

Aktuální radiokomunikační technologie pro komunikaci s vozidly V2X / ITS

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc.

*Katedra radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze
vaclavzalud@email.cz; <http://radio.fel.cvut.cz/>*

Stručný obsah prezentace

- Časový vývoj veřejné pozemní mobilní komunikace v nedávných letech*
- Co jsou systémy ITS/V2X: Intelligent Transportation System /Vehicle to Everything*
- Srovnání tří rádiových technologií pro komunikaci s vozidly: DSRC, C-V2X a LP-WAN*
- Lokální technologie pro komunikaci s vozidly: IEEE 802.11p*
- Buňkové technologie W-WAN pro komunikaci s vozidly C-V2X: 4G LTE a 5G NR*
- Nízkovýkonové technologie dlouhého dosahu pro komunikaci s vozidly V2X: LP-WAN*
- Přínosy inteligentních dopravních systémů ITS (Intelligent Transport Systems)*
- Zvýšená bezpečnost, nižší přetížení dopravy, C-V2X, snížený nepříznivý vliv na životní prostředí a nižší provozní náklady*
- Nejbližší perspektivy systémů ITS a komunikace V2X*

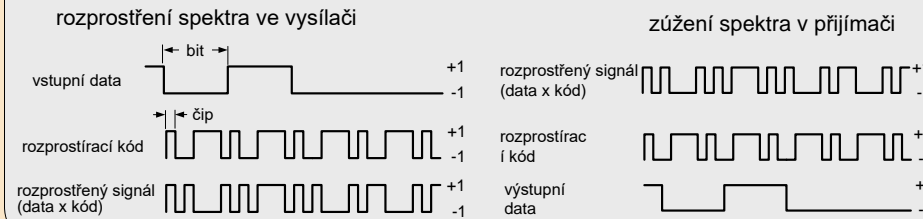
*Časový vývoj veřejné pozemní mobilní komunikace
v nedávných letech*

Generační vývoj systémů veřejné pozemní komunikace

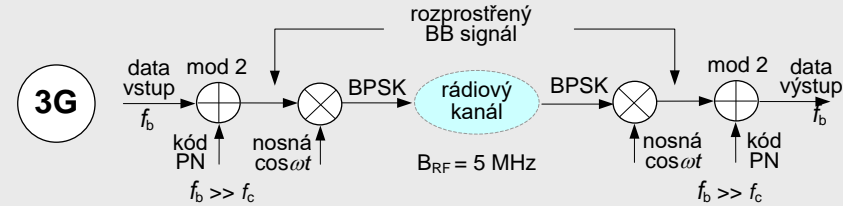
| | | | | | |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| generace: | 1G (1980) | 2G (1990) | 3G (2000) | 4G (2010) | 5G (2020) |
| přístup: | FDMA | TDMA | CDMA | OFDM | zatím neurčen |
| standardy: | NMT, AMPS... | GSM, IS 54... | HSPA... | LTE | |

| | | | | | |
|------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------|-------------------|---|
| | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020 |
| předcelulární generace | pouze řeč analog. systém | řeč, (data) | řeč + SMS (paket. data) | data+ video + řeč | rychlá data, multimédia |
| | | | | | hovor, data, multimedia: 10 Gb/s komunikace M2M (IoT, Tal..): 1 ms |

signál W-CDMA

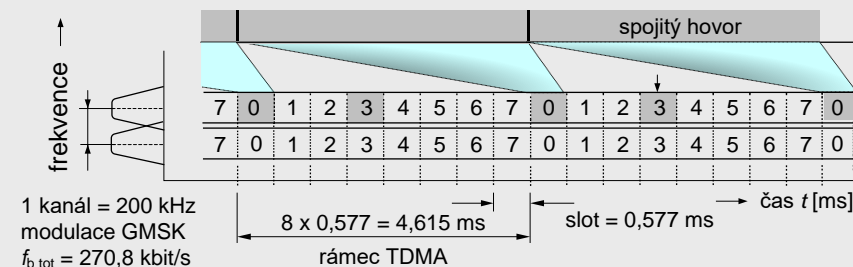


přenos W-CDMA (na bázi DS-SS)



