

**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.

Original zadania

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 cloudom. Popísané sú tu ako aj výhody, tak 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	16
2.1.3	Protokoly založené na klastri	16
2.1.4	Broadcast protokoly	17
2.1.5	Geocast protokoly	17
2.2	Využitie sietí vo svete	17
2.3	Požiadavky na automobil / sieť	18
2.3.1	Automobil	18
2.3.2	Sieť.....	18
3	LiFi	19
3.1	Prenosové médium	20
3.2	Interakcie svetla s atmosférou	21
3.2.1	Molekulová absorpcia.....	22
3.2.2	Rayleighov rozptyl.....	22
3.2.3	Mieho rozptyl.....	23
3.2.4	Atmosférické turbulencie.....	24
3.3	Vysielač a prijímač.....	25
3.3.1	LED ako zdroj svetla	25
3.3.2	Vysielací čip.....	26
3.3.3	Prijímač	26
3.3.4	Transceiver.....	27
3.4	Modulácie.....	27
3.4.1	Modulácia s jedným nosičom (SCM)	27
3.4.2	Modulácie s viacerými nosičmi (MCM).....	28
3.4.3	Farebné modulácie (CSK).....	28
4	Autonómne vozidlá.....	29
4.1	Čo je to autonómne vozidlo	29
4.2	Úrovně autonómnosti	29

4.2.1	Úroveň 0 (Bez automatizácie)	29
4.2.2	Úroveň 1 (Asistencia vodiča).....	30
4.2.3	Úroveň 2 (Čiastočná automatizácia jazdy)	30
4.2.4	Úroveň 3 (Podmienená automatizácia jazdy)	30
4.2.5	Úroveň 4 (Vysoká automatizácia jazdy).....	30
4.2.6	Úroveň 5 (Úplná automatizácia jazdy)	30
5	Automobilové komunikácie	31
5.1	V2V	31
5.2	V2C	32
6	Praktická časť	33
6.1	Použité technológie	33
6.1.1	Virtual Box.....	33
6.1.2	Debian 11, Linux 5, GNOME.....	34
6.1.3	OMNeT++	34
6.1.4	SUMO	35
6.1.5	INET	36
6.1.6	Veins	36
6.1.7	Veins VLC	37
6.2	Postup Riešenia	38
6.2.1	Výber kompatibilných verzií	38
6.2.2	Import mapy.....	40
6.2.3	Mobilita.....	41
6.2.4	Komunikácia	44
6.2.5	Scenár.....	50
6.2.6	Zbieranie a vyhodnotenie výsledkov	55
6.3	Výhody a nevýhody takejto komunikácie.....	57
6.4	Minimalizovanie nevýhod.....	60
7	Záver.....	63
	Zdroje obrázkov	64
	Použitá literatúra	64
	Prílohy.....	67

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 Commision	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
BRP	The Bordercast Resolution	Rozlíšenie Bordercast
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 cloudu
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
PHY	PHY1 layer header	
PSDU	PHY1 service data unit	
NED	Network Description language	
DSL	Domain specific language	

Zoznam použitých veličín

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

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 bezdrôtový telefón vynájdený v 1982 až po najnovšie výdobytky v oblasti umelej inteligencie, človeku sa život každým dňom po malých krôčikoch zjednodušuje. Rýchlosti internetového pripojenia idú hore, IoT je čím ďalej tým viac rozvinutejšie 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 zakúrili a rozohrial auto v zime, vďaka posilňovaču riadenia ho nemusia trápiť početné zákruty, a ekologická stopa je tiež menšia ako kedykoľvek predtým. Naše technologické pokroky je značne 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 WiFi. Autonómne vozidlá sú prirodzenými nástupcami klasických, človekom riadených automobilov. Táto práca sa zaoberá technológiou LiFi, a to práve ako komunikačný prostriedok v automobilovej doprave. Je to technológia stále nová, v bežnom živote nepoužívaná, no má veľmi perspektívnu budúcnosť. Nárast autonómnych vozidiel na cestách je nezastaviteľný a LiFi ponúka ideálny kompromis medzi väčšími rýchlosťami a náročnosťou na priebeh samotnej komunikácie. V tejto práci bude čitateľ oboznámený s technológiami vyššie spomínanými, bude mu preložený a vysvetlený model komunikácie medzi autonómnymi automobilmi 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 pojmy. LiFi komunikácia a autonómne autá. 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 napríklad v medicíne alebo v armáde. LiFi ponúka vyššie rýchlosti a nižšiu latenciu ako WiFi a podľa môjho názoru je to logickým krokom napred, ktorý za pár rokov podstúpime všetci a štandard WiFi v bežnom použití 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.

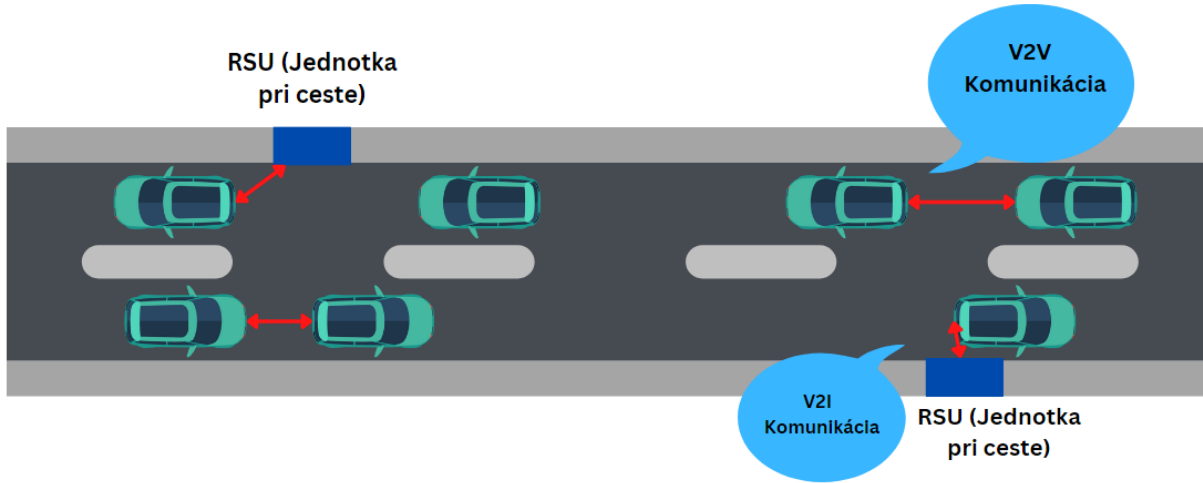
Čo sa týka autonómnych vozidiel, tak rozmach tejto technológie v posledných rokoch rastie exponenciálne. Už pomaly každý piaty automobil je plne elektrický a autonómne vozidlá momentálne existujúce sú všetky elektrické. Dokonca v Arizone už funguje plne autonómna taxi služba. Už aj na našich cestách je automobil značky Tesla celkom bežným zjavom. Záujem u mňa vzrástol keď si kamarát kúpil už spomínanú Teslu a bol ma 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 auto išlo normálnou rýchlosťou. Parkovanie presné na centimeter a výdrž batérie je tiež v dobrom zmysle udivujúca. Vtedy som si uvedomil, že v nie až tak ďalekej budúcnosti budú šoférovať len tí, ktorých to vyslovene baví. Čím viac bude takýchto aut na ceste, tým viac bude nutné aby vedeli medzi sebou komunikovať a predísť nehodám. Autá takto komunikujúce si vedia posielat' informácie o 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 aj povedať, že sú našou neodvratnou 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 severnej Amerike 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 áut, aby dohliadalo na bezpečnosť systémov a priliehajúcich aplikácií. V roku 2010 IEEE 802.11p MAC (Medium Access Control) a PHY (Physical Layer) boli dokončené pre podporu bezdrôtového prenosu v automobilových sieťach a publikované. Takýto vývoj viedol k zvýšenej pozornosti na bezpečnostnú komunikáciu, konkrétne výmenu paketov na upozornenie vozidiel na hroziacu kolíziu alebo nebezpečenstvo na ceste. Aby bola komunikácia bezpečná a účinná, je potrebné aby fungovala v reálnom čase. Je potrebné, aby zabezpečenie kompletnej distribúcie správ bolo v rámci veľmi krátkeho času, zvyčajne 100ms. Jedna oblasť štúdia – konkrétne dopravné siete ad-hoc (VANET) – očakáva sa, že bude poskytovať rôzne aplikácie. Výsledkom je vynikajúci sieťový výkon.

VANET siete vznikli použitím MANET (Mobile ad hoc network) technológie na pohybujúce sa automobily[2]. VANET je skratka pre vehicular ad hoc network. Hlavným cieľom siete VANET je vytvorenie a udržanie komunikácie medzi autami na ceste bez použitia básovej stanice alebo kontroléra. Veľkou výhodou VANET sietí je kritické predávanie informácií o blížiaccej sa nehode alebo nebezpečenstve na ceste bez prídavnej infraštruktúry na ceste. Nedostatok infraštruktúry vo VANET sieti prenáša 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 životnom prostredí. 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), známa ako medzi Vozidlom a infraštruktúrou (V2I). Obrázok 1 ukazuje typický scenár VANET.



