
A V2X járműkommunikáció alapjai

egyetemi jegyzetvázlat, v0.1

Petkovics Ármin, Szabó Csaba Attila, Varga Norbert, Bokor László
BME, Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Bevezetés

Az elektronika és a távközlés fejlődésével az érzékelésen alapuló vezérlő és beavatkozó rendszerek hihetetlen sebességgel kezdtek terjedni, és az 1970-es évektől kezdődően a közúti járműveket is fokozatosan ellepték a mikro-elektromechanikai megoldások (microelectromechanical systems, MEMS) és általuk a multifunkcionális, kis hatótávú és kisméretű szenzorokra támaszkodó rendszerek világa. Türték a nagy hőingadozást és a rezgéseket, ezáltal gépjárművekbe történő építésre is alkalmassá váltak: kezdetben a meghajtott tengely forgási sebességét (és ebből a jármű sebességét) mérték vele, valamint az olaj és hűtővíz hőmérsékletet. Ma már egészen extrém és sokféle felhasználási módjuk is ismert, a hangsúly pedig eltolódott az alapfunkciók támogatása felől a biztonsági- és komfortfunkciók irányába.

A biztonsági funkciók egy ideje már nem luxus, hanem kötelező elemei a közúti járműveknek: 2004 óta minden EU-ban forgalomba állított autónak kötelező blokkolásgátlót alkalmaznia (Anti-lock Braking System, ABS), ugyanitt, 2014 óta az ESP menetstabilizáló is kötelező alapfelszereltség (Electronic Stability Program). Gondoljuk csak végig: az ABS működéséhez minden keréknél szükség van egy-egy szenzorra, ami figyeli azt, hogy fékezéskor blokkol-e a kerék, az ESP-nél pedig minden kerékhez kell egy forgássebesség-szenzor, egy giroszkóp-gyorsulásmérő páros az oldalirányú gyorsulás érzékelésére, valamint még egy szenzor, ami a kormányoszögállást érzékeli. De ezeken kívül is rengeteg, az autókban már most is széles körben használt szenzorokat sorolhatunk fel: lambdaszenzor az üzemanyag-levegő keverék arányának beállítására, esőszensor az automatikus ablaktörléshez, külső és belső hőmérsékleti szenzorok melyek figyelmeztetnek, ha kinn fagyponthoz közelire süllyed a hőmérséklet, illetve egészen komfortosan, fél fokos pontossággal állítják be a vezetői fülke hőmérsékletét. Újabban a RADAR (Radio Detection and Ranging) és LIDAR (Light Detection and Ranging), valamint a kamerarendszerek is egyre elterjedtebbek. A radar rendszer pl. a parkolásnál segít, illetve a LIDAR-ral együttműködve automatikus távolság- illetve sávtartást tesz lehetővé. Természetesen ez azzal jár, hogy szükség esetén gyorsítja vagy lassítja az autót, tehát már „beleszól” annak közvetlen irányításába is. A kamerarendszer is besegíthet parkolásnál, de szabad parkolóhelyek keresésére is alkalmas. A RADAR-ra, LIDAR-ra és kamerákra alapozó vezetéssegítő, támogató, kényelmi rendszereket ADAS alkalmazásoknak nevezik (Advanced Driver-Assistance Systems). Ezek a rendszerek a járművek autonóm, azaz önálló mozgása irányába mutatnak: az önvezetés természetesen itt még nem teljes, de a cél az, hogy a szenzorokkal nagy biztonsággal kezelhető helyzetek megoldásának terhére levegyék a sofőrök válláról.

Az autókba telepített szenzorokat alapvetően két típusra oszthatjuk. Az egyik csoportba tartozók az autó alkatrészeinek állapotát monitorozzák, az autó üzemeltetését segítik: visszajelzést adnak annak állapotáról. A környezeti érzékelők a vezetéssegítő rendszert látják el információval, a környezet megfigyelésére összpontosítanak: sávjelzéseket értelmeznek, időjárási paramétereket gyűjtenek, közelben közlekedő autókat észlelnek, mérik azok gyorsulását, stb. Vannak viszont olyan helyzetek, ahol szenzorokkal együtt sem tud egy autó biztonságosan áthaladni. Ilyen például egy beláthatatlan kereszteződés: nincs ugyanis több releváns információja egy emberi sofőr által begyűjthetőnél, hiszen a szenzor sem tudja, hogy mi van a „kanyar mögött”, a legmodernebb megoldások sem látnak át házakon. Viszont, ha van autó a kanyarban, akkor az akár szólhatna is arról, hogy érkezik, és mi nem mennénk ki elé: megszületik tehát az igény a kommunikációra. Ha egy autó nem is tud mindent az útszakasról, többen, kooperatív módon együttműködve, az adatforrásaikat (szenzoradataikat) megosztva egészen pontos képet alakíthatnak ki az útszakasz állapotáról, forgalmáról, jellemzőiről. Ez a V2V, azaz Vehicle-to-Vehicle, autók közötti kommunikáció, mi a járművek együttműködésével hoz létre kooperatív tudatosságot: minél több forrás, annál több és megbízhatóbb a leszárt információ mennyiség. Azonban

míg a járművek egymás közötti „beszélgetése” megoldhatja a helyzetet bizonyos szituációkban, addig más esetekben be kell vonni az infrastruktúrát, pl. a közlekedési lámpákat, meteorológiai állomásokat, változtatható jelzésekű táblákat is, mivel az útinfrastuktúra működtetője olyan információkat birtokolhat, melyeket nem lehet előrejelezni, melyeket nála pontosabban senki sem tudhat. Itt válik szükségessé a V2I és I2V (Vehicle-to-Infrastructure, és fordított irányban), azaz jármű-infrastuktúra-jármű kommunikáció. Mindennek az összefoglaló neve a napjainkban már ismerősen csengő V2X (Vehicle-to-Everything) vagy C2X (Car-to-Everything), azaz járművek kommunikációja „minden mással”¹. A magas szintű kooperáció eredménye pedig a kooperatív intelligens közlekedési rendszerek (Cooperative Intelligent Transport Systems, C-ITS) ökoszisztémája, melyben a járműkommunikációs infrastruktúrára épülve a fejlett szolgáltatások széles skálája biztosítható².

A járműkommunikáció céljai és kihívásai

A V2X lehetővé teszi, hogy az autók együttműködjenek az útinfrastuktúra és/vagy a város közlekedésirányításával, valamint más járművekkel, így optimalizálva, és persze elsősorban *biztonságosabbá* téve a közlekedést. Az autó vezetőjének információja lesz a nem belátható területekről érkező veszélyekről, eseményekről, döntéseit így lépésről lépésre segítik a járműkommunikációs rendszerek.

Léteznek már olyan megoldások, melyek mobiltelefonos applikáció formájában jeleznek a sofőrnek az útvonalon várható eseményekről, kátyúkról, balesetekről: ilyen például a jól ismert Waze alkalmazás³. A V2X viszont többet kínál: a Waze frissítési ideje nem versenyezhet a V2X milliszekundumos késleltetésével: éles szituációkban, ütközésselkerülésnél a Waze, vagy más, applikációba ültetett közlekedést segítő rendszerek nem versenyképesek és nem is ez a céljuk. Amit tehát szeretünk a Waze-ben azt a V2X alaphól tudja, de ennél már most többet nyújt és nem csak informáló, hanem biztonságkritikus döntési helyzetekben is megállja a helyét. Az elsődleges célja a járműkommunikációnak tehát a biztonság, a közúti halálesetek és alapvetően a balesetek visszaszorítása.

