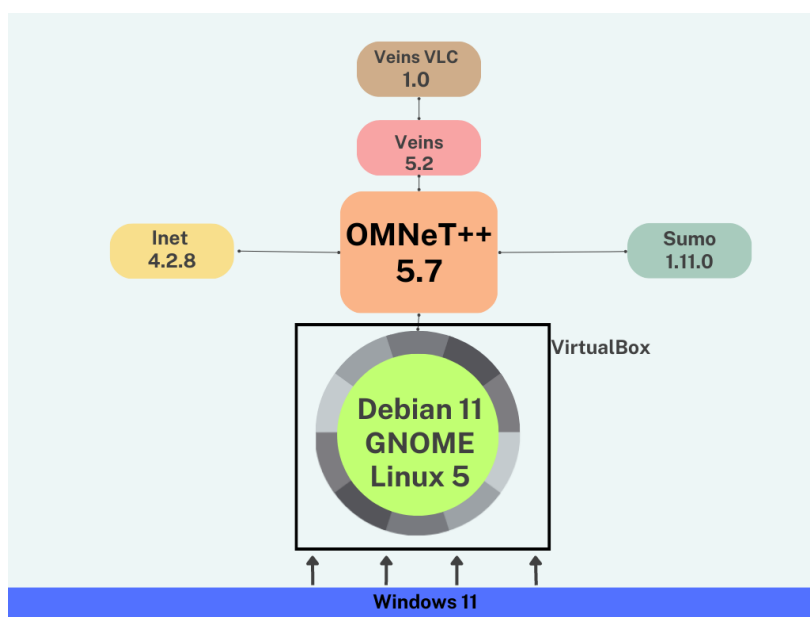
Veins VLC sa používa na simuláciu a vyhodnocovanie výkonnosti komunikácie viditeľným svetlom vo vozidlových sieťach. Možno ho použiť na testovanie rôznych aplikácií, ako je komunikácia medzi vozidlami (V2V) alebo medzi vozidlami a infraštruktúrou (V2I), v rôznych scenároch premávky. Veins VLC je postavený na sieťovom simulátore OMNeT++ a k činnosti

využíva rámce INET a Veins [33]. Toto rozšírenie je k dispozícii ako softvérový balík s otvoreným zdrojovým kódom na stránke GitHub [42].

6.2 Postup Riešenia

6.2.1 Výber kompatibilných verzií

Prvým krokom k vytvoreniu modelu komunikácie bolo nainštalovanie a spustenie prostredia, v ktorom sa tento model komunikácie bude odohrávať. Toto prostredie sa skladalo z viacerých programov a rámcov, spomínaných v podkapitole 6.1. Celé výsledné prostredie, ako aj vzťahy medzi programami a ich rámcami možno vidieť graficky znázornene na obr.13.



Obr. 13 Skladba simulačného prostredia

Ako je vyššie uvedené, tak celé prostredie je poskladané z ôsmich rôznych programov a rámcov vrátane základného operačného systému, na ktorom je toto celé zostavené. Prvé myšlienky boli spustiť OMNeT++ priamo na operačnom systéme Windows, no tam vznikali rôzne problémy ako s kompatibilitou, tak so spúšťaním základných ukážkových simulácií, ktoré majú slúžiť ako test, či sú moduly a rámce správne importované a schopné komunikácie medzi sebou. Na platforme Windows bol aj problém s vizualizérom, čiže síce číselné výsledky boli správne, no v okne, kde mala prebiehať simulácia nebolo nič zobrazené. Najväčší problém ale bol, že najdôležitejší modul celého tohto prostredia, Veins VLC, k správnej funkčnosti potrebuje verziu OMNeT++ 5.7 a Veins minimálne 5, no Veins 5 na Windows potrebuje minimálne OMNeT++ 6.0pre14.

- OMNeT++ 6.0pre14 **works** , **needed on Windows**

Obr. 14 Potrebná verzia OMNeT++ pre Windows

Je potrebné si uvedomiť, že všetky tieto rámce boli vyvíjané na operačné systémy na báze Linux, takže nie je prekvapením, že na platforme Windows bol pokus o nastavenie tohto simulačného prostredia neúspešný.

Pre tieto dôvody bol druhý pokus o nastavenie simulačného prostredia realizovaný na operačnom systéme Debian, ktorý je na báze Linuxu. Každý rámec a modul musel byť importovaný do simulačného prostredia v špecifickej verzii, aby nedochádzalo k problémom s kompatibilitou. Informácie o kompatibilitách verzií a o potrebných verziách rámcov pre určité moduly sú zo stránky modulu Veins, v sekcii Download and Changelog [34].

Compatibility

Veins 5.2

OMNeT++:

- OMNeT++ 5.7 **works**

SUMO:

- SUMO 1.11.0 **works**

INET Framework (optional):

- INET 4 (for use with, e.g., Internet protocols or wired networks; and for use of, e.g., PCAP traces or emulation features)
 - INET 4.2.8 **works** , **with OMNeT++ 5.7**

Veins VLC (optional, for evaluating vehicular visible light communication systems):

- Veins VLC 1.0 **works** , **with OMNeT++ 5.7**

Obr. 15 Upravená verzia stránky o kompatibilite modulov

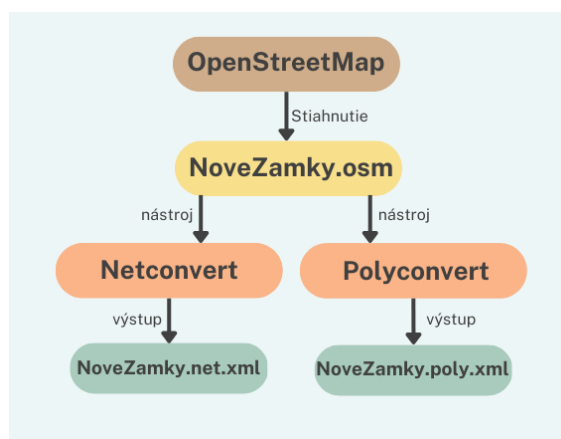
6.2.2 Import mapy

Pod importom mapy sa rozumie akcia, pri ktorej je do SUMO simulátora dopravy importovaná mapa z vonkajších zdrojov. Aj kvôli tejto vlastnosti je SUMO tak populárny nástroj. Ďalšia možnosť by bolo kompletné vytvorenie vlastnej mapy v nástroji Netedit, ktorý je základnou cestou SUMO simulátora. Nakoľko výsledný scenár tejto komunikácie medzi automobilmi by mal odpovedať realite, tak aj cesty, po ktorých sa budú tieto vozidlá pohybovať by mali odpovedať realite. Pre tieto účely existuje nástroj s názvom OpenStreetMap.

OpenStreetMap je online projekt, ktorého cieľom je vytvoriť voľne editovateľnú mapu sveta. Vytvára ju komunita dobrovoľných prispievateľov, ktorí zbierajú, overujú a upravujú

geografické údaje pomocou rôznych zdrojov, ako sú zariadenia GPS, letecké snímky a miestne znalosti. V skratke OpenStreetMap poskytuje cestnú sieť, ktorej hranice si určí užívateľ so všetkými vlastnosťami ako smer, sú tam zohľadnené aj všetky semaforey, prechody pre chodcov a dopravné nariadenia ako napríklad maximálna povolená rýchlosť. Pre tento projekt ako mapa bolo zvolené historické centrum mesta Nové Zámky.

OpenStreetMap poskytuje dáta v súbore s príponou osm. SUMO pracuje s viacerými súbormi pre jednu mapu, no všetky súbory sú typu xml. Aby mohol byť výstup zo stránky OpenStreetMap použiteľný ako vstup pre SUMO, musí byť tento osm súbor prekonvertovaný pomocou nástroja Netconvert a Polyconvert. Netconvert a Polyconvert sú nástroje, ktoré sú poskytované SUMOm a slúžia na konvertovanie osm súborov na xml súbory, s ktorými vie SUMO pracovať. Logický sled konverzií na xml súbory možno vidieť na obr. 16.



Obr. 16 Funkčnosť Netconvert a Polyconvert

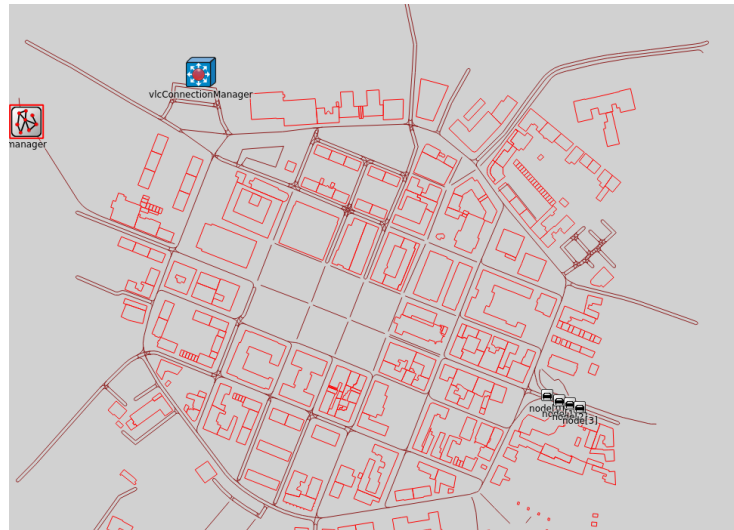
Súbor NoveZamky.net.xml obsahuje informácie o počte a usporiadaní ciest a súbor NoveZamky.poly.xml obsahuje informácie o okolitých budovách. Na to, aby Polyconvert pracoval je nutné si vytvoriť súbor typemap.xml a vložiť doň vlastnosti všetkých typov polygónov čo SUMO podporuje. Tieto všetky polygóny sú dostupné na stránke SUMO manuálu [35].

Presný postup konverzie možno vidieť na ukážke číslo 1.

```
netconvert --osm-files NoveZamky.osm -o NoveZamky.net.xml  
polyconvert --net-file NoveZamky.net.xml --osm-files NoveZamky.osm --  
type-file typemap.xml -NoveZamky.poly.xml
```

Ukážka 1 : Netconver a Polyconvert príkazy

Takto vytvorené súbory sú kompatibilné so SUMO-m, takže ich treba špecifikovať v konfiguračnom súbore pre SUMO simuláciu v prostredí OMNeT++. Viac o prepojení SUMO a OMNeT++ v podkapitole 6.2.3.

