

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Směrovací algoritmy v sítích MANET
Routing Algorithms in MANET Networks

Rok 2019

Petr Ščurek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Ščurek**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie

Téma: **Směrovací algoritmy v sítích MANET**
Routing Algorithms in MANET Networks

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je srovnání efektivity směrovacích algoritmů v mobilních ad-hoc sítích (MANET). Tyto sítě rychle mění svou topologii v čase, což vyžaduje specifické přístupy ke strategii směrování. Podmnožinou jsou kupříkladu sítě VANET (Vehicular Ad-hoc NETWORK), kde lze nalézt praktické užití pro komunikaci mezi vozidly. Efektivita algoritmů bude zpracována v prostředí MATLAB a to minimálně pro směrovací protokoly AODV, DSR a OLSR.

1. Koncepty sítí MANET a VANET, jejich použití.
2. Technologie a protokoly užívané pro komunikaci mezi vozidly.
3. Směrovací algoritmy v MANET, jejich simulace a porovnání výkonnosti.
4. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

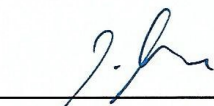
- [1] Hartenstein, H., Laberteaux, K. (2010). VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies, Wiley: 1st ed.
- [2] Kurmis, M, Andziulis, A., Dzemydiene, D., Jakovlev, S., Voznak, M., Drungilas, D. (2013). Development of the Real Time Situation Identification Model for Adaptive Service Support in Vehicular Communication Networks, In Journal Advances in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 11, Issue 5, 2013, pp. 342-348.
- [3] Gupta, A., Singh, R., Ather, D., Shukla, R.S. Comparison of various routing algorithms for VANETS (2017) Proceedings of the 5th International Conference on System Modeling and Advancement in Research Trends, SMART 2016, art. no. 7894509, pp. 153-157.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

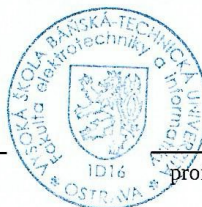
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty


Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Miroslavu Vozňákovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 29. dubna 2019

Podpis zástupce: 

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku sítí MANET, VANET a analýzu směrovacích protokolů. Pozornost budeme věnovat především DSR, OLSR a AODV protokolům. V teoretické části práce je popsán úvod do Ad-hoc sítí, základní informace o MANET a VANET sítí a popis vybraných směrovacích protokolů. Cílem praktické části bakalářské práce je implementace DSR, OLSR a AODV protokolu v prostředí MATLAB a jejich následné simulace, které jsou použity pro vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova

Ad-hoc síť, MANET, VANET, Směrovací protokol, DSR, OLSR, AODV, MATLAB, Simulace

Abstract

This bachelor thesis is focused on problems of MANET, VANET and routing protocols analysis. We will pay particular attention to DSR, OLSR and AODV protocols. The theoretical part describes the introduction to Ad-hoc networks, basic information about MANET and VANET network and description of selected routing protocols. The aim of the practical part of the thesis is the implementation of DSR, OLSR and AODV protocol in MATLAB and their subsequent simulations, which are used for evaluation of results.

Keywords

Ad-hoc Networks, MANET, VANET, Routing Protocol, DSR, OLSR, AODV, MATLAB, Simulation

Seznam použitých zkratek

AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
BSS	Basic Service Set
C2CCC	Car2Car Communication Consortium
CDMA	Code division multiple access
CSMA	Carrier Sensing Multiple Access
CSMA-CA	CSMA with Collision Avoidance
CSMA-CD	CSMA with Collision Detection
DBF	Distributed Bellman-Ford
DDoS	Distributed Denial of Service
DSDV	Distance Source Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EDR	Enhanced Data Rates
ETSI	European telecommunications standards institute
FCC	Federal communications commission
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GPRS	Greedy Perimeter Stateless Routing
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITS	Intelligent transport systém
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MATLAB	Matrix Laboratory
MPR	Multipoint relays
MPRS	Multipoint relays selector
OBE	On Board Equipment
OLSR	Optimized Link State Routing
RM-OSI	Reference Model - Open System Interconnection
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RSE	Road Side Equipment
SAODV	Secure AODV
SRP	Secure Routing Protocol
SSR	Signal Stability Routing
TDMA	Time Division Multiple Access
TMC	Traffic Management Center
TTL	Time-to-live
V2I	Vehicle To Infrastructure communication
V2V	Vehicle To Vehicle communication
V2X	Vehicle to everything
VANET	Vehicular Ad-hoc Network
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
WRP	Wireless Routing Protocol
ZHLS	Zone-based Hierarchical Link State
ZRP	Zone Routing Protocol

Obsah

Úvod	11
1. Úvod k Ad-hoc sítím	12
1.1. Síť Ad-hoc	12
1.1.1. Technologie využívající topologii Ad-hoc	12
1.1.2. Přístupové protokoly	13
1.1.3. Zabezpečení	13
1.1.4. Srovnání Ad-hoc sítí s klasickými sítěmi	14
2. Koncepty sítí MANET a VANET, jejich použití	15
2.1. Síť MANET	15
2.1.1. Vlastnosti	15
2.1.2. Směrovací protokoly	16
2.1.3. Využití sítí MANET	16
2.2. Síť VANET	16
2.2.1. Architektura sítě	17
2.2.2. Rozdělení podle směrování:	18
2.2.3. Využití sítí VANET	19
3. Technologie a protokoly využívané pro komunikaci mezi vozidly	20
3.1. IEEE 802.11p standard	20
3.1.1. Komunikační komponenty	20
3.1.2. WAVE	20
3.2. Ad-Hoc On-demand Distance Vector (AODV) protokol	21
3.2.1. Princip protokolu AODV	22
3.2.2. Výhody protokolu AODV	24
3.3. Optimized Link State Routing protokol (OLSR) protokol	24
3.3.1. Princip protokolu OLSR	25
3.4. Dynamic source routing (DSR) protokol	26
3.4.1. Princip protokolu DSR	26
3.5. Systém inteligentní dopravy (V2X)	28
3.5.1. V2V	28
3.5.2. V2I	28

4.	Simulace směrovacích algoritmů v prostředí MATLAB	29
4.1.	Úvod do prostředí MATLAB	29
4.2.	Implementace DSR protokolu	30
4.2.1.	Simulace protokolu DSR	30
4.2.2.	Zhodnocení simulace DSR protokolu	33
4.3.	Implementace OLSR	35
4.3.1.	Simulace OLSR protokolu	36
4.3.2.	Zhodnocení simulace OLSR protokolu	38
4.4.	Implementace AODV	41
4.4.1.	Simulace protokolu AODV	42
4.4.2.	Zhodnocení AODV protokolu	45
5.	Zhodnocení dosažených výsledků	48
	Závěr	49
	Použitá literatura	50

Seznam tabulek

Tabulka 1: Pole pro ROUTE REQUEST zprávu v AODV protokolu	23
Tabulka 2: Pole pro ROUTE REPLY zprávu v AODV protokolu	23
Tabulka 3: Pole pro ROUTE REQUEST zprávu v DSR protokolu.....	27
Tabulka 4: Vyhodnocení první simulace DSR protokolu	33
Tabulka 5: Vyhodnocení druhé simulace DSR protokolu.....	34
Tabulka 6: Vyhodnocení třetí simulace DSR protokolu	34
Tabulka 7: Souhrn výsledků vyhodnocených simulací DSR protokolu.....	35
Tabulka 8: Uzly vzdálené 2 skoky od MPRS v simulaci OLSR protokolu (50 vozidel, R=15)	38
Tabulka 9: Vyhodnocení první simulace OLSR protokolu.....	39
Tabulka 10: Vyhodnocení druhé simulace OLSR protokolu	40
Tabulka 11: Vyhodnocení třetí simulace OLSR protokolu.....	40
Tabulka 12: Souhrn výsledků vyhodnocených simulací OLSR protokolu	41
Tabulka 13: Vyhodnocení první simulace AODV protokolu	46
Tabulka 14: Výsledek druhé simulace AODV protokolu	46
Tabulka 15: Výsledek třetí simulace AODV protokolu.....	47
Tabulka 16: Souhrn výsledků vyhodnocených simulací AODV protokolu.....	47

Seznam obrázků

Obrázek 1: Sousední uzly v AODV protokolu.....	22
Obrázek 2: Ukázka AODV protokolu.....	24
Obrázek 3: MPR v protokolu OLSR [10]	25
Obrázek 4: Ukázka OLSR protokolu	26
Obrázek 5: Ukázka DSR protokolu.....	27
Obrázek 6: Náhled obrazovky v prostředí MATLAB r2017b [12].....	29
Obrázek 7: Simulace DSR pro 15 vozidel, R=25.....	30
Obrázek 8: Výsledek hledané cesty DSR protokolu pro 15 vozidel, R=25	31
Obrázek 9: Simulace DSR pro 30 vozidel, R=20.....	31
Obrázek 10: Výsledek hledané cesty DSR protokolu pro 30 vozidel, R=20	32
Obrázek 11: Simulace DSR pro 50 vozidel, R = 15.....	32
Obrázek 12: Výsledek hledané cesty DSR protokolu pro 50 vozidel, R=15	33
Obrázek 13: Simulace OLSR pro 15 vozidel, R=25	36
Obrázek 14: Simulace OLSR pro 30 vozidel, R=20	37
Obrázek 15: Simulace OLSR pro 50 vozidel, R=15	38
Obrázek 16: Simulace AODV pro 15 vozidel, R=25.....	42
Obrázek 17: ROUTE REPLY zprávy AODV protokolu pro 15 vozidel, R=25	42
Obrázek 18: Výsledek hledané cesty AODV protokolu pro 15 vozidel, R=25.....	43
Obrázek 19: Simulace AODV pro 30 vozidel, R=20.....	43
Obrázek 20: ROUTE REPLY zprávy AODV protokolu pro 30 vozidel, R=20	44
Obrázek 21: Finální cesta AODV protokolu pro 30 vozidel, R=20.....	44
Obrázek 22: Simulace AODV protokolu pro 50 vozidel, R=15	44
Obrázek 23: ROUTE REPLY zprávy AODV protokolu pro 50 vozidel, R=15	45
Obrázek 24: Finální cesta AODV protokolu pro 50 vozidel, R=15.....	45

Úvod

V bezdrátových sítích a jejich vývoji dochází k rozvoji, který je zapříčiněn převážně Wi-fi sítí. Z důvodu nových komunikačních modelů a systémů, kde samotné zařízení (popř. uživatelé) slouží k funkčnosti sítě, již Wi-fi nevyhovuje požadavkům mobility, například z důvodu malého využití spektra. Mezi komunikační systémy, které jsou označovány za mobilní, patří například síť MANET (Mobile Ad-hoc Network). Mobilní síť MANET komunikují díky bezdrátové technologii, uživatelé nejsou omezováni svou polohou, nebo jakoukoliv změnou, jedná se o takzvaný autonomní systém. Systém bezdrátově komunikuje s několika uzly v jakémkoliv místě a čase. V MANET je díky mobilitě uzlů však složitější bezpečnost. Podmnožinou mobilních Ad-hoc sítí MANET jsou síť VANET (Vehicular Ad-hoc Network), které slouží pro komunikaci mezi vozidly. VANET síť se převážně využívají pro zjištění informací pro bezpečný provoz.

V teoretické části této bakalářské práce se budeme zabývat základním konceptem MANET a VANET sítí. Dále se zaměříme na technologie a protokoly používané pro komunikaci mezi vozidly.

Cíl praktické části je zaměřen na směrovací algoritmy v sítích MANET, jejich implementace, simulace a vyhodnocení výsledků. Implementace a následná simulace směrovacích protokolů AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector protocol), DSR (Dynamic Source Routing protocol) a OLSR (Optimized Link State Routing protocol) je vytvořena v prostředí MATLAB. V předposlední kapitole bakalářské práce je provedena simulace jednotlivých protokolů a jejich následné zhodnocení pro různý počet uzlů. Poslední kapitola se zabývá porovnáním výsledků mezi jednotlivými protokoly a jejich zhodnocení.

1. Úvod k Ad-hoc sítím

V kapitole si objasníme základní informace o Ad-hoc sítích. Dále si uvedeme příklady nejznámějších technologií, které využívají topologii Ad-hoc. Následně si rozdělíme přístupové protokoly a zabezpečení sítě. V závěru kapitoly porovnáme klasickou síť a Ad-hoc síť.

1.1. Síť Ad-hoc

Jedná se o typ počítačové sítě, která má komunikační linky bezdrátové, tudíž neexistuje řídicí centrální jednotka oproti infrastrukturní síti. V síti typu Ad-hoc jsou si všechny připojené stanice rovny, tudíž postrádají základnovou stanici a nenachází se tady i žádný přístupový bod, který by řídil síť. To tedy znamená, že všechny stanice mohou komunikovat mezi sebou navzájem. Další vlastností je, že síť není trvalá. Rozhodnutí o přeposílání dat záleží na podobě dynamicky založené sítě. První využívání sítě Ad-hoc sloužilo k propojení nepohyblivých stanic, které musely být ve vzdálenosti dovolující vzájemnou komunikaci. V dnešní době je kladen důraz, aby byla síť co nejvíce mobilní s minimální konfigurací. Možný pohyb stanic (terminálů) zapříčiňuje to, že stanice, které spolu komunikovali díky mobilitě a změně topologie, nemusí být trvale v komunikačním dosahu. Po rozpojení komunikace může nastat to, že se stanice může přiblížit k jiné stanici natolik blízko, aby mohla začít další komunikace. Zmíněná povaha sítě je vhodná například pro různé aplikace, které se nemohou spoléhat na centrální stanici. Tímto se i zlepšuje rozšiřitelnost sítě. Typy bezdrátových Ad-hoc sítí zahrnují technologie bezdrátové mesh sítě, bezdrátové senzorové sítě a MANET technologie (Mobile Ad-hoc network). MANET síť kombinují mobilitu stanic (uživatelů) a topologii Ad-hoc sítě. [4, 6]

1.1.1. Technologie využívající topologii Ad-hoc

Mezi nejznámější technologie patří například Wi-fi, které je založeno na standardu 802.11, nebo Bluetooth, které je založeno na standardu 802.15. Uvedené technologie využívají ad hoc topologii.

Wi-fi

Jedná se o bezdrátovou síť sloužící pro síť s malým dosahem (desítky metrů). Wi-fi poskytuje vysokou přenosovou rychlost pro uživatele. Běžně používané maximální rychlosti jsou až 54 Mbit/s podle standardu IEEE 802.11a/g. Standard IEEE 802.11n, který se také v dnešní době využívá, dosahuje přenosové rychlosti až 300 Mbit/s. Hlavní předností Wi-fi jsou její pásma, které jsou v bezlicenčním kmitočtovém pásmu ISM (Industrial, Scientific and Medical) a také nízká cena. Jedná se o pásma v okolí 2,4 GHz a 5 GHz. Pásmo 2,4 GHz je v rozsahu od 2,4 GHz až po 2,484 GHz a obsahuje pro Evropské země 13 kanálů, které mají šířku pásma 22 MHz. V Spojených státech amerických je využíváno 11 kanálů. Pro nepřekrývání kanálů se mohou využít pouze 3 kanály, které se navzájem neruší. Pásmo 5 GHz je rozděleno na tři sub-pásma, které jsou v rozsahu od 5150 MHz až po 5450 MHz. Na druhé vrstvě RM-OSI (Reference Model - Open System Interconnection) se nachází vrstva MAC (Medium Access Control) společně s LLC (Logical Link Control) částí, které jsou definovány standardy IEEE 802.11.

Bluetooth

Pro bezdrátovou komunikaci, která je na krátkou vzdálenost, se využívá Bluetooth technologie, která se vyznačuje nízkou cenou a nízkým vysílacím výkonem. U základního typu Bluetooth je přenosová rychlost až 1 Mbit/s. Bluetooth 2.0, které díky EDR (Enhanced Data Rates), má přenosovou rychlost zvýšenou až na 3 Mbit/s. Bluetooth v3.0 + High speed (HS) využívá frekvenční pásma, které jsou určeny pro Wi-fi a má přenosovou rychlost až 24 Mbit/s. Verze Bluetooth v4.0 LE (Low Energy) má naopak nízkou spotřebu energie.