A biztonságon felül takarékoság is vezérli a V2X kommunikációt: a szenzorok által egyformán nagyon gyors „reakcióidővel” rendelkező autók, teherautók konvojban, gyorsan, egymáshoz nagyon közel haladva spórolhatnak rengeteg üzemanyagot a légellenállás okozta veszteségek minimalizálásával.

További célok közt lehet említeni a real-time multimédiás alkalmazásokat, a dugók elkerülését, a károsanyag-kibocsátás csökkentését is, tehát sok olyan szolgáltatást, amit az okos város koncepció is megcéloz: ehhez a V2X egy megfelelő eszköznek bizonyul.

Megvalósítás, de legalábbis engedélyezés és elfogadottság szempontjából mindenképpen jövőbe mutató célterülete a V2X fejlesztésének az önvezető járművek támogatása és széleskörű alkalmazhatóságuk, elterjedésük segítése. Az autonóm járművek jelenleg elérhető változatai ott tartanak, hogy az emberi vezetőt próbálják emulálni: szenzorokkal lát, hall és érzékel, az aktuátorok (beavatkozók) pedig helyettesítik az ember reakcióit (pl. elektromos működtetésű hidraulikus kormányrásegítés, elektromechanikus fékrendszerek, stb.). Viszont, ahogyan a beláthatatlan kanyarnál is említettük: az emberi sofőr emulálásával és szenzorokkal/beavatkozókval történő helyettesítésével csak maximum egy emberhez hasonló színvonalú döntéseket meghozó szerkezetet fejlesztünk, V2X-szel viszont jóval több információ biztosítható a működéshez, megalapozottabb döntéseket hozhatna az önvezető jármű, melyekhez az összes közlekedő és maga az infrastruktúra is hozzájárulhat az információi megosztásával. Így létrejöhet a kooperatív tudatosság, melyre alapozva komplex szolgáltatások és alkalmazások építhetők fel.

A célkitűzések között a felhasználási területek és a hozzájuk kapcsolódó alkalmazások továbbfejlesztése mellett fontos megemlíteni egy világszinten szerveződő direktívát, a Vision Zero-t⁴: célja hosszabb távon minden emberi hibalehetőség kizárása a közlekedésből, ezzel a balesetek és halálesetek nullára csökkentése és a közlekedési dugók elkerülése. Utóbbit a közlekedni kívánók, illetve

¹ Zhou, H., Xu, W., Chen, J., & Wang, W. (2020). Evolutionary V2X Technologies Toward the Internet of Vehicles: Challenges and Opportunities. Proceedings of the IEEE, 108(2), 308–323. doi:10.1109/jproc.2019.2961937

² https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/30826/dot_30826_DS1.pdf

³ <https://www.waze.com/hu>

⁴ <http://visionzero.global/>

az őket szállító (autonóm) járművek tökéletes informáltságával céljuk elérni. Mindez természetesen a környezetet is pozitívan érinti majd: városonként évente több milliónyi feleslegesen dugóban töltött óra gazdasági hátrányt okozó hatása és felesleges károsanyag-kibocsátása takarítható majd meg általa.

Az EU sem fukarkodik a nagy szavakkal: az aktuális célkitűzés szerint 2030-ra 40%-al kell csökkenteni a gazdaságok kibocsátását az 1990-es szinthez képest!⁵ Merész gondolatok ezek, a jövő megmutatja, sikerül-e megvalósítani, mindenesetre elég nagy a törekvés erre és nem csak az Európai Unióban.

Természetesen a szabványosítás és a kezdeti megvalósítások közben már előjöttek a technológia kihívásai is, amikkel meg kell birkóznia. Ilyen például az elsősorban autópályákon jelentkező autók közötti nagy relatív sebesség: két szemben haladó jármű viszonylagos sebessége 2-300 km/h is lehet. Ebből eredően a topológia is nagyon gyorsan változhat, a szemben haladó autók nagyon rövid ideig vannak egymás „hatótávolságában”, így az üzenetek továbbítása ebbe a rövid időbe kell, hogy belefértjen, vagy alternatív megoldást kell kifejleszteni egy hatékonyabb ad-hoc szerveződő hálózati struktúra képében. A túlzottan sok kommunikáló eszköz is lehet gond: dugóban állva, ha mindenki csak periodikusan küld magáról információkat, az is a rádiós/hálózati közeg túlterheléséhez vezethet. Ilyen esetben viszont nagy újdonságértékkel sem rendelkezik az, hogy az autó még mindig ugyanazon az útszakaszon vesztegel, tehát érdemesebb ritkábbra venni a jelzéseit vagy eseményvezérelté tenni: elindulás, dugóból kiszabadulás esetére például. Ilyen és ehhez hasonló kihívásokat, komplex igényrendszert kell kezelni a kooperatív intelligens közlekedési rendszerek architektúráinak, a megvalósítandó járműkommunikációs szolgáltatási rendszereknek.

A C-ITS architektúra⁶

A C-ITS architektúrája már több mint tíz éve szabványosítás alatt van, kisebb kiegészítéseket kap még, de alapvetően elég letisztult és stabil (1. ábra).

Érdekes összehasonlítani az ISO OSI rétegszerkezetével⁷: a C-ITS-ben vannak vertikális rétegek is. Ezek a Security és a Management rétegek: nem csak a közvetlen felettük vagy alattuk lévő réteggel tudnak kommunikálni, hanem mindegyikkel: ez javítási lehetőségeket rejt magában a rétegek közötti (cross-layer) optimalizáció révén⁸.

A Management réteg azzal foglalkozik, hogy a megfelelő helyre elküldje az egyes rétegekből származó információkat. Folyamatosan változik a topológia, ebből eredően a jel/zaj viszony és változik az, hogy milyen átviteli technológiával, milyen kodekkel kódolva és milyen sávszélességre optimalizálva érdemes átvinni az adatainkat. Pl. egy 50 Mbit/s-os Wi-Fi linken 4K felbontású videó is átvihető, míg 3G-n ezzel meg sem kell próbálkoznunk: ezt közölve a Management réteggel az időben dönthet az átviteli mód változásáról és értesítheti a kommunikáló feleket.

A Security réteg természetesen a hozzáférés-szabályozás, hitelesítés, bizalmasság megőrzése, a letagadhatatlanság biztosítása és az adatok hitelességének és sértetlenségének biztosítása alapvető céljait szolgálja: state-of-the-art, minden réteget érintő komoly biztonsági mechanizmusok kerültek szabványosításra. Ehhez elengedhetetlen volt az, hogy a többi réteggel közvetlen kapcsolatban legyen, hogy az információ megfelelően gyorsan terjedjen.

További hasonlóság az OSI-rétegekkel, hogy mindkettőben megtalálható hozzáférési, hálózati és alkalmazási réteg, de megjelenik a Facilities réteg is, amit egy szóban magyarázni nehéz, de arra szolgál, hogy a C-ITS/V2X-alkalmazások speciális igényeit közvetlenül ki lehessen elégíteni. Ilyenek például a kooperatív tudatosságot előidéző üzenetváltások: periodikus- és eseményvezérelt információadás állapotunkról, amit a többiek elfognak és az alapján tudnak reagálni, illetve beépíteni a „világképükbe”.

