



## Zadání diplomové práce

<b>Název:</b>	Bezdrátová komunikace vozidel a infrastruktury
<b>Student:</b>	Bc. Karel Hevessy
<b>Vedoucí:</b>	Ing. Miroslav Macháček
<b>Studijní program:</b>	Informatika
<b>Obor / specializace:</b>	Návrh a programování vestavných systémů
<b>Katedra:</b>	Katedra číslicového návrhu
<b>Platnost zadání:</b>	do konce letního semestru 2022/2023

### Pokyny pro vypracování

- Nastudujte problematiku bezdrátových technologií V2X pro komunikaci vozidlo-vozdlo (V2V) a vozidlo-infrastruktura (V2I)
- Porovnejte jednotlivé technologie a vyberte jednu nebo více vhodných
- Implementujte komunikační vrstvy dle vybraných specifikací a standardů
- Realizujte komunikaci mezi bezdrátovými moduly a řešení zdokumentujte
- Zhodnoťte výsledky práce a diskutujte její případné pokračování nebo rozšíření





**FAKULTA  
INFORMAČNÍCH  
TECHNOLGIÍ  
ČVUT V PRAZE**

Diplomová práce

## **Bezdrátová komunikace vozidel a infrastruktury**

*Bc. Karel Hevessy*

Katedra číslicového návrhu

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Macháček

1. ledna 2023



---

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Miroslavu Macháčkovi za ochotu a rady při vypracování této práce. Dále chci poděkovat doc. Ing. Zdeňkovi Lokajovi, Ph.D, LL.M. z Fakulty dopravní ČVUT za cenné připomínky.



---

# Prohlášení

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.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. Dále prohlašuji, že jsem s Českým vysokým učením technickým v Praze uzavřel dohodu, na jejímž základě se ČVUT vzdalo práva na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona. Tato skutečnost nemá vliv na ustanovení § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách, ve znění pozdějších předpisů.

V Praze dne 1. ledna 2023

.....

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta informačních technologií

© 2023 Karel Hevessy. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.*

### **Odkaz na tuto práci**

Hevessy, Karel. *Bezdrátová komunikace vozidel a infrastruktury*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2023.



---

# Abstrakt

Tato práce se zabývá zmapováním standardizace mezivozidlové V2X komunikace a její praktickou implementací. V teoretické části popisuje její standardizaci, použité technologie a existující pilotní projekty. Dále vybírá vhodnou hardwarovou platformu a vhodný softwarový stack pro její implementaci. V praktické části jsou do stacku přidány nové typy zpráv a je provedena integrace knihovny s API výrobce čipsetu zařízení. V2X komunikace je implementovaná na poskytnuté komunikační desce, jsou vytvořeny ukázkové služby pro generování a přijímání základních typů zpráv, které jsou otestované.

**Klíčová slova** V2X, ITS-G5, C-V2X, inteligentní dopravní systémy

---

# Abstract

This thesis deals with standardization of inter-vehicle V2X communication and its practical implementation. In theoretical part, standardization, used technologies and existing pilot projects are described. Next, hardware platform and software stack for its implementation is chosen. In practical part, new messages and integration with chipset supplier's API is added to the chosen stack. Communication is implemented on a provided board, example

services for generation and reception of basic message types are implemented and tested.

**Keywords** V2X, ITS-G5, C-V2X, intelligent transport systems

---

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Cíl práce</b>	<b>3</b>
<b>2 Analýza a návrh</b>	<b>5</b>
2.1 V2X komunikace	5
2.2 Evropský C-ITS projekt C-Roads	6
2.3 Přehled standardizace	9
2.3.1 Fyzická a spojová vrstva a alokace pásem v Evropě	10
2.3.2 Zabránění interference s TTT	13
2.3.3 Popis IEEE 802.11p	13
2.3.4 Popis C-V2X	13
2.4 Standardizace na vyšších vrstvách	14
2.4.1 GeoNetworking	14
2.4.1.1 Struktura GeoNetworking headeru	16
2.4.2 Kontrola zahlcení (DCC)	18
2.4.3 Basic Transport Protocol	18
2.4.3.1 BTP frame	19
2.4.4 Zprávy na Facilities vrstvě	19
2.4.4.1 CAM zprávy	20
2.4.4.2 DENM zprávy	21
2.4.4.3 CPM zprávy	22
2.4.5 Základní služby na Facilities vrstvě	22
2.4.5.1 CA služba	22
2.4.5.2 DEN služba	22
2.4.5.3 TLM služba	23
2.4.5.4 RLT služba	23
2.4.5.5 IVI služba	23
2.4.5.6 TLC služba	23

2.4.6	Aplikace na aplikační vrstvě . . . . .	24
2.4.7	Bezpečnostní architektura . . . . .	24
2.4.8	V2X Use-Cases . . . . .	26
2.4.8.1	Day 1 služby C-ITS . . . . .	26
2.4.8.2	Day 2 služby C-ITS . . . . .	28
2.4.8.3	Day 3+ služby C-ITS . . . . .	29
2.4.9	ASN.1 formát . . . . .	30
2.5	Srovnání s ostatními částmi světa . . . . .	31
2.5.1	Standardizace v Americe . . . . .	31
2.5.2	Standardizace v Asii . . . . .	32
2.6	Hardwarové platformy . . . . .	33
2.6.1	Integrované obvody . . . . .	33
2.6.2	Moduly . . . . .	35
2.6.3	Hotová řešení . . . . .	35
2.7	Softwarové implementace . . . . .	36
2.7.1	GeoNet Stack . . . . .	36
2.7.2	OpenC2X . . . . .	36
2.7.3	Vanetza . . . . .	37
2.7.4	Cohda V2X Stack . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Realizace</b>	<b>39</b>
3.1	Hardwarové desky . . . . .	39
3.1.1	V2X vývojová komunikační deska MACH-V2X-IF . . . . .	41
3.1.2	Parametry čipsetu . . . . .	41
3.1.3	Bootování . . . . .	42
3.2	Softwarová implementace . . . . .	43
3.2.1	Přidání dalších typů zpráv do Vanetzy . . . . .	44
3.2.2	Sestavení knihovny Vanetza . . . . .	45
3.2.3	Propojení s API výrobce čipsetu . . . . .	46
3.2.4	Implementované služby a vzorové vyplňování základních typů zpráv . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Testování</b>	<b>49</b>
4.1	Základní komunikace s generováním zpráv . . . . .	51
4.2	Zabezpečená komunikace . . . . .	51
4.3	Test v reálném provozu . . . . .	52
4.4	Zhodnocení testování . . . . .	52
	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>Kompilace knihovny Vanetza pro běh na zařízení Autotalks</b>	<b>65</b>
A.1	Kompilace pro Craton 2 . . . . .	65

A.2	Kompilace pro Secton . . . . .	66
<b>B</b>	<b>Použití ukázkové aplikace</b>	<b>67</b>
<b>C</b>	<b>Ukázka programu STA-FlashLoader</b>	<b>69</b>
<b>D</b>	<b>Obrázky z testování</b>	<b>71</b>
<b>E</b>	<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>77</b>
<b>F</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>79</b>



---

## Seznam obrázků

2.1	Mapa nasazení C-ITS v České republice v rámci projektu C-Roads	8
2.2	Přehled asijských (ARIB), evropských (ETSI) a amerických (IEEE) standardů pro C-ITS a jejich mapování na síťový ISO/OSI model	10
2.3	Alokace ITS-G5 pásem v Evropě	11
2.4	Přehled evropských standardů pro C-ITS	14
2.5	Point-to-point V2V komunikace	15
2.6	Point-to-multipoint V2V komunikace	15
2.7	GeoAnycast V2V komunikace	16
2.8	GeoBroadcast V2V komunikace	16
2.9	Struktura GeoNetworking paketu	16
2.10	Struktura GeoNetworking hlavičky v nezabezpečeném paketu	16
2.11	Struktura zabezpečeného GeoNetworking paketu	17
2.12	BTP paket zapouzdřený ve framu nižší vrstvy	19
2.13	Základní struktura CAM zprávy	20
2.14	Základní struktura DENM zprávy	21
2.15	Schematické znázornění PKI	25
2.16	Začátek specifikace CAM zprávy	31
2.17	Přehled WAVE	31
2.18	Schéma knihovny OpenC2X	37
3.1	Schéma a fotografie modulu Murata pro Autotalks Craton 2	39
3.2	Příklad NMEA řetězců	40
3.3	Schéma zařízení MACH-V2X-IF	41
3.4	Fotografie zařízení MACH-V2X-IF	42
3.5	Vrstvy implementace	43
3.6	Třídní diagram základních implementovaných tříd	47
4.1	Ukázka běhu – schéma komunikace a fotografie desek	50
4.2	Ukázka běhu – schéma komunikace a fotografie desek	50

C.1	Hlavní obrazovka multiplatformního programu STA-FlashLoaderu určeného pro nahrávání software do SoC Autotalks Craton 2 . . . .	69
D.1	Vývojová deska Murata pro modul s Autotalks Sectar . . . . .	71
D.2	Vývojová deska Murata pro modul s Autotalks Craton 2 . . . . .	72
D.3	Příjem CAM zprávy vývojovém kitu pro Autotalks Sectar . . . . .	73
D.4	Příjem CAM zprávy na desce MACH-V2X-IF s čipsetem Autotalks Craton 2 . . . . .	74
D.5	Příjem a dekodování implementovaných typů zpráv na MACH-V2X-IF . . . . .	75
D.6	Umístění zařízení MACH-V2X-IF při testování v provozu . . . . .	75
D.7	Příklad dat linkové vrstvy CAM zprávy zachycené v provozu . . . .	76
D.8	Příklad CAM zprávy dekodované offline v programu Wireshark . . .	76



---

## Seznam tabulek

2.1	Alokace ITS-G5 pásem v EU . . . . .	12
2.2	Porovnání IEEE 802.11p a LTE V2X . . . . .	12
2.3	Přidělení ITS služeb BTP portům . . . . .	20



---

# Úvod

*Inteligentní dopravní systémy (ITS, Intelligent Transport System) jsou takové systémy, které mají za cíl poskytovat inovativní služby týkající se různých druhů dopravy a řízení provozu a umožňují různým uživatelům lepší informovanost a poskytují bezpečnější, koordinovanější a „inteligentnější“ používání dopravních sítí. ... ITS spojují telekomunikační, elektronické a informační technologie s dopravním inženýrstvím s cílem naplánovat, navrhnout, provozovat, udržovat a řídit dopravní systémy. [1]*

Tato směrnice Evropského parlamentu a Rady mimo jiné dále uvádí, že ITS systémy výrazně přispívají ke snížení vlivu silniční dopravy na životní prostředí, zlepšení její bezpečnosti a efektivity. Z toho vidíme, že je jejich použití velmi výhodné. Kooperativní dopravní systémy (C-ITS) pak navíc díky spolupráci mezi dvěma nebo více ITS subsystémy umožňují ITS službu o lepší kvalitě, než by poskytly tyto subsystémy samostatně [2]. V podstatě to znamená, že v C-ITS je vozidlům umožněna standardizovaná komunikace navzájem mezi sebou, s infrastrukturou (např. světelnými signalizačními zařízeními) nebo s jinými účastníky provozu (např. chodci). Tyto systémy jsou také známy jako komunikace vozidel a infrastruktury (V2I) a vozidel navzájem (V2V). Souhrnně se všechny typy těchto komunikací označují jako V2X. Vozidla pak mezi sebou tvoří síť, v rámci které je možné předávání informací. Pro konkrétní příklady použití viz další kapitola 2.1. Pro tyto komunikace je výhodné použití tzv. VANET (vehicular ad-hoc network, vozidlová ad-hoc síť). Je to kvůli dynamické topologii sítě, protože se vozidla pohybují.

Tato práce se nejdříve věnuje standardizaci V2X komunikace na všech vrstvách síťového ISO/OSI modelu, od fyzické vrstvy až po popis různých definovaných use-case, tím se zabývá celá kapitola 2 až po sekci 2.4 včetně. V podkapitole 2.5 je dále stručně srovnána evropská standardizace s dalšími oblastmi světa. Poté jsou v 2.6 popsány softwarové stacky vhodné pro implementaci a v 2.7 hardwarové čipsety od různých výrobců a v další kapitole je proveden výběr. Software je nejprve portován na vývojové kity pro moduly

## Úvod

---

Murata s čipsetem Autotalks, později na komunikační desku MACH-V2X-IF. Dále jsou do stacku přidány nové zprávy; poté je napsaná aplikace pro ukázkovou komunikaci. O tomto pojednává kapitola 3. Výsledná softwarová implementace je na zařízení otestovaná v kapitole 4.

---

## Cíl práce

Prvním cílem je prozkoumání problematiky bezdrátových V2X komunikací. Mají se porovnat jednotlivé technologie a má se vybrat jedna nebo více vhodných. Hlavním cílem je implementace komunikační vrstvy dle daných specifikací a standardů, ať už vytvořením vlastního řešení nebo přizpůsobením existujícího stacku. Dále se má realizovat bezdrátová komunikace mezi poskytnutými deskami a zdokumentovat vytvořené řešení. Závěrečným cílem je zhodnocení výsledků a diskuze jejich případného rozšíření.



---

## Analýza a návrh

V této kapitole je popsána V2X komunikace, dále je popsán evropský projekt C-Roads. Posléze je popsána standardizace v Evropě od nejnižších vrstev síťového ISO/OSI modelu k vyšším. Evropská standardizace je porovnaná s ostatními částmi světa. Na závěr jsou zmíněny hardwarové a softwarové implementace V2X komunikace.

### 2.1 V2X komunikace

Jak již bylo zmíněno v úvodu, pro C-ITS se používá komunikace vozidel mezi sebou nebo s jinou infrastrukturou. Souhrnně se tyto typy komunikace nazývají zkratkou V2X, tedy vehicle-to-everything. To v sobě skrývá všechny druhy bezdrátové komunikace v dopravě, rozlišují se různé typy podle toho, kdo s kým komunikuje:

- V2V – Vehicle-to-Vehicle, komunikace mezi vozidly navzájem. Tato část je nejvýznamněji použitelná pro kooperativní dopravu, například platooning<sup>1</sup> nebo adaptivní tempomat. Do budoucna ji budou s výhodou implementovat samořiditelná vozidla tak, aby spolu navzájem mohla spolupracovat. Příkladem současného use-case je HLN-SV, tedy varování před stojícím vozidlem.
- V2I – Vehicle-to-Infrastructure, komunikace vozidla a infrastruktury. Obrácený směr (od infrastruktury k vozidlu) se označuje I2V. Většina zatím navržených use cases směřuje do této oblasti. Jedním ze současných použití je SI-TLP, prioritizace vozidla na SSZ.
- V2P – Vehicle-to-Pedestrian, komunikace mezi vozidlem a chodcem. Tímto způsobem by se např. dalo zabráňovat kolizím mezi automobily

---

<sup>1</sup>Metoda pro zvýšení kapacity dálnic, kdy vozidla společně jedou v malých vzdálenostech od sebe, jakoby v konvoji

a lidmi. Ze zatím implementovaných use-cases žádný tuto komunikaci nepoužívá.

- V2N – Vehicle-to-Network, komunikace vozidel se sítí (internetem). Toto je v současné době použito v drtivé většině nově vyrobených aut, kdy například posílají do sítě telematická data.

Pro jednotku, umístěnou přímo ve vozidle, se používá označení OBU (On-Board Unit). Ta pak komunikuje s jednotkami umístěnými v infrastruktuře, které se nazývají RSU (Road Side Unit).

Dále existují různé typy zpráv, zde jsou uvedeny pro ilustraci, jak se používají. Podrobně jsou popsány dále, v sekci 2.4.4, případně 2.4.5. Pro popis jednotlivých use-case viz 2.4.8.

- CAM zprávy (viz 2.4.4.1). Použití je například pro preferenci vybraných vozidel na SSZ (v tomto případě MHD).
- DENM zprávy (viz 2.4.4.2). Tyto zprávy jsou použité například v use-case varování před pomalu jedoucím vozidlem.
- SPATEM zprávy (viz 2.4.5.3). Tyto zprávy využívá use-case varování před jízdou na červenou.
- MAPEM zprávy (viz 2.4.5.4). Jsou použité pro informování o stavu SZZ.
- IVI zprávy (viz 2.4.5.5). Jsou použité pro přenos dopravních symbolů a textových zpráv.
- SREM zprávy (viz 2.4.5.6). Jsou používány pro preferenci vybraných vozidel na SZZ (v tomto případě se jedná o vozidla IZS).
- SSEM zprávy (viz 2.4.5.6). Společně se SREM zprávami je lze využít pro preferenci vybraných vozidel na SZZ.

Pro bezdrátový přenos mohou být využité různé technologie. V Evropě se jedná o ITS-G5 na základě DSRC 5,9 GHz a LTE-V (C-V2X) v možné kombinaci s LTE nebo 5G.

## 2.2 Evropský C-ITS projekt C-Roads

V různých evropských státech existují projekty, které nasazují nebo nasazovaly C-ITS služby, viz např. Car 2 Car Consortium [2]. Kromě jiných se jednalo například o DRIVE C2X (8 evropských států, 2011 – 2014), SCOOP@F (Francie, 2013 – 2018), nebo simTD (Německo, 2009 – 2013). Zaměřím se na projekt C-Roads, jednak protože se velkou měrou podílí na současném vývoji a jednak proto, že se ho účastní i Česká republika.



C-Roads [3] [4] je platforma pro testování a implementaci C-ITS služeb. Také se stará o interoperabilitu a harmonizaci. S konsorciem Car 2 Car [2] spolupracuje na tvorbě základního systémového profilu pro V2X komunikace a na standardizaci dostupných služeb pro realizaci jednotlivých use-cases a pak také definici některých use-cases (některé budou popsány v podkapitole 2.4.8). Co se týče skupin služeb, pak se jedná o následující (názvy dle [5]):

- Varování před nebezpečnou lokalitou (také HLN – Hazardous Location Notification).
- Varování před železničním přejezdem (toto je jedna služba se zkratkou HLN-RLX).
- Varování před pracemi na silnici (také RWW – Road Works Warning).
- Bezpečnostní služby MHD (tyto spadají do kategorie HLN).
- Služby spojené s IZS (tyto spadají do kategorie HLN).
- Varování před prudkým brzděním (také EEBL – Emergency Vehicle Brake Light).
- Služby spojené se signalizovanými křižovatkami (také SI – Signalized Intersection).
- Přenos dopravních symbolů a textových zpráv (původně IVI, nově IVS – In-Vehicle Information, In-Vehicle Signage).
- Sběr dopravních dat (také PVD – Probe Vehicle Data).

V některých členských státech probíhá reálné nasazení těchto technologií a my nejsme výjimkou. Česká republika byla jedním ze zakládajících členů. Projekt zde měl probíhat v letech 2016 – 2020, kvůli epidemii Covidu-19 byl jeho konec posunut až na prosinec 2021 [4] [6]. Projekt byl koordinován Ministerstvem dopravy ČR. Dále se jej účastnily zejména tyto organizace, pro ITS G5: ŘSD ČR, Správa železnic, AŽD Praha, Brněnské komunikace; Plzeňské městské dopravní podniky a Dopravní podnik Ostrava umožnili testování ve svých vozech. Pro spojení ITS G5 a LTE: O2 CZ, INTENS, T-Mobile CZ. Pro LTE-V2X: T-Mobile CZ [4]. Vyhodnocení a posouzení provedla FD ČVUT [7].

C-ITS systémy byly nasazeny na sedmi místech označených zkratkou DT (Deployment & Test Areas) [8] [3], viz obr. 2.1. Všude je nasazena komunikace ITS-G5 spolupracující s existující LTE technologií (tzv. hybridní ITS G5 / LTE systém). Kromě lokality DT0 byly všechny implementované v rámci projektu C-Roads:

- DT0: koridor Mirošovice – Rudná. V oblasti pražského okruhu D0 a částech dálnic D0 a D5 bylo ŘSD od roku 2018 provozováno C-ITS [3]. Tato oblast přímo nespadá do projektu C-Roads, pouze byla v rámci něj rozšířena.

## 2. ANALÝZA A NÁVRH

---



Obrázek 2.1: Mapa nasazení C-ITS v České republice v rámci projektu C-Roads [3]

- DT1: brněnská aglomerace. Zde se C-ITS systémy týkají úseků dálnic D1 a D2 jižně od Brna. Řidiči jsou varováni například před pracemi na silnici.
- DT2: město Brno. C-ITS je implementované na silnicích mezi Velkým městským okruhem a dálnicí D1 a také na komunikaci Vídeňská. V rámci tohoto nasazení jsou řidiči například varováni před blížícím se vozidlem IZS. Také byly implementované priority pro IZS na křižovatkách a poskytování informací o signálním plánu na křižovatkách.
- DT3: dálnice D1, D5, D11, D52 a silnice I52. V tomto případě se jedná o napojení na mezinárodní koridor spojující Rotterdam, Frankfurt nad Mohanem a Vídeň [3]. Řidiči jsou varováni například před stojící kolonou.
- DT4: MHD v Ostravě, Plzni a Brně. V těchto městech byly ve spolupráci s místními dopravními podniky testovány C-ITS systémy například pro preferenci městské hromadné dopravy na SSZ nebo pro varování řidičů před zvýšeným nebezpečím chodců ve vozovce.
- DT5: železniční přejezdy. Řidiči jsou varováni při příjezdu k přejezdu, případně dostanou varování před blížícím se vlakem.
- DT6: přeshraniční testování. Cílem je ověření interoperability s C-ITS systémy ostatních států.

Toto nasazení je v současné době dále používáno.

## 2.3 Přehled standardizace

Pro realizaci C-ITS existuje několik přístupů, které se liší v technické realizaci komunikace, ve fyzické a spojové vrstvě ISO/OSI modelu. Jedná se o DSRC, C-V2X (LTE-V), příp. LTE/5G. Zde popíšu první dvě zmíněné. Prvopočátky DSRC (Direct Short Range Communication) sahají až do roku 1999, kdy pro tento typ komunikace bylo alokováno 75 MHz v pásmu 5,9 GHz. Kolem roku 2003 se část tohoto pásma začíná používat pro výběr poplatků mýta. Přestože ve Spojených státech amerických bylo od této technologie víceméně upuštěno zejména kvůli jejímu velmi pomalému rozšiřování (větší část použitého pásma byla FCC přelokována pro C-V2X), v Evropě její vývoj a využití pokračuje nadále. Například Volkswagen Golf 8 má jen komunikaci DSRC.

Oproti tomu C-V2X (celulární V2X) využívá 4G LTE nebo nově 5G komunikaci. Reálné nasazení C-V2X začíná mnohem později než u DSRC, jedná se zhruba o rok 2013. Je postaveno na standardech konsorcia 3GPP. Také využívá pásmo 5,9 GHz. Tato technologie je v Evropě prosazována konsorciem 5GAA. Pro níže zmíněná C-ITS není v současné době regulováno, která přístupová technologie se v nich má používat.