1.1.2. Přístupové protokoly

Při navrhování sítě Ad-hoc musíme vhodně použít přístupové protokoly. Hlavním úkolem použití přístupových protokolů je co nejefektivnější využití přenosového média, řízení přístupu k rádiovému kanálu a v co největší míře zamezení kolizí během vysílání. V bezdrátových sítích jsou nejčastěji přístupové metody založeny na CSMA (Carrier Sensing Multiple Access) metodě, která prověřuje, jestli je potřebné médium právě volné, nebo musí vyčkat do doby, než se médium uvolní. Jestliže je médium volné, uživatel vyšle data. Kvůli zmenšení pravděpodobnosti kolize vznikly metody CSMA-CD (CSMA with Collision Detection) nebo CSMA-CA (CSMA with Collision Avoidance). Přístupové protokoly můžeme dále rozdělit na protokoly, které jsou „beze sporu“, nebo musí soupeřit o přístup k médiu.

Protokoly, které soupeří o médium

Jedná se o protokoly, které přistupují k médiu okamžitě, když mají k dispozici data k odeslání. Protokoly jsou založeny na ALOHA přístupu, kde hrozí vzniknutí kolize v případě, že více uživatelů může využít médium ve stejný čas. Tato metoda je příliš omezená a není vhodná pro větší počet uživatelů.

Protokoly beze sporu o médium

Jedná se o protokoly, které jsou contention-free (beze sporu), liší se v tom, že oproti protokolům, které soupeří o přístup k médiu, mají uživatelé přiřazeny časové okamžiky, kdy mohou přijímat data (Time Division Multiple Access – TDMA), nebo jsou odděleny pomocí kódů (Code division multiple access – CDMA). Popřípadě je přístup oddělen pomocí odlišného frekvenčního pásma (Frequency Division Multiple Access - FDMA). Další použití přístupových protokolů zajišťuje metoda „token ring“, která se využívá například v technologii Bluetooth, protože zajišťuje vysokou kvalitu služby. Kvalita je zapříčiněna postupným střídáním uživatelů a tím je zabráněno kolizím.

1.1.3. Zabezpečení

Pro co nejlepší zabezpečení komunikace v síti se využívají metody symetrických a asymetrických klíčů. V sítích s nedostatečnou infrastrukturou se asymetrické metody obtížně využívají. Nejčastěji se využívají protokoly SRP (Secure Routing Protocol) a SAODV (Secure AODV). Pro zabezpečení komunikace musí být uživatel při vstupu do sítě ověřen. Informace musí být chráněny proti jakémukoliv zneužití a data se nemohou měnit v průběhu přenosu.

Mezi nejčastější útoky patří získání důvěrné informace odposlechem a její zneužití, dále pak přístup ke konfiguračním datům, které pak útočník může upravovat, nebo DDoS (Distributed Denial of Service), který díky rušení zabraňuje jakékoli komunikaci.

1.1.4. Srovnání Ad-hoc sítí s klasickými sítěmi

Klady

Sítě jsou jednodušší pro jejich snadné vybudování, konfiguraci a instalaci z důvodu absence centrálních řídicích uzlů. Síť je možno vybudovat všude, kde jsou zrovna potřebné, protože se jedná o zabezpečení komunikace mezi jednotlivými uzly.

Zápory

Komunikace probíhá jen s uzly, které jsou v dosahu (jedná se pouze o přímou komunikaci podle původní definice). Síť vyžaduje vysoké nároky na bezpečnost přenosu. U MANET sítí se kvůli časté změně topologie musí aktualizovat informace. Tyto aktualizace přináší informace na úkor přenosových prostředků sítě.

2. Koncepty sítí MANET a VANET, jejich použití

V kapitole si rozdělíme MANET a VANET sítě, jejich vlastnosti, rozdělení, architekturu sítě a možnost jejich využití.

2.1. Sítě MANET

Bezdrátové sítě MANET nezávisí na již existující infrastruktuře. Závisí na volně se pohybujících uzlech, které jsou si rovny a mohou spolu ve volné topologii komunikovat mezi sebou. Topologie v síti je dynamická, kvůli náhodnému přibývání a ubírání uzlů na určité šířce pásma. MANET sítě mohou pracovat samostatně v autonomním režimu, nebo mohou být propojeny s pevnou sítí pomocí bran. Uzly v této síti mají antény, které mohou být směrové (point to point), všesměrové (broadcast), říditelné, nebo kombinované. V této síti se mohou data posílat přes více uzlů v síti. Jedná se o komunikaci přes více skoků (multihop communication), což dává výhodu delší vzdálenosti mezi uzly. Podmínka je taková, že musí být dostatečný počet dalších zařízení, aby mohly přeposlat data cílovým uzlům.[8, 13]

2.1.1. Vlastnosti

Dynamická topologie

Libovolný pohyb uzlů, které se mohou také volně pohybovat. V určitém čase se topologie sítě může rychle a náhodně měnit a spojení se může skládat z jednosměrných, nebo obousměrných spojení.

Energeticky omezený provoz

Hlavní předností při návrhu systému je úspora energie, protože uzly využívají baterie, popřípadě jiné vyčerpatelné zdroje energie.

Omezená fyzická bezpečnost

Oproti pevným kabelovým sítím je v mobilních bezdrátových sítích větší riziko k bezpečnostním hrozbám jako jsou např. útoky na odmítnutí služby DDOS, falšování zpráv, nebo zvýšené riziko odposlechů. Díky decentralizované struktuře zde nastává výhoda oproti klasickým sítím.

Proměnlivá kapacita spojů a omezená šířka pásma

V bezdrátovém spojení je maximální reálná přenosová rychlost menší než teoretická přenosová rychlost, protože musíme brát v úvahu mnohonásobný přístup (Media Access Control), slábnutí signálu, zohlednění šumu a podobně. Když je přenosová kapacita nízká, může způsobit přetížení komunikačních kanálů.

2.1.2. Směrovací protokoly

Protokoly, které slouží pro sítě MANET se rozdělují na tři základní kroky. V prvním kroku je důležité najít optimální cestu mezi zařízeními, které si mezi sebou vyměňují data pomocí nejrozšířenějšího flooding (zaplavujícímu) algoritmu. K sestavení cesty slouží paket RREQ (Route Request), který vysílá zdrojová zařízení. Cílová zařízení po obdržení paketu vygeneruje RREP (Route Reply) paket, který se odešle zpět zdrojovému zařízení. V druhém kroku je výběr co nejefektivnější cesty pro směrování dat. Poslední třetí krok slouží k údržbě vybrané cesty, nebo nalezení nové cesty, pokud z důvodu mobility už daná cesta není k dispozici. Směrovací protokoly se dělí na proaktivní, reaktivní a hybridní.

Proaktivní protokoly

Proaktivní (tabulkové) protokoly pravidelně aktualizují informace o stavu sítě. Tyto informace jsou uloženy v tabulkách pro každé zařízení. V případě výpadku je díky informacím známá cesta a není zde zpoždění pro hledání nové cesty. Mezi tyto protokoly patří OLSR (Optimized Link State Routing), DSDV (Distance Source Distance Vector), DBF (Distributed Bellman-Ford), nebo WRP (Wireless Routing Protocol).

Reaktivní protokoly

Reaktivní (na vyžádání) protokoly pomáhají najít cestu až v okamžiku, kdy chce stanice poslat data, oproti proaktivním protokolům, které pravidelně získávají informace. Nevýhodou však může být vzniknutí zpoždění hned na začátku přenosu. Mezi tyto protokoly se řadí například AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector) nebo SSR (Signal Stability Routing), popřípadě DSR (Dynamic Source Routing).

Hybridní protokoly

Hybridní protokoly jsou kombinací výhod proaktivních a reaktivních protokolů. Mezi tyto protokoly patří například ZHLS (Zone-based Hierarchical Link State), nebo ZRP (Zone Routing Protocol).

2.1.3. Využití sítí MANET

Technologie nachází uplatnění pro vojenské účely, pohotovostní služby (policejní či záchranné operace), univerzitní sítě až po soukromé odvětví.

2.2. Sítě VANET

Jedná se o komunikační technologii využívanou v dopravě, která je založená na Ad-hoc sítích (Vehicular Ad-hoc Network, VANET). Technologie využívá uzly (vozidla) pro vytvoření sítě. Propojené uzly spolu mohou komunikovat, pokud jsou v komunikačním dosahu svých bezdrátových sítí a vytvořit síť ještě s větším rozsahem než je u sítí MANET. Oproti sítím MANET, kde se uzly pohybují libovolně a nepředvídatelně, se uzly v sítích VANET pohybují organizovaným způsobem. Pohyb je definován jako pohyb po silnicích a dálnicích a nejlépe odpovídá mřížkovému typu pohybu.

Pohyby síťových uzlů jsou předpověditelného průběhu. Další možností VANET sítí je například poskytnutí uživatelům připojení k internetu i na cestách. Od roku 2004 se sjednotily velké automobilové společnosti (Audi, BMW, Fiat a další) k vytvoření neziskové organizace nazvané Car2Car Communication Consortium (C2CCC), která se zaměřuje na zvyšování bezpečnosti silničního provozu a lepší komunikaci mezi vozidly. IEE vytvořila standard IEEE 802.11p, který se zaměřuje k poskytnutí bezdrátového přístupu vozidlům. [2, 3]

2.2.1. Architektura sítě

Hlavním požadavkem směrovacích protokolů je navázání komunikace za co nejkratší čas a s minimální spotřebou síťových prostředků. Některé protokoly, které byly vyvinuty pro mobilní síť Ad-hoc (MANET), mohou být aplikované přímo na VANET síť. VANET síť se odlišuje od MANET sítí z důvodu rychlého pohybu vozidel a dynamické výměně informací, což klade vysoké nároky na udržování tras. Architektura VANET se dále dělí na tři kategorie.[17]

Čistá celulární/WLAN síť

Využívání pevných celulárních bran a WLAN přístupových bodů, které jsou umístěné na dopravních křižovatkách pro připojení k síti a získávání informací o dopravě. Mezi hlavní nevýhody patří vysoké náklady na pořízení bran a přístupových bodů.

Čistá Ad-hoc síť

Komunikace je zprostředkována propojením vozidla s jiným vozidlem. Mezi nevýhody patří vznik takzvaného slepého místa, kde vozidlo nemůže navázat komunikaci s dalším vozidlem.

Hybridní síť

Jedná se kombinaci celulární/WLAN sítě a Ad-hoc sítě. Kromě podobností s Ad-hoc sítěmi, jako jsou například krátký rozsah rádiového přenosu, samoorganizace a samospráva, mohou být VANET síť odlišeny od jiných druhů Ad-hoc sítí následovně:

1. Vysoce dynamická topologie

Vzhledem k vysoké rychlosti pohybu mezi vozidly se topologie VANET stále mění. Předpokládejme například, že dosah bezdrátového přenosu každého vozidla je 250 m, takže spojení existuje, pokud vzdálenost mezi těmito vozidly je menší než 250 m.

2. Časté odpojování od sítě

Připojení se může často měnit, zejména pokud je hustota provozu nízká. Jedno z možných řešení je rozmístění několika přístupových bodů blízko silnice, aby se zajistila konektivita.

3. Dostatečná energie a skladování

Společnou charakteristikou uzlů ve VANET síti je, že uzly mají dostatečnou energii a výpočetní výkon (uzly jsou automobily namísto malých ručních zařízení).

4. Predikce mobility

Vozidla jsou zpravidla omezována dálnicemi, silnicemi a ulicemi a jejich rychlostním omezením, tím lze předpokládat budoucí polohu vozidla.

2.2.2. Rozdělení podle směrování:

Ad-hoc směrování

Sítě MANET a VANET fungují na stejném principu. Nezakládají se na pevné infrastruktuře sloužící pro komunikaci, tudíž je stále použitelná většina Ad-hoc směrovacích protokolů, jako jsou například AODV (Ad-hoc on-demand Distance Vector) a DSR (Dynamic Source Routing).

Position-Based Routing (Směrování založené na pozicích)

Pohyb uzlů ve VANET síti je většinou omezen obousměrným pohybem po silnicích a ulicích, proto je geografické směrování (směrování na základě pozice) vyhodnoceno jako slibnější směrování ve VANET sítích. Tyto směrovací algoritmy jsou založené na rozhodování o předávání informací o poloze uzlu, který je nejbližší k cíli. Mezi nejznámější zástupce zmíněného směrování patří GPRS (Greedy Perimeter Stateless Routing) protokol. Možnou nevýhodou GPRS může být jeho použití ve městě, protože přímá komunikace je značně omezena z důvodu existence překážek jako jsou například stromy nebo budovy.

Cluster-Based Routing

V Cluster-Based směrování musí být vytvořena virtuální síťová infrastruktura prostřednictvím seskupování uzlů za účelem poskytnutí škálovatelnosti. Každý cluster může mít clusterovou hlavu, která je zodpovědná za koordinaci uvnitř clusteru a mezi clustery navzájem v rámci funkcí správy sítě. Uzly uvnitř clusteru komunikují prostřednictvím přímých odkazů. Komunikace mezi clustery probíhá prostřednictvím hlav.

Broadcast Routing

Broadcast směrování je často používanou metodou v sítích VANET například pro sdílení provozu, počasí, nouzové situace, stavu vozovky a dalších oznámení. Vysílání je také často využíváno v unicast směrovacích protokolech k nalezení efektivní cesty k cíli. Když se zpráva nachází mimo rozsah přenosu, používá se takzvaný multi-hop.

Vysílání je také využíváno v unicast směrovacích protokolech (směrovací fáze zjišťování) k nalezení efektivní cesty k cíli. Když se zpráva musí rozšiřovat na vozidla mimo rozsah přenosu, používá se multi-hop.

2.2.3. Využití sítí VANET

VANET sítě byly vyvinuty pro lepší informovanost řidičům a poskytnutí pohodlí. Můžou se rozdělit podle použití do dvou skupin. Inteligentní dopravní využití a komfortní využití. Inteligentní dopravní využívání slouží pro palubní navigaci, kooperativní sledování provozu, analyzování dopravní zácpy a výpočet objízdných tras na základě dopravních podmínek na místa určení. Pomocí silničních senzorů, které monitorují hustotu provozu a rychlost vozidel, se sdílejí dopravní podmínky mezi vozidly. V případě dopravní nehody se právě díky těmto senzorům varují ostatní vozidla v dostatečném odstupu (již několik kilometrů dopředu) a tím si může řidič zvolit jinou trasu nebo včas zareagovat.

3. Technologie a protokoly využívané pro komunikaci mezi vozidly

3.1. IEEE 802.11p standard

Standard IEEE 802.11p je rozšíření standardu 802.11 a slouží pro komunikaci a bezdrátový přístup mezi dopravními prostředky (Wireless Access in Vehicular Environments, zkráceně WAVE). Standard poskytuje DSRC s vysokým výkonem, který se využívá ve VANET sítích. Systém je postavený na DSRC (Dedicated Short Range Communication) komunikaci. Tento systém byl navržený speciálně pro automobilový průmysl a slouží pro komunikace krátkého dosahu. Komunikace jsou jednosměrné, nebo obousměrné. V roce 1997 resp. 1999 skončila standardizace DSRC pro různé kontinenty a druhy DSRC. Federální komise pro komunikaci (FCC) přidělila pro Spojené státy americké 75 MHz v pásmu 5,9 GHz pro DSRC na použití v Inteligentních dopravních systémech (ITS). Pro Evropu v roce 2008 přidělil Evropský ústav pro telekomunikační normy (ETSI) 30 MHz spektrum v pásmu 5,9 GHz, které je také pro ITS. Ve spektru v okolí 5 GHz dokážou šířící se vlny bez ohledu na vnější vlivy, jako je počasí, poskytnout vyšší datovou rychlost na delší vzdálenosti. Tím je toto spektrum vhodné pro automobilové prostředí. V současnosti se DSRC v Evropě a Japonsku používá v pásmu 5,8 GHz a slouží pro elektronický výběr mýtného. DSRC pro Evropu a Japonsko se liší od DSRC pro Spojené státy americké. Díky rozdílnosti DSRC pro různé kontinenty vznikl standard pro celý svět, který byl označen 802.11p [11].