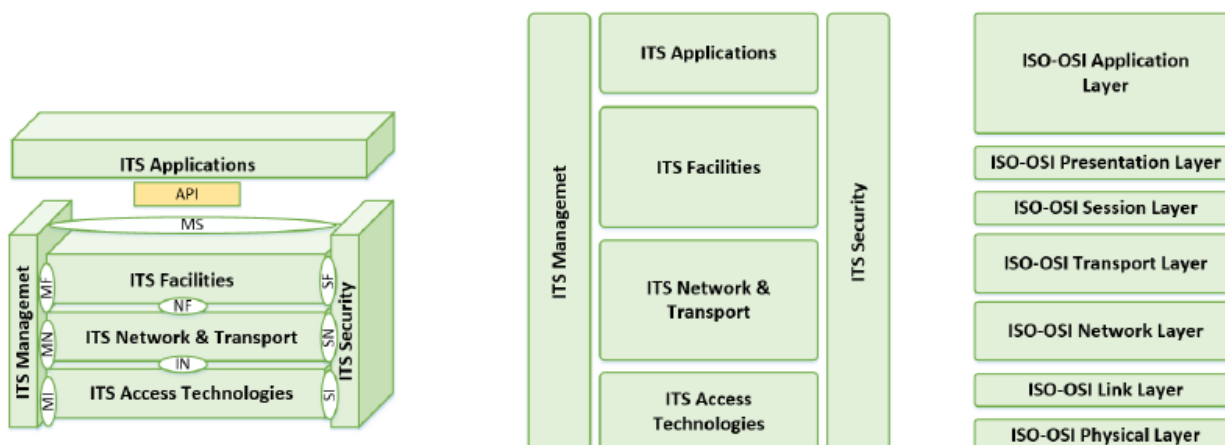
A következőkben áttekintjük a C-ITS protokoll hierarchia és szabványos kommunikációs architektúra az alapvető rétegeit, fontosabb jellemzőiket és feladataikat, a közeghozzáféréstől az alkalmazási rétegig bezárólag valamennyit érintve.

⁵ https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en

⁶ ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09), Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture

⁷ ISO / IEC 7498-1: Open Systems Interconnection - Basic Reference Model

⁸ Georgios Karagiannis, Onur Altintas, Eylem Ekici, Geert Heijenk, Boangoat Jarupan, Kenneth Lin, and Timothy Weil: Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No. 4, 4th Quarter 2011, page: 585-616



1. ábra. A C-ITS-architektúra összehasonlítása az ISO OSI-rétegekkel.

Közeghozzáférési réteg (ITS Access Layer)^{9 10}

Transzpárens réteg, felcserélhetők benne a Wi-Fi alapú, Bluetooth-os, cellás és vezetékes hozzáférési módok (2. ábra). Az aktuális C-ITS telepítési és továbbfejlesztési erőfeszítések a rendelkezésre álló rádiós hozzáférési technikákon alapulnak. Ezek az IEEE 802.11p/ETSI ITS-G5 (röviden ITS-G5), valamint a 3G és 4G cellás szabványok. Ebben a jelenleg elérhető kombinációban az ITS-G5 megoldás adja a rövid hatótávolságú, ad-hoc hálózati technikákra épülő kommunikációs technológiát, melyet kiegészítenek a nagy hatótávolságú 3G/4G mobil celluláris rendszerek. Az *IEEE 802.11p* szabvány használatos leginkább az aktuális pilot projektekben (pl. EU C-ROADS¹¹, US Connected Vehicle Test Bed¹²), ennek megfelelő 5,9 GHz-es frekvenciatartomány¹³ és a definiált kódolás használatos a világ legnagyobb részén, néhány kivétellel (Japánban 700 MHz a kijelölt sáv, illetve Kínában inkább celluláris megoldásokat tesztelnek). Ez a szabvány hasonló az otthoni használatra szánt Wi-Fi-hez, de nem az ISM (Industrial, Scientific, Medical) szabad frekvenciasávjában működik, hanem engedélyköteles. Napjainkra már kiforrott, „automotive grade” szintű. Az 1980-as években megkezdett C-ITS kutatási munka 2008-ban ért oda, hogy az Európai Bizottság egy 30MHz-es tartományt (5875 - 5905 MHz) jelölt meg az 5,9 GHz-es frekvenciasávon belül a biztonsággal kapcsolatos ITS alkalmazásokhoz (EC/2008/671). 2013-ban került kiadásra az első, valós telepítéseken végzett teszteken alapuló ITS-G5 európai szabványcsalád, melyre támaszkodva napjainkban már off-the-shelf termékek és éles RSU rendszerek érhetők el világszerte.

A 802.11p alapú C-ITS közeghozzáférés hatótávolsága 800-1000-1600 méter a rádiós és földrajzi viszonyoktól függően. Ezen távolságon belül rengeteg autó feltorlódhat, így nagyon fontos, hogy a haladási sebességtől függően adaptívan állítsuk a „levegőben lévő” csomagok számát, mivel az egyrészt túltelítődhet, másrészt viszont egy lassan haladó járműről értelemszerűen nem jelent több hasznos információt az, ha másodpercenként többször is jelent magáról, mintha lassú haladás esetén ezt pár másodpercenként tenné meg. Ez az adaptív változtatás a közeghozzáférési réteget érinti, de a Management függőleges rétege segítségével kivitelezhető megfelelő gyakorisággal és megfelelően rövid idő alatt. Szintén *flexibilitást* követel meg az egyéb, 5 GHz sávban működő alkalmazásokkal való együttélés: több helyen (Olaszország, Németország¹⁴) az autópálya fizetőkapuk egy része az 5795 MHz - 5815 MHz sávban működő DSRC technológiákat alkalmazza, potenciális interferencia lehetőség a C-ITS 5855 MHz - 5925 MHz sávjával, így a V2X-t használó járműveknek észlelniük kell, ha ilyen kapuhoz közelednek és vissza kell venniük ezen időszakban az adási teljesítményükből¹⁵. Ezzel a hatótáv, azaz

⁹ ETSI EN 302 663 V1.3.1 (2020-01), ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band

¹⁰ ETSI TS 123 285 V15.4.0 (2020-01), LTE; Architecture enhancements for V2X services (3GPP TS 23.285 version 15.4.0 Release 15)

¹¹ <https://www.c-roads.eu/platform.html>

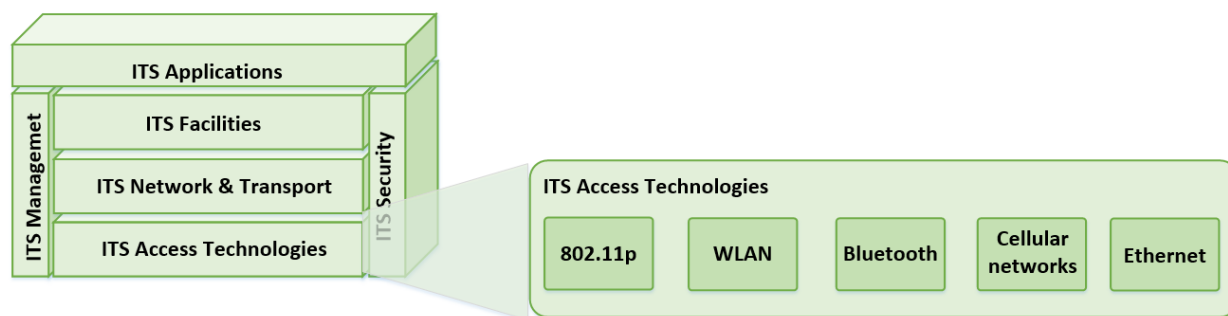
¹² https://www.its.dot.gov/research_archives/connected_vehicle/dot_cvbrochure.htm