Obr. 1 VANET sieť

Jednou z najzložitejších a najzaujímavejších častí VANET siete je samotný prenos a príjem signálu[3]. Bezdrôtový kanál ktorým sa signál prenáša je veľmi dynamický, často sa menia objekty v ňom nachádzajúce a tým pádom aj veľa nových, neustále sa meniacich odrazových plôch. Preto je pokladaná vysoká priorita na správne modelovanie signálu, čo vo výsledku pomôže správnej rekonštrukcii prijatého signálu. Keďže je posielaný signál viacerestný, 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, $y \in \mathbb{C}^{N_t}$ 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 znižovať 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 sieťach predstavuje jeden z najväčších problémov. Väčšina smerovacích protokolov vo VANET je blízko prepojená s topológiou používanou v sieti.

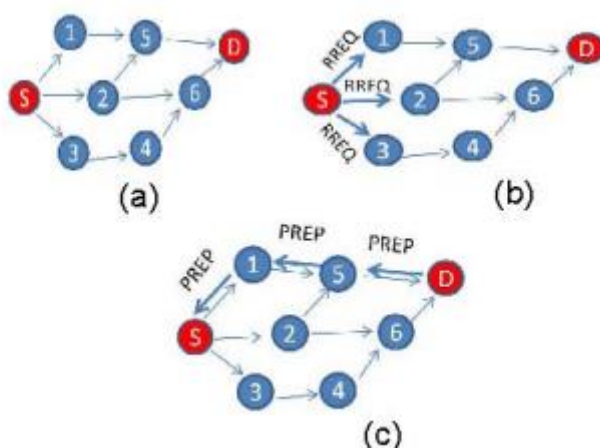
Architektúra a výkon sa odchyľujú vždy, keď existuje zmena topológie siete. Protokoly smerovania používané vo VANET sieťach vieme rozdeliť do piatich kategórií a to :

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 (autá), neustále obnovujú svoju smerovaciu tabuľku s novými smermi v ich okolí. Tieto informácie sú neustále vysielané okoliu pomocou HELLO paketov.

Pri reaktívnych smerovaniach ako napríklad AODV, DSR, BRP, 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)

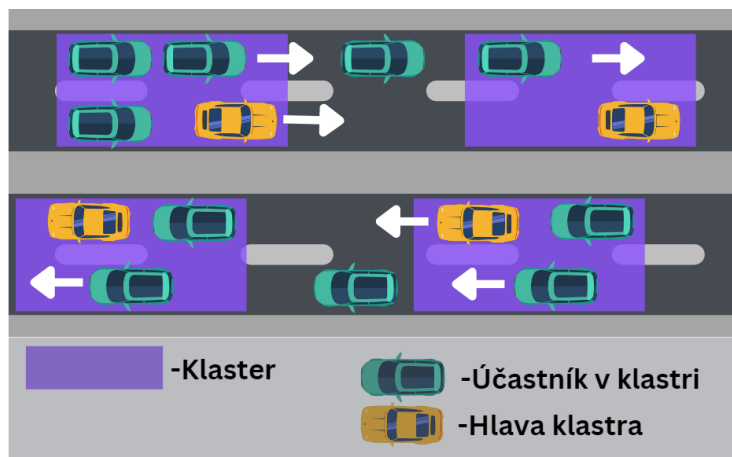
2.1.2 Lokalizačné smerovacie protokoly

Pri tomto prístupe sa získavajú informácie o polohe vozidiel zo zdrojov ako Globálny pozičný systém (GPS). 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 netreba údržbu 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, takzvaných klastrov. V klastri hrá 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 sieťach. 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 siete, bolo prezentovaných pomerne veľa prístupov k Geocast smerovaniu. Kľúčovou myšlienkou smerovania Geocastu je zúžiť vyhľadávanie ďalšieho skoku na konkrétnu zónu relevancie (ZOR). Predstavte si možnosť mať mechanizmus, v ktorom, ak sa auto stane účastníkom nehody, to 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, Severnej Amerike a Japonsku. Tieto siete idú ruka v ruku s pribúdaním smart automobilov na ceste. Medzi hlavné využitia týchto sietí patria[5] :

- **elektronické brzdové svetlá** : Umožňujú spomalenie auta detekciou brzdových 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 napríklad dostupnosť internetu, streamovacích služieb, upozornenie na zaujímavé udalosti v okolí, najbližšie reštaurácie a hotely.

2.3 Požiadavky na automobil / sieť

2.3.1 Automobil

[6] Aby mohol byť autonómny automobil súčasťou premávky, v ktorej komunikácia prebieha pomocou LiFi, musí byť vybavený sadou LiFi prijímačov a vysieláčov ako aj vpredu, tak aj vzadu vozidla. Tieto jednotky môžu byť spojené do jednej, a to vysielaco-prijímacej jednotky s názvom Transceiver. 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. Napríklad ak by sa stala nehoda a v okolí by nebolo žiadne auto, bolo by fajn mať pri ceste nejakú jednotku, ktorej by auto odovzdalo informácie a kvôli bezpečnosti by sa to auto vyplo. 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 sieťach 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 strategické 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[7]. Vieme o LiFi uvažovať ako o WiFi, ktoré používa svetlo namiesto rádiových vln. Svetlo ako prenosové médium prináša niekoľko výhod, ako napríklad vyššie prenosové rýchlosti, fungovanie vo väčšej šírke pásma a môže sa využívať v oblastiach náchylných na rádiové vlny ako napríklad 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 vyžarovovaných impulzov môžu dáta putovať do prijímačov a z nich. 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 Gb/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.

Technológia Li-Fi 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 Kb/s. Ideálne sa používa na vonkajšie aplikácie.
- **PHY II** : verzia je vyvinutá tak, aby spĺňala požiadavky na strednú rýchlosť prenosu dát od 1,25 Mbps do 96 Mbps. Ideálne sa používa na vnútorné aplikácie.
- **PHY III** : verzia je vyvinutá tak, aby spĺňala požiadavky na rýchlosť prenosu dát od 12 Mbps do 96 Mbps. 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

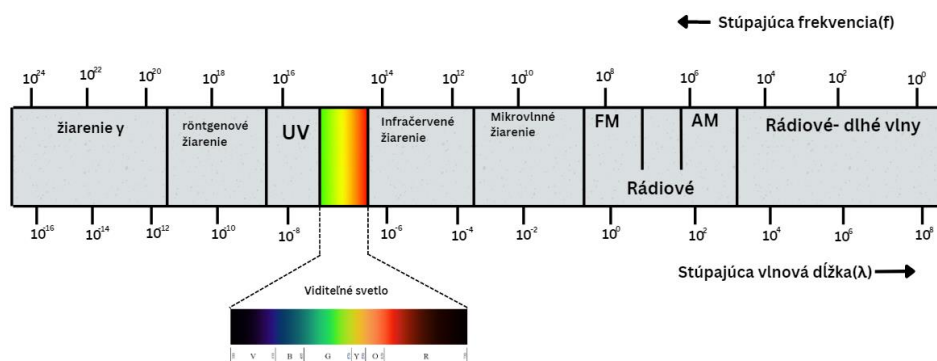
Parameter	Lifi	WiFi
Rýchlosť	do 224 Gb/s	do 1300 Mb/s
Spektrum	10000 širšie než WiFi	úzke
Hustota dát	vysoká	nízka
Bezpečnosť	vysoká, svetlo neprejde cez steny	menej bezpečná kvôli transparentnosti
Spoľahlivosť	stredná	stredná
Šírka pásma	široká vďaka spektru	nízka
Vyslaný/prijatý výkon	vysoký	stredný
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 fungovanie rádiové vlny, ktoré majú dlhšiu vlnovú dĺžku a sú pre človeka nepostrehnuteľné[10]. 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 nemocniciach, 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 drahé, obmedzené a menej bezpečné.



Obr. 4 Elektromagnetické spektrum

Keďže sme schopní vnímať viditeľné spektrum, tak je pre človeka úplne neškodné 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 lepšiu vlnovú dĺžku a frekvenciu, ktorá je užitočná pri prenose dát.

3.2 Interakcie svetla s atmosférou

[11] 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.

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 útlm optického 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)

$$\alpha_a(\lambda)N(x, t) = SgNP_a, \quad (3.3)$$

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

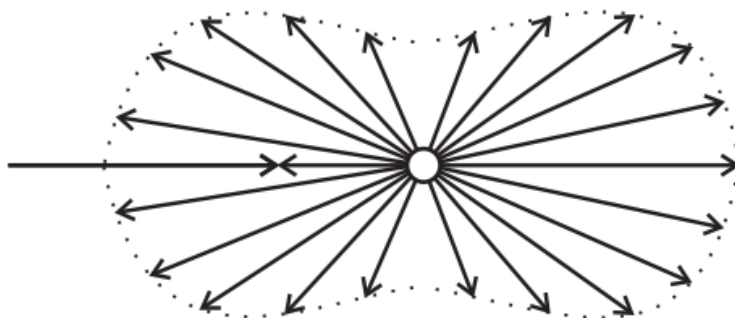
Rayleighov rozptyl je elastický, to znamená že pri ňom nedochádza k posunu vlnovej dĺžky dopadajúceho svetla[11]. Rayleighov rozptyl vzniká v dôsledku posunu slabo viazaných elektrónových oblakov, ktoré obklopujú molekuly plynu, ktorý je ovplyvnený dopadajúcim elektromagnetickým (optickým) poľom. Tento 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)

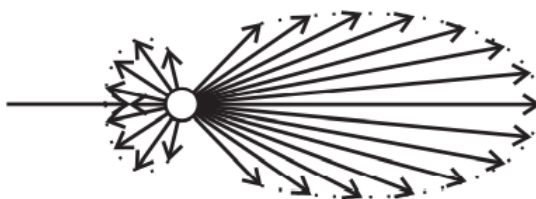
$$\alpha_R(\lambda)N(x, t) = N\sigma_R \quad (3.5)$$



[1] Obr.č.5.: Rayleighov rozptyl

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.