3.1.1. Komunikační komponenty

Hlavními komponenty pro DSRC je OBU jednotka, která je umístěna ve vozidle a RSU jednotka, která je pevně zabudovaná.

OBU (On Board Unit)

Jednotka je umístěna ve vozidlech, protože je schopna komunikovat za pohybu s RSU jednotkou, tak i s ostatní OBU jednotkou. Díky této komunikaci je umožněno zvýšení bezpečnosti na pozemní komunikaci. Jednotka je tvořena kombinací přijímače a vysílače, popřípadě pouze jedním z nich, podle potřeby automobilu. Jednotku dále tvoří anténa, nebo optický systém.

RSU (Road Side Unit)

Jednotka obsahuje vysílač s přijímačem pro krátký rozsah komunikace (DSRC), který je instalovaný u cesty. Stanice mohou pracovat autonomně. RSU stanice mohou být namontovány i ve vozidlech, ale zařízení bude fungovat, pouze pokud je stacionární. Jednotka si vymění data s palubními jednotkami OBU v oblastech, kde mohou komunikovat, nebo vysílá přímo data do palubních jednotek. Do jednotky je možný přístup na dálku pomocí internetu a lze také změnit nastavení podle potřeb.

3.1.2 WAVE

WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) slouží k podpoře aplikací, které pomáhají k větší bezpečnosti na silnicích. WAVE má především výhodu ve spolehlivosti datové komunikace a v relativně krátkých odezvěch.

Pro poskytnutí veřejné bezpečné komunikace a dynamické přizpůsobení prostředí se stejnou rádiovou technologií režim používá odlišnou strategii přístupu, než u standardu IEEE 802.11, protože síťové služby WAVE vyžadují speciální implementaci standardu 802.11. Jednotky, které jsou v základní sadě služeb WAVE BSS (Basic Service Set), jsou OBU, slouží k provozu v pohybu a RSU jednotky, které jsou upevněné podél cest. Jednotky mohou pracovat jako stanice nebo jako přístupové body. Hlavní funkce RSU je kontrola k radiofrekvenčnímu médiu v místech, kde mohou komunikovat nebo pouze vysílat data. Konfigurace WAVE, které používají DSRC zařízení pro komunikaci, je buď mezi RSU a OBU, nebo jen mezi OBU. Pro zařízení DSRC implementující WAVE existují dvě základní komunikační služby. První z nich je mezi poskytovatelem a uživatelem a druhá z nich je mezi vysílačem a posluchačem. Zprávy jsou v módu, kde se nečeká odpověď a jsou generované RSU, nebo OBU. Ke komunikaci mezi poskytovatelem a uživatelem dochází, když poskytovatel vyšle tabulku služeb poskytovatele a uživatel reagující na tuto zprávu vytvoří komunikační spojení s poskytovatelem podle definice v IEEE P1609.3. Reagující uživatel na zprávu od poskytovatele může odpovědět zprávou obsahující uživatelskou tabulku služeb a požádat o určité služby. Za kontrolu kanálu, na kterém byla komunikace zahájena, je odpovědný poskytovatel služeb.

3.2. Ad-Hoc On-demand Distance Vector (AODV) protokol

Ad-Hoc On-demand Distance Vector (AODV) je tabulkově řízený směrovací protokol pro mobilní Ad-hoc sítě a další bezdrátové sítě. Protokol vznikl v roce 1997 na University of California v Santa Barbaře a to konkrétně ve výzkumném centru Nokia za spolupráce s University Cincinnati. Protokol vznikl pod vedením C. Perkinse, který zastupoval výzkumné centrum Nokia, Elizabeth Royer z University of California a S. Das z University Cincinnati. AODV patří do kategorie reaktivních směrovacích protokolů, které sestavují cestu k cíli až po vyžádání, oproti proaktivním protokolům, které vyhledávají cestu, i když danou cestu nevyužívají. Protokol využívá vektorový dálkový algoritmus, který se snaží zajistit, aby byla cesta vždy “čerstvá”. K zajištění takové cesty AODV používá cílová sekvenční čísla, které slouží k identifikaci jak je cesta aktuální. Používají se právě nejaktuálnější směrovací informace, čím se AODV vyhýbá Bellman Fordovému algoritmu (“počítání do nekonečna”). Protokol je založen k nalezení cest na základě request-reply (dotaz-odpověď) a HELLO zprávách, což jsou určité ROUTE REPLY pakety vysílané periodicky. HELLO zprávy se využívají pro nalezení sousedů. Když potřebuje určitý uzel najít cestu k dalšímu určitému uzlu, tak vyšle ROUTE REQUEST paket všem sousedům. Požadavek se bude rozšiřovat tak dlouho, až se najde cesta k cílovému uzlu. Z cílového uzlu se odešle ROUTE REQUEST paket, který už je jednosměrný zpět k uzlu, který je na počátku. Díky těmto HELLO zprávám uzly dostávají najevo, že mezi nimi existuje další uzel, ke kterému vede platná cesta. Pokud z určitého uzlu nebudou přicházet HELLO zprávy, tak si ostatní uzly označí cestu za neplatnou, protože se uzel vzdálil. Uzly, které již nedostávají HELLO zprávy od vzdáleného uzlu, odešlou speciální REQUEST REPLY paket (“link failure notification”) dalším uzlům.

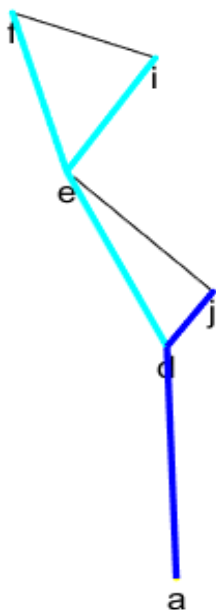
Každý paket v síti, která používá AODV protokol, má přidělen takzvaný time-stemp (časové razítko), který udává dobu pohybu paketu v síti. Pokud je pohyb paketu delší než time-stemp, tak dojde k zahození paketu. Díky téhle kontrole pohybu paketu v síti se předchází zacyklení. [4,23]

3.2.1. Princip protokolu AODV

Princip protokolu AODV je rozdělen do následujících kroků.

Nalezení cesty

K nalezení cesty od počátečního uzlu ke koncovému je umožněno pouze uzlům, které nemají obsažené informace ve své směrovací tabulce. Pokud je záznam již v tabulce, může počáteční uzel data rovnou posílat koncovému uzlu. Způsob směrování je zahájen v uzlu a , který musí najít cestu do uzlu j , a poslat mu data viz obrázek 1. Identifikace sousedních uzlů je zjištěna díky neustálému posílání HELLO zpráv. Poté, co uzel přijme HELLO zprávu, si aktualizuje tabulku sousedů (Neighbors list).



Obrázek 1: Sousední uzly v AODV protokolu

Uzel a nemá uložené žádné informace o uzlu j ve své směrovací tabulce. Pro vyhledání cesty z uzlu a do uzlu j , vyšle uzel a ROUTE REQUEST (RREQ) paket všem svým sousedům. Sousední uzel, přijal paket RREQ a přeposílá paket dokud nedojde k cílovému uzlu j viz obrázek číslo 1. Pomocí Time-to-live (TTL) intervalu je umožněno uzlu kontrolovat jeho rozšiřování v síti. Paket z cílového uzlu může vést pouze podle nastavení TTL. Jestli má uzel nastaven například TTL na hodnotu 3, může paket cestovat maximálně přes 3 uzly. Jestliže není cesta nalezena ještě před tím, než vyprší TTL interval, tak uzel vyšle stejný paket, ale s vyšší hodnotou TTL. Tento paket může vést přes více uzlů, ale časový interval je delší.

Paket obsahuje adresu počátečního uzlu, sekvenční číslo počátečního uzlu, Broadcast ID, adresu koncového uzlu, sekvenční číslo koncového uzlu a počet přeskoků viz tabulka číslo 1. Sekvenční číslo koncového uzlu slouží k zaznamenání poslední cesty od počátečního uzlu do koncového uzlu. Pokud cesta není známá, tak je hodnota implicitně nastavena na hodnotu 0. Broadcast ID je označení RREQ paketu sloužící pro určení odlišných RREQ paketů odeslaných ze stejného uzlu. Broadcast ID se zvyšuje každým odesláním. Počet přeskoků (Hop Count) značí počet uzlů, přes které uzel musel projít.

Pole	Význam
Source address	Adresa počátečního uzlu
Source Sequence number	Sekvenční číslo počátečního uzlu
Broadcast ID	Broadcast ID
Destination address	Adresa koncového uzlu
Destination Sequenced number	Sekvenční číslo koncového uzlu
Hop count	Počet přeskoků

Tabulka 1: Pole pro ROUTE REQUEST zprávu v AODV protokolu

Ukončení hledání cesty

Po úspěšném nalezení cesty k cílovému uzlu odešle tento uzel ROUTE REPLY paket přímo počátečnímu uzlu, který hledal cestu. RREP (ROUTE REPLY) paket může odesílat také mezilehlý uzel. RREP paket obsahuje adresu počátečního uzlu, adresu koncového uzlu, sekvenční číslo koncového uzlu, počet přeskoků a dobu životnosti paketu viz tabulka číslo 2.

Pole	Význam
Source address	Adresa počátečního uzlu
Destination address	Adresa koncového uzlu
Destination Sequenced number	Sekvenční číslo koncového uzlu
Hop count	Počet přeskoků
Lifetime	Doba životnosti paketu

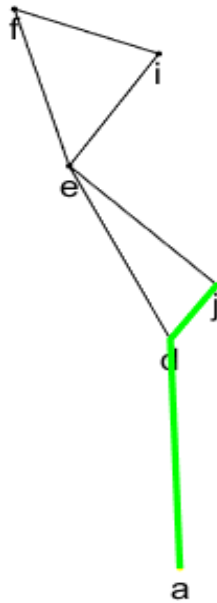
Tabulka 2: Pole pro ROUTE REPLY zprávu v AODV protokolu

Údržba aktuálních cest

Údržba cesty je založena na HELLO zprávách, které se odesílají v pravidelných intervalech. Jestliže vznikne porucha na dané cestě, dochází k přeposílání ROUTE ERROR (RERR) zpráv všem uzlům na dané cestě. Jednotlivé uzly mohou požádat o nalezení nové cesty popřípadě zastavit vysílání dat.

Ukázka AODV protokolu

Na obrázku číslo 2 můžeme vidět výsledek hledání cesty mezi počátečním uzlem a a koncovým uzlem j . Finální cesta tedy bude vypadat $[a, d, j]$.



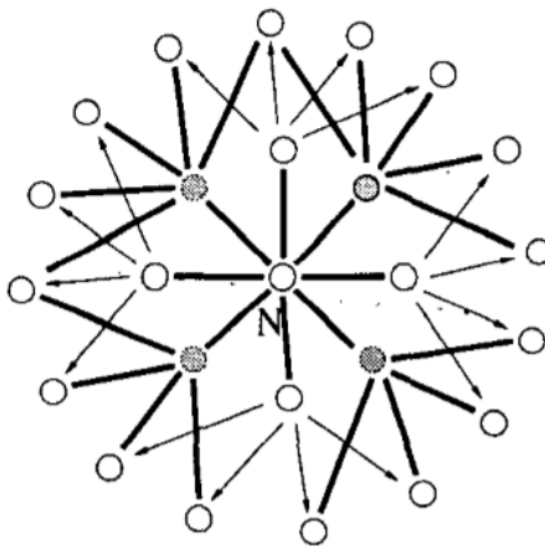
Obrázek 2: Ukázka AODV protokolu

3.2.2. Výhody protokolu AODV

Díky časté změně topologie sítě, je nutné použití reaktivních technik, aby byl získán relativní výkon. AODV směrovací protokol redukuje značné množství počtu zpráv o směrování. Protokol také zjišťuje cestu jen v případě požadavku. Odstranění problému zacyklení probíhá díky sekvenci. Další výhodou je podpora jedné cesty ke každému uzlu (možnost modifikace více cest k cíli). Změny ve spojení jsou zaznamenány pouze v sousedních uzlech, které si předávají informace. Systém využívá HELLO zpráv. Informace o změně v místní části sítě jsou odděleny od informací o změně v celé topologii sítě.

3.3. Optimized Link State Routing protokol (OLSR) protokol

Optimized Link State Routing protokol (OLSR) je směrovací protokol, který patří mezi proaktivní protokoly. OLSR je určený převážně pro směrování paketů v Ad-hoc sítí. Pro hledání nejkratší cesty využívá OLSR algoritmus, který pracuje s metrikou počtu uzlů. Všechny uzly v síti obsahují informace o aktuální topologii sítě. OLSR využívá spojovací stanice Multipoint relays (MPR) pro velkou síť. Daný mechanismus je založen na principu, kde každý uzel má za úkol vybrat sousední uzly určené pro přenos, které jsou vzdálené 2 přeskoky. Tyto uzly pak přijmou broadcastové zprávy, i když MPR pouze přeposílá zprávy. Využití tohoto mechanismu je takové, že spojovací stanice MPR dokáže výrazně snížit počet broadcastových zpráv. Na obrázku číslo 3 můžeme vidět zvolené MPR (tmavě šedá barva uzlu).[10]



Obrázek 3: MPR v protokolu OLSR [10]

3.3.1. Princip protokolu OLSR

Princip protokolu OLSR je rozdělen do následujících kroků.

Nalezení cesty

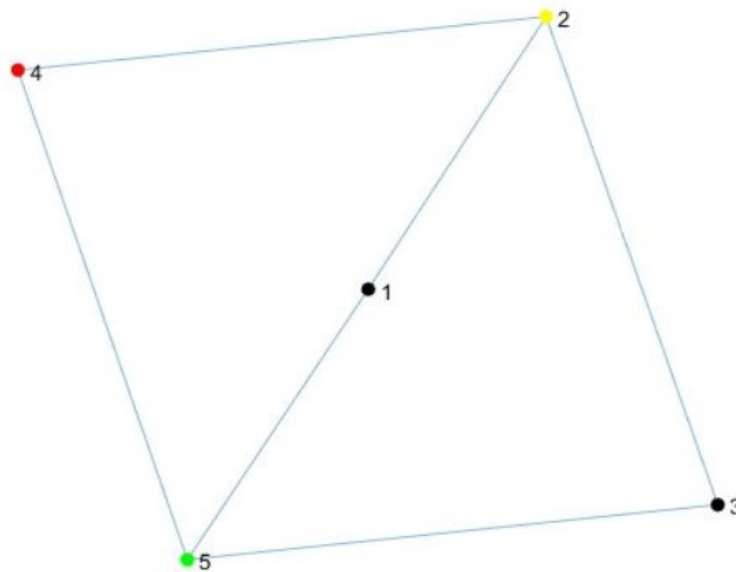
K nalezení cesty využívají každé uzly HELLO zprávy, které pravidelně posílají. Hello zprávy slouží k získání seznamu všech sousedních uzlů. Zprávy mají TTL (hodnota přežití) na hodnotě 1, díky tomu nejsou předávány dále. Díky informacím získaných z HELLO zpráv si uzel nezávisle vypočítá sadu MPR. OLSR určuje každé cestě status a tou může být symetrická cesta, nebo nesymetrická cesta.

Údržba cesty

Podle změny v topologii využívá protokol k údržbě cesty kontrolní zprávu, která je závislá na jakékoliv změně a je odeslána ihned po vykonané změně. Zpráva obsahuje tabulku, která obsahuje sekvenční číslo a výběr dané spojovací stanice.

Ukázka protokolu OLSR

Na obrázku číslo 4 můžeme vidět ukázkou OLSR protokolu. Uzel označený hodnotou 13, který má červenou barvu, je náhodně vybraný MPRS (MULTIPOINT RELAYS SELECTOR) uzel. Žlutě označené uzly jsou výsledné MPR. Černou barvu mají uzly, které jsou vzdálené 2 přeskoky od MPRS. Zelenou barvu má uzel, který je přímý soused s MPRS.