¹³ ETSI EN 302 571 V2.1.1 (2017-02), 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

¹⁴ ECC Report 250, Compatibility studies between TTT/DSRC in the band 5805-5815 MHz and other systems, <https://www.ecodocdb.dk/download/f4340389-e665/ECCRep250.pdf>

¹⁵ ETSI TS 102 792 V1.2.1 (2015-06), 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

„ameddig ellátnak” az csökken, de ez nem különösebben jelent gondot, hiszen a kapuknál egyébként is lassítaniuk kell. Nem meglepő módon ebben is a vertikális Management réteg működik közre.



2. ábra. Az ITS közeghozzáférési rétege.

A hozzáférési technológiák versenye még nem zárult le: a Wi-Fi-szerű IEEE 802.11p és a 3GPP celluláris LTE-V2X illetve az 5G megoldásai is versenyeznek és itt elsősorban a gyártók csapnak össze. A celluláris hálózatokat fejlesztők már nehezen indokolják az újabb mobil hozzáférési generációk bevezetését, de a járműkommunikáció egy jó indok. Itt már nem az a cél, hogy 100 Mbit/másodperc fölé vigyék a letöltési sebességeket (bár ez is megtörténik), hanem az, hogy a késleltetést csökkentsék milliszekundumos nagyságrendre és ennek az ingadozását minimalizálják: real-time közeli alkalmazásoknak ugyanis elsősorban erre van szükségük. Éppen ezért a további szabványosítási munkák során elkezdtek egységesíteni az LTE-V2X technológiát is, valamint folynak az 5. generációs celluláris hálózatok (5G) kutatási-fejlesztési munkálatai is. Azonban az ITS-G5 és a C-V2X (celluláris V2X, 4G és 5G technológiákra alapulva) közötti átjárhatóság továbbra is problémát jelent. Így egy jármű, ami csak ITS-G5-el van felszerelve, további harmonizálási erőfeszítések nélkül nem fog tudni kommunikálni egy olyan járművel, ami csak LTE-V2X vagy 5G C-V2X technológiával van felszerelve. Éppen ezért az alábbi megfontolások kiemelkedő jelentőségűek^{16 17}:

- Az átjárhatóság az ITS-G5 és az újabb celluláris C-ITS hozzáférési technológiák között elengedhetetlen. Az emberi élet védelme elsődleges prioritás és ebbe nem fér bele az a tény, hogy azért alakult ki baleset, mert a járművek nem tudtak egymás között kommunikálni, vagy mert egy RSU nem volt képes kommunikálni átjárhatósági probléma miatt.
- Az úthálózatok üzemeltetőit nem szabad arra kényszeríteni, hogy két vagy több egymással versengő hozzáférési technológiával ellátott RSU-kal legyenek felkészülve, amelyek a hozzáférési technológiától függetlenül ugyanazt a használati esetet szolgálnák, vagy azonos szolgáltatást biztosítanának a vezetőknek/autonóm járműveknek.
- Az 5G felé irányuló celluláris mobil hálózati szabványok fejlődése várhatóan tovább javítja a nagy hatótávú kommunikációt (például a lefedettség javítását és a jelátviteli hatékonyságot), hozzájárulva egyúttal a hibrid kommunikációs rendszer javításához és kiegészítve a rövid hatótávolságú kapcsolatot is.
- A visszafelé kompatibilitás (backward compatibility) megközelítését mindenképpen követni kell, vagyis az új, Day-1 szintet meghaladó C-ITS eszközöknek támogatniuk és továbbra is biztosítaniuk kell a már telepített C-ITS szolgáltatásokat és alkalmazásokat.
- Az LTE-V2X és jövőbeli 5G technológiáknak nem szabad károsan befolyásolniuk az ITS-G5 használhatóságát, az együttműködésre, együttélésre kell törekedni.

¹⁶https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-Roads_Position_paper_on_59GHz_final.pdf

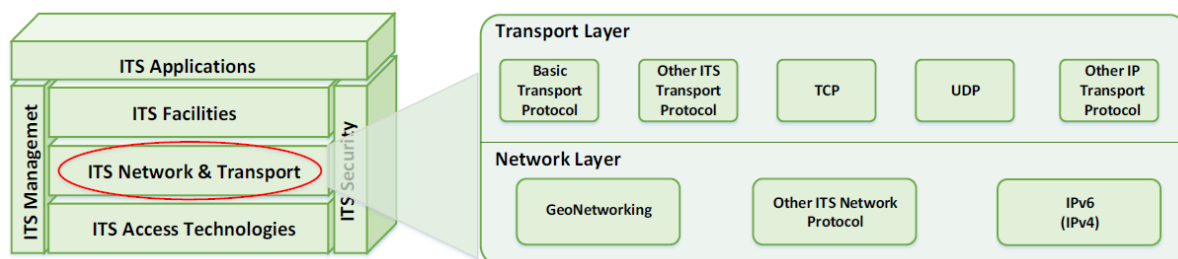
¹⁷ <http://www.asecap.com/images/News/PDF/ASECAPpositionpaperLTEV2X.pdf>

- Az úthálózatok üzemeltetőinek szabadon kell tudni dönteniük arról, hogy hogyan lehet a hibrid kommunikációs megközelítésen keresztül biztosítani az összeköttetést, beleértve minden jövőbeli járműkommunikációra alkalmas megoldást is.

Hálózati- és szállítási réteg (ITS Network and Transport Layer)^{18 19}

Ahogy a 3. ábra mutatja, a hálózati és a szállítási réteg az OSI-modellben megszokott módon épül egymásra, a hálózati rétegben az elsődleges, sőt szinte kizárólag az IPv6 használata jellemző a járművek nagy száma miatt, de nem a biztonsági (safety) alkalmazásokkal/megoldásokkal, mivel azok esetén az IP alapú kommunikáció nagy terhelést (overhead-et) eredményezne, és ezt ilyen esetekben nem érdemes alkalmazni, speciális megoldásokra van igény.

Nagyon fontos hálózati rétegben a címezésnél, hogy tudjunk földrajzi alapon is címezni, például a mögöttünk lévő öt kilométer hosszú útszakaszon közlekedőket: ez egy releváns alkalmazási igény a járműkommunikációnál, ha érzékeltünk egy úthibát vagy az előrehaladást befolyásoló tényezőt, akkor azt a mögöttünk haladóknak kell tudniuk, aki már túl van rajta, azt kár terhelni az üzeneteinkkel. Ezt az IPv6 alpból nem tudja. IPv6-ban multicast van, ami csoportcímezést végez, de továbbra is IP címek alapján működik. Kell tehát egy georafikus címezés és útvonalirányítás (addressing és routing), amit a GeoNetworking speciális V2X hálózati rétegbeli protokoll feladata.

