

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

Fakulta dopravní



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

# **Hodnocení telekomunikačních parametrů V2X přenosových technologií**

**Martin Dostál**

**Květen 2018**

**Ústav aplikované informatiky v dopravě**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Lokaj, Ph.D.**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K614..... Ústav aplikované informatiky v dopravě**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Martin Dostál**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy**

Název tématu (česky): **Hodnocení telekomunikačních parametrů V2X  
přenosových technologií**

Název tématu (anglicky): Evaluation of Telecommunications Parameters in V2X  
Technologies

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Analyzujte různé typy kooperativních systémů a realizované implementace v ČR a v Evropě.
- Analyzujte současný stav platných a připravovaných norem (ISO, CEN, ETSI) a legislativních dokumentů zaměřených na ověřování kooperativních systémů.
- Analyzujte telekomunikační technologie vhodné pro kooperativní systémy - ITS-G5, LTE-A a LTE-V.
- Analyzujte měřitelné parametry v rámci přenosových technologií V2X systémů.
- Navrhněte SW modul pro ověřování kvality komunikačního kanálu V2X včetně vizualizace výsledků.
- Vypracujte funkční vzorek navrženého automatizovaného systému ověřování telekomunikačních parametrů V2X přenosových technologií a proveďte jeho ověření v laboratorních podmínkách.



Rozsah grafických prací: minimálně 10 obrázků


Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Zelinka, T., Svítek, M.: Telekomunikační řešení pro informační systémy síťových odvětví, Grada 2009  
ETSI, CEN a ISO normy  
Odborné časopisy  
Internet

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Lokaj, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **24. července 2017**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **28. května 2019**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

  
doc. Ing. Vít Fábera, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu aplikované informatiky v dopravě



  
doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Martin Dostál  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 13. září 2018

## Prohlášení autora práce

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne.....

.....

## **Poděkování**

Děkuji svému školiteli panu Doc. Ing. Zdeňkovi Lokajovi, Ph.D. a panu Ing. Martinovi Šrotýřovi, Ph.D. za jejich věnovaný čas, vedení práce a poskytování cenných rad, které pomohly formovat tuto práci.

## **Abstrakt**

Kooperativní systémy vozidel jsou nástrojem ke zvýšení efektivity pozemní silniční dopravy a ke snížení jejího ekologického dopadu. Technologie a postupy potřebné k masovému nasazení kooperativních systémů jsou v nynější době ve fázi vývoje a testování. Cíl této diplomové práce je dvojitý: vytvořit analýzu typů a pilotních implementací kooperativních systémů v ČR a v Evropě, včetně popisu použitých technologií a v druhé řadě vytvoření softwarového nástroje pro analýzu datových záznamů o komunikaci z ITS-G5 jednotek nasazených v rámci projektu C-ROADS CZ na brněnském městském okruhu, jehož výstupem jsou reporty shrnující informace o relevantních telekomunikačních parametrech.

**Klíčová slova:** ITS, C-ITS, ITS-G5, datová analýza

## **Abstract**

Cooperative vehicular system is a tool with the goal of ensuring higher traffic effectiveness and smaller amount of pollutants being emitted into the atmosphere. The processes and technologies needed for mass deployment of cooperative vehicular systems are now the subject of research and intensive testing. The goal of this thesis is twofold: to assess the state of cooperative vehicular systems in Europe and Czech Republic and to develop a software tool to evaluate telecommunication parameters based on the input in the form of logs gathered from the ITS G5 units installed in the implementation of the C-ROADS CZ project.

**Key words:** ITS, C-ITS, ITS-G5, data analysis

# Obsah

1	Úvod .....	12
2	C-ITS .....	13
2.1	Historie a vývoj C-ITS .....	13
2.2	Projekty C-ITS .....	14
2.2.1	Evropa .....	14
2.2.2	ČR .....	21
2.3	Architektura C-ITS .....	24
2.3.1	Architektura ITS-S .....	24
2.4	C-ITS use cases .....	28
3	Telekomunikace pro C-ITS .....	29
3.1	ITS ETSI G5 .....	29
3.1.1	Topologie sítě .....	29
3.1.2	PHY .....	30
3.1.3	MAC .....	31
3.1.4	Decentralized congestion control (DCC) .....	31
3.1.5	Frekvenční pásma .....	32
3.2	C-V2X .....	33
3.2.1	LTE .....	33
3.2.2	LTE-A .....	35
3.2.3	LTE-V .....	35
4	Testování C-ITS .....	37
4.1	Standardy testování C-ITS .....	37
4.1.1	Standardizační organizace .....	37
4.1.2	Standardy testování C-ITS .....	38
4.2	Měřitelné parametry systému V2X .....	41
4.2.1	Telekomunikační KPI .....	41
4.2.2	GNSS KPI .....	43
5	Zpracování dat – metodika .....	44
5.1	Python .....	44

5.1.1	Obecný popis.....	44
5.1.2	Pandas.....	44
5.1.3	NumPy.....	44
5.2	Data .....	45
5.2.1	Získání .....	45
5.2.2	Forma.....	45
5.2.3	Obsah.....	46
5.2.4	Výpočet telekomunikačních parametrů.....	47
5.3	Vstupy a výstupy softwarového nástroje.....	49
5.4	Postup zpracování dat .....	51
5.4.1	Předzpracování logů .....	51
5.4.2	Kombinace logů.....	53
5.4.3	Zhodnocení telekomunikačních parametrů.....	53
5.4.4	Automaticky generovaný report.....	53
6	Výsledky .....	55
7	Závěr.....	56
8	Zdroje .....	57
	Dodatek A.....	59

## Seznam obrázků

OBR. 1:	ROZSAH PROJEKTU SIMTD, TMAVĚ AZUROVÁ - DÁLNIČNÍ S VYSOKOU HUSTOTOU KOMUNIKAČNÍCH UZLŮ, AZUROVÁ – DÁLNIČNÍ S KOMUNIKAČNÍMI UZLY NA NÁJEZDECH A SJEZDECH, ZELENÁ – SILNIČNÍ KOMUNIKACE S KOMUNIKAČNÍMI UZLY NA SVĚTELNĚ ŘÍZENÝCH KŘIŽOVATKÁCH, ČERVENÁ – SILNIČNÍ KOMUNIKACE V INTRAVILÁNU [2].....	14
OBR. 2:	ÚSEKY DÁLNIC V PROJEKTU COOPERS[4].....	15
OBR. 3:	TECHNOLIE A SLUŽBY POSKYTOVANÉ V RÁMCI PROJEKTU COOPERS [4].....	16
OBR. 4:	PROJEKT C-ROADS, ČLENSKÉ STÁTY [5] .....	17
OBR. 5:	STRUKTURA ŘÍZENÍ V PROJEKTU C-ROADS[6] .....	18
OBR. 6:	C-ROADS, USE CASES [7].....	18
OBR. 7:	ECOMOVE STRUKTURA PROJEKTU [8].....	19
OBR. 8:	VYBAVENÍ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY JEDNOTKOU RSU PRO KOMUNIKACI ETSI ITS G5 [10] .....	21
OBR. 9:	JEDNOTLIVÉ LOKALITY ČESKÉHO PILOTNÍHO PROJEKTU C-ROADS CZ [11] .....	22
OBR. 10:	ANTÉNNÍ POLE RSU INSTALOVANÉ NA DOPRAVNÍM PORTÁLU NAD DÁLNIČNÍ KOMUNIKACÍ [11].....	23
OBR. 11	REFERENČNÍ ARCHITEKTURA ITS-S [12] .....	25
OBR. 12	FUNKČNÍ KOMPONENTY ITS-S, ZLEVA PO SMĚRU HODINOVÝCH RUČÍČEK: GATEWAY, ROUTER A BORDER ROUTER [12].....	26



OBR. 13 VANET ITS-S DEKOMPOVANÉ DO FUNKČNÍCH KOMPONENT V ZÁVISLOSTI NA ROLI, PARAFRÁZE [12] .....	27
OBR. 14: VRSTVY POKRYTÉ ETSI ITS-G5 [14] .....	29
OBR. 15: OFDM NOSNÉ VLNY VE SPEKTRU A JEJICH ORTOGONALITA [16].....	30
OBR. 16: ARCHITEKTURA DECENTRALIZED CONGESTION CONTROL [17] .....	32
OBR. 17 PÁSMA SLUŽBY ETSI ITS-G5 [14] .....	32
OBR. 18: MÓDY KOMUNIKACE ZAVEDENÉ V RELEASE 14, ZLEVA: PŘÍMÁ KOMUNIKACE MEZI UZLY, KOMUNIKACE PŘES SÍŤ [22] .....	36
OBR. 19: ČASOVÁ OSA RELEASŮ 3GPP S ODHADEM NA DOKONČENÍ RELEASU 16 [25].....	36
OBR. 20: STANDARDY PRO TESTOVÁNÍ ITS SYSTÉMŮ, V NYNĚJŠÍ DOBĚ VE VÝVOJI/FINALIZOVÁNY [30] .....	39
OBR. 21: DT1 – ÚSEK, NA KTERÉM PROBÍHALO TESTOVÁNÍ, ZE KTERÉHO POCHÁZÍ DATOVÉ LOGY ANALYZOVANÉ V TÉTO PRÁCI [11] .	45
OBR. 22: SEZNAM ZACHYCENÝCH DEKÓDOVANÝCH C-ITS ZPRÁV V PROGRAMOVÉM PROSTŘEDÍ WIRESHARK .....	46
OBR. 23:DETAIL CAM ZPRÁVY VYSLANÉ VOZIDLEM VYBAVENÝM OBU JEDNOTKOU .....	47
OBR. 24: VSTUPY A VÝSTUPY VYVINUTÉHO SOFTWARE NÁSTROJE .....	49
OBR. 25: PROCES EXTRAKCE DAT Z FORMÁTU PCAP DO DATOVÉ ZPRACOVATELNÉHO FORMÁTU (PŘEDZPRACOVÁNÍ DAT) .....	51
OBR. 26: VÝŘEZ Z XML SOUBORU S DATOVÝM LOGEM, V HORNÍ ČÁSTI JE VIDĚT ZÁKLADNÍ STRUKTURA JEDNOHO PAKETU (JEDNÁ C-ITS ZPRÁVA), V DOLNÍ ČÁSTI JSOU VIDĚT DETAILS NÁSLEDUJÍCÍHO PAKETU TÝKAJÍCÍ SE ČASOVÁNÍ A ROZMĚRŮ PAKETU .....	52
OBR. 27: UKÁZKA PŘEDZPRACOVANÝCH AGREGOVANÝCH DAT VE FORMÁTU .CSV V PROGRAMU MS OFFICE EXCEL.....	52
OBR. 28: CELÝ HLAVNÍ PROCES ZPRACOVÁNÍ JIŽ PŘEDZPRACOVANÝCH DAT .....	53
OBR. 29: PŘÍKLAD AUTOMATICKY GENEROVANÉHO REPORTU .....	54

## Seznam tabulek

TABULKA 1: JEDNOTLIVÉ DÍLČÍ FÁZE PROJEKTU C-ROADS CZ .....	22
TABULKA 2: ETSI ITS-G5 - MOŽNÁ NASTAVENÍ MODULAČNÍCH SCHÉMAT A KÓDOVÉHO POMĚRU [14].....	31
TABULKA 3: KANÁLY JEDNOTLIVÝCH PÁSEM ETSI ITS-G5 [14] .....	33
TABULKA 4: POROVNÁNÍ LTE SE SVÝMI PŘEDCHŮDCI [18] .....	33
TABULKA 5: SHRUTÍ TELEKOMUNIKAČNÍCH PARAMETRŮ Z TESTOVÝCH LOGŮ .....	55

## Seznam použitých zkratk

3GPP	3rd generation partnership project
AP	Access point
BPSK	Binary-phase shift keying
BSS	Basic service set
BSSID	BSS identification
BTP	Basic transport protocol
C2X	Všechny kombinace směrů komunikace V2V, V2I, I2V
CAM	Cooperative awareness message
CEN	European committee for standardization
C-ITS	Cooperative ITS
CSMA/CA	Carrier sense multiple access/collision avoidance
DCC	Decentralized congestion control
DENM	Decentralized environmental notification message
DSRC	Dedicated short range communication
EDCA	Enhanced distributed channel access
ETSI	European telecommunications standards institute
EUT	Equipment under test
FDD	Frequency division duplex
GNSS	Global navigation satellite system
IDE	Integrated development environment
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
ISO	International standardization organization
ITS	Intelligent transport system
ITS-S	ITS-station
IUT	Implementation under test
IVI	In-vehicle information message
IZS	Integrovaný záchranný systém
KPI	Key performance indicator
LLC	Logical link control
LTE-V	Long term evolution - vehicular
MAC	Media access control

MHD	Městská hromadná doprava
MIMO	Multiple input multiple output
OBU	On-board unit
OFDM	Orthogonal frequency division multiplex
PAPR	Peak-to-average power ratio
PDU	Protocol data unit
PHY	Fyzická vrstva v modelu ISO/OSI
QAM	Quadrature amplitude modulation
QoS	Quality of service
RSSI	Received signal strength indicator
RSU	Road-side unit
SNR	Signal to noise ratio
SPAT	Signal phase and timing message
SUT	System under test
TDD	Time division duplex
V2I	Vehicle to infrastructure communication
V2V	Vehicle to vehicle communication
VANET	Vehicular ad-hoc network

# 1 Úvod

Ve světě ITS (Intelligent Transport Systems), je věnovaná čím dál větší pozornost oblasti C-ITS (Cooperative ITS). Cílem C-ITS je zvýšení ekonomické i ekologické efektivity pozemní silniční dopravy skrze užití prostředků pro datové propojení vozidel a dopravní infrastruktury. Aplikace C-ITS systémů je široká a zahrnuje celou škálu use-cases, od relativně jednoduchých (např. varování řidiče před pracemi na silnici) až po složité (např. tzv. truck platooning – vytváření vlaků z kamionů, kdy následující kamiony jedou v těsné blízkosti za vedoucími kamiony).

V posledních dekádě byla provedena celá řada pilotních projektů C-ITS technologií a schémat v celé řadě zemí, velká část z nich právě v Evropě. Řada z nich testovala dopady C-ITS na efektivitu dopravy, dále byly testovány různé telekomunikační technologie, které umožňují datové propojení vozidel a infrastruktury. V nynější době existuje jisté schizma, co se použití telekomunikačních technologií týče. Existují dvě hlavní technologie, které se zásadně liší svou filozofií a každá z nich má za sebou relativně silnou lobby – ETSI ITS G5 a 3GPP 5G. Díky tomu je problém získat nezaujaté porovnání obou technologií - v této práci je obsažena mimo analýzy C-ITS projektů a standardů C-ITS také faktická analýza obou hlavních C-ITS telekomunikačních technologií.

Během základního testování funkčnosti nasazeného C-ITS systému založeném na technologii ETSI ITS G5, kdy se testuje, zda instalované RSU (Road side unit) jednotky na dopravní infrastruktuře správně komunikují s testovací OBU (On-board unit) jednotkou v testovacím vozidle jsou generovány záznamové logy všemi jednotkami, které zaznamenávají aktivitu na síti. Pro testovací účely by bylo příhodné disponovat nástrojem, který dokáže z těchto logů spočítat hodnoty některých telekomunikačních parametrů, pomocí nich se dá hodnotit kvalita poskytnutých telekomunikačních služeb. Vývoj a použití takového softwarového nástroje je předmětem praktické části této diplomové práce.

## 2 C-ITS

Jednou z řady významných odnoží ITS, je takzvané C-ITS (Cooperative ITS). C-ITS se zabývá zefektivňováním pozemní dopravy prostřednictvím komunikace mezi všemi participujícími aktéry – tedy vozidly a dopravní infrastrukturou. Komunikace mezi uzly, kde část z nich je pohyblivá (vozidla) a další část stacionární (infrastruktura), klade unikátní a technologicky náročné požadavky na komunikační síť. Takovou komunikaci je možno provádět přes tzv. *Vehicle ad-hoc network I* (VANET). Tento termín vystihuje specifickou vlastnost C-ITS sítí – dynamickou topologii. Dynamická topologie zde znamená, že uzel C-ITS sítě komunikuje pouze s uzly ve svém geografickém okolí a tyto uzly se mění společně s dopravní situací.