Obrázek 4: Ukázka OLSR protokolu

3.4. Dynamic source routing (DSR) protokol

Dynamic source routing protokol se řadí mezi reaktivní směrovací protokoly. DSR vznikl v roce 1994. Protokol patří do skupiny On-demand (směrování až na žádost), tudíž nepracuje se směrovací tabulkou v uzlu a nepotřebuje aktualizaci směrovací tabulky, když je jakákoliv změna v topologii sítě. Z toho vyplývá skutečnost, že protokol šetří energii a uvolňuje šířku pásma. Protokol nejdříve najde cestu pomocí uzlů, které dynamicky hledají cestu přes několikanásobné skoky, než zahájí přenos dat. V DSR obsahují veškeré pakety hlavičku, ve které je uložena cesta, přes které uzly v síti musí projít. [4, 22]

3.4.1. Princip protokolu DSR

Princip protokolu DSR je rozdělen do následujících kroků.

Nalezení cesty

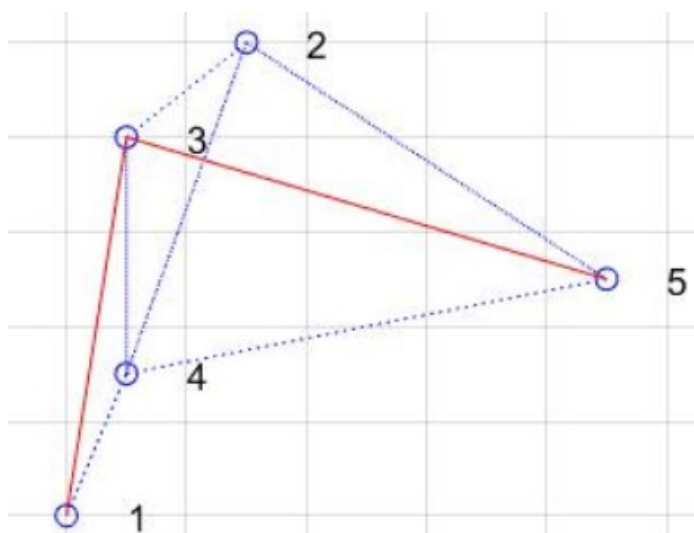
K nalezení cesty využívá protokol ROUTE REQUEST (RREQ) a ROUTE REPLY (RREP) zprávy. Počáteční uzel zkontroluje, jestli nemá již uloženou cestu k cílovému uzlu v tabulce ROUTE CACHE. Pokud uzel neobsahuje žádnou cestu, kterou by již znal, tak počáteční uzel vyšle RREQ zprávu po celé síti. Síť je tudíž “zaplavena” (Flooding) RREQ pakety. ROUTE REQUEST zprávy obsahují adresu počátečního uzlu, adresu cílového uzlu, unikátní identifikátor zprávy, pole obsahující všechny sousední uzly, počet přeskoků (pouze pro nastavení limitu počtu přeskoků), počet síťových rozhraní uzlu a značení vrácení zprávy viz tabulka číslo 3. Jakmile se k cílovému uzlu dostane RREQ zpráva, uzel vyšle zpět k vysílajícímu uzlu odpověď ve formě ROUTE REPLY zprávy a cestu si uloží.

Pole	Význam
Initiator ID	Adresa vysílacího uzlu
Target ID	Adresa cílového uzlu
Unique Request ID	Unikátní ID
Address list	Pole obsahující všechny adresy mezilehlých uzlů
Hop limit	Omezení maximálního počtu přeskoků
Network Interface list	Uložení dalších síťových rozhraní, pokud je uzel má
Acknowledgment bit	Bit je označený, když je zpráva vrácena zpět k výchozímu uzlu

Tabulka 3: Pole pro ROUTE REQUEST zprávu v DSR protokolu

Příklad DSR protokolu

Na obrázku číslo 5 můžeme vidět výsledek hledané cesty pro počet pěti uzlů z počátečního uzlu označený hodnotou 1 do koncového uzlu označeného hodnotou 5. Výsledná cesta bude tvořena uzly 1, 3, 5.



Obrázek 5: Ukázka DSR protokolu

Údržba cesty

Pro údržbu cesty se musí neustále udržovat aktuální stav v ROUTE CACHE, protože se síť neustále mění z důvodu pohybu uzlu. Vznikají tak nové směrovací cesty, ale i zanikají. K potvrzení dostupnosti cesty se využívá pasivní potvrzování, nebo link-level potvrzování. Jestliže uzel opakovaně nedostane na dané cestě potvrzení v určitém čase, vysílá znovu RREQ zprávu. Jestliže RREQ zpráva nedojde k cíli, poslední komunikující uzel vysílá ROUTE ERROR zprávu, která ukáže v jakém místě na trase je problém. Následně uzel zjistí, že je nefunkční spojení na cestě k cílovému uzlu, tím se daná trasa odstraní ze směrovací paměti. Zdrojový uzel poté vyšle novou žádost k nalezení cesty k cílovému uzlu.

3.5. Systém inteligentní dopravy (V2X)

Systém představuje komunikaci mezi vozidlem a libovolným objektem (Vehicle to everything), který může souviset s vozidlem. Systém obsahuje infrastrukturní jednotku (RSU), Dopravní řídicí centrum (Traffic Management Center, TMC) a podsystém vozidla, který je propojen komunikačními kanály. Dále obsahuje aplikační jednotku (Application Unit), palubní jednotku (OBU) a řídicí jednotku (Electric Control Unit). Systém slouží ke zvýšení bezpečnosti provozu na silnicích, efektivity provozu a úspory energie pomocí rádiového sdílení informací. [25]

3.5.1. V2V

Jedná se o komunikaci vozidla s vozidlem na krátkou vzdálenost (Vehicle To Vehicle communication), která vznikla za účelem zvýšení bezpečnosti a plynulosti dopravy. Mezi vybrané možnosti využití systému pro vozidla patří blížící se záchranné vozidlo, upozornění na kolony na dálnicích, elektronické mýtné, nebo získávání statistických dat.

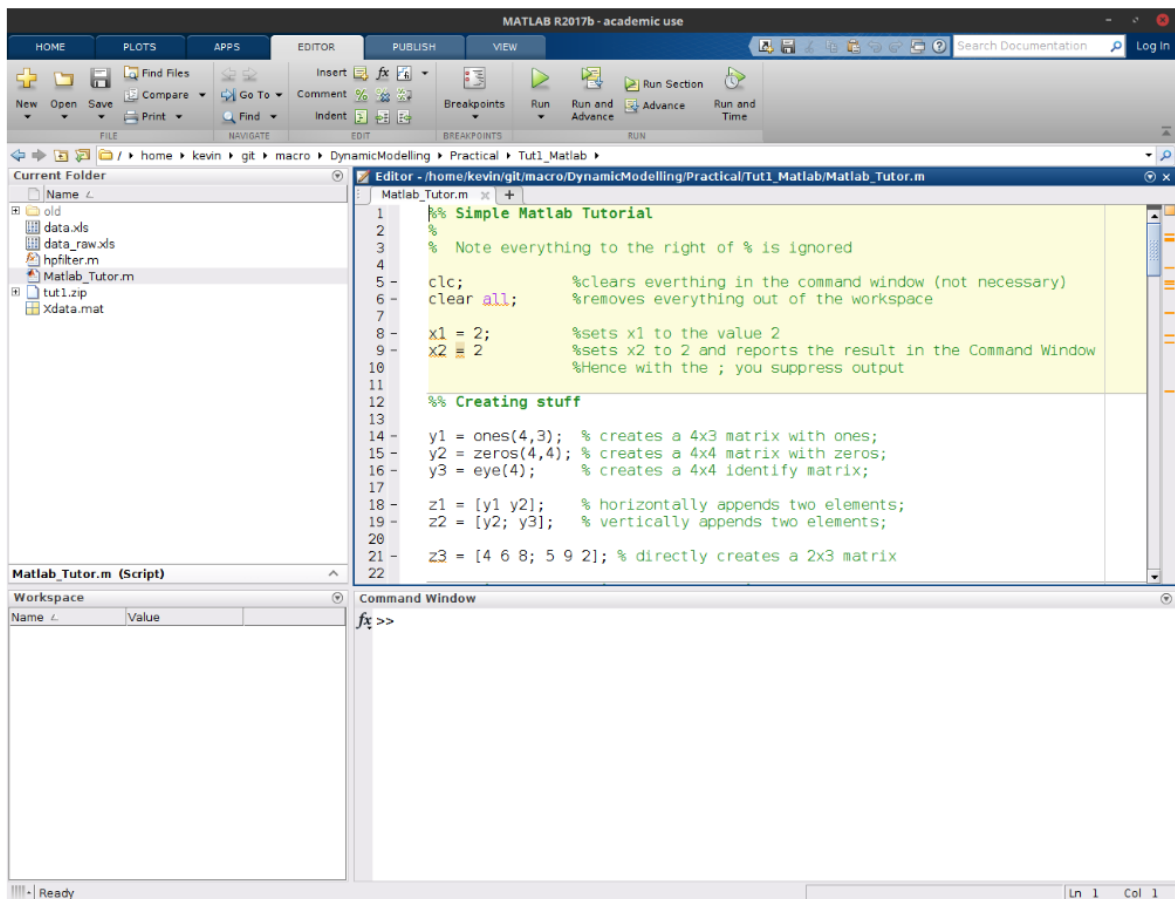
3.5.2. V2I

Jedná se o komunikaci mezi vozidlem a infrastrukturou (Vehicle To Infrastructure communication), která poskytuje aktuální informace o dopravě z větší vzdálenosti. To zapříčiňuje informovanost řidiče nejen o dopravě a stavu silnice, ale například i vzdálenosti čerpací stanice s aktuální cenou pohonných hmot, popřípadě i dalších informací, které jsou ve směru jízdy vozidla. Aplikace komunikačního systému V2I jsou součástí inteligentního dopravního systému.

4. Simulace směrovacích algoritmů v prostředí MATLAB

4.1. Úvod do prostředí MATLAB

Matematický software MATLAB, jehož název vznikl ze spojení dvou slov, konkrétně Matrix Laboratory, prioritně pracuje s maticemi během výpočtů. MATLAB slouží převážně k modelování, analýze dat, technickým a vědeckým výpočtům, které pak následně slouží pro jejich vizuální simulaci v podobě grafu. Programování v prostředí MATLAB využívá k řešení a výpočtům čistě matematickou formu, tudíž není nutné znát klasické programování. Prostedí MATLAB dokáže řešit technické problémy, které obsahují vektorové nebo maticové výpočty. Vektorové výpočty využívají vektory, které obsahují matici o jednom sloupci, nebo jedním řádkem. Příkazy jsou uloženy v souboru nazývaném tzv. skript, které jsou označovány jako M-files (soubor s příponou .m). Jako hlavní okna v prostředí MATLAB se ve verzi r2017b označují Editor, ve kterém je možné upravovat kód skriptu a následně Workspace, sloužící pro zaznamenání veškerých proměnných viz obrázek číslo 6. [12]



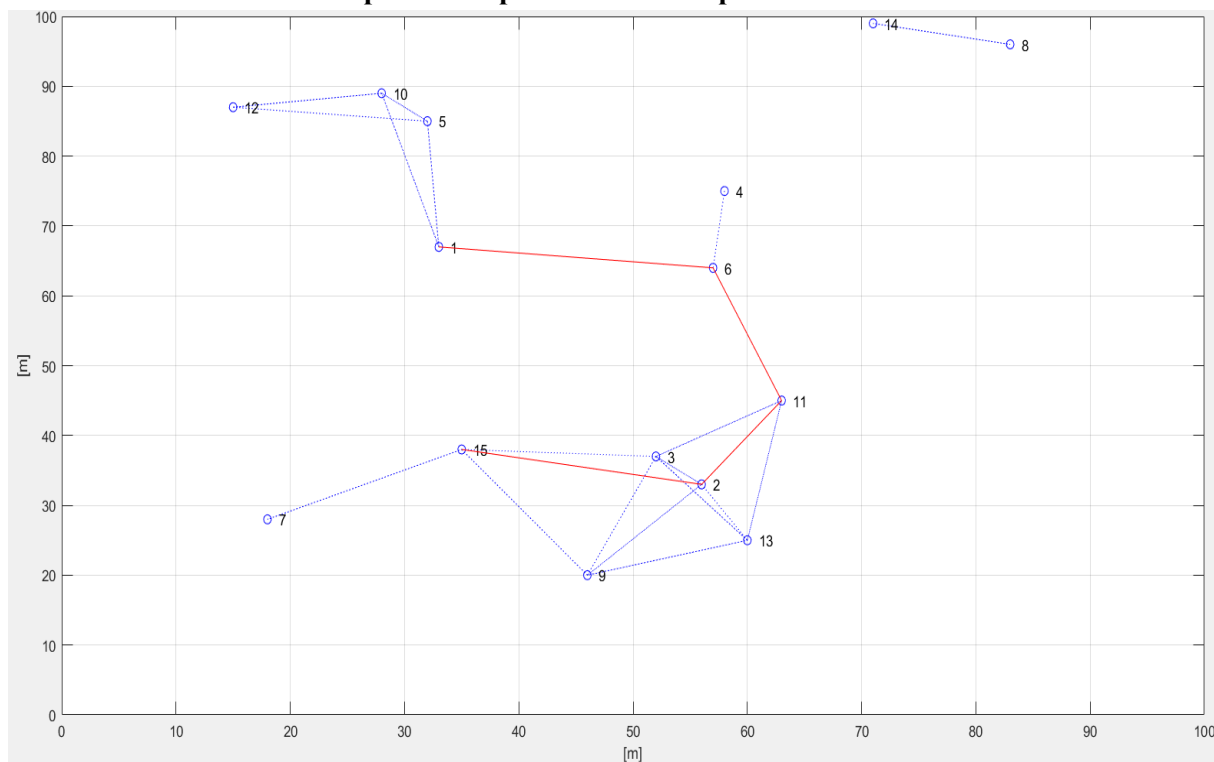
Obrázek 6: Náhled obrazovky v prostředí MATLAB r2017b [12]

4.2. Implementace DSR protokolu

Implementace Ad-hoc sítě pro využití simulace Dynamic Source Routing (DSR) směrovacího algoritmu byla vytvořena v prostředí MATLAB. Implicitně nastavená simulační plocha se skládá z matice, ve které je hodnota řádků a sloupců nastavená na hodnotu 100. Plocha simuluje prostředí pro pohyb uzlů, jehož jednotkou jsou metry. Měněné hodnoty jsou počty uzlů, které simulují vozidla. Uzly jsou označeny čísly, které jsou počítány od 1 do hodnoty celkového počtu uzlů. Dalším důležitým nastavovaným parametrem v simulaci je tzv. parametr sousednosti R . Parametr sousednosti vyjadřuje vzdálenost, do které jsou uzly považovány ještě za sousední. Finální rozmístění uzlů v síti je generováno náhodně. Hledání výsledné cesty je prováděno mezi počátečním uzlem, který je nastaven na hodnotu 1 a koncovým uzlem, který je nastaven na hodnotu celkového počtu uzlů.

4.2.1. Simulace protokolu DSR

Simulace 1: Simulace DSR protokolu pro 15 vozidel a parametrem sousednosti s hodnotou 25



Obrázek 7: Simulace DSR pro 15 vozidel, $R=25$

V první simulaci DSR protokolu (Obrázek 7) lze vidět náhodně vygenerované umístění celkového počtu uzlů, který má nastavenou hodnotu na 15, v prostoru 100 x 100 metrů. Parametr sousednosti R je pro uzly nastaven na hodnotu 25. S menším počtem uzlů a vyšší hodnotou parametru sousednosti můžeme vidět, že v dané simulaci jsou téměř všechny uzly propojeny s výjimkou uzlů označených hodnotou 14 a 8, které jsou však propojeny navzájem a nejsou tedy bez sousedního uzlu.