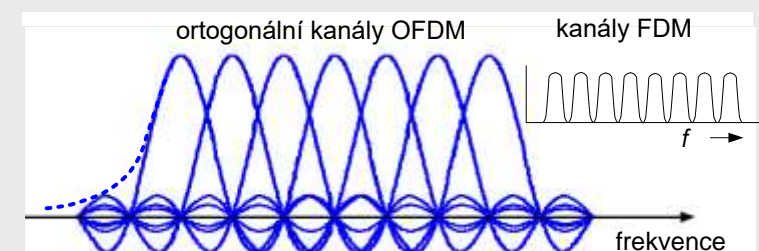
signál GSM

vývoj GSM (GMSK/CS) → GPRS (CS a PS) → EDGE (GMSK a 8PSK); přístup TDMA/FDMA: 8 časových slotů v rámci TDMA (4,615 ms); **2G** na přenosu: kódování FEC/ekvalizace/časové prokládání; GSM využívá pouze frekvenční duplex FDD ($\Delta f = 45 \text{ MHz}$); šířka pásma na 1 rádiový kanál = 200 kHz; další vývoj E EDGE (..32QAM ?)

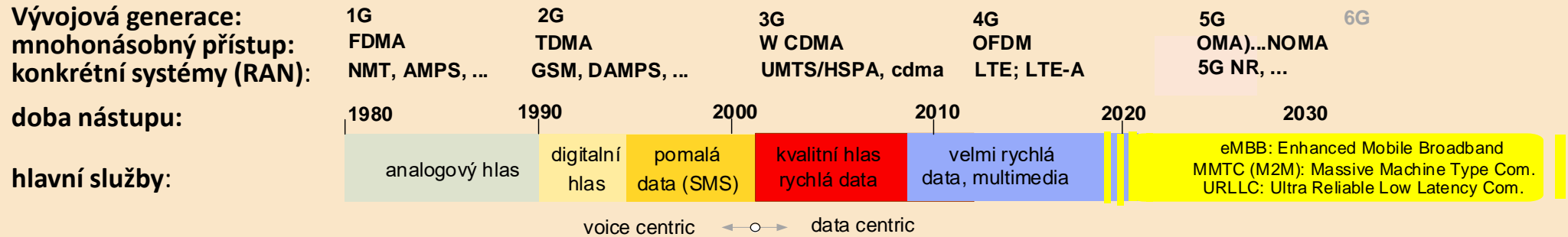


signál LTE

vývoj Rel. 8...12...; přístup OFDM, kde alokované pásmo obsahuje síť ortogonálních subnosných vln ($\Delta f = 15 \text{ kHz}$) ve frekvenční oblasti a **4G** tu odpovídající sekvenci OFDM symbolů ($T_u = 1/15 \cdot 10^3 = 66,66 \mu\text{s}$) v časové oblasti; širší pásma 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz, možnost agregace až $5 \times 20 = 100 \text{ MHz}$; rozvinutá technika MIMO;



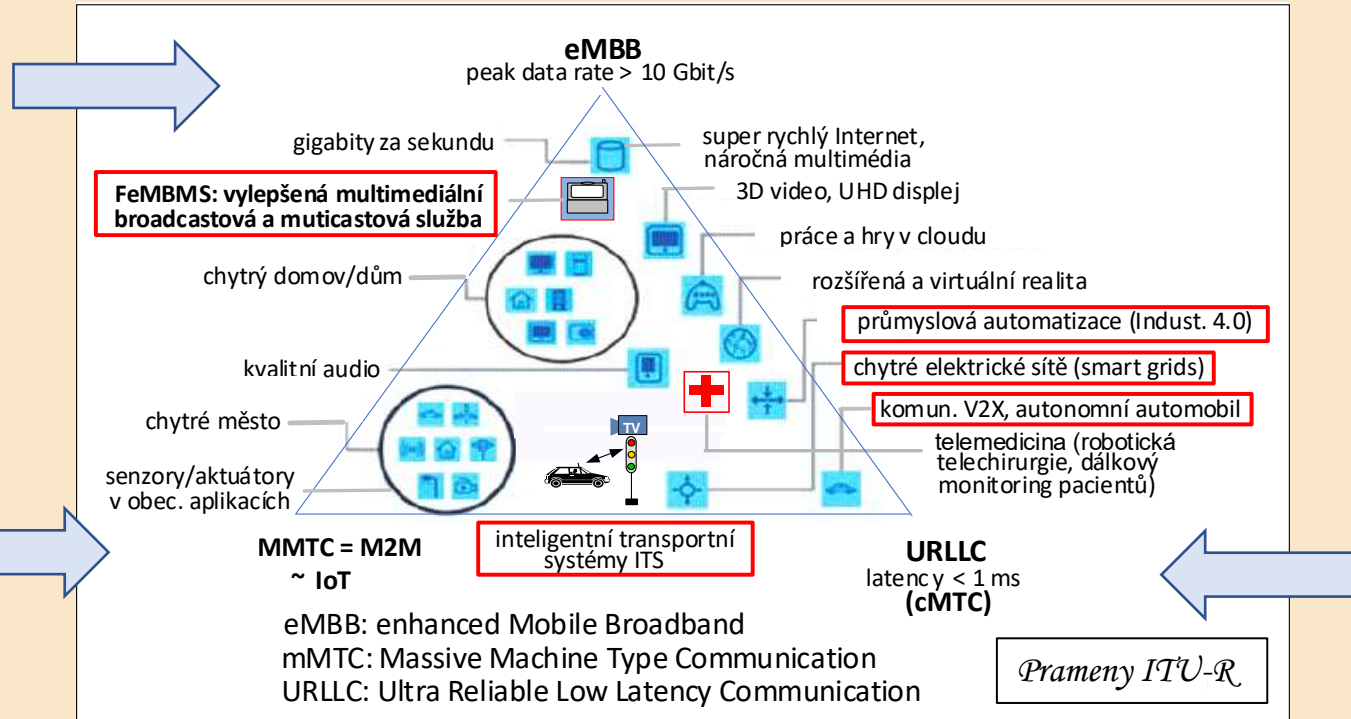
Časové vývojové mobilních sítí a trojúhelník aplikací systémů 5G