V této kapitole je krátce shrnuta historie a vývoj odvětví C-ITS, následovaná analýzou evropských a českých projektů týkající se C-ITS problematiky. V poslední části kapitoly je popsána základní architektura C-ITS dle evropských norem ETSI a výčet jednodušších, v dnešní době již otestovaných, C-ITS use cases.

### 2.1 Historie a vývoj C-ITS

Prvním široce užívaným konceptem (evropským standardem v 1990), kde bylo využito radiové spojení pro přenos datového toku, obsahujícího dopravně orientované informace je systém RDS (Radio data system). RDS používá úzké pásmo klasického FM audio vysílání lokálních radiových stanic pro přenos malého množství dopravních dat. Systém RDS lze považovat za první široce nasazený prostředek komunikace dopravní infrastruktury s vozidlem (IzV komunikace).

Přesto se systém RDS neřadí do oboru C-ITS, jelikož se jedná pouze o komunikaci jednosměrnou a pouze ve směru IzV. Prvními systémy s obousměrnou komunikací, ve kterých figurovala pohybující se vozidla, byly systémy mýtných bran, jež využívaly krátkovlnné komunikace DSRC (Dedicated short range communication). Mýtné brány vybaveny DSRC umožnily ve vymezeném prostoru v okolí mýtné brány vyřizovat transakce potřebné k elektronickému výběru mýta. K dynamické ad-hoc síti má ale takový systém pořád daleko.

Během vývoje sítě, která by splňovala požadavky pro C-ITS síť, vystával problém způsobený přirozenou nesymetrií vozidel a infrastruktury. Prvky infrastruktury se ze své definice nepohybují, ale stejně tak se nepohybuje ani stojící vozidlo. Z dopravního pohledu je mezi stojícím vozidlem a prvkem dopravní infrastruktury zásadní rozdíl, nicméně z pohledu komunikačně-síťového se nejedná o zajímavou informaci. Jelikož je tedy z komunikačního hlediska rozdíl mezi infrastrukturou a vozidlem nezajímavý, došlo k oddělení ITS a komunikačního problému na různé úrovně: pro samotnou komunikaci je použit peer-to-peer model, kde každý síťový uzel

(označován jako *ITS station, ITS-S*) má stejnou hierarchickou úroveň jako ostatní a ITS problematiku si řeší každá ITS-S na vlastní ze síťového hlediska vyšší úrovni. Od začátku milénia takto vznikaly standardy utvářející představu o tom jak má VANET vypadat. Společně se standardy se také začaly objevovat první pilotní projekty ke zhodnocení životaschopnosti konceptu C-ITS [1].

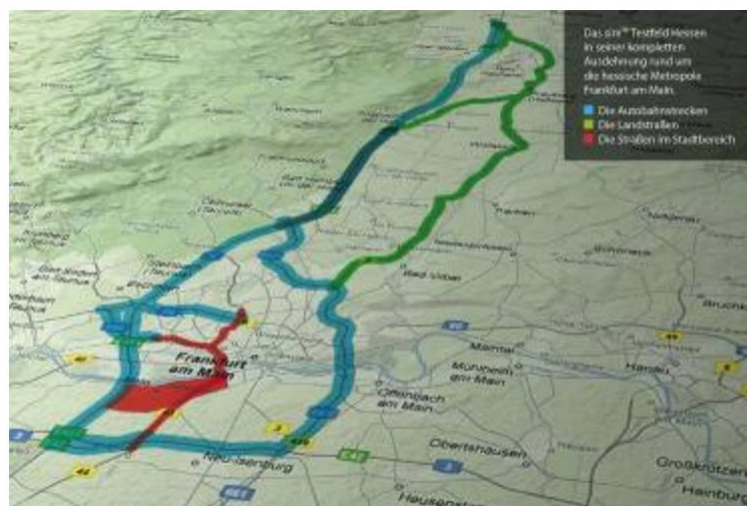
## 2.2 Projekty C-ITS

V následující části kapitoly jsou popsány C-ITS projekty, jež se odehrávaly v uplynulých letech na území Evropské Unie. Projekty, provedené v ČR, mají svou speciální podkapitolu.

### 2.2.1 Evropa

#### simTD

simTD byl testovací projekt C2X technologií, který proběhl mezi lety 2008-2013, vedený firmami Daimler AG, Audi AG a BMW Group. Projektu se mimo jmenovaných účastnily ostatní německé automobilky, technické vysoké školy a výzkumná centra a v neposlední řadě také německé telekomunikační společnosti. Projekt se odehrával v okolí Frankfurtu nad Mohanem na různých druzích pozemních komunikací (od intravilánu po dálnice v extravilánu). Na těchto komunikacích bylo testováno 120 vozidel vybavených OBU, které komunikovaly jak mezi sebou, tak s více než 100 RSU, rozmístěných na dopravních komunikacích, jak je naznačeno na Obr. 1. Lokální dopravně informační centrum sbíralo data od vybavených vozidel a agregovalo je s konvenčně získanými dopravními informacemi. Dopravní opatření pro optimální řízení, založená na získaných agregovaných datech byla následně vysílána skrze



Obr. 1: Rozsah projektu simTD, tmavě azurová - dálnice s vysokou hustotou komunikačních uzlů, azurová - dálnice s komunikačními uzly na nájezdech a sjezdech, zelená - silniční komunikace s komunikačními uzly na světelně řízených křižovatkách, červená - silniční komunikace v intravilánu [2]

C2X do vybavených vozidel a skrze PDZ do vozidel nevybavených. Výstupem projektu simTD bylo zjištění, že C2X komunikace přispívá ke zvýšení efektivity a bezpečnosti individuální automobilové dopravy [3].

## COOPERS

Coopers byl evropský projekt probíhající v období 2006-2010, který koordinovala rakouská společnost AustriaTech. Cílem projektu bylo vytvoření fungujících C-ITS systémů na velkém množství úseků vytížených dálnic po celé Evropě (viz Obr. 2). Jelikož měl každý z úseků unikátní technické predispozice, nebylo nasazeno jediné univerzální technické řešení, ale pro každou oblast bylo použito technické řešení nejvíce vhodné. Tyto úseky byly rozděleny do 4 oblastí, kde každá oblast adoptovala jiné technologické řešení. Služby poskytované v jednotlivých oblastech a technologie k tomu použité jsou vyobrazeny na Obr. 3 [4].

- Oblast 1 (Brennerský koridor) – testování konceptu zasílání dopravních informací řidičům
- Oblast 2 (Rotterdam – Antverpy) – testování efektivity řízení dopravy pomocí C-ITS
- Oblast 3 (Berlín – dálnice v intravilánu) – testování v prostředí intravilánu
- Oblast 4 (Chamonix – Valence a oblast Paříže) – testování služeb C-ITS a jejich dopadu na dopravní proud



Obr. 2: Úseky dálnic v projektu COOPERS[4]

V době konání projektu COOPERS bylo technologií, použitelných pro C-ITS o poznání méně, než v současnosti, neexistovaly například dnes mnohem pokročilejší technologie ETSI G5 nebo LTE-V. Pro potřeby projektu COOPERS byly vybrány následující telekomunikační technologie:

- CALM IR (komunikace na krátkou vzdálenost)
- DAB (komunikace na střední vzdálenost)
- GSM/GPRS (komunikace na velkou vzdálenost)

COOPERS Service		Site 1			Site 2	Site 3	Site 4
		I	A	D	NL/B	D	F
S1a	Accident warning	IR	IR	DAB	GPRS	DAB	GPRS
S1b	Incident warning	IR	IR	DAB	GPRS	DAB	GPRS
S1c	Wrong-way driver warning	IR	IR	DAB	GPRS		
S2	Weather condition warning	IR	IR	DAB	GPRS	DAB	GPRS
S3	Roadwork information	IR	IR	DAB		DAB	GPRS
S4a	Lane banning	IR	IR	IR (*)	GPRS	DAB	
S4b	Lane keeping	IR	IR	IR (*)	GPRS	DAB	
S4c	Auxiliary lane accessibility	IR	IR		GPRS		
S5	Legal speed limit	IR	IR	IR (*)	GPRS	DAB	GPRS
S6	Traffic congestion warning	IR	IR	DAB	GPRS	DAB	GPRS
S7	Recommended speed limit	IR	IR		GPRS	DAB	GPRS
S8	International service handover	IR	IR		GPRS		
S9	Road charging		IR (*)				
S10	Estimated journey time		IR (*)		GPRS	DAB	GPRS
S11	Recommended next link				GPRS	DAB	
S12	Map update						

Obr. 3: Technologie a služby poskytované v rámci projektu COOPERS [4]



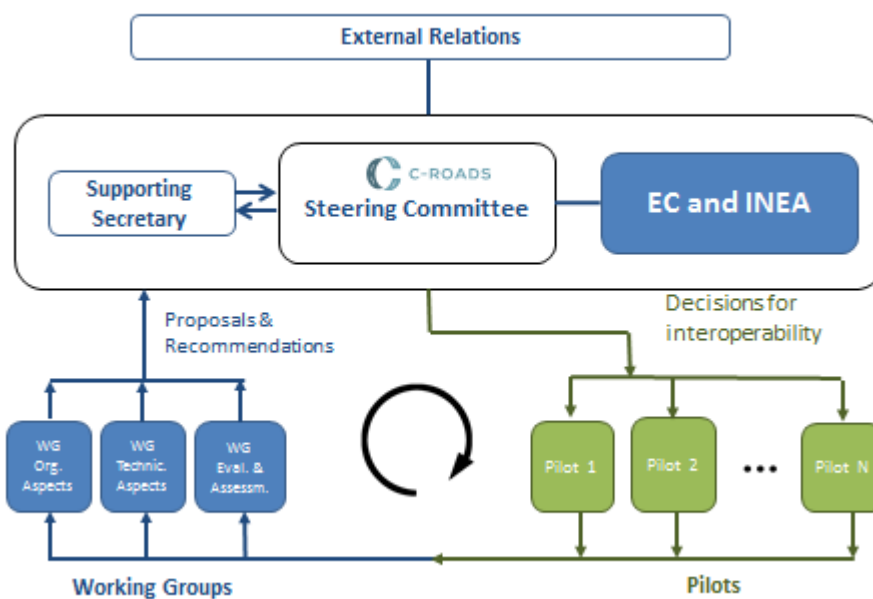
## C-ROADS

Projekt C-ROADS je kooperací několika Evropských („členských“) států, které společně ve spolupráci s lokálními provozovateli silničních komunikací, telekomunikačními operátory a dalšími technologickými firmami usilují o vytvoření interoperabilního (uvnitř EU) C-ITS systému, který má za cíl zvyšovat jak bezpečnost na silnicích, tak efektivitu pozemní dopravy. Obr. 4 vyobrazuje členské státy účastníci se projektu, které zabezpečují svoje vlastní lokální pilotní projekty.



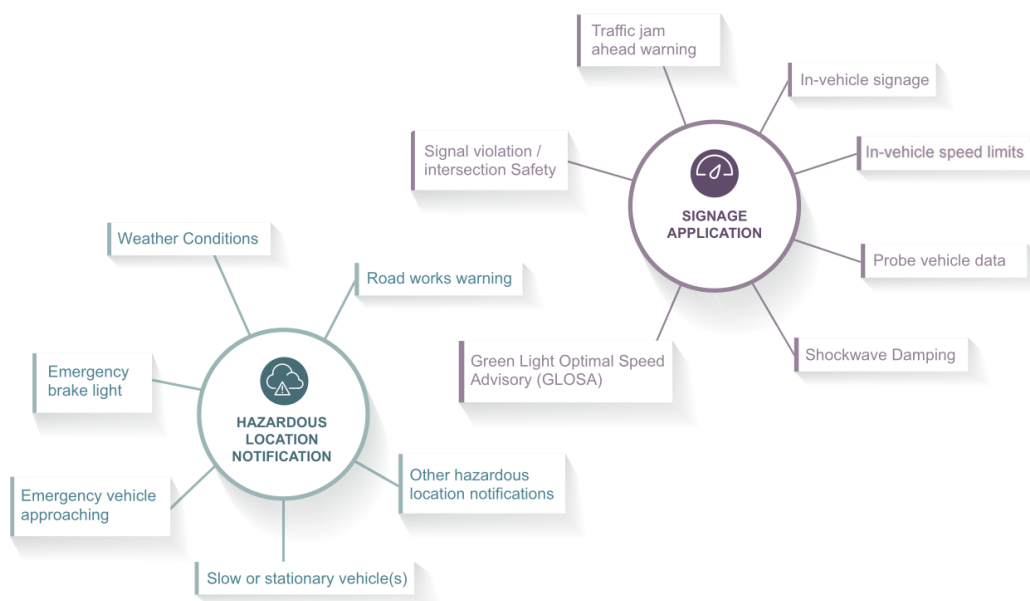
Obr. 4: Projekt C-ROADS, členské státy [5]

Jak je naznačeno na Obr. 5, projekt je řízen *C-Roads Steering Committee*, která je složená z reprezentantů jednotlivých členských států. Řídící komise vytváří nařízení pro dosažení interoperability, která poskytuje jednotlivým pilotním lokalitám. Tzv. pracovní skupiny (*Working Groups*) na základě zkušeností z pilotních lokalit dodávají řídicí komisi doporučení a tím efektivně poskytují zpětnou vazbu v rámci řízení projektu.



Obr. 5: Struktura řízení v projektu C-ROADS[6]

Dosažení interoperability je v projektu zprostředkováno použitím stejné standardizované DSRC technologie ETSI ITS G5, která byla vyvinuta přímo pro C-ITS v kombinaci s mobilní datovou komunikací 3G/4G. Každá pilotní lokalita má za cíl zprostředkovávat soubor C-ITS služeb (use cases), které musí zprovoznit v daném časovém horizontu. Soubory služeb nemají všechny pilotní lokality stejné.

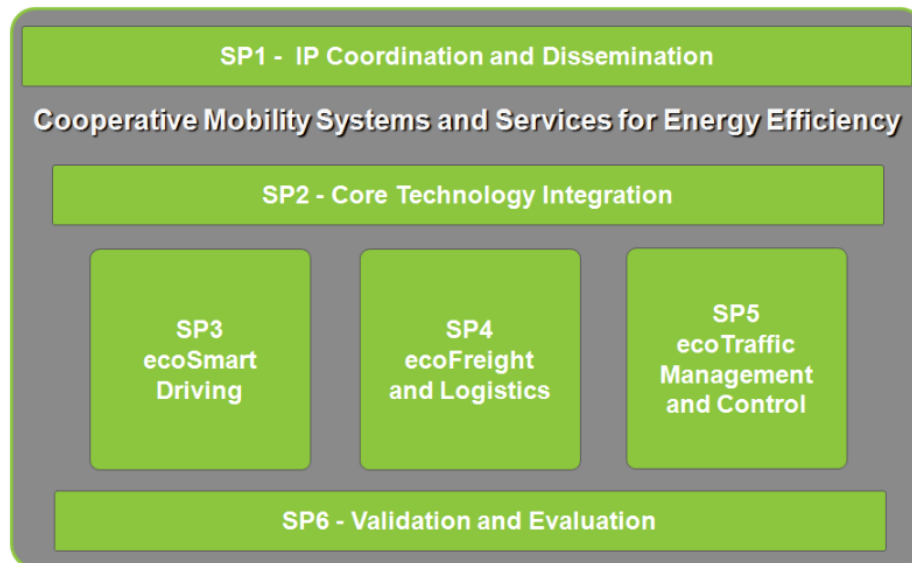


Obr. 6: C-ROADS, use cases [7]

Plný soubor use cases, ze kterých jsou složeny jednotlivé soubory, může být rozdělen do dvou tříd: varování před nebezpečím a signalizace vozidlu (viz Obr. 6) [5]–[7].