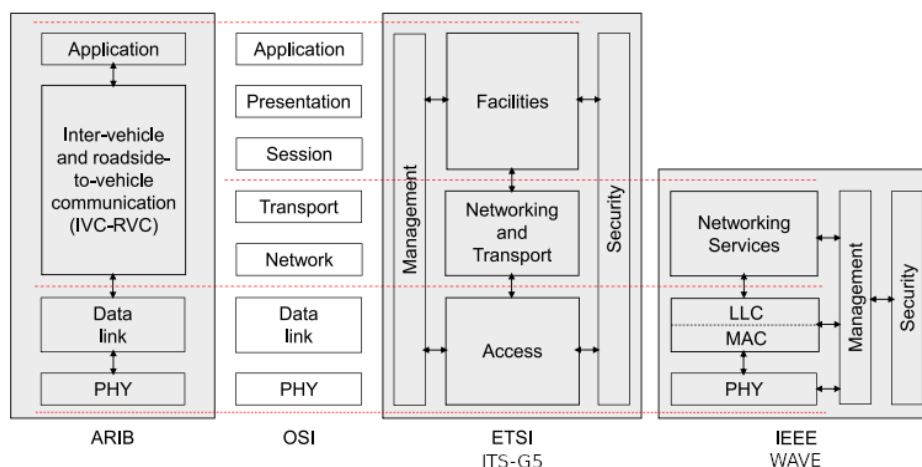
Proto v roce 2019 5GAA navrhla [9], aby byla část pásma, konkrétně od 5905 MHz výše, rezervovaná pro C-V2X. V roce 2020 v USA skutečně FCC přelokovala část ITS pásma (5850 – 5925 MHz) pro nelicencované Wi-Fi použití a zbytek (5895 – 5925 MHz) ponechala pro ITS a určila C-V2X jako použitou technologii. I přes protesty např. společnosti ITS America ale i jiných firem, bylo toto rozhodnutí ponecháno v platnosti [10]. Oproti tomu v Evropě byl nejprve schválen Delegated Act [11] schvalující DSRC jako podporovanou technologii, toto rozhodnutí bylo ale posléze zrušeno kvůli tomu, že ITS pásmo by mělo být technologicky nezávislé.

Která technologie je lepší? To záleží, v jakém prostředí je nasazena a pro jaké situace. Z hlediska zahlcení kanálu se zdá, že do hodnoty 150 uživatelů/km<sup>2</sup> vychází lépe C-V2X, nad tuto hodnotu je již lepší DSRC (simulováno zde [12]). Z reálně naměřených dat vyplývá, že C-V2X má větší dosah než DSRC, avšak o dost větší latenci. Obě technologie mají latenci nicméně menší než požadovanou hranici 100 ms [13]. Další zdroje uvádějí, že v městském prostředí je pouze DSRC schopno vyhovět požadavkům na latenci a na množství generovaných zpráv [14].

Na síťové a aplikační vrstvě a z hlediska použití a bezpečnosti se tyto technologie ale neliší. Tato situace, kdy existují dva soupeřící standardy, je však nevýhodná pro všechny, protože přispívá k drobení standardizačních snah a zároveň kvůli jejich principiální nekompatibilitě zpomaluje šíření podpory C-ITS.

Pokud se dohodneme na fyzické a spojové vrstvě, na vyšších vrstvách síťového modelu se standardizace liší podle toho, ve které oblasti světa se pohybujeme. Jiná je situace v Evropě, v Severní America a v Japonsku.

Pro DSRC existují dva základní standardy: ETSI ITS-G5 v Evropě a IEEE

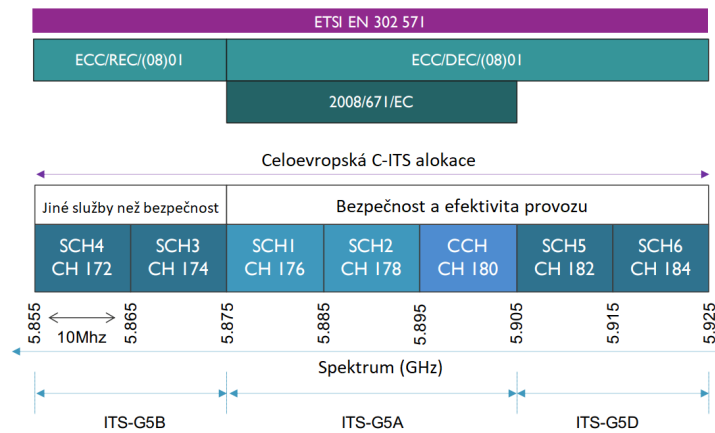


Obrázek 2.2: Přehled asijských (ARIB), evropských (ETSI) a amerických (IEEE) standardů pro C-ITS a jejich mapování na síťový ISO/OSI model z [15]

WAVE v Severní Americe. Pro mapování těchto a asijského ARIB standardu na síťový ISO/OSI model viz obrázek 2.2. Zde je trochu terminologický problém, protože WAVE i ITS-G5 původně počítaly s využitím komunikace DSRC a standardizovaly jen nejnižší dvě vrstvy ISO/OSI modelu, takže i v současnosti použití těchto názvů většinou vylučuje použití celulárního C-V2X. Nyní se označení ITS-G5, resp. WAVE někdy používá pro celý aplikační stack ETSI resp. IEEE, ve variantě s DSRC (přestože obě varianty již umožňují použití celulární komunikace na fyzické a spojové vrstvě). ETSI standardy používají pro celulární přístupovou vrstvu označení LTE-V2X.

### 2.3.1 Fyzická a spojová vrstva a alokace pásem v Evropě

Hlavními standardizačními organizacemi v Evropě jsou ETSI (Evropský ústav pro telekomunikační normy), Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO), která úzce spolupracuje s Evropským výborem pro normalizaci (CEN). ETSI sídlí ve Francii a vydává evropské normy (European Norms, EN) a technické specifikace (Technical Specifications, TS), které obsahují normativní požadavky k zaručení interoperability a k zamezení rušení. Dále také vydává nenormativní dokumenty, které obsahují další informace a rady k implementaci norem. Návrhy dokumentů zpracovávají Specialist Task Force (STF) – specialisté a pracovní skupiny 1 až 5 (WG1 až WG5). Všechny standardy jsou zdarma dohledatelné na internetu, což je velký rozdíl oproti například organizaci ISO. Standardem pro V2X komunikace od ETSI je ITS-G5. Pokrývá fyzickou a spojovou vrstvu, někdy se tímto pojmem označuje standardizace



Obrázek 2.3: Alokace ITS-G5 pásem v Evropě, ilustrace převzata z [13] a přeložena

všech vrstev. Základem standardizace je norma [16]. ITS-G5 počítá pouze s využitím IEEE 802.11p, ale standardy na vyšších vrstvách jsou již nyní technologicky nezávislé, takže je lze použít i s C-V2X.

Přehled dalších standardů je vidět na obrázku 2.2. Sahají přes všechny stupně ISO/OSI modelu. Oproti standardnímu modelu zavádí ETSI vrstvu zvanou facilities, která odpovídá prezentační/relační vrstvě. Jinak jde o, v terminologii ETSI: přístupové technologie (fyzická a linková vrstva), networking a transport (síťová a transportní vrstva) a aplikační vrstva.

V současné době jsou v Evropě pro silniční ITS rezervována tři frekvenční pásma od 5855 do 5925 MHz (viz tabulku 2.1 a obrázek 2.3). Jde o 3 různá pásma, která se dělí na 7 kanálů o šířce 10 MHz. Pásmo 5925–5935 MHz je vyhrazeno pro kolejové ITS, proto se mu nebudu dále věnovat. Pásmo ITS G5A je podle rozhodnutí Evropské komise 2008/671/ES určeno pro bezpečnost provozu. Obsahuje tři kanály:

- CCH (Control Channel, kontrolní kanál). Vyhrazen pro kooperativní bezpečnost na silnici (cooperative road safety). Je to výchozí kanál pro zprávy profilů DP1 a DP2 (viz dále). Zprávy profilů DP3 až DP8 mohou být posílány jen pokud je kanál ve stavu RELAXED. Jedná se o kanál 180 (5900 MHz).
- SCH1 (Service Channel 1, servisní kanál 1) je výchozí kanál pro nabízení ITS služeb silniční bezpečnosti a efektivity. Jedná se o kanál 176 (frekvence 5880 MHz).
- SCH2 (servisní kanál 2) je náhradní kanál pro silniční bezpečnostní služby. Protože je umístěn mezi CCH a SCH1, tak je jeho reálné použití

## 2. ANALÝZA A NÁVRH

Tabulka 2.1: Alokace ITS-G5 pásem v EU, viz [17]

Rozsah frekvencí	Popis	Regulace
5855 až 5875 MHz	ITS aplikace netýkající se bezpečnosti, též zvané ITS G5B	Doporučení ECC (08)01
5875 až 5905 MHz	ITS aplikace týkající se bezpečnosti, též zvané ITS G5A	Rozhodnutí EK 2008/671/EC, rozhodnutí ECC (08)01
5905 až 5925 MHz	Budoucí ITS aplikace, též zvané ITS G5D	Rozhodnutí ECC (08)01
5925 až 5935 MHz	Kolejové ITS (běžně se neuvádí)	Rozhodnutí ECC (08)01

kvůli interferenci problematické. Jedná se o kanál 178 (5890 MHz).

Pásmo ITS G5B je umístěno na frekvencích 5855 až 5875 MHz. Je to víceúčelové pásmo, které je určeno například pro efektivitu dopravy, servisní hlášení nebo multi-hopping (obsažen v protokolu GeoNetworking). Jeho použití je problematické, protože není po celé Evropě stejně alokované. Obsahuje dva kanály, SCH3 a SCH4 (číslo 174 resp. 172, na frekvenci 5870 resp. 5860 MHz).

Pásmo ITS G5D obsahuje dva kanály, SCH5 (číslo 182, 5910 MHz) a SCH6 (číslo 184, 5920 MHz).

Standardizace na vyšších vrstvách bude popsána v kapitole 2.4. Pro ostatní oblasti světa viz 2.5.

Tabulka 2.2: Porovnání IEEE 802.11p a LTE V2X [18]

Parametr	IEEE 802.11	LTE V2X
Možné frekvence	5,86 – 5,92 GHz	450 MHz – 4,99 GHz
Modulace	OFDM	SC-FDM
Přístup ke kanálu	CSMA/CA	SB-SPS
Synchronizace	Asynchronní	Synchronní
Přenosová rychlost	Až 27 Mb/s	Až 1 Gb/s
Podpora mobility	Až 250 km/h dle [19] (dle [18] rel. rychlost 60 km/h)	Až 350 km/h
Podpora QoS	EDCA	QCI
Podpora broadcastu/multicastu	Nativně	Pomocí eMBMS

### 2.3.2 Zabránění interference s TTT

TTT – Road Transport and Trafics Telematics je pásmo, které je umístěno hned vedle DSRC komunikace. Tento způsob komunikace je také nazýván CEN DSRC a používá se pro výběr mýta. Protože jsou pásma hned vedle sebe, je nutné ošetřit, aby spolu neinterferovala a aby DSRC komunikace nenarušovala CEN DSRC. Tento proces je zaveden v [20]. Jakmile ITS detekuje, že je v chráněné oblasti, přepne se do módu koexistence. Existují 4 různé módy označené A, B, C, D, které definují různou střídu posílání a/nebo maximální výkon a maximální rušení na CEN DSRC pásmu. Na zprávy DENM (viz sekci 2.4.4.2) s prioritou 0 nebo 1 se tyto limity nevztahují (viz [21], priorita je v rámci Traffic Class na úrovni GeoNetworkingu). V módu koexistence může být stanice pořád. Detekce může být buďto rádiová nebo přes seznam všech takových míst. Tento pochází buď z CAM zprávy (viz sekci 2.4.4.1) (poslané jinou jednotkou, která ví, že je v zóně), nebo v předdefinované databázi, kterou má jednotka uloženou v sobě. Po rádiové detekci musí být pozice posílána v 10 po sobě jdoucích CAM zprávách, aby okolní jednotky zónu také rozpoznaly.

### 2.3.3 Popis IEEE 802.11p

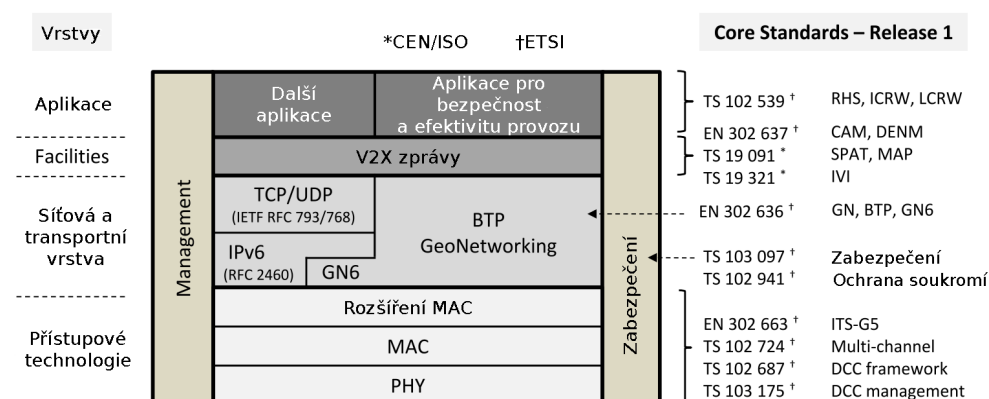
IEEE 802.11p je rozšíření standardu IEEE 802.11a. Hlavní změnou této novely je OCB mód (Outside the Context of a BSS) – možnost komunikace bez použití BSS, aby se nemuselo čekat na autentifikaci a nastavení parametrů komunikace. Pro přístup k rádiovému kanálu používá mechanismus CSMA/CA – uzel před použitím kanálu provede CCA (hodnocení vytížení kanálu) a pokud je kanál vytížen, přejde do klidového stavu a zkusí to znovu později. Používá multiplexování OFDM. Pásma jsou zúžena na 10 MHz namísto 20 MHz, takže rychlost přenosu je 3 až 27 Mbps. Nevýhodou je malá maximální relativní rychlost vozidel a to 250 km/h. Tyto nevýhody řeší budoucí standard IEEE 802.11bd. Ten je zpětně kompatibilní a podporuje opakované přenosy, relativní rychlosti až 500 km/h a fungování v 60 GHz pásmu [19].

### 2.3.4 Popis C-V2X

Druhou technologií je komunikace na základě celulárních standardů od konsorcia 3GPP nazvaná C-V2X. Dělí se na různá vydání (Releases), které jsou ne vždy zpětně kompatibilní. Prvním byl 3GPP Release 14, který používá LTE PC5 a nazývá se LTE V2X. Poté Release 15, který je pouhým vylepšením. Dále Release 16, který používá 5G NR a Release 17, který je opět vylepšením.

V tabulce 2.2 vidíme hlavní rozdíly mezi DSRC a LTE V2X. Výhodou LTE V2X je podpora vyšší relativní rychlosti vozidla (350 km/h), zatímco 802.11p podporuje jen 250 km/h. Výhodou je i podpora vyšší přenosové rychlosti, nevýhodou je nemožnost komunikace bez základnové stanice. LTE V2X kromě 5,9 GHz pásma může fungovat i v licenčních pásmech operátorů. Release 15

## 2. ANALÝZA A NÁVRH



Obrázek 2.4: Přehled evropských standardů pro C-ITS, ilustrace převzata z [22] a přeložena

přidává vylepšení pro LTE V2X, například komunikaci bez základnové stanice. Také přináší první fázi standardizace 5G.

Nástupcem LTE V2X je Release 16 neboli 5G NR V2X (New Radio) – druhá fáze standardizace 5G. Mění architekturu komunikace a je možné využívat komunikace na vysokých mmWave frekvencích (milimetrové vlny na frekvenci  $> 30$  GHz). Protože se jedná o 5G, podporuje již mnohem vyšší datové toky, což se hodí pro use-cases druhého dne a dále (viz sekci 2.4.8.2). Toto vydání ruší zpětnou kompatibilitu.

Zatím poslední iterací je NR V2X na bázi 3GPP Release 17. Přidává komunikaci typu unicast a groupcast, mění modulaci na OFDM atd.

## 2.4 Standardizace na vyšších vrstvách

V této kapitole jsou popsány evropské ITS-G5 technologie od síťové vrstvy výše, přehled jednotlivých standardů je vidět na obrázku 2.4. Pro popis pro ostatní oblasti světa viz 2.5.

### 2.4.1 GeoNetworking

GeoNetworking je protokol na síťové vrstvě, který poskytuje směrování paketů v ad-hoc sítích. Jak už jeho název napovídá, používá pro směrování a přepravu geografickou pozici. Umožňuje použití pro různé přístupové technologie, dá se použít jak pro DSRC, tak pro celulární V2X.

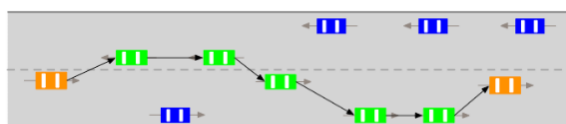
Počítá s nestabilní povahou ad-hoc sítí, což znamená, že počítá s nespojovanou (connectionless) komunikací a funguje plně distribuovaně. Podporuje různé ITS aplikace, například víceskokové směrování pro přeposílání nouzových informací.



Protože používá geografickou pozici, jak je zmíněno výše, je tedy možné adresovat paket jednomu nebo více uzlům na dané pozici nebo v dané geografické oblasti. Počítá se tedy s tím, že každý uzel má částečnou informaci o topologii dané sítě a podle ní udělá v okamžiku obdržení paketu rozhodnutí o jeho směrování.

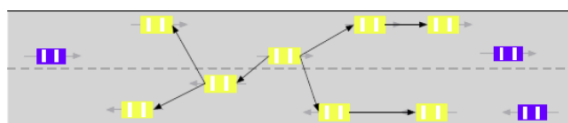
Podle potřebného typu směrování v dané situaci je definováno několik scénářů, které mohou být navzájem kombinovány. Jedná se o následující scénáře, definované v [23]:

- Point-to-Point 2.5: Komunikace probíhá mezi jednou stanicí, která vysílá, a druhou stanicí, která přijímá. Tento scénář používá GeoUnicast směrovací schéma. V tomto případě nejdřív vysílající uzel zjistí pozici uzlu, kterému je paket určen a pak jej pošle uzlu, který je ve směru komunikace. Jakmile další uzel tento paket přijme, dále ho opět přepošle směrem, kde se cílový uzel nachází.



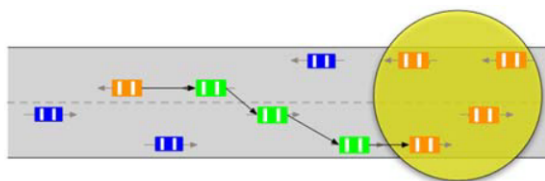
Obrázek 2.5: Point-to-point V2V komunikace (z [23])

- Point-to-Multipoint 2.6: Komunikace probíhá mezi jednou vysílající stanicí a více přijímacími. Využívá směrovací schéma „topologically-scoped broadcast“. V tomto případě vysílající uzel odešle paket všem sousedním uzlům v dosahu, ty udělají totéž atd. Toto je použito v Cooperative Awareness službách jako „single-hop“ broadcast, kde zprávy po přijetí nejsou dále směrovány.

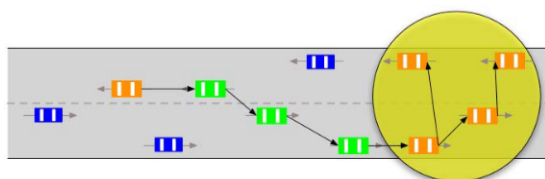


Obrázek 2.6: Point-to-multipoint V2V komunikace (z [23])

- GeoAnycast 2.7: Zpráva je odeslána jednou stanicí a je přijat kteroukoliv stanicí, která se nachází ve zvolené geografické oblasti. Pakety jsou přeposílány, dokud se nedostanou do cílové oblasti.
- GeoBroadcast 2.8: Zpráva je odeslána jedním uzlem a jakmile se dostane do dané geografické oblasti, přepošlou si ji mezi sebou všechny uzly, které se v ní nacházejí. Toto schéma je využito v DEN službě, viz dále.



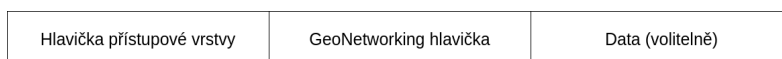
Obrázek 2.7: GeoAnycast V2V komunikace (z [23])



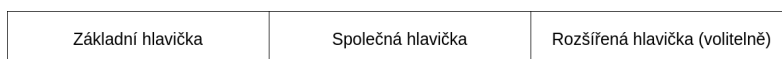
Obrázek 2.8: GeoBroadcast V2V komunikace (z [23])

#### 2.4.1.1 Struktura GeoNetworking headeru

GeoNetworking paket je součástí BTP framu (viz sekci 2.4.3) a vypadá dle obrázku 2.9, pokud je nezabezpečený a podle obrázku 2.11, pokud je zabezpečený. Hlavička, kterou přidává GeoNetworking, se skládá ze základní hlavičky, společné hlavičky a rozšířené hlavičky (viz obr. 2.10). Základní hlavička obsahuje verzi GeoNetworking protokolu, životnost paketu, zbývající hop limit a určuje typ další hlavičky (společná hlavička nebo zabezpečený GeoNetworking paket). Společná hlavička určuje typ hlavičky za GeoNetworking paketem (BTP-A / BTP-B / IPv6), typ paketu – tvar rozšířené hlavičky, zda je stanice mobilní nebo stacionární, délku dat v oktetech (vše, co následuje za hlavičkou), maximální hop limit. Také obsahuje tzv. „Traffic Class“, která je ovlivněná požadavky na Facilities vrstvě a také použitým médiem (ITS-G5 / C-V2X). Rozšířená hlavička se pak liší podle typu paketu, který může být jedním z následujících:



Obrázek 2.9: Struktura GeoNetworking paketu dle [24]



Obrázek 2.10: Struktura GeoNetworking hlavičky v nezabezpečeném paketu dle [24]

Hlavička přístupové vrstvy	GeoNetworking základní hlavička	Zabezpečený GeoNetworking paket se společnou hlavičkou, volitelnou rozšířenou hlavičkou a volitelnými daty
----------------------------	---------------------------------	--

Obrázek 2.11: Struktura zabezpečeného GeoNetworking paketu dle [24]

- GUC (GeoUnicast) – obsahuje číslo sekvence pro detekci duplicitních paketů, dlouhý poziční vektor, který určuje referenční pozici zdroje a krátký poziční vektor, který určuje destinaci;
- TSB (Topologically-Scoped broadcast / broadcast s topologicky daným rozsahem) – obsahuje číslo sekvence pro detekci duplicitních paketů a dlouhý poziční vektor, který určuje referenční pozici zdroje;
- SHB (Single-Hop broadcast) – obsahuje dlouhý poziční vektor, který určuje referenční pozici zdroje, a dále data závislá na médiu (pro ITS-G5 data pro DCC – viz dále);
- GBC / GAC (Geographically-Scoped broadcast / Anycast – broadcast / Anycast s geograficky daným rozsahem) – obsahuje opět dlouhý poziční vektor pro pozici zdroje a číslo sekvence pro detekci duplicit; dále zeměpisnou šířku a délku a parametry  $a$ ,  $b$  a úhel cílového tvaru (pro kruh poloměr a úhel natočení od severu, pro obdélník strany  $a$ ,  $b$  a úhel natočení od severu, pro elipsu hlavní a vedlejší poloosu a úhel od severu dle ETSI EN 302 931);
- Beacon, jenž obsahuje dlouhý poziční vektor zdroje;
- LS žádost a LS odpověď (Location Service) – LS žádost obsahuje číslo sekvence pro detekci duplicit, dlouhý poziční vektor pozice zdroje a adresu GeoNetworking routeru, jehož adresu požadujeme; LS odpověď pak opět číslo sekvence a dlouhý poziční vektor, dále krátký poziční vektor obsahující pozici destinace.