Mnohostranné aplikace buňkového systému 5G, vůči 4G rozšířené o MMTC a URLLC

Vylepšené tradiční aplikace (applications, use cases) sítí 1G až 4 G eMBB (enhanced Mobile Broad Band Systems)

Nové aplikace sítí 5G: mMTC (massive Machine type Communication) ≈ mM2M (massive Machine to Machine Communication)

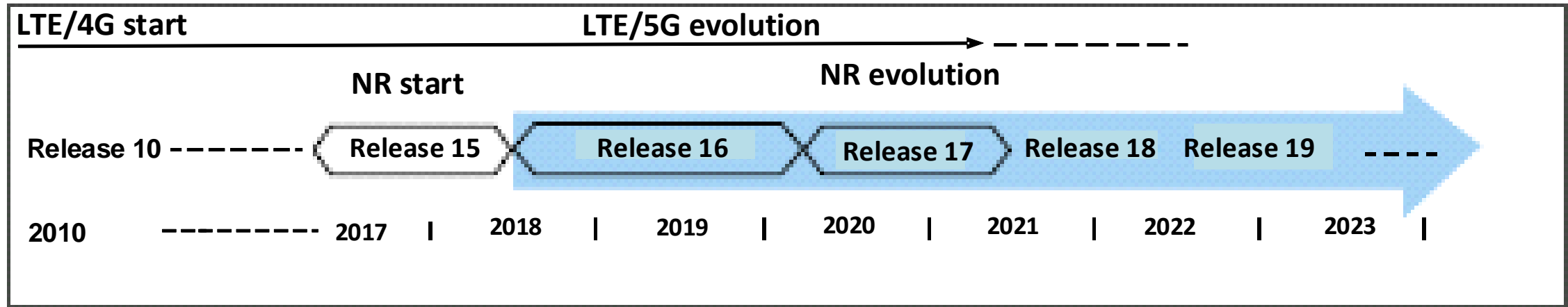


Nové aplikace sítí 5G: eMBB (enhanced Mobile Broad Band Systems) URLLC (Ultra Latency Low Reliable Communication)

Pátá generace mobilních komunikačních sítí (5G) bude plnit stále rostoucí nároky na podstatně rozšířený sortiment aplikací, vyžadující výrazně zvýšené uživatelské datové rychlosti, ale také vyšší propustnost, nižší latenci a spektrální i energetickou účinnost