## Ecomove

Ecomove byl projekt, který probíhal mezi lety 2010 a 2013, jenž byl financován z velké části z EU, a účastnila se ho celá řada subjektů z různých odvětví průmyslu. Cílem projektu Ecomove bylo zjistit dopad aplikace kooperativních systémů na efektivnost provozu a tedy snížení spotřeby paliva vedoucí k nižším emisím CO<sub>2</sub>.



Obr. 7: Ecomove struktura projektu [8]

Na Obr. 7 je naznačena struktura projektu v čase a jeho dílčích součástích. V první řadě proběhlo rozdělení úkolů a koordinace mezi jednotlivými účastníky projektu. V SP2 probíhala integrace a nasazování technologie, která byla následována třemi souběžně běžícími dílčími částmi, s vyjmenovanými obsaženými use casey:

- ecoSmart Driving
  - eco-pre-Trip Planning  
Kalkulace optimální trasy před zahájením jízdy na základě informací získaných z kooperativních systémů
  - ecoSmart Driving  
Dynamický přepočítání trasy doplněný službou poskytování informací řidiči ohledně doporučené rychlosti vozidla, zařazené rychlosti a dalších
  - ecoPostTrip  
Poskytování zpětné vazby řidiči sestávající se ze zhodnocení jeho jízdy z ekologického pohledu

- ecoFreight and Logistics
  - ecoDriver Coaching  
Poskytování rad řidiči v reálném čase s cílem zvýšit ekologičnost jeho řídicího stylu doplněné zasiláním řídicích ekologických profilů fleet managementu
  - ecoTour Planning  
Kalkulace optimální trasy z ekologického hlediska se zahrnutím požadavků od samotného dopravce
  - Truck ecoNavigation  
Nadstavba na ecoTour Planning, která uvažuje konfiguraci (hmotnost, typ nákladu,...) individuálního nákladního vozidla
- ecoTraffic Management and Control
  - ecoAdaptive Balancing and Control  
Rozkládá dopravní zátěž po dopravní síti pro ekologicky optimální provoz
  - ecoAdaptive Traveller Support  
Poskytování personalizovaných doporučení jednotlivým vozidlům
  - ecoMotorway Management  
Řízení dopravy na dálnicích pomocí RLTC a ramp metering

Testování probíhalo na vzorku řidičů sestávajícího se jak z profesionálů, tak laiků. Dle výsledků získaných testováním v projektu bylo zjištěno, že horní hranice úspory CO<sub>2</sub> je až 25% [8].

### **ConVeX**

ConVeX (Connected Vehicle to Everything of Tomorrow) je konsorcium firem (Audi AG, Ducati, Ericsson, SWARCO a další...) vytvořené za cílem testování a demonstrování C-ITS komunikace pomocí LTE-V technologie. Konsorcium je financováno účastníky se firmami a subjekty a v neposlední řadě Německým ministerstvem dopravy. Technologie použitá k provedení demonstrace je založena na prvním komerčně dostupném LTE-V chipsetu 9150 C-V2X od firmy Qualcomm. Testování technologie probíhá jak v přímém módu, tak i v módu komunikace přes síť (viz kapitola LTE-V)

Zatím jediná předvedená demonstrace zahrnovala následující use case C-ITS:

- Varování před kolizí na křižovatce
- Varování před kolizí při odbočování vlevo [9]

## 2.2.2 ČR

### BaSIC

Projekt BaSIC byl projekt financovaný Technologickou agenturou České Republiky probíhající mezi lety 2012 a 2013. Cílem projektu bylo otestování životaschopnosti konceptu zasílání informací jak mezi vozidly V2V, tak mezi vozidly a infrastrukturou V2I pomocí technologie ETSI ITS G5.

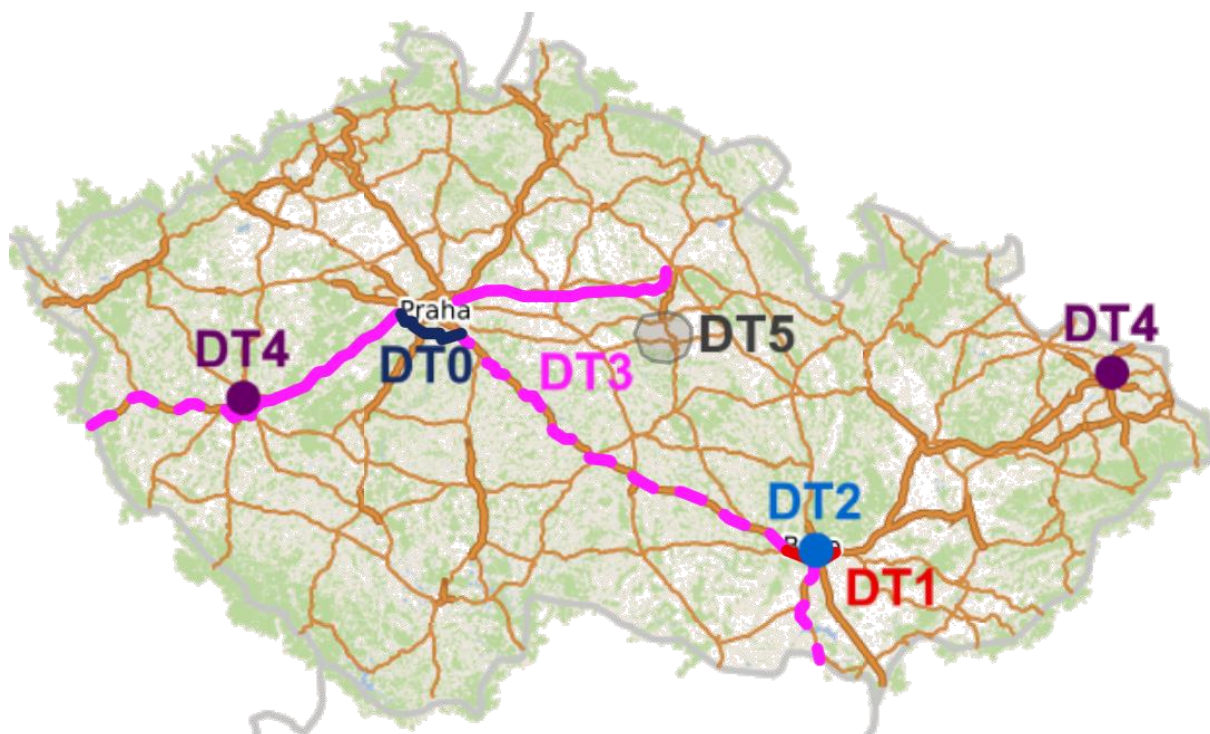
Testy probíhaly na části dálnice Do (Pražský okruh) na úseku mezi obcí Jesenice a obcí Vestec, které byly vybaveny jednotkami RSU, jež byly instalovány na portály LŘD. Interpretace zachycených C-ITS zpráv ve vozidle byla zprostředkována tabletem s operačním systémem Android, na kterém běžela aplikace vyvinutá společností Intens Corp, která také byla hlavním akteřem v celém projektu BaSIC [10].



Obr. 8: Vybavení dopravní infrastruktury jednotkou RSU pro komunikaci ETSI ITS G5 [10]

### C-ROADS CZ

C-ROADS CZ je český lokální pilotní projekt, který je součástí výše zmíněného celoevropského projektu C-ROADS. Samotný projekt se skládá z celkem 6 etap, které na sebe časově i geograficky postupně navazují. Oblasti, kde se realizují dílčí části projektu a které se



Obr. 9: Jednotlivé lokality českého pilotního projektu C-ROADS CZ [11]

Tabulka 1: Jednotlivé dílčí fáze projektu C-ROADS CZ

ETAPA	LOKALITA	CÍL
DT <sub>0</sub>	Do, Pražský okruh	Nasazení a ověření technologie ETSI ITS G5, která je použita v následujících fázích projektu
DT <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> , Brněnský okruh	Vytvoření C-ITS systému na principu hybridní komunikace, tj. Kombinace ETSI ITS G5 a LTE
DT <sub>2</sub>	Brno, intravilán	Testování C-ITS use cases pro intravilán (use cases týkající se řízených křižovatek,...)
DT <sub>3</sub>	D <sub>1</sub> , D <sub>5</sub> , D <sub>11</sub> , I/52/D52	Vybavení a zprovoznění výše vyznačených částí dálnic stejným způsobem jako v případě DT <sub>1</sub>
DT <sub>4</sub>	Plzeň a Ostrava, dopravní podnik	Otestování a zprovoznění C-ITS komunikace mezi vozidly MHD a městskou infrastrukturou
DT <sub>5</sub>	Pardubický kraj, z žel. přejezdy	Otestování a zprovoznění C-ITS varování před uzavřeným železničním přejezdem pro silniční vozidla [11]

ke konci projektu stanou součástí Evropského C-ITS koridoru, jsou vyznačeny na Obr. 9.

Následujících 12 use cases budou postupně během projektu otestovány a spuštěny do provozu:

1. Upozornění na práce na silnici
2. Dopravní informace ve vozidle
3. Získávání dopravně-inženýrských dat z dopravního proudu
4. Varování před pomalu jedoucím/stojícím vozidlem
5. Varování před blížícím se vozidlem IZS
6. Upozornění na dopravní kongesci ve směru jízdy
7. Varování před nerespektováním návěsti SSZ v řízené křižovatce
8. Zprostředkování přednosti vozidlu MHD
9. Upozornění na obecně nebezpečné místo
10. Upozornění na nepříznivé povětrnostní podmínky
11. Varování před aktivovaným železničním přejezdem
12. Varování před křížováním komunikace kolejovým vozidlem MHD
13. Bezpečnost vozidel MHD (zastávka Vídeňského typu atd.)
14. Upozornění na prudce brzdící vozidlo po směru jízdy



Obr. 10: Anténní pole RSU instalované na dopravním portálu nad dálniční komunikací [11]

V projektu C-ROADS je jako hlavní komunikační technologie pro komunikaci C2X používán standard ETSI ITS G5. Infrastrukturní vysílače C2X jsou povětšinou instalovány na dopravních portálech, či jiné již existující technologii, která umožňuje jednoduché připojení RSU na již existující síť. Příklad instalované RSU je vidět na Obr. 10.

## 2.3 Architektura C-ITS

Evropským standardem ETSI EN 320 665 byla ustanovena komunikační architektura C-ITS systémů. V následující části je provedeno její shrnutí a základní popis. Obecně se systém C-ITS skládá ze tří základních stavebních kamenů [11]:

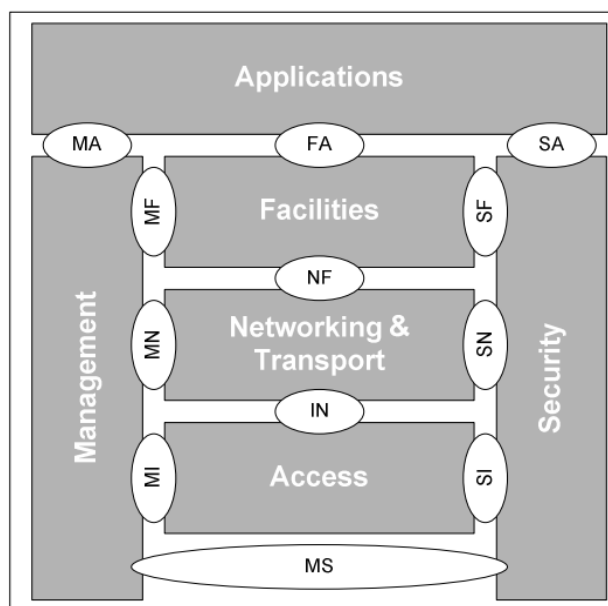
- On-board unit (OBU) – je vozidlo vybavené jednotkou, která dokáže obousměrně komunikovat s ostatními uzly VANET a vyčítat informace o stavu vozidla z jeho palubního systému
- Road-side unit (RSU) – je napevno instalovaná jednotka na prvku dopravní infrastruktury, která je připojena na rychlou proprietární síť, kterou je propojena s ostatními RSU jednotkami a C-ITS řídicím centrem
- C-ITS řídicí centrum - zpracovává a agreguje data z množství zdrojů (RSU, OBU, NDIC, atd.) a poskytuje informace, které dále vysílá do relevantních uzlů VANET

Jak již bylo dříve zmíněno, z komunikačního hlediska se jedná o peer-to-peer síť a tedy každou ze zmíněných entit (OBU, RSU, C-ITS řídicí centrum) můžeme modelovat jako ITS-S. ITS-S, dle jejich role v síti VANET tak můžeme nadále dekomponovat, jak je ukázáno v následujícím textu.

### 2.3.1 Architektura ITS-S

Každá ITS-S může být připodobněna k referenční architektuře vyobrazené na Obr. 11. Jsou zde vidět jednotlivé komunikační vrstvy, tak jak jsou připodobněny k referenční architektuře ISO/OSI. Následuje popis vyobrazených vrstev:





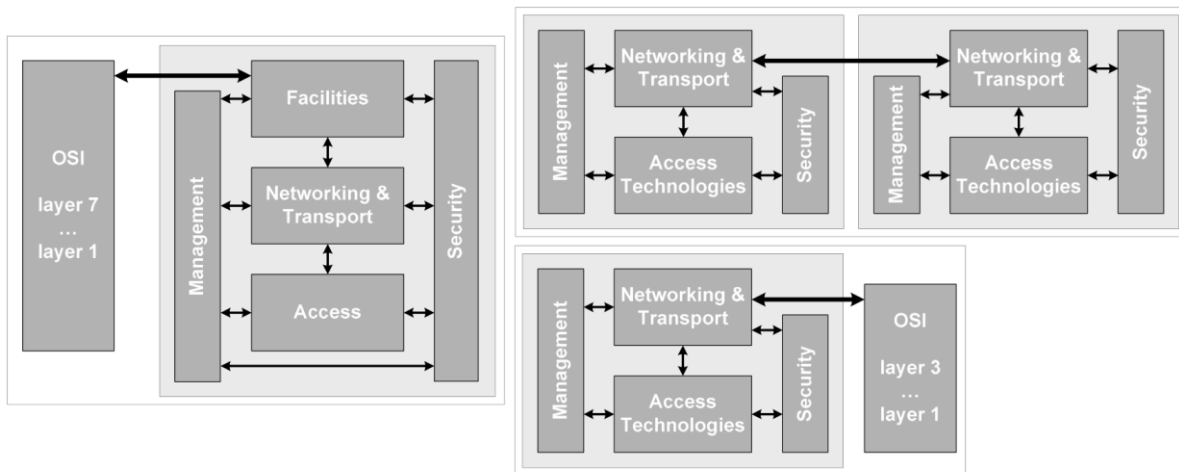
Obr. 11 Referenční architektura ITS-S [12]

- Access – představuje sloučení 1. a 2. vrstvy ISO/OSI
- Networking & Transport (N&T) – představuje sloučení 3. a 4. vrstvy ISO/OSI
- Facilities – představuje sloučení 5., 6. a 7. vrstvy ISO/OSI
- Entity Management a Security poskytují řízení respektive zabezpečení komunikace pro danou ITS-S

Vyobrazené body, které propojují jednotlivé vrstvy, představují rozhraní mezi jednotlivými entitami, a které jsou specifikovány v odpovídajících standardech ETSI.

Každou ITS-S, kterou můžeme v systému uvažovat (OBU, RSU, C-ITS řídicí centrum), lze dekomponovat na malou podsít skládající se z následujících funkčních subsystémů (viz Obr. 12):

- ITS-S Host – zde probíhá samotná aplikace ITS-S, viz Obr. 11
- ITS-S Gateway – připojuje proprietární síť k vlastní facilities vrstvě ITS-S, musí tedy umět konvertovat telekomunikační protokoly
- ITS-S Router – propojuje dva různé ITS stacky
- ITS-S Border router – propojuje ITS-S stack s obecnou externí sítí ISO/OSI na 3. úrovni



Obr. 12 Funkční komponenty ITS-S, zleva po směru hodinových ručiček: gateway, router a border router [12]

Pokud dekomponujeme ITS-S dle rolí, které mohou v síti VANET zastupovat, dostaneme Obr. 13. Jak je na diagramech vidět, každou ITS-S si lze představit jako malou lokální síť, kde jednotlivé uzly jsou zastoupeny funkčními subsystémy ITS-S.