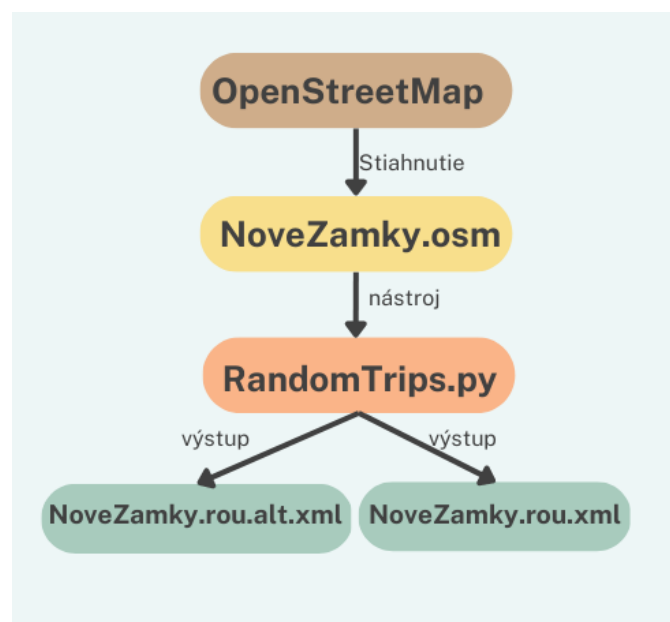


Obr. 17 Finálna verzia mapy

6.2.3 Mobilita

Mobilitu v tomto projekte zabezpečuje simulátor SUMO. Prvá časť práce so SUMO-m je import cestnej siete do ktorej bude SUMO generovať premávku. Tato časť je popísaná v bode 6.2.2. Dôležitou časťou teraz je vniesť premávku na túto cestnú sieť a prepojiť SUMO s OMNeT++.

Premávka v SUMO sa dá dosiahnuť dvoma spôsobmi. Prvým spôsobom je využitie python skriptu s názvom *randomTrips.py*. Tento skript je časťou SUMO, a funguje na princípe generovania náhodného počtu vozidiel na špecifickej cestnej sieti a náhodne každému vozidlu určí jeho trasy.



Obr. 18 Generovanie náhodnej premávky

Tento postup vytvorí 2 súbory a to NoveZamky.rou.xml, v ktorom sú zadefinované všetky vozidlá a každé vozidlo má vlastnú trasu a NoveZamky.rou.alt.xml, čo sú alternatívne trasy pre tieto vozidlá. V simuláciách je potom možné dynamicky prepínať medzi týmito dvoma trasami pre každé vozidlo.

Presný postup vytvorenia náhodného počtu vozidiel a ich trás možno vidieť v ukážke 2.

```
python /home/src/sumo-1.11.0/tools/randomTrips.py -n NoveZamky.xml
python /home/src/sumo-1.11.0/tools/randomTrips.py -n NoveZamky.xml
NoveZamky.rou.xml
```

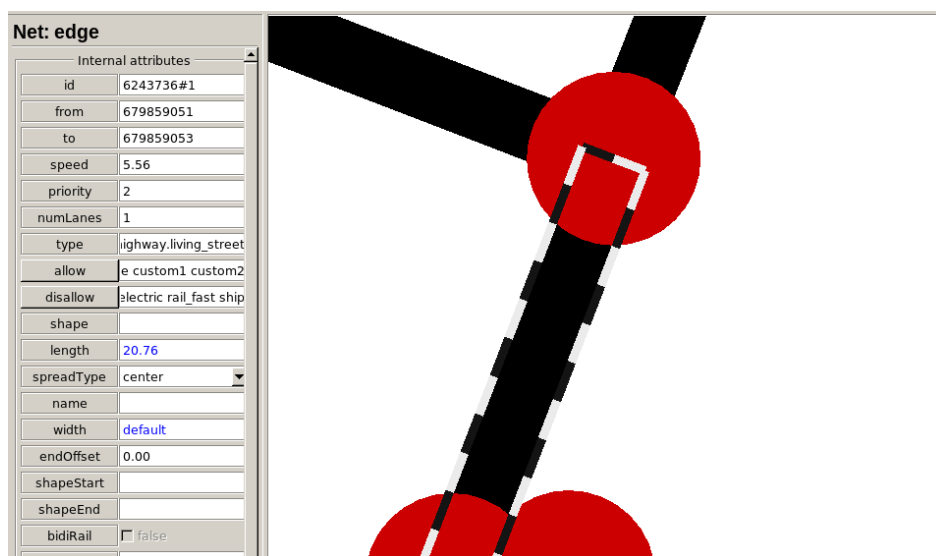
Ukážka 2 : Generovanie náhodnej premávky

Tu je dôležité upozorniť, že /home/src/sumo-1.11.0/tools/randomTrips.py je cesta k tomuto skriptu a každý užívateľ ju bude mať inú. V nástroji Netedit je možné tieto trasy upravovať, ako ich je možné vytvárať a upravovať - aj ručne. Každé vozidlo v súbore NoveZamky.rou.xml je zaznamenané nasledovne:

```
<vehicle id="2" depart="2.00" >
  <route edges="-689761965 53848957 6243736#1 6243736#2 6243736#3 288424478 16117212#0 16117212#1 16117212#2 16117212#3" />
</vehicle>
```

Obr. 19 Vozidlo a jeho trasa

ID je unikátny rozpoznávací znak každého vozidla, depart je čas, kedy sa v simulácii vozidlo vygeneruje a edges je jeho trasa. SUMO rozdeľuje každú cestu na medzi križovatkami alebo odbočeniami na jednu takúto hranu (edge). Preto sled takýchto hrán dáva spolu celú trasu.



Obr. 20 Inšpekcia cesty v Netedit

Keďže nástroj Netedit poskytuje možnosť inšpekcie každej cesty, tak existuje možnosť priradenia špecifickej trasy vozidla vloženíu sledu špecifických, po sebe nasledujúcich hrán. Takýmto spôsobom je možné pridávať každému vozidlu špecifickú trasu, ktorú má nasledovať, na rozdiel od náhodnej trasy, ktorá by mu bola vygenerovaná skriptom *randomTrips.py*

Takto vygenerované súbory s trasami vozidiel ako aj súbory cestnej siete a okolia, ktorých postup je popísaný v kapitole 6.2.2 sa vkladajú do priečinku, kde sa nachádzajú zvyšné súbory potrebné pre simuláciu a vytvára sa špeciálny konfiguračný súbor, do ktorého sa vkladajú odkazy na tieto súbory.

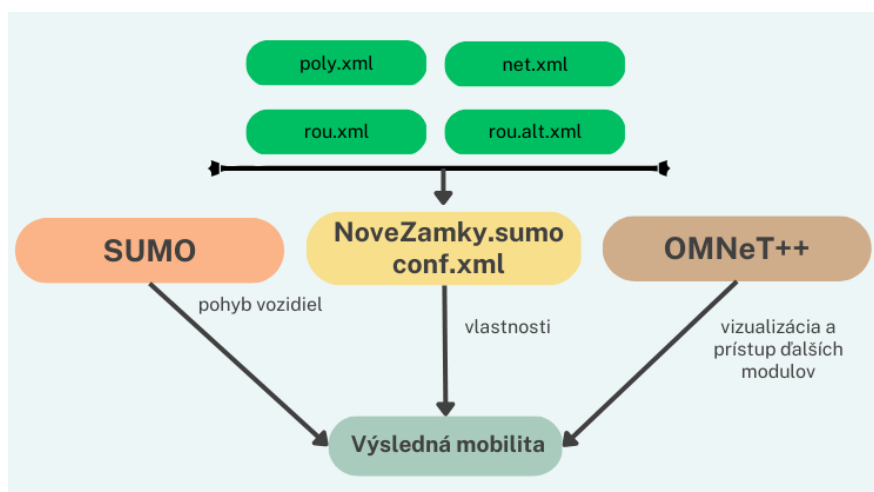
```
<!-- debug config -->
<launch>
  <copy file="NoveZamky.net.xml" />
  <copy file="NoveZamky.rou.xml" />
  <copy file="NoveZamky.rou.alt.xml" />
  <copy file="NoveZamky.sumo.cfg" type="config" />
  <copy file="NoveZamky.poly.xml" />
</launch>
```

Obr. 21 Obsah konfiguračného súboru NoveZamky.sumoconf.xml

Tento konfiguračný súbor je potom jeden zo vstupných argumentov OMNeT++ simulácie, a OMNeT++ priradzuje mapu, počet a trasu vozidiel pomocou týchto súborov. Do hlavného súboru s inštrukciami pre celú simuláciu je potom tento priradený nasledovne:

```
*.manager.launchConfig = xmlDoc("NoveZamky.sumoconf.xml")
```

Obr. 22 Priradenie konfiguračného súboru v omnetpp.ini



Obr. 23 Výsledná mobilita

Nakoľko tento konfiguračný súbor sa nachádza v OMNeT++ projekte, tak externe spárovať treba len SUMO simuláciu s nakonfigurovanou OMNeT++ simuláciou. To je dosiahnuté pomocou python skriptu a SUMO. Príkaz na prepojenie je nutné použiť pred každou simuláciou. Tento príkaz možno aj automatizovať bash skriptom, nakoľko sa používa dosť často a je ho možno vidieť na ukážke číslo 3.

```
/home/veins/src/veins/bin/veins_launchd -vv -c -home/veins/src/sumo-1.11.0/bin/sumo
```

Ukážka 3 Prepojenie simulátorov SUMO a OMNeT++

6.2.4 Komunikácia

V tejto časti sa začína využívať Veins VLC, čo je rozšírenie rámca Veins o komunikáciu s viditeľným svetlom ako prenosovým médiom. Podľa [21] je toto rozšírenie jediné s otvoreným zdrojovým kódom na simuláciu VLC v automobilovej prevádzke. Toto rozšírenie poskytuje viacero knižníc potrebných na úplnú komunikáciu pomocou LiFi.