Časový vývoj systému 4G LTE a 5G NR v rámci projektu 3GPP Rel. 8 až Rel.18

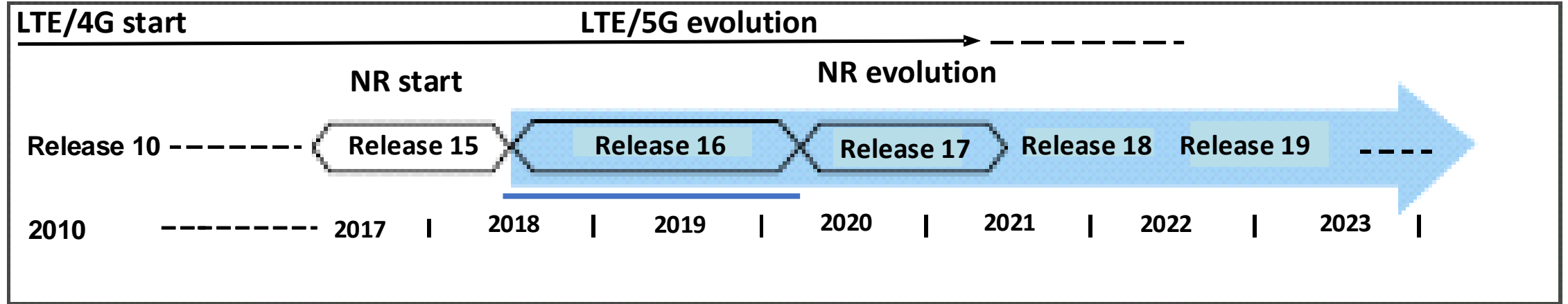
Časový vývoj mobilní komunikace probíhá podle projektu 3GPP ve formě na sebe navazujících Release (Vydání), tak jak ukazuje pro nedávná a nejbližší příští léta následující schéma. V roce 2010 nastupuje do života v rámci Rel. 10 nová rádiová přístupová síť LTE (Long Term Evolution), která ve spojení s inovovaným jádrem sítě EPC (Evolved Packet Core) vytváří novou, čtvrtou generaci buňkových systémů 4G. V Rel. 15 se začíná rozvíjet již v rámci systému 5G nová rádiová přístupová síť NR (New Radio), v Rel. 16 a dalších potom dochází k její postupné evoluci. Pro aktuální vývoj (Q2 2020) je typické jednak zdokonalování současných již existujících charakteristických rysů Release 16 a 17, jednak zavádění nových funkcionalit v rámci těchto Release.



K nejvýznamnějším výzkumným záměrům v Rel. 16 a Rel. 17 patří zejména:

- činnost v bezlicenčních segmentech spektra;
 - problematika inteligentních transportních (dopravních) systémů ITS (Intelligent Transport Systems);
 - průmyslový Internet věcí IIoT (Industrial Internet of Things)
 - satelitní síť
- a řada dalších aktuálních problémů a entit.

Přínosy systému 5G NR v rámci projektu 3GPP Rel. 16



Obohacení stávajících technik 5G NR v rámci Rel. 16:

Součástí tohoto procesu je:

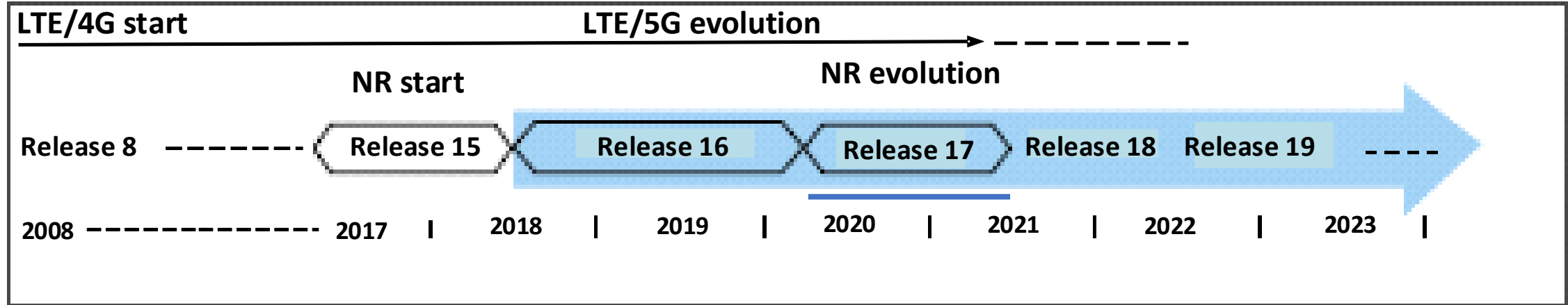
- Další rozvoj anténních systémů MIMO ve spojení s formováním svazků BF (Beam Forming);
- Dynamické sdílení spektra DSS (Dynamic Spectrum Sharing), jež usnadňuje spojitý přechod mezi systémy 4G LTE a 5G NR;
- Duální konektivita DC (Dual Connectivity) umožňující uživatelským terminálům UT současné spojení s pozemní buňkovou sítí a satelitní sítí;
- Agregace nosných CA (Carrier Aggregation) a úspora výkonu v uživatelských terminálech.

Uvedená opatření zvětšují propustnost a robustnost této inovované sítě a snižují nebezpečí jejího přetížení.