### 1. ITS-S řídicího centra

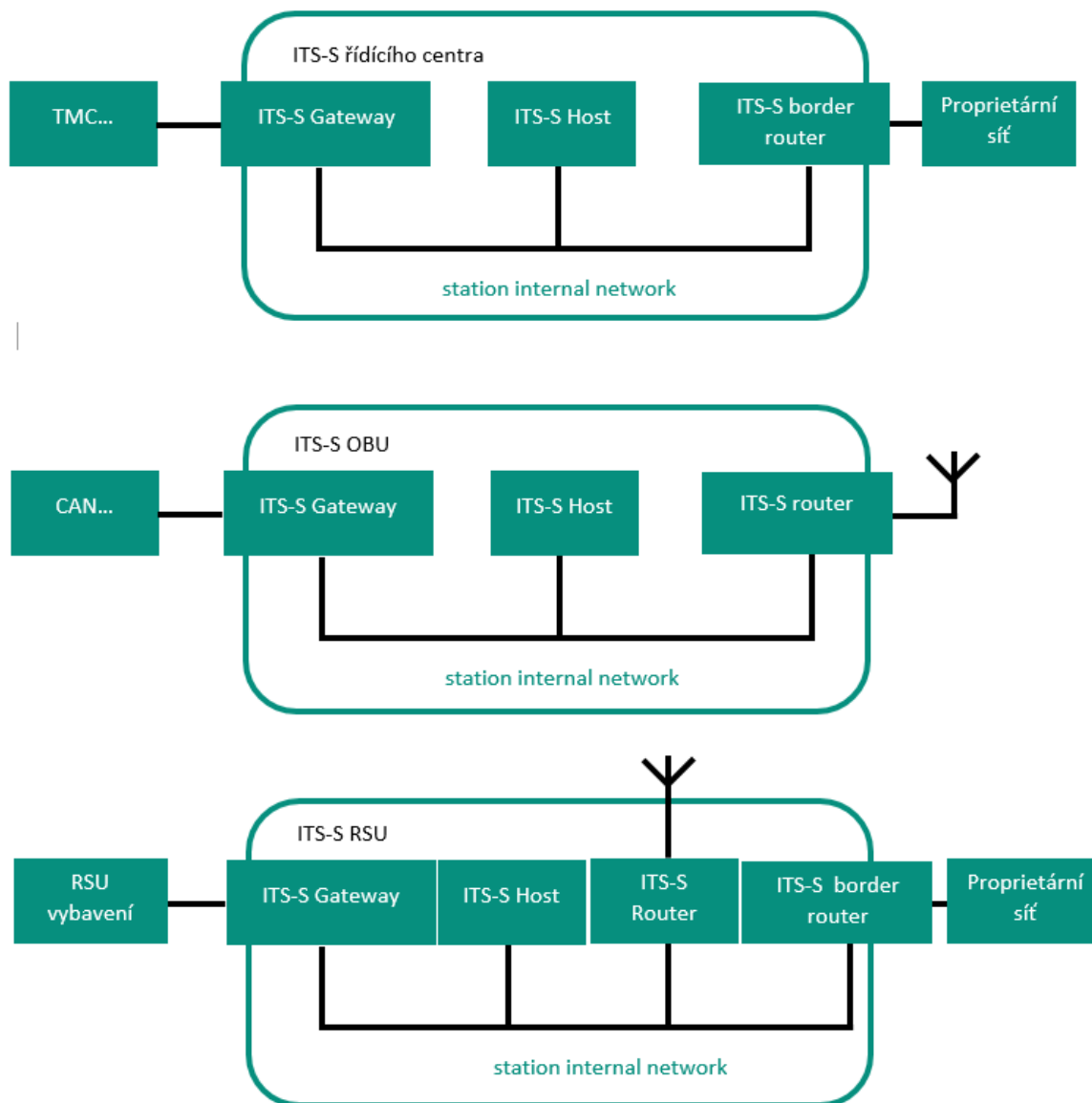
ITS-S řídicího centra vytváří svou ITS činnost prostřednictvím subsystému **ITS-S Host**. Napojení na zbytek sítě VANET je realizováno prostřednictvím bloku **border router**. Připojení na síť třetích stran (jako například dopravně informační centrum, TMC) je realizováno blokem **gateway**.

### 2. ITS-S OBU

Obdobně jako je tomu u ostatních typů ITS-S, blok **ITS-S Host** zastupuje zpracování dopravně-informační ITS části problému v aplikační vrstvě. Informace o stavu vozidla získává připojením na sběrnici (či jinak řešenou síť) vozidla (např. CAN) pomocí bloku **gateway**. Komunikace s ostatními uzly VANET je zprostředkována pomocí **routeru**.

### 3. ITS-S RSU

K RSU může být připojena celá řada příslušenství, jako např. proměnné dopravní značení (PDZ), či dopravní detektory (indukční smyčky). Toto příslušenství je k ITS-S připojeno přes **gateway**. K připojení k ostatním uzlům VANET používá obdobně jako OBU blok **router** a k připojení k proprietární síti blok **border router** stejně jako řídicí centrum. [12]



Obr. 13 VANET ITS-S dekomponované do funkčních komponent v závislosti na roli, parafráze [12]

## 2.4 C-ITS use cases

Následuje základní popis vybraných C-ITS use cases společně s popisem dopadů a benefitů, které by měly mít na dopravu.

- **Upozornění na práce na silnici**

Služba upozorňuje řidiče na probíhající práce na silnici (přesnější lokace prací a jejich typ), které vytvářejí nějaké omezení na dopravním proudu. Lepší informovanost řidičů ohledně prací na silnici má za následek vyšší efektivitu dopravy při zvýšené bezpečnosti.

- **Dopravní informace ve vozidle**

Služba řidiči zprostředkovává agregované dopravně-provozní informace, jako například aktuální a nadcházející rychlostní omezení, či omezení použití daného pruhu pro určitý typ vozidel. Tato služba by měla mít za následek zvýšení komfortu prezentace dopravních omezení pro řidiče a tím přispívat ke zlepšení informovanosti řidičů.

- **Získávání dopravně-inženýrských dat z dopravního proudu**

Služba poskytuje provozovateli pozemní komunikace zdroj dopravně inženýrských dat. Tato detailní data pak mohou být použita k optimálnímu řízení dopravy v oblasti.

- **Varování před pomalu jedoucím/stojícím vozidlem**

Služba řidiči poskytuje varování před neočekávaně pomalu-jedoucím, či stojícím vozidlem ve směru jízdy. Cílem služby je zvýšení bezpečnosti na komunikaci a snížení počtu dopravních konfliktů a nehod.

- **Varování před blížícím se vozidlem IZS**

Služba řidiče upozorňuje na ve směru jízdy, zezadu blížící se záchranné vozidlo IZS. Služba má napomoci rychlejším zásahům IZS, včasným doporučením řidičům k úhybnému manévru, aby byla vytvořena tzv. „záchranná“ ulička.

### 3 Telekomunikace pro C-ITS

Následující kapitola obsahuje popis dvou hlavních technologií, které jsou v současné době nasazovány do C-ITS projektů.

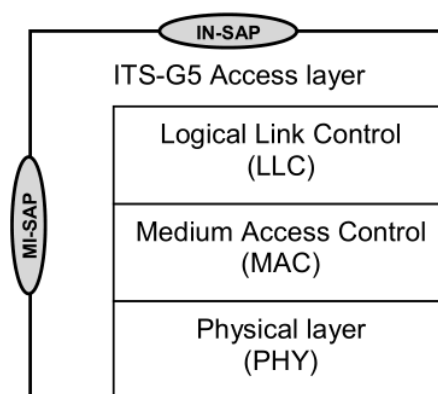
V posledních několika letech byla jedinou komerčně dostupnou technologií vhodnou pro C-ITS ETSI ITS G5. Tento telekomunikační standard je založen na standardu IEEE 802.11 (běžně známé pod názvem Wi-Fi), který byl upraven a standardizován v Evropě jako ETSI EN 302 663. Tato technologie je dlouhodobě testována v Evropě i v USA (zde 802.11p). V Evropě by měla masová produkce ETSI ITS G5 začít v průběhu tohoto roku (2019).

Jako alternativa pro ETSI ITS G5 se v roce 2017 objevila technologie komunikace založená na standardu LTE používaného v buňkových mobilních sítích. Prvním vydaným standardem této pro ETSI ITS G5 konkurenční technologie je tzv. Release 14 od standardizační organizace 3GPP z roku 2017.

Obě zmíněné technologie mají stejný use-case a obě mohou operovat na referenční architektuře C-ITS, nicméně nejsou interoperabilní na access vrstvě [13].

#### 3.1 ITS ETSI G5

ITS ETSI G5 je Evropský standard pokrývající fyzickou a data-link vrstvu (viz Obr. 14), která je v referenční architektuře C-ITS označována jako access vrstva. Na PHY vrstvě je použita modulace OFDM. OFDM modulace je zde implementována dle Wi-Fi standardu IEEE 802.11-2012. Dle stejného standardu je v ETSI ITS-G5 implementována MAC vrstva. Vrstva LLC je definována stejně jako ve standardu IEEE 802.2.



Obr. 14: Vrstvy pokryté ETSI ITS-G5 [14]

##### 3.1.1 Topologie sítě

Ve standardu IEEE 802.11-2012 jsou popsány dvě základní síťové topologie, ve kterých jsou jednotlivé uzly sítě identifikovány unikátním identifikátorem BSSID:

###### 1. Infrastrukturní BSS (Basic Service Set)

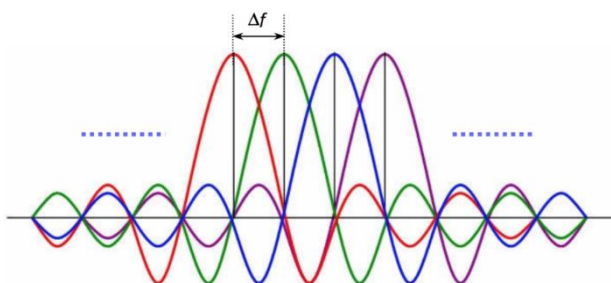
Tato topologie obsahuje access point (AP), přes který je vedena veškerá komunikace bez závislosti na fyzické vzdálenosti obou komunikujících uzlů. V infrastrukturním BSS se musí komunikační uzel před připojením do sítě asociovat a autentizovat.

## 2. Nezávislý BSS

V této topologii komunikují uzly mezi sebou bez potřeby předávání komunikace přes AP. Tento druh přímé komunikace mezi uzly se nazývá ad-hoc/peer-to-peer a toto je topologie sítě zvolená pro C-ITS v ETSI ITS-G5. Aby nedocházelo k narušování bezpečnostně kritické C-ITS komunikace, je zde zakázáno jednotlivým uzlům skenovat BSS pro zjištění aktivní sítě/připojení do sítě. Z tohoto důvodu je nutná existence řídicího kanálu pro řízení komunikace [14].

### 3.1.2 PHY

OFDM je modulace využívající souboru ortogonálních nosných vln pro přenos informace. Ortogonalita nosných vln je dosaženo odsazením jejich frekvencí o  $1/T_s$  ( $T_s$  – doba trvání symbolu). Pokud má obecný symbol v čase tvar obdélníku (přenos pouze 1 a 0 bitů), pak ve frekvenční doméně má tvar funkce sinc. Funkce sinc má své první nuly právě ve vzdálenosti  $1/T_s$  a proto neovlivňuje sousední nosné. Tento efekt je znázorněn na Obr. 15. Data se v OFDM posílají sériově-paralelně po „symbolech“ – konstantní hodnoty po dobu trvání symbolu, které se liší v závislosti na použité subnosné [15].



Obr. 15: OFDM nosné vlny ve spektru a jejich ortogonalita [16]

V ETSI ITS-G5 je 52 subnosných, z nichž 48 je datových a 4 jsou pilotní subnosné používané pro synchronizaci a odhad přenosových charakteristik média. Je možno použít celkem 8 kombinací různých modulačních schémat s různými kódovými poměry. Tyto jsou znázorněny v Tabulce 2. Na výběr je vcelku ze 4 modulačních schémat od dvoustavové BPSK až po 64 stavovou 64-QAM. Pro každou z modulací je možno nastavit dva kódové poměry – jeden pro vyšší datový tok, druhý pro bezpečnější přenos.

Tabulka 2: ETSI ITS-G5 - možná nastavení modulačních schémat a kódového poměru [14]

Datový tok [Mbit/s]	Modulační schéma	Kódový poměr	Dat v OFDM symbolu [bity]	Délka OFDM symbolu [bity]
3	BPSK	$\frac{1}{2}$	24	48
4.5	BPSK	$\frac{3}{4}$	36	48
6	QPSK	$\frac{1}{2}$	48	96
9	QPSK	$\frac{3}{4}$	72	96
12	16-QAM	$\frac{1}{2}$	96	192
18	16-QAM	$\frac{3}{4}$	144	192
24	64-QAM	$\frac{2}{3}$	192	288
27	64-QAM	$\frac{3}{4}$	216	288

### 3.1.3 MAC

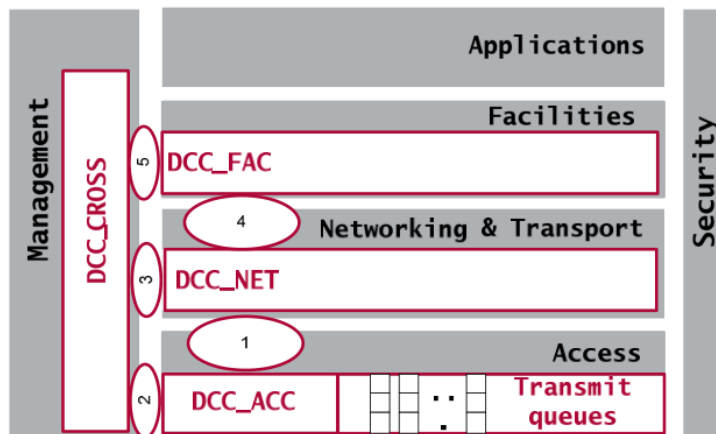
MAC (Medium Access Control) vrstva má za úkol rozhodovat, kdy je možné vysílat na médiu, aby docházelo k pokud možno minimální interferenci. V ETSI ITS-G5 je na MAC vrstvě použit algoritmus EDCA (Enhanced Distributed Coordination Access). EDCA je CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) s přidaným QoS.

Při CSMA/CA monitoruje uzel médium před vysláním. Pokud je médium nečinné po danou dobu, uzel začne se svým vysláním. Při situaci, kdy je médium při monitorovací periodě činné, aktivuje se tzv. „backoff“ procedura, při které si uzel odepře přístup k médiu na náhodně dlouhý časový úsek (s krajními omezeními) generovaný algoritmem specifikovaným v IEEE 802.11 [14].

### 3.1.4 Decentralized congestion control (DCC)

Pro zabránění přetížení bezdrátového média je součástí ETSI ITS-G5 mechanismus, který řídí vysílání jednotlivých uzlů tak, aby nedošlo ke kongesci na kanálu způsobenou jak vysokým počtem komunikujících uzlů, tak EDCA na MAC.

DCC není alokováno do jediné vrstvy, nýbrž se jedná o mechanismus, který se rozpíná nad více vrstvami. DCC tímto způsobem dostává informace i o běžících aplikacích na vyšších komunikačních vrstvách, což je zásadní k optimalizaci přenosu na médiu. Hlavní myšlenka DCC spočívá v omezování zátěže média způsobovaného každým vozidlem. Architektura DCC se skládá (viz Obr. 16) celkem ze 4 komponent, které jsou obsaženy ve vrstvě access, N&T, Facilities a ve vrstvě Management.