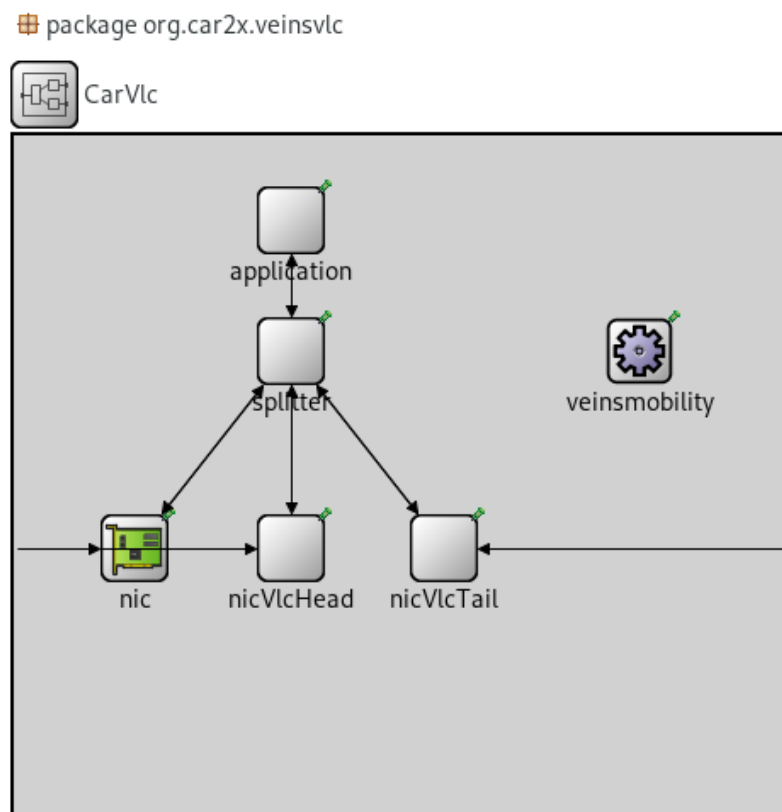
Dôležitým bodom je, že toto rozšírenie rámca Veins plne vyhovuje IEEE802.15.7, čo je protokol pre komunikáciu viditeľným svetlom ako médiom. Tento protokol určuje maximálnu veľkosť paketu na 8192B, PHR je 58bitov a PSDU 65 636 bitov. Taktiež podľa protokolu IEEE802.15.7 predpokladáme pre kanál V-VLC, že systém je s priepustným pásmom a je realizovaný pomocou modulácie intenzity a priamou detekciou (IM/DD). Pričom dáta moduluje pomocou kľúčovania On-Off Keying (OOK). OOK je binárna modulácia, kde logická 1 je reprezentovaná vysokou úrovňou a logická 0 s nižšou úrovňou prúdu.

Pri vytváraní simulácie v OMNeT++ je potrebné venovať zvýšenú pozornosť dvom hlavným súborom, a to NED súboru a omnetpp.ini súboru, nakoľko tieto súbory sú hlavnými, z ktorých pri kompilácii a simulácii OMNeT++ berie informácie alebo referencie na jednotlivé funkcionality ako napríklad MAC vrstva, aplikačná vrstva, modely výkonu signálu zo svietidiel a mnoho ďalších.

NED:

NED je skratka Network Description language (NED). NED je doménovo špecifický jazyk (DSL) používaný v iba v OMNeT++ na opis topológií siete a správania uzlov pri sieťových simuláciách. Používa sa na definovanie štruktúry a správania uzlov siete vrátane ich modulov, brán, spojení a parametrov. NED umožňuje používateľom definovať sieťové komponenty a ich vlastnosti, ako sú uzly, spojenia a kanály, hierarchickým spôsobom. Poskytuje stručný a intuitívny spôsob opisu štruktúry a správania komplexných sietí vrátane

ich prepojení a modelov výmeny správ. Veins VLC používa viacero takýchto NED súborov na špecifikovanie ako aj siete tak aj sieťových komponentov. Medzi dôležitejšie z nich patri NED súbor siete v tejto simulácii, kde sa definujú rôzne vlastnosti ako manažment konektivity, vizualizácia cestnej siete a okolitých budov, definuje sa tu typ mobility automobilov atď. Ďalej si rámec Veins VLC pomocou NED súborov špecifikuje vlastnú fyzickú, MAC a aplikačnú vrstvu, auto a mobilitu toho auta. Tieto NED súbory môžu byť aj vnorené, ako napr. splitter.net a NIC.ned (network interface card) sú vnorené v CarVlc.ned.



Obr. 24 NED definícia auta

```

gates:
    output applicationOut; // output gate towards the application
    input applicationIn;   // input gate from the application

    output nicOut; // output gate towards the 802.11p NIC
    input nicIn;  // input gate from the 802.11p NIC

    output nicVlcHeadOut; // output gate towards the HeadLight
    input nicVlcHeadIn;  // input gate from the HeadLight

    output nicVlcTailOut; // output gate towards the TailLight
    input nicVlcTailIn;  // input gate from the TailLight

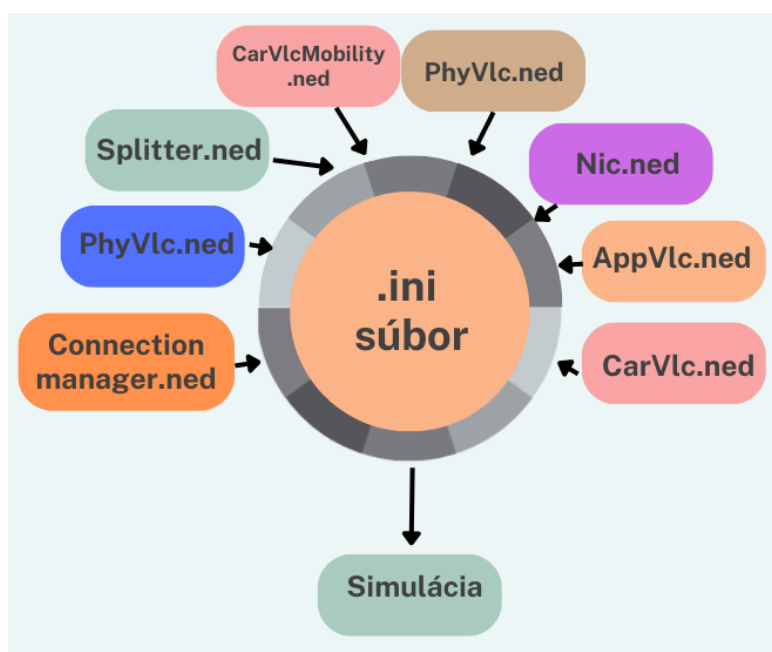
```

Obr. 25 NED definícia splittera

Omnetpp.ini:

Súbor omnetpp.ini je konfiguračný súbor, ktorý špecifikuje parametre simulácie pre konkrétny priebeh simulácie. Súbor omnetpp.ini sa používa na konfiguráciu rôznych nastavení simulácie, napr. času simulácie, topológie siete, parametrov modulu a možností behu. Spolu s NED súborom topológie je to povinný súbor pri OMNeT++ simulácii. Prípona .ini je skratkou anglického slova initialize čo do slovenčiny možno preložiť ako inicializácia. V každom OMNeT++ projekte môže len jeden takýto súbor.

V tomto .ini súbore prebieha aj označenie a určenie konfiguračného SUMO súboru, pomocou ktorého sa rieši vyššie spomínaná mobilita, ako aj rôzne parametre simulácie ako napr. veľkosť mapy, čas simulácie, vlastnosti prístrojových jednotiek (RSU), nastavenia aplikačnej vrstvy, nastavenia sieťovej karty, špecifické nastavenia pre VLC komunikáciu, V skratke, .ini súbor je centrálnym súborom, ktorý prepája všetky .ned definície a pridáva im vlastnosti.



Obr. 26 Vzťah medzi NED a ini

```

omnetpp.ini x
#####
#          VLC specific parameters          #
#                                          #
#          NIC-Settings                    #
#####
# PhyLayerVlc
i *.node[*].nicVlc**.phyVlc.txPower = 10mW # This is an arbitrary no
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.bitrate = 1Mbps

# BasePhyLayer
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.usePropagationDelay = true
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.noiseFloor = -110dBm
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.useNoiseFloor = true
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.minPowerLevel = -114dBm

*.node[*].nicVlcHead.phyVlc.antenna = xml("<root><Antenna type=\"Head
*.node[*].nicVlcTail.phyVlc.antenna = xml("<root><Antenna type=\"Tail

*.node[*].nicVlcHead.phyVlc.antennaOffsetX = 2.5 m
*.node[*].nicVlcTail.phyVlc.antennaOffsetX = -2.5 m
*.node[*].nicVlcHead.phyVlc.antennaOffsetZ = 0.6 m
*.node[*].nicVlcTail.phyVlc.antennaOffsetZ = 0.8 m

*.node[*].nicVlc**.phyVlc.analogueModels = xmldoc("config-vlc.xml")
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.decoder = xmldoc("config-vlc.xml")

# Splitter
*.node[*].splitter.drawHeadHalfAngle = 45deg
*.node[*].splitter.drawTailHalfAngle = 60deg

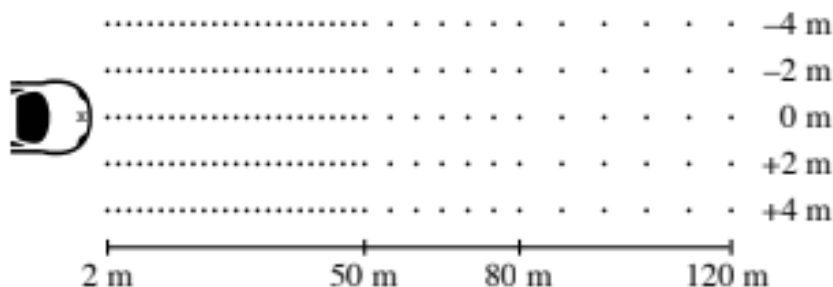
# LsvLightModel
*.node[*].nicVlcHead.phyVlc.radiationPatternId = "LbSedan1"
# other patterns: LbSedan2, LbSuv1, HbSedan1, HbSedan2
*.node[*].nicVlcTail.phyVlc.radiationPatternId = "DefaultRear"
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.photodiodeId = "PDA100A"
*.node[*].nicVlcHead.phyVlc.photodiodeGroundOffsetZ = 0.6 m
*.node[*].nicVlcTail.phyVlc.photodiodeGroundOffsetZ = 0.2 m

## antennaOffsetZ only applies to head and taillights
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.interModuleDistance = 1.5 m

```

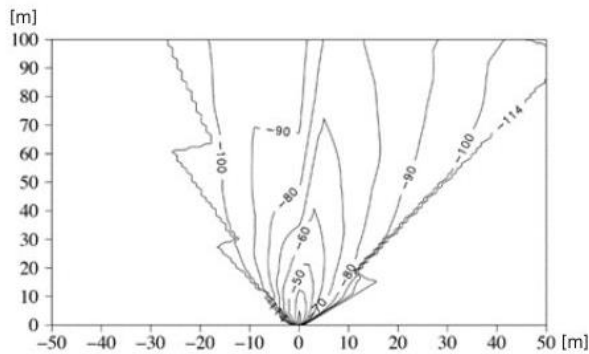
Obr. 27 Vzťah medzi NED a ini

Ako možno vidieť na obr. 25, rámec Veins VLC ponúka vlastný model svetiel, ktoré sú usporiadané ako anténa na vysielanie VLC signálu. [32] Tieto hodnoty nie sú od výrobcov aut, ale boli špecificky namerané pre tento simulačný nástroj na letisku v nemeckom meste Lippstad tímom výskumníkov z CCS Labs, pričom mnohí z nich pôsobia ako pedagógovia alebo výskumníci na Berlínskej technickej univerzite na oddelení Telekomunikačných sietí. Na obr. 26 je znázornený pohľad na pozíciu merania výkonu svetiel zvrchu.