[1] Obr. 6 Mieho rozptyl

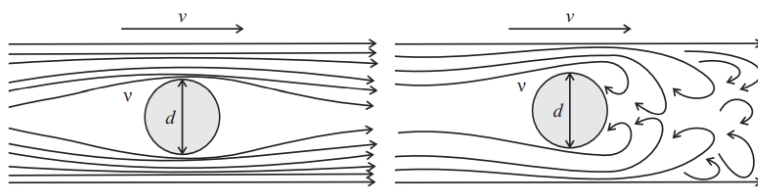
3.2.4 Atmosférické turbulencie

Prúdenie v atmosfére vzniká kvôli termálnym zmenám a nestálej rýchlosti vzduchu. Prúdenie plynov v atmosfére vychádza z prúdenia kvapalín a preto sa delí 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 $d [m]$ je priemer otvoru alebo vstupu cez ktorý lúč prúdi, $v [m \cdot s^{-1}]$ je rýchlosť ktorou vzduch prúdi a $\nu [m^2 \cdot s^{-1}]$ je viskozita vzduchu.

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.



[1] Obr. 7 Laminárne a Turbulentné prúdenie

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 pol šírka 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 napríklad 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 začínajú vyžarovať svetlo keď sa v ich polovodičovej dióde zmení úroveň energie. Táto zmena generuje fotóny, ktoré sú vysielané ako náš 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. Mikro-LED žiarovka môže prenášať 3,5 Gb/s a je možné

dosiahnuť rýchlosť prenosu dát viac ako 10 Gb/s. Mikro-LED žiarovky umožňujú paralelné vysielanie svetelného toku, čím prenášajú obrovské množstvo dát v Gb/s.

3.3.2 Vysielací čip

Bežné čipy ktoré podporujú PAM a ODFM moduláciu majú integrovanú jednotku na prevod signálu z digitálneho na analógový[7]. Takéto čipy vedia 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 poháňať aj LED diódy. Digitálne analógový prevodník má dve vetvy na ktorých môže pracovať. Ak použijeme obe, tak je možné poháňať až dve LED diódy na jeden prevodník za predpokladu, že každá svieti alebo preklika inou farbou. Toto zdvojnásobuje efektivitu a úroveň signálu. 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 funguje 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 funguje 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

[14]Modulácia v LiFi signáloch sa používa na kontrolovanie blikania LED diódy pri rôznych frekvenciách, ktoré obsahujú dáta ktoré chceme prenášať. 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 spomínané, tak LiFi funguje na systéme IM/DD a preto by tieto modulačné techniky mali najprv spĺňať požiadavky predtým, ako budú nasadené na LiFi. Napríklad, modulačné techniky by mali podporovať utlmené 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)

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-pozičná 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 uspokojené 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.

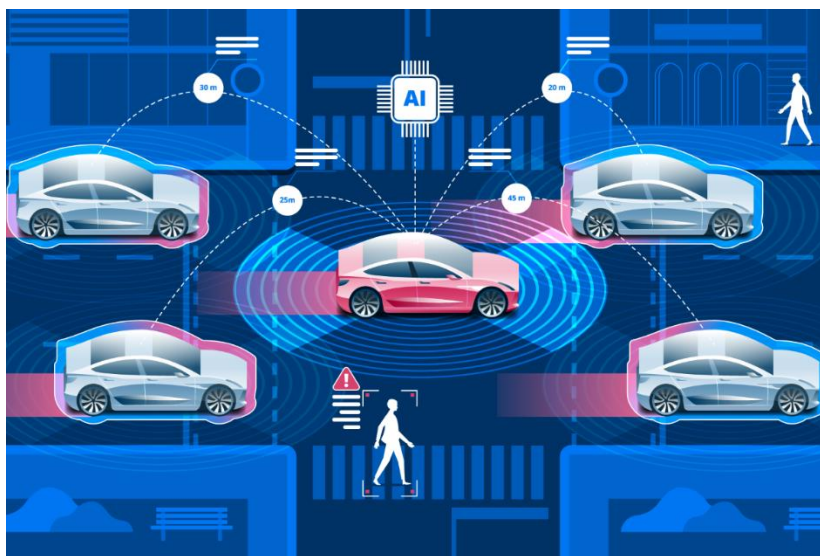
3.4.3 Farebné modulácie (CSK)

[16] 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) vytvárame rôzne farby, ktoré sú kódované ako informačné bity. Nevýhodou je, že sa značne zvyšuje zložitosť vysielačov a prijímačov.

4 Autonómne vozidlá

4.1 Čo je to autonómne vozidlo

Autonómne vozidlo je vozidlo, ktoré je schopné skenovať a vyhodnocovať svoje okolie a fungovať bez zasahovania vodiča[17]. Ľudský pasažier nemusí kedykoľvek prevziať kontrolu nad vozidlom, ani sa nevyžaduje, aby bol ľudský pasažier vôbec prítomný vo vozidle alebo zasahoval do riadenia. Autonómne vozidlo môže ísť kamkoľvek, kam ide tradičné vozidlo, a robiť všetko, čo robí ľudský vodič. 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. 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 v danom štáte. Tieto nariadenia sa samozrejme líšia od štátu k štátu, takže to znamená že autonómne vozidlo, ktoré môže jazdiť napríklad v Spojených štátoch nebude automaticky uznané v Európe a naopak.



[2] Obr. 9 Autonómne vozidlo

4.2 Úrovně autonómnosti

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

4.2.1 Úroveň 0 (Bez automatizácie)

Väčšina vozidiel na cestách je v súčasnosti na úrovni 0: ručne ovládané. Človek zabezpečuje riadenie vozidla, hoci môžu existovať systémy, ktoré vodičovi pomáhajú.

Príkladom môže byť systém núdzového brzdienia - keďže technicky vozidlo "neriadi", nepovažuje sa za automatizáciu.

4.2.2 Úroveň 1 (Asistencia vodiča)

Ide o najnižšiu úroveň automatizácie. Vozidlo je vybavené jediným automatizovaným systémom na asistenciu vodiča, napríklad 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 monitoruje ostatné aspekty jazdy, ako je riadenie a brzdienie.

4.2.3 Úroveň 2 (Čiastočná automatizácia jazdy)

To znamená pokročilé asistenčné systémy vodiča alebo ADAS. Vozidlo dokáže ovládať, zatáčať a aj riadiť zrýchľovanie/spomaľovanie. V tomto prípade automatizácia nedosahuje úroveň samostatnej jazdy, pretože na mieste vodiča sedí človek a môže 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 obrovský z technického hľadiska, 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)

Hlavný rozdiel medzi úrovňou 3 a 4 automatizácie spočíva v tom, že vozidlá úrovne 4 môžu zasiahnuť, ak sa niečo pokazí alebo dôjde k zlyhaniu systému. V tomto zmysle si tieto vozidlá za väčšiny okolností nevyžadujú ľudskú interakciu. Človek má však stále možnosť ručne ovládnuť vozidlo.

4.2.6 Úroveň 5 (Úplná automatizácia jazdy)

Vozidlá úrovne 5 si nevyžadujú ľudskú pozornosť - úloha vodiča je eliminovaná. Vozidlá úrovne 5 nebudú mať ani volant alebo pedále na zrýchlenie/brzdienie. Nebudú mať geografické obmedzenia, budú schopné ísť kamkoľvek a robiť čokoľvek, čo dokáže skúsený ľudský vodič. Plne autonómne autá

sa testujú vo viacerých častiach sveta, ale žiadne z nich ešte nie je k dispozícii širokej verejnosti.

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:

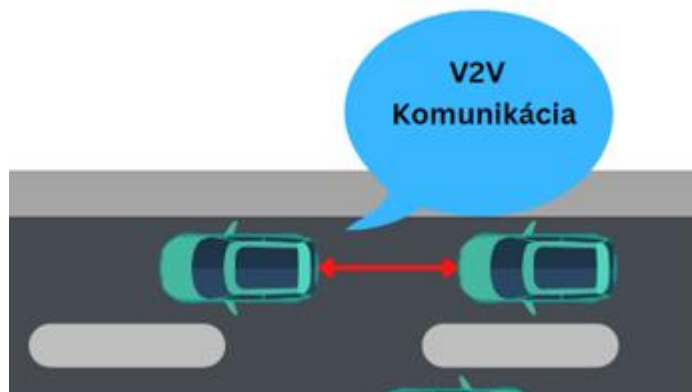
- vozidlo k sieti (V2N- Vehicle to network)
- vozidlo k infraštruktúre (V2I- Vehicle to infrastructure)
- vozidlo k vozidlu (V2V- Vehicle to vehicle)
- vozidlo k cloudu (V2C- Vehicle to cloud)
- vozidlo k chodcovi (V2P- Vehicle to pedestrian)
- vozidlo k zariadeniu (V2D -Vehicle to device)

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 jedna z najdôležitejších typov komunikácie nakoľko vysielače a prijímače spracúvajú svetlo, najčastejšie autá budú komunikovať pomocou svetlometov. Je to priamy spôsob podania komunikácie a môže byť obmedzená napríklad vzdialenosťou od udalosti na ktorú autá upozorňujú. Komunikácia medzi autami musí byť rýchla, pretože informácie predávané medzi vozidlami zodpovedajú za bezpečnosť cestujúcich. Preto je LiFi dobrým spôsobom komunikácie, nakoľko je rýchly, 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 vozidla
- zmeny jazdného pruhu
- poloha prevodového stupňa