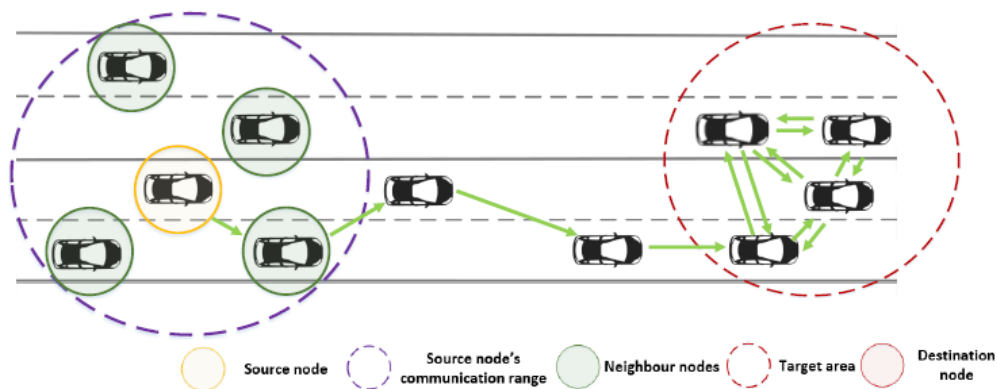


3. ábra. A V2X hálózati és szállítási rétege és protokolljaik.

A GeoNetworking leggyakoribb felhasználása a geobroadcast, azaz a téglalap, kör és ellipszis választható alakú célterületeken belül tartózkodók megcímezése (4. ábra). A terület általában nagyobb vagy messzebb van, mint a V2X közeghozzáférési technológia hatótávja, tehát amikor egy jármű megkap egy ilyen üzenetet, akkor kötelessége továbbítani is mindaddig, amíg mindenki, aki az adott területen belül tartózkodik, meg nem kapja, és ameddig a hirdetett esemény releváns, azaz az üzenet időzítője le nem jár. A GeoNetworking része tehát az ad-hoc routing protokoll, ami összetett algoritmusokat kíván. Míg USA-ban csak egy ugrásig szabad terjednie a V2X üzeneteknek, tehát ilyen összetett megoldásokat nem alkalmaznak, addig az EU-ban használható a több „hop”-on keresztüli üzenet célbajuttatás is, azaz a szabványok alapján a járművek továbbíthatják a csomagokat egymást között is, például egy célterület felé.

¹⁸ ETSI EN 302 636-3 V1.2.1 (2014-12), GeoNetworking; Part 3: Network Architecture

¹⁹ ETSI EN 302 636-5-1 V2.2.1 (2019-05), GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol

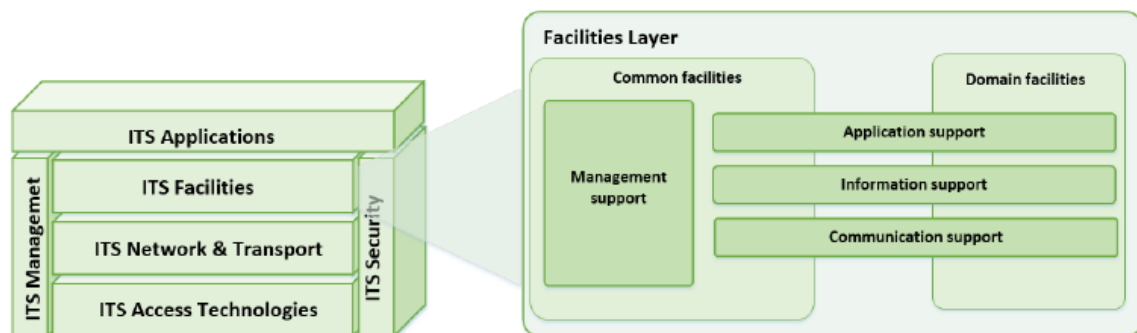


4. ábra. Geobroadcast példa: a sárga autó üzenetének útja a piros körrel jelölt területre.

Facilitás réteg (ITS Facilities Layer)²⁰

Az „új” réteg, ami nincs az OSI-struktúrában, de a V2X-architektúrában megjelent. Különböző alkalmazásokat támogató funkciókat valósíthatunk meg ezzel a réteggel (5. ábra).

Egyik Facilities rétegbeli protokoll a CAM (Cooperative Awareness Message)²¹ üzenetváltást definiáló. Ez az a „heartbeat”, azaz „itt vagyok” jellegű folyamatos, *periodikus* üzenet, ami segít megtudni minden járműről azt, hogy hol van, merre halad, hányan ülnek benne, hány kg a súlya, mi a sebességvektora, stb. Itt is megjelenik a rétegek közötti optimalizáció: ha a jármű gyorsabban halad, akkor az üzenetek sűrűségét akár másodpercenként tíz alkalomra is tudja állítani, fordított esetben, lassú haladásnál csak egy üzenet kerül kiküldésre másodpercenként.



5. ábra. A V2X-architektúra „Facilities” rétege.

A másik legismertebb protokoll a Facilities rétegből a DENM (Decentralized Environmental Notification Message)²² üzeneteket definiáló: ez *eseményvezérelt*, a CAM-mel ellentétben: csak akkor küld üzenetet, ha valamilyen esemény bekövetkezett. Pl. ha megállunk a leállósávban, akkor küld egy „álló jármű a leállósávban” üzenetet. Előre definiált eseményekhez kódokat rendelnek és az üzenetek magukat a kódokat tartalmazzák csak idő- és geopozíció bélyeggel ellátva.

Vannak persze további üzenettípusok is a Facilities rétegben, melyek a közlekedési lámpák beállításait közlik (SPaTEM)²³, és ez alapján tudja az autó beállítani a sebességét, hogy pont zöld jelzésre érjen oda; vannak amelyek szervíz üzeneteket továbbítanak; olyanok melyek a kereszteződések geometriáját közlik a közeledő járművekkel (MAPEM)²⁴, stb. Ezekkel a jegyzetvázlat terjedelmi korlátai miatt bővebben nem foglalkozunk.

²⁰ ETSI TS 102 894-1 V1.1.1 (2013-08), Part 1: Facility layer structure, functional requirements and specifications

²¹ ETSI EN 302 637-2 V1.4.1 (2019-04), Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service

²² ETSI EN 302 637-3 V1.3.1 (2019-04), Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service

²³ ETSI TS 103 301 V1.1.1 (2016-11), Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service

²⁴ ETSI TS 103 301 V1.1.1 (2016-11), Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service

Menedzsment réteg (ITS Management Layer)^{25 26}

A menedzsment réteg – a következő szakaszban tárgyalt biztonsági réteghez hasonlóan – nem feleltethető meg egyik OSI modellben szereplő rétegnek sem. Ez a réteg felelős az ITS architektúrában található, a biztonsági rétegen kívül valamennyi réteg irányításáért, működésük összehangolásáért. Az összehangoltság rendkívül fontos a kooperatív funkciókra kihegyezett C-ITS infrastruktúrában, hiszen minden működési inkonzisztencia, nem kívánt késleltetés felboríthatja az optimalizált rendszert és komoly problémákkal járhat. A menedzsment réteg a cross-layer optimalizáció központja a C-ITS architektúrában (például itt található a hatékony közeghozzáférést megvalósító Decentralized Congestion Control, vagyis a DCC központi modulja is), éppen ezért áll kapcsolatban az összes többi réteggel.