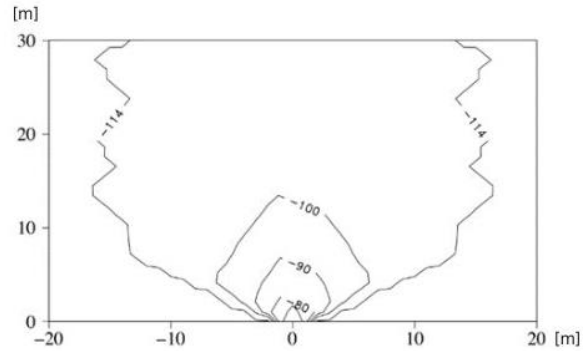


Obr. 28 Pohľad na meranie výkonu signálu zo svetiel vozidla [32]

Z týchto empiricky nameraných hodnôt boli vyhotovené grafy, tieto hodnoty potom boli upravené matematickými úkonmi a výsledné hodnoty integrované ako model antény do Veins VLC. Vďaka skutočnosti, že celá komunikácia vyhovuje protokolu IEEE802.15.7 a hodnoty dosahu signálu, čo je najväčší nedostatok tejto technológie, sú presne namerané, tak môžeme simulácie používajúce Veins VLC ako základ brať za odpovedajúce realite.



Obr. 29 Pokles výkonu signálu predných svetiel [33]



Obr. 30 Pokles výkonu signálu zadných svetiel [33]

Majorita programovania spomínala v programovaní aplikačnej vrstvy, kde je riešené samotné posielanie, prij

Odoslanie Správy:

V tejto časti je riešené odosielanie správ, odosiela sa objekt s názvom `vlcMsg`, ktorý je vytváraný nižšie a reprezentuje VLC správu, ako prístupová technológia sa používa VLC, a posiela sa príkazom `send`. Pri posielaní správy sa využíva VLC modul `BOTH_LIGHTS`, čo znamená že v okamihu sa vyšle VLC sprava ako prednými, tak aj zadnými svetlometmi. Spúšťač na spustenie tejto komunikácie bude vysvetlený v kapitole 6.2.5.

```
if (getParentModule()->getIndex()==0){
    auto dsrc = [this]() {
        VlcMessage* vlcMsg = new VlcMessage();
        vlcMsg->setAccessTechnology(VLC);
        send(vlcMsg, toLower);
    };
    int vlcModule = BOTH_LIGHTS;
    auto vlc = [this, vlcModule]() {
        EV_INFO << "Sending VLC message of type: " << vlcModule << std::endl;
        VlcMessage* vlcMsg = generateVlcMessage(VLC, vlcModule);
        send(vlcMsg, toLower);
    };
}
```

Obr. 32 Odosielanie správy

Spracovanie správy:

Pod spracovaním správy sa rozumie tomu, čo sa bude diať, ak vozidlo zachytí pomocou fotodiódy nejakú VLCsprávu. Funkcia rozlišuje medzi dvoma prístupovými technológiami, a to DRSC a VLC. Po prijatí správy je do konzoly vypísaný potvrdzujúci text o prijatí a v reálnom použití by práve tu prebiehalo spracovanie správ. Ako sú tieto správy spracovávané priamo v tejto simulácii bude prebrané v kapitole 6.2.5.

```
void SimpleVlcApp::handleMessage(cMessage* msg)
{
    // To handle the timer
    if (timerManager.handleMessage(msg)) return;
    if (msg->isSelfMessage()) {
    }
    else {
        VlcMessage* vlcMsg = check and cast<VlcMessage*>(msg);
        int accessTech = vlcMsg->getAccessTechnology();
        switch (accessTech) {
            case DSRC: {
                EV_INFO << "DSRC message received!" << std::endl;
                delete vlcMsg;
                break;
            }
            case VLC: {
                EV_INFO << "VLC message received from: " << vlcMsg->getSourceNode() << std::endl;
                delete vlcMsg;
                break;
            }
            default:
                error("message neither from DSRC nor VLC");
                break;
        }
    }
}
```

Obr. 33 Odosielanie správy

Vytváranie Správy:

Funkcia `generateVlcMessage` slúži na vygenerovanie správy, ktorá je vymieňaná medzi vozidlami. Pre účel tohto špecifického scenára, kde sa jedná o blízke sledovanie automobilov, sa správa nazýva nehoda, pretože sa bude táto správa vymieňať raz počas nehody. Tu sa práve

nastavujú parametre ako ID odosielateľa, model odosielenia, či je to broadcast alebo unicast a pridáva sa aj čas odoslania, pre počítanie odozvy medzi vyslaním a prijatím správy. Modul vysielania a prístupovú technológiu pridávame tejto správe pri vysielaní správy, nakoľko pre rôzne scenáre sa môže vyskytnúť núdza použiť rôzne technológie.

```

VlcMessage* SimpleVlcApp::generateVlcMessage(int accessTechnology, int sendingModule)
{
    VlcMessage* vlcMsg = new VlcMessage();
    // OMNeT-specific
    vlcMsg->setName("NEHODA");
    // VlcMessage fields
    vlcMsg->setSourceNode(this->sumoId.c_str());
    vlcMsg->setDestinationNode("BROADCAST");
    vlcMsg->setAccessTechnology(accessTechnology);
    vlcMsg->setTransmissionModule(sendingModule);
    vlcMsg->setTimestamp();
    // Set application layer packet length
    vlcMsg->setByteLength(byteLength);

    return vlcMsg;
}

```

Obr. 34 Odosielanie správy

6.2.5 Scenár

Po príprave a testovaní komunikácie a mobility nasledovalo vytvorenie scenára pre nejakú situáciu. Pod scenárom sa rozumie nejaká špecifická udalosť, ktorá môže nastať v dopravnej premávke. Medzi najčastejšie scenáre patria nehody, poruchy auta, dopravné zápchy, uzatvorenie cesty atď. Samozrejme, do scenára patria aj všetky kroky, ktoré nasledujú po takzvanom spúšťači tohto scenára. Pod pojmom spúšťač sa rozumie akcia alebo jav, kvôli ktorému sa preruší normálny tok dopravy a nasledujú akcie zo scenára. Napr. pri scenári s haváriou automobilov je samotná havária spúšťač a po havárii odklon dopravy je stále cestou scenára.

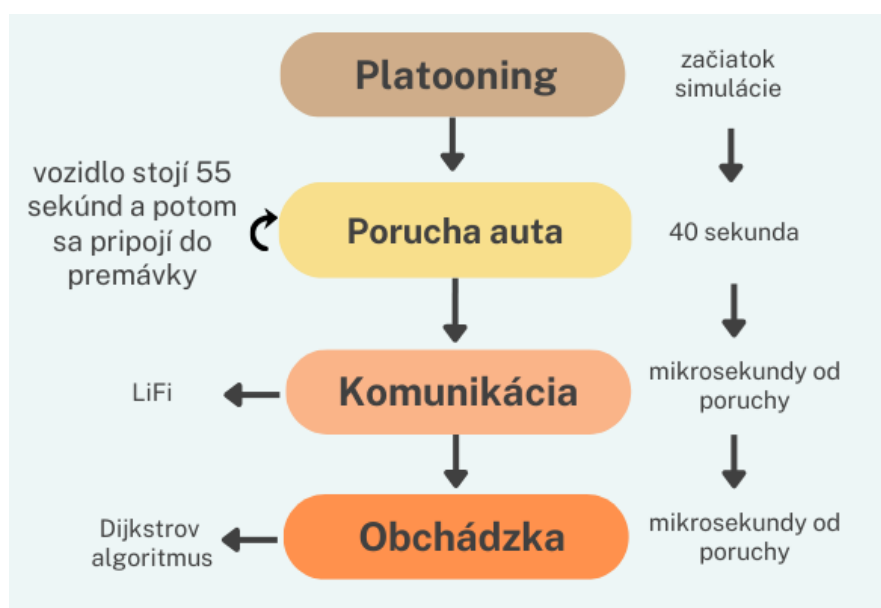
V zadaní tejto práce sa spomínajú dva typy komunikácií a to V2V a V2C, teda komunikácia medzi vozidlami na ceste a vozidlom a online cloud-ovým úložiskom. Preto sa v tejto práci budem venovať presne dvom scenárom, pre každý typ komunikácie bude práve jeden.

V2V Scenár:

Pri V2V scenári sa bude používať pre LiFi úplne ideálna situácia. Simuluje sa takzvaný platooning, čo je skupinka áut jazdiacich za sebou v malej vzdialenosti. Ako je už párkrát spomínané, najväčší nedostatok LiFi v automobilovom priemysle je jej dosah. Keď berieme do úvahy platooning, tak všetky autá medzi sebou sú v bezpečnej vzdialenosti, v ktorej vieme zabezpečiť komunikáciu. Toto je len jedna z výhod platooningu, medzi ďalšie patri menšia

spotreba automobilov v centre tejto skupinky, nakoľko auto pred nimi rozráža vzduch a majú menší odpor, tým pádom aj menšiu spotrebu, menšiu produkciu škodlivých látok atď. Tento scenár je vybraný na poukázanie silných stránok LiFi komunikácie v automobilovom priemysle.

Pri tomto scenári figurujú štyri automobily ktoré sa nasledujú, a na štyridsiatej sekunde prvé auto zastane na 55 sekúnd, simulujúc nejakú poruchu na ceste. Rýchlosť vozidla berieme ako spúšťač komunikácie. Akonáhle rýchlosť vozidla klesne na 0, tak vozidlo vyšle ako prednými, tak aj zadnými svetlometmi správu NEHODA broadcastom. Broadcast je vybraný z dôvodu, že chceme o neprejazdnosti cesty a fakte, že sa tam pokazilo vozidlo informovať všetkých účastníkov cestnej premávky v okolí. Zvyšné vozidla pomocou fotodiódy príjmu tuto správu, interne ju spracujú a pomocou Dijkstrovho algoritmu vypočítajú najkratšiu trasu k ich destinácii mimo cesty, kde stojí poškodené vozidlo.