Dlouhý poziční vektor vystihuje pozici, obsahuje adresu routeru, čas v milisekundách, kdy byla pozice získaná, zeměpisnou šířku a délku, indikátor přesnosti pozice, rychlost a směřování. Krátký poziční vektor pak pouze adresu, čas v milisekundách a zeměpisnou šířku a délku.

V případě zabezpečeného GeoNetworking paketu je do něj přidán digitální certifikát a data jsou zašifrována. Kromě jiného také obsahuje ITS-AID a SSP, které v kombinaci s certifikátem v důsledku určují, zda bude paket přijat jako platný či nikoliv, viz podkapitolu 2.4.7. Funkcionalita a fungování bezpečnostní entity je určeno v technické specifikaci ETSI TS 102 723-8.

### 2.4.2 Kontrola zahlčení (DCC)

Dle specifikace [25] musí každá ITS stanice obsahovat DCC (Decentralized Congestion Control), tedy kontrolu zahlčení. Vzhledem k tomu, že V2X komunikace mají probíhat i v hustém provozu a za předpokladu, že každé vozidlo posílá nějaké periodické zprávy (například CAM, viz dále), dává tento požadavek smysl.

Existují 3 základní varianty DCC, a to:

- Ovládání síly přenosu (transmit power control, TPC),
- ovládání četnosti přenosů (transmit rate control, TRC),
- ovládání rychlosti přenosu (transmit datarate control, TDC).

TPC spočívá v tom, že stanice mění sílu vysílaného signálu podle toho, jak moc je kanál používán. Během velkého vytížení ji může zmenšit a tím zmenšit dosah své interference. TRC mění čas mezi dvěma následujícími pakety, ten se během velkého vytížení může zvýšit. TDC je mechanismus, kdy stanice nabízejí víc možných rychlostí přenosu. Při velkém vytížení se může rychlost zvýšit tak, aby stanice kanál zabírala co nejméně.

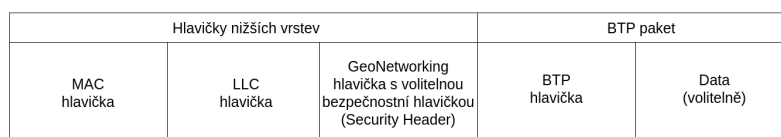
Podle [26] se každých 100 ms musí přepočítávat hodnota CBR (Channel Busy Ratio – číslo mezi 0 a 1, které reprezentuje poměr času, po který je kanál využit pro přenos). CBR se počítá tak, že jednotka 100 ms poslouchá na daném kanále a zaznamenává, kolik času z toho probíhala komunikace o síle signálu větší než -85 dBm [27]. Pak se spočítá poměr těchto dvou čísel.

V ITS-G5 jsou podle [25] dále uvedeny dva základní přístupy k DCC, a to reaktivní a adaptivní. Reaktivní je implementován konečným automatem. Princip spočívá v tom, že pro každé měření CBR se stanice posouvá do stavu, který odpovídá změřené hodnotě. Pro každý stav pak používá kombinaci výše zmíněných variant změny parametrů (TPC, TRC, TDC). Adaptivní přístup aplikuje TRC podle měřené hodnoty CBR. Pokud se CBR zvyšuje, čas  $T_{off}$  mezi dvěma po sobě odeslanými pakety se zvyšuje tak, aby se zatížení kanálu snížilo. Pakety pak čekají v posílacích frontách déle.

### 2.4.3 Basic Transport Protocol

Basic Transport Protocol (BTP) je protokol transportní vrstvy použitý v ITS-G5. Obdobně jako UDP poskytuje přenos bez záruky doručení pro ITS ad-hoc sítě. Jeho hlavním úkolem je umožnit službám běžícím na facilities vrstvě přístup k GeoNetworking protokolu a naopak demultiplexovat přijaté zprávy jednotlivým službám (např. CAM zprávy pro CA základní službu). Pro demultiplexování/multiplexování jsou použity porty, obdobně jako u UDP. Každý port identifikuje ITS službu ve zdroji nebo v cíli.

BTP je výpočetně nenáročný protokol, měl by umožňovat plynulou komunikaci mezi facilities layer a GeoNetworkingem – měl by tvořit bridge mezi



Obrázek 2.12: BTP paket zapouzdřený ve framu nižší vrstvy dle [28]

těmito dvěma vrstvami, který má co nejmenší overhead v podobě přidání jen malé hlavičky. Dále je popsána struktura BTP paketu.

#### 2.4.3.1 BTP frame

Struktura paketu je popsána v [28] a je vidět na obrázku 2.12. Paket obsahuje:

- MAC hlavičku – dle konkrétní přístupové technologie,
- LLC hlavičku – hlavičku SNAP rozšíření 802.2 LLC,
- GeoNetworking hlavičku,
- BTP hlavičku,
- samotná data vytvořená vyššími vrstvami.

Hlavička BTP je 4B struktura o dvou 16bitových hodnotách. Rozlišují se dva druhy podle druhu paketu – BTP-A pro interaktivní komunikaci a BTP-B pro neinteraktivní komunikaci.

BTP-A hlavička je pro interaktivní komunikaci, takže předpokládá možnost odpovědi. Obsahuje tedy zdrojový a cílový port. Zdrojový port identifikuje entitu na facilities vrstvě, která zprávu vygenerovala a která případně obdrží odpověď, cílový port identifikuje entitu na facilities vrstvě, pro kterou je zpráva určena.

BTP-B hlavička neobsahuje zdrojový port, jen cílový port a informace o něm. Defaultní hodnota tohoto druhého pole je nula, jinak obsahuje ITS AID dle [29] nebo [30] podle identifikované služby, pokud taková identifikace existuje.

Podobně jako u IP protokolů zde existuje koncept „well-known“ portů, jsou to předdefinované porty, které odpovídají některým službám na facilities vrstvě – viz tabulku 2.3.

#### 2.4.4 Zprávy na Facilities vrstvě

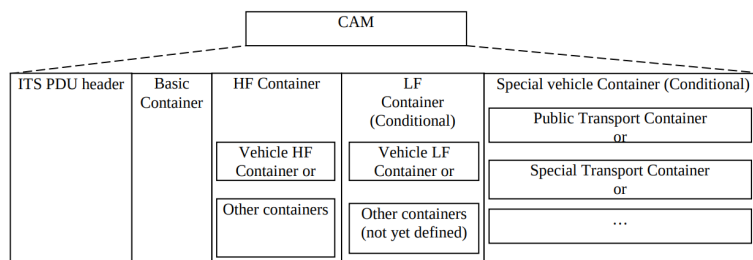
ETSI společně s ISO definuje určité typy zpráv, které se mají používat. Dále jsou určeny různé služby, které využívají jednotlivé typy zpráv. V této sekci jsou popsány jen některé typy zpráv, další jsou zmíněny v následující sekci u popisu služeb.

## 2. ANALÝZA A NÁVRH

Tabulka 2.3: Přidělení ITS služeb BTP portům dle [31]

Číslo BTP portu	Facilities služba nebo Aplikace	Relevantní standard
2001	CA (CAM)	ETSI EN 302 637-2
2002	DEN (DENM)	ETSI EN 302 637-3
2003	RLT (MAPEM)	ETSI EN 103 301
2004	TLM (SPATEM)	
2005	SA (SAEM)	ETSI EN 102 890-1
2006	IVI (IVIM)	ETSI EN 302 637-2
2007	TLC (SREM)	
2008	TLC (SSEM)	
2009	CP (CPM)	Budoucí standard dle ETSI TR 103 562
2010	EVCSN POI (EVCSN POI zpráva)	ETSI TS 101 556-1
2011	TPG (TRM, TCM, VDRM, VDPM, EOFM)	ETSI TS 101 556-2
2012	Nabíjení (EV-RSR)	ETSI TS 101 556-3
2013	GPC (RTCMEM)	ETSI TS 103 301
2014	CTL (CTLM)	ETSI TS 102 941
2015	CRL (CRLM)	
2016	Služba žádosti o certifikát (EC / Žádost ET)	
2017	MCD (MCDM)	ETSI TS 103 152
2018	VA (VAM)	ETSI TS 103 300-3
2019	IMZ (IMZM)	ETSI TS 103 724

### 2.4.4.1 CAM zprávy



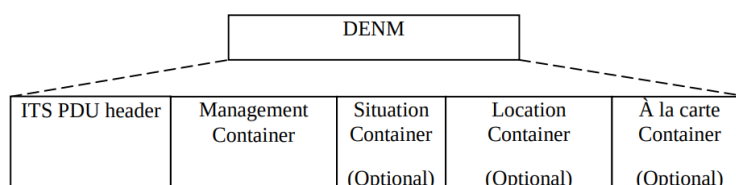
Obrázek 2.13: Základní struktura CAM zprávy z [32]

CAM zprávy (Cooperative Awareness Messages – zprávy o vzájemném povědomí) jsou zprávy, jimiž se vozidla mezi sebou informují o svém stavu. Vychází ze standardu [32] a používá datové prvky z [33]. Struktura CAM zprávy je na

obrázku 2.13. Skládá se z ITS PDU hlavičky, která obsahuje informace o verzi protokolu, typ zprávy a ITS-S ID vysílající stanice. Dále tyto kontejnery:

- Basic container (základní kontejner). Obsahuje základní informace o zdrojové ITS stanici a je přítomen vždy.
- High frequency container (kontejner vysoké frekvence). Obsahuje informace o zdrojové stanici, které se rychle se mění (například aktuální pozice) a je přítomen vždy.
- Low frequency container (kontejner nízké frekvence). Obsahuje informace o zdrojové stanici, které jsou statické nebo se mění pomalu (například stav světel).
- Special vehicle container (kontejner speciálního vozidla). Obsahuje informace specifické pro roli vozidla.

#### 2.4.4.2 DENM zprávy



Obrázek 2.14: Základní struktura DENM zprávy z [21]

DENM zprávy (Decentralized Environment Notification Messages – zprávy decentralizovaného oznámení o prostředí) jsou zprávy, kterými se jednotky informují o nějaké detekované události. Vychází ze standardu [21] a používá datové prvky [33]. Základní strukturu zprávy vidíme na obrázku 2.14. Stejně jako CAM zpráva obsahuje ITS PDU hlavičku se stejnými informacemi. Dále obsahuje:

- Management container (kontejner správy). Obsahuje základní informace o vysílající stanici a o události (např. čas vzniku).
- Situation container (situační kontejner) popisující přesný typ události a kvalitu informace o ní.
- Location container (kontejner lokace), který obsahuje další informace o pozici vzniku události, např. rychlost, směr nebo typ silnice.
- À la carte container (kontejner à la carte), který volitelně obsahuje další parametry, například teplotu.

### 2.4.4.3 CPM zprávy

Standard ETSI TS 103 324 pro CP službu, která generuje CPM zprávy je v prosinci 2022 ve fázi draftu a těsně před schválením, ale struktura CPM zpráv je technickém reportu [34] již navržená. CPM zprávy (Collection Perception Messages – zprávy kolektivního vnímání) budou sloužit v dalších fázích použití V2X pro sdílení dat ze senzorů mezi vozidly (např. radar nebo LIDAR). Datové položky zprávy jsou z [33] a některé z [35].

### 2.4.5 Základní služby na Facilities vrstvě

Ve Facilities vrstvě běží služby, které poskytují data pro aplikační vrstvu. V ETSI standardech jsou definovány dvě základní služby, které jsou mimo jiné navrženy ke zvýšení bezpečnosti a efektivity provozu na silnici. Celkem je v [36] definovaných 6 různých služeb.

#### 2.4.5.1 CA služba

CA služba je služba, která se stará o posílání a příjem CAM zpráv 2.4.4.1. Její architektura je definována ve standardu ETSI EN 302 637-2 [32]. Interval pro posílání CAM zpráv má být menší než  $T_{GenCamMax} = 1000 \text{ ms}$  (frekvence 1 Hz), ale ne menší než  $T_{GenCamMin} = 100 \text{ ms}$  (frekvence 10 Hz). V tomto intervalu může být spuštěno okamžité posílání zprávy na základě dynamických parametrů stanice a stavu kanálu. Ověření těchto podmínek má probíhat s periodou ne menší než  $T_{GenCamMin}$ . Dynamické podmínky jsou tyto:

- Rozdíl mezi směrem pohybu při poslání minulé CAM zprávy a současným směrem pohybu je větší než  $4^\circ$ .
- Vzdálenost mezi polohou stanice při poslání minulé CAM zprávy a současnou polohou je větší než 4 m.
- Rozdíl rychlosti stanice při poslání minulé zprávy a současné rychlosti je větší než  $0,5 \text{ m/s}$ .

Tato služba je součástí základní množiny aplikací (Basic Set of Applications).

#### 2.4.5.2 DEN služba

DEN služba je služba, jejímž úkolem je generování, příjem a zpracování DENM zpráv 2.4.4.2. Je definována ve standardu ETSI EN 302 637-3 [21]. Kromě CA je ještě tato služba součástí základní množiny aplikací. Oproti CAM službě neposílá zprávy neustále, ale jen pokud detekuje nějakou událost, na kterou je potřeba upozornit – její generování si vyžádá vyšší vrstva na základě daného use-case. Existují tři typy zpráv, nová DENM, aktualizací DENM, rušící DENM a negační DENM. Nová DENM je generovaná při detekci události a má



generované nové ID. Aktualizační DENM potom může změnit parametry dané události a musí být vysílána stejnou ITS stanicí. Tato stanice pak vyše ruší DENM, když zjistí, že událost, která způsobila její vygenerování, již neplatí. Negační DENM posílá jiná ITS stanice, když zjistí že událost již neplatí.

### 2.4.5.3 TLM služba

TLM služba (Traffic Light Maneuver, informace o SSZ) používá SPATEM zprávy. Snahou je umožnit dopravním účastníkům bezpečný průchod křižovatkou. Obsahuje informace o stavu kontroléru světelného signalizačního zařízení v reálném čase, aktuální stav signálů, zbývající čas do změny stavu, povolené manévry a asistenci přecházení; předpokládá budoucí využití pro zelenou vlnu. Hlavička SPATEM zprávy vychází z [33], který odkazuje na [37]. Obsažené datové položky jsou z [35].

### 2.4.5.4 RLT služba

RLT služba (Road and Lane Topology, topologie silnice a křižovatky) používá MAPEM zprávy. Tato služba je určena pro generování, odesílání a příjem digitální topologické mapy. Tato mapa definuje infrastrukturní oblast. Dále obsahuje topologii pruhů pro různé typy vozidel (auta, kola, veřejná doprava), přechody pro chodce a povolené manévry v dané oblasti. V budoucnu bude popisovat například i kruhové objezdy. Popis zahrnuje asi 200 metrů od hranice křižovatky, ale ne více než polovinu vzdálenosti od sousední křižovatky (pokud je blíže než 400 metrů). Hlavička MAPEM zprávy vychází z [33], který odkazuje na [37]. Obsažené datové položky jsou oproti minulým zprávám z ISO standardu [35].

### 2.4.5.5 IVI služba

IVI služba (Infrastructure to Vehicle Information, informování vozidla infrastrukturou) používá IVIM zprávy. Stará se o jejich generování, posílání a příjem. IVIM podporují příkazové a informační značky jako jsou omezení rychlosti nebo práce na silnici. Datové prvky jsou definované v ISO standardu [38]. Zajímavé je, že v tomto standardu je zkratka IVI vysvětlena jako in-vehicle information (informace ve vozidle). Ve specifikaci use-cases od C2CCC se zase uvádí in-vehicle signage, vždy je tím ale myšleno informování o značkách.

### 2.4.5.6 TLC služba

TLC služba (Traffic Light Control, ovládání světelných křižovatek) slouží pro prioritizaci například veřejné dopravy nebo vozidel složek IZS na světelných křižovatkách. Stará se o generování a posílání SREM a SSEM zpráv. Požadavek je vytvořen vozidlem ve formě zprávy SREM a může se týkat buďto křižovatky,

ke které se vozidlo blíží, nebo všech křižovatek, které má aktuálně v cestě. Infrastruktura odpoví zprávou SSEM, která dá najevo, zda požadavek je splněn, zrušen nebo mu byla snížena priorita, protože služba dostala jiný, důležitější požadavek. Datové prvky jsou opět z ISO standardu, a to [35].

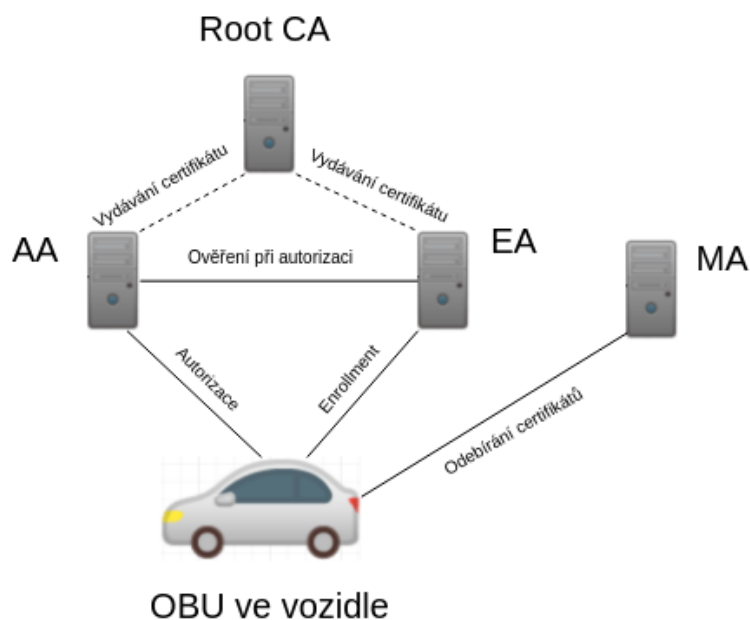
### 2.4.6 Aplikace na aplikační vrstvě

ETSI specifikuje aplikace, které běží na nejvyšší, aplikační vrstvě, protože využívají služby facilities vrstvy. Jedná se o RHS, ICRW a LCRW.

- RHS (Road Hazard Signalling) – Signalizace nebezpečí na silnici. Tato aplikace využívá CAM a DENM zprávy k tomu, aby řidiči signalizovala nebezpečí, které může způsobit nehodu (například pomalé vozidlo, člověk v jízdním pruhu nebo práce na silnici) [39].
- ICRW (Intersection Collision Risk Warning) – Varování před kolizí v křižovatce. V plné verzi OBU používá CAM, DENM, SPATEM, MAPEM a IVIM zprávy pro analýzu situace a při detekci nebezpečí jej signalizuje řidiči. Dalším rozšířením je implementace v RSU, která detekuje možná nebezpečí a pomocí DENM zpráv informuje OBU [40].
- LCRW (Longitudinal Collision Risk Warning) – Varování před podélnou kolizí. Podélná kolize znamená, že se vozidla srazí jakoukoli částí jejich zadní / přední strany. Aplikace obnáší generování / analýzu CAM a DENM zpráv popisujících toto nebezpečí. Existují tři hlavní možnosti, jak se podélná kolize může stát, první je náraz do překážky zezadu, druhou je srážka při předjíždění dvou vozidel, když jedno vozidlo už předjíždí; třetí možností je čelní srážka [41].

### 2.4.7 Bezpečnostní architektura

Pro zabezpečení V2X komunikace se používá asymetrická kryptografie veřejného klíče (PKI). Každá jednotka v sobě má uložen soukromý a veřejný klíč, kanonický identifikátor (globálně unikátní) a dále adresu a veřejný klíč registrační a autorizační autority. Dále musí obsahovat certifikát kořenové autority k ověření zápisové a autorizační autority [43]. Registrační autorita (EA, Enrollment Authority) je entita s certifikátem, která je stanici schopna udělit certifikát pro komunikaci s AA. Autorizační autorita (AA, Authorization Authority) je entita udělující stanici autorizační tikety pro specifická oprávnění (např. oprávnění k tomu, používat určitou službu). Obecně uděluje tikety, které jsou nutné k podepisování jakékoli komunikace. Další věc, kterou systém umožňuje, je odebrání certifikátů, pokud se stanou neplatnými. K tomu slouží další autorita (RA – Revocation Authority). Ta ale implementovaná být nemusí, stačí vydávat certifikáty s krátkou dobou platnosti, takže při příští žádosti o nový již jednotce nebude vydán [43]. Schematicky viz obrázek 2.15. Postup dle [43]:



Obrázek 2.15: Schematické znázornění PKI, obrázek dle [42]

- V2X jednotka při výrobě dostane správné údaje a je zaregistrovaná do EA (je ve stavu Inicializovaná a Nezapsaná).
- V dalším kroku zažádá EA o své údaje pro zapsání (pro AA). Toto může proběhnout jen jednou za životnost jednotky, jednotka je Zapsaná Neautorizovaná.
- Poté, když bude chtít jednotka komunikovat, vyšle žádost o autorizaci pro AA. Ten si ověří, že požadavek je oprávněn, a vydá krátkodobý certifikát pro podepisování. Jednotka je ve stavu Autorizovaná.
- Jakmile certifikát vyprší, jednotka si může AA zažádat o nový. Tento postup podporuje pseudoanonymitu, protože pravou identitu jednotky musí znát jen EA, při dalších žádostech pro AA již komunikuje jen pomocí dlouhodobého certifikátu od EA.