Nové funkcionality zaváděné v systému 5G NR v rámci Rel. 16 se zaměřují na následující oblasti:

- Integrace přístupové a backhaul sítě IAB (Integrated Access and Backhaul)
- Nové rádio NR v nelicencovaném spektru;
- Entity vztahující se k průmyslovému Internetu věcí IIoT (Industrial IoT) a k ultraspolehlivé nízkolatenční komunikaci URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication);
- **Inteligentní transportní systémy ITS (Intelligent Transp. System);**
- **komunikace mezi vozidly a okolím V2X (Vehicular to Anything);**
- Určování polohy (Positioning) je v NR založeno na využití lokačního serveru, podobně jako v LTE, takže je vhodné i pro vnitřní prostory (na rozdíl od systémů založených na satelitní navigaci GPS)

Další evoluční vývoj systému 5G NR v rámci projektu 3GPP Rel.17



V prosinci 2019 byly schváleny projektem 3GPP inovace ve všech třech hlavních aplikačních oblastech systému 5G Rel. 17. Jejich účelem je podpora dalšího očekávaného růstu provozu mobilních dat, jakož i úprava systému NR dle potřeb automobilismu, logistiky, veřejné bezpečnosti a výroby.

Obohacení stávající struktury 5G NR v rámci Rel. 17: v prosinci 2019 byly schváleny projektem 3GPP inovace ve všech třech hlavních aplikačních oblastech systému 5G:

- eMBB (zdokonalování technologií MIMO aj.),
- mMTC (přenos malých dat v neaktivním stavu aj.)
- URLLC (vyšší horizontální i vertikální přesnost a nižší latence při určování polohy aj.).

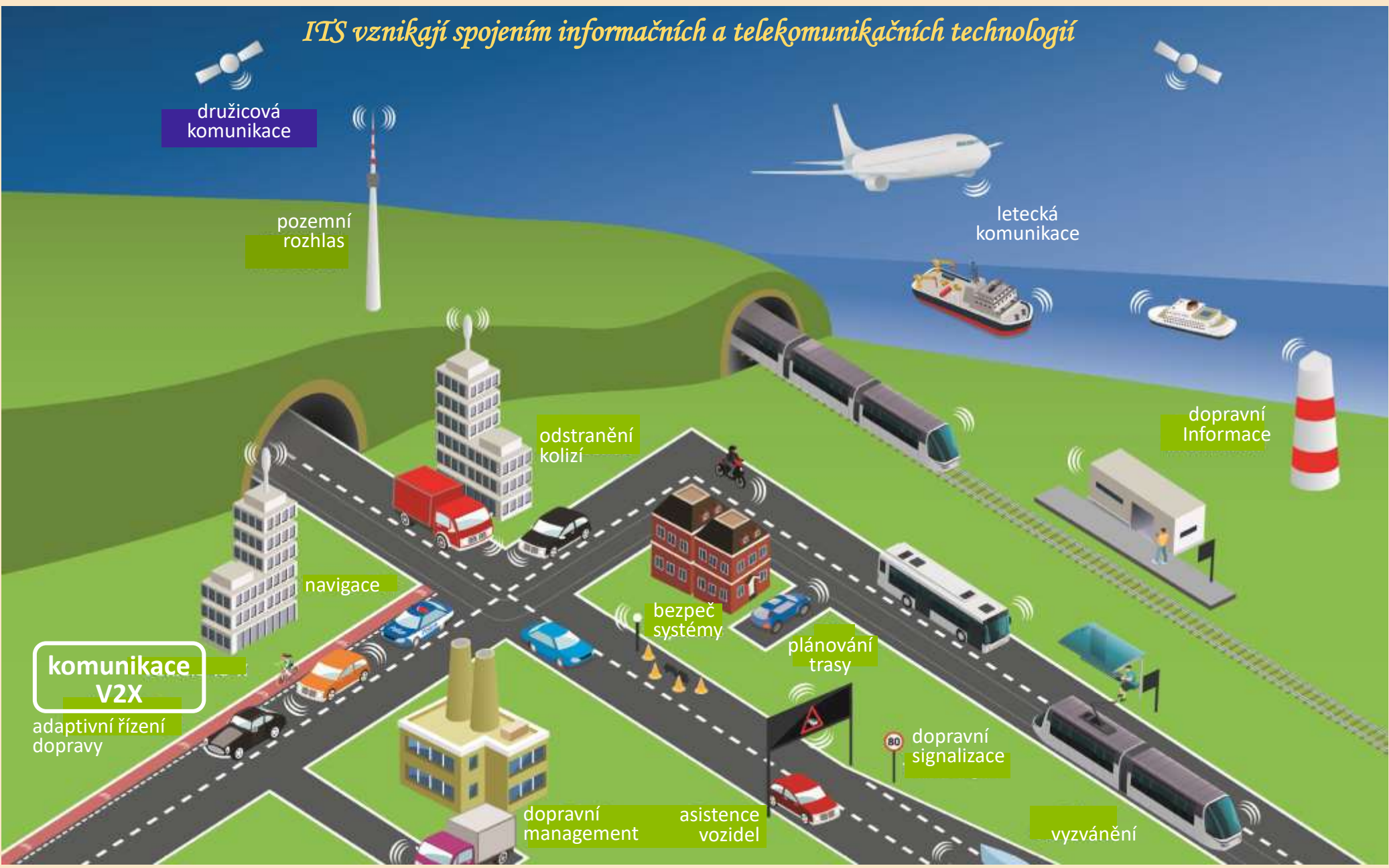
Nové funkcionality zaváděné v systému 5G NR v rámci Rel. 17 se zaměřují na následující oblasti:

- Integrace přístupové a backhaul sítě IAB (Integrated Access and Backhaul)
- Nové rádio NR v nelicencovaném spektru
- Entity vztahující se k průmyslovému Internetu věcí IIoT (Industrial IoT) a k ultraspolehlivé nízkolatenční komunikaci URLLC
- Inteligentní transportní systémy ITS
- komunikace mezi vozidly a okolím V2X
- Určování polohy (Positioning)

*Co jsou inteligentní transportní systémy ITS/V2X
(Intelligent Transportation System /Vehicle to Everything)*

Ilustrace pojmu Inteligentní transportní systémy ITS (Information Transport Systems)

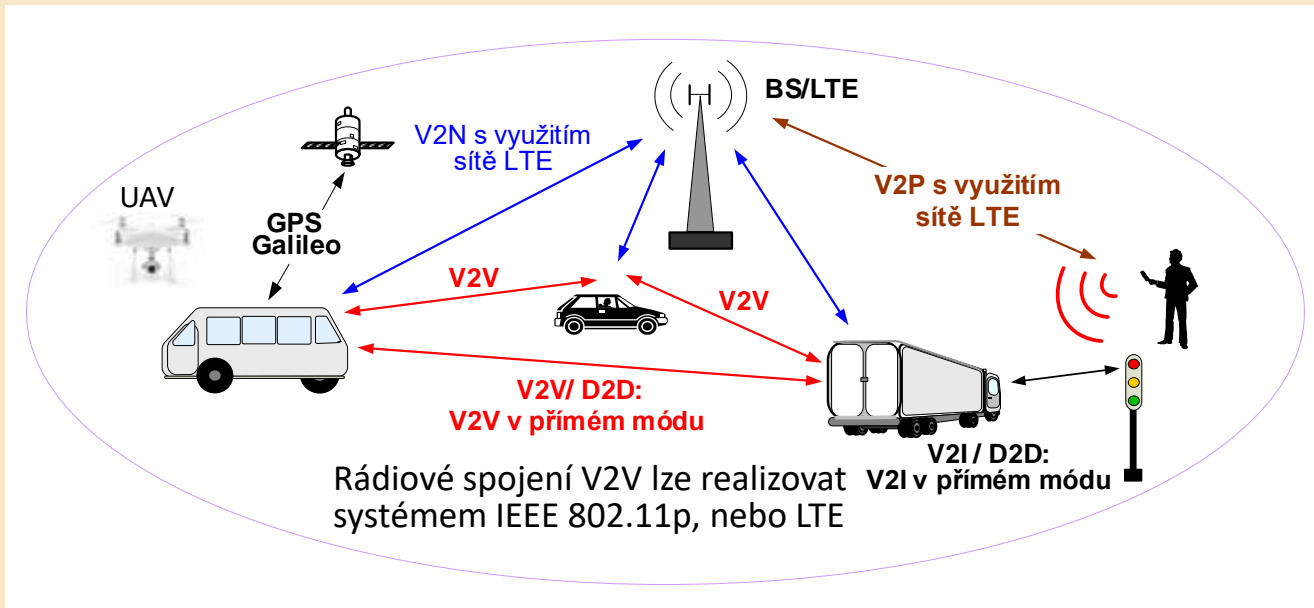
ITS vznikají spojením informačních a telekomunikačních technologií