- informácie týkajúce sa kontroly stability, kontroly trakcie
- informácie týkajúce sa bŕzd a proti-blokovacieho systému



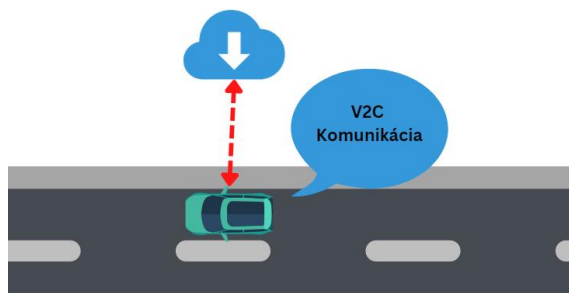
Obr. 10 V2V Komunikácia

5.2 V2C

Pojem V2C predstavuje komunikáciu medzi vozidlom a cloudom[20]. Cloud je server, ktorý slúži ako úložné alebo výpočtové stredisko ku ktorému sa používateľ dostane pomocou Internetu. Autonómne automobily cloud využívajú na spracovanie a výpočty z mnohých senzorov, ktorými sú autá vybavené, ale ako aj záznamy kamier ktorými sú tieto autá vybavené a nahrávajú aj počas toho ako je auto zaparkované. Autonómne autá potrebujú veľa úložného priestoru a výpočtovej sily a cloud je jednoduchým riešením. Komunikácia medzi vozidlom a cloudom (V2C) využíva prístup V2N k širokopásmovým mobilným sieťam na výmenu údajov s cloudom. 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 cloudu (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. Napríklad preferencie vodičov by sa mohli ukladať do cloudu 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 do podrobna prebrané technológie LiFi, čím sa odlišuje od konvenčných technológií, stavby vysielačov 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 jednoduchý 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

[22] [VirtualBox](#) je univerzálny plnohodnotný virtualizátor pre hardvér x86 určený na serverové, stolové a vstavané použitie. Tento softvér je zadarmo, ako aj má otvorený zdrojový kód pre každého na nahliadnutie. Tento softvér umožňuje používateľom vytvárať a spúšťať virtuálne počítače. Virtuálny počítač je počítačový systém, ktorý beží nad iným

operačným systémom, čím poskytuje virtualizované prostredie, ktoré možno použiť na spustenie viacerých operačných systémov súčasne.

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

[23] [Debian11](#) GNU/Linux je konkrétna distribúcia operačného systému Linux a početných balíkov, ktoré na ňom fungujú. 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 Unixe. Okrem jadra Linux poskytuje aj súborový systém, ktorý sa riadi štandardom FHS a taktiež širokú škálu unixových 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 Linuxu a pôsobí ako operačný systém, na ktorom bežia simulačné programy. Tento operačný systém je spustený ako virtuálny počítač vo vyššie spomínanom VirtualBoxe, čo je aplikácia bežiacia na počítači s operačným systémom Windows 11.

Dôvody pre výber Debianu 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++

[25]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.

Hlavnými komponentami OMNeT++ sú :

- Knížnica simulačného jadra (C++)
- Jazyk na opis topológie NED
- Simulačné IDE založené na platforme Eclipse
- Interaktívne grafické používateľské rozhranie pre beh simulácie (QtEnv)
- Rozhranie príkazového riadku na vykonávanie simulácie (CmdEnv)
- Nástroje (nástroj na vytváranie makefile atď.)

OMNeT++ poskytuje NED[27], čo je vlastný jazyk na opis topológie. Synax je jednoduchá a NED je veľmi výkonný, pokiaľ ide opis pravidelných topológií, ako je napríklad 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 spraviť grafy, je OMNeT++ široko 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[28] (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.

SUMO poskytuje nástroj s názvom NETEDIT(NetworkEditor)[29], čo je nástroj používaný ako na vytváranie vlastnej dopravnej siete ako aj upravovanie sietí z rozdielnych 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.

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

NET Framework[30] 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 napríklad bezdrôtové, drôtové, ad-hoc alebo mobilné. 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.

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.

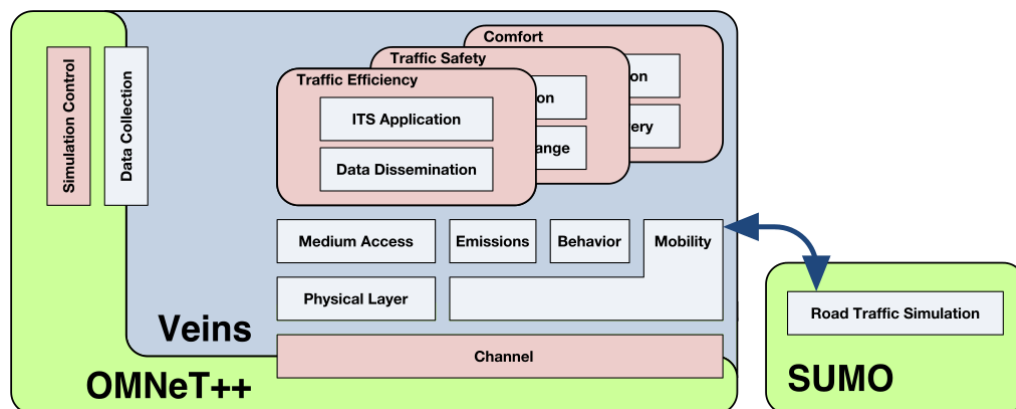
6.1.6 Veins

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 automobilov poskytovanú simulátorom SUMO s komunikačnými protokolmi poskytnutými rámcom INET. Ako INET, tak aj Veins je projekt v simulátore OMNeT++, no primárne funguje 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.



[3] Obr. 12 Veins

6.1.7 Veins VLC

Veins VLC (Visible Light Communication)[32] 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 vysielačov a prijímačov. Veins VLC obsahuje aj modely vplyvu okolitého svetla a rušenia na kvalitu komunikácie.

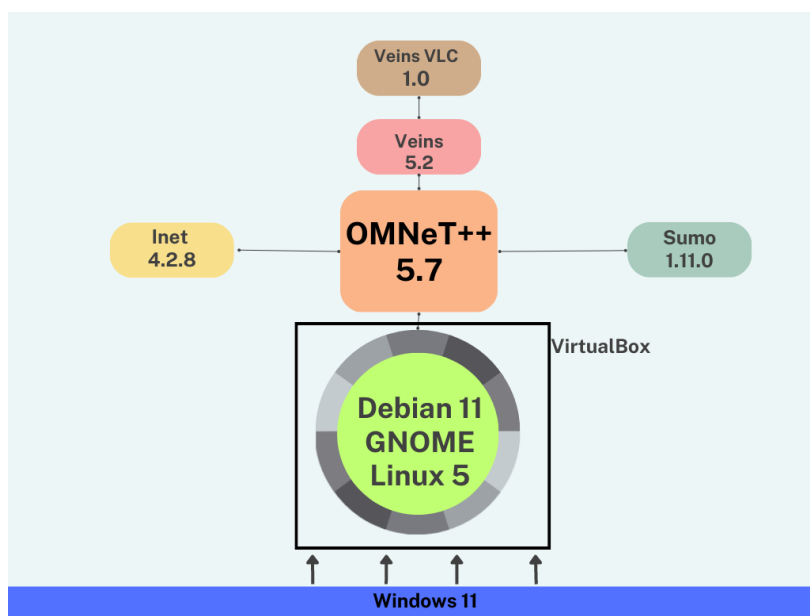
[33]Dôležitou časťou tohto rozšírenia pre Veins sú modely poklesu výkonu signálu so vzdialenosťou pri žiarení prednými a zadnými svetlometmi. Tieto hodnoty boli empiricky namerané pokusmi s reálnymi vozidlami a následne importované do tohto projektu.

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

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 a k funkčnosti potrebovalo všetky programy a ich rámce spomínané v predošlej podkapitole 6.1. Celé výsledné prostredie, ako aj vzťahy medzi programami a ich rámcami možno vidieť graficky znázornene na obrázku 13.



Obr. 13 Skladba simulačného prostredia

Ako je vyššie spomínané, tak celé prostredie je poskladané z ôsmich rôznych programov a rámcov vrátane základného operačného systému na ktorom je toto celé postavené. Prvé

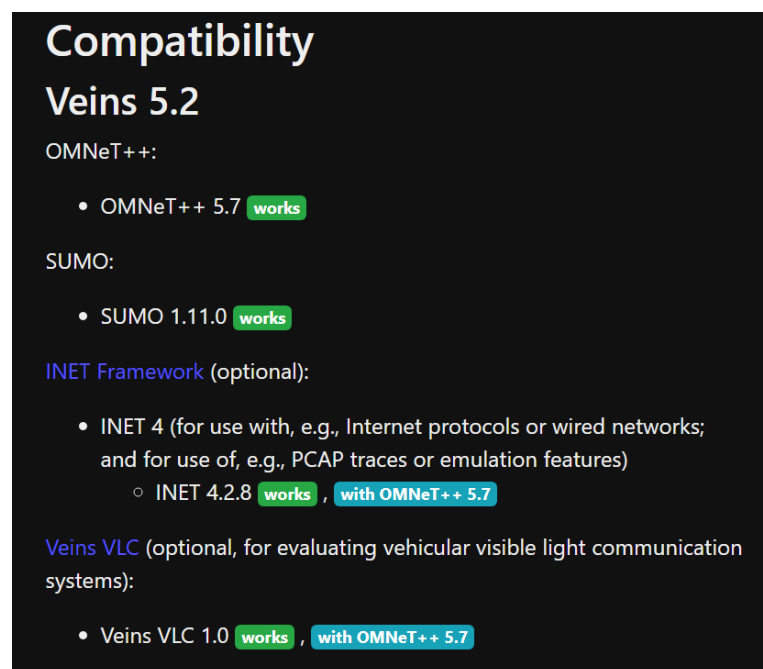
myšlienky boli spustiť OMNeT++ priamo na operačnom systéme Windows, no tam vznikali rôzne problémy ako s kompatibilitou, tak so spúšťaním základných ukázkových simulácií, ktoré majú slúžiť ako test, či sú moduly a rámce správne importované a schopné komunikácie medzi sebou. Na platforme Windows bol aj 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.