Biztonsági réteg (ITS Security Layer)^{27 28}

A V2X biztonsági réteg által biztosított szolgáltatások számára alapvető követelmény a megbízhatóság, integritás, autentikálás (confidentiality, integrity, authenticity), valamint a privát szféra védelmének biztosítása. Az alábbi pontokban röviden összefoglaljuk ezeket a fontos követelményeket:

- **Megebízhatóság (Confidentiality):** azt jelenti, ha Alice Bobnak küld egy üzenetet harmadik fél nem tudhat meg semmit sem az üzenet tartalmából (esetleg a hosszát). Ez gyakorlatilag az enkriptálással valósul meg.
- **Integritás (Integrity):** azt jelenti, hogy ha Alice küld egy üzenetet Bobnak, Bob egyértelműen képes azonosítani, ha valaki megpróbálta megmásítani a küldött üzenetet.
- **Autentikálás (Authenticity):** azt jelenti, ha Alice Bobnak küld egy üzenetet, akkor biztos lehet abban Bob, hogy az üzenet Alicetől származik és nem hamisan akart valaki Alice nevében üzenetet küldeni
- **Anonimitás (anonymity):** A V2X kommunikáció által küldött üzeneteknek nem szabad semmilyen olyan információt tartalmazniuk, ami egyértelműen azonosítaná a gépjárművet, a gépjármű sofőrjét, vagy az utast.
- **Összekapcsolhatatlanság (unlinkability):** a jármű által küldött üzenetek alapján ne legyen könnyen követhető a jármű. Ne legyen könnyebben követhető a V2X segítségével, mint a hagyományos vizuális módon.

Ezeket a követelményeket a V2X biztonsági réteg (6. ábra) megbízható hardverelemek (Hardware Security Module - HSM), biztonsági és tanúsítvány attribútumok, valamint a digitális aláírás (és azok ellenőrzése) valamint a hozzá tartozó PKI (Public Key Infrastructure) mechanizmusok segítségével biztosítja.

A hardveres biztonsági modul (Hardver Security Module, HSM) jellemzően egy külső periféria. Feladata, hogy privát kulcsokat generáljon, tároljon és ezekkel speciális kriptográfiai műveleteket végezzen. Mivel egy privát kulcs egy randomszám, ezek generálásához a HSM modul egy valódi hardveres véletlenszám generátort (true random number generator) tartalmaz. A privát kulcs generáláson túl, a HSM feladata még az aláírások generálása is.

A digitális aláírás egy matematikai módszer arra, hogy kiszűrjessük azokat az üzeneteket, amik nem megbízható forrásból származnak, egyértelműen azonosíthatunk valakit. V2X-ben az ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm)²⁹ megoldást használják. Az ECDSA alapú PKI működése nagyon vázlatosan az alábbi: a járműben lévő HSM-mel generáltatunk egy kulcspárt. A publikus kulcsot elküldjük a Certificate Authority (CA) nevű entitásnak (a privát kulcs végig a járműhöz tartozó HSM-ben marad). A CA aláírja az ő privát kulcsával a jármű által elküldött publikus kulcsát. Ezt az aláírt publikus kulcsot nevezzük tanúsítványnak. Ezután ezt a tanúsítványt a CA visszaküldi a járműnek, ami a tanúsítványt mindenkinek elküldi rádióan, akinek aláírt üzenetet akar küldeni. A tanúsítvány segítségével

²⁵ ETSI TS 103 175 V1.1.1 (2015-06), Cross Layer DCC Management Entity for operation in the ITS G5A and ITS G5B medium

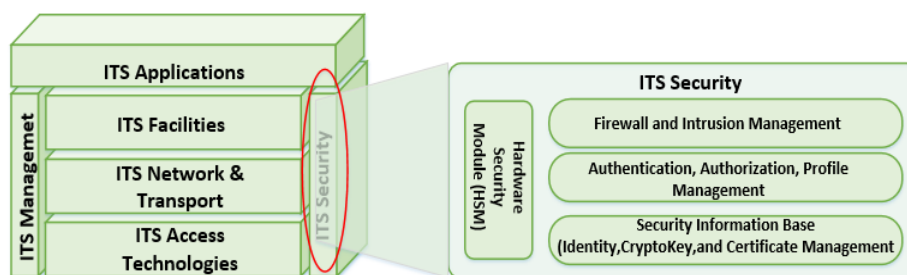
²⁶ ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09), Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture

²⁷ ETSI TS 102 731 V1.1.1 (2010-09), Security; Security Services and Architecture

²⁸ ETSI TS 102 940 V1.3.1 (2018-04), Security; ITS communications security architecture and security management

²⁹ The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA), <https://www.cs.miami.edu/home/burt/learning/Csc609.142/ecdsa-cert.pdf>

az üzenetet fogadók biztosak lehetnek abban, hogy az információ a CA által hitelesített forrásból származik. Az üzenetet fogadók onnan tudják, hogy a küldő tanúsítványa megbízható, hogy ők is rendelkeznek a CA tanúsítványával. Így tudják hitelesíteni a rádióon fogadott tanúsítványt.



6. ábra. A C-ITS Biztonsági réteg szerkezete és feladatai

Ezzel a bottom-up megközelítéssel a hozzáférési rétegtől eljutottunk egészen az alkalmazási réteghez, mellyel kapcsolatban az un. „Day 1” alkalmazásokat fogjuk bővebben tárgyalni a következő alfejezetben, vagyis azokat, amelyeket a V2X-technológia bevezetésének első lépéseinek látnak előre: közülük sok már most is használható vagy bemutatásra került demók, tesztek során.

Alapvető V2X alkalmazások (ITS Applications Layer)^{30 31}

Ebben a szakaszban a napjainkban kifejlesztés alatt álló vagy már rendelkezésre is álló V2X alkalmazásokat tárgyaljuk. A készültség fokától függően lesznek itt használati esetek (use-cases), szolgáltatások (services) illetve a szolgáltatásokra építő alkalmazások (applications) is. Ezeket a fogalmakat most definiáltuk, de a továbbiakban egyenértékűként használjuk.

A Car-2-Car Communication Consortium³² megközelítését alapul véve a következő három csoportba soroljuk a V2X szabványosítás alatt lévő és tervezett alkalmazásait: az első csoportban a „Day 1” alkalmazások vannak, melyek már most is működnek vagy tesztelés alatt állnak, a második és harmadik csoportban az előző csoportokra építő, magasabb hozzáadott értékű és persze ezzel párhuzamosan egyre bonyolultabb szolgáltatásokat villantjuk fel érdekességként, hogy lássuk mi mindenre lehet majd képes a V2X, amint a szabványosításra lezárul és elgördülnek a megvalósíthatóságának akadályai.