Inteligentní transportní systémy ITS

- Inteligentní dopravní systémy ITS (Intelligent Transport Systems, Transport Telematics), vznikají spojením moderních informačních a komunikačních technologií. Jsou zaměřené na pozemní silniční dopravu, na železniční dopravu, dále na vodní říční i námořní dopravu a na dopravu leteckou. Systémy ITS všechny tyto formy dopravy sledují, vyhodnocují a také podle dohodnutých pravidel přímo řídí.
- Direktiva EU 2010/40/EU z roku 2010 definuje ITS jako systémy, u nichž jsou informační a komunikační technologie aplikovány hlavně na pozemní silniční dopravu zahrnující infrastrukturu, vozidla a jejich uživatele a dopravní management, jakož i management mobility. Pozornost je věnována i rozhraním s jinými, výše zmíněnými módy dopravy, které však podle zmíněné direktivy již do ITS jako celky, nepatří.
- Ve smyslu uvedené direktivy systémy ITS tedy umožňují v daném úseku silniční komunikace průběžně sledovat a vyhodnocovat charakteristiky dopravního proudu (hustotu provozu, intenzitu provozu, průměrnou rychlost proudu vozidel, odstupy vozidel apod. Přitom se berou v úvahu také meteorologické informace (teplotu vzduchu, teplotu povrchu vozovky, srážky, viditelnost, bod mrznutí, apod.), ale i například skladba vozového parku, hmotnost vozidel průjezd kradených automobilů atd.
- Získané informace a data jsou zpracovány v Národním dopravním informačním centru (NDIC). Prostřednictvím dalších telematických technologií jsou potom publikovány ve formě proměnných tabulí, proměnných značek apod., učených řidičům, nebo je provoz jimi přímo řízen (liniové řízení provozu). Pracoviště NDIC však není určeno pro přímou komunikaci s veřejností.
- **Tento příspěvek je z celé problematiky ITS zaměřen jen na rádiovou komunikaci, realizovanou v rámci silniční dopravy. Jeho jádrem je zkoumání systémů V2X (Vehicular to everything), tj. systémů pro rádiovou komunikaci mezi silničními vozidly navzájem a rovněž komunikaci mezi vozidly a jejich bližším i vzdálenějším okolím.**

Rádiová komunikace V2X (Vehicle-to-Everything)



Ilustrace různých prostředků rádiové komunikace V2X; jejími základními složkami jsou přístupové sítě C-V2X (Cellular-V2X), k nimž patří síť 4G LTE, která bude postupně doplňována sítí 5G NR; již déle se zde uplatňuje též standard pro lokální komunikaci DSRC (Dedicated Short Range Communication), ve variantě IEEE 802.11p.

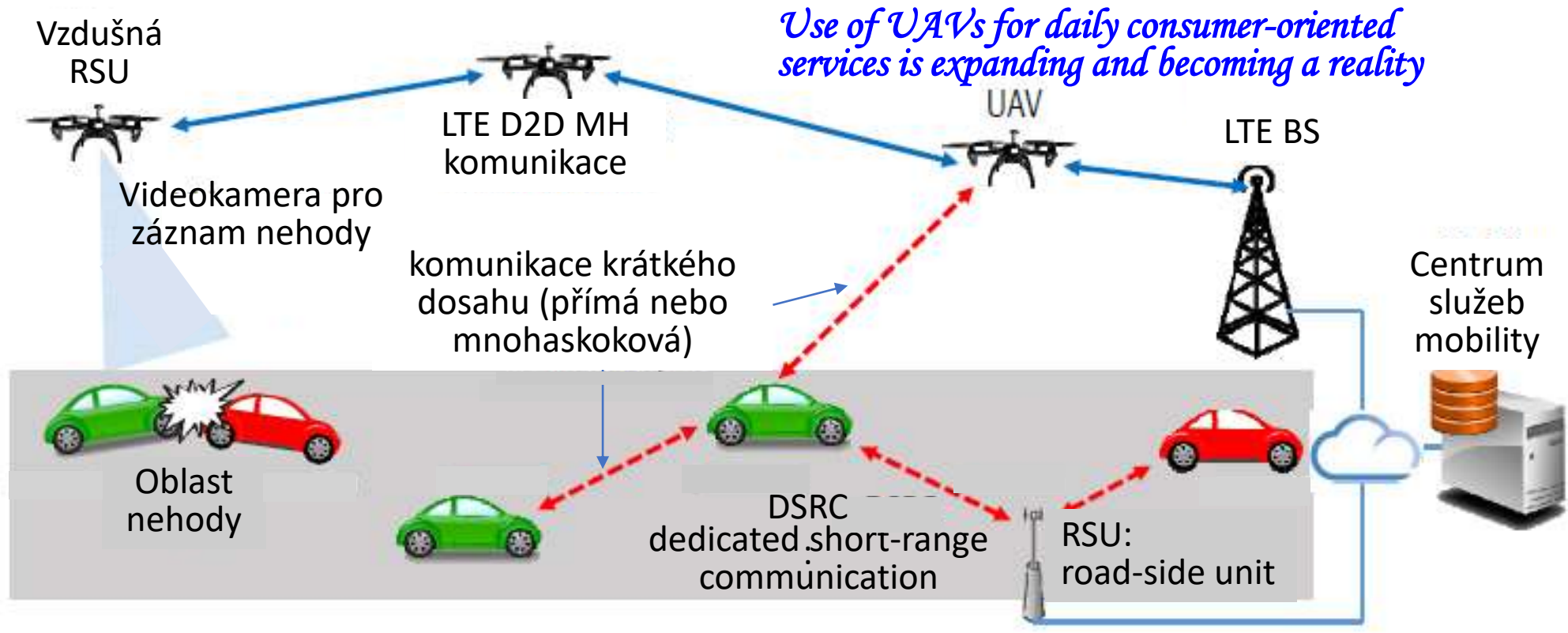
Dosah komunikace V2V, umožňující vzájemné spojení mezi silničními vozidly, a to při přímé viditelnosti LOS a nepřímé viditelnosti NLOS:
DSRC: dosah LOS \approx 240 m; dosah NLOS \approx 60 m
C-V2X: dosah LOS \approx 443 m; dosah NLOS \approx 107 m