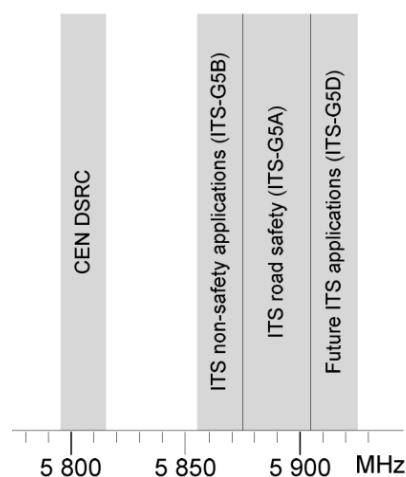
Obr. 16: Architektura Decentralized Congestion Control [17]

### 3.1.5 Frekvenční pásma

ITS ETSI-G5 je technologie navrhnutá na provoz v pásmu 5,9 GHz, které je v Evropě rozděleno na následující pásma:

1. ITS-G5A, (5875 – 5905) Hz – bezpečnostní ITS aplikace
2. ITS-G5B, (5855 – 5875) Hz – ne-bezpečnostní ITS aplikace
3. ITS-G5D, (5905 – 5925) Hz – budoucí ITS aplikace

Na Obr. 17 jsou vyobrazeny pásma C-ITS služeb. Je zde vidět i relativní blízkost pásma vyhrazeného pro službu CEN DSRC (výběr mýta). Aby bylo zabráněno interferenci mezi službami pro mýto a C-ITS, je nutné v blízkosti mýtných bran omezovat střihu a výkon vysílání – tyto pravidla pro koexistenci obou služeb jsou popsány v technické specifikaci ETSI TS 102 792.



Obr. 17 Pásma služby ETSI ITS-G5 [14]



Jednotlivé kanály a jejich alokace do pásem jsou popsány v Tabulce 3. Kanály jsou dvojího druhu – řídicí a kanály poskytující službu, přičemž všechny kanály mají stejnou šířku pásma - 10 MHz.

Tabulka 3: Kanály jednotlivých pásem ETSI ITS-G5 [14]

	Označení kanálu	Frekvenční pásmo [MHz]
ITS – G5A	G5-CCH	5895 – 5905
	G5-SCH2	5885 – 5895
	G5-SCH1	5875 – 5885
ITS – G5B	G5-SCH3	5865 – 5875
	G5-SCH4	5855 – 5865
ITS – G5D	G5-SCH5	5905 – 5915
	G5-SCH6	5915 – 5925

## 3.2 C-V2X

C-V2X je označení pro komunikační technologie založené na standardu používaném pro mobilní datové sítě, LTE-A (Advanced). LTE-A je mobilní komunikační standard, na kterém je postaven první standard mířený do oblasti C-ITS - LTE Release 14 vydaný standardizační organizací 3GPP. Samotné LTE-A je dalším vývojovým stádiem standardu LTE, který poskytuje nové funkce systému tak, aby se zvýšil možný datový tok.

### 3.2.1 LTE

LTE je nástupce mobilních technologií 3G (3. generace), která, jak je vidět v Tabulce 4, zásadně zvyšuje rychlost sítě jak v downloadu, tak v uploadu a k tomu mění již dlouho zaběhnutou metodu hromadného přístupu z kódového multiplexu (CDMA) na ortogonální frekvenčně dělený multiplex (OFDMA).

Tabulka 4: Porovnání LTE se svými předchůdci [18]

	UMTS	HSPA	HSPA+	LTE	LTE-A
MAX D/L SPEED [bps]	384 k	14 M	28 M	100 M	1 G
MAX U/L SPEED [bps]	128 k	5.7 M	11 M	50 M	500 M
LATENCY [ms]	150	100	50	~10	<5ms
3GPP RELEASE	99/4	5/6	7	8	10
ACCESS METHOD	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA/SC-FDMA	OFDMA/SC-FDMA

Použití modulace OFDM propůjčuje LTE mnohem vyšší odolnost vůči vícecestnému šíření a interferenci oproti předešlým technologiím. Díky vysokému PAPR (peak to average power ratio) v modulaci OFDM, není vysílání pod touto modulací energeticky efektivní. Proto je pro upload do sítě používána modulace SC-FDMA, která má PAPR nižší a tedy je energeticky efektivnější, což ji činí vhodnější pro bateriová zařízení (mobilní telefony).

Další novinkou LTE oproti jejím předchůdcům je možnost použití pole antén pro příjem a vysílání – MIMO (Multiple input, multiple output). MIMO opět poskytuje možnost potlačení vícecestného šíření a navíc poskytuje možnost zvýšeného průtoku dat.

## MIMO

MIMO je technologie, která umožňuje využívat vícecestného šíření signálu v prostoru ke zvýšení SNR nebo zvýšení datového průtoku. Mimo jiné poskytuje MIMO v LTE následující funkce:

- Příjímací diverzita (Receive diversity) – Jeden datový tok je vysílán jednou anténou a přijímán dvěma a více anténami, také nazýváno, SIMO – single input multiple output.
- Vysílací diverzita (Transmit diversity) – Jeden datový tok je vysílán více anténami, kde pro každou anténu je datový tok kódován jiným způsobem. Tento způsob vysílání má za následek vyšší kvalitu signálu u příjemce, nijak nezvyšuje datový tok [19].

Poslední zásadní novinkou uvedenou v LTE je zrušení přepínání okruhů pro hlasové volání. V LTE je vše přenášeno jako IP data pakety.

V LTE je možné použít jak duplex v čase (TDD) tak ve frekvenci (FDD). Tato kombinace se ve spojitosti s LTE označuje jako TD-LTE. Každá forma duplexu má svou vlastní strukturu LTE rámce.

1. LTE FDD struktura rámce – rámeček o délce 10 ms je rozdělen na 20 individuálních slotů, kde 2 sloty dávají dohromady jeden podrámeček (subframe).
2. LTE TDD struktura rámce – rámeček o délce 10 ms je složen ze dvou půlrámečků (každý 5 ms), kde každý půlrámeček je rozdělen do 5 podrámečků (každý 1 ms) [20].

Různé druhy dat (dle jejich účelu v systému) jsou v LTE vysílány na různých kanálech. Tyto kanály se dají dělit do tří následujících kategorií:

1. Fyzické kanály – přenos uživatelských dat a řídicích zpráv
2. Logické kanály – služby MAC
3. Transportní kanály – poskytují informace pro MAC [21]

### 3.2.2 LTE-A

LTE-A (LTE Advanced) je soubor technik, které zásadně vylepšují parametry služeb poskytovaných LTE (viz Tabulka 4). Jak lze vidět z Tabulka 4, je zdesetinásobená rychlost jak v uploadu, tak v downloadu.

### 3.2.3 LTE-V

LTE-V, častěji označováno jako C-V2X (Cellular-V2X) je technologie založena na LTE, která je speciálně (podobně jako standard IEEE 802.11 má svou verzi pro C-ITS IEEE 802.11p) navržena pro použití v kooperativních systémech vozidel. C-V2X bylo poprvé definováno v 3GPP Release 14 v roce 2017. V nynější době jsou hotové Release 14 (rok 2017) a 15 (rok 2018), probíhají práce na Release 16 (odhadovaný na konec roku 2019), který by měl využívat technologie 5G, známé také pod zkratkou NR (New Radio) [22].

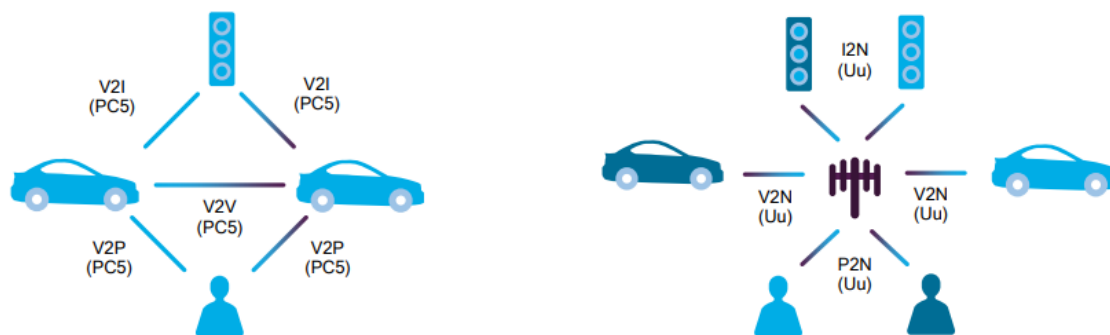
LTE Release 14 obsahuje popis komunikace ve dvou módech:

1. Komunikace přímo mezi jednotlivými koncovými zařízeními, v tomto módu operuje C-V2X ve stejném frekvenčním pásmu 5.9 GHz (ITS frekvenční pásmo) jako konkurenční technologie ETSI ITS G5. Při tomto typu komunikace není C-V2X komunikace nijak závislá na zbytku infrastruktury mobilní buňkové sítě.

Technologie 802.11p a C-V2X jsou schopny koexistence v pásmu 5.9 GHz, pokud využívají nestejně kanály. Pro provoz základních bezpečnostních funkcí stačí komunikaci C-V2X 10 MHz široké pásmo, s tím, že při použití 70 MHz širokého pásma je možné provozovat pokročilé aplikace, které využívají velké množství dat získaných senzorikou vozidel.

2. Komunikace z/do koncového zařízení do/ze sítě, jako při konvenčních službách mobilní buňkové sítě. V tomto módu operuje C-V2X ve frekvenčním pásmu, které bylo operátorovi přiděleno pro poskytování konvenčních služeb uživatelům.

Tento mód komunikace může být použit jak pro provozní/bezpečnostní služby, tak pro komerční účely. Další výhodou propojení s mobilní buňkovou sítí je možnost použití výpočetního výkonu serverů pro případné výpočetně náročné aplikace [23].

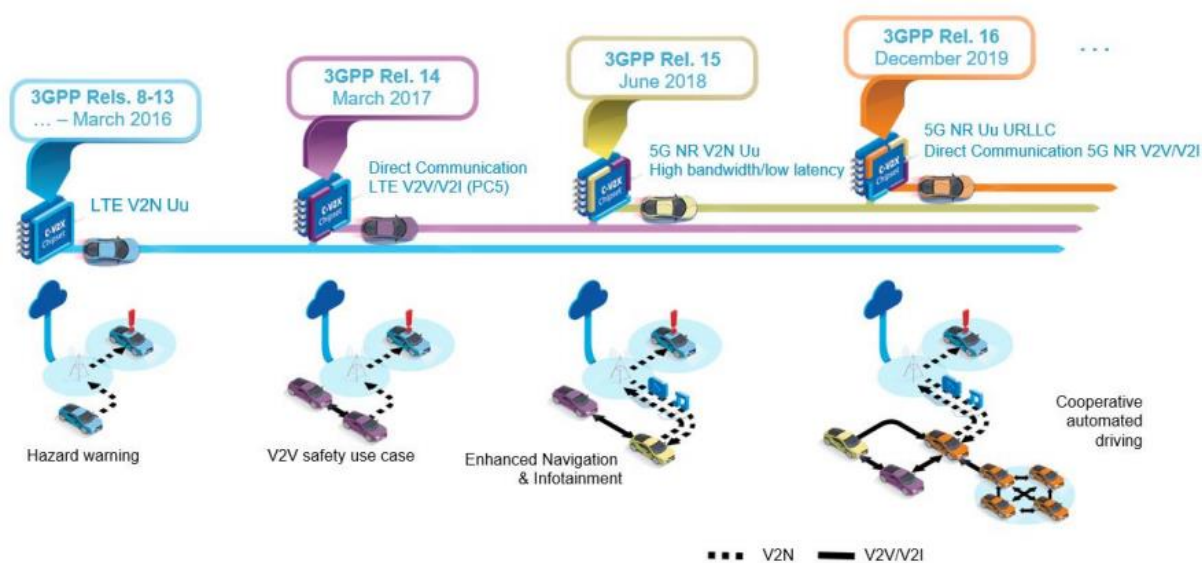


Obr. 18: Módy komunikace zavedené v Release 14, zleva: přímá komunikace mezi uzly, komunikace přes síť [22]

Na Obr. 18 jsou vyvedeny diagramy znázorňující oba výše zmíněné módy komunikace, které jsou vzájemně komplementární. V přímém módu probíhá komunikace pouze mezi koncovými uzly (tedy např. V2V, V2I, ...), není tedy potřeba žádná síťová infrastruktura. V síťovém módu komunikuje vozidlo s vnější sítí (např. internet) podobně jako mobilní telefon s datovým připojením.

3GPP Release 15, který byl vydán v červnu 2018, dále zlepšuje C-V2X technologii představenou v Release 14, mimo jiné se jedná o zvýšení dosahu módu komunikace mezi koncovými zařízeními a vyšší spolehlivost této komunikace [22].

3GPP Release 16 (vydání plánované na konec roku 2019) bude velkým technologickým skokem, jelikož bude specifikovat C-V2X komunikaci, která bude fungovat na 5G technologii. Technologie bude plně zpětně kompatibilní s C-V2X z Release 14/15. 5G technologie opět zvýší datovou propustnost sítě, je slíbená podpora vzájemné rychlosti vozidel až 500 km/h a zpoždění sítě by pro bezpečnostně kritické aplikace nemělo přesahovat 1 ms [24].



Obr. 19: Časová osa releasů 3GPP s odhadem na dokončení releasu 16 [25]

## 4 Testování C-ITS

V první části této kapitoly jsou popsány standardy a postupy týkající se testování a ověřování C-ITS systémů. V druhé části již práce navazuje na praktickou část, ve které jsou popsána data získaná během měření na dálničním okruhu v Brně v rámci projektu C-ROADS CZ a postupy, kterými jsou z těchto dat spočteny KPI (také popsány v této kapitole).

### 4.1 Standardy testování C-ITS

#### 4.1.1 Standardizační organizace

Standardizační organizace relevantní k této práci jsou:

##### ISO

Organizace ISO (International Organization for Standardization) je organizace nezávislá na jakémkoli orgánu státní moci jakéhokoliv státu, která nevytváří zisk – prostředky získané prodejem standardů jsou použité pro samotný chod organizace. Mísí organizace ISO je vytváření mezinárodních standardů – dokumentů obsahujících tzv. „best-practices“ a informace a postupy k vytváření celosvětově kompatibilních produktů [26].

##### CEN

CEN (European Committee for Standardization) je asociací, která svazuje dohromady 34 národních evropských standardizačních orgánů. Je jednou ze tří na území Evropské Unie rozeznávaných Evropských standardizačních organizací s kompetencí vytvářet standardy na Evropské úrovni [27].

##### ETSI

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) je neziskový Evropský standardizační orgán s misí vyvíjet, ratifikovat a testovat globálně aplikovatelné standardy pro ICT (Information and Communication Technologies) systémy a aplikace. Přestože se jedná o organizaci vyvíjející Evropské standardy, má ETSI celosvětový dosah a je v partnerském vztahu s mezinárodní organizací 3GPP [28].

##### 3GPP

3GPP je mezinárodní standardizační organizace, která spojuje sedm telekomunikačních standardizačních organizací (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), které nazývá organizačními partnery. 3GPP pro své organizační partnery zprostředkovává prostředí, ve kterém mohou vyvíjet a diskutovat dokumenty a specifikace které definují 3GPP technologie [29].

## 4.1.2 Standardy testování C-ITS

### ETSI EG 202 798 – Framework for conformance and interoperability testing

Dokument specifikuje dva základní testovací rámce pro projekty v oblasti ITS. Testovací rámec je dokument obsahující návody a příklady nutné k implementaci testové specifikace. Testovací rámce obsažené v EG 202 798 jsou:

1. ITS testovací rámec pro testování konformity systémů – proces zjišťování, zda implementace systému a procesy v něm, jsou v souladu s relevantními standardy.