Certifikáty kromě jiného obsahují, jaké zprávy na Facilities vrstvě může jednotka posílat a případně určuje, jaké datové prvky se ve zprávě mohou nacházet. Toto je určeno párem ITS-AID a SSP. ITS-AID (Application Identifier, identifikátor aplikace) dle [29] a také příslušného ISO standardu [30] určuje celková oprávnění – jaké zprávy jednotka může posílat. Například

existuje identifikátor pro CAM zprávy (konkrétně je to 36). Druhým identifikátorem je SSP (Service Specific Permissions) – v rámci určitého ITS-AID mohou být povoleny určité podmnožiny všech oprávnění, například dle typu vozidla. To znamená, že například u CAM zpráv můžeme určit, že daný certifikát může sloužit k podepisování zpráv, které jsou posílány v roli záchranářského vozidla [32].

Bezpečnostní architektura na nejvyšší úrovni obsahuje Certificate Policy Authority (CPA), Trust List Manager (TLM) a volitelný C-ITS Point of Contact (CPOC). CPA leží nad TLM a CPOC a jedná se o autoritu, složenou ze zástupců veřejných a soukromých subjektů, která se podílí na vytváření a provozu důvěryhodného modelu. Trust List Manager (TLM) je komponenta, která je správcem kořenových certifikačních autorit v rámci EU a také vydává seznam kořenových certifikátů (ECTL), který používají jednotlivé jednotky. Tím se stará o vzájemnou důvěru mezi kořenovými autoritami. CPOC je entita jmenovaná CPA, která se stará o komunikaci mezi kořenovými certifikačními autoritami (RCA) a TLM. Rovněž distribuuje ECTL jednotkám na nižších úrovních [42] [44].

### 2.4.8 V2X Use-Cases

Na nejvyšší úrovni jsou definované různé use-cases, jejich rozsah záleží na tom, kterou organizací se řídíme. C2CC rozlišuje use-casy dle toho, jak pokročilou funkcionalitu vyžadují [45]. Existují tři základní kategorie: Day 1, Day 2 a Day 3 (den 1, 2 a 3).

- Day 1 (den 1): Awareness driving. Vozidla sdílejí svůj stav.
- Day 2 (den 2): Sensing driving. Vozidla sdílejí data ze svých senzorů.
- Day 3+ (den 3+): Cooperative driving. Autonomně řízená vozidla spolu sdílí a koordinují svoje dopravní manévry.

#### 2.4.8.1 Day 1 služby C-ITS

Use-cases prvního dne jsou postupně implementované již dnes, zejména používají CA (sekce 2.4.5.1) a DEN službu (sekce 2.4.5.2). Počítá se v nich s tím, že vozidla přenášejí informace o svém stavu a nenadálých situacích (např. špatné počasí). Day 1 se také týká TLM, RLT, IVI služeb pro popis křižovatek a dopravního značení. Popíšu zejména ty use-cases, které jsou implementované projektem C-Roads [46] a definované konsorciem C2CC [45], část informací je z již neplatného TR [47]. Dělení use-cases vychází z projektu C-Roads, je to např: HLN, IVS, RWW, PVD nebo SI – viz sekci 2.2.

- HLN-APR (Animal or Person on Road – zvíře nebo člověk na silnici). Správce silnice nebo řidič zjistí, že na silnici se pohybuje člověk nebo

zvíře a tuto informaci pošle vozidlům, která zobrazí upozornění. Použité zprávy: DENM.

- HLN-AWWD (Alert Wrong Way Driving – varování na jízdu v protisměru). Upozorňuje řidiče, že by mohl potkat vozidlo jedoucí v protisměru. Použité zprávy: DENM.
- EEBL (Emergency Electronic Brake Light, elektronické brzdové světlo při nouzovém brždění). Vozidlo při nouzovém brždění informuje o této události okolní vozidla. Vozidlo, které tuto informaci přijme, může varovat řidiče pro zabránění nehodě. Toto je výhodné při snížené viditelnosti, například v mlze. Použité zprávy: DENM.
- HLN-EVA (Emergency Vehicle Approaching, blížící se vozidlo IZS). Vozidlo tímto oznamuje svou přítomnost. Informuje řidiče např. kvůli vytvoření záchranné uličky. Použité zprávy: CAM, DENM.
- GLOSA (Green Light Optimum Speed Advisory, optimální rychlost průjezdu na zelenou). Oznamuje ideální rychlost pro bezpečný a efektivní průjezd křižovatkou. Použité zprávy: MAPEM, SPATEM.
- IVS-FT (In-Vehicle Signage: Free Text – volný text). Myšlenkou je informovat o textu, který je zobrazen na dynamickém dopravním značení. Použité zprávy: IVIM.
- IVS-TS (In-Vehicle Signage: Traffic Signs – dopravní značky). Určen k informování o dopravním značení. Použité zprávy: IVIM.
- HLN-OR (Obstacle on the road – překážka na cestě). Operátor zjistí, že v jeho úseku je překážka v jednom nebo ve více jízdních pruzích. Vydá upozornění, které se pak zobrazí ve vozidle. Jedná se o překážku, která úplně nebrání provozu (dá se objet). Použité zprávy: DENM.
- PVD-EDC (Event Data Collection – shromažďování dat o události). Informace o události, buďto detekované vozidlem nebo manuálně zadané řidičem, jsou shromažďovány infrastrukturou. Použité zprávy: DENM.
- PVD-VDC (Vehicle Data Collection). Data ze sensorů vozidla jsou shromažďována infrastrukturou pro detekci dopravní situace. Použité zprávy: CAM.
- RWW-LC (Lane Closure – uzavření pruhu). Informuje o uzavření jednoho nebo více pruhů (i odstavného) z důvodu prací na silnici. Použité zprávy: DENM.
- RWW-RC (Road Closure – uzavření silnice). Informuje o dočasném uzavření silnice kvůli pracím na silnici. Použité zprávy: DENM.

- RWW-RM (Road Works Mobile – mobilní stanoviště). Informuje o dočasném uzavření jednoho nebo více pruhů (ale ne celé silnice) kvůli mobilní stanici prací na silnici. Použité zprávy: DENM.
- RWW-ROVA (Road Operator Vehicle Approaching – blíží se vozidlo dopravního operátora), RWW-ROVI (Road Operator Vehicle in Intervention – probíhá intervence dopravního operátora). Informuje o tom, kde se nachází vozidlo dopravního operátora během zásahu. Použité zprávy: DENM.
- RWW-WM (Winter Maintenance). Signalizuje činnost vozidla zimní údržby (např. solení nebo odhrnování sněhu). Použité zprávy: DENM.
- SI-ISVW (Imminent Signal Violation, hrozí nerespektování světla na SSZ). Informuje řidiče vozidla, že se chystá jet na červenou. Použité zprávy: MAPEM, SPATEM.
- HLN-SV (Stationary Vehicle). Určen k informování o stojícím vozidle, které je zastavené, rozbité nebo nabourané a umožňuje včasnou reakci na něj. Informace může být zjištěna stojícím vozidlem samotným nebo infrastrukturou. Použité zprávy: DENM.
- HLN-TSR (Temporarily Slippery Road – dočasně kluzká silnice). Operátor zjistí, že je na nějakém místě kluzká vozovka nebo jeden její pruh a pošle tuto informaci vozidlu, které pro řidiče generuje upozornění. Použité zprávy: DENM.
- HLN-TJA (Traffic Jam Ahead – blíží se zácpa). Určena k informování o nebezpečném konci dopravní zácpy. Zprávu generují buďto vozidla nebo operátor. Může obsahovat pozici, délku fronty a dotčené pruhy (pokud je toto známo. Použité zprávy: DENM.
- HLN-WCW (Weather Condition Warning – varování o počasí). Varuje o počasí (mlha, srážky) případně o stavu vozovky (hrozí ztráta trakce). Použité zprávy: DENM.

### 2.4.8.2 Day 2 služby C-ITS

V této fázi se již počítá s využitím dat z dalších senzorů ve vozidlech, jako jsou kamery, lidary nebo radary. Použity jsou zejména CPM zprávy generované CP službou. Toto lze použít pro detekci VRU nebo pro detekci vozidel, která nejsou vybavena V2X komunikací. Tyto informace by se pak daly použít pro semi-autonomní řízení. Dále jsou plánovaná vylepšení pro SREM a SSEM zprávy, dále přibudou nové RTCMEM zprávy pro korekci polohy. Také se počítá s rozšířením CAM a DENM zpráv (ale tato rozšíření ještě nejsou standardizovaná) například pro adaptivní tempomat nebo kooperativní nouzové brždění. Dále je pro ilustraci popsán výběr z use-cases dne 2.

- AICW (Advanced Intersection Collision Warning, pokročilé varování před kolizí v křižovatce). Slouží prostředí k detekci nespolutracujících vozidel, čímž může detekovat riziko kolize v křižovatce). Použité zprávy: CPM.
- APCS (Advanced Pre-Crash Sensing Warning, pokročilé varování těsně před nehodou). Poskytuje informaci o akutním nebezpečí nehody a umožňuje vozidlu připravit se na kolizi. Použité zprávy: DENM druhého dne.
- C-ACC, C-ACC S (Cooperative ACC, Cooperative ACC String – kooperativní adaptivní tempomat, řetězec C-ACC). Informuje o dynamice vedoucího vozidla a o celkovém stavu provozu pro efektivnější adaptivní tempomat. Infrastruktura může nabízet doporučenou rychlost. Ve druhé verzi umožňuje sdílet informace o více vozidlech. Použité zprávy: CAM prvního dne, CAM a IVIM druhého dne.
- OVW (Overtaking Vehicle Warning – varování při předjíždění). Předjíždějící vozidlo eliminuje riziko čelního střetu využitím informací o protijedoucích vozidlech. Využité zprávy: CPM.
- RWW LT (Road Work Warning Long Term – varování při dlouhodobých pracích na silnici). Prostřednictvím I2V komunikace poskytuje informace o dlouhodobých změnách při práci na silnici (např. zákaz předjíždění nebo nabídka alternativní trasy). Využité zprávy: DENM a IVIM prvního a druhého dne.
- VRUP (Vulnerable Road User Protection – ochrana zranitelných dopravních účastníků). Varuje před nebezpečnou přítomností např. cyklistů nebo chodců. Oproti Dnu 1, kde může infrastruktura varovat vozidla (viz HLN-APR), v tomto případě si mohou vozidla navzájem předávat data ze senzorů a z nich pak odvodit potenciální nebezpečnou situaci. Použité zprávy: CPM.

### 2.4.8.3 Day 3+ služby C-ITS

V této fázi se již jedná o kooperativní autonomní řízení. Vozidla s autonomním řízením vyšších úrovní jsou schopna plánovat úkony, které budou provádět a toho je zde využito tak, že by je měla navzájem koordinovat. Příkladem je CLM služba pro kooperativní přejíždění mezi pruhy z projektu Autonet2030. Očekávané je také další rozšíření CAM zpráv pro určení úrovně autonomního řízení. Pro ukázkou jsou dále popsány některé use-cases.

- ACACC (Advanced Cooperative ACC – pokročilý kooperativní ACC). Jedná se o další vylepšení adaptivního tempomatu, kdy vozidla si mohou vybrat i jízdní pruh. Využívá CAM zprávy prvního, druhého a třetího dne a IVIM zprávy druhého a třetího dne.

- AGLOSA (Automated Green Light Optimum Speed Advisory - automatizované GLOSA). Vylepšení GLOSA (viz výše), kdy vozidlo si samo vybere vhodnou rychlost dle doporučení. Využité zprávy: SPATEM, MAPEM.
- CAP (Cooperative Automated Parking – kooperativní autonomní parkování). Auta autonomně parkují na parkovišti. Podpora může být různá, od oznámení volných míst po centrálně vypočítanou trajektorii. Použité zprávy: MAPEM třetího dne, CPM, MCM.
- CLC (Cooperative Line Change – kooperativní změna pruhu). Vozidla spolu koordinují změnu pruhu, výjimečně může poskytnout informace i infrastruktura. Použité zprávy: MCM.
- Platoon (Platooning). Podpora pro platooning kamionů na dálnici. Umožňuje jak příčné, tak podélné ovládání, podle úrovně autonomního řízení. Využité zprávy: CAM prvního, druhého a třetího dne a PCM zprávy.

### 2.4.9 ASN.1 formát

Zprávy na Facilities vrstvě jsou ve specifikacích definované ve formě ASN.1 souborů. Příklad specifikace CAM zprávy můžeme vidět na obrázku 2.16. Tato specifikace je dostupná buďto přímo ze standardu [32], nebo z repozitáře vytvořeného pro tento účel, dostupného zde: [48]. ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) je formát popisu datových struktur, který umožňuje jejich serializaci / deserializaci mezi různými platformami. Používá se zejména v telekomunikacích. Je standardizován společně organizacemi ITU-T a ISO [49]. ASN definuje různé formáty kódování, například [50]:

- BER – Basic Encoding Rules,
- CER – Canonical Encoding Rules,
- DER – Distinguished Encoding Rules,
- XER – XML Encoding Rules (XER),
- UPER – unaligned Packed Encoding Rules,
- CPER – canonical Packed Encoding Rules.

CAM a DENM zprávy používají formát UPER. Přesná podoba zpráv vychází z příslušných standardů, přičemž ty využívají základní datové typy ze slovníku společných dat [33]. Zprávy definované v původním americkém DSRC standardu [37] používají stejný slovník společných dat jako zprávy dle ETSI, ale kódování je typu DER.



## 2.5. Srovnání s ostatními částmi světa

```

CAM-PDU-Descriptions {
itu-t (0) identified-organization (4) etsi (0) itsDomain (5) wg1 (1) en (302637) cam (2) version (2)
}

DEFINITIONS AUTOMATIC TAGS ::=
BEGIN

IMPORTS
ItsPduHeader, CauseCode, ReferencePosition, AccelerationControl, Curvature, CurvatureCalculationMode, Heading, LanePosition,
EmergencyPriority, EmbarkationStatus, Speed, DriveDirection, LongitudinalAcceleration, LateralAcceleration, VerticalAcceleration,
StationType, ExteriorLights, DangerousGoodsBasic, SpecialTransportType, LightBarSirenInUse, VehicleRole, VehicleLength, VehicleWidth,
PathHistory, RoadworksSubCauseCode, ClosedLanes, TrafficRule, SpeedLimit, SteeringWheelAngle, PerformanceClass, YawRate,
ProtectedCommunicationZone, PtActivation, Latitude, Longitude, ProtectedCommunicationZonesRSU, CenDsrcTollingZone FROM ITS-Container {
itu-t (0) identified-organization (4) etsi (0) itsDomain (5) wg1 (1) ts (102894) cdd (2) version (2)
};

-- The root data frame for cooperative awareness messages
CAM ::= SEQUENCE {
header ItsPduHeader,
cam CoopAwareness
}

CoopAwareness ::= SEQUENCE {
generationDeltaTime GenerationDeltaTime,
camParameters CamParameters
}

CamParameters ::= SEQUENCE {
basicContainer BasicContainer,
highFrequencyContainer HighFrequencyContainer,
lowFrequencyContainer LowFrequencyContainer OPTIONAL,
specialVehicleContainer SpecialVehicleContainer OPTIONAL,
...
}

```

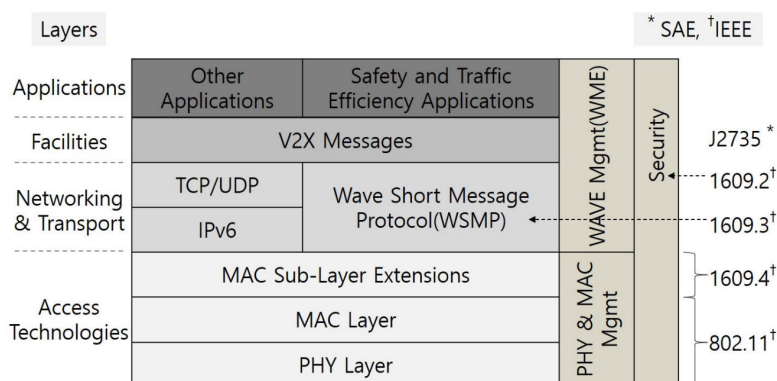
Obrázek 2.16: Začátek specifikace CAM zprávy [48]

## 2.5 Srovnání s ostatními částmi světa

Zde je stručně nastíněna standardizace od síťové vrstvy výše v Americe a v Asii.

### 2.5.1 Standardizace v Americe

Obdobou ETSI ITS-G5 v Americe je IEEE WAVE standard (IEEE je Institute of Electrical and Electronics Engineers). WAVE znamená Wireless Access in Vehicular Environments, tedy bezdrátová komunikace v dopravním prostředí.



Obrázek 2.17: Přehled WAVE, převzato z [22]

Schematicky viz 2.17. Jedná o skupinu norem IEEE 1609. Jejich základem je (stejně jako pro ITS-G5) standard IEEE 802.11p, který definuje MAC a PHY vrstvy (fyzická a linková vrstva ISO/OSI modelu). Ekvivalentem DCC je část IEEE 1609.4 Dále je použito LLC stejně jako u ITS-G5.

Na síťové a transportní vrstvě je použit oproti ITS-G5 použit jeden protokol a to WSMP (Wave Short Message Protocol) dle IEEE 1609.3. Hlavním rozdílem oproti ITS-G5 je to, že zařízení v pravidelných intervalech (50 ms) střídá frekvenci, na které vysílá / přijímá, přičemž každá druhá musí odpovídat kontrolnímu kanálu CCH.

Na nejvyšší vrstvě (facilities) jsou dle SAE J2735 [37] definované jednotlivé zprávy, například jde o tyto:

- BSM (Basic Safety Message). Je zhruba ekvivalentem CAM zprávy.
- EVA (Emergency Vehicle Alert). Zpráva informující o tom, že se blíží záchranářské vozidlo.
- SPAT (Signal Phase and Timing Message), MAP (Map Data). Použité službami popsanými výše.
- TIM (Traveler Information Message). Popisuje např. provoz, dopravní značení nebo maximální dovolenou rychlost.

Úspěchem harmonizačních snah je sjednocení ITS Společného datového slovníku (CDD) mezi CAM, DENM, atd. zprávami ETSI (viz výše) a zpráv z J2735. Tento slovník obsahuje datové položky, které jsou použity všemi těmito typy zpráv.

### 2.5.2 Standardizace v Asii

V Asii je základem pro standardizaci ITS japonská norma ARIB STD-T109. Na fyzické vrstvě využívá IEEE 802.11p, pouze místo pásma 5,9 GHz má 700 MHz. K přístupu k médiu je použita kombinace CSMA/CA (dle IEEE 802.11p) a TDMA. Tento standard rozděluje komunikaci na dvě kategorie – IVC (mezi vozidly, mobilními stanicemi) a RVC (mezi vozidly a RSU – základnovými stanicemi). Simulace (např. [51]) ukazují, že komunikace dle ARIB T109 má mnohem větší dosah. To přináší výhody i nevýhody – posílaná informace se sice dostane ke vzdálenějším příjemcům, ale o to snadněji dojde k zahlcení kanálu. Toto částečně řeší TDMA mechanismus, který ale zároveň omezuje propustnost kanálu. Toto pak na vyšších úrovních ISO/OSI modelu způsobuje vyšší zpoždění a omezení propustnosti kanálu.

## 2.6 Hardwarové platformy

Komunikaci standardu 802.11p lze realizovat na běžné síťové kartě (s vhodnou podporou ovladačů na Linuxu), pro C-V2X je potřeba dedikovaný hardware. Oběma variantami se v současné době zabývá již větší množství firem.

### 2.6.1 Integrované obvody

- Marvell. Firma Marvell v roce 2015 přišla se SoC řady 88W8987xA zahrnující kromě komunikace standardu 802.11p také běžnou Wi-Fi standardu IEEE 802.11ac a Bluetooth 5 Low Energy. Podporovala použití dvou antén, jedné pro DSRC / Wi-Fi a jedné pro Bluetooth. Primárně se ale jednalo o řešení pro použití ve vozidlovém infotainmentu a jako gateway pro audio a video [52]. Na webových stránkách Marvellu se již o této modelové řadě nedá nic dohledat, ale dle blokových schémat se zdá, že v současné době bylo HW jádro převzato NXP jako 88W8987 (srov. [53] a [54]), avšak již bez podpory 802.11p.
- NXP. NXP vyrábí vlastní komunikační čipy na bázi standardů DSRC, tedy technologii 802.11p. Pro podporu proti LTE-V2X argumentuje lepší připraveností technologie nebo zpětnou kompatibilitou (5G verze neumožňuje zpětnou kompatibilitu). Dále uvádí, že LTE-V2X přenáší zprávy hůře, když jsou zařízení moc blízko u sebe a navíc má menší dosah, než DSRC. Na podporu svých postojů vydalo již několik vědeckých článků, např. [55][56] společně s Autotalks a jinými firmami.

Mezi nabízená řešení patří SDR procesor SAF5100 [57]. Obsahuje firmware, který implementuje IEEE 802.11p na PHY/MAC vrstvě a IEEE 1609.4 LLC, odpovídá specifikaci ETSI EN 302 663. Kromě DSRC na 5.9 GHz podporuje také ARIB 760 MHz pásma (viz výše). Řešení obsahuje ARM jádro pro uživatelskou implementaci vyšších vrstev. Má hardwarovou podporu pro podepisování eliptickými křivkami.

Druhou variantou je použití modemu SAF5400, ke kterému je potřeba další procesor, který jej bude řídit. Tento modem je použit například V2X modulem japonské společnosti Alps Alpine. Z dalšího hardware od NXP pro podporu V2X lze zmínit například kryptografický modul SXF1800 a transceiver TEF5100.

- Autotalks. Jedná se o firmu z Izraele, která jako jedna z mála nabízí čipy pro kombinované použití jak DSRC, tak C-V2X. Kromě komunikačních procesorů pro V2X nabízí také transceivery pro toto použití. Její řešení jsou použitelná pro všechny světové standardy popsané výše. U procesorů se jedná konkrétně o čipsety Craton 2 [58] a Secton [59]. Craton 2 je výkonný systém se dvěma jádry ARM Cortex A7, což je 32bitový mikroprocesor; kromě toho obsahuje volitelně také mikrokontrolér. Přímou

na čipu má také hardwarový bezpečnostní modul eHSM, který implementuje podepisování eliptickými křivkami. Modul podporuje WiFi komunikaci standardů IEEE 802.11a/b/g/n/ac. Co se týče C-V2X, jedná se o standardy Release 14 a Release 15, tedy LTE PC5. Nepodporuje Release 16 a dále (5G). Sectar je proti Cratonu jednodušší, má vše výše zmíněné, až na mikroprocesor Cortex A7. Jedná se tedy pouze o komunikační čipset, je nutné ho ovládat dalším hostitelským procesorem pomocí USB a SPI.

Autotalks dále poskytuje transceiver Pluton 2. Připravují se nástupci čipsetů Craton 2 a Sectar – konkrétně Tekton 3 resp. Sectar 3. Jejich hlavní výhodou je, že kromě IEEE 802.11p a C-V2X Release 14 a 15 budou podporovat i další generace sítí 5G-V2X a V2X NR (Release 16, 17, 18) a IEEE 802.11bd. Tekton 3 bude umožňovat certifikaci ISO26262 ASIL B pro funkční bezpečnost. Tekton 3 a Sectar 3 jsou v době psaní této práce (2022) teprve v přípravě, mluví se o začátku roku 2023.