Obr. 35 V2V Scenár

Funkcionalita odosielania správy sa rieši v aplikačnej vrstve a to pomocou externej funkcie z knižnice, ktorú ponúka Veins rámec, *TraCIMobility::getSpeed()*. Pomocou tejto funkcie sú získavané rýchlosti áut, a ak v tomto prípade auto, ktoré má ID 0, čo značí prvé auto v skupinke, bude mať rýchlosť 0 km/h, tak sa vyšle broadcastom správa o nehode.

```

if (getParentModule()->getIndex()==0){
    double speed = mobility->TraCIMobility::getSpeed();
    EV_INFO << "Car ID 0 is traveling at speed of :" << speed << "m/s" << std::endl;
    if (getParentModule()->getIndex() == 0 && mobility->TraCIMobility::speed == 0) {
        auto dsr = [this]() {
            getParentModule()->getDisplayString().setTagArg("i", 1, "red");
        };
        VlcMessage* vlcMsg = new VlcMessage();
        vlcMsg->setAccessTechnology(VLC);
        send(vlcMsg, toLower);
    };
    int vlcModule = BOTH_LIGHTS;
    auto vlc = [this, vlcModule]() {
        EV_INFO << "Sending VLC message of type: " << vlcModule << std::endl;
        VlcMessage* vlcMsg = generateVlcMessage(VLC, vlcModule);
        send(vlcMsg, toLower);
    };
}

```

Obr. 36 Spúšťač odoslania správy

Problém obchádzania tejto poruchy je riešený vo funkcii, ktorá sa zaoberá spracovávaním prijatých správ. Pracuje tak, že po prijatí VLC správy sa spusti takzvaný presmerovač, čo je funkcia zo SUMO, ktorý uzavrie cestu tam, kde nastala porucha prvého vozidla, a vypočíta pomocou Dijkstrovho algoritmu najkratšiu trasu do destinácie, ktorú zadávame v definícii tohto presmerovača. Tento presmerovač sa spúšťa pre každé auto, ktoré spracovalo VLC správu NEHODA odoslanú z prvého vozidla.

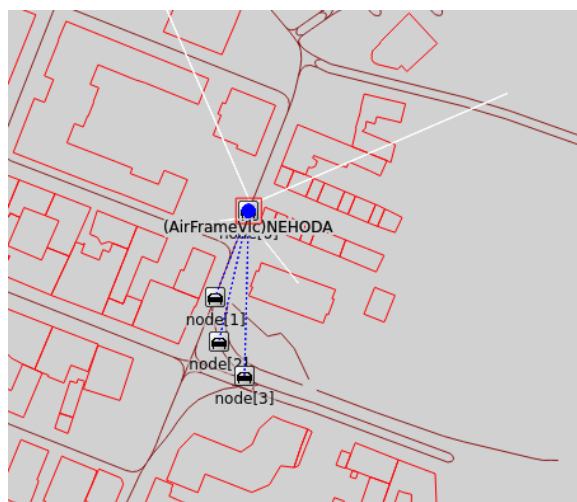
```

case VLC: {
    EV_INFO << "VLC message received from: " << vlcMsg->getSourceNode() << std::endl;
    delete vlcMsg;
    <rerouter id="rerouter1" edges="6243736#1">
        <interval begin="40" end="95">
            <closingReroute id="6243736#2"/>
            <destProbReroute id="-689762019" probability="1"/>
        </interval>
    </rerouter>
    break;
}

```

Obr. 37 Presmerovanie vozdiel

Dijkstrov algoritmus je široko používaný v informatike a teórii grafov, a nachádza najkratšiu cestu medzi dvoma uzlami vo váženom grafe. Je často používaný v simuláciách s vozidlami. Nakoľko poloha vozidla a destinácia sú dva uzly, cesty sú hrany, ktoré tieto uzly spájajú.



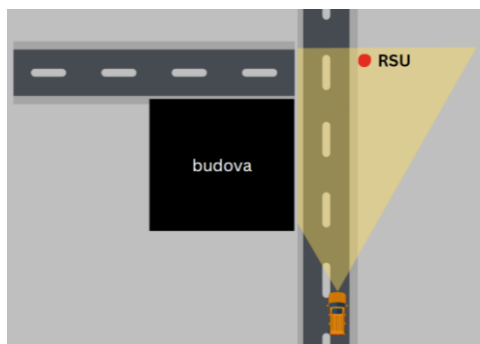
Obr. 38 Posielanie správy

V2C Scenár:

Komunikácia medzi vozidlami a cloud-om pomocou technológie LiFi je teoreticky možná ale v praxi nie. Na dosiahnutie čistej LiFi komunikácie medzi vozidlom a cloud-om by bolo nutné dosiahnuť dosvietenie svetlometu do fyzického datacentra kde sa nachádzajú cloud úložiská. V tomto špecifickom prípade námestia Nových Zámkov, najbližšie dátové centrum je vo Frankfurte a je pre Amazon web services cloud [36]. Vzdialenosť medzi centrom Nových Zámkov a týmto dátovým centrom je 730 km. Pomocou zrkadiel sa dá dosah svetla značne zvýšiť, no nastavovať zrkadlá až do Frankfurtu je nonsens, a zrkadlá tiež absorbujú malé množstvo svetla, takže dosah závisí na počte zrkadiel.

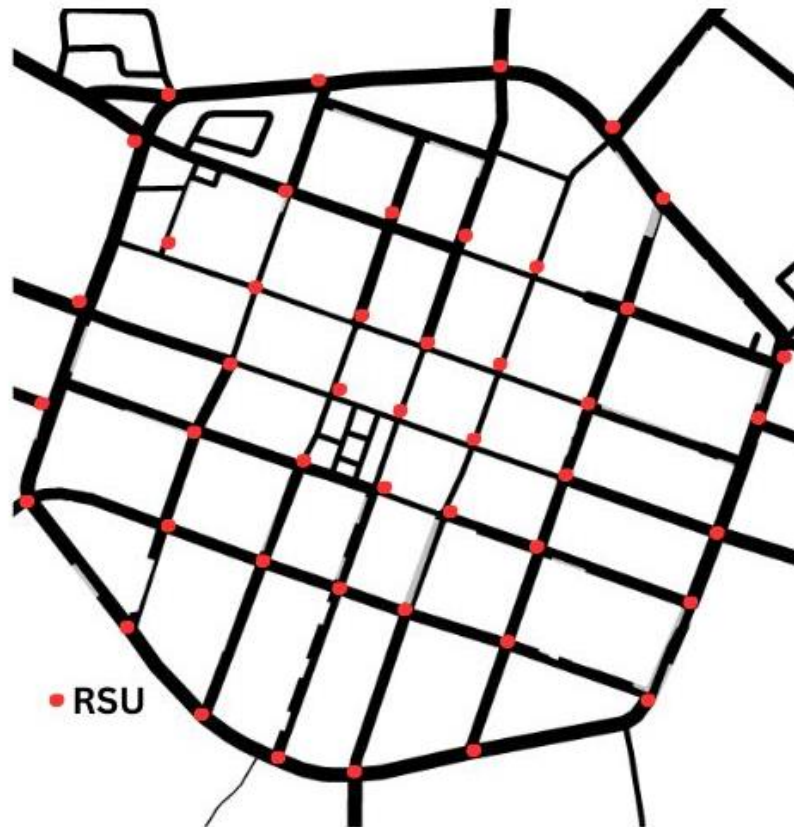
Jedinou možnosťou komunikácie je rozdelenie tejto trasy dát na rôzne technológie. Najväčší zmysel dáva LiFi komunikácia medzi vozidlom a RSU a bude mať prístup ku cloud-u. S týmto ale prichádza viacero otázok. Keďže medzi RSU a vozidlom bude komunikácia prebiehať na baze LiFi, tak RSU musí byť v zornom poli(LOS) vozidla a taktiež maximálne nejakých 100 metrov od vozidla [33]. Tu sa treba zamyslieť, či urýchlenie komunikácie, čo je to, čo by nám LiFi oproti bežným komunikačným metódam ponúklo, na posledných 100 metrov vôbec niečo zmení. Keďže, ako je spomínané vyššie, najbližšie dátové centrum je vo Frankfurte vzdialenom 730 km, a to je bod, s ktorým komunikujeme, tak tých 100 metrov čo vieme urýchliť pomocou LiFi, vo výsledku robí 0.0137% celej trasy dát.

Zároveň z tejto myšlienky vyplýva aj všeobecný problém s RSU pri LiFi technológii. Faktom je, že LiFi je LOS technológia. RSU pre LiFi pri všetkých ideálnych podmienkach museli byť opakované každých 100 metrov na rovnej ceste, čisto kvôli dosahu tejto technológie. Akonáhle cesta zatáča za budovu, tak je nutné k tejto zákrute priradiť RSU, pretože budova vytvára tienenie pre svetlo.



Obr. 39 Tienenie budovy

Jednotky RSU, ako je viditeľné na obr. 40, by museli byť rozmiestnené na každej ostrej zákrute, a na rovných cestách každých 100 metrov. Iba v centre Nových Zámkov to vychádza na 45 jednotiek RSU.



Obr. 40 Jednotky RSU v centre

Komerčne dostupný LiFi vysielač [37] stojí okolo 2000 eur, a komerčne dostupná fotodióda okolo 12 eur. K tomu treba pripočítať cenu nejakého stojanu a ľudskej práce osadenia tejto RSU. Ak bol počítaný len vysielač a prijímač, tak osadenie RSU jednotiek v centre mesta by stálo 90 500 eur. S týmito jednotkami RSU vznikajú samozrejme ďalšie problémy, ako napr. handover. Tu začínajú byť vidieť najväčšie nedostatky LiFi, a to LOS a dosah. Mesto by muselo vynaložiť 90 500 eur len na centrum, čo je malá časť mesta, aby zrýchlila 0.0137% z celej trasy dát.

6.2.6 Zbieranie a vyhodnotenie výsledkov

Ako je v práci viackrát spomínané, tak OMNeT++ je veľmi obľúbený simulačný nástroj, aj z dôvodu zbierania a vykresľovania dát. OMNeT++ zbiera dáta, ktoré je možno priamo v simulátore vykresliť do grafov.

Na zbieranie týchto dát je nutné v inicializačnom súbore omnetpp.ini určiť výstupné súbory, kam ich bude simulátor ukladať.

```
output-scalar-file = ${resultdir}/${experiment}/${configname}/sca/run(${runnumber}).sca
output-vector-file = ${resultdir}/${experiment}/${configname}/vec/run(${runnumber}).vec
```

Obr. 41 Určenie výstupných súborov na zber dát

Po spustení simulácie OMNeT++ vytvoril vyššie špecifikované dva súbory, v jednom sa nachádzajú vektorové hodnoty, v druhom skalárne hodnoty.

Každé vozidlo má svoje vlastné hodnoty a pre každé vozidlo možno z vektorov sledovať jeho pozíciu, rýchlosť, zrýchlenie ako aj znečistenie oxidom uhličitým. OMNeT++ priamo poskytuje prehľad priemeru týchto hodnôt ako aj štandardnú odchýlku.

Replica	Module	Name	Count	Mean	StdDev
#0	VLCExa	posx	1026	572.4729454930	18.191307558909912
#0	VLCExa	posy	1026	444.3907605461	34.564457296725514
#0	VLCExa	speed	1025	1.7736233156281	2.0927104463361
#0	VLCExa	acceleration	1024	0.056924765211	0.7855672745540706
#0	VLCExa	co2emission	1024	1.239289709978	0.5643051433540232

Obr. 42 Vektorové hodnoty

Skalárnych hodnôt pre každé vozidlo je viac ako vektorových hodnôt. V celku pre každé vozidlo OMNeT++ poskytuje 73 hodnôt, no kvôli veľkosti tejto práce sa tu budem venovať len zopár najdôležitejším. Medzi dôležitejšie z nich patria počty odoslaných a prijatých paketov ako prednými tak zadnými svetlometmi.