Hledaná cesta první simulace mezi počátečním uzlem a koncovým uzlem je tvořená z uzlů označených hodnotou 1 (počáteční uzel), 6, 11, 2 a 15 (koncový uzel) viz. obrázek 8.

```
Command Window
Final path found!

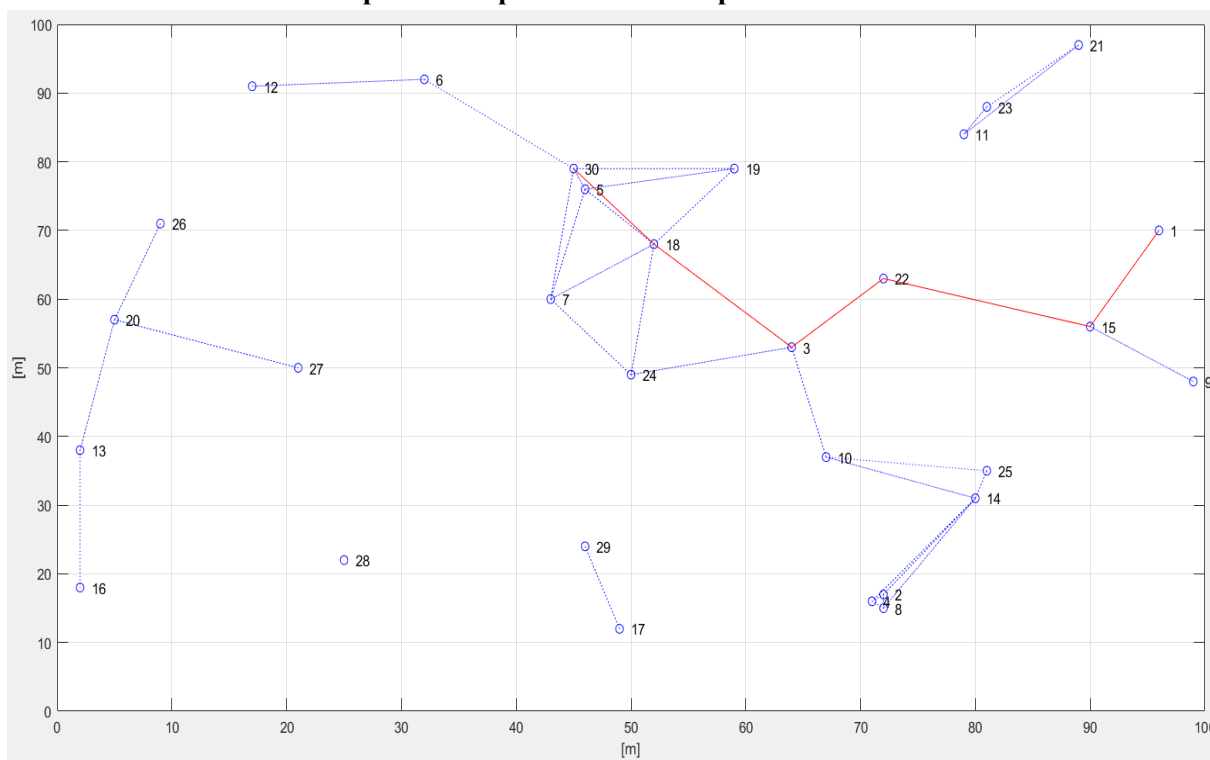
finalPath =

     1     6    11     2    15

fx >> |
```

Obrázek 8: Výsledek hledané cesty DSR protokolu pro 15 vozidel, R=25

Simulace 2: Simulace DSR protokolu pro 30 vozidel a parametrem sousednosti s hodnotou 20



Obrázek 9: Simulace DSR pro 30 vozidel, R=20

V druhé simulaci DSR protokolu (obrázek 9) lze vidět výsledek hledání cesty. Ve výsledném grafu vidíme náhodné rozmístění třiceti uzlů v prostoru 100 x 100 metrů. Propojení všech uzlů nebylo možné z důvodu velké vzdálenosti mezi uzly. Jak můžeme vidět, uzel označený číslem 28 nemá žádného souseda. Rozhodnutí, jestli bude uzel považován za sousedního, závisí na parametru sousednosti, který je v první simulaci nastaven na hodnotu 20. Cesta byla vyhledána z počátečního uzlu číslo 1 do koncového uzlu označeného číslem 30.

Hledání výsledné cesty mezi počátečním a koncovým uzlem skončila úspěšně, tudíž za finální cestu můžeme označit uzly s hodnotou 1 (počáteční uzel), 15, 22, 3, 18 a 30 (koncový uzel) viz obrázek 10.

```

Command Window
Final path found!

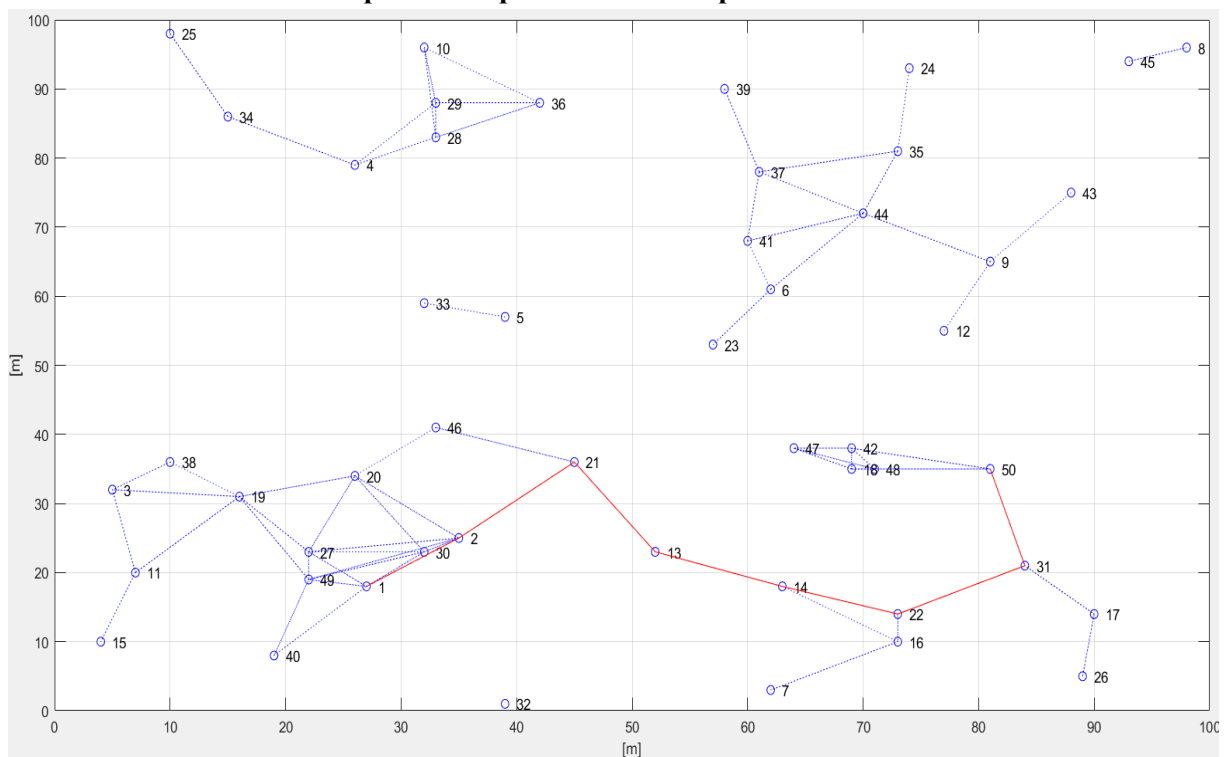
finalPath =

    1    15    22    3    18    30

fx >>
    
```

Obrázek 10: Výsledek hledané cesty DSR protokolu pro 30 vozidel, R=20

Simulace 3: Simulace DSR protokolu pro 50 vozidel a parametrem sousednosti s hodnotou 15



Obrázek 11: Simulace DSR pro 50 vozidel, R = 15

V třetí simulaci DSR protokolu (obrázek 11) pro vyhledání finální cesty mezi počátečním a koncovým uzlem vidíme náhodné rozmístění uzlů v prostoru 100 x 100 metrů. V simulaci 3 jsou nastavené hodnoty počtu uzlů na 50 a parametr sousednosti na hodnotu 15. Vyšší počet uzlů zajistí, že v konkrétní simulaci není samostatný uzel, který by neměl souseda.

Výsledek hledané cesty mezi počátečním (uzel označený hodnotou 1) a koncovým uzlem (uzel označený hodnotou 50) skončil úspěchem, tudíž za finální cestu lze označit uzly s označením 1 (počáteční uzel), 2, 21, 13, 14, 22, 31 a 50 (koncový uzel) viz. obrázek 12.

```

Command Window
Final path found!

finalPath =

    1    2   21   13   14   22   31   50

fx >>

```

Obrázek 12: Výsledek hledané cesty DSR protokolu pro 50 vozidel, R=15

4.2.2. Zhodnocení simulace DSR protokolu

Pro vyhodnocení výsledků protokolu DSR jsme použili tři simulace s různými parametry. Prostor simulace zůstal neměnný. Jedná se o matici o rozměrech 100 x 100 metrů. Ke změnám docházelo v proměnných reprezentujících celkový počet uzlů (vozidel) a parametru sousednosti R, který určuje pro každý uzel, jestli pro něj budou ostatní uzly považovány za sousedy. Pro všechny simulace bylo provedeno deset testů, podle kterých můžeme určit úspěšnost v hledání finální cesty mezi počátečním a koncovým uzlem.

První simulace byla vytvořena pro 15 uzlů (vozidel) v prostoru 100 x 100 metrů s parametrem sousednosti R, který byl roven hodnotě 25. Simulace byla tedy nastavena na nižší počet vozidel s relativně vysokým parametrem sousednosti. Z deseti testů bylo v první simulaci úspěšných 5 testů pro vyhledání finální cesty z počátečního uzlu do koncového. To znamená 50% úspěšnost ve finálním výsledku. Průměrný čas první simulace k nalezení finální cesty mezi počátečním a koncovým uzlem a její následné vyhodnocení je 0,3256 sekund. Průměrný čas byl získán z deseti časů viz tabulka 4.

Pořadí testu	Vyhodnocení	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Finální cesta
1	Neúspěch	0,39	
2	Úspěch	0,27	[1, 12, 9, 14, 7, 3, 15]
3	Neúspěch	0,27	
4	Úspěch	0,34	[1, 3, 15]
5	Neúspěch	0,35	
6	Úspěch	0,33	[1, 13, 15]
7	Úspěch	0,29	[1, 11, 15]
8	Úspěch	0,35	[1, 5, 7, 15]
9	Neúspěch	0,33	
10	Neúspěch	0,35	

Tabulka 4: Vyhodnocení první simulace DSR protokolu

Druhá simulace sloužila pro 30 uzlů (vozidel). Parametr sousednosti se snížil na hodnotu 20. Prostor byl použit stejný jako u první simulace. V druhé simulaci se tedy počet uzlů zvedl dvojnásobně a parametr R je zmenšen o hodnotu 5, z toho vyplývá, že simulace by měla mít vyšší úspěšnost vyhledání finální cesty v provedených testech, což dokazuje tabulka 5. Průměrný potřebný čas k sestavení druhé simulace je 1,3876 sekund.

Pořadí testu	Vyhodnocení	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Finální cesta
1	Neúspěch	0,70	
2	Úspěch	1,12	[1, 30]
3	Úspěch	2,67	[1, 26, 10, 8, 13, 16, 30]
4	Neúspěch	0,66	
5	Neúspěch	0,59	
6	Úspěch	1,99	[1, 30]
7	Úspěch	0,59	[1, 7, 30]
8	Úspěch	0,89	[1, 28, 2, 30]
9	Úspěch	2,2	[1, 20, 21, 10, 30]
10	Úspěch	3,17	[1, 9, 23, 11, 30]

Tabulka 5: Vyhodnocení druhé simulace DSR protokolu

Ve třetí simulaci byl celkový počet uzlů (vozidel) navýšen na 50 a parametr sousednosti snížen z důvodu časové náročnosti na hodnotu 15. Veškeré testy byly provedeny ve stejném prostoru jako v předchozích dvou simulacích. Průměrný čas potřebný k vyhodnocení výsledků třetí simulace je 2,6855 sekund. Z tabulky číslo 6 můžeme vidět, že v prvním, šestém a desátém testu jsou časy potřebné k sestavení simulace mnohonásobně vyšší než v ostatních testech. To zapříčiňuje výskyt náhodně vygenerovaných uzlů (vozidel) blízko sebe.

Pořadí testu	Vyhodnocení	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Finální cesta
1	Úspěch	3,35	[1, 20, 47, 48, 4, 6, 2, 26, 50]
2	Úspěch	0,64	[1, 11, 50]
3	Úspěch	0,61	[1, 25, 45, 10, 50]
4	Neúspěch	0,69	
5	Úspěch	0,89	[1, 50]
6	Úspěch	7,63	[1, 24, 2, 14, 6, 12, 32, 50]
7	Úspěch	1,69	[1, 25, 26, 50]
8	Úspěch	0,67	[1, 26, 40, 50]
9	Neúspěch	0,87	
10	Úspěch	3,18	[1, 10, 50]

Tabulka 6: Vyhodnocení třetí simulace DSR protokolu

V poslední části porovnááme již vzniklé simulace (první, druhá a třetí) navzájem mezi sebou. Simulace mají stejné podmínky v parametru sousednosti R, který je roven hodnotě 15 v prostoru 100 x 100 metrů. Mění se pouze počet uzlů. Simulace byla provedena pro 15, 30 a 50 uzlů. Pro porovnání časové náročnosti jednotlivých simulací obsahuje tabulka č. 7 úspěšné i neúspěšné vyhodnocení pro jednotlivý počet vozidel. Z první simulace můžeme vidět, že potřebný čas k sestavení simulace je pro úspěšné i neúspěšné vyhodnocení podobný. V simulaci pro 30 vozidel se nám čas pro neúspěch mírně zvýšil oproti neúspěšnému řešení pro 15 vozidel, avšak u třiceti vozidlové simulace s úspěšným vyhledáním cesty vzrostl čas dvojnásobně. V simulaci s 50 uzly je čas s úspěšným řešením skoro šestnásobně vyšší, než v úspěšné simulaci pro 15 uzlů.