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].



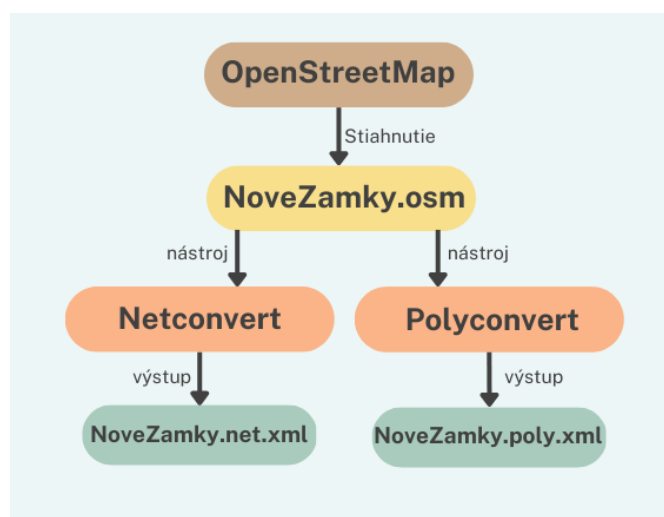
Obr. 15 Upravená verzia stránky o kompatibilite modulov

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 kompletne vytvorenie vlastnej mapy v nástroji Nedit, 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 semafore, 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 SUMO a slúžia na konvertovanie osm súborov na xml súbory, s ktorými vie SUMO pracovať. Logický sled konverzií na xml súbory možno vidieť na obrázku 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

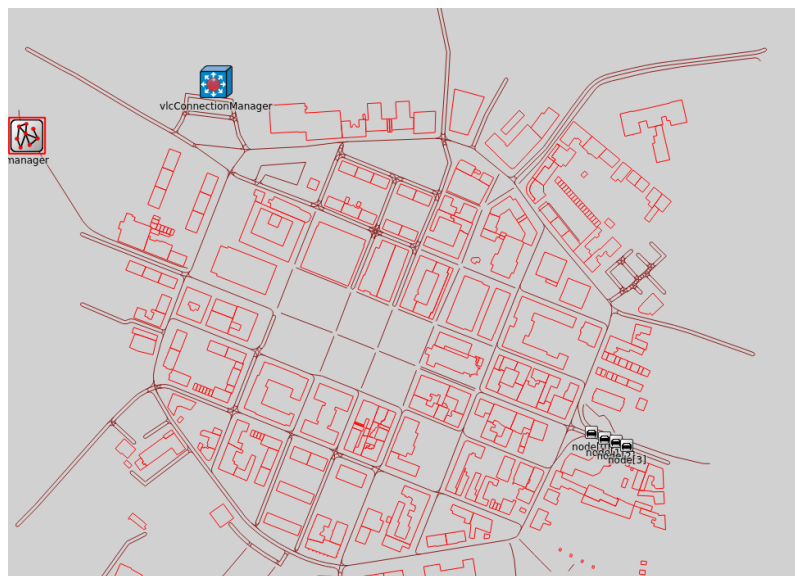
fungoval je nutné si vytvoriť súbor `typemap.xml` a vložiť doň vlastnosti všetkých typov polygónov čo SUMO podporuje. Tieto všetky polygóny sú dostupné na stránke SUMO manuálu [35].

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 SUMOm, takže ich treba špecifikovať v konfiguračnom súbore pre SUMO simuláciu v prostredí OMNeT++. Viac o prepojení SUMA a OMNeT++ v podkapitole 6.2.3.

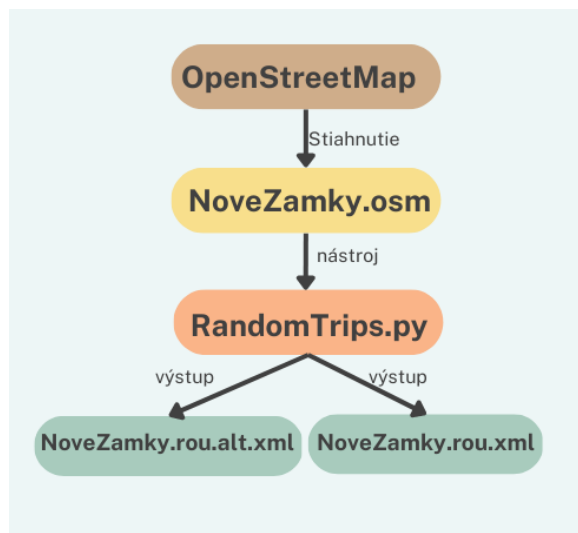


Obr. 17 Finálna verzia mapy

6.2.3 Mobilita

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

Premávka v SUME sa dá dosiahnuť dvoma spôsobmi. Prvým spôsobom je využitie python skriptu s názvom *randomTrips.py*. Tento skript je časťou SUMA, 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
```

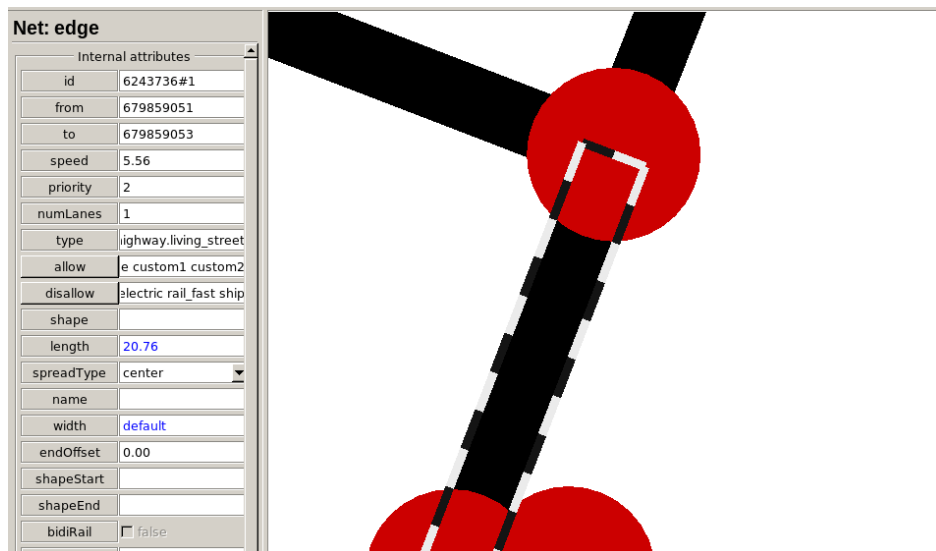
Ukážka 2 : Generovanie náhodnej premávky

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 aj je ich 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 dokopy celú trasu.



Obr. 20 Inšpekcia cesty v Netedit

Keďže nástroj Netedit poskytuje možnosť inšpekcie každej cesty, tak existuje možnosť priradenia špecifickej trasy vozidlu vložení 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.

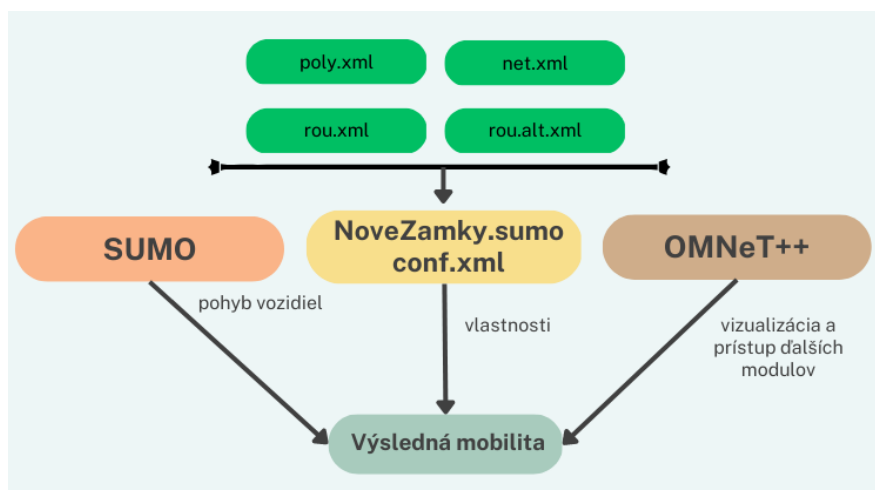
```
<!-- debug config -->
<launch>
  <copy file="NoveZamky.net.xml" />
  <copy file="NoveZamky.rou.xml" />
  <copy file="NoveZamky.rou.alt.xml" />
  <copy file="NoveZamky.sumo.cfg" type="config" />
  <copy file="NoveZamky.poly.xml" />
</launch>
```

Obr. 21 Obsah konfiguračného súboru NoveZamky.sumoconf.xml

Tento konfiguračný súbor je potom jeden z 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 so zvyškom. To je dosiahnuté pomocou python skriptu a SUMA. Príkaz na prepojenie je nutné použiť pred každou simuláciou. Tento príkaz možno aj zautomatizovať 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.

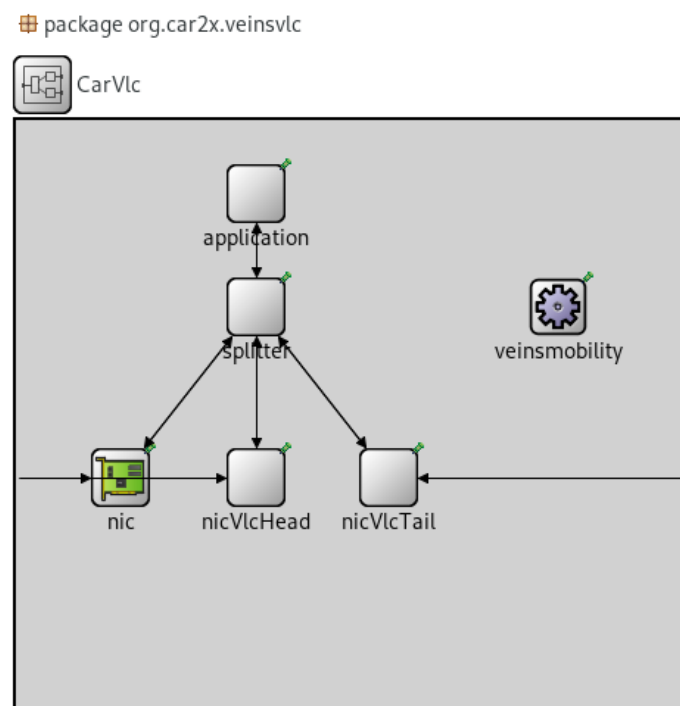
Dôležitým bodom je, že toto rozšírenie rámca Veins plne vyhovuje IEEE802.15.7, čo je protokol pre komunikáciu viditeľným svetlom ako médiom. Tento protokol určuje maximálnu veľkosť paketu na 8192B, PHR je 58bitov a PSDU 65 636 bitov. Taktiež podľa protokolu IEEE802.15.7 predpokladáme pre kanál V-VLC, 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 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 napríklad `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

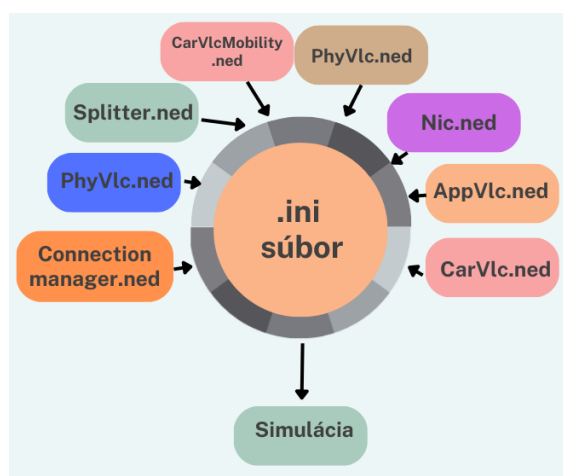
```