All (145 / 145) Vectors (0 / 0) Scalars (4 / 145) Histograms (0 / 0)					
runID filter		*		vlcPacketsSent	
Experiment	Measurement	Replica	Module	Name	Value
vlc-experiment		#0	VLCEExampleScenario.n	vlcPacketsSent	3.0
vlc-experiment		#0	VLCEExampleScenario.n	vlcPacketsSent	0.0
vlc-experiment		#0	VLCEExampleScenario.n	vlcPacketsSent	0.0
vlc-experiment		#0	VLCEExampleScenario.n	vlcPacketsSent	0.0

Obr. 43 Vyslané VLC pakety

All (145 / 145) Vectors (0 / 0) Scalars (4 / 145) Histograms (0 / 0)					
runID filter		*		vlcPacketsReceived	
Experiment	Measurement	Replica	Module	Name	Value
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	vlcPacketsReceiv	0.0
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	vlcPacketsReceiv	1.0
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	vlcPacketsReceiv	1.0
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	vlcPacketsReceiv	1.0

Obr. 44 Prijaté VLC pakety

S odoslanými a prijatými paketmi ide „ruka v ruke“ paket loss, v prípade tejto špecifickej simulácie, nakoľko celá komunikácia prebieha vyslaním jedného paketu o nehode zvýšným trom vozidlám, tak paket loss je pri tejto minimálnej komunikácii nulový, no pri simulácii väčšej premávky by samozrejme už bol nejaký paket loss pozorovateľný.

All (145 / 145) Vectors (0 / 0) Scalars (4 / 145) Histograms (0 / 0)					
runID filter		*		TotalLostPackets	
Experiment	Measurement	Replica	Module	Name	Value
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	TotalLostPackets	0.0
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	TotalLostPackets	0.0
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	TotalLostPackets	0.0
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	TotalLostPackets	0.0

Obr. 45 Stratené pakety

Jedna z najvýznamnejších výhod LiFi komunikácie je jej rýchlosť. Tú je možno tiež odsledovať, a na to OMNeT++ poskytuje dáta o oneskorení.

All (145 / 145) Vectors (0 / 0) Scalars (4 / 145) Histograms (0 / 0)					
runID filter		*		totalVlcDelay:mean	
Experiment	Measurement	Replica	Module	Name	Value
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	totalVlcDelay:me	NaN
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	totalVlcDelay:me	0.008432093299
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	totalVlcDelay:me	0.00843214573
vlc-experiment		#0	VLCEXampleScenario.n	totalVlcDelay:me	0.008432186109

Obr. 46 Oneskorenie

Oneskorenie je čas, počas ktorého sú pakety prenášané vzduchom medzi vysielačom a prijímačom. Každé vozidlo, ktoré prijalo VLC paket vykazuje priemerné oneskorenie okolo 8,4 ms. Otázkou zostáva, či je toto oneskorenie dostačujúce, nakoľko by to malo byť najsilnejšou stránkou LiFi komunikácie. Podľa tabuľky 2 zo štúdie [21], ktorá berie za základ štúdie [38] a [39], na bezpečnostné funkcie, napr. reakcia na náhle brzdenie je potrebné oneskorenie menšie ako 100ms. Keďže simulované oneskorenie je v priemere 8,4 ms je možné tvrdiť, že takáto odozva nie je len dostačujúca, je až ideálna na takýto scenár.

Tab. 2 Požiadavky na automobilovú komunikáciu

Aplikácia	Oneskorenie	Spôľahlivosť	Škálovateľnosť	Rozsah
Varovanie pred čelnou zrážkou	3ms - 1s	> 95%	1 – 100 uzlov	vozidlá v okolí
Zdieľanie dát	3ms - 1s	90% - 95%	1 – 100 uzlov	vozidlá v okolí
Pohotovostné brzdenie	< 100ms	90% - 95%	1 – 100 uzlov	vozidlá v okolí
Dopravný informačný systém	> 1s	< 90%	> 100 uzlov	celá sieť
Predchádzanie kolíziám na križovatkách	3ms - 1s	> 95%	10 – 100 uzlov	malé okolie
Platooning	< 100ms	> 95%	1 – 100 uzlov	malé okolie

6.3 Výhody a nevýhody takejto komunikácie

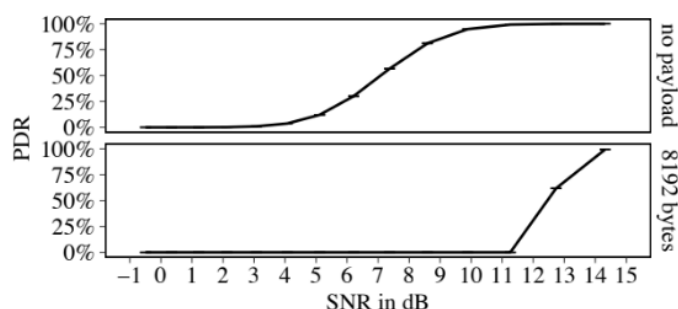
Ako je z predošlej simulácie možné vidieť, technológia LiFi sa hodí na určité použitia v automobilových komunikáciách, no nie na všetky. Naďalej je potrebné si uvedomiť že z dôvodov nedostupnosti simulačných nástrojov, veľká časť času a úsilia na tejto práci išla len do sprevádzkovania použiteľného prostredia na takúto simuláciu. Pozornosť bola venovaná dvom typom komunikácie a ich scenáru a na základe dvoch pokusov by nebolo správne vyvodzovať výsledky. Preto v nasledujúcej časti budú prebrané výhody a nevýhody, prípadne silné a slabé stránky použitia technológie LiFi pre komunikáciu medzi autonómnymi vozidlami nie len z výsledkov zo simulácií popísaných v kapitole 6.2, no aj výsledkov z iných štúdií, ktoré sa zaoberali využitím VLC v automobilových komunikáciách. Tieto výsledky boli dosiahnuté buď podobnými simuláciami alebo priamo testovaním v reálnej premávke. Všetky tieto štúdie slúžili ako teoretický základ ako pre analytickú, tak aj pre praktickú časť tejto práce.

Tab. 3 Silné a slabé stránky takejto komunikácie

Silné stránky	Slabé stránky
bezpečnosť	dosah
platooning	šírenie
doplňková komunikácia	interferencia
varovanie pred zrážkou	asymetria žiarenia svetlometov
dopravné informačné systémy	regulácie pre bezpečnosť očí
dobrá smerovosť	vozidlá príliš pri sebe
jednoduchý duplex	predný svetlomet má vysokú kapacitu
diaľkové svetlá	viditeľnosť > komunikácia
rýchlosť	rôzne druhy svetlometov
nižšie potrebné SNR	denné svetlá
obrovské spektrum	stretávacie svetlá
	nepresnosti na cestách
	nerovnomerný pohyb
	cena

Ako je možné vidieť, pre automobilovú komunikáciu je LiFi naozaj výborná technológia, pokiaľ sa komunikácia odohráva medzi vozidlami, ktoré sú relatívne blízko pri sebe. Jej

vlastnosti vynikajú najmä pri platooningu a rýchlosť tejto technológie ju robí vysoko použiteľnou pre bezpečnostné funkcie ako náhle brzdenie alebo varovanie pred zrážkami. Veľkou výhodou je fakt, že vysielač nevytvára vnútornú interferenciu pre prijímač. Vysielanie a prijímanie signálu sú dva rozdielne úkony spracovania signálu, takže plný duplex je jednoducho integrovateľný bez nadbytočného hardvéru. LiFi je taktiež bezpečnejšia ako zvyšné technológie nakoľko sa jedná o LOS technológiu, tak prípadný útočník musí byť v blízkom okolí na odchytenie komunikácie alebo na posielanie falošných paketov. Taktiež podľa [32] minimálny rozdiel signálu k šumu na 100% prenos len 14dB pričom Cisco pre bezdrôtové komunikácie odporúča minimálne 20dB [40].



Obr. 47 SNR [32]

Najväčší nedostatok LiFi technológie je jej dosah a šírenie. Keďže takáto komunikácia by používala svetlomety ako vysielače, tak jej maximálny dosah by bol vymedzený osvetlením zo svetlometu a okolitým šumom, čo tento signál ešte obmedzuje. Problém šírenia LiFi je ten, že sa jedná o komunikáciu s viditeľným svetlom ako prenosovým médiom. Tento signál zablokuje alebo znehodnotí akýkoľvek objekt dostatočne veľký, alebo v dostatočnej blízkosti k vysielaču na zatienenie prijímača. Tu vystupujú problémy s komunikáciou, ktorá nie je v zornom poli vozidla, ako napr. pravouhlé zákruty alebo nerovnosti na vozovke.

Keďže sa uvažuje o používaní svetlometov vozidla ako antén, nastavajú problémy ako bezpečnosť ľudských očí, používanie diaľkových svetiel oproti stretávacím, asymetria svetelného lúča a pod. Tieto problémy by sa dali vyriešiť, no treba si pamätať, že svetlomety vo vozidlách sú vždy na prvom mieste na osvetlenie vozovky, potom na upozornenie na seba až potom na komunikáciu. S týmto ide „ruka v ruke“ tvrdenie, že väčšina štátov by musela zaviesť povinné denné svetlá. Nemalým faktorom je aj cena týchto komponentov. Technológia LiFi je stále vo vývoji a nové poznatky sú publikované takmer denne. Na odstránení mnohých týchto nedostatkov sa už pracuje, no ešte to potrvá, kým to bude použiteľné pre bežné vozidlá. Zopár myšlienok, ako odstrániť tieto nedostatky je vyjadrených v podkapitole 6.4. Kvôli týmto nedostatkom by som LiFi neodporúčal ako jediný komunikačný protokol pre automobilové

komunikácie. Ak je komunikácia pomocou LiFi možná, je určite výhodnejšia ako čokoľvek iné, no tých momentov naozaj nie je mnoho. Ak má komunikácia prebiehať na viac ako nejakých 100 metrov alebo mimo zorného poľa, je LiFi úplne bezmocná. Z týchto dôvodov by som LiFi odporúčal ako doplnkovú komunikáciu ku klasickým metódam využívajúcim rádiové spektrum na diaľkovú alebo NLOS komunikáciu. LiFi by sa využívala v mestách, zápchach, proste ak by bola možná.