1. Tudatos vezetés (Awareness driving via status data)

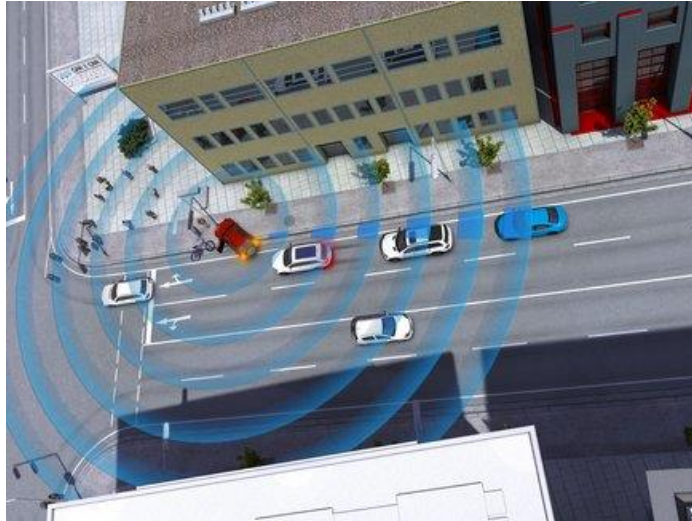
A tudatosság arra utal itt, hogy a Facilities rétegnél tárgyalt CAM/DENM/stb. üzenetek révén a sofőr, illetve az autó tisztában van a környezetével, a környéken közlekedőkkel azáltal, hogy veszi és feldolgozza ezeket a periodikus/eseményvezérelt üzeneteket az autóktól. Előre „látja” ha a leállósávban vesztegel valaki, ha beláthatatlan helyről tolat kifelé az úttestre, vagy ha baleset történt valahol (7. ábra). Ide tartozó alkalmazások a teljesség igénye nélkül:

- Ütközési figyelmeztetés a kereszteződéseknel.
- Rendőr, mentő, tűzoltó járművek közelségére vonatkozó értesítés.
- Általános veszélyre való figyelmeztetés az útvonalon.
- Álló/lassú járműre való figyelmeztetés.

³⁰ ETSI TS 102 637-1 V1.1.1 (2010-09), Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 1: Functional Requirements

³¹ ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06), Basic Set of Applications; Definitions

³² <https://www.car-2-car.org/>

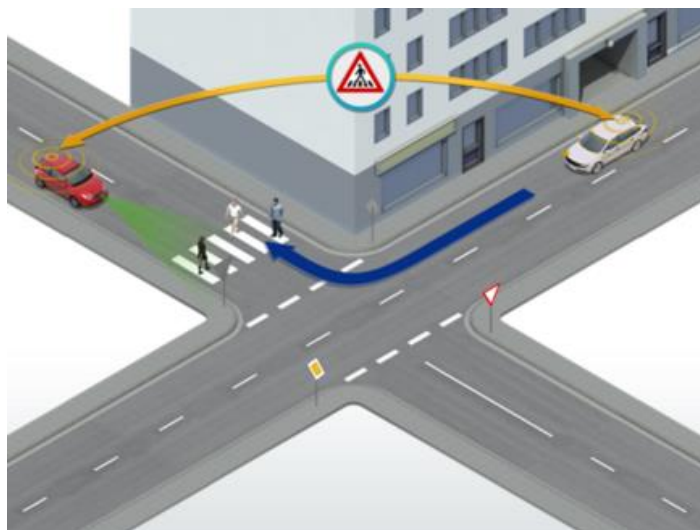


7. ábra. Tudatos vezetés (awareness driving) (Forrás: [2]).

2. Érzékelésekre alapuló vezetés (Sensing driving via sensor data)

A CAM- és egyéb szolgáltatások által közvetített alapadatok mellett, a V2X kommunikációra képes járművek más szenzoraik adatait is megoszthatják egymással: környezetükről pontosabb és mélyebb képet közvetíthetnek, így a közelükben közlekedő autók ismerete teljesebb lesz a környezetről. figyelembe vehetik például a 8. ábra által bemutatott esetben azt, a piros autó által érzékelt tényt is, hogy a zebrán gyalogosok közlekednek, így a fehér autó tisztában lesz azzal, hogy útját a jobbra fordulás után egy gyalogos keresztezi majd. Ebbe a csoportba tartozó alkalmazások közé tartoznak például a következők:

- „Előzés alatt állsz” figyelmeztetés.
- Távol(abb)i kereszteződés előtti figyelmeztetés
- Csoportos adaptív sebességtartó automatika
- Vészfékezés-jelzés
- Úttesttel kapcsolatos figyelmeztetések, távol(abb)ról, jóval az odaérkezés előtt



8. ábra. Érzékelésekre alapuló vezetés (Sensing driving). (Forrás: [2].)

3. Kooperatív és szinkronizált kooperatív vezetési műveletek (Cooperative and synchronized cooperative driving with intention and coordination data)

A CAM-üzenetek és a hatótávon belül tartózkodó vagy azon kívül lévő, de releváns adatokkal bíró autók szenzoradatai mellett a V2X-kommunikációra képes járművek összehangoltan működnek: segítik egymás döntéseit összetett forgalmi szituációkban: kifordulhat-e mellékútról, belekezdhet-e az előzésbe adott helyzetben, ha igen akkor hogyan soroljon be és a többi jármű hogyan segítheti a besorolását, stb. Előre látható alkalmazások:

- Kooperatív előzés (mindenki besegít az egy előző autó döntésébe és manőverének meghatározásába)
- Kooperatív holtér-figyelmeztetés
- Kooperatív sávváltás: hasonlóan a fentihez
- Rajban/konvojban/csoportban haladás (pl. teherautóknál, üzemanyag-megtakarítási célzattal)



9. ábra. Kooperatív vezetési műveletek. (Forrás: [2].)

A járművek közötti kommunikáció lényege tehát az, hogy ha nem is látod, akkor is értesülsz róla, hogy a másik autó, az akadály, a dugó, a kátyú vagy a gyalogos ott van, amerre te tartasz, mert ezt a többiek érzékelik és „elmondják” neked.

Összefoglalás

A járműkommunikáció napjaink egyik legígéretesebb, szabványosítás alatt lévő fejlesztése. A közlekedés meghatározó szerepű mindennapjainkban, a mobilitás javulását gyakran kiegyenlítik a gazdasági fejlődéssel: ahol autópálya épül, ott felvirágzik a környék, csak azért mert könnyebben, gyorsabban elérhetővé válik a régió az országban meghatározó szerepet játszó „csomópontokból”: a fővárosból és az ipari, logisztikai központokból. A közlekedés mindemellett negatív hatásokkal is bír: szennyezi a környezetet és sok ember haláláért felelős. A károsanyag-kibocsátást csak csökkenteni tudja a Vehicle-to-Everything (V2X) kommunikáció, azáltal, hogy például a közlekedés ütemezését tökéletesíti, segít elkerülni a forgalmi dugókat, illetve konvojban, egymástól nagyon alacsony követési távolságra utaztatja a kamionokat, melyek így a légellenállás drasztikus csökkentése miatt rengeteget spórolnak. A haláleseteket viszont a kitűzött célok alapján akár teljesen ki tudja majd küszöbölni: a V2X elsődleges célja a közlekedésbiztonság sokkal magasabb szintre emelése azáltal, hogy a járművek egymással kommunikálva megosztják az a „tudást” amit szenzoraik segítségével környezetükről begyűjtöttek.

A V2X-technológiák bevezetésének első lépései („Day 1” alkalmazások) már tesztelés alatt vannak, kezdik alkalmazni őket: arra alapulnak, hogy periodikus CAM-üzenetekkel és eseményvezérelt DENM-üzenetekkel a járművek értesítik egymást érkezésükről, megkülönböztető jelzés alkalmazó jármű közeledtéről, úthibákról, lassú vagy veszteséges járművekről. Itt az információ előre definiált üzenetekre alapuló megosztására építenek a szolgáltatások, de nincs benne még valódi kooperáció: ezt nevezi az idézett Car-to-Car Consortium [2] tudatos vezetésnek (awareness driving).