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, napríklad 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 napríklad 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

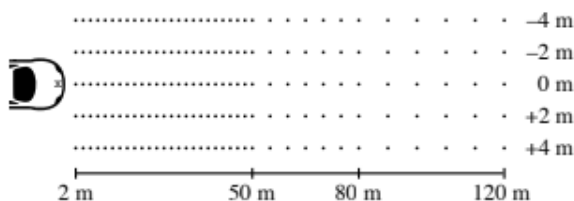
# LsvLightModel
*.node[*].nicVlcHead.phyVlc.radiationPatternId = "LbSedan1"
# other patterns: LbSedan2, LbSuv1, HbSedan1, HbSedan2
*.node[*].nicVlcTail.phyVlc.radiationPatternId = "DefaultRear"
*.node[*].nicVlc**.phyVlc.photodiodeId = "PDA100A"
*.node[*].nicVlcHead.phyVlc.photodiodeGroundOffsetZ = 0.6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

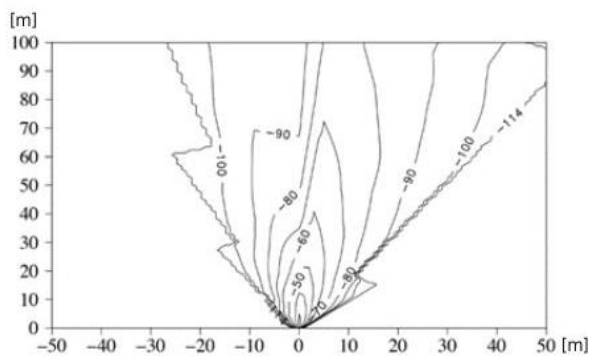
Ako možno vidieť na obrázku 25, rámec Veins VLC ponúka vlastný model svetiel, ktoré sú usporiadané ako anténa na vysielanie VLC signálu. [32] Tieto hodnoty nie sú od výrobcov aut, ale boli špecificky namerané pre tento simulačný nástroj na letisku v nemeckom meste Lippstad tímom výskumníkov z CCS Labs,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



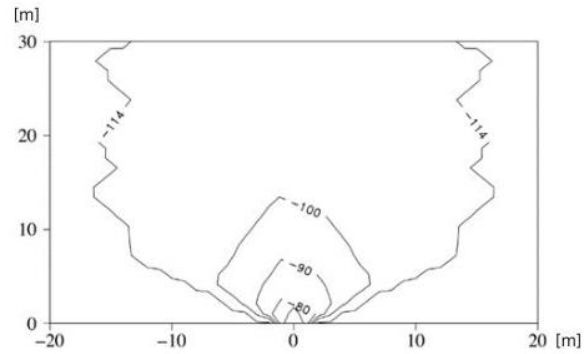
[32] Obr. 28 Pohľad na meranie výkonu signálu zo svetiel vozidla

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 reálnemu životu.



[33] Obr. 29 Pokles výkonu signálu predných svetiel



[33] Obr. 30 Pokles výkonu signálu zadných svetiel

Majorita programovania spomínala v programovaní aplikačnej vrstvy, kde je riešené samotné posielanie, prijímanie a vytváranie správ, ktoré si vozidlá budú vymieňať. Aplikačnú vrstvu tejto simulácie možno rozdeliť do 4 častí a to inicializácia, odoslanie správy, prijímanie a spracovanie správy, a napokon vytváranie správy.

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 konzole 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 Odosielenie správy

6.2.5 Scenár

Po pripravení a otestovaní komunikácie a mobility nasledovalo vytvorenie scenáru 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. Napríklad pri scenári s haváriou automobilov je samotná havária spúšťač a po havárii odklon dopravy je stále cestou scenára.

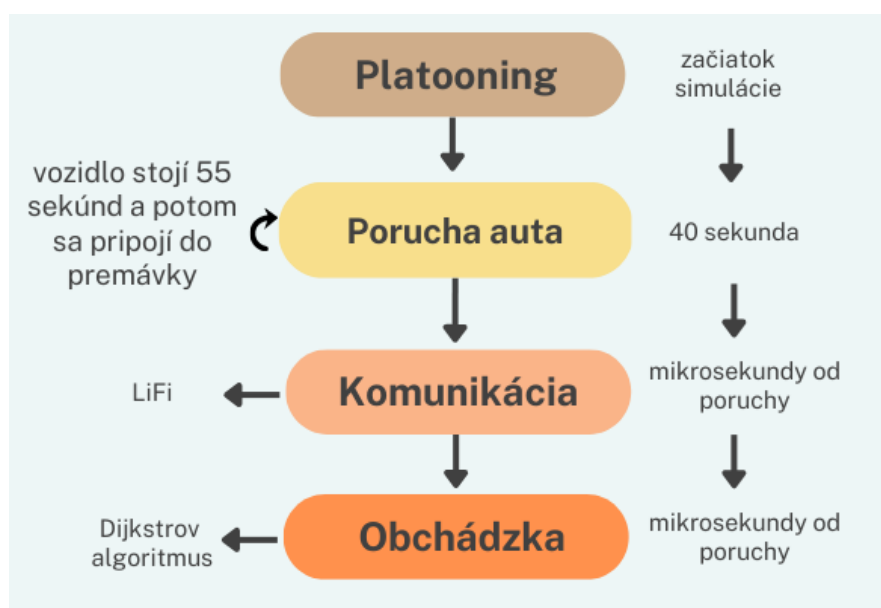
V zadaní tejto práce sa spomínajú dva typy komunikácií a to V2V a V2C, teda komunikácia medzi vozidlami na ceste a vozidlom a online cloudovým úložiskom. Preto sa v tejto práci budem venovať presne dvom scenárom, pre každý typ komunikácie bude práve jeden.

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 auto informovať všetkých účastníkov cestnej premávky v okolí. Zvyšné autá 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 sprava 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. Funguje tak, že po prijatí VLC správy sa spusti takzvaný presmerovač, čo je funkcia zo SUMA, 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.