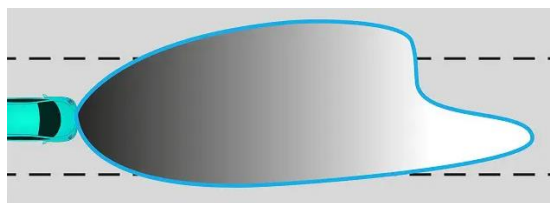
6.4 Minimalizovanie nevýhod

V tejto časti budú vyjadrené niektoré nápady ktoré by mohli vyriešiť alebo minimalizovať problémy, ktoré sú zjavné pri používaní LiFi ako komunikačného protokolu pre vozidlá. Tieto problémy sú zaznamenané v kapitole 6.3

Dosah: Dosah je najväčším problémom LiFi technológie. LiFi využíva LED diódy ako zdroj svetla, preto ak chceme zvýšiť dosah LED diódy, tak musíme zvýšiť jej jas. Jas LED diód sa dá zvýšiť viacerými spôsobmi, no najjednoduchším by bol zvýšiť jej príkon. Zvýšiť jej príkon je možné tzv. boost obvodom, čo pridá ako na cene tak zložitosti antény. Zvýšením jasu je možné dosiahnuť väčší dosah, no bude to len o pár metrov, čo nie je dostačujúce na odstránenie tejto nevýhody a vytvára len viacero problémov ako napr. bezpečnosť očí okoloidúcich ľudí, alebo dlhšie zapínanie svetla. Pre úplné odstránenie problému s dosahom bude treba vymyslieť nový postup vytvárania LED diód.

Typy svetlometov: Svetlomety majú hneď niekoľko problémov. Asi najväčší je, že každé vozidlo má iný typ svetlometov a tým pádom aj iný svetelný lúč, ktorý produkuje a tým pádom iné rozloženie signálu. Tento problém by sa dal odstrániť zavedením jedného typu svetiel ako predných, tak aj zadných pre každé vozidlo.

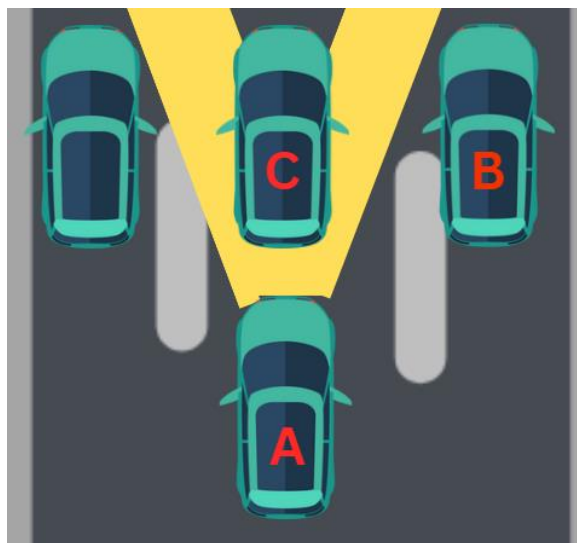
Asymetria osvetlenia: Ďalším problémom je fakt, že ideálne výsledky sú dosahované pri diaľkových svetlách. Prepínanie na stretávacie svetlá značne znehodnocuje signál. Ďalší problém je asymetria tohto lúča, pretože najlepšie osvetlenie nie je priamo pred svetlometom, ale je jeme posunuté doprava, pretože takto vozidlá najväčšiu intenzitu smerujú na krajinu a nie na oproti idúce vozidlá v protismere.



Obr. 48 Intenzita iluminácie predného svetlometu [4]

Možným riešením problémov ako nerovnomernej intenzity osvetlenia, ako aj prepínania diaľkových a stretávacích svetiel je riešiteľný tzv. systémom matice predných svetiel. Je to technológia, pri ktorej sa svetlá skladajú z viacerých LED komponentov a zrkadiel, a tým pádom sú schopné meniť intenzitu svetla na určitý bod. Tým pádom by mohla byť najväčšia intenzita stále smerovaná na časť vozidla, kde by bol umiestnený prijímač.

Vozidlá príliš blízko pri sebe: Ako je problém s vozidlami mimo dosah LED svetiel, tak môže problém nastať aj vtedy, keď sú vozidlá príliš blízko pri sebe, nakoľko signál má tvar kužeľa s najužšou časťou pri zdroji. Názornú ukážku možno vidieť na obr. 49.



Obr. 49 Problém vozidiel blízko pri sebe

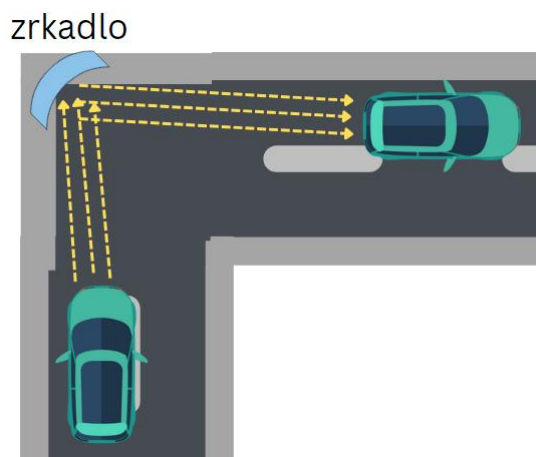
Na obr. 49 je znázornený pokus o komunikáciu medzi vozidlami príliš blízko pri sebe. Vozidlo A sa snaží komunikovať s vozidlom B, no komunikácia nie je možná, nakoľko sú blízko pri sebe. Tento problém nastáva už pri uhloch väčších ako 20° , ak je vozidlo A 1 meter za vozidlom C.

Vysoká kapacita svetlometu: Toto je v dnešnej dobe najväčší obmedzovač rýchlosti LiFi. Predné svetlomety využívajú vysoko svietivé LED diódy, ktoré by ideálne mali byť ešte navýšené pre väčší dosah. Tieto LED diódy majú vysokú kapacitu, a preto je čas ich nábehu pomalý, čo obmedzuje modulačnú rýchlosť na niekoľko MHz. Pre rýchlejší čas nábehu LED diódy je viacero riešení ako napr. optimalizácia plošných čipov, alebo zvýšenie prúdu, ktorý poháňa LED. Najjednoduchším riešením by ale bolo znížiť jas LED diódy, no tým zhoršujeme komunikáciu.

Interferencia svetla a počasie: Prírodné a umelé svetlo interferuje so signálom, ktorý vozidlá vysielajú. Pod prírodným svetlom sa rozumie slnko, priamo cez deň alebo odrazené od mesiaca

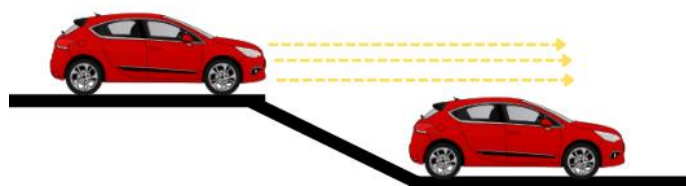
v noci. Keďže tento VLC signál, ktorý slnko vysiela nie je modulovaný, jeho elektrický výstup na prijímači je jednosmerný prúd a riešením je jednoduchý dolnopriepustný filter. Umelé svetlo z pozadia ma inú vlnovú dĺžku, ako svetlo vysielané cez svetlomety, takže môže byť takisto odfiltrované. Počasie vplýva tiež na kvalitu komunikácie. Dážď, sneh, hmla, všetky negatívne ovplyvňujú komunikáciu. Najviac ju ovplyvňuje hustá hmla, ktorá drasticky znižuje dosah až na nejakých 20 metrov [21].

Šírenie: Problém šírenia spočíva v tom, že LiFi je LOS technológia. Ak je z nejakého zatienený prijímač, tak neprijíma žiaden signál. Veľký problém tvoria pravouhlé zákruty v mestách, kde budovy zamedzujú šíreniu svetla. Každý ľudským okom viditeľný materiál môže zabrániť alebo znehodnotiť signál. Riešením tohto fenoménu by mohli byť buď jednotky RSU, no pri tom množstve potrebných by to bolo finančne veľmi zaťažujúce, alebo jednoducho na každú zákrutu umiestniť správne nastavené zrkadlo.



Obr. 50 Použitie zrkadiel na zákrutách

Nerovnosti na ceste: Tu najmä dominujú jamy a kopce, nakoľko tie po prejení rozkývajú celé vozidlo vertikálnym smerom, a tak prerušia stabilný tok informácií, pretože vysielacie vozidlo bude pod iným ako nulovým uhlom k prijímaciemu vozidlu. Tento problém sa dá vyriešiť relatívne jednoducho, opravením všetkých ciest.



Obr. 51 Vertikálne nerovnosti

7 Záver

V tejto práci som sa venoval využitiu technológie LiFi ako komunikačného protokolu pre autonómne vozidla medzi sebou, alebo medzi vozidlom a cloud-om. V analytickej časti som sa venoval mojej osobnej motivácii a dôvodu pre ktorý som s zvolil túto tému, ako aj štúdiu každej technológie špecifikovanej v zadaní.

Na začiatku som sa venoval štúdiu technológii automobilových sietí a ich terajšiemu stavu, ich protokolom, využitiu a požiadavkám. Najdôležitejšou časťou analýzy je kapitola popisujúca technológiu LiFi. Tu som sa venoval tomu, čo je LiFi, čím sa odlišuje od zvyšku komunikačných protokolov, ako pracuje vysielateľ a prijímač pre takýto špeciálny typ komunikácie, ako aj všeobecným a špecifickým moduláciám pre LiFi, a v neposlednom rade sa tu venujem nepriaznivým interakciám s atmosférou. Zadanie práce pojednáva o autonómnych vozidlách, tak je časť tejto práce venovaná aj autonómnym vozidlám ich definícii a deleniam. V neposlednom rade sa v analytickej časti venujem dvom špecifickým typom komunikácie a to medzi vozidlami a vozidlom a cloud-om.

V praktickej časti som sa venoval tvorbe a vyhodnoteniu modelu komunikácie vozidiel pomocou LiFi. Zvolil som možnosť simulácie takejto komunikácie. Preto na začiatku praktickej časti sú uvedené všetky technológie a programy, ktoré som použil pri tvorbe tejto simulácie. Ďalej som sa tu venoval postupu tvorby tejto simulácie, od prepojenia všetkých rámcov používaných až po vytváranie špecifických scenárov. Po vytvorení tejto simulácie som značnú časť venoval zberu a vyhodnocovaniu dát zo simulácie, čo vyústilo následnému rozoberaniu silných a slabých stránok takejto komunikácie. Ďalej som sa venoval možnostiam minimalizácie slabých stránok, a tomu, čo by bolo potrebné spraviť pre takúto minimalizáciu.

Prínos tejto práce spočíva v ucelenom nahliadnutí do problematiky komunikácie využívajúcej LiFi pre vozidlá, v priblížení a vysvetlení spôsobu, akým sa dá takáto komunikácia simulovať.