- Qualcomm. Tento polovodičový gigant je největší podporovatel celulárního standardu C-V2X. Proto ho implementují i jeho čipsety. Vyrábí jak komunikační procesory, tak LTE i 5G modemy.

Hlavním produktem pro V2X je v současné době 9150 C-V2X ASIC [60], který podporuje 5G a je kompatibilní s C-V2X dle 3GPP Release 14. Velkou výhodou je integrovaný GNSS přijímač (Galileo, Beidou, GLONASS, GPS), který jiná řešení většinou neobsahují. Také obsahuje velké množství komunikačních sběrnic, jmenovitě I<sup>2</sup>S, I<sup>2</sup>C, USB 2.0 / 3.0, PCIe, UART, SPI a SDIO. Co se výpočetního výkonu týče, obdobně jako Craton obsahuje více jader ARM Cortex A7. Tento čip je používán modulem Quectel AG15 a WNC C-V2X. Qualcomm k čipu poskytuje SDK, které obsahuje externí komunikační stack implementující veškerou komunikaci i s facilities vrstvou (včetně generování např. CAM zpráv z ETSI nebo BSM zpráv ze SAE standardů).

- SIMCom: Vyrábí například modul SIM8800, který kromě 5G komunikace volitelně obsahuje i modul pro C-V2X [61]. Stejně jako čipy od Qualcommu má (volitelně) integrovaný GNSS přijímač. Také je obdobně bohatě vybaven komunikačními sběrnicemi, navíc obsahuje ještě gigabitový Ethernet.
- Quectel: Poskytuje čipsety pro C-V2X komunikaci, například AG15 nebo AG18 pro 3GPP Release 14 resp. Release 14 a 15 [62]. Dalším produktem je aplikační procesor AP AG215S s dvěma jádry ARM Cortex-A53, který je určený pro použití těchto modulů.

## 2.6.2 Moduly

Další výrobci poskytují moduly na základě čipsetů z minulé sekce 2.6.1. Jedná se například o:

- Unex: Používají mikrokontroléry od Autotalks. Jednotky tedy podporují jak DSRC, tak C-V2X. Jako modul je dostupná m-PCIe karta pro použití v Linuxu s kernelem verze 4 a na platformě x86-64, ARMv7-A nebo ARMv8-A 64 bit. UNEX poskytuje vlastní stack a SDK pod názvem V2Xcast, který implementuje komunikaci jen do facilities vrstvy, aplikační vrstvu už neumí [63].
- Murata: Připravuje moduly na základě čipsetů od Autotalks. V době psaní této práce ještě nebyly dostupné ve velkém objemu, pouze jako vzorky; plná výroba má dle tiskové zprávy naběhnout v roce 2023. Jsou dostupné dva typy modulů, Typ 1YL s Autotalks Serton a Typ 2AN s Autotalks Craton 2. K zařízení není poskytnut žádný komunikační stack, Murata jen poskytne kontakt na jeho poskytovatele [64].

## 2.6.3 Hotová řešení

Dále existují hotová řešení, která používají čipsety popsané v předmiulé sekci 2.6.1.

- Cohda Wireless: Tato australská společnost je jedním z největších výrobců zařízení pro toto použití. Jejich řada MK5 používá čipy od firmy NXP. Poskytují MK5 OBU, RSU a XBU (speciálně pro důlní provozy). Nově poskytují i řadu MK6 na základě čipsetu Qualcomm (RSU, OBU a EVK – vývojový kit zahrnující jak RSU tak OBU funkcionalitu). Na zařízení běží vlastní stack, který implementuje komunikaci až do aplikační vrstvy [65].
- Unex: Kromě m-PCIe karty vyrábějí také RSU a OBU. K těmto jednotkám je také poskytnut stack V2Xcast [63].
- Bosch: Společnost Bosch vyrábí vlastní komunikační jednotky, které zvládají jak DSRC, tak C-V2X. Dále na sobě mají také klasické Wi-Fi a LTE pro posílání telematických informací. Veřejně se nedá zjistit, od kterého výrobce používají čipy [66].
- Commsignia: Commsignia vyrábí komunikační jednotky OBU a RSU na základě čipsetů Autotalks, NXP, Marvellu nebo Qualcommu. Od těchto firem je vždy jen bezdrátový čipset, deska dále obsahuje NXP i.MX 6 procesor, který řídí celou komunikaci. Mohou tedy umět DSRC, C-V2X nebo i obě varianty [67].

- Vector. Tento výrobce poskytuje variantu svého komunikačního rozhraní VN4610 pod názvem 802.11p/CAN (FD)/GNSS Interface, která implementuje DSRC komunikaci pomocí čipsetu NXP SAF5100 [68]. Dále obsahuje sběrnici CAN i CAN FD, do počítače se připojuje pomocí USB 2.0 nebo gigabitového Ethernetu. Má GNSS přijímač uBlox NEO-M8U a čas umí synchronizovat i ze sítě protokolem PTP. Jednou z hlavních výhod je integrace se softwarem od Vectoru, ať už je to plugin Car2x pro Vector CANoe nebo Vector CANalyzer.

## 2.7 Softwarové implementace

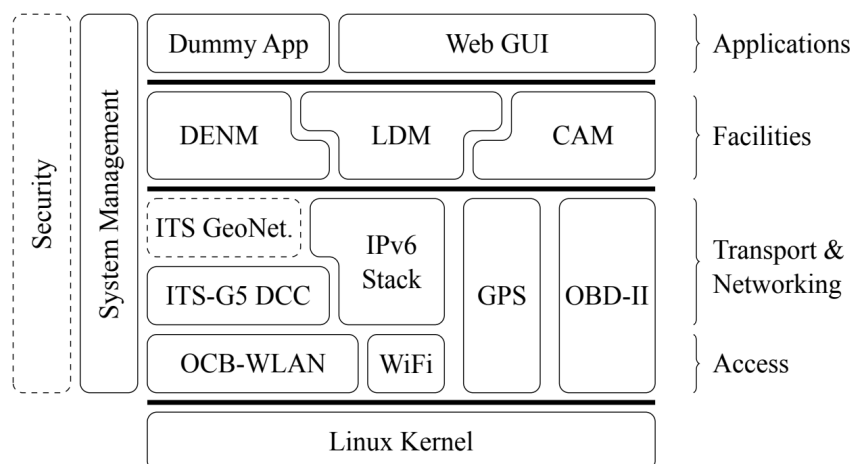
V softwaru je potřeba implementovat transportní, síťovou, facilities, bezpečnostní vrstvu a vrstvu správy (transport, networking, facilities, security a management) z ETSI ITS-G5. Existují různé komerční i open-source varianty tohoto softwaru. Jiná komerční zařízení obsahují většinou proprietární stacky. Dále popíšu různé možné implementace, které by se daly použít.

### 2.7.1 GeoNet Stack

Tento stack [69] je balík aplikací napsaný v Javě, který vyžaduje instalaci Java Virtual Machine. Má velmi vysoké nároky na hardware, a proto se nehodí pro instalaci na Embedded Linux. Projekt implementuje transportní a síťovou vrstvu, které odpovídají vrstvám 3, 4 a 5 ISO/OSI modelu. Zdrojový kód lze volně vyhledat na GitHubu a je vydán pod permissivní licencí Apache. Původním autorem je Alex Voronov ze Švédska, ale díky tomu, že je projekt open-source, již přibýlo mnoho dalších přispěvatelů.

### 2.7.2 OpenC2X

OpenC2X [71] je také balík programů, který sestává kromě stacku i z řídicích aplikací na aplikační úrovni. Skládá se z modulů, které mezi sebou komunikují pomocí ZeroMQ. Je zamýšlen pro běh na stolním PC, protože běží nad linuxovým kernelem. Podporuje IEEE 802.11p a dále připojení s GPS nebo propojení s automobilovým standardem OBD-II. Bohužel ale neumí GeoNetworking a BTP, takže je nutné použít např. IPv6. Na Facilities vrstvě umožňuje generování CAM, DENM (viz výše) a LDM (viz report ETSI TR 102 863) zpráv. Na nejvyšší vrstvě pak poskytuje webové GUI a ukázkovou aplikaci, která generuje a posílá V2X zprávy. Schematicky viz 2.18. Je napsán v C++ a taktéž vydán na GitHubu [72], a vydán pod licencí LGPL verze 3.0, ale repozitář je již několik let bez commitů a vypadá to, že projekt již není udržován.



Obrázek 2.18: Schéma knihovny OpenC2X, převzato z [70]. Přerušované ohraničené oblasti nejsou implementované.

### 2.7.3 Vanetza

Vanetza [73] je open-source implementace různých částí ETSI C-ITS. Co konkrétně implementuje:

- GeoNetworking (GN) na síťové vrstvě,
- Basic Transport Protocol (BTP) na transportní vrstvě, obojí dle ETSI standardů řady EN 302 636;
- Decentralized Congestion Control (DCC) – kontrola zahlcení kanálu,
- zabezpečení – základní správa certifikátů, která je potřeba pro V2X systémy dle standardů,
- rozšiřitelnou podporu generování různých typů zpráv na facilities vrstvě, například se jedná o CAM a DENM zprávy; se zprávami se pracuje v ASN.1 formátu.

Knihovna je psána v C++11. Má tři externí závislosti a to Boost, GeographicLib a Crypto++. Obdobně jako OpenC2X se dá stáhnout pod licencí LGPL verze 3.0. Vznikla na Technische Hochschule Ingolstadt jako výzkumný projekt pod vedením Raphaela Riebla, v současné době má však mnoho přispěvatelů na GitHubu a projekt je zde velice aktivní. Obsahuje ukázkové programy pro základní použití a je připravena na portování na zařízení od firmy Cohda Wireless. Jedním z ukázkových programů je `socktap`, který generuje a posílá / přijímá V2X pakety.

### 2.7.4 Cohda V2X Stack

Tento komerční stack s uzavřeným zdrojovým kódem je poskytován firmou Cohda Wireless [74]. Jeho použití je zamýšleno zejména pro zařízení této firmy, která jsou popsána výše (např. Cohda MK5 OBU). Lze jej ale použít i na jiná zařízení. Z veřejně dostupných informací není přesně jasné, ve kterém jazyce je software implementován, ale existují předpoklady, že se jedná o jazyk C. Dá se ovšem zjistit, že jsou implementovány zejména vrstvy síťové, aplikační a facilities. Cohda tvrdí, že tento stack používá již více než milion zařízení po celém světě.

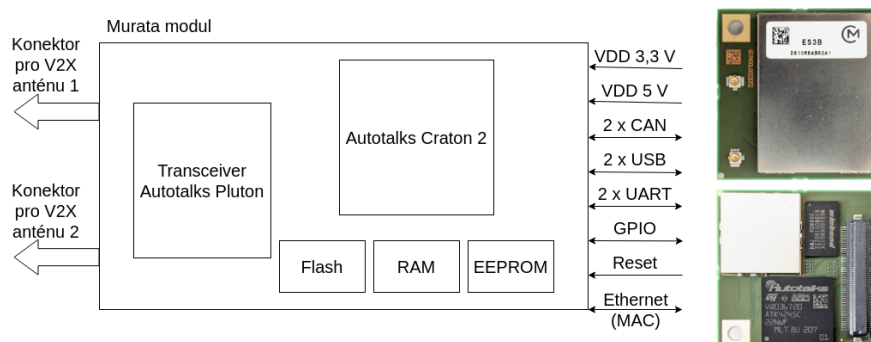


## Realizace

Cílem realizace je implementovat V2X komunikaci na poskytnuté vývojové desce. V této části je popsána vybraná hardwarová platforma, použité vývojové desky a komunikační deska MACH-V2X-IF. Dále je popsána softwarová implementace – kompilace použité knihovny, přidání nových typů zpráv a implementované ukázkové služby pro jejich generování a příjem. Hotová implementace je posléze otestovaná v kapitole 4.

### 3.1 Hardwarové desky

Byla vybraná platforma od firmy Murata na základě čipsetu Autotalks, která umožňuje jak komunikaci DSRC, tak celulární C-V2X. Od Muraty existují vývojové kity, které byly pořízeny pro prvotní vývoj a na nich byla implementace průběžně zkoušena. Výrobce má dvě různé varianty svého čipsetu. Jeden obsahuje jen implementaci fyzické vrstvy V2X komunikace a nemá vlastní operační systém (Autotalks Secton). Musí proto být řízen externím procesorem, který umožňuje spuštění SDK výrobce. Toto řízení může zprostředkovávat



Obrázek 3.1: Schéma a fotografie modulu Murata pro Autotalks Craton 2

### 3. REALIZACE

---

```
SGPGGA,172134.495,5004.969,N,01430.568,E,1,12,1.0,0.0,M,0.0,M,,*6E
SGPGSA,A,3,01,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12,1.0,1.0,1.0*30
SGPRMC,172134.495,A,5004.969,N,01430.568,E,004.7,139.7,100522,000.0,W*71
SGPGGA,172135.495,5004.968,N,01430.569,E,1,12,1.0,0.0,M,0.0,M,,*6F
SGPGSA,A,3,01,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12,1.0,1.0,1.0*30
SGPRMC,172135.495,A,5004.968,N,01430.569,E,004.1,352.0,100522,000.0,W*7E
SGPGGA,172136.495,5004.969,N,01430.569,E,1,12,1.0,0.0,M,0.0,M,,*6D
SGPGSA,A,3,01,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12,1.0,1.0,1.0*30
SGPRMC,172136.495,A,5004.969,N,01430.569,E,001.1,180.0,100522,000.0,W*74
SGPGGA,172137.495,5004.969,N,01430.569,E,1,12,1.0,0.0,M,0.0,M,,*6C
SGPGSA,A,3,01,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12,1.0,1.0,1.0*30
SGPRMC,172137.495,A,5004.969,N,01430.569,E,001.9,277.3,100522,000.0,W*75
SGPGGA,172138.495,5004.969,N,01430.568,E,1,12,1.0,0.0,M,0.0,M,,*62
SGPGSA,A,3,01,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12,1.0,1.0,1.0*30
SGPRMC,172138.495,A,5004.969,N,01430.568,E,001.9,277.3,100522,000.0,W*7B
```

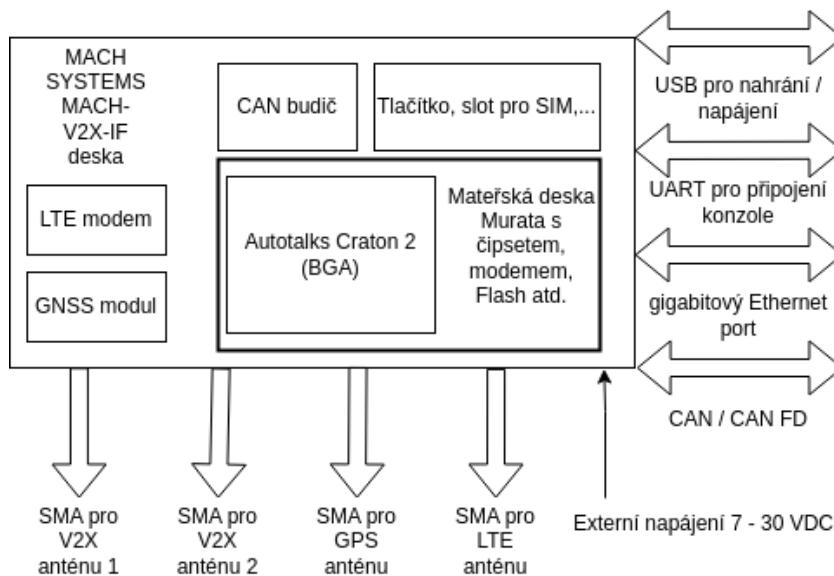
Obrázek 3.2: Příklad NMEA řetězců

buďto osobní počítač, nebo praktičtěji nějaká jednodesková platforma s OS Linux, například Raspberry Pi. K čipsetu je pak potřeba tuto platformu připojit po USB (pro DSRC) nebo po USB a SPI (pro C-V2X). Pro C-V2X je potřeba mít dostupný 1PPS signál, což je signál s přesnou 1sekundovou periodou. Druhou variantou je SoC, který obsahuje dvě různá ARM jádra a běží operační systém přímo na něm, není tedy třeba žádný další řídicí procesor (Autotalks Craton 2). Přirozeně je tato varianta mnohem výhodnější pro implementaci, neboť z hlediska komunikace stačí pouze jeden čip. Moduly Murata obsahují daný komunikační procesor, dále modem Autotalks Pluton a základní součástky, nutné pro chod zařízení. Tento modul má 100pinové rozhraní pro externí zapojení. Do navržené desky je poté modul přes toto rozhraní zapojen. Schéma Murata modulu můžeme vidět na obrázku 3.1. Vývojovou desku pro Autotalks Serton vidíme na obrázku D.1, pro Autotalks Craton 2 na obrázku D.2.

Modul dále obsahuje NAND Flash paměť pro zapsání operačního systému a uživatelských aplikací. Systém obsahuje několik filesystémů, které musí být nahráné do paměti najednou pomocí softwaru na PC. Nahrání probíhá přes sériovou linku (UART). K desce jsou potřeba externí antény, napájecí zdroj na 5 V a v případě potřeby externí GPS přijímač, který poskytuje data ve formě NMEA řetězců<sup>2</sup>. Na desce běží embedded Linux, ke kterému se dá připojit terminálem po USB. Deska obsahuje 256 MB NAND Flash, kde je nahrán celý systém. Celý proces bootování viz dále. Při bootu je vše nahráno do 128MBytové RAM, kde je vytvořen volatilní filesystém. Z hlediska paměťových zařízení je navíc na desce integrovaná 512bytová EEPROM s MAC adresami od výrobce a kalibračními daty. Informace výše se vztahují k modulu Type 2AN ES1.1. Nově je dostupná řada Type 2AN ES3B, která má rozšířenou flash paměť na 512 MB a RAM na 256 MB, takže je na ní dostatek místa na všechny požadované programy.

---

<sup>2</sup>Textový standardní formát pro přenos GNSS dat; pro jejich příklad viz obrázek 3.2



Obrázek 3.3: Schéma zařízení MACH-V2X-IF

### 3.1.1 V2X vývojová komunikační deska MACH-V2X-IF

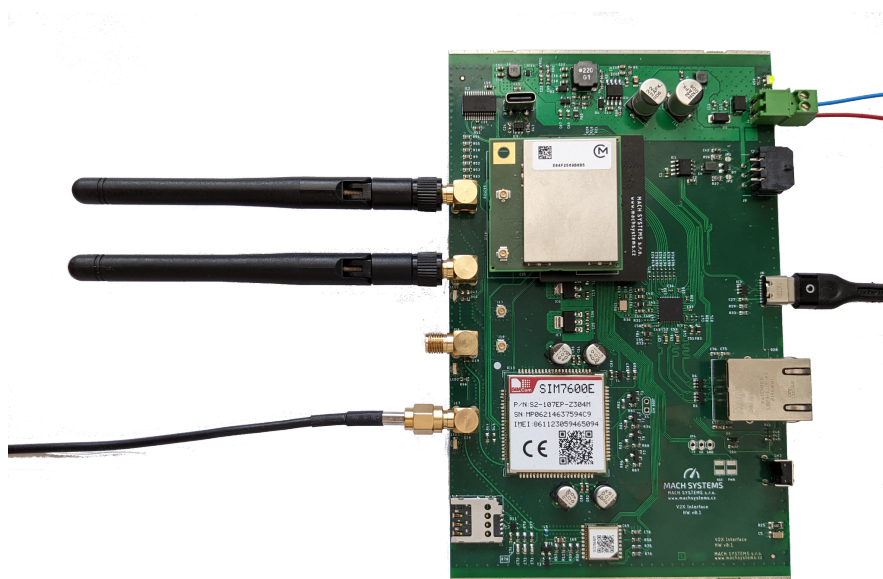
Na základě modulu Murata Type 2AN byla firmou MACH SYSTEMS s.r.o. vytvořena vývojová komunikační deska MACH-V2X-IF, která byla použita v rámci této práce pro další vývoj. Ta je schematicky vidět na obrázku 3.3. Využívá výše zmíněný modul se 100pinovým rozhraním, na kterém je osazen Autotalks Craton 2. Desku lze napájet 7 – 30 V DC nebo také USB Type-C konektorem. Deska má na konektory vyveden USB přímo z čipsetu pro nahrání a UART pro připojení k linuxové konzoli. Dále má na externí SMA konektory vyvedené dvě V2X antény a po jedné GPS a LTE anténě. Obsahuje samostatný GPS modul SIMCOM SIM68M, který je k čipsetu připojen pomocí UARTu a posílá mu přes něj NMEA řetězce, které jsou poslány v zařízení zpracovány; také poskytuje 1PPS signál. Také má LTE modem SIMCOM SIM7600E pro připojení do mobilní sítě. Pro příjemnější připojení z PC, například přes SSH, je dostupný gigabitový Ethernet. Pro testovací účely je zařízení vybaveno vlastním generátorem 1PPS signálu, aby mohla v laboratorním prostředí probíhat C-V2X komunikace i bez dostupné GPS. Výběr zdroje 1PPS signálu (tento nebo GNSS modul) je provedena pomocí GPIO z Cratonu. V neposlední řadě deska umožňuje komunikaci sběrnici CAN / CAN FD.

### 3.1.2 Parametry čipsetu

SoC obsahuje dvě úplně oddělená výpočetní jádra ARM. Prvním z nich je Arm Cortex M3, což je jednoduchý mikrokontrolér. Ten slouží kromě spouštění celé

### 3. REALIZACE

---

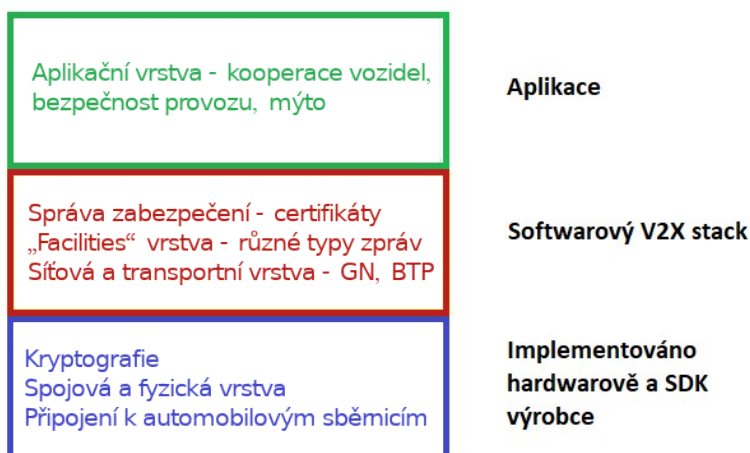


Obrázek 3.4: Fotografie zařízení MACH-V2X-IF

desky také ke komunikaci s většinou periferií SoC. S hlavním jádrem, což je Arm Cortex A7, komunikuje pomocí hardwarových mailboxů. Toto CPU běží na frekvenci 600 MHz. Kromě 768 kB RAM na čipu pro Cortex M3 má systém 128 MB externí RAM a také externě připojeno 256 MB NAND Flash (ve verzi ES3B 256 a 512 MB). Co se týče periferií, je systém bohatě vybaven, kromě základních UART, SPI, I<sup>2</sup>C nebo SDIO (digitální piny) obsahuje dále USB, CAN, FlexRay ale i RMII/RGMII pro připojení Ethernetu. Přímou na čipu je hardwarová akcelerace pro kryptografii – například implementace hashování SHA2, AES pro standardy 802.11 nebo akcelerátor podepisování pomocí eliptických křivek (ECDSA).