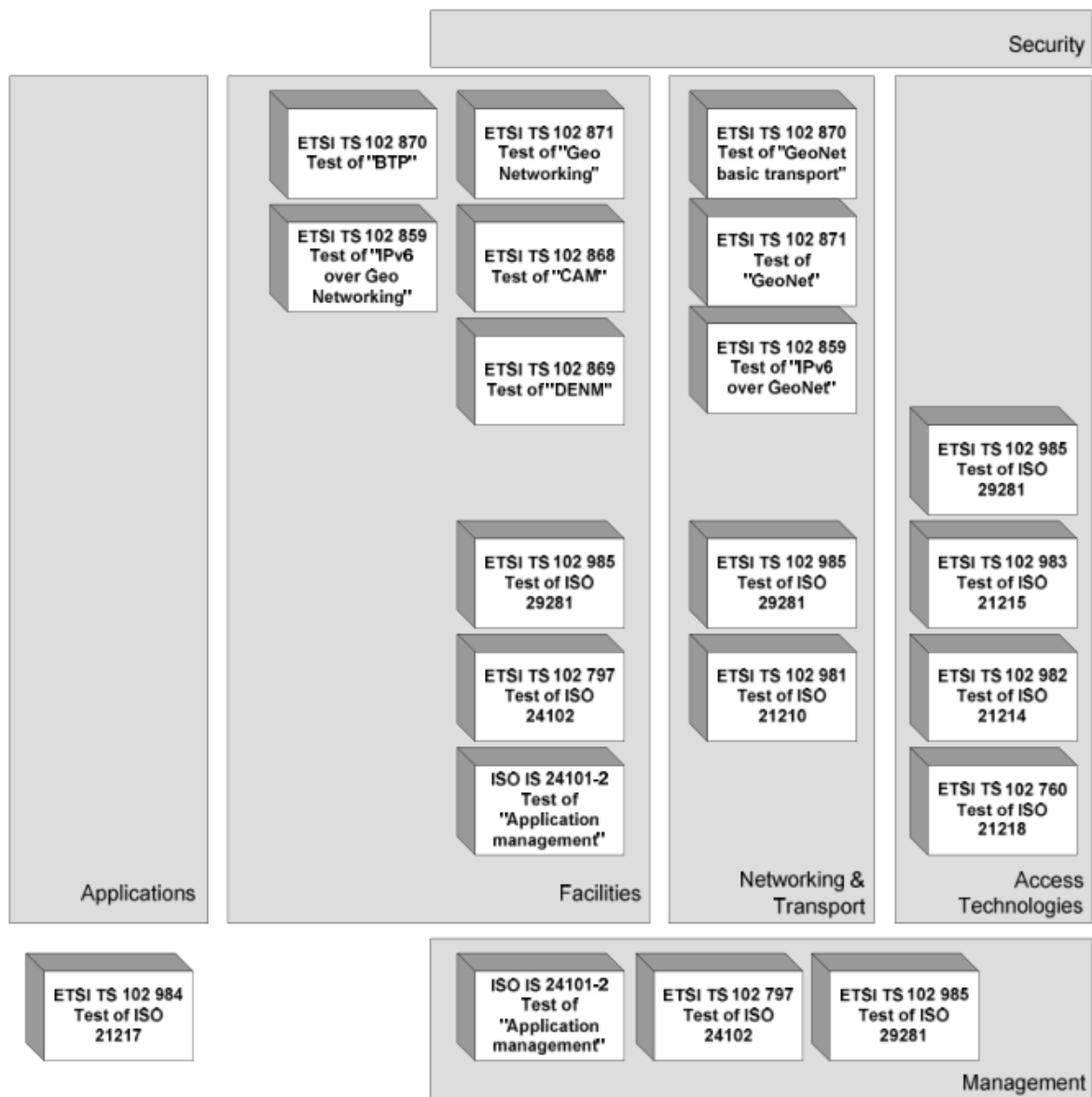
V názvosloví standardu se testovaná část celkového systému (System Under Test, SUT) označuje jako *Implementation under test* (IUT). Rozhraní, přes které je realizováno propojení IUT (součást SUT) a testového systému (systém, který poskytuje testové vstupy a výstupy) se nazývá *referenční bod*.

Přes rozhraní referenčního bodu probíhá komunikace testovacího a testovaného systému skrze zprávy pojmenované *Protocol data units* (PDU). Pomocí PDU se excitují procesy v testovaném systému a zároveň se pomocí nich přenáší směrem do testovacího systému reakce na testové vstupy v podobě výstupů testovaného systému [30].

2. ITS testovací rámec pro testování interoperability systémů – proces zjišťování, zda jsou jednotlivá zařízení od různých výrobců schopná spolupráce.

V rámci testování interoperability je trochu pozměněná terminologie, kde testovaný objekt je pojmenován *Equipment under test* (EUT). Jednotlivé systémy (přístroje), označované jako EUT, spolu komunikují přes rozhraní, která jsou opět nazývána jako *referenční body* [30].

Standardy pro ověřování systémů na území EU jsou vydávány organizací ETSI. Přípravované a již vyhotovené standardy relevantní pro testování ITS/C-ITS systémů jsou vyobrazeny na Obr. 20, kde jsou rozřazeny podle síťové vrstvy, kterou řeší. Následuje přehled již existujících standardů a technických specifikací pro testování C-ITS systémů na facilities vrstvě.



Obr. 20: Standardy pro testování ITS systémů, v nynější době ve vývoji/finalizovány [30]

### ETSI TS 102 868 – 1/2/3 Testing; Conformance test specifications for Cooperative Awareness Basic Service (CA)

Sada dokumentů pro testování základní služby využívající CAM zprávy jako prostředek pro přenos informací mezi ITS-S, obsahuje manuál k vyplňování předdefinovaných testovacích formulářů, strukturu testů, jejich cíle a v neposlední řadě doporučení pro testování pro dosažení co možná nejvyšší interoperability mezi zařízeními od různých výrobců.

### ETSI TS 102 869 – 1/2/3 Testing; Conformance test specifications for Decentralized Environmental Notification Basic Service (DEN)

Sada dokumentů pro testování služeb založených na využití varovných zpráv DENM, obsahuje předdefinované testovací formuláře, manuál ke způsobu jejich vyplnění, strukturu testů, jejich cíle a doporučení pro testování pro dosažení co možná nejvyšší interoperability mezi zařízeními od různých výrobců. Jak je vidět, jedná se o dokument velmi podobný ETSI 102 868, jen aplikovaný na jiný druh zprávy (DENM).

### **ETSI TS 102 870 – Testing; Conformance test specifications for Geonetworking Basic Transport Protocol (BTP)**

Sada dokumentů pro testování základního transportního protokolu Geonetworkingu obsahuje ve své první části testové formuláře a instrukce k jejich správnému vyplňování. Ve druhé části je popsána struktura konformačních testů pro následující oblasti:

- Generování paketů BTP-A
- Generování paketů BTP-B
- Zpracování paketů

V poslední části jsou specifikovány abstraktní testy BTP, které mají opět zvýšit pravděpodobnost interoperability produktů od různých výrobců.

### **ETSI TS 102 871 – 1/2/3 Testing; Conformance test specifications for GeoNetworking ITS-G5**

Sada dokumentů pro testování Geonetworkingu ITS-G5 obsahuje ve své první části testové formuláře a instrukce k jejich správnému vyplňování. Ve druhé části je popsána struktura konformačních testů pro následující oblasti:

- Testování formátu a platnosti dat
- Testování chodu protokolu
- Testování kapacity bufferu
- Testování závislosti na médiu

V poslední části jsou specifikovány abstraktní testovací metody, které mají zvýšit pravděpodobnost interoperability produktů od různých výrobců.



## 4.2 Měřitelné parametry systému V2X

### 4.2.1 Telekomunikační KPI

#### RSSI (Received Signal Strength Indicator)

RSSI je reprezentací výkonu přijatého rádiového signálu. RSSI není standardizovaný parametr signálu v závislosti na výrobci je počítán z různých fází zpracovaného signálu – může se počítat jak ze signálu na mezifrekvenci (superheterodyn), tak ze signálu v základním pásmu. Jednotky RSSI jsou arbitrární (např. 0 – 100), obecně ale platí, že čím vyšší číslo, tím vyšší výkon signálu a s tím tedy i jeho kvalita [31].

#### SNR (Signal to Noise Ratio)

SNR je poměr výkonu signálu k výkonu šumu na daném frekvenčním pásmu. SNR lze tedy zapsat jako

$$SNR = \frac{P_{\text{signál}}}{P_{\text{šum}}}$$

#### Dostupnost služby

Dostupnost telekomunikační služby je vyjádřena jako:

$$P(|c_{at} - c_{m,t}| \leq \epsilon) \geq \gamma, t \in \langle 0, T \rangle$$

Kde  $c_{at}$  jsou požadované parametry,  $c_{m,t}$  jsou parametry naměřené,  $\epsilon$  je prahová hodnota rozdílu parametrů a  $\gamma$  zastupuje hladinu pravděpodobnosti. Dostupnost se tedy také dá ve zjednodušené formě vyjádřit následujícím zlomkem:

$$\text{Dostupnost} = \frac{\text{doba po kterou je služba dostupná}}{\text{celková doba měření}}$$

Kde doba po kterou je služba dostupná, je doba, kdy rozdíl  $c_{at} - c_{m,t}$  nepřesahuje prahovou hodnotu  $\epsilon$ .

#### Střední čas mezi poruchami

Tento parametr je statistickým průměrem (mean) časových intervalů, ve kterých funguje systém bez poruchy. Lze definovat jako:

$$P(|f_i - f_{m,i}| \leq \epsilon) \geq \gamma$$

Tedy jako pravděpodobnost, že rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou ( $f_i - f_{m,i}$ ), překročí nějaký definovaný práh.

### **Střední čas k obnovení služby**

Tento parametr je statistickým průměrem (mean) časových intervalů, ve kterých systém nefunguje správně (je ve stavu poruchy). Lze definovat jako:

$$P(|rc_i - rc_{m,i}| \leq \epsilon) \geq \gamma$$

Tedy jde o pravděpodobnost překročení prahu rozdílem požadované a skutečné hodnoty ( $rc_i - rc_{m,i}$ ) i-tého obnovení funkce po poruše sítě.

### **Latence (zpoždění)**

Latence je doba mezi časovou značkou samotné zprávy a dobou přijetí zprávy

### **Jitter**

Jitter je rozptyl zpoždění jednotlivých paketů v nějakém časovém intervalu, tedy

$$Jitter = \frac{\sum(latency - E[latency])}{N}$$

### **Ztráta paketů**

Ztráta paketů se vyjadřuje jako poměr ztracených paketů k paketům vyslaným:

$$ztráta\ paketů = \frac{pakety\ přijaté}{pakety\ vyslané}$$

[32][33]

## 4.2.2 GNSS KPI

### **Přesnost**

Přesnost udává míru odchýlení určení pozice od pravé pozice přijímače. Nejčastěji používané hodnoty k popisu míry přesnosti systému jsou směrodatné odchylky od reálné hodnoty pozice (používají se hodnoty jedné či dvou standardních odchylek, také lze zapsat jako  $\sigma$  či  $2\sigma$ ), jelikož pravděpodobnostní rozdělení chyb většiny navigačních systémů je podobné rozdělení normálnímu.

### **Integrita**

Parametr integrity udává míru důvěry v navigační řešení poskytované systémem. V praxi parametr udává, jaká je pravděpodobnost výskytu chyby o mnoho větší, než je chyba specifikovaná v parametru přesnosti.

### **Kontinuita**

Parametr kontinuity udává pravděpodobnost, zhoršení kvality navigačního řešení v čase. Jinými slovy parametr kontinuity měří schopnost systému dodávat navigační řešení konstantní kvality.

### **Dostupnost**

Parametr dostupnosti je nejobecnějším a v zásadě nejpopsnějším parametrem systému, jelikož je pravděpodobností správné funkce systému, kdy správná funkce je definovaná jako provoz systému, kdy parametry přesnosti, integrity a kontinuity dosahují nějakých definovaných parametrů [34].

## 5 Zpracování dat – metodika

V této kapitole jsou popsána obdržená data z testování projektu C-ROADS, dále je popsán postup, použitá a vyvinutá metodika zpracování dat, která byla na zmíněná data aplikována. Výstupem zpracování těchto dat jsou reporty v pdf, jejichž formát a obsah jsou popsány ke konci této kapitoly.

### 5.1 Python

#### 5.1.1 Obecný popis

Ke zpracování dat obsažených v obdržených záznamech ve formátu .pcap byl použit programovací jazyk Python. Python je interpretovaný, objektově orientovaný, dynamicky typovaný programovací jazyk na vysoké úrovni abstrakce. Python podporuje moduly a balíčky, díky kterým lze dosáhnout vysoké modularity zdrojového kódu.

Python je v posledních letech velice oblíbeným jazykem používaným mimo jiné ke zpracování dat. Pro tento účel jsou vytvořeny dále popsané balíčky, které byly použity k vypracování většiny praktické části diplomové práce.

Jako vývojové prostředí praktické části práce bylo použito integrované vývojové prostředí Spyder IDE, které je součástí datově-analytického balíčku Anaconda, jež je volně dostupná na webových stránkách projektu Anaconda.

#### 5.1.2 Pandas

Pandas je datově orientovaný programový balíček, který usnadňuje práci s velkým množstvím dat. Jádrem balíčku je datový typ *DataFrame*, který umožňuje uskládat heterogenní data ve dvoudimenzionální struktuře, která jde přirovnat k tabulce.

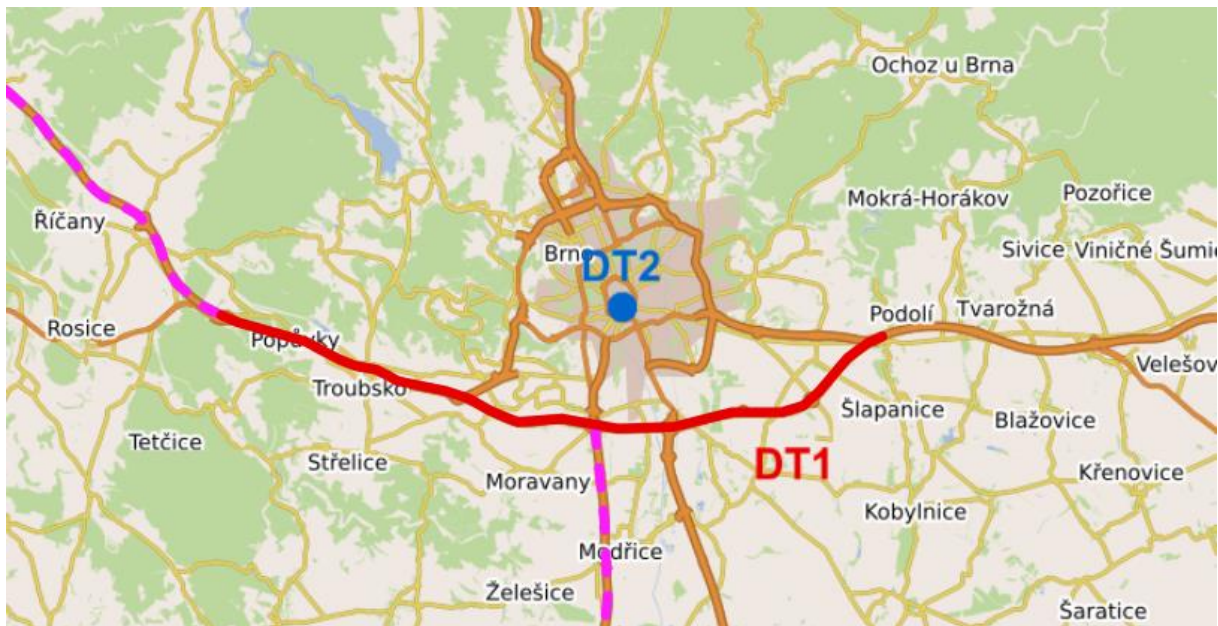
#### 5.1.3 NumPy

NumPy je Python knihovna s cílem poskytovat prostředí pro práci s multidimenzionálními maticemi (ne nepodobných maticovým strukturám v programovém prostředí MATLAB) a s operacemi lineární algebry na nich. Díky implementovanému systému indexace zmíněných maticových struktur je velice zjednodušen výběr podmnožin dat [35].

## 5.2 Data

### 5.2.1 Získání

Vstupní data pro automatickou analýzu vyvinutým softwarovým nástrojem, jsou logy získané během testování lokality DT<sub>1</sub> v projektu C-ROADS CZ. Detail této lokality je vidět na Obr. 21. Test, během kterého byly zmíněné logy pořízeny, vypadal následovně: testovací vozidlo vybavené ITS-G5 OBU jednotkou projíždělo jednotlivé, RSU jednotkami vybavené, úseky testovací oblasti DT<sub>1</sub>. Po projetí všech předem stanovených částí byly staženy logy jak z OBU jednotky, tak ze všech relevantních RSU jednotek.