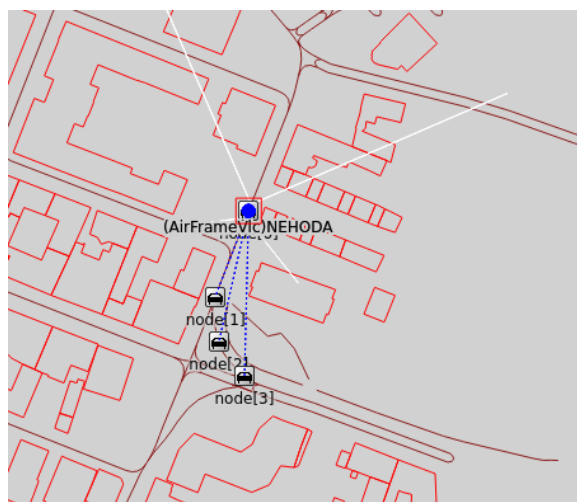
```

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 vozidiel

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.



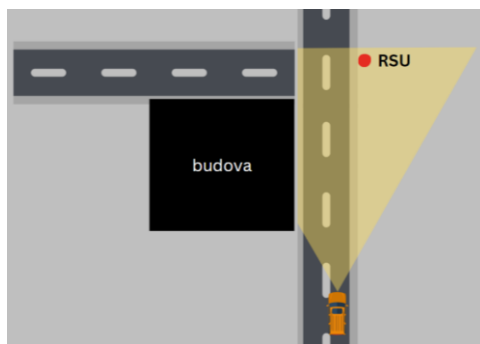
Obr. 38 Posielanie správy

V2C Scenár:

Komunikácia medzi vozidlami a cloudom pomocou technológie LiFi je teoreticky možná ale v praxi nie. Na dosiahnutie čistej LiFi komunikácie medzi vozidlom a cloudom 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.

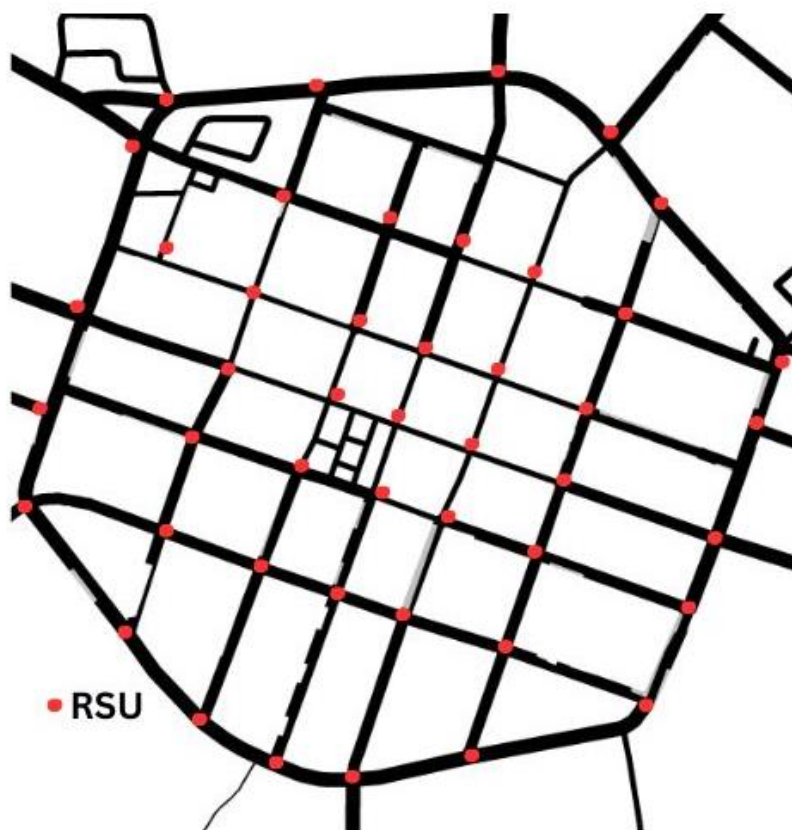
Jedinou možnosťou komunikácie je rozdelenie tejto trasy dát na rôzne technológie. Najväčší zmysel dáva LiFi komunikácia medzi vozidlom a RSU a bude mať prístup ku cloudu. S týmto ale prichádza viacero otázok. Keďže medzi RSU a vozidlom bude komunikácia prebiehať na baze LiFi, tak RSU musí byť v zornom 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 obrázku 39, 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 vysielateľ[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 vysielateľ a prijímač, tak osadenie RSU jednotiek v centre mesta by stálo nejakých 90 500 eur. S týmito jednotkami RSU vznikajú samozrejme ďalšie problémy, ako napríklad 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 uhľíčitým. 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

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 packet loss, v prípade tejto špecifickej simulácie, nakoľko celá komunikácia prebieha vyslaním jedného paketu o nehode zvýšným trom vozidlám, tak packet loss je pri tejto minimálnej komunikácii nulový, no pri simulácii väčšej premávky by samozrejme už bol nejaký packet loss pozorovateľný.

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.

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, napríklad 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 priam 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. Nadalej 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. Bolo sa venované 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

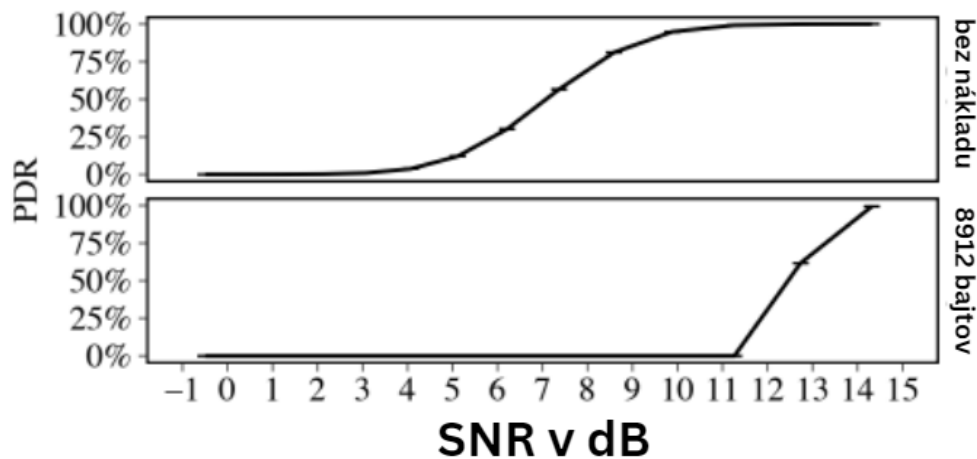
bud' podobnými simuláciami alebo priamo testovaním v reálnom živote. Všetky tieto štúdie slúžili ako teoretický základ ako pre analytickú, tak aj pre praktickú časť tejto práce.

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 vysielateľ nevytvára vnútornú interferenciu pre prijímač. Vysielač 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].



[32] Obr. 47 SNR

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 napríklad pravouhlé zákruty alebo nerovnosti na vozovke.

Keďže sa uvažuje o používaní svetlometrov vozidla ako antén, nastávajú 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 vyjavované skoro každým dňom. Na odstránení mnohých týchto nedostatkov sa už pracuje, no ešte to potrvá kým to bude použiteľné pre bežného človeka. 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, a LiFi by sa využívala v mestách, zápachach, proste ak by bola možná.

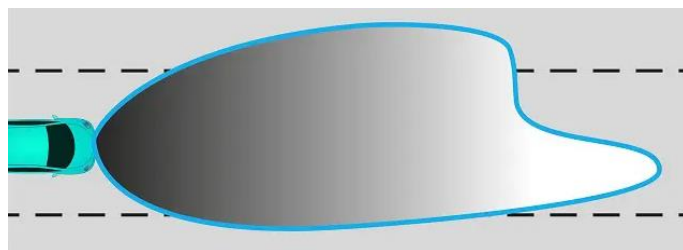
6.4 Minimalizovanie nevýhod

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 takzvaným boost obvodom, čo pridá ako na cene tak zložitosti antény. Zvýšením jasů 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 napríklad bezpečnosť očí okolitých 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.

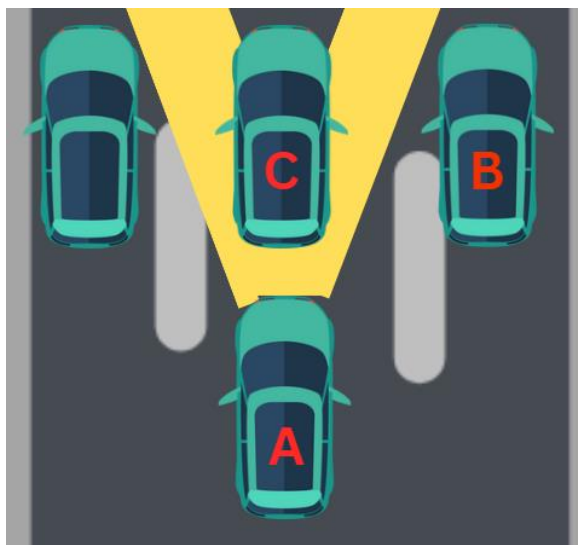
Asymetria osvetlenia: Ďalším problémom je fakt, že ideálne výsledky sú dosahované pri diaľkových svetlách. Prepínanie na stretávacie svetlá značne znehodnocuje signál. Ďalší problém je asymetria tohto lúča, pretože najlepšie osvetlenie nie je priamo pred svetlometom, ale je jeme posunuté doprava, pretože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



[4] Obr. 48 Intenzita iluminácie predného svetlometu

Možným riešením problémov ako nerovnomernej intenzity osvetlenia, ako aj prepínania diaľkových a stretávacích svetiel je riešiteľný takzvaným 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 najväčšia intenzita byť 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 obrázku 48.



Obr. 49 Problém vozidiel blízko pri sebe

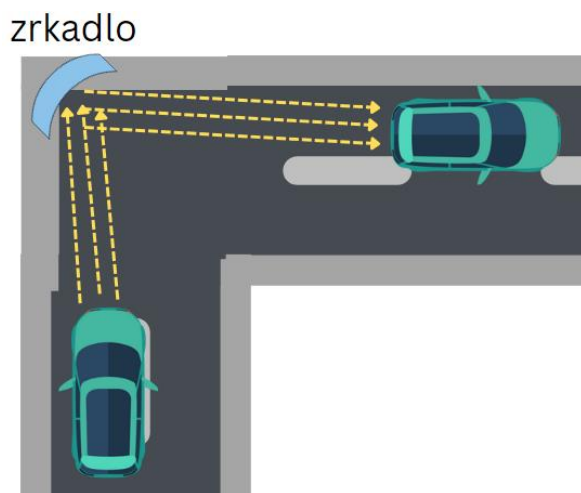
Na obrázku 48 je znázornený pokus o komunikáciu medzi vozidlami príliš blízko pri sebe. Vozidlo A sa snaží komunikovať s vozidlom B, no komunikácia nie je možná, nakoľko sú blízko pri sebe. Tento problém nastáva už pri uhloch väčších ako 20° , ak je vozidlo A 1 meter za vozidlom C.

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 napríklad 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

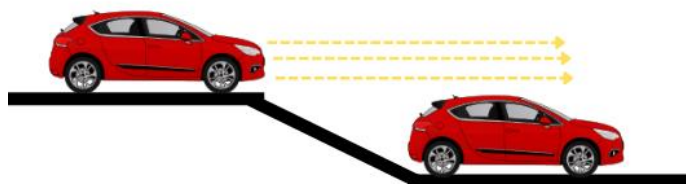
v noci. Keďže tento VLC signál, ktorý slnko vysiela nie je modulovaný, jeho elektrický výstup na prijímači je jednosmerný prúd a riešením je jednoduchý dolnopriepustný filter. Umelé svetlo z pozadia ma inú vlnovú dĺžku ako svetlo vysielané cez svetlomety, takže môže byť takisto odfiltrované. Počasie 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 auto 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 cloudom. V analytickej časti som sa venoval mojej osobnej motivácii a dôvodu pre ktorý som si 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 sa venujem tomu, čo je LiFi, čím sa odlišuje od zvyšku komunikačných protokolov, ako funguje 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 cloudom.

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 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] MoustafaHZhangYVehicular Networks: Techniques, Standards, and Applications, Auerbach Publications, Taylor and Francis Group, 450 pages, Ch. 2, 2009
- [2] R. Madli a G. Varaprasad, "A Review of Communication Handoffs in Vehicular Ad-Hoc Networks (VANET) and its Classification".
- [3] "Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs) - An Overview and Challenges", *Journal of Wireless Networking and Communications*, 2013.
- [4] S. Singh a S. Agrawal, "VANET routing protocols: Issues and challenges", v *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, mar. 2014, s. 1–5. doi: [10.1109/RAECS.2014.6799625](https://doi.org/10.1109/RAECS.2014.6799625).