Počet uzlů	Vyhodnocení	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Počáteční uzel	Koncový uzel	Finální cesta
15	Úspěch	0,27	1	15	[1, 15]
15	Neúspěch	0,28	1	15	
30	Úspěch	0,69	1	30	[1, 7, 30]
30	Neúspěch	0,32	1	30	
50	Úspěch	1,17	1	50	[1, 26, 38, 41, 33, 50]
50	Neúspěch	0,55	1	50	

Tabulka 7: Souhrn výsledků vyhodnocených simulací DSR protokolu

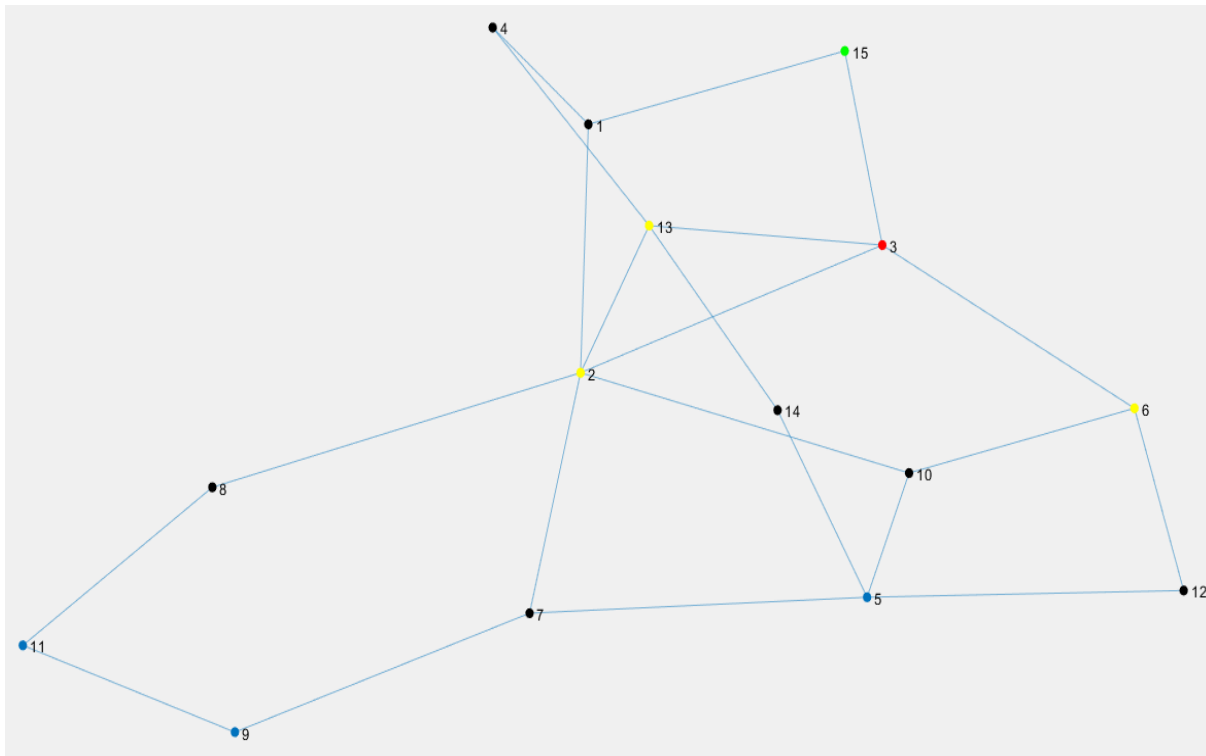
Výsledky v jednotlivých simulacích nám dokazují, že úspěšnost je závislá na celkovém počtu uzlů a parametru sousednosti. V dalším případě hraje neméně důležitou roli také náhodné rozmístění uzlů, které simulovalo pohyb v síti. Oproti síti, kde by bylo rozmístění konstantní (zamezen pohyb vozidel), a tudíž nalezení optimálního nastavení parametrů pro co nejlepší úspěšnost a nejmenší časový interval jednodušší. Dané proměnné měly ve všech simulacích různou hodnotu. V případě nižšího počtu uzlů (vozidel) je čas potřebný k sestavení a vyhodnocení simulace nízký, ale také úspěšnost nalezení cesty je nízká, tudíž pro dosažení co nejlepších výsledků je nutností zvětšit parametr sousednosti. V síti s větším počtem vozidel je důležité rozmístění uzlů (vozidel) z důvodu vyhodnocování co nejefektivnější cesty k cílovému uzlu. Také parametr sousednosti hraje důležitou roli na časovou náročnost simulace. Druhá a třetí simulace má oproti první simulaci větší úspěšnost v nalezení finální cesty, ale také vyšší časové nároky na sestavení simulace.

4.3. Implementace OLSR

Implementace směrovacího algoritmu Optimized Link State Routing protocol (OLSR) byla implementována v prostředí MATLAB pro síť Ad-hoc. Simulační plocha, která slouží pro simulaci, byla nastavena na stejnou hodnotu jako u předchozích dvou simulací (kapitola 4.2 a 4.3). V implementaci OLSR budeme měnit počet uzlů, které jsou náhodně rozmístěny v prostoru, a parametr sousednosti. Simulace obsahuje MPRS (MULTIPOINT RELAY SELECTOR) uzel, který zvolil jiný uzel (popř. uzly) za svůj vlastní MPR (MULTIPOINT RELAY) uzel. MPRS uzel je při simulaci vybraný náhodně z celkového počtu uzlů.

4.3.1. Simulace OLSR protokolu

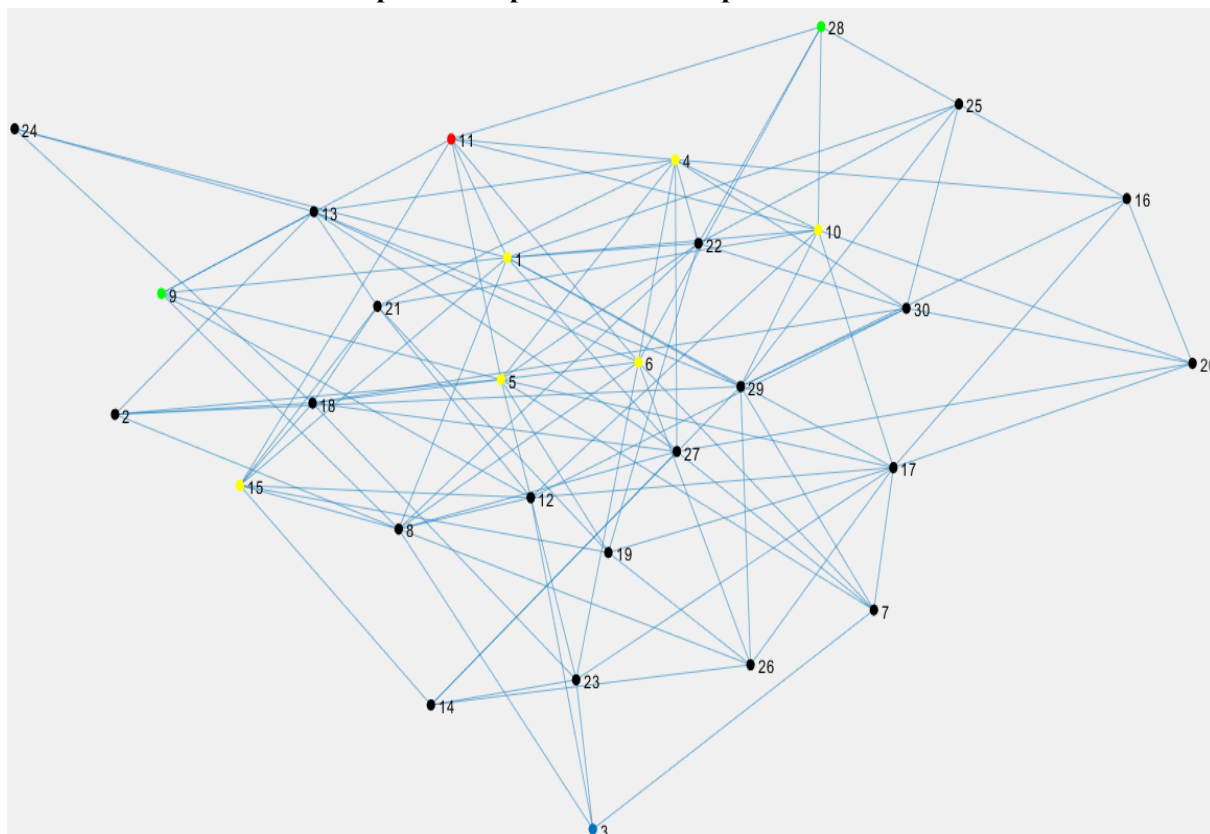
Simulace 1: Simulace OLSR protokolu pro 15 vozidel a parametrem sousednosti s hodnotou 25



Obrázek 13: Simulace OLSR pro 15 vozidel, $R=25$

V první simulaci (obrázek 13) vidíme výsledek OLSR protokolu pro 15 vozidel s nastaveným parametrem sousednosti na hodnotu 25. Uzel označený hodnotou 3, který má červenou barvu, je náhodně vybraný MPRS uzel. V první části simulace zjistí MPRS své sousedy, kteří jsou vzdáleni jen jeden „skok“. Jak můžeme vidět, jedná se o uzly s označením [2, 6, 13, 15]. V následujícím kroku si MPRS zjistí sousedy vzdálené dva „skoky“. Z uzlu označeného hodnotou 2 se jedná o uzly [1, 7, 8, 10], pro uzel označený hodnotou 6 se jedná o uzly [10, 12] a pro uzel označený hodnotou 13 se jedná o uzly [4, 14]. V dalším kroku nastává výběr vhodných MPR uzlů. Jako MPR budou označeny následující uzly [2, 6, 13], protože jsou spojeny s uzly z druhého skoku od MPRS. Uzel označený hodnotou 15 můžeme tudíž označit za přímého souseda z prvního kroku, protože uzly vzdálené 2 „skoky“ od MPRS jsou již pokryté. Uzly označené hodnotou [11, 9, 5] jsou vzdáleny 3 přeskoky od MPRS.

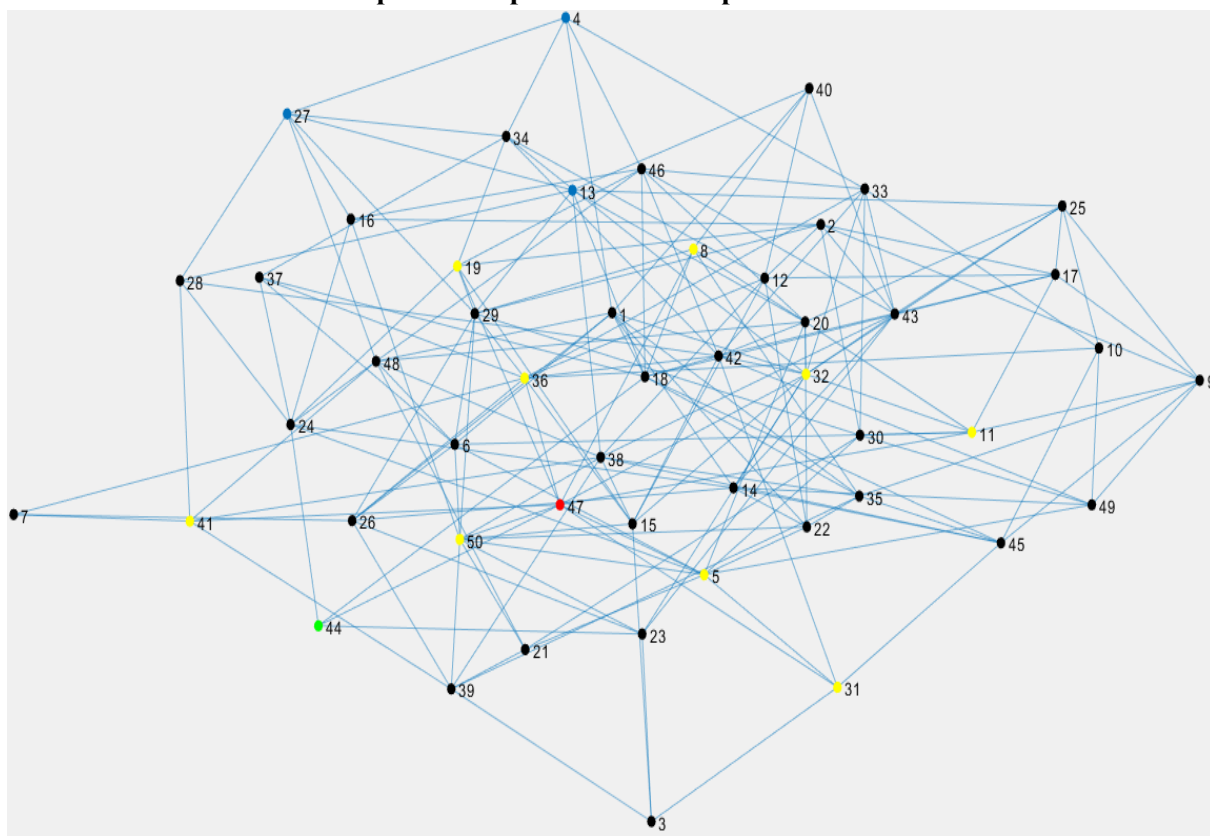
Simulace 2: Simulace OLSR protokolu pro 30 vozidel a parametrem susednosti s hodnotou 20



Obrázek 14: Simulace OLSR pro 30 vozidel, $R=20$

Druhá simulace (Obrázek 14) OLSR protokolu má nastavené hodnoty pro počet vozidel na 30 a parametr susednosti na 20. Za MPRS byl zvolen uzel s hodnotou 11. V prvním kroku si označil MPRS susední uzly vzdálené 1 skok, tudíž uzly [1, 4, 5, 6, 9, 10, 15, 28] a následně uzly vzdálené 2 skoky, jedná se o uzly [8, 17, 22, 24, 25, 27, 29, 13, 16, 21, 30, 2, 7, 12, 18, 19, 23, 26, 20, 14]. V druhém kroku si MPRS zvolí podle svých susedů, vzdálené 1 skok, MPR. Uzel označený hodnotou 1 má za susední uzly [24, 9, 15, 8, 27, 29, 17, 22, 10, 25]. Uzel 4 má za susední uzly [13, 21, 5, 6, 27, 22, 30, 10, 16]. Uzel 5 má za susední uzly označené [9, 18, 2, 12, 19, 7, 17, 6, 22, 4]. Uzel číslo 6 má za susedy [13, 5, 8, 23, 26, 7, 28, 4]. Označený uzel s hodnotou 10 má za susední uzly [28, 4, 1, 21, 12, 29, 17, 20]. Uzly 9 a 28 mají již všechny své susedy pokryté od ostatních uzlů, tudíž je můžeme označit za koncový uzel. Uzel vzdálený od MPRS tři skoky je pouze jeden v celé síti. Jedná se o uzel s označením 3.

Simulace 3: Simulace OLSR protokolu pro 50 vozidel a parametrem susednosti s hodnotou 25



Obrázek 15: Simulace OLSR pro 50 vozidel, $R=15$

Ve třetí simulaci (obrázek 15) vidíme použití OLSR protokolu pro 50 vozidel. Nastavená hodnota parametru susednosti je rovna 25. Za zvolený MPRS je uzel označený hodnotou 47. Sousedé vzdálené 1 skok od MPRS jsou [5, 8, 11, 19, 31, 32, 36, 41, 44, 50]. Sousední uzly vzdálené 2 přeskoky jsou viz tabulka č. 9.

6	20	21	22	24	30	49	18	29	35	40	9	17	2
15	34	46	3	42	45	1	14	23	25	33	43	7	10
12	26	37	28	38	39	48	16						

Tabulka 8: Uzly vzdálené 2 skoky od MPRS v simulaci OLSR protokolu (50 vozidel, $R=15$)

Zvolené MPR jsou uzly [5, 8, 11, 19, 31, 32, 36, 41, 50], tudíž skoro všechny susední uzly vzdálené 1 skok od MPRS, kromě uzlu 44, který je koncovým uzlem.

4.3.2. Zhodnocení simulace OLSR protokolu

Pro zhodnocení výsledků OLSR protokolu byly využity tři simulace. Každá simulace měla různý počet uzlů a odlišný parametr susednosti R . Každá simulace byla prováděná ve stejném prostoru, tudíž plocha zůstává stejná. Pro jednotlivé simulace bylo vytvořeno deset testů, ze kterých vznikaly tabulky s vyhodnocením. V každé tabulce jsou obsaženy informace ke každému testu. Jedná se o potřebný čas k sestavení simulace, uzel označený za MPRS, počet uzlů označených jako MPR, počet

vzdálených uzlů a počet koncových sousedů. Sloupec nazvaný počet vzdálených uzlů obsahuje počet uzlů, které jsou od zvoleného MPRS vzdáleny více než 2 „přeskoky“ (konkrétně se jedná o sousedy vzdálené 3 „přeskoky“), tudíž se k daným uzlům nedostanou všesměrové zprávy, které mohou přenášet pouze uzly označené jako MPR. Počet koncových sousedů označuje uzly, které jsou sousedé s MPRS v prvním kroku a nejsou označeny za MPR.

První simulace měla nastavené parametry s počtem uzlů na 15 a parametrem sousednosti na 25. V tabulce 9 můžeme vidět jednotlivé údaje z každého testu. Průměrný čas pro nastavené hodnoty je 1,7464 sekund. Průměrně v síti pro 15 uzlů s parametrem sousednosti R nastaveným na 25 nemohou přijímat 3 až 4 uzly zprávy vysílané MPR.