#### 3.1.3 Bootování

Nejdříve se spustí bootloader 0, který spustí bootloader 1 (X-Loader), běžící na jádře Arm Cortex M3 (mikrokontrolér), na kterém se dále spustí real-time operační systém ThreadX (M3-OS). Zároveň se začne vykonávat bootloader 2 (AP-Loader), který již běží na hlavním procesoru Arm Cortex A7. Ten nahraje z ROM do hlavní paměti systém Linux včetně jeho zavaděče U-Boot a ověří správnost nahrání. Poté se začne spouštět Linux pomocí U-Bootu. Celou tu dobu se v M3-OS čeká, zdali se Linux začne spouštět. Pokud neběží ani po 30 vteřinách od začátku bootování, celý SoC je zresetován a proces běží od začátku.



Obrázek 3.5: Vrstvy implementace

## 3.2 Softwarová implementace

Linuxová distribuce, která běží na vybraných deskách, je vytvořena na základě projektu Yocto verze 3.0 (resp. jeho referenční implementace Poky), což je sada cross-platformních nástrojů pro vytvoření kompilaci vlastní distribuce. Stručně popíšu samotné sestavení. Nejprve je nutné spustit konfiguraci, kde se vybere zařízení, které slouží jako základ hardwarového nastavení, v tomto případě se jedná o evaluační kit od samotného Autotalks. Tím se vyberou základní nastavení, jako je typ paměti (NAND / NOR), její velikost atd. Dále je nutné aplikovat několik patchů poskytnutých přímo od Muraty, zejména se jedná o vytvoření DHWC souboru s konfigurací Murata modulu, jež je vytvořena na základě konfigurace Autotalks evaluačního kitu. Pro zařízení MACH-V2X-IF je dále nutné provést některé změny v Linux Device Tree, jako jsou:

- Povolení ovladačů qmi\_wwan pro LTE modem.
- Výběr správného módu provozu ethernetové PHY (RGMII-ID).
- Pro Autotalks API od verze Release 18 je nutné povolit ovladače CANu v podobě modulu. Zdá se, že pro kompletní funkcionalitu CAN modulu na SoC jsou nutné úpravy výchozího ovladače, toto zatím nebylo kompletně vyřešeno.

Podrobnější popis těchto změn je mimo obsah této práce. Dalším krokem je spuštění kompilace linuxového jádra, které při prvním běhu trvá několik hodin. Na závěr je potřeba (po každém sestavení) zkopírovat textové soubory s konfigurací daného modulu, které jsou načteny při bootování desky.

Od výrobce čipsetu je poskytnuto API v jazyce C pro předávání V2X zpráv na spojové vrstvě. API funguje tak, že je vytvořen linuxový modul a s tím je komunikováno pomocí socketů. Na obrázku 3.5 vidíme, která vrstva je kde implementovaná. Nejnižší modrý rámeček reprezentuje hardware a to, co umí software od výrobce, na obrázku 2.4 jsou to „Přístupové technologie“. Kromě obou základních typů V2X komunikací C-V2X a DSRC (viz výše) obsahuje kontrolér také hardwarovou akceleraci pro základní kryptografické operace. Nechybí také přístup k automobilovým sběrnici jako je CAN, LIN nebo FlexRay. Většinu prostředního žlutého rámečku implementuje uživatelský software, odpovídá to transportní vrstvě v obrázku 2.4. Jde o BTP+GeoNetworking, dá se však použít klasické TCP a IPv4 nebo IPv6. V nejvyšším rámečku můžeme vidět samotné praktické využití služeb nabízených na nižších vrstvách. Například pokud prostřední vrstva poskytuje CAM zprávy pro kooperativní spolupráci vozidel, na nejvyšší vrstvě bychom mohli najít use-case Road Works Warning, kdy si vozidla navzájem dávají najevo, že někde probíhají práce na silnici (viz předchozí kapitoly).

Pro samotnou softwarovou implementaci byl vybrán stack Vanetza. Pro tento výběr bylo několik důvodů. Prvním z nich byla cena, protože Vanetza je zdarma. Cílem práce bylo buď implementovat komunikaci vlastními silami, nebo použít a přizpůsobit nějaké existující řešení. Komerční stacky stojí několik desítek tisíc korun. Druhým důvodem byla implementace v C++. Další otevřený stack nabízený v rešeršní části je psán v jazyce Java, který je nevhodný pro běh na vestavném zařízení. Když už byla vybraná otevřená implementace, bylo dobré vybrat takovou, která je v aktivním vývoji, takže komunita může průběžně vyladovat případné chyby. To je v tomto případě také splněno. Kvůli tomu, že implementací by měl vzniknout komerční produkt, je výhodné, že Vanetza má otevřenou licenci LGPL. To v praxi znamená, že pokud je knihovna linkována s hlavním programem ve formě dynamických knihoven (tedy kód není součástí spustitelného kódu programu), nemusí být zbytek kódu také licencován pod otevřenou licenci. Toto je odlišnost proti klasické GPL, kdy jakékoli dílo, které používá kód pod touto licenci, musí být také GPL, ať už je program linkován staticky či dynamicky za běhu.

#### 3.2.1 Přidání dalších typů zpráv do Vanetzy

Knihovna Vanetza v současném stavu neobsahuje struktury pro použití SREM, SSEM a IVIM zpráv. Bylo pro ně tedy nutné přidat podporu, abychom uměli generovat/zpracovávat základní v současné době standardizované zprávy. Do Vanetzy jsou zprávy jednoduše přidávat zkompileováním jejich ASN.1 specifikací do struktur v jazyce C. Pro jednoduchost jsou některé zprávy v knihovně již předkompilované, což se netýká výše zmíněných.

Zprávy jsou standardizované v ASN.1 formátu (viz podkapitola 2.4.9). Z tohoto formátu je nutné vytvořit C struktury, které jsou pak programem používány. K tomu existují různé open-source kompilátory, jedním z nej-

používanějších je `asn1c` vytvořený Levem Walkinem. Ten umí zároveň vytvořit i funkce pro serializaci / deserializaci dat. ASN.1 je natolik složitý, že většina knihoven nepodporuje všechny jeho konstrukce, týká se to i `asn1c`; pro naše účely je ale podpora dostačující. Je ale nutné použít fork spravovaný taktéž autorem knihovny Vanetza, kde jsou opravené některé drobné chyby a další úpravy pro správné kódování V2X zpráv. Pro přidání dalších typů zpráv do Vanetzy stačí přidat správné `.asn` soubory a pak spustit sestavení se zapnutým parametrem `VANETZA_WITH_ASN1C`. Problém je pouze to, že `asn1c` neumožňuje syntaxi s dvojitými hranatými závorkami pro volitelné parametry (které jsou přidány v IVI V2X zprávě), takže řešením je prozatím tyto parametry ručně odstraňovat v rámci CMake skriptu (jedná se o tři místa v jednom souboru).

Tato kompilace byla mnou provedena a v současné době čeká na přijetí do hlavní větve Vanetzy jakožto pull request [75]. Až na zmíněný problém s volitelnými parametry IVI zpráv se zdá, že generování i dekodování všech přidávaných typů zpráv probíhá v pořádku.

### 3.2.2 Sestavení knihovny Vanetza

Pro konfiguraci sestavení je využit program CMake. Jak bylo zmíněno v předchozí sekci, knihovnu je potřeba kompilovat jako sdílenou knihovnu. Knihovna má tři závislosti, které musí být přítomny na cílovém systému. Jedná se o tyto knihovny:

- Boost verze 1.58 a vyšší: jedná se o sadu pomocných C++ knihoven například vhodných pro vícevláknové programování.
- GeographicLib verze 1.37 a vyšší: geodetické výpočty, převody mezi souřadnými systémy, gravitační výpočty.
- Crypto++ verze 5.6.1 a vyšší: otevřená implementace různých kryptografických algoritmů.

Pro běh na zařízení ARM by bylo potřeba tyto závislosti cross-kompilovat. Na webu Vanetzy je můžeme nalézt již ve vhodných verzích předkompilované pro zařízení Cohda MK5, které používá stejnou architekturu jako naše deska, takže je můžeme použít. Dále je potřeba vytvořit CMake konfigurační skript pro konfiguraci toolchainu pro následnou kompilaci. Tato a další potřebné úpravy čekají na přijetí do hlavní větve Vanetzy jako pull request [76]. Pro detailní instrukce přípravy sestavení a samotné kompilace viz přílohu A.

Pokud je potřeba sestavit knihovnu pro použití v OS Windows pomocí toolchainu Visual Studio, je nutné ve výsledném projektu provést několik úprav, aby se kompilace úspěšně zdařila.

- U security modulu se musí změnit standard kompilace na C++17,

### 3. REALIZACE

---

- U modulu `asn1_support` je potřeba definovat direktivu preprocesoru `_USE_MATH_DEFINES`, neboť používá symboly `M_E` a `M_PI`, které dle C standardu nejsou v headeru `math.h`.
- V některých modulech je potřeba definovat `NOMINMAX` pro preprocesor.
- Pokud sestavujeme knihovnu jako sdílené DLL, musí být zapnuto CMake nastavení `CMAKE_WINDOWS_EXPORT_ALL_SYMBOLS`.

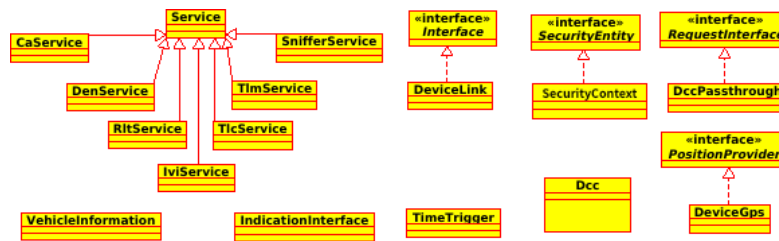
Implementace CMake makra `CMAKE_WINDOWS_EXPORT_ALL_SYMBOLS` obsahuje chybu, kdy exportuje některé symboly, které jsou již exportované standardní C++ knihovnou. Na toto narazíme, pokud chceme Vanetzu sestavit jako sdílenou DLL knihovnu. Existují dvě různá řešení, buďto odstranit tyto symboly ze vzniknuvšího `.def` souboru, kde jsou exportovány, nebo zapnutí možnosti linkeru `FORCE_MULTIPLE`, která zabrání selhání linkování při vícenásobné definici symbolu. Dále musíme provést jisté úpravy v samotném zdrojovém kódu knihovny.

- Přidání dummy proměnných do sjednocení v souboru `vanetza/asn1/its/RegionalExtension.h`. Konkrétně se jedná o 16 výskytů v tomto souboru. Prázdné sjednocení a výčtové typy nejsou ve standardním C povoleny, ale kompilátoru `gcc` prázdné sjednocení nevadí, a proto jsou soubory generované takto. Je snaha tento krok přidat do skriptu přípravy instalace Vanetzy.
- Definice makra `GMTOFF()` v souboru `vanetza/asn1/support/GeneralizedTime.c` i pro platformu `_WIN32`. Může být použita například implementace `_get_timezone`.
- Při sestavení jako sdílené DLL je potřeba do všech modulů přidat C soubor, který includeje soubory s definicemi některých `asn` struktur. Je to z toho důvodu, že adresy symbolů, které jsou dynamicky nahrávány, nemohou být použity ve statickém inicializátoru.

#### 3.2.3 Propojení s API výrobce čipsetu

Dalším úkolem pro běh Vanetzy na daném zařízení je realizace propojení knihovny s API výrobce čipsetu. API je realizováno kernelovým modulem, který běží v zařízení a pomocí něj komunikujeme na nižších vrstvách. Komunikace s modulem probíhá na linkové vrstvě. Navržená architektura obsahuje dva procesy: jeden pro příjem, pro DCC je potřeba další proces, který provádí měření vytížení kanálu (pro DSRC) a předává jej knihovně. K posílání není třeba další proces. V zařízení běží Yocto Linux, který se musí před prvním spuštěním zkompileovat. Z těchto důvodů je nutné API sestavovat z Linuxu. Do SDK verze 5.16 je nejnovější podporovaná distribuce Ubuntu 16.04. S tímto





Obrázek 3.6: Třídní diagram základních implementovaných tříd

je trochu problém, protože se jedná o systém z roku 2016 a standardně nepodporuje některé novější verze programů, zejména CMake, jehož novější verze je nutná pro správnou konfiguraci sestavení Vanetzy. Správná verze se dá doinstalovat z externího repozitáře. Na konci roku 2022 byla vydaná verze SDK 5.17 (Release 18), která již podporuje pouze Ubuntu 18.04 a Ubuntu 20.04, takže tyto problémy již není potřeba řešit.

Linux je tvořen volatílní partition, která se při spuštění zařízení vždy přehraje z flash. Dále obsahuje nevolatílní partition, ve které jsou data, která se za běhu mohou měnit. Aby se nemusela při každé změně filesystému kompilovat celá distribuce, tuto partition lze kompilovat samostatně a lze ji i samostatně přehrát. Systém se do zařízení nahrává přes USB pomocí utility STA Flash Loader, která je založena na aplikaci FLASHER-STM32 od STMicroelectronics; jedná se o GUI pro skript v PERLu. Hlavní obrazovka viz příloha C. Mód nahrávání (Craton bootuje z USB / Craton bootuje z flash paměti) se vybírá pomocí pinu, na desce MACH-V2X-IF je toto řešeno pomocí tlačítka vyvedeného na okraj desky. Nahrání dalších dat za běhu je možné buďto jejich zkopírováním z flash disku, nebo přes Ethernet, např. programem SCP.

### 3.2.4 Implementované služby a vzorové vyplňování základních typů zpráv

Hlavním výsledkem je implementace ukázkových služeb pro všechny typy podporovaných zpráv. Jsou podporovány CAM [32], DENM [21], SPATEM, MAP-EM, SREM/SSEM a IVIM [36] zprávy. O generování a příjem každého typu zprávy se stará služba, která je přes dispatchera portů zaregistrovaná k tomu konkrétnímu portu. Další službou je sniffer, který umožňuje přijímat / odesílat zprávy na libovolném BTP portu. Generování CAM zpráv funguje dle [32], viz 2.4.5.1. Do CAM zpráv se přidává GPS poloha, kterou zařízení přijímá ve formě NMEA řetězců. Pro přehled hlavních implementovaných tříd viz třídní diagram 3.6. Dále je vytvořen proces, který knihovně předává měření CBR pro implementaci DCC.



---

## Testování

Byly provedeny následující testy:

- Nezabezpečená komunikace vývojových desek pro Murata Craton 2 a Murata Sectar, viz sekce 4.1.
- Nezabezpečená komunikace vývojové desky MACH-V2X-IF a vývojové desky pro Murata Sectar, viz sekce 4.1.
- Zabezpečená komunikace vývojové desky MACH-V2X-IF a vývojové desky pro Murata Sectar, viz sekce 4.2.
- Zabezpečená komunikace vývojové desky MACH-V2X-IF v reálném provozu, viz sekce 4.3.

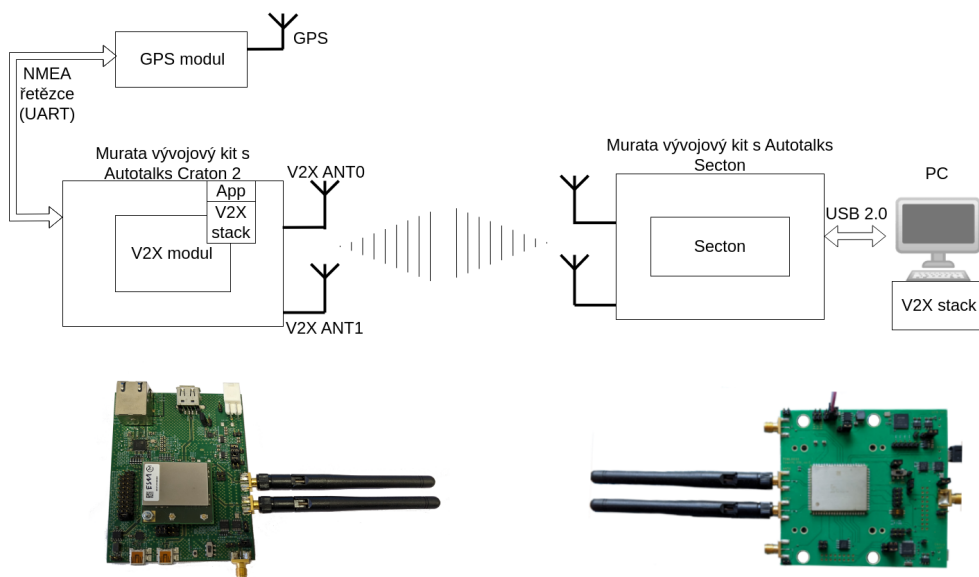
Byla otestována komunikace (odesílání a příjem) na dvou různých zařízeních. Nejprve tak, že v jednom běžel implementovaný stack (vývojová deska Murata pro Autotalks Craton 2, viz obr. D.2), druhé bylo ovládané z PC pomocí USB (vývojová deska pro Autotalks Sectar, viz obr D.1). Posléze byl test proveden na vývojové desce MACH-V2X-IF proti vývojové desce se Sectar, schéma této komunikace vidíme na obrázku 4.2. K vývojové desce s Cratonem byl připojen externí GPS přijímač, který poskytoval NMEA řetězce s údaji o čase a poloze. Zařízení správně posílala a dekodovala implementované zprávy. Na síťové a transportní vrstvě byly použity protokoly GeoNetworking a BTP. Správnost GeoNetworking paketů byla nezávisle ověřena online nástrojem<sup>3</sup>, CAM zprávy nástrojem<sup>4</sup>. Bylo ověřeno zpracování zabezpečených zpráv s vygenerovaným certifikátem. Na závěr byla deska MACH-V2X-IF otestovaná pro příjem zpráv v reálném provozu.

---

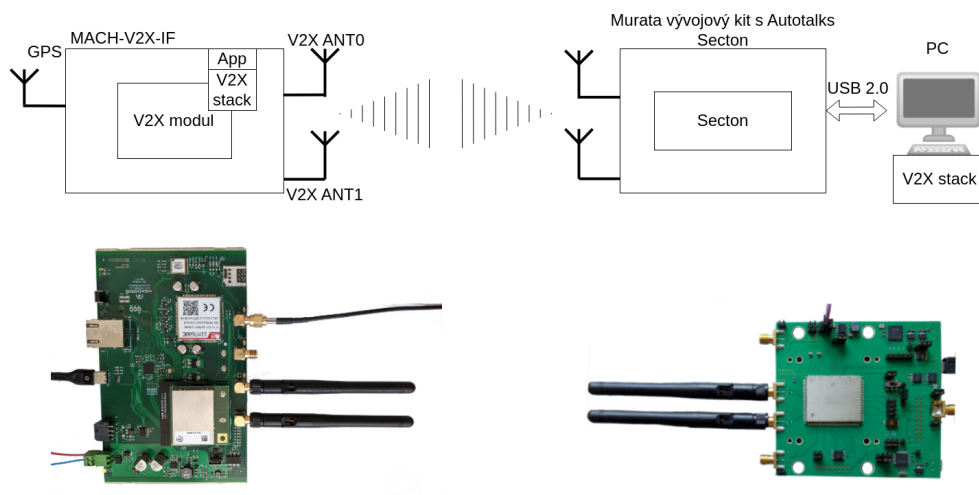
<sup>3</sup><https://werkzeug.dcaiti.tu-berlin.de/etsi/ts103097/>

<sup>4</sup><https://asn1.io/asn1playground/default.aspx>

#### 4. TESTOVÁNÍ



Obrázek 4.1: Ukázka běhu – schéma komunikace a fotografie desek



Obrázek 4.2: Ukázka běhu – schéma komunikace a fotografie desek

## 4.1 Základní komunikace s generováním zpráv

Nejprve byla komunikace testovaná na vývojových kitech. Pro ukázkou byla zapnuta služba generování CAM zpráv a bylo odzkoušeno, že zprávy jsou z jednoho zařízení odeslány a správně přijaty a dekodovány na druhém zařízení. Obě zařízení byla připojena k témuž počítači pro výpisy. Schéma komunikace viz obrázek 4.1. Sériové výpisy ze Ssectonu můžeme vidět na obrázku D.3. Vidíme, že v Ssectonu byla dekodovaná správná poloha (další údaje nejsou správné, protože nebyly testovací aplikací vyplněné). Stejný test byl proveden mezi deskou Murata a deskou MACH-V2X-IF, pro schéma viz obrázek 4.2. Sériový výstup desky MACH-V2X-IF je na obr. D.4. Dále bylo postupně zapínáno generování dalších typů zpráv a bylo ověřeno, že jak vývojový kit tak vývojová deska MACH-V2X-IF generuje/přijímá CAM, DENM, MAPEM, SPATEM, SREM, SSEM a IVIM zprávy. Pokud by zprávy nebyly správně dekodované, program by vypsal chybu. Výpis z tohoto testu je na obrázku D.5.

## 4.2 Zabezpečená komunikace

Bylo otestované generování a dekodování podepisované komunikace za použití vygenerovaných ukázkových certifikátů. Schéma opět viz obrázky 4.1 a 4.2. Program pro generování certifikátů je implementován od autorů knihovny Vanetza jako jedna z ukázkových aplikací `certify`. Příkazy pro vygenerování ukázkových soukromých klíčů a certifikátů kořenové autority, autorizační autority a zařízení:

```
./certify generate-key root.key
./certify generate-root --subject-key root.key root.cert
./certify generate-aa --sign-key root.key \
    --sign-cert root.cert \
    --subject-key aa.key aa.cert
./certify generate-ticket --sign-key aa.key \
    --sign-cert aa.cert \
    --subject-key ticket.key ticket.cert \
    --cam-permissions 1111111111111100
```

Pro další informace viz dokumentaci knihovny Vanetza. Při reálném použití by měl být exportován veřejný klíč z HSM modulu v použitém zařízení, toto nebylo testováno. Takto může vypadat konfigurační soubor pro ukázkovou aplikaci:

```
certificate-file cert/ticket.cert
key-file cert/ticket.key
chain-certificate-file cert/aa.cert
trusted-certificate-file cert/root.cert
```

Pro podrobnější popis viz příloha B. Dále je třeba mít v předchozím kroku vygenerované soubory soubory ve složce `cert`. Při spuštění ukázkové aplikace s parametrem `strict` je zapnuta striktní dekapulace paketů. Pokud je vše nastaveno správně, komunikace by měla probíhat jako v předchozím případě. Hláška

```
Router dropped packet, reason: Decap_Unsuccessful_Strict (6)
```

znamená, že se dekapulování paketu nepovedlo. Nejčastější příčinou je roz-synchronizování hodin mezi vysílající a přijímající stanicí. Pokud se čas syn-chronizuje s GPS, toto by nemělo nastat.