Ďalším prínosom tejto práce je vytvorenie jednej z mála takýchto simulácií, ako aj jej nasledovné vyhodnotenie, vytvorenie tabuľky silných a slabých stránok a rozbor krokov potrebných na jej minimalizáciu. Všetky simuláciou dosiahnuté výsledky a predpoklady smerujú k tvrdeniu, že LiFi je výborná technológia pre komunikáciu, ak sa dá využiť, no jej využitia/ aplikácie sú vďaka krátkemu dosahu veľmi obmedzené. Preto by som LiFi odporučil ako doplnkový typ komunikácie, využívaný v prípade, že to vzdialenosť dovoľí.

Zdroje obrázků

- [1] Vitásek, I.J. (2014) 'Optické atmosférické komunikace'.
- [2] <https://www.smartcitiesworld.net/opinions/opinions/driving-autonomous-vehicles-forward-with-intelligent-infrastructure>
- [3] <http://veins.car2x.org/documentation/>
- [4] <https://www.bestcaraudio.com/upgraded-headlight-output-and-beam-patterns/>

Použitá literatura

- [1] H. Moustafa , Y. Zhang, Eds., Vehicular Networks: Techniques, Standards, and Applications. CRC Press, (1. Vydanie),2019, London, Anglicko,445 s., ISBN 9780367385781.
- [2] R. Madli a G. Varaprasad, A Review of Communication Handoffs in Vehicular Ad-Hoc Networks (VANET) and its Classification. [online]
Dostupné na internete:
https://bmsce.ac.in/Research/Publications/A_Review_of_Communication_Handoffs_in_VANET_and_its_Classification.pdf
- [3] Rehman, S.U., Khan, M., Zia, T. and Zheng, L., Vehicular ad-hoc networks (VANETs): an overview and challenges,2013 (Vol. 3), USA, Journal of Wireless Networking and communications, Pp.29-38, ISSN 2167-7328.
- [4] S. Singh a S. Agrawal, VANET routing protocols: Issues and challenges. Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS),2014 Chandigarh, India, Pp. 1–5, ISBN 978-1-4799-2291-8 , doi: 10.1109/RAECS.2014.6799625.
- [5] A. Dahiya a D. R. K. Chauhan, A Comparative study of MANET and VANET Environment. Journal of computing, 2010(Vol. 2), Pakistan, Pp.87-92, ISSN 2076-0833.
- [6] Laberteaux, K., Hartenstein, H. eds., VANET: vehicular applications and inter-networking technologies. John Wiley & Sons, 2009(1. Vydanie),Chichester, UK 466 s., ISBN 9780470740569.
- [7] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, a C. Chen, What is LiFi? Jouranl of Lightwave Technology, 2016(Vol. 34), USA, Pp. 1533–1544, ISSN 1558-2213, doi: 10.1109/JLT.2015.2510021.
- [8] Singh, R., O'Farrell, T., David, J.P., Performance evaluation of IEEE 802.15. 7 CSK physical layer. 2013, IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Atlanta, GA, USA, Pp. 1064-1069, ISBN 978-1-4799-2851-4.
- [9] Kumar, N.R., Srikanth, A., Singha, A. and Sam, B.B., 2017, February. Comparison of LIFI and WIFI and study of smart meter-survey. International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES),2017, Chennai, India, Pp. 1-8, ISBN 978-1-5090-6135-8.
- [10] M. Sathiyarayanan, V. Govindraj, a N. Jahagirdar, Challenges and opportunities of integrating Internet of Things (IoT) and Light Fidelity (LiFi), 3rd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT),2017 Tumkur, India, Pp. 137–142, ISBN 978-1-5386-1144-9, doi: 10.1109/ICATCCT.2017.8389121.
- [11] Vitásek, I.J, Optické atmosférické komunikace. 2014(1. Vydanie), Ostrava, Česká Republika, 164 s.
- [12] A. Sarkar a S. Agarwal, Li-Fi Technology: Data Transmission through Visible Light. International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies, 2015(Vol. 3) India, Pp. 1-10 ISSN 2321 – 7782.
- [13] Goswami, P., Shukla, M.K., 2017. Design of a Li-Fi transceiver. Wireless Engineering and Technology, 2017(Vol. 8), USA, Pp.71, ISSN 2152-2308.

- [14] R. George, S. Vaidyanathan, A. S. Rajput, a K. Deepa, LiFi for Vehicle-to-Vehicle Communication – A Review. *Procedia Computer Science*, 2019(Vol. 165), Amsterdam, Holandsko, Pp. 25–31, doi: 10.1016/j.procs.2020.01.066 ISSN 1877-0509.
- [15] M. S. Islim a H. Haas, Modulation Techniques for Li-Fi. *ZTE communications*, 2019(Vol. 14), China, Pp. 29-40, ISSN 1673-5188.
- [16] S. Salvi a V. Geetha, From Light to Li-Fi: Research Challenges in Modulation, MIMO, Deployment Strategies and Handover. *International Conference on Data Science and Engineering (ICDSE)*, 2019(Vol. 1), Patna, India, Pp.107–119, doi: 10.1109/ICDSE47409.2019.8971475, ISSN 978-1-7281-2087-4.
- [17] I. R. Management Association, Y. Wiseman, *Research Anthology on Cross-Disciplinary Designs and Applications of Automation.*, Ed. IGI Global, 2022, Hershey, Pennsylvania, USA, Pp. 878–889. doi: 10.4018/978-1-6684-3694-3.ch043, ISBN 9781668440209.
- [18] P. Czech, Turoń, K, Barcik J, Autonomous vehicles: basic issues, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2018(Vol. 100), Pp. 15–22., doi: 10.20858/sjsutst.2018.100.2 ISSN 2450-1549.
- [19] A. Islam, M. T. Hossan, a Y. M. Jang, Convolutional neural networkscheme–based optical camera communication system for intelligent Internet of vehicles. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, UK, 2018(Vol. 14), doi: 10.1177/1550147718770153, ISSN 1550-1477.
- [20] Hamad, M., Regnath, E., Lauinger, J., Prevelakis, V., Steinhorst, S., Spps: secure policy-based publish/subscribe system for v2c communication. *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2021, Patna, India (pp. 529-534). ISBN 978-1-7281-2087-4.
- [21] Memedi, A., Dressler, F., Vehicular visible light communications: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.2020(Vol. 23), USA, Pp.161-181, ISSN 1553-877X.
- [22] Documentation, Virtualbox.org.[Online].
Dostupné na internete: <https://www.virtualbox.org/wiki/Documentation>. [citované:2023].
- [23] Dassen, J.H.M., Stickelman, C., Kleinmann, S., Rudolph, S., The Debian GNU/Linux FAQ. [online]
Dostupné na internete:
<https://www.debian.org/doc/manuals/debian-faq/basic-defs.en.html#whatisdebian>
[citované:2023].
- [24] Gnome, Gnome - Debian Wiki. [online].
Dostupné na internete:
<https://wiki.debian.org/Gnome>. [citované:2023].
- [25]“OMNeT++documentation,” Omnetpp.org.[Online]. Dostupné na internete:
<https://omnetpp.org/documentation/>. [citované:2023].
- [26] Eclipse.org. [Online].
Dostupné na internete:
<https://help.eclipse.org/2022-12/index.jsp>. [citované:2023].
- [27] Omnetpp.org. [Online].
Dostupné na internete:

<https://doc.omnetpp.org/omnetpp/SimulationManual.pdf>. [citované:2023].

[28] Lopez, P.A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., Wießner. Microscopic traffic simulation using sumo. 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC), 2018, Pp. 2575-2582, ISBN 978-1-7281-0323-5.

[29] Netedit - SUMO documentation. [online]
Dostupné na internete:
<https://sumo.dlr.de/docs/Netedit/index.html>. [citované:2023].

[30] What is INET framework?, Omnetpp.org. [online]
Dostupné na internete:
<https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>. [citované:2023].

[31] Christoph Sommer, Reinhard German, Falko Dressler, Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), 2011(Vol. 10), Pp. 3–15, ISSN 1558-0660.

[32] Agon Memedi, Claas Tebruegge, Julien Jahneke, Falko Dressler, Impact of Vehicle Type and Headlight Characteristics on Vehicular VLC Performance. Proceedings of 10th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2018), 2018 Taipei, Taiwan, Pp. 1-8, ISBN 978-1-5386-9428-2 .

[33] Agon Memedi, Hsin-Mu Tsai, Falko Dressler, Impact of Realistic Light Radiation Pattern on Vehicular Visible Light Communication. Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017), 2017, Singapore, Singapore, Pp. 1-6, ISBN 978-1-5090-5019-2.

[34] C. Sommer, Download and changelog – veins. [online]
Dostupné na internete:
<https://veins.car2x.org/download/>. [citované:2023].

[35] OpenStreetMap - SUMO documentation, Dlr.de. [online]
Dostupné na internete:
<https://sumo.dlr.de/docs/Networks/Import/OpenStreetMap.html>. [citované:2023].

[36] Atomia adds support for hybrid cloud hosting with AWS and Azure. [online].
Dostupné na internete:
<https://www.atomia.com/press/atomia-adds-support-for-hybrid-cloud-hosting-with-aws-and-azure/>. [citované:2023].

[37] LiFi transmitter, Hyperion Technologies,. [online]
Dostupné na internete: <https://www.hyperiontechs.com/product/lifi-transmitter/>.
[citované:2023].

[38] Boban, M., Kousaridas, A., Manolakis, K., Eichinger, J., Xu, W., Connected roads of the future: Use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications. IEEE vehicular technology magazine, USA, 2018(Vol. 13), Pp.110-123
ISSN 1556-6080.

[39] Willke, T.L., Tientrakool, P., Maxemchuk, N.F.,. A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, USA, 2009(Vol. 11), Pp.3-20, ISSN 1553-877X

[40]Signal-to-Noise Ratio (SNR) and wireless signal strength, Cisco Meraki, [online]
Dostupné na internete:
[https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_\(SNR\)_and_Wireless_Signal_Strength](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_(SNR)_and_Wireless_Signal_Strength). [citované:2023].

[41] Company, Waymo. [online].
Dostupné na internete:
<https://waymo.com/company/>. [citované: 2023].

[42] Veins, Veins/VEINS_VLC, GitHub. [online].
Dostupné na internete:
https://github.com/veins/veins_vlc. [citované: 2023].

Prílohy

Príloha A

Online repozitár, kde sa nachádzajú všetky konfiguračné a zdrojové súbory používané pri simuláciách LiFi protokolu na komunikáciu medzi autonómnymi vozidlami a vozidlami a cloud-om, ako aj práca samotná.

Link:

<https://github.com/Matthew55661/Technol-gie-LiFi>

QR kód :



Príloha B

CD s nahratými konfiguračnými a zdrojovými kódmi