Pořadí testu	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Zvolený MPRS	Počet MPR	Počet vzdálených uzlů	Počet koncových sousedů
1	1,81	12	3	4	1
2	1,68	1	3	3	2
3	1,81	12	3	5	0
4	1,66	13	3	4	0
5	1,88	5	4	0	2
6	1,78	4	2	3	3
7	1,77	4	3	1	2
8	1,69	6	3	3	2
9	1,69	1	3	3	1
10	1,7	9	2	6	0

Tabulka 9: Vyhodnocení první simulace OLSR protokolu

Parametry pro druhou simulaci OLSR protokolu byly nastaveny na 30 vozidel a parametrem sousednosti R na hodnotu 20. Průměrný čas k sestavení simulace v sekundách je 1,9711 s. Průměrný počet vzdálených uzlů je 4 až 5 uzlů v celé síti viz tabulka č. 10.

Pořadí testu	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Zvolený MPRS	Počet MPR	Počet vzdálených uzlů	Počet koncových sousedů
1	2,01	19	6	5	0
2	2,11	25	6	2	4
3	2,08	15	5	3	2
4	1,75	13	5	13	0
5	2,07	5	4	10	1
6	2,16	26	4	3	4
7	1,82	19	5	3	2
8	2,04	3	5	1	2
9	1,92	15	5	6	1
10	1,75	23	5	2	3

Tabulka 10: Vyhodnocení druhé simulace OLSR protokolu

Třetí simulace OLSR protokolu byla provedena pro 50 vozidel a parametrem sousednosti nastaveným na hodnotu 15. Průměrný čas k provedení testu simulace je 1,9831 s a průměrný počet vzdálených uzlů jsou 2 uzly na celou síť viz tabulka č. 11.

Pořadí testu	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Zvolené MPRS	Počet MPR	Počet vzdálených uzlů	Počet koncových sousedů
1	1,59	17	5	0	13
2	2,38	46	6	2	5
3	2,25	43	7	0	5
4	2,10	40	7	3	4
5	2,30	39	6	0	8
6	2,35	45	6	1	10
7	2,14	39	6	2	10
8	1,97	35	7	6	0
9	2,09	40	7	4	3
10	2,21	37	6	2	5

Tabulka 11: Vyhodnocení třetí simulace OLSR protokolu

V poslední části porovnáváme tři předchozí simulace mezi sebou navzájem ve stejném prostoru. Poslední část simulace je vytvořena z důvodu, abychom mohli vidět vliv parametru susednosti pro 15, 30 a 50 uzlů na počet vzdálených uzlů. Parametr susednosti pro již zmíněné počty uzlů byl zvolen nejdříve na 15 (spodní hranice v testech) a později na 25 (horní hranice v testech).

V následující tabulce č. 12 můžeme vidět výsledky k jednotlivým vybraným testům. Pro 15 vozidel s parametrem susednosti nastaveným na 15 způsobil delší potřebný čas k sestavení simulace a také počet vzdálených uzlů s hodnotou 7, z toho vyplývá, že téměř polovina uzlů v síti nepřijme zprávy od zvolených MPR. V opačném případě s vyšší hodnotou parametru susednosti je počet vzdálených uzlů nulový a také potřebný čas k sestavení simulace je menší. Podobné výsledky dostáváme z testů provedených pro 30 uzlů. Pro síť s 50 uzly platí podobné vyhodnocení jako u předchozích testů ohledně počtu vzdálených uzlů, ale odlišuje se v potřebném čase pro sestavení simulace. Čas pro vyšší hodnotu parametru susednosti je vyšší, napříč tomu, že v předchozích dvou případech byl nižší, ale to může být zapříčiněno vyšším počtem uzlů (vozidel) v síti.

Počet uzlů	Parametr susednosti	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Zvolené MPRS	Počet MPR	Počet vzdálených uzlů	Počet koncových susedů
15	15	2,21	4	2	7	1
15	25	1,61	13	3	0	2
30	15	1,90	8	3	18	0
30	25	1,55	15	4	1	6
50	15	1,47	42	5	16	2
50	25	1,69	48	5	3	5

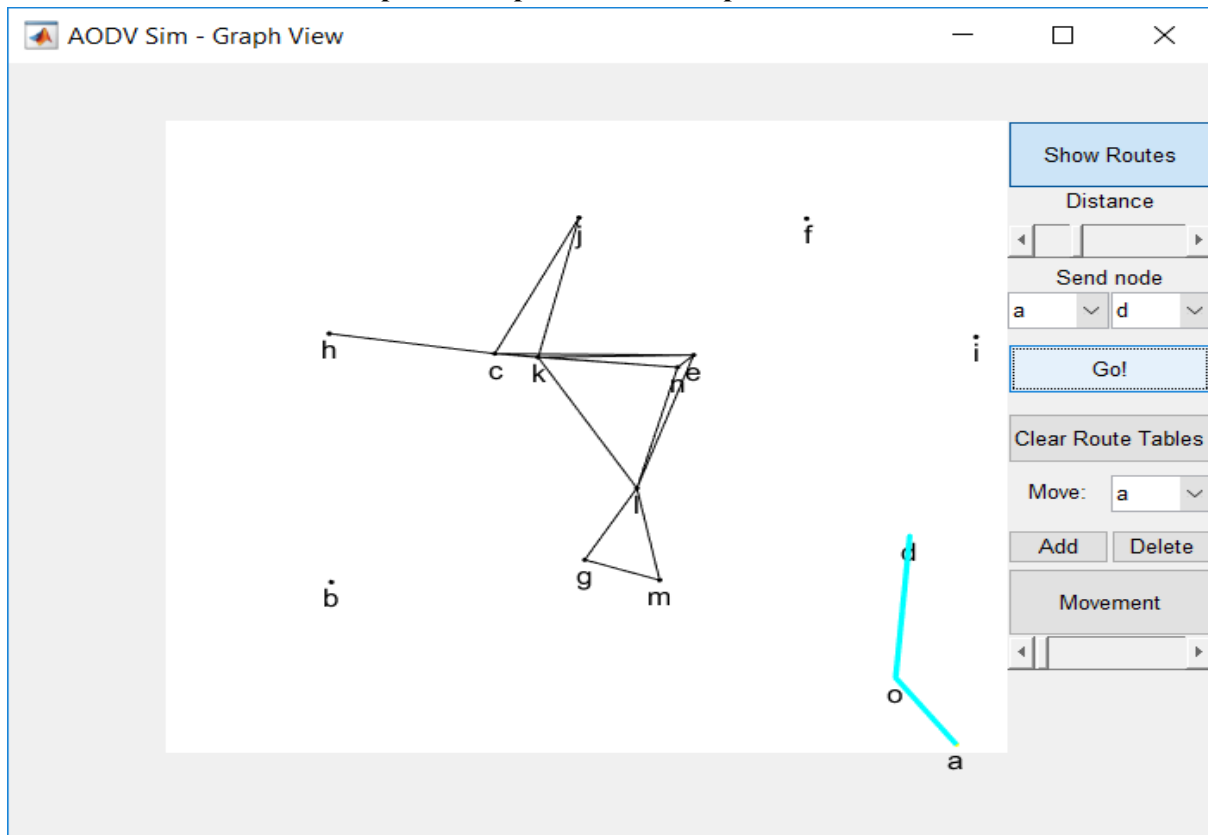
Tabulka 12: Souhrn výsledků vyhodnocených simulací OLSR protokolu

4.4. Implementace AODV

Implementace sloužící pro simulaci protokolu Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) byla vytvořena v prostředí MATLAB. Simulace bude prováděna v prostředí o rozměrech 100 x 100 metrů, které zůstává neměnné po celou dobu simulace. Implementace AODV protokolu obsahuje náhodně vygenerované uzly označené písmeny malé abecedy s možností výběru počátečního a koncového uzlu. Parametr susednosti je zde také nastavován jak v předchozích simulacích protokolů. V implementaci AODV protokolu můžeme vidět znázorněné ROUTE REQUEST, ROUTE REPLY a ROUTE ERROR zprávy pro vyhledání finální cesty z počátečního uzlu do koncového.

4.4.1. Simulace protokolu AODV

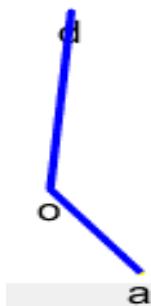
Simulace 1: Simulace AODV protokolu pro 15 vozidel a parametrem sousednosti s hodnotou 25



Obrázek 16: Simulace AODV pro 15 vozidel, $R=25$

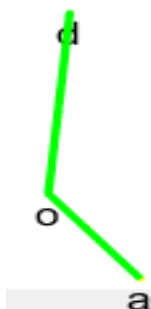
V první simulaci AODV protokolu (Obrázek 16) lze vidět náhodně vygenerované umístění 15 uzlů, v prostoru 100 x 100 metrů. Za počáteční uzel byl zvolen uzel označený *a*. Koncový uzel byl označen písmenem *d*. Parametr sousednosti *R* je pro uzly nastaven na hodnotu 25. Na výstupu simulace vidíme RREQ (ROUTE REQUEST) zprávy poslány z počátečního uzlu, které jsou označeny světle modrou barvou.

Na obrázku č. 17, který je zaměřený na podsít' uzlů, vidíme ROUTE REPLY zprávy označené tmavě modrou barvou.



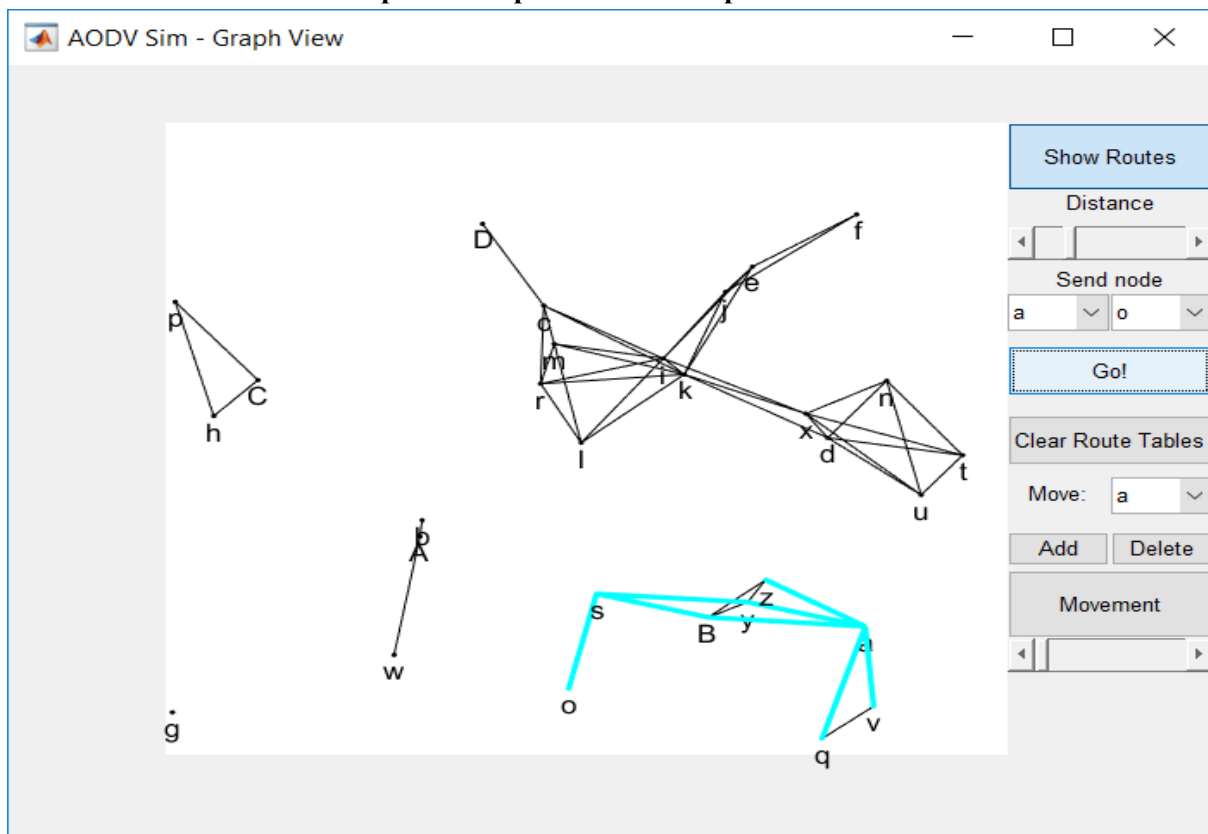
Obrázek 17: ROUTE REPLY zprávy AODV protokolu pro 15 vozidel, $R=25$

Na obrázku č. 18 můžeme vidět úspěšný výsledek hledané cesty, označený zelenou barvou, z počátečního uzlu do koncového. Finální cesta je tedy [a, o, d,].



Obrázek 18: Výsledek hledané cesty AODV protokolu pro 15 vozidel, R=25

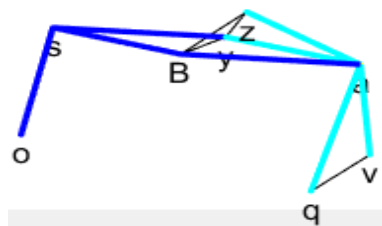
Simulace 2: Simulace AODV protokolu pro 30 vozidel a parametrem sousednosti s hodnotou 20



Obrázek 19: Simulace AODV pro 30 vozidel, R=20

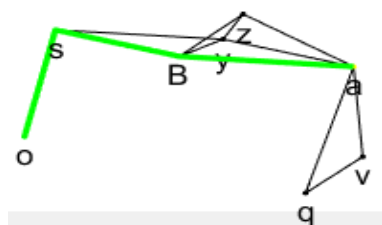
V simulaci číslo 2 (obrázek 19), která je pro 30 uzlů, je nastaven parametr sousednosti na hodnotu 20. V simulaci se již objevily písmena velké abecedy z důvodu většího počtu uzlů. V simulaci můžeme vidět RREQ zprávy, které vysílá počáteční uzel, aby vyhledal koncový uzel při „zaplavování“ sítě.

V podsíti uzlů vidíme ROUTE REPLY zprávy označené tmavě modrou barvou, viz obrázek číslo 20.



Obrázek 20: ROUTE REPLY zprávy AODV protokolu pro 30 vozidel, R=20

Na obrázku č. 21 můžeme vidět úspěšný výsledek hledané cesty z počátečního uzlu do koncového. Finální cesta je tedy [a, o, d,].



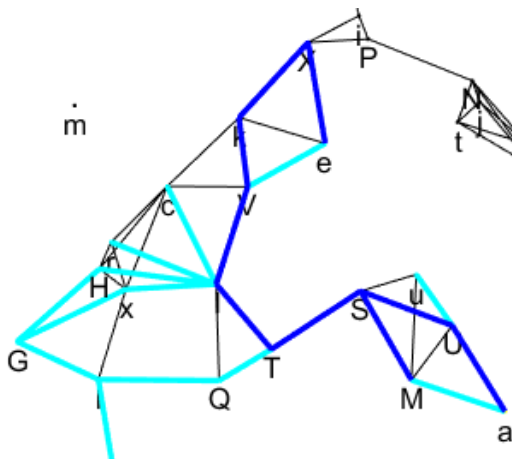
Obrázek 21: Finální cesta AODV protokolu pro 30 vozidel, R=20

Simulace 3: Simulace AODV protokolu pro 50 vozidel a parametrem sousednosti s hodnotou 15

Obrázek 22: Simulace AODV protokolu pro 50 vozidel, R=15

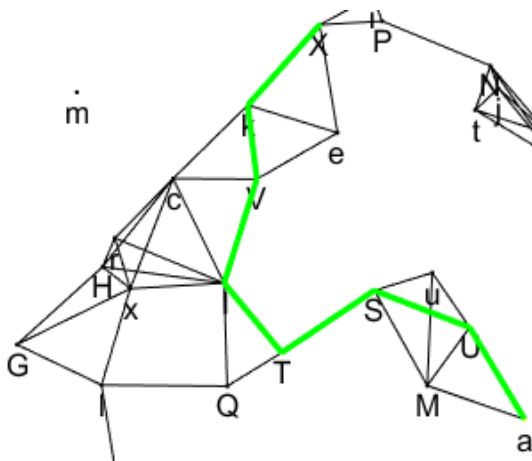
Ve třetí simulaci (Obrázek 22), která je pro 30 uzlů, je nastaven parametr sousednosti na hodnotu 15. Na obrázku můžeme vidět RREQ zprávy z počátečního uzlu označeného malým písmenem *a* do koncového uzlu označeného velkým písmenem X.