Obr. 21: DT<sub>1</sub> – úsek, na kterém probíhalo testování, ze kterého pochází datové logy analyzované v této práci [11]

### 5.2.2 Forma

Datové logy byly předány ve formátu .pcap v následující souborové struktuře:

- Kořenový adresář (název testu)
  - OBU 1
    - Tx (log vyslaných zpráv)
    - Rx (log přijatých zpráv)
  - RSU 1
    - Tx
    - Rx
  - 
  - 
  - RSU N

Formát souborů .pcap je formát užívaný k uchování paketů zachycených během síťové komunikace. Je tzv. „de facto“ standardem pro práci s pakety v UNIX-based prostředí. Pro prohlížení těchto souborů a jejich základní analýzu je možné použít např. program Wireshark (ke stažení na <https://www.wireshark.org>). Jelikož v základní verzi nemá program Wireshark dekodér pro standardizované C-ITS zprávy a pakety, je potřeba mít nainstalovaný balíček pluginů obsahující tento dekodér (dostupné v elektronické příloze práce).

### 5.2.3 Obsah

Po otevření obdržených datových logů ve Wiresharku s nainstalovanými potřebnými pluginy, se naskytne pohled vyobrazený na Obr. 22. Je zde vidět seznam zachycených, dekodovaných C-ITS zpráv, různých druhů (CAM, IVI, DENM) vyslaných RSU jednotkou do svého okolí.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	CAM	148	
2	0.025038	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	IVIM	293	(ETSI TS 103301)
3	0.037093	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	DENM	196	
4	0.525114	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	IVIM	293	(ETSI TS 103301)
5	0.538448	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	DENM	196	
6	1.003842	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	CAM	148	
7	1.031067	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	IVIM	293	(ETSI TS 103301)
8	1.044411	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	DENM	196	
9	1.540760	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	IVIM	293	(ETSI TS 103301)
10	1.545857	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	DENM	196	
11	2.007336	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	CAM	148	
12	2.051419	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	IVIM	293	(ETSI TS 103301)
13	2.054336	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	DENM	196	
14	2.559254	89:52:a7:02:ca:02	Broadcast	IVIM	293	(ETSI TS 103301)

Obr. 22: Seznam zachycených dekodovaných C-ITS zpráv v programovém prostředí Wireshark

Každá z vyobrazených C-ITS zpráv vykazuje nějakou, svému typu specifickou vnitřní strukturu odpovídající Evropským standardům. Příklad struktury CAM zprávy vyslané OBU jednotkou v testovacím vozidle je vidět na Obr. 23. Na obrázku je rozbalená součást struktury, týkající se C-ITS dopravních informací – je zde vidět poloha C-ITS-S, typ vozidla (stationType), rychlost a další informace dle Evropského standardu pro CAM zprávu.

```

> Frame 9: 338 bytes on wire (2704 bits), 338 bytes captured (2704 bits)
> Radiotap Header v0, Length 44
  802.11 radio information
> IEEE 802.11 QoS Data, Flags: .....
> Logical-Link Control
> GeoNetworking: Common (TSB Single Hop)
> Basic Transport Protocol (Type B)
▼ CAM
  ▼ CAM
    ▼ header
      protocolVersion: currentVersion (1)
      messageID: cam (2)
      stationID: 3226894010
    ▼ cam
      generationDeltaTime: Unknown (57884)
      ▼ camParameters
        ▼ basicContainer
          stationType: passengerCar (5)
          ▼ referencePosition
            latitude: Unknown (491364183)
            longitude: Unknown (166019366)
            > positionConfidenceEllipse
            > altitude
          ▼ highFrequencyContainer: basicVehicleContainerHighFrequency (0)
            ▼ basicVehicleContainerHighFrequency
              > heading
              > speed
              driveDirection: unavailable (2)
              > vehicleLength
              vehicleWidth: Unknown (20)
              > longitudinalAcceleration
              > curvature
              curvatureCalculationMode: unavailable (2)
              > yawRate
            > lowFrequencyContainer: basicVehicleContainerLowFrequency (0)

```

Obr. 23: Detail CAM zprávy vyslané vozidlem vybaveným OBU jednotkou

### 5.2.4 Výpočet telekomunikačních parametrů

Telekomunikační parametry, které by měl software analyzovat, jsou následující:

1. Latence (zpoždění) – doba, která uběhne od vyslání zprávy vysílací stranou do přijetí téže zprávy přijímací stranou
2. Jitter – rozptyl latence
3. Packet loss - *přijaté pakety/vyslané pakety*
4. Signal-to-Noise ratio (SNR) - poměr výkonu signálu k výkonu šumu na daném frekvenčním pásmu

Pro spočtení těchto telekomunikačních parametrů byly vytvořeny následující postupy, které využívají níže uvedená data extrahovaná z datových logů.

- Frame → frame.time – timestamp paketu [**tstamp**]
- Frame → frame.time\_delta – doba od přijetí předešlého paketu [**tdelta**]

- Wlan → wlan.addr – adresa jednotky
- Radiotap → radiotap.present → dbm\_antsignal – odhad výkonu signálu [**sigpwr**]
- Radiotap → radiotap.present → dbm\_antnoise – odhad výkonu šumu [**noisepwr**]

K jednoznačné identifikaci vysílající jednotky v rx logu byla použita wlan.addr. Výše uvedené telekomunikační parametry se počítají s pomocí zmíněných dat následovně:

1. **Latence:**

Latence je počítaná následovně:

$$latence[i] = timestamp_{rx}[i] - timestamp_{tx}[i]$$

Jelikož datové pakety v logách neobsahují žádnou informaci, která by šla použít jako tzv. primární klíč (jednoznačný identifikátor) pro určení jednotlivých paketů, bylo nutné přistoupit ke zjednodušení problému, kde se počítá s „best-case“ scénářem, kdy jsou od sebe odečítány vždy timestamps paketů, které činí minimální možný rozdíl (minimální možné zpoždění).

2. **Jitter:**

Jitter je počítán s použitím dat **tdelta** následovně:

$$Jitter = \frac{\sum(tdelta - \mu_{tdelta})}{N}$$

$\mu_{tdelta}$  zde reprezentuje průměr **tdelta** a N značí počet zpráv

3. **Packet loss:**

Packet loss se počítá dle poměru:

$$packet\ loss = \frac{N_{prijaté}}{N_{vyslané}}$$

Kde počty přijatých a vyslaných zpráv se berou z časového intervalu, který je ohraničen časovými značkami z první a poslední přijaté zprávy od vysílajícího subjektu.

4. **SNR:**

Kalkulace SNR je zjednodušená díky faktu, že hodnoty výkonu signálu a šumu jsou poskytovány v jednotkách dbm, na:

$$SNR[i] = sigpwr[i] - noisepwr[i]$$

Datové pole vyhrazené pro **sigpwr** a **noisepwr** byla bohužel ve všech poskytnutých logách nevyplněná, proto výpočet nedává žádné výsledky.



### 5.3 Vstupy a výstupy softwarového nástroje

Jednoduché schéma na Obr. 24 znázorňuje vstupy a výstupy vyvinutého SW nástroje. Vstupem programu je adresář testu (adresářů testů může být samozřejmě více), obsahující adresáře jednotlivých OBU a RSU jednotek, ve kterých jsou odděleně od sebe jednotlivé .pcap soubory obsahující buďto pouze přijaté nebo pouze odeslané zprávy. Logy obsahující pouze odeslané zprávy musí mít někde ve svém názvu řetězec „tx“ a logy obsahující pouze přijaté zprávy musí mít někde ve svém názvu řetězec „rx“. Znázornění struktury vstupního adresáře je uvedeno dále v textu pod Obr. 24.



Obr. 24: Vstupy a výstupy vyvinutého softwarového nástroje

- `analyze_logs.py`
- `logs`
  - Adresář s názvem testu (jeden test, jakkoliv pojmenovaný, např. datum a typ)
    - OBU 1
      - `Tx1.pcap`
      - ....
      - `TxN.pcap`
      - `Rx1.pcap`
      - ....
      - `RxN.pcap`
    - .....
    - OBU N
    - RSU 1
      - `Tx1.pcap`
      - ....
      - `TxN.pcap`
      - `Rx1.pcap`
      - ....
      - `RxN.pcap`
    - .....
    - RSU N

Výstupem programu je v adresáři reports, který se automaticky vytvoří ve stejném adresáři, ve kterém je umístěn jak adresář logs, tak samotný program analyze\_logs.py. V adresáři reports je složka s názvem testu ve které se nachází automaticky generované reporty ve formátu pdf pro každý pár OBU → RSU a RSU → OBU.

Příklad: pokud chce uživatel zanalyzovat logy ve složce `.\logs\brno_01_2019\`, pak v kořenovém adresáři programu zadá přes konzoli operačního systému příkaz:

**»python analyze\_cits\_logs.py logs\brno\_01\_2019«**

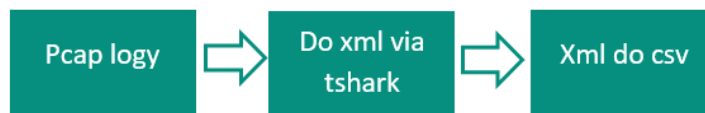
- python – spustí python interpreter (python je interpretovaný programovací jazyk)
- analyze\_cits\_logs.py – název programu
- logs\brno\_01\_2019 - cesta ke složce s logy daného testu

## 5.4 Postup zpracování dat

### 5.4.1 Předzpracování logů

V následující kapitole následuje popis vyvinutého softwarového nástroje, jakým způsobem zpracovává data a jak počítá výstupní hodnoty prezentované v automaticky generovaných pdf reportech.

Z dat ve formátu pcap nelze žádným smysluplným způsobem přímo pracovat s informačně cennými daty – je proto nutné původní data převést do konvenčními nástroji čitelného formátu a následně provést jejich předzpracování, kdy se vyberou jen data, která jsou předmětem zájmu analýzy a převedou se do autorem předem definovaného formátu, který je pak v programu interně používán. Z důvodu příhodnosti užití programu Wireshark a existenci jeho konzolové verze Tshark, která umí konvertovat soubory ve formátu pcap do souborů ve formátu xml.



Obr. 25: Proces extrakce dat z formátu pcap do datově zpracovatelného formátu (předzpracování dat)

XML soubor vygenerovaný programem tshark již může být dále zpracován pomocí klasických nástrojů k práci s XML soubory jako je například použitá knihovna lxml (nejpoužívanější a nejpropracovanější knihovna pro práci s XML soubory v programovacím jazyce Python). Náhled na reprezentaci datového logu ve formátu XML je vidět na Obr. 26.

Ze souboru ve formátu XML jsou následně s pomocí atributů „name“ vybrána relevantní data, která jsou agregována (pomocí tzv. regular expressions) a následně ukládána do datových souborů .csv, kde je jako datový separátor použit charakter tabulátoru \t. S vybranými daty v takovémto formátu se dá již pohodlně pracovat a tím tedy končí procesní segment předzpracování dat.

```

<packet>
  <proto name="geninfo" pos="0" showname="General information" size="148">
  </proto name="frame" showname="Frame 1: 148 bytes on wire (1184 bits), 148 bytes captured (1184 bits)" size="148" pos="0">
  <proto name="radiotap" showname="Radiotap Header v0, Length 44" size="44" pos="0">
  <proto name="wlan_radio" showname="802.11 radio information" size="0" pos="44"/>
  <proto name="wlan" showname="IEEE 802.11 QoS Data, Flags: ....." size="26" pos="44">
  <proto name="llc" showname="Logical-Link Control" size="8" pos="70">
  <proto name="gn" showname="GeoNetworking: Common (TSB Single Hop)" size="70" pos="78">
  <proto name="btp" showname="Basic Transport Protocol (Type B)" size="4" pos="118">
  <proto name="cam" showname="CAM" size="26" pos="122">
</packet>

<packet>
  <proto name="geninfo" pos="0" showname="General information" size="293">
    <field name="num" pos="0" show="2" showname="Number" value="2" size="293"/>
    <field name="len" pos="0" show="293" showname="Frame Length" value="125" size="293"/>
    <field name="caplen" pos="0" show="293" showname="Captured Length" value="125" size="293"/>
    <field name="timestamp" pos="0" show="Jan 15, 2019 13:31:28.083823000 Střední Evropa (běžný čas)" showname="Captured Time" size="293"/>
  </proto>
  <proto name="frame" showname="Frame 2: 293 bytes on wire (2344 bits), 293 bytes captured (2344 bits)" size="293" pos="0">
    <field name="frame.encap_type" showname="Encapsulation type: IEEE 802.11 plus radiotap radio header (23)" size="0" pos="0">
    <field name="frame.time" showname="Arrival Time: Jan 15, 2019 13:31:28.083823000 Střední Evropa (běžný čas)" size="0" pos="0">
    <field name="frame.offset_shift" showname="Time shift for this packet: 0.000000000 seconds" size="0" pos="0" show="0.0000" size="0">
    <field name="frame.time_epoch" showname="Epoch Time: 1547555488.083823000 seconds" size="0" pos="0" show="1547555488.0838" size="0">
    <field name="frame.time_delta" showname="Time delta from previous captured frame: 0.025038000 seconds" size="0" pos="0" show="0.0250" size="0">
    <field name="frame.time_delta_displayed" showname="Time delta from previous displayed frame: 0.025038000 seconds" size="0" pos="0" show="0.0250" size="0">
    <field name="frame.time_relative" showname="Time since reference or first frame: 0.025038000 seconds" size="0" pos="0" show="0.0250" size="0">
    <field name="frame.number" showname="Frame Number: 2" size="0" pos="0" show="2"/>
    <field name="frame.len" showname="Frame Length: 293 bytes (2344 bits)" size="0" pos="0" show="293"/>
    <field name="frame.oap_len" showname="Capture Length: 293 bytes (2344 bits)" size="0" pos="0" show="293"/>
    <field name="frame.marked" showname="Frame is marked: False" size="0" pos="0" show="0"/>
    <field name="frame.ignored" showname="Frame is ignored: False" size="0" pos="0" show="0"/>
    <field name="frame.protocols" showname="Protocols in frame: radiotap:wlan_radio:wlan:llc:gn:btp:itsis" size="0" pos="0" show="radiotap:wlan_radio:wlan:llc:gn:btp:itsis" size="0">
  </proto>
  <proto name="radiotap" showname="Radiotap Header v0, Length 44" size="44" pos="0">
  <proto name="wlan_radio" showname="802.11 radio information" size="0" pos="44"/>
  <proto name="wlan" showname="IEEE 802.11 QoS Data, Flags: ....." size="26" pos="44">
  <proto name="llc" showname="Logical-Link Control" size="8" pos="70">
  <proto name="gn" showname="GeoNetworking: Common (TSB Single Hop)" size="215" pos="78">
  <proto name="btp" showname="Basic Transport Protocol (Type B)" size="4" pos="118">
  <proto name="itsis" showname="ETSI TS 103301" size="171" pos="122">
</packet>

```

Obr. 26: Výřez z XML souboru s datovým logem, v horní části je vidět základní struktura jednoho paketu (jedná C-ITS zpráva), v dolní části jsou vidět detaily následujícího paketu týkající se časování a rozměrů paketu

cam_cam.generationDeltaTime	cam_cam.latitude	cam_cam.longitude	cam_cam.stationID	frame_frame.offset_shift	frame_frame.time	frame_frame.time_delta	geninfo_len	geninfo_timestamp
50884	491364066	166018483	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:09.110331000	0.000000000	338	Jan 15, 2019 13:54:09.110331000
50884	491364066	166018483	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:10.113379000	1.003048000	338	Jan 15, 2019 13:54:10.113379000
50884	491364066	166018483	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:11.133385000	1.020006000	338	Jan 15, 2019 13:54:11.133385000
50884	491364066	166018483	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:12.119331000	0.985946000	338	Jan 15, 2019 13:54:12.119331000
50884	491364066	166018483	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:13.134832000	1.015501000	338	Jan 15, 2019 13:54:13.134832000
57499	491364183	166019116	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:13.652437000	0.517605000	163	Jan 15, 2019 13:54:13.652437000
57884	491364183	166019366	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:14.659494000	1.007057000	338	Jan 15, 2019 13:54:14.659494000
57884	491364183	166019366	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:15.671627000	1.012133000	338	Jan 15, 2019 13:54:15.671627000
57884	491364183	166019366	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:16.668515000	0.996888000	338	Jan 15, 2019 13:54:16.668515000
61384	491364366	166019266	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:17.670459000	1.001944000	338	Jan 15, 2019 13:54:17.670459000
61984	491364383	166019233	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:18.678038000	1.007579000	338	Jan 15, 2019 13:54:18.678038000
63384	491364433	166019166	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:19.694999000	1.016961000	338	Jan 15, 2019 13:54:19.694999000
64384	491364466	166019116	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:20.695689000	1.000690000	338	Jan 15, 2019 13:54:20.695689000
65384	491364500	166019066	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:21.703086000	1.007397000	338	Jan 15, 2019 13:54:21.703086000
848	491364516	166019016	3226894010	0.000000000	Jan 15, 2019 13:54:22.701960000	0.998874000	338	Jan 15, 2019 13:54:22.701960000

Obr. 27: Ukázka předzpracovaných agregovaných dat ve formátu .csv v programu MS Office Excel

### 5.4.2 Kombinace logů

Před samotným spočtením telekomunikačních parametrů pro nějakou dvojici TX-RX, je nutné vytvořit všechny smysluplné kombinace vysílajících a přijímacích logů. Jelikož testování probíhá způsobem, kdy se vezme jedno vozidlo vybavené OBU a projíždí se s ním úseky dálnice, které jsou vybaveny RSU jednotkami, jsou brány v potaz všechny kombinace OBU→RSU a RSU→OBU. Na výstupu programu je tak vyroben jeden report pro každou kombinaci OBU→RSU (v tomto případě pro OBU log tx.pcap a pro RSU log rx.pcap) a RSU→OBU.