A következő szinten már további információkat is megosztanak egymással a járművek: az egyik autó által a zebrán érzékelt gyalogos annak is hasznos információ, aki még a sarok mögött autózik és pont arra készül befordulni, ahol a gyalogost érzékelték. Itt az információk továbbítása távolabbra is lehetséges, több ugráson keresztül és magasabb szintű információkat közvetít: vészfékezés jelzés a kettővel előttünk haladó autótól, „előzés alatt állsz” jelzés, valamint ide tartozik a csoportos adaptív sebességtartás is.

A harmadik szinten, ami egyelőre még bőven a jövőbe mutat megjelennek a *kooperatív vezetési műveletek*, azaz a többi autó segít annak megítélésében, hogy belekezdhet-e az előzésbe, a holtteret már nem csak a saját szenzorom figyeli, hanem a belső sávban 300 km/h-val érkező motorosról a többi autótól is értesülök és ide tartozik a konvojban haladás is, ugyanis itt is szoros együttműködésre: szinkronizált gyorsulásra/lassulásra van szükség.

A V2X fejlesztésének távlati célja a teljesen *autonóm járművek* kiszolgálása. Az autonómítás kezdeti szintjét (saját, auton belüli) szenzoralapú, embert emuláló megoldások jellemzik. Minden autonóm járműnek szüksége van a környezetet leíró digitális reprezentációra: és ha mindenki csak a saját szenzoraira támaszkodik, az sokkal kevesebb adat, mintha mindenki meg is osztaná a saját érzékeléseit. Ehhez kell a járműkommunikáció, melynek a szintjétől, szolgáltatásainak bonyolultságától, hozzáadott értékétől függően jutunk el az *önvezetés* magasabb szintjeire, ezt pedig a vázolt három lépcsőfokon való előrehaladás modellezi. A fejlődéssel fokozatosan kooperatív tudatosság jön létre az egyes elemek (járművek, útmenti szenzorok, közlekedési lámpák, változtatható jelzésképű táblák, stb.) közt, kicserélik azt, hogy mit látnak a környezetből és ezzel egyre teljesebb képet tudnak alkotni róla, ami egyre magasabb szintű közlekedésbiztonságot jelent.

Még egy érdekes jövőbeli use-case a remote driving, azaz „távolból vezetés”. Az Uber nevű taxis cég foglalkozik ezzel, mivel az a nagy hátránya a jelenlegi üzleti modelljüknek, hogy még emberek vezetik az autókat. Viszont az önvezetés sem lesz teljes megoldás, ha majd egyszer szabályozott körülmények közt, széleskörűen megvalósul: megtörténhet majd, hogy a mesterséges intelligencia meghibásodik, nem képes vezetni, de az autó még vezethető lenne, motorikusan semmi baja. Ekkor jönne képbe a remote driving, azaz az irodában ülő operátor szervízbe/a bázisra vezethetné az autót távolról. Ehhez tehát már nem kell működőképes AI (mesterséges intelligencia) algoritmus, elég ha a kommunikáció jól működik, megfelelően nagy sáv szélességgel és nagyon alacsony késleltetéssel. Itt már csak az 5G-6G³³ alapú megoldásoknak lehet létjogosultsága, ezek tudják ill. fogják tudni teljesíteni az extrém alacsony késleltetésre és a megfelelően nagy átviteli kapacitásra vonatkozó elvárásokat.

Végül a távoli jövőre való kitekintésként megemlíthetjük a V2X – IoT várt jövőbeli összefonódását: ezzel újabb, óriási adatforráshoz juthatnak a közlekedők, ugyanis az IoT eszközök lassan mindenhol (szinte minden újabb készülékben) megtalálhatók. A személyekhez köthető adatok továbbítása még jogi szempontból megoldandó kérdéskör, de amikor ez sikerül, egy még jobb minőségű adathalmazra alapozó, városi, sőt akár országos szintű egyéni és közösségi közlekedés optimalizáló rendszer lesz megvalósítható, amivel már egészen közel kerülhet a V2X a kitűzött „nulla halálos áldozat a közlekedésben” céljához.

Magyarországon is fontosnak látják a V2X járműkommunikációs rendszerek fejlesztésében, szabványosításában való részvételt: Zalaegerszeg mellett fejlesztés alatt van egy hatalmas kiterjedésű zárt, autóipar tesztpálya, melynek van nyílt útszakaszt és okos várost modellező része: itt zavartalanul és biztonságosan lehet ezeket a technológiákat vizsgálni, tesztelni³⁴.

A V2X által jelentett új technológiacsáládnak a kutatás-fejlesztésben (K+F) mutatott húzóereje kiemelkedő, beépítése a magyar felsőoktatásba a következő néhány év egyik fontos kihívása. Ezt felismerve a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszéke (HIT) a Commsignia Kft.³⁵-vel már több éve folyó közös szakmai munkát formalizálta és 2016. április 4-én a Multimédia Hálózatok és Szolgáltatások Laboratóriumon belül megalakította a COMMSIGNIA – BME HIT Jármű-kommunikáció

³³ K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang and Y. A. Zhang, "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 8, pp. 84-90, August 2019.

³⁴ <https://zalazone.hu/en/>

³⁵ <https://www.commsignia.com/>

Kutatócsoportot³⁶ (Commsignia – BME HIT V2X Communication Research Group). Az együttműködés legfontosabb elemei közé tartozik az ipar által motivált K+F és az innovatív alkalmazási területek vizsgálata, valamint a kooperatív járműkommunikáció tudományterületének bevezetése a villamosmérnökök és informatikusok oktatási programjába. Ez utóbbi törekvés egyik korai eredménye az *Autonóm járművek kommunikációs technológiái*³⁷ című szabadon választható tantárgy is, amely angol nyelven, gyakorlatokkal és terepi mérésekkel színesítve tárgyalja a vonatkozó kommunikációs megoldások, alkalmazások, szolgáltatások részleteit.

³⁶ <https://medianets.hu/research/commsignia-bme-hit-v2x-communication-research-group/>

³⁷ <https://portal.vik.bme.hu/kepzes/targyak/VIHIAV37/>

Irodalomjegyzék

- [1] Rénes Dániel: „Adatgyűjtés, -rendszerezés és –vizualizáció kooperatív intelligens közlekedési rendszerek V2X kommunikációs hálózataiban”, szakdolgozat, BME-VIK, 2017. december
- [2] Car-2-Car Communication Consortium: C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems and Services, elérhető: <https://www.car-2-car.org/about-c-its/#c133>, elérés ideje: 2019.11.28.
- [3] ZALA ZONE: Autóipari Próbapálya Zala Kft, <http://www.apz.hu>, elérés ideje: 2019.11.29.
- [4] Car-2-Car Communication Consortium (C2CCC), The Car-2-Car Communication Consortium Roadmaps beyond Day-1, Report, 2016. Elérhető: www.codecsproject.eu/fileadmin/user_upload/pdfs/City_Pool_Workshop_1/CIMEC-CODECS_2016-03-3_Buburuzan.pdf.
- [5] Granát Roland: Hardver biztonsági modul használata USA szabványokat követő V2X alkalmazásokban, diplomaterv, BME-VIK, 2018. december