Na obrázku č. 23 vidíme RREP zprávy z koncového uzlu označeného hodnotou X do počátečního uzlu označeného hodnotou *a*.



Obrázek 23: ROUTE REPLY zprávy AODV protokolu pro 50 vozidel, $R=15$

Na obrázku č. 24 můžeme vidět úspěšný výsledek hledané cesty z počátečního uzlu do koncového. Finální cesta je tedy [*a*, U, S, T, I, V, k, X].



Obrázek 24: Finální cesta AODV protokolu pro 50 vozidel, $R=15$

4.4.2. Zhodnocení AODV protokolu

Celkem byly provedeny a následně vyhodnoceny tři simulace s různým počtem uzlů (vozidel) a různým parametrem sousednosti R . Pro získání výsledků bylo vyhodnoceno 10 testů pro každou simulaci. Jednotlivé simulace byly nastaveny pro 15 vozidel s parametrem sousednosti R rovným hodnotně 25. Následná simulace pro 30 vozidel s parametrem sousednosti nastaveným na hodnotu 20 a třetí simulace byla provedena v síti pro 50 vozidel s parametrem sousednosti 15. V poslední části bylo provedeno porovnání mezi předchozími simulacemi navzájem.

V první simulaci byl nastaven počet vozidel na 15 a parametr susednosti na 25. Z deseti testů byly v této simulaci úspěšné všechny při hledání cesty z počátečního uzlu do koncového. Z následující tabulky č. 13 můžeme vidět, že v třetí simulaci bylo nutností využít pro vyhledání cesty 18 přeskoků, aby byla nalezena cesta z počátečního uzlu ke koncovému a následná odpověď z koncového uzlu zpět do počátečního.

Pořadí testu	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Počet přeskoků	Vyhodnocení
1	4,63	1	Úspěch
2	3,27	11	Úspěch
3	9,06	18	Úspěch
4	4,63	1	Úspěch
5	4,76	11	Úspěch
6	2,35	3	Úspěch
7	5,85	1	Úspěch
8	2,46	4	Úspěch
9	5,52	1	Úspěch
10	3,95	2	Úspěch

Tabulka 13: Vyhodnocení první simulace AODV protokolu

V druhé simulaci pro 30 vozidel s parametrem susednosti, který je roven hodnotě 20, bylo také všech deset testů úspěšných pro vyhledání cesty z počátečního uzlu do koncového. Oproti simulaci s 15 uzly je ve druhé simulaci větší počet přeskoků, což je zapříčiněno větším počtem uzlů viz. tabulka č. 14.

Pořadí testu	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Počet přeskoků	Vyhodnocení
1	4,94	30	Úspěch
2	8,61	32	Úspěch
3	5,83	12	Úspěch
4	5,07	18	Úspěch
5	9,51	38	Úspěch
6	9,69	43	Úspěch
7	9,71	36	Úspěch
8	3,23	1	Úspěch
9	4,87	29	Úspěch
10	4,69	26	Úspěch

Tabulka 14: Výsledek druhé simulace AODV protokolu

Třetí simulace měla nastavené parametry na 50 vozidel s parametrem susednosti na 15. V tabulce č. 15 můžeme vidět, že již čtyři z deseti testů nebyly úspěšné. Počet přeskoků, se z důvodu zmenšení parametru susednosti, zmenšil oproti druhé simulaci.

Pořadí testu	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Počet přeskoků	Vyhodnocení
1	0	0	Neúspěch
2	1,65	8	Úspěch
3	2,06	12	Úspěch
4	1,83	3	Úspěch
5	9,83	6	Úspěch
6	2,33	13	Úspěch
7	0	0	Neúspěch
8	0	0	Neúspěch
9	3,33	1	Úspěch
10	0	0	Neúspěch

Tabulka 15: Výsledek třetí simulace AODV protokolu

V poslední části simulace (tabulka č. 16) můžeme vidět srovnání předešlých simulací. Srovnání bylo provedeno pro 15, 30 a 50 vozidel se stejně nastaveným parametrem sousednosti na hodnotu 15. V tabulce jsou pole pro počet vozidel, potřebný čas k sestavení simulace, tudíž vyhledání cesty z počátečního uzlu do koncového a zpátky, v sekundách a nanosekundách. Nejmenší počet přeskoků byl vybrán z deseti simulací a reprezentuje počet přeskoků k vyhledání finální cesty. V posledním poli tabulky vidíme počet neúspěšných pokusů o vyhledání cesty. Tudíž můžeme říci, že pro stejné podmínky (prostor, parametr sousednosti) a s různým počtem uzlů, že menší parametr sousednosti můžeme použít pro síť s vyšším počtem uzlů pro co nejlepší výsledky vyhledání cesty.

Počet vozidel	Potřebný čas k sestavení simulace [s]	Nejmenší počet přeskoků	Počet neúspěchů
15	3,55	2	6
30	2,31	3	2
50	9,83	6	4

Tabulka 16: Souhrn výsledků vyhodnocených simulací AODV protokolu

5. Zhodnocení dosažených výsledků

V této kapitole si shrneme zhodnocení dosažených výsledků pro jednotlivé protokoly. Pro každý protokol byly provedeny tři simulace s různým počtem uzlů a parametrem sousednosti. Počet uzlů byl stanoven na hodnoty 15, 30 a 50 pro každý protokol a parametr sousednosti na 25, 20 a 15, který ovlivňoval úspěšnost vyhodnocení hledání výsledné cesty i její časovou náročnost. V každé simulaci bylo provedeno 10 testů pro získání potřebných informací k danému protokolu.

V protokolu DSR nám dopadla nejhůře první simulace (15 vozidel, $R=15$). Z pohledu vyhodnocení úspěšnosti vyhledání finální cesty z počátečního uzlu do koncového tudíž můžeme říci, že pro 15 vozidel by bylo nutné nastavit vyšší parametr sousednosti, aby nedocházelo ke ztrátám dat v síti. Pro 50 vozidel již bylo s parametrem sousednosti nastavený na hodnotu 15 snazší hledání finální cesty, ale bez jistoty úspěšného vyhledání, ovšem potřebný čas se oproti 15 vozidlům zvětšil skoro pětinašobně.

V protokolu OLSR byly nevhodně zvoleny parametry u druhé simulace (30 vozidel, $R=20$) z důvodu velkého počtu vzdálených uzlů, což jsou uzly, které jsou vzdáleny již 3 skoky od zvoleného MPRS a nemohou tudíž dostat zprávy od MPR. Z toho vyplývá, že se musí v dalším kroku znovu provést výběr MPR, aby se počet zpráv a vzdálených uzlů minimalizoval.

V protokolu AODV můžeme vidět relativně úspěšné nastavení parametru sousednosti pro 15 a 30 uzlů s mírným kolísáním. V simulaci s 50 ti uzly již bylo více neúspěšných pokusů než v předchozích dvou simulacích.

Z celkového hodnocení můžeme říci, že pro nízký počet uzlů a se správně nastavením parametrem sousednosti je nejvhodnější použít protokol DSR z důvodu nízké ztrátovosti a nižší odezvy dat. Pro síť s vysokým počtem uzlů je výhodnější využít protokol OLSR (také se správně nastaveným R), který pomocí vícebodového spojení MPR lépe optimalizuje větší a hustější síť.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo srovnání efektivity směrovacích algoritmů v mobilních Ad-hoc sítích (MANET). Efektivita algoritmů byla zpracována v prostředí MATLAB pro tři směrovací protokoly. Jedná se o AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector protocol), DSR (Dynamic Source Routing protocol) a OLSR (Optimized Link State Routing protocol) protokoly.

V úvodní kapitole bakalářské práce se věnujeme úvodu k Ad-hoc sítím. Kapitola obsahuje základní informace o zmíněných sítích. Dále jsou zde uvedeny příklady nejznámějších technologií, které využívají již zmíněnou topologii Ad-hoc sítě. V kapitole jsou také uvedeny vhodné přístupové protokoly, které jsou využívány v Ad-hoc sítích, a jejich rozdělení. Ke konci kapitoly je zabezpečení komunikace v dané síti a na samém závěru kapitoly porovnáváme Ad-hoc sítě, jejich klady a zápory oproti klasické síti.

V následující kapitole jsou obsaženy informace o konceptu MANET a VANET sítí a jejich následném použití. První část se zabývá MANET sítí, konkrétně jejími vlastnostmi, směrovacími protokoly a následným využitím MANET sítí. V druhé části kapitoly se zabýváme sítí VANET, která je podmnožinou sítě MANET. V dané části jsou obsaženy informace o architektuře dané sítě, její rozdělení podle směrování a využití VANET sítí.

Třetí kapitola obsahuje technologie a protokoly využívané pro komunikaci mezi vozidly. Jsou zde popsány principy jednotlivých protokolů, konkrétně AODV, OLSR a DSR. Dále jsou ve třetí kapitole obsaženy informace o standardu 802.11p a WAVE.

V závěrečné části kapitoly jsou provedeny simulace jednotlivých směrovacích protokolů, které jsou sepsány v předchozí kapitole a mezi které patří DSR (Dynamic Source Routing protocol), OLSR (Optimized Link State Routing protocol) a AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector protocol). Dané simulace byly implementovány v prostředí MATLAB, jedná se konkrétně o verzi R2017b. Srovnání jednotlivých simulací protokolů a jejich následné srovnání navzájem mezi sebou je uvedeno v závěru kapitoly. Z daných výsledků je patrné, že pro větší počet uzlů je nejlepší použít OLSR protokol. Při menším počtu uzlů je nejlepší použít protokol DSR.

Použitá literatura

- [1] MACHATA, Tomáš a Jiří HOŠEK. Popis směrovacího protokolu AODV pro MANET sítě a jeho následné rozšíření o nový typ zprávy v prostředí OPNET Modeler (Description of routing protocol AODV and its extension by new type of routing message). *Elektro revue* [online]. Brno, 2011, 12.09.2011, 2011(5), 11 [cit. 2019-04-14]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/120/popis-smerovaciho-protokolu-aodv-pro-manet-site-a-jeho-nasledne-rozsireni-o-novy-typ-zpravy-v-prostredi-opnet-modeler/>
- [2] HARTENSTEIN, Hannes a Kenneth LABERTEAUX. VANET: vehicular applications and inter-networking technologies. Chichester, U.K.: Wiley, 2010. *Intelligent transportation systems* (Chichester, England). ISBN 978-0-470-74056-9.
- [3] KURMIS, M, ANDZIULIS, A., DZEMYDIENE, D., JAKOVLEV, S., VOZNAK, M., DRUNGILAS, D. (2013). Development of the Real Time Situation Identification Model for Adaptive Service Support in Vehicular Communication Networks, In *Journal Advances in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 11, Issue 5, 2013, pp. 342-348. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/123248/2388-12950-1-PB.pdf?sequence=1>
- [4] BEČVÁŘ, Zdeněk, Pavel MACH a Ivan PRAVDA. Mobilní sítě. V Praze: České vysoké učení technické, [2013]. ISBN 978-80-01-05305-8. Dostupné z: http://improvet.cvut.cz/project/download/C4CZ/Mobilni_site.pdf
- [5] SEHNÁLEK, Adam. Sítě s volnou typologií se zaměřením na technologii MANET: Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/10526?show=full>
- [6] VALA, Ondřej. Analýza směrovacích protokolů používaných v MANET sítích [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66003>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Anna Kubánková.
- [7] MAHDAL, Ondřej. Směrovací protokoly v sítích s volnou topologií: Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=14233
- [8] S. SINGH, P. KUMARI and S. AGRAWAL, "Comparative Analysis of Various Routing Protocols in VANET," *2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, Haryana, 2015, [cit. 2019-04-14] Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7079099&isnumber=7079031>
- [9] KLAMPÁR, Marián. Návrh komunikace mezi pohybujícími se vozidly [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6209>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Vladislav Škorpil.

- [10] HENNER, Jaroslav a Martin GRAMES. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) [online]. 2009 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: wh.cs.vsb.cz/sps/images/7/73/OLSR.pdf
- [11] JIANG, Daniel a Luca DELGROSSI. IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments [online]. 2008, , 5 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4526014>
- [12] KOTZÉ, Kevin. Tutorial: The Matlab Programming Language [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://kevinkotze.github.io/mm-tut1-matlab/>
- [13] WILLIAMS, Brad a Tracy CAMP. Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks [online]. In: . Lausanne, Switzerland, 2002, s. 12 [cit. 2019-04-22]. ISBN 1-58113-501-7. Dostupné z: http://delivery.acm.org/10.1145/520000/513825/p194-williams.pdf?ip=158.196.194.241&id=513825&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=D6C3EEB3AD96C931%2E97A769A0015204DC%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&__acm__=1555938113_422689b3153fea5f19a032339f7e78ce
- [14] ABOLHASAN, Mehran, Tadeusz WYSOCKI a Eryk DUTKIEWICZ. *A review of routing protocols for mobile ad hoc networks: Ad Hoc Networks* [online]. 2004 [cit. 2019-04-22]. ISSN 1570-8705. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157087050300043X?via%3Dihub>
- [15] DENG, HONGMEI, WEILI a D. P. AGRAWAL. Routing security in wireless ad hoc networks. In: *IEEE Communications Magazine* [online]. 2002, s. 70-75 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1039859>
- [16] LABERTEAUX, Kenneth P. a Hannes HARTENSTEIN. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* [online]. 2008, 164 - 171 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4539481>
- [17] LI Fan a Yu WANG. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* [online]. 2007, 12 - 22 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4450627>
- [18] AL-SULTAN, Saif, Moath M.AL-DOORI, Ali H.AL-BAYATTI a Hussien ZEDAN. A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network. In: *ScienceDirect* [online]. 2014, s. 380-392 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108480451300074X?via%3Dihub>

- [19] ZEADALLY, Sherali, Ray HUNT, Yuh-Shyan CHEN, Angela IRWIN a Aamir HASSAN. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges. Springer Science+Business Media [online]. 2010, , 1-25 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11235-010-9400-5.pdf>
- [20] TOOR, Yasser, Paul MUHLETHALER, Anis LAOUITI a Arnaud DE LA FORTELLE. VEHICLE AD HOC NETWORKS: APPLICATIONS AND RELATED TECHNICAL ISSUES. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials [online]. 2008, 74 - 88 [cit. 2019-04-24]. ISSN 1553-877X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4625806>
- [21] MOHAPATRAA, S. a P. KANUNGOB. Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV Routing Protocols using NS2 Simulator. In: KANUNGOB, P. ScienceDirect [online]. 2011, s. 69-76 [cit. 2019-04-24]. ISSN 1553-877X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812008454?via%3Dihub>
- [22] DAS, Saniir R., Charles E. PERKINS a Elizabeth M. ROYER. Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks. In: KANUNGOB, P. Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064) [online]. 2002, s. 3-12 [cit. 2019-04-24]. ISBN 0-7803-5880-5. ISSN 0743-166X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=832168>
- [23] Charles E. PERKINS, Elizabeth M. ROYER. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. WMCSA '99: Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, February 25-26, 1999, New Orleans, Louisiana : proceedings. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 1999. ISBN 0-7695-0025-0. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=749281>
- [24] MATLAB simulation of DSR Protocol for Adhoc networks [online]. In: . [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://www.codeforge.com/article/228239>
- [25] ŠTOHANZL, Milan a Jan PROKOPEC. Car2X a Car2Car komunikace. In: Elektrovue [online]. 2012, s. 6 [cit. 2019-04-09]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrovue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/car2x-a-car2car-komunikace/>
- [26] MS (2019). Selection of Multi-Point Relay (MPR) nodes in OLSR protocol [online]. In: . [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71079-selection-of-multi-point-relay-mpr-nodes-in-olsr-protocol>
- [27] MILLER, Stuart. A simulation of the ad-hoc on-demand distance vector (AODV) routing protocol [online]. In: . 2018 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://github.com/stewythe1st/AODV-Matlab>