### 5.4.3 Zhodnocení telekomunikačních parametrů

S vytvořenými všemi smysluplnými kombinacemi logů (popsané v předešlém odstavci) lze pro jednotlivé kombinace počítat zadané telekomunikační parametry z předzpracovaných dat uložených v csv souborech. Samotné výpočty jsou provedeny tak, jak je popsáno v kapitole 5.2.4. Proces, kterým se dojde od předzpracovaných logů k finálním reportům, je vyobrazen na Obr. 28.



Obr. 28: Celý hlavní proces zpracování již předzpracovaných dat

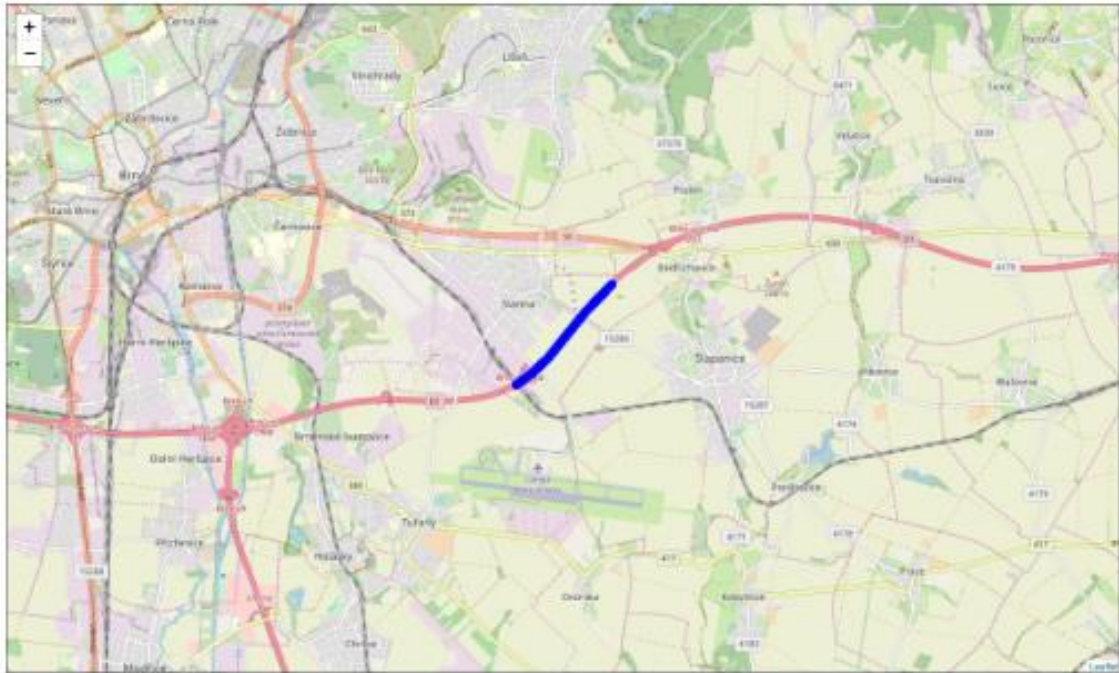
### 5.4.4 Automaticky generovaný report

Z předzpracovaných dat a z vypočtených telekomunikačních parametrů jsou nakonec vytvořeny reporty v permanentním dokumentovém formátu .pdf. Příklad reportu je vidět na Obr. 29. Report obsahuje název kombinace logů, mapový výřez s vyznačenými polohami vyslaných CAM zpráv, shrnutí spočtených telekomunikačních parametrů a graf průběhu latence.

## ITS-G5 DATA REPORT

TX - OBU\_Herman to RX - RSU\_201\_8

### INDICATED POSITIONS OF TRANSMITTED CAM MESSAGES



TX: OBU

RX: RSU

LATENCY:

Mean: 183.26 [ms]

Std: 63.09 [ms]

JITTER: 81.31 [ms]

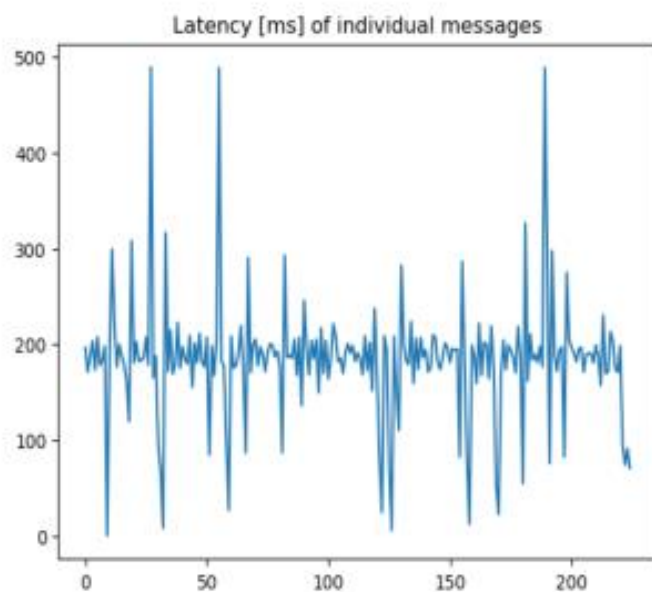
PACKET LOSS:

Messages TX: 261.0

Messages RX: 225.0

Loss ratio: 0.86

SNR info not available



Obr. 29: Příklad automaticky generovaného reportu

## 6 Výsledky

Shrnutí parametrů z dostupných datových logů je vyvedeno v Tabulce 5. Jak je z tabulky vidět, je ve všech vypočtených parametrech zásadní rozdíl v závislosti na směru komunikace. Komunikace ve směru RSU→OBU má zásadně vyšší latenci a ztrátu paketů, naopak má ale zásadně nižší jitter paketů. Důvody pro tyto rozdíly nejsou autorovi známy, taková analýza je ale mimo zadání a rozsah této práce.

Tabulka 5: Shrnutí telekomunikačních parametrů z testových logů

	Latence		Jitter	Packet loss	SNR
	Průměr [ms]	Std [ms]			
OBU→RSU <sub>207.7</sub>	196.58	87.28	130.96	0.76	N/A
OBU→RSU <sub>201.8</sub>	183.26	63.09	81.31	0.86	N/A
RSU <sub>207.7</sub> →OBU	518.66	2.53	21.34	0.11	N/A
RSU <sub>201.8</sub> →OBU	523.73	19.49	9.93	0.11	N/A

## 7 Závěr

V diplomové práci byl představen koncept systémů C-ITS – systémy, využívající sdílení informace v abstraktním dopravním prostoru tvořeném vozidly a dopravní infrastrukturou pro zvýšení efektivity a bezpečnosti dopravy na pozemních komunikacích. Celá řada evropských projektů, provedených v posledních několika letech, ukázala svoji konvergencí a zkušenostmi, získanými během těchto projektů, cestu, kterou se budou ubírat trendy a způsoby nasazení C-ITS technologií.

Dvě hlavní technologie, které soupeří o své místo na trhu a o dominantní postavení na trhu C-ITS, jsou koncepčně starší a více otestovaná ETSI ITS G5, jejímž soupeřem je mladší a v současnosti ještě ne příliš důkladně vyzkoušená technologie 5G. V práci je proveden popis a analýza obou těchto technologií.

Dále byly v práci analyzovány standardy relevantní k oblasti testování C-ITS projektů. Důležité standardy jsou popsány a jejich obsah shrnut, stejně jako důležité KPI jak v oblasti telekomunikační, tak v oblasti globálních satelitních navigací, které jsou nedílnou součástí systémů C-ITS.

V praktické části diplomové práce byl vytvořen softwarový nástroj v programovacím jazyce Python, jež je schopen z testových paketových záznamů ve formátu pcap, vytvořit souhrnné pdf reporty obsahující odhad telekomunikačních parametrů.

Vstupem vytvořeného nástroje byly datové logy ve formátu pcap z testovacích jednotek použitých v rámci národní části evropského projektu C-ROADS na brněnském dálničním okruhu, který je v současné době vybavován C-ITS technologií. Výstupem softwaru jsou reporty ve formátu pdf, které shrnují telekomunikační parametry, které jdou z poskytnutých dat vyčíst (jelikož jde o testy, velká část informací v datových záznamech chybí, například data potřebná pro zhodnocení síly a kvality signálu). K získání zmíněných reportů ze surových dat, bylo potřeba vytvořit a aplikovat nové postupy zpracování dat, kterými je možné odhadovat telekomunikační parametry z dat získaných při testování C-ITS systémů.

C-ITS systémy jsou nutným mezikrokem mezi nynějším stavem pozemní dopravy a budoucími autonomními vozidly. Lze tedy očekávat zvýšené nasazení C-ITS technologií a systémů a jejich podporu od vlád evropských států. Vytvořený softwarový nástroj může výrazně ulehčit prvotní analýzu kvality telekomunikačního pokrytí a spojení během implementací C-ITS systémů v reálných podmínkách bez přidaných nákladů.



## 8 Zdroje

- [1] J. Härrri and J. Kenney, *Vehicular ad hoc Networks*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [2] D. AG, “Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland Test- und Versuchsspezifikation,” 2010.
- [3] D. AG, “simTD - Sichere und intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland.” [Online]. Available: <http://www.simtd.de>.
- [4] C. Faisstnauer, “COOPERS integrated project COOPERS Co-operative Networks for Intelligent Road Safety D6100 Final report on demonstration,” *Final Rep. Demonstr.*, pp. 1–60, 2010.
- [5] W. Kernstock, “Detailed pilot overview report. C-Roads,” 2017.
- [6] AustriaTech, “C-ROADS.” [Online]. Available: <https://www.c-roads.eu/platform.html>.
- [7] M. Böhm, “C-Roads -the Platform of Harmonised C-Its Deployments in Europe.”
- [8] E.-I. EUROPE, “eCoMove, Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency.” [Online]. Available: <http://www.ecomove-project.eu/>.
- [9] Qua, “ConVeX Consortium Hosts Europe’s First Live C-V2X Direct Communication Interoperability Demonstration Between Motorcycles, Vehicles, and Infrastructure,” 2018. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2018/07/04/convex-consortium-hosts-europes-first-live-c-v2x-direct-communication>.
- [10] F. Dvořák, “Auta si o koloně poví tichou poštou, testují ji na obchvatu Prahy,” *iDnes*, 13-Nov-2013.
- [11] “C-ROADS Czech republic.” [Online]. Available: <https://c-roads.cz>.
- [12] ETSI, “ETSI EN 302 665 V1.1.1 Intelligent Transport Systems: Communication Architecture,” vol. 1, pp. 1–44, 2009.
- [13] Autotalks, “DSRC vs. C-V2X for Safety Applications,” 2018. [Online]. Available: <https://www.auto-talks.com/technology/dsrc-vs-c-v2x-2/>.
- [14] ETSI (European Telecommunications Standards Institute), “Draft ETSI EN 302 663 v.1.2.0 - Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band,” vol. 0, pp. 1–24, 2012.
- [15] “What is OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing,” *Radio-electronics.com*. [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/multicarrier-modulation/ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing-what-is-tutorial-basics.php>.
- [16] “PHY Basics: How OFDM Subcarriers Work,” 2015. [Online]. Available:

- <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work>.
- [17] ETSI, “TS 102 687 - V1.2.1 - Intelligent Transport Systems ( ITS ); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range ;,” *Ts 102 687 V1.2.1*, vol. 2, pp. 1–14, 2018.
- [18] “What is LTE,” *Radio-electronics.com*, 2018. [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/what-is-lte-basics-tutorial-overview.php>.
- [19] “LTE MIMO,” *Radio-electronics.com*, 2017. [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/mimo.php>.
- [20] “LTE Frame & Subframe Structure,” *Radio-electronics.com*, 2018. [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/frame-subframe-structure.php>.
- [21] “LTE Channels,” *Radio-electronics.com*, 2018. [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/physical-logical-transport-data-channels.php>.
- [22] M. Flament, “Path towards 5G for the automotive sector.” 2018.
- [23] GSMA, “Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X).” GSMA, London, 2017.
- [24] Qualcomm, “5G NR based C-V2X.” Qualcomm, 2018.
- [25] “Timeline for deployment of C-V2X.” pp. 1–5, 2019.
- [26] ISO, “ISO in brief,” *Iso*, p. 12, 2018.
- [27] CEN, “CEN - Who we are,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cen.eu/about/Pages/default.aspx>.
- [28] ETSI, “ETSI - about us,” 2019. [Online]. Available: <https://www.etsi.org/about>.
- [29] 3GPP, “About 3GPP,” 2019. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/about-3gpp>.
- [30] ETSI (European Telecommunications Standards Institute), “ETSI EG 202 798,” vol. 1, pp. 1–48, 2011.
- [31] G. Lui, T. Gallagher, B. Li, A. G. Dempster, and C. Rizos, “Differences in RSSI readings made by different Wi-Fi chipsets: A limitation of WLAN localization,” *2011 Int. Conf. Localization GNSS, ICL-GNSS 2011*, pp. 53–57, 2011.
- [32] P. Moos, T. Zelinka, and M. Vít, *Telekomunikační služby*. Nakladatelství ČVUT, 2007.
- [33] ČVUT, “C-ROADS, Evaluation & Testing Methodology,” 2017.
- [34] M. Petovello, “GNSS Solutions: Quantifying the performance of navigation systems and standards for assisted-GNSS,” *Insid. GNSS*, pp. 20–24, 2008.
- [35] “ANACONDA,” *Anaconda, Inc.*, 2019. [Online]. Available: <https://www.anaconda.com>.

## Dodatek A      Obsah přiloženého disku

- `analyze_cits_logs.py`                    -      python skript ke spuštění
- `[logs]`                                        -      adresář se všemi testy
  - `[brno_jan_2019]`                            -      adresář se všemi logy jednoho testu
    - `[OBU_Herman]`                            -      OBU logy
    - `[RSU_201_8]`                                -      RSU 201.8km logy
    - `[RSU_207_7]`                                -      RSU 207.7km logy