- [5] A. Dahiya a D. R. K. Chauhan, "A Comparative study of MANET and VANET Environment", roč. 2, č. 7, 2010.
- [6] Laberteaux, K. and Hartenstein, H. eds., 2009. *VANET: vehicular applications and inter-networking technologies*. John Wiley & Sons.
- [7] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, a C. Chen, "What is LiFi?", *J. Lightwave Technol.*, roč. 34, č. 6, s. 1533–1544, mar. 2016, doi: [10.1109/JLT.2015.2510021](https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2510021).
- [8] Singh, R., O'Farrell, T. and David, J.P., 2013, December. Performance evaluation of IEEE 802.15. 7 CSK physical layer. In *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (pp. 1064-1069). IEEE.
- [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. In *2017 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)* (pp. 1-8). IEEE.
- [10] M. Sathiyarayanan, V. Govindraj, a N. Jahagirdar, "Challenges and opportunities of integrating Internet of Things (IoT) and Light Fidelity (LiFi)", v *2017 3rd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, Tumkur, dec. 2017, s. 137–142. doi: [10.1109/ICATCCT.2017.8389121](https://doi.org/10.1109/ICATCCT.2017.8389121).
- [11] Vitásek, I.J. (2014) 'Optické atmosférické komunikace'.
- [12] A. Sarkar a S. Agarwal, "Li-Fi Technology: Data Transmission through Visible Light", roč. 3, č. 6, 2015.

- [13] Goswami, P. and Shukla, M.K., 2017. Design of a Li-Fi transceiver. *Wireless Engineering and Technology*, 8(04), p.71.
- [14] R. George, S. Vaidyanathan, A. S. Rajput, a K. Deepa, “LiFi for Vehicle to Vehicle Communication – A Review”, *Procedia Computer Science*, roč. 165, s. 25–31, 2019, doi: [10.1016/j.procs.2020.01.066](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.066).
- [15] M. S. Islim a H. Haas, “Modulation Techniques for Li-Fi”.
- [16] S. Salvi a V. Geetha, “From Light to Li-Fi: Research Challenges in Modulation, MIMO, Deployment Strategies and Handover”, v *2019 International Conference on Data Science and Engineering (ICDSE)*, Patna, India, sep. 2019, s. 107–119. doi: [10.1109/ICDSE47409.2019.8971475](https://doi.org/10.1109/ICDSE47409.2019.8971475).
- [17] Y. Wiseman, “Autonomous Vehicles”:, v *Research Anthology on Cross-Disciplinary Designs and Applications of Automation*, I. R. Management Association, Ed. IGI Global, 2022, s. 878–889. doi: [10.4018/978-1-6684-3694-3.ch043](https://doi.org/10.4018/978-1-6684-3694-3.ch043).
- [18] P. Czech, “Autonomous vehicles: basic issues”, *SJSUT.ST*, roč. 100, s. 15–22, sep. 2018, doi: [10.20858/sjsutst.2018.100.2](https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.100.2).
- [19] A. Islam, M. T. Hossan, a Y. M. Jang, “Convolutional neural network scheme–based optical camera communication system for intelligent Internet of vehicles”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, roč. 14, č. 4, s. 155014771877015, apr. 2018, doi: [10.1177/1550147718770153](https://doi.org/10.1177/1550147718770153).
- [20] Hamad, M., Regnath, E., Lauinger, J., Prevelakis, V. and Steinhorst, S., 2021, February. Spps: secure policy-based publish/subscribe system for v2c communication. In *2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)* (pp. 529-534). IEEE.
- [21] Memedi, A. and Dressler, F., 2020. Vehicular visible light communications: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), pp.161-181.
- [22] <https://www.virtualbox.org/wiki/Documentation>
- [23] Dassen, J.H.M., Stickelman, C., Kleinmann, S. and Rudolph, S., 1996. The Debian GNU/Linux FAQ. *Free Software Foundation*.
- [24] <https://wiki.debian.org/Gnome>
- [25] <https://omnetpp.org/documentation/>
- [26] <https://help.eclipse.org/2022-12/index.jsp>
- [27] <https://doc.omnetpp.org/omnetpp/SimulationManual.pdf>
- [28] Lopez, P.A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P. and Wießner, E., 2018, November. Microscopic traffic simulation using sumo. In *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)* (pp. 2575-2582). IEEE.
- [29] <https://sumo.dlr.de/docs/Netedit/index.html>
- [30] <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>

- [31] Christoph Sommer, Reinhard German and Falko Dressler, "Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis," *IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)*, vol. 10 (1), pp. 3–15, January 2011.
- [32] Agon Memedi, Claas Tebruegge, Julien Jahneke and Falko Dressler, "Impact of Vehicle Type and Headlight Characteristics on Vehicular VLC Performance," Proceedings of 10th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2018), Taipei, Taiwan, December 2018. Best Paper Runner Up Award
- [33] Agon Memedi, Hsin-Mu Tsai and Falko Dressler, "Impact of Realistic Light Radiation Pattern on Vehicular Visible Light Communication," Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017), Singapore, Singapore, December 2017
- [34] <https://veins.car2x.org/download/>
- [35] <https://sumo.dlr.de/docs/Networks/Import/OpenStreetMap.html>
- [36] <https://www.atomia.com/press/atomia-adds-support-for-hybrid-cloud-hosting-with-aws-and-azure/>
- [37] <https://www.hyperiontechs.com/product/lifi-transmitter/>
- [38] Boban, M., Kousaridas, A., Manolakis, K., Eichinger, J. and Xu, W., 2018. Connected roads of the future: Use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications. *IEEE vehicular technology magazine*, 13(3), pp.110-123.
- [39] Willke, T.L., Tientrakool, P. and Maxemchuk, N.F., 2009. A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(2), pp.3-20.
- [40] [https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_\(SNR\)_and_Wireless_Signal_Strength#:~:text=Generally%2C%20a%20signal%20with%20an,Signal-to-Noise%20Ratio.](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_(SNR)_and_Wireless_Signal_Strength#:~:text=Generally%2C%20a%20signal%20with%20an,Signal-to-Noise%20Ratio.)

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 cloudom, ako aj práca samotná.

Link:

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

QR kód :



Príloha B

CD s nahratými konfiguračnými a zdrojovými kódmi