### 4.3 Test v reálném provozu

Komunikační deska MACH-V2X-IF byla testovaná v reálném provozu na Pražském okruhu mezi silnicemi D5 a D1 v obou směrech a dále na jižní části Městského okruhu. Umístění zařízení ve vozidle můžeme vidět na obrázku D.6. Při prvních pokusech nebyl při vytváření socketu správně zapsán EtherType 0x8947 pro GeoNetworking (který je přenášen v rámci SNAP rozšíření Ethernetu), takže nebyla přijímána žádná data. Později byl tento omyl napraven, takže se nakonec povedlo přijmout mezivozidlovou komunikaci, bohužel stack ji ale nedokázal dekodovat. Ukázalo se totiž, že Vanetza podporuje komunikaci dle ETSI TS 103 097 v1.2.1, která ale není kompatibilní s novější zachycenou verzí v1.3.1/2.1.1. Online nástroj z minulé sekce tyto novější verze také nepodporuje. Rámce byly tedy následně offline zpracované pomocí programu Wireshark (viz obr. D.8, který již ve výchozím stavu podporuje GeoNetworking. Příklad dat zachycených na linkové vrstvě je na obrázku D.7. Bylo zjištěno, že byly přijaty jen CAM zprávy od vozidel, takže od infrastruktury zařízení nic nezachytilo. Zdá se tedy, že v C-Roads lokaci DT0 (viz kap. 2.2) na D0 buďto již není instalován, nebo není v provozu.

### 4.4 Zhodnocení testování

Implementovaný software byl úspěšně otestován, nejprve s vývojovými deskami pro vybrané moduly a dále s poskytnutou komunikační deskou. Nepodepsaná i podepsaná komunikace je v pořádku dekodovaná. V reálném provozu se ukázalo, že jednotka komunikuje, ale použitý stack nemá implementovaný nejnovější standard pro bezpečnost. Tento výsledek dává možnost k budoucímu rozšíření knihovny Vanetza pro standard ETSI TS 103 097 v1.3.1, resp. v2.1.1. Hlavní autor knihovny na tomto již pracuje a je v plánu s ním na tom spolupracovat.

---

## Závěr

Prvním cílem práce bylo zmapovat standardizaci V2X komunikace. Dalším bylo vybrání vhodné komunikační technologie pro vyvíjenou desku pro V2X komunikaci. Dále měla být vytvořena softwarová implementace podle vybraných standardů na reálném zařízení. Toto bylo nejdříve provedeno na vývojovém kitu pro modul Murata s čipsetem Autotalks, později na komunikační desce MACH-V2X-IF. Nakonec se na výsledném software na zařízení měla otestovat správná funkcionality.

Lze konstatovat, že všechny tyto vytyčené cíle se podařilo splnit. Výsledné řešení bylo implementováno a otestováno na komunikační desce MACH-V2X-IF. Zařízení je v tomto stavu připravené pro laboratorní použití.

Rozšíření práce by bylo možné, neboť použitá platforma umožňuje hardwarovou akceleraci použitých kryptografických operací, které jsou v současné podobě implementovány softwarově pomocí knihovny Crypto++. Další rozšíření může spočívat například v přidání dalších typů zpráv, až bude přesně definovaná jejich podoba pro use-cases druhého dne a dále. Zásadním rozšířením by bylo přidání podpory podepisované komunikace dle ETSI 103 097 v2.1.1 (namísto aktuálně implementované verze 1.2.1) do knihovny Vanetza, protože při testování bylo zjištěno, že reálně nasazené jednotky třetích stran tento standard implementují.

Při psaní práce jsem nabyl detailní znalosti o V2X komunikacích a jejich standardizaci. Dále jsem se naučil cross-kompilovat složitější aplikace pro embedded Linux.





---

## Bibliografie

1. EUROPEAN PARLIAMENT, Council of the European Union. *Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport Text with EEA relevance*. 2010. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/40/oj>.
2. CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM. *C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems and Services* [online] [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.car-2-car.org/about-c-its/>.
3. MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *C-Roads* [online] [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.its-knihovna.cz/cz/knihovna/projekty/c-roads>.
4. C-ROADS. *C-ROADS CZECH REPUBLIC* [online] [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.c-roads.eu/pilots/core-members/czech-republic/Partner/project/show/c-roads-czech-republic.html>.
5. C-ROADS CZ. *Use Case katalog* [online]. 2021 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: [https://www.its-knihovna.cz/CDV/media/ITS-Knihovna/Projekty%20a%20studie/C\\_ROADS/Technick%c3%a9%20normy%20a%20standardy/C-Roads-CZ-Use-Case-katalog-v2-0.pdf](https://www.its-knihovna.cz/CDV/media/ITS-Knihovna/Projekty%20a%20studie/C_ROADS/Technick%c3%a9%20normy%20a%20standardy/C-Roads-CZ-Use-Case-katalog-v2-0.pdf).
6. C-ROADS. *The C-Roads Platform: An overview of harmonised C-ITS deployment in Europe* [online]. 2021 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: [https://www.c-roads.eu/fileadmin/user\\_upload/media/Dokumente/C-Roads\\_Brochure\\_2021\\_final\\_2.pdf](https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-Roads_Brochure_2021_final_2.pdf).
7. LOKAJ, Zdenek; SROTYR, Martin; VANIS, Miroslav; BROZ, Jiri. Technical part of evaluation solution for cooperative vehicles within C-ROADS CZ project. In: *2020 Smart City Symposium Prague (SCSP)*. 2020, s. 1–5. Dostupné z DOI: 10.1109/SCSP49987.2020.9133885.

8. C-ROADS. *C-ROADS Annual pilot overview report 2021* [online]. 2022 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: [https://www.c-roads.eu/fileadmin/user\\_upload/media/Dokumente/M22\\_Annual\\_pilot\\_overview\\_report\\_2021\\_v2.1\\_FINAL.pdf](https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/M22_Annual_pilot_overview_report_2021_v2.1_FINAL.pdf).
9. 5GAA. *5GAA Petition for Waiver to Allow Deployment of Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) Technology in the 5.9 GHz Band; GN Docket No. 18-357* [online] [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://ecfsapi.fcc.gov/file/104030451515194/5GAA%20Band%20Plan%20Ex%20Parte%20-%20FINAL.pdf>.
10. RCRWIRELESS. *DC Appeals court upholds FCC reallocation of 5.9 GHz* [online] [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.rcrwireless.com/20220815/spectrum/dc-appeals-court-upholds-fcc-reallocation-of-5-9-ghz>.
11. EUROPEAN COMMISSION. *COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) supplementing Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the deployment and operational use of cooperative intelligent transport systems* [online]. Brusel, Belgie: European Commission, 2019. Dostupné také z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9a2fe08f-4580-11e9-a8ed-01aa75ed71a1/>.
12. MANNONI, Valerian; BERG, Vincent; SESIA, Stefania; PERRAUD, Eric. A Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X. In: *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*. 2019, s. 1–5. Dostupné z DOI: 10.1109/VTCSpring.2019.8746562.
13. MAGLOGIANNIS, Vasilis; NAUDTS, Dries; HADIWARDYO, Seilendria; AKKER, Daniel van den; MARQUEZ-BARJA, Johann; MOERMAN, Ingrid. Experimental V2X Evaluation for C-V2X and ITS-G5 Technologies in a Real-Life Highway Environment. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021, s. 1–1. Dostupné z DOI: 10.1109/TNSM.2021.3129348.
14. PETROV, Tibor; SEVCIK, Lukas; POČTA, Peter; DADO, Milan. A Performance Benchmark for Dedicated Short-Range Communications and LTE-Based Cellular-V2X in the Context of Vehicle-to-Infrastructure Communication and Urban Scenarios. *Sensors*. 2021, roč. 21, s. 5095. Dostupné z DOI: 10.3390/s21155095.
15. ABOUD, Khadige; OMAR, Hassan Aboubakr; ZHUANG, Weihua. Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016, roč. 65, č. 12, s. 9457–9470. Dostupné z DOI: 10.1109/TVT.2016.2591558.

16. ETSI EN 302 665 V1.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2010. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/302665/01.01.01\\_60/en\\_302665v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302665/01.01.01_60/en_302665v010101p.pdf).
17. ETSI EN 302 571 V2.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2017. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302500\\_302599/302571/02.01.01\\_60/en\\_302571v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf).
18. GYAWALI, Sohan; XU, Shengjie; QIAN, Yi; HU, Rose Qingyang. Challenges and Solutions for Cellular Based V2X Communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021, roč. 23, č. 1, s. 222–255. Dostupné z DOI: 10.1109/COMST.2020.3029723.
19. NAIK, Gaurang; CHOUDHURY, Biplav; PARK, Jung-Min. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications. *IEEE Access*. 2019, roč. 7, s. 70169–70184. Dostupné z DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
20. ETSI TS 102 792 V2.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Mitigation techniques to avoid interference between European CEN Dedicated Short Range Communication (CEN DSRC) equipment and Intelligent Transport Systems (ITS) operating in the 5 GHz frequency range [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2015. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102700\\_102799/102792/01.02.01\\_60/ts\\_102792v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102700_102799/102792/01.02.01_60/ts_102792v010201p.pdf).
21. ETSI EN 302 637-3 V1.2.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2014. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/30263703/01.02.01\\_30/en\\_30263703v010201v.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263703/01.02.01_30/en_30263703v010201v.pdf).
22. FESTAG, Andreas. Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2015, roč. 132. Dostupné z DOI: 10.1007/s00502-015-0343-0.
23. ETSI EN 302 636-2 V1.2.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 2: Scenarios [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute

- (ETSI), 2013. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/30263602/01.02.01\\_60/en\\_30263602v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263602/01.02.01_60/en_30263602v010201p.pdf).
24. ETSI EN 302 636-4-1 V1.4.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2020. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/3026360401/01.04.01\\_60/en\\_3026360401v010401p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/3026360401/01.04.01_60/en_3026360401v010401p.pdf).
25. 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; Access layer part [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2018. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102600\\_102699/102687/01.02.01\\_60/ts\\_102687v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102687/01.02.01_60/ts_102687v010201p.pdf).
26. ETSI TS 102 636-4-2 V1.4.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 2: Media-dependent functionalities for ITS-G5 [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102600\\_102699/1026360402/01.04.01\\_60/ts\\_1026360402v010401p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/1026360402/01.04.01_60/ts_1026360402v010401p.pdf).
27. ETSI EN 302 663 V1.3.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2020. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/302663/01.03.01\\_60/en\\_302663v010301p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.01_60/en_302663v010301p.pdf).
28. ETSI EN 302 636-5-1 V2.1.0. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2017. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/3026360501/02.01.00\\_20/en\\_3026360501v020100a.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/3026360501/02.01.00_20/en_3026360501v020100a.pdf).
29. ETSI TS 102 965 V2.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Application Object Identifier (ITS-AID); Registration; Release 2 [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021. Dostupné také z: <https://www.etsi.org/deliver/>

- etsi\_ts/102900\_102999/102965/02.01.01\_60/ts\_102965v020101p.pdf.
30. ISO 17419:2018. *Intelligent transport systems — Cooperative systems — Globally unique identification [online]*. Ženeva, Švýcarsko: International Organization for Standardization (ISO), 2018. Dostupné také z: <https://www.iso.org/standard/70077.html>.
  31. ETSI TS 103 248 V2.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); GeoNetworking; Port Numbers for the Basic Transport Protocol (BTP); Release 2 [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/103200\\_103299/103248/02.01.01\\_60/ts\\_103248v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103200_103299/103248/02.01.01_60/ts_103248v020101p.pdf).
  32. ETSI EN 302 637-2 V1.4.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2019. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/30263702/01.04.01\\_60/en\\_30263702v010401p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.04.01_60/en_30263702v010401p.pdf).
  33. ETSI TS 102 894-2 V2.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary; Release 2 [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2022. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102800\\_102899/10289402/02.01.01\\_60/ts\\_10289402v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10289402/02.01.01_60/ts_10289402v020101p.pdf).
  34. ETSI TR 103 562 V2.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2 [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2019. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/103500\\_103599/103562/02.01.01\\_60/tr\\_103562v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103562/02.01.01_60/tr_103562v020101p.pdf).
  35. ISO/TS 19091:2019. *Intelligent transport systems — Cooperative ITS — Using V2I and I2V communications for applications related to signalized intersections*. Ženeva, Švýcarsko: International Organization for Standardization (ISO), 2019. Dostupné také z: <https://www.iso.org/standard/73781.html>.
  36. ETSI TS 103 301 V1.3.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2020. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/103300\\_103399/103301/01.03.01\\_60/ts\\_103301v010301p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103300_103399/103301/01.03.01_60/ts_103301v010301p.pdf).

37. SAE J2735\_202007. *V2X Communications Message Set Dictionary*. Warrendale, Spojené státy americké: SAE International (SAE), 2020. Dostupné také z: [https://www.sae.org/standards/content/j2735\\_202007/](https://www.sae.org/standards/content/j2735_202007/).
38. ISO/TS 19321:2020. *Intelligent transport systems — Cooperative ITS — Dictionary of in-vehicle information (IVI) data structures [online]*. Ženeva, Švýcarsko: International Organization for Standardization (ISO), 2020. Dostupné také z: <https://www.iso.org/standard/76974.html>.
39. ETSI TS 101 539-1 V1.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 1: Road Hazard Signalling (RHS) application requirements specification [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2013. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/101500\\_101599/10153901/01.01.01\\_60/ts\\_10153901v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_101599/10153901/01.01.01_60/ts_10153901v010101p.pdf).
40. ETSI TS 101 539-2 V1.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2018. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/101500\\_101599/10153902/01.01.01\\_60/ts\\_10153902v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_101599/10153902/01.01.01_60/ts_10153902v010101p.pdf).
41. ETSI TS 101 539-3 V1.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 3: Longitudinal Collision Risk Warning (LCRW) application requirements specification [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2013. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/101500\\_101599/10153903/01.01.01\\_60/ts\\_10153903v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_101599/10153903/01.01.01_60/ts_10153903v010101p.pdf).
42. ETSI TS 102 940 V2.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; ITS communications security architecture and security management; Release 2 [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102900\\_102999/102940/02.01.01\\_60/ts\\_102940v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102900_102999/102940/02.01.01_60/ts_102940v020101p.pdf).
43. ETSI TS 102 941 V1.4.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Trust and Privacy Management [online]*. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102900\\_102999/102941/01.04.01\\_60/ts\\_102941v010401p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102900_102999/102941/01.04.01_60/ts_102941v010401p.pdf).
44. C-ROADS CZ. *Specifikace systému [online]*. 2021 [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: [https://www.its-knihovna.cz/CDV/media/ITS-Knihovna/Projekty%20a%20studie/C\\_ROADS/Technick%c3%a9%20normy%20a%20standardy/C-Roads-CZ-Specifikace-systemu-v2-0.pdf](https://www.its-knihovna.cz/CDV/media/ITS-Knihovna/Projekty%20a%20studie/C_ROADS/Technick%c3%a9%20normy%20a%20standardy/C-Roads-CZ-Specifikace-systemu-v2-0.pdf).

45. CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM. *Guidance for day 2 and beyond roadmap* [online]. 2021 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: [https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General\\_Documents/C2CCC\\_WP\\_2072\\_RoadmapDay2AndBeyond\\_V1.2.pdf](https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2072_RoadmapDay2AndBeyond_V1.2.pdf).
46. C-ROADS. *Guidance for day 2 and beyond roadmap* [online]. 2016 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.c-roads.eu/pilots/implemented-services.html>.
47. ETSI TS 102 638 V1.1.1. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions* [online]. Sophia Antipolis, Francie: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2009. Dostupné také z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102600\\_102699/102638/01.01.01\\_60/tr\\_102638v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102638/01.01.01_60/tr_102638v010101p.pdf).
48. *GitLab*. ASN.1 module for Cooperative Awareness Basic Service [ETSI EN 302 637-2] [online] [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: [https://forge.etsi.org/rep/ITS/asn1/cam\\_en302637\\_2/-/tree/7ae4195d48dd468754a50f1a3bb0c2ce976ae15a](https://forge.etsi.org/rep/ITS/asn1/cam_en302637_2/-/tree/7ae4195d48dd468754a50f1a3bb0c2ce976ae15a).
49. ITU. Introduction to ASN.1 [online] [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.itu.int/en/ITU-T/asn1/Pages/introduction.aspx>.
50. JANEČEK, Jan. *Přednášky NI-IOT: 8. IoT application protocols - XML, JSON, ASN.1*. FIT ČVUT: Fakulta informačních technologií ČVUT, 2022. Dostupné také z: <https://courses.fit.cvut.cz/NI-IOT/lectures/08/index.html>.
51. HEINOVSKI, Julian; KLINGLER, Florian; DRESSLER, Falko; SOMMER, Christoph. Performance comparison of IEEE 802.11p and ARIB STD-T109. In: *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. 2016, s. 1–8. Dostupné z DOI: 10.1109/VNC.2016.7835923.
52. MARVELL. *Automotive Wireless: Wi-Fi, Bluetooth 5 and 802.11p Combo Solutions for Vehicle-to-Everything and In-Vehicle Infotainment* [online]. 2018 [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20181223204524/https://www.marvell.com/wireless/88W8987xA/>.
53. NXP. *Marvell 88W8987xA Wireless SoC Supports 802.11ac & 802.11p Wi-Fi, Bluetooth 5 for V2X & IVI Automotive Applications* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.cnx-software.com/2017/06/15/marvell-88w8987xa-wireless-soc-supports-802-11ac-802-11p-wifi-bluetooth-5-for-v2x-ivi-applications/>.
54. NXP. *88W8987 (Automotive): 2.4/5 GHz Dual-Band 1x1 Wi-Fi® 5 (802.11ac) + Bluetooth® 5.2 Solution* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/products/wireless/wi-fi-plus-bluetooth-plus-802-15-4/88w8987-automotive-2-4-5-ghz-dual-band-1x1-wi-fi-5-802-11ac-plus-bluetooth-5-2-solution:88W8987A>.

55. FILIPPI, Alessio; MOERMAN, Kees; MARTINEZ, Vincent; TURLEY, Andrew; HARAN, Onn; TOLEDANO, Ron. *IEEE802.11p ahead of LTE-V2V for safety applications*. Eindhoven, Nizozemsko a Kfar Netter, Izrael: NXP Semicond. a Autotalks, 2017. Dostupné také z: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/LTE-V2V-WP.pdf>.
56. FILIPPI, Alessio; MOERMAN, Kees; ALEXANDER, Gerardo Daalderop Paul D.; SCHOBER, Franz; PFLIEG, Werner. *Ready to roll: Why 802.11p beats LTE and 5G for V2x*. Eindhoven, Nizozemsko, Wayville, Austrálie a Mnichov, Německo: NXP Semicond., Cohda Wireless a Siemens, 2016. Dostupné také z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab5935c545ee430a94910921b8ec75f3c17bab6c/its-g5-ready-to-roll-en.pdf>.
57. NXP. *Software Defined Radio Processor for V2X Communication – SAF-5100* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/products/wireless/dsrc-safety-modem/software-defined-radio-processor-for-v2x-communication:SAF5100>.
58. AUTOTALKS. *CRATON2* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://auto-talks.com/products/craton2/>.
59. AUTOTALKS. *SECTON* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://auto-talks.com/products/secton/>.
60. QUALCOMM. *Qualcomm C-V2X 9150* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.qualcomm.com/products/application/automotive/qualcomm-c-v2x-9150>.
61. SIMCOM. *Automotive Modules: SIM8800X Series* [online] [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.simcom.com/product/SIM8800-Series.html>.
62. QUECTEL. *Automotive Modules* [online] [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.quectel.com/product-category/automotive-modules>.
63. UNEX. *The DSRC-V2X and C-V2X for Connected Vehicles and C-ITS Systems* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.unex.com.tw/v2x/>.
64. MURATA. *Murata Announces Advanced V2X Solution Powered by Autotalks' Chipset* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.murata.com/en-eu/news/connectivitymodule/v2x/2022/1121>.
65. COHDA WIRELESS. *V2X - Cohda Wireless* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.cohdawireless.com/sectors/v2x/>.
66. BOSCH MOBILITY SOLUTIONS. *V2X connectivity solutions for commercial vehicles* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/connectivity/v2x-connectivity-solutions-cv/>.



- 
67. COMMSIGNIA. *Powerful V2X Onboard Unit* [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.commsignia.com/products/obu/>.
  68. VECTOR. *VN4610: Powerful Interface for Car2x/V2X Communication* [online] [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.vector.com/int/en/products/products-a-z/hardware/network-interfaces/vn4610/>.
  69. VORONOV, Alex. *alexvoronov/geonetworking: ETSI ITS G5 GeoNetworking stack, in Java: CAM-DENM / ASN.1 PER / BTP / GeoNetworking* [online] [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://github.com/alexvoronov/geonetworking>.
  70. LAUX, Sven; PANNU, Gurjashan Singh; SCHNEIDER, Stefan; TIEMANN, Jan; KLINGLER, Florian; SOMMER, Christoph; DRESSLER, Falko. Demo: OpenC2X — An open source experimental and prototyping platform supporting ETSI ITS-G5. In: *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. 2016, s. 1–2. Dostupné z DOI: 10.1109/VNC.2016.7835955.
  71. KLINGLER, Florian. *florianklingler/OpenC2X-standalone: Open Source Experimental and Prototyping Platform Supporting ETSI ITS-G5* [online] [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://github.com/florianklingler/OpenC2X-standalone>.
  72. *GitHub*. Open Source Experimental and Prototyping Platform Supporting ETSI ITS-G5 [online] [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://github.com/florianklingler/OpenC2X-standalone>.
  73. RIEBL, Raphael. *riehl/vanetza: Open-source implementation of the ETSI C-ITS protocol stack* [online] [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://github.com/riehl/vanetza>.
  74. COHDA WIRELESS. *V2X - Stack* [online] [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.cohdawireless.com/solutions/v2x-stack/>.
  75. HEVESSY, Karel. *Adding SREM, SSEM and IVIM messages* [online]. GitHub, 2022 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://github.com/riehl/vanetza/pull/161>.
  76. HEVESSY, Karel. *socktap: Adding the Autotalks link layer* [online]. GitHub, 2022 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://github.com/riehl/vanetza/pull/151>.



---

# Kompilace knihovny Vanetza pro běh na zařízení Autotalks

Zde je popsáno sestavení knihovny pro použití se zařízením Autotalks Craton 2 / Secton. Build je třeba provádět na počítači s Ubuntu 16.04, pro SDK verze 5.17.0 a výše je potřeba Ubuntu 18.04 nebo 20.04.

Předpokládáme, že uživatel má v domovském adresáři složku `vanetza`, ve které je rozbalen buď repozitář [73] s přidanými soubory z pull requestu [76] nebo verze z této práce, kde jsou již zahrnuté potřebné konfigurační soubory. Dále by měl být vytvořen symbolický link `autotalks_craton_api`, který směřuje do kořenového adresáře Autotalks API (složka, kde je API zkompileováno). Další kroky se liší podle použitého čipsetu.

## A.1 Kompilace pro Craton 2

Vytvořte v adresáři `vanetza` podsložku, ve které bude probíhat build. Dále se musí v CMake nastavit cesta ke křížovému kompilátoru a cesta k dalším závislostem knihovny. Závislosti mohou být buďto ručně zkompileované nebo lze použít jejich předkompilované verze ze stránek knihovny. Zde předpokládáme, že jsou použité předkompilované verze (Boost 1.71.0, GeographicLib 1.50, Crypto++ 8.2.0), které jsou rozbalené ve složce `$HOME/vanetza-deps`. Pozor na to, že po rozbalení je třeba odstranit adresář CMake, jinak kompilace neprojde. Popsané kroky a samotnou make kompilaci lze provést těmito příkazy v adresáři `vanetza`:

```
mkdir vanetza/vanetza-build
cd vanetza/vanetza-build
cmake $HOME/vanetza \
  -DCMAKE_TOOLCHAIN_FILE=$HOME/vanetza/cmake/ \
  Toolchain-Autotalks-Craton.cmake \
  -DCMAKE_FIND_ROOT_PATH=$HOME/vanetza-deps \
```

## A. KOMPILACE KNIHOVNY VANETZA PRO BĚH NA ZAŘÍZENÍ AUTOTALKS

---

```
-DCMAKE_INSTALL_RPATH=\$ORIGIN/./lib \  
-DCMAKE_INSTALL_PREFIX=$HOME/vanetza-dist  
-DBUILD_SOCKTAP=ON \  
-DSOCKTAP_WITH_AUTOTALKS=ON
```

make

Tímto je zkompileovaná knihovna a navíc ukázková aplikace `socktap`, která generuje V2X provoz. Příkazem `make install` se binární soubory zkopírují do složky `$HOME/vanetza-dist`. Binárky a knihovny se nyní dají zkopírovat do Cratonu. Program `socktap` musí být spuštěn jako Autotalks příklady, neboť jsou potřeba jejich konfigurační soubory. Dále je třeba jej spouštět s argumentem `-l autotalks` pro správný výběr linkové vrstvy.

### A.2 Kompilace pro Serton

V tomto případě jsou kroky stejné jako běžná kompilace Vanetzy, protože kód běží v hostitelském počítači. Jedinou změnou je definice CMake symbolů pro použití linkové vrstvy Autotalks. Přípravu a sestavení lze provést těmito příkazy:

```
mkdir vanetza/vanetza-build  
cd vanetza/vanetza-build  
cmake $HOME/vanetza \  
-DBUILD_SOCKTAP=ON \  
-DSOCKTAP_WITH_AUTOTALKS=ON
```

make

Program `socktap` pak může být spuštěn ze stejného adresáře jako Autotalks ukázky, protože jsou potřeba jejich konfigurační soubory. Opět jej musíme spouštět s argumentem `-l autotalks` pro správný výběr linkové vrstvy.

Pro kompletní dokumentaci viz [76].

## Použití ukázkové aplikace

Seznam parametrů ukázkové aplikace:

```
Použití: ./CratonFacilities [--help|-h|--h|-help|?]  
          [--rx-cam-verbosity=X]  
          [--tx-cam-verbosity=Y]  
          [cert-config=path-to-cert-config]  
          [ca|den|rlt|tlm|tlc_srem|tlc_ssem|ivi]  
          [freq=Z] [rx-dump] [tx-dump] [strict]  
          [sniffer-print]  
např. ./CratonFacilities --rx-cam-verbosity=1 --tx-cam-verbosity=0  
--{r|t}x-cam-verbosity=X Volba podrobnosti výpisu CAM zpráv.  
                        Možné hodnoty: 0 až 2  
cert-config=...       Cesta ke konfiguračnímu souboru  
                        certifikátů  
ca,den,...            Které služby mají být spuštěny  
                        (a generovat své zprávy)  
freq=...              Volba frekvence kanálu v MHz  
                        (hodnota mezi 5855 a 5925);  
                        výchozí hodnota 5880  
tx-dump               Vypisovat všechny odesílané  
                        GeoNetworking pakety  
rx-dump               Vypisovat všechny přijaté  
                        GeoNetworking pakety  
strict                Zapnutí striktní dekapulace paketů  
                        (bezpečnostní entita je použita)  
sniffer-print         Dekódovat ve snifferu některé  
                        podporované zprávy  
--help|-h|--h|-help|? Zobrazí nápovědu
```

Konfigurační soubor pro certifikáty (výchozí název certConfig.txt, alternativně viz parametr cert-config výše):

## B. POUŽITÍ UKÁZKOVÉ APLIKACE

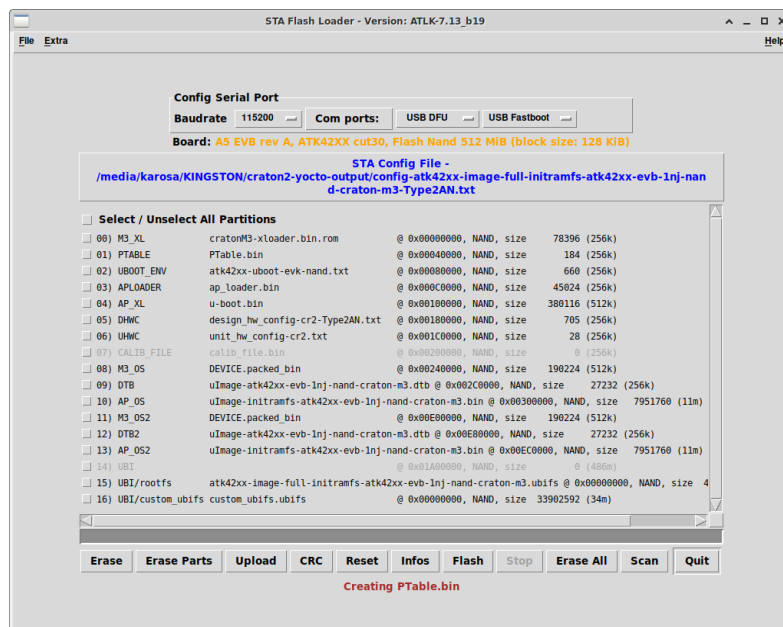
---

```
# Pokud je první znak #, řádek je komentář
# Formát je parametr hodnota
# Parametr může být:
#   certificate-file
#     název souboru s certifikátem k podepisování
#   key-file
#     název souboru se soukromým klíčem
#     (použitým v certifikátu výše)
#   chain-certificate-file
#     název souboru s certifikátem certifikační autority,
#     použité v cestě ke kořenu
#   trusted-certificate-file
#     název souboru s kořenovým certifikátem
certificate-file cert/ticket.cert
key-file cert/ticket.key
chain-certificate-file cert/aa.cert
trusted-certificate-file cert/root.cert
```

Konfigurační soubor pro parametry vozidla (musí mít název vehicleConfig.txt):

```
# Pokud je první znak #, řádek je komentář
# Formát je parametr hodnota
# Parametr může být:
#   w
#     šířka vozidla v milimetrech (hodnota od 0 do 5000)
#   l
#     délka vozidla v milimetrech (hodnota od 0 do 10000)
w 1800
l 5000
```

# Ukázka programu STA-FlashLoader

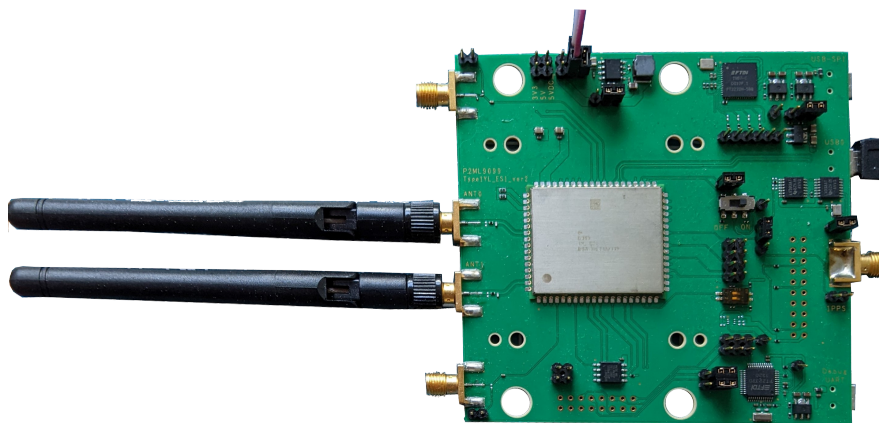


Obrázek C.1: Hlavní obrazovka multiplatformního programu STA-FlashLoaderu určeného pro nahrávání software do SoC Autotalks Craton 2

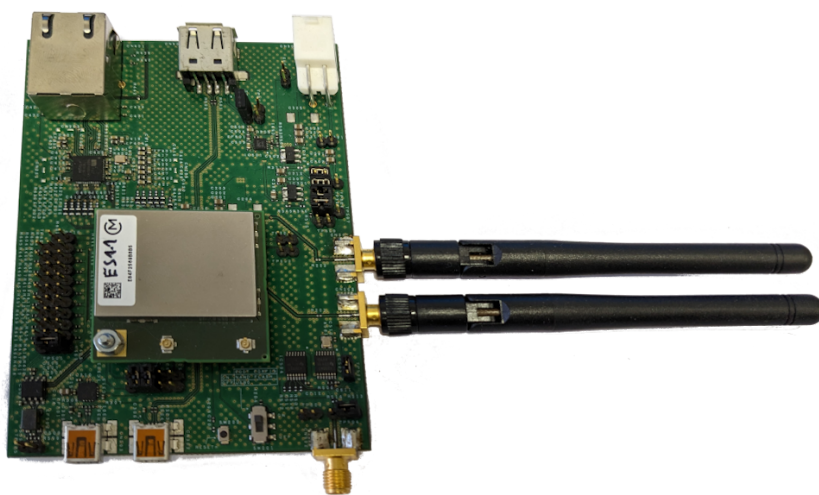




## Obrázky z testování



Obrázek D.1: Vývojová deska Murata pro modul s Autotalks Sector



Obrázek D.2: Vývojová deska Murata pro modul s Autotalks Craton 2

---

```
karel@karel-VirtualBox:~/secton/bin$ sudo ./murata-craton-2
cam --rx-cam-verbosity=2
Runtime started.
# Výstup inicializace zkrácen
WDM frequency for channel A: 5880 MHz
Interface 0 attached
MAC: 92:56:92:0:0:2
Rx pthread_create success.
CBR pthread_create success.
Failed to open file 'vehicleInfo.txt'.
Failed to open file 'certConfig.txt'.
Rx vlakno
CA service enabled
Receive successful 2022-May-10 08:29:32.840252
Received packet from d8:10:68:ab:51:91, 580 B
CAM application received a packet with decodable content
CAM received.
It contains: ITS PDU Header:
  Protocol Version: 2
  Message ID: 2
  Station ID: 1
  CoopAwareness:
    Generation Delta Time: 63901
  Basic Container:
    Station Type: 5
    Reference Position:
      Longitude: 145095679
      Latitude: 500828030
      Semi Major Orientation: 0
      Semi Major Confidence: 190
      Semi Minor Confidence: 160
      Altitude [Confidence]: 28530 [9]
    High Frequency Container [Basic Vehicle]:
      Heading [Confidence]: 1 [10]
      Speed [Confidence]: 0 [1]
      Drive Direction: 2
      Longitudinal Acceleration: 161
      Vehicle Length [Confidence Indication]: 1022 [0]
      Vehicle Width: 61
      Curvature [Confidence]: 0 [7]
      Curvature Calculation Mode: 0
      Yaw Rate [Confidence]: 32767 [8]
    Low Frequency Container: yes
  CA Service sending #0: 2022-May-10 08:29:32.849094
  Real sending #0: 2022-May-10 08:29:32.850831
^CTermination requested.
karel@karel-VirtualBox:~/secton/bin$
```

Obrázek D.3: Příjem CAM zprávy vývojovém kitu pro Autotalks Sectar

## D. OBRÁZKY Z TESTOVÁNÍ

---

```
root@autotalks:/usr/bin# ./murata-craton-2 cam --tx-cam-
verbosity=2
# Výstup z inicializace zkrácen
WDM frequency for channel A: 5880 MHz
Interface 0 attached
MAC: d8:10:68:ab:51:91
Rx pthread_create success.
Rx vlakno
CBR pthread create success.
Initiating POTI device /dev/ttyAMA1, baud rate 9600, cycle
enders ($XXGGA, $XXGLL)
OK: external gnss (/dev/ttyAMA1) initialized
$PSTMGETPAR,2500
RTK FW version:
Failed to open file 'vehicleInfo.txt'.
Failed to open file 'certConfig.txt'.
CA service enabled
Applying new date; command: date @1671697438
Tue May 10 08:23:58 UTC 2022
nmea_parse_parametric failed rc= 2 !!!!!
CAM generated.
It contains:
ITS PDU Header:
Protocol Version: 2
Message ID: 2
Station ID: 1
CoopAwareness:
Generation Delta Time: 58525
Basic Container:
Station Type: 5
Reference Position:
Longitude: 145094180
Latitude: 500828250
Semi Major Orientation: 0
Semi Major Confidence: 520
Semi Minor Confidence: 350
Altitude [Confidence]: 28270 [10]
High Frequency Container [Basic Vehicle]:
Heading [Confidence]: 0 [10]
Speed [Confidence]: 0 [1]
Drive Direction: 2
Longitudinal Acceleration: 161
Vehicle Length [Confidence Indication]: 1022 [0]
Vehicle Width: 61
Curvature [Confidence]: 0 [7]
Curvature Calculation Mode: 0
Yaw Rate [Confidence]: 32767 [8]
Low Frequency Container: yes
CA Service sending #0: 2022-May-10 08:23:59.903795
Real sending #0: 2022-May-10 08:23:59.941533
^CTermination requested.
Deleting ok
root@autotalks:/usr/bin#
```

Obrázek D.4: Příjem CAM zprávy na desce MACH-V2X-IF s čipsetem Auto-talks Craton 2

```
root@autotalks:/usr/bin# ./murata-craton-2 no-beacons sniffer
Runtime started.
# Výstup inicializace zkrácen
WDM frequency for channel A: 5880 MHz
Interface 0 attached
MAC: d8:10:68:ab:51:91
Rx pthread_create success.
CBR pthread_create success.
Rx vlakno
Initiating POTI device /dev/ttyAMA1, baud rate 9600, cycle enders ($XXGGA, $XXGLL)
OK: external gnss (/dev/ttyAMA1) initialized
$PSTMGTPAR,2500
RTK FW version:
Failed to open file 'vehicleInfo.txt'.
Failed to open file 'certConfig.txt'.
Sniffer mode enabled
Wed May 28 10:36:11 UTC 2022
Receive successful 2022-May-28 10:36:24.699055
Received packet from 92:56:92:00:00:02, 561 B
Sniffer received a message on CA port (CAM).
Receive successful 2022-May-28 10:36:32.103641
Received packet from 92:56:92:00:00:02, 426 B
Sniffer received a message on DEN port (DENM).
Receive successful 2022-May-28 10:36:42.095302
Received packet from 92:56:92:00:00:02, 383 B
Sniffer received a message on TLM port (SPATEM).
Receive successful 2022-May-28 10:36:49.102311
Received packet from 92:56:92:00:00:02, 371 B
Sniffer received a message on RLT port (MAPEM).
Receive successful 2022-May-28 10:36:57.090496
Received packet from 92:56:92:00:00:02, 377 B
Sniffer received a message on TLC port (SREM).
Receive successful 2022-May-28 10:37:04.094466
Received packet from 92:56:92:00:00:02, 379 B
Sniffer received a message on TLC port (SSEM).
Receive successful 2022-May-28 10:37:13.096318
Received packet from 92:56:92:00:00:02, 376 B
Sniffer received a message on IVI port (IVIM).
^CTermination requested.
Deleting ok
root@autotalks:/usr/bin#
```

Obrázek D.5: Příjem a dekodování implementovaných typů zpráv na MACH-V2X-IF



Obrázek D.6: Umístění zařízení MACH-V2X-IF při testování v provozu

## D. OBRÁZKY Z TESTOVÁNÍ

```

00000000 12 00 05 01 03 81 00 40 03 80 81 AE 20 50 02 80 .....@.... P..
00000010 00 8A 01 00 14 00 5A 5D 29 F3 FD 2B 5C 5F 9C D2 .....Z])...+\_...
00000020 1D D5 A6 3A 08 82 6E 64 86 38 07 45 00 00 A0 00 ...:..nd.8.E....
00000030 07 D1 00 00 02 02 29 F3 FD 2B A0 6A 40 5A 6F 51 .....).+.j@ZoQ
00000040 43 2E 79 87 ED E2 34 23 00 78 45 F3 94 58 74 E0 C.y...4#.xE..Xt.
00000050 A3 1F 83 02 D6 8A 7F 33 F8 61 FF 12 10 3F A0 14 .....3.a...?.
00000060 19 81 02 56 06 3E 80 49 59 00 00 1B F0 3D E4 02 ...V.>.IY....=..
00000070 54 C6 70 01 0F 81 E8 20 0F 06 33 80 08 7C 0F A1 T.p.... .3.|..
00000080 00 67 31 9C 00 41 E0 7B 48 03 2D 8C E0 02 13 03 .g1..A.{H.-.....
00000090 CA 40 18 EC 67 00 10 D8 1F 8A 00 BF 63 38 00 8B .@.g.....c8..
000000A0 C0 FA B0 04 BB 19 C0 04 3E 07 AD 80 0E 18 CE 00 .....>.....
000000B0 20 F0 3E 23 FF FE C6 70 01 0E 40 01 24 00 02 20 .>#...p..@.$..
000000C0 60 D5 8B 70 9B 80 86 1E 5A 5D 29 F3 FD 2B 80 83 `..p....Z])...+.
000000D0 12 1B 85 D6 5D 52 13 E2 44 73 F1 55 F1 63 B5 0E ....]R..Ds.U.c..
000000E0 C2 13 3F 99 EC DE 16 10 C1 BA DD 1E 78 81 E4 70 ..?.....x..p
000000F0 79 EF 25 FE 5C 60 7C 8E F2 B6 55 BF 7E 56 0C 52 y.%.\'`...U.~V.R
00000100 54 07 1F D9 DD 0B 10 8A 4B 7A CB C4 86 03 EB 80 T.....Kz.....

```

Obrázek D.7: Příklad dat linkové vrstvy CAM zprávy zachycené v provozu

```

> Frame 1: 286 bytes on wire (2288 bits), 286 bytes captured (2288 bits) on interface Fake IF, Import from Hex Dump, id 0
> Ethernet II, Src: Send_00 (20:53:45:4e:44:00), Dst: Receive_00 (20:52:45:43:56:00)
> GeoNetworking
  < BTP-B
    Destination Port: 2001
    Destination Port info: 0x0000
  < Intelligent Transport Systems
    < ItsPduHeader
      protocolVersion: 2
      messageID: cam (2)
      stationID: 703855915
    < CoopAwareness
      generationDeltaTime: 41066
    < camParameters
      < basicContainer
        stationType: passengerCar (5)
        < referencePosition
          latitude: 50°3'14,282"N (500539673)
          longitude: 14°16'35,552"E (142765423)
          > positionConfidenceEllipse
          > altitude
        < highFrequencyContainer: basicVehicleContainerHighFrequency (0)
          < basicVehicleContainerHighFrequency
            > heading
            > speed
              speedValue: 15,99m/s = 57,6km/h (1599)
              speedConfidence: 0,04m/s (4)
            > driveDirection: forward (0)
            < vehicleLength
              vehicleLengthValue: 4,6m (46)
              vehicleLengthConfidenceIndication: trailerPresenceIsUnknown (3)
              vehicleWidth: 1,8m (18)
            < longitudinalAcceleration
              longitudinalAccelerationValue: -0,1m/s² (-1)
              longitudinalAccelerationConfidence: unavailable (102)
            > curvature
              curvatureCalculationMode: yawRateUsed (0)
            > yawRate
            > accelerationControl: 40 [bit length 7, 1 LSB pad bits, 0100 000. decimal value 32]
            > steeringWheelAngle
            > lateralAcceleration
          < lowFrequencyContainer: basicVehicleContainerLowFrequency (0)
            < basicVehicleContainerLowFrequency
              vehicleRole: default (0)
              > exteriorLights: 81 [bit length 8, 1000 0001 decimal value 129]
              > pathHistory: 10 items

```

Obrázek D.8: Příklad CAM zprávy dekodované offline v programu Wireshark

## Seznam použitých zkratk

- AES** Advanced Encryption Standard
- API** Application Programming Interface
- ARIB** Association of Radio Industries and Businesses
- ASN.1** Abstract Syntax Notation One
- BTP** Basic Transport Protocol
- CAM** Cooperated Awareness Message
- CAN** Controller Area Network
- CPU** Central Processing Unit
- CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
- C-V2X** Cellular Vehicle-to-Everything
- DENM** Decentralized Environmental Message
- DSRC** Dedicated Short-Range Communications
- ECDSA** Elliptic Curve Digital Signing Algorithm
- I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ITS** Intelligent Transport System
- OBU** On-Board Unit
- OS** Operační systém
- PKI** Public Key Infrastructure

## E. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

---

**RSU** Roadside Unit

**SHA2** Secure Hash Algorithm

**SoC** System on Chip

**SPI** Serial Peripheral Interface

**SSZ** Světelné signalizační zařízení (lidově semafor)

**TDMA** Time Division Multiple Access

**USB** Universal Serial Bus

**V2X** Vehicle-to-Everything

**VRU** Vulnerable Road User



## Obsah přiloženého CD

	readme.txt .....	stručný popis obsahu CD
	src	
	impl .....	zdrojové kódy implementace
	thesis.tex .....	zdrojová forma práce ve formátu $\text{\LaTeX}$
	text .....	text práce
	thesis.pdf .....	text práce ve formátu PDF