Klíčovým prostředkem komunikace V2X je rádiové spojení mezi vozidlem a jeho okolím. Tato technologie má několik složek:

- Vozidlo komunikující s jinými vozidly v jeho okolí V2V (Vehicle-to-Vehicle)
- Vozidlo komunikující s okolní infrastrukturou V2I (Vehicle-to-roadside Infrastructure), jako jsou silniční semaforey ap.
- Vozidlo komunikující s chodci V2P (Vehicle-to-Pedestrian)
- Vozidlo komunikující se sítí V2N (Vehicle-to-Network), jež tvoří cloudová centra, základnové stanice a přístupové body ap.

RSU: Road Side Unit' (RSU) označuje fixní silniční rádiovou jednotku, zprostředkující mezi blízkými vozidly komunikaci V2X

UAV prostředky podporující inteligentní dopravní systém ITS



Prostředky UAV (Unmanned Aerial Vehicles) lze využít v inteligentních dopravních systémech ITS ve funkci:

- Silničních jednotek RSU (road-side unit), umožňujících komunikaci centra MSC s automobily
- Nosičů videokamer pro záznam havarijních situací a jeho on-line přenosu do MSC (mobile services center)
- Jeden z prostředků UAV se může přiblížit k místu nehody, pořídí její videozáznam, poté přistát a odeslat toto video prostřednictvím jiných UAV – event. technikou mnohaskokové komunikace MH D2D (multihop device to device), buď do centra MSC, nebo do základnové stanice LTE BS a odtud do dalších relevantních entit.

Rádiová komunikace V2X (Vehicle-to-Everything): definice, vývoj a přínosy

V silničních dopravních prostředcích se již delší dobu používají různé typy aktivních senzorů, jako jsou např. dopravní radary a lidary, systémy počítačového vidění apod., které aktivně sledují okolí daného prostředku v rámci „přímé viditelnosti“ LOS. **Na komunikaci V2X lze potom pohlížet jako na další formu senzorů, která má schopnost pomocí rádiové komunikace LOS, ale i NLOS aktivně „naslouchat a hovořit“ s jinými vozidly mimo dosah přímé viditelnosti a tak podrobněji mapovat dopravní situaci v okolí daného vozidla.**

Komunikace V2X (Vehicle to Everything) značí komunikaci iniciovanou pozemními vozidly, chodci, dopravní infrastrukturou nebo sítí a určenou jednomu nebo určité skupině uživatelů. Při této komunikaci se nejčastěji přenášejí kritické informace, jako je varování před dopravními kolisemi, změny v dopravních trasách, upozornění na blížící se dopravní komplikace apod. Technologii V2X je možné také využít pro platonování tj. synchronní jízdu skupiny vozidel.

Pro komunikaci V2X se používá rovněž označení „Bezdrátový přístup v mobilním prostředí WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)“, a také „Kooperativní připojená vozidla a kooperativní ITS“.

Výzkum problematiky V2X započal v USA již po roce 2000 v USA a za několik málo let vedl ke vzniku nové varianty bezdrátového lokálního standardu W-LAN typu IEEE 802.11p (2009), patřícího mezi dedikované systémy pro komunikaci na krátké vzdálenosti DSRC (Dedicated Short Radio Communication). S nástupem buňkových systémů 3GPP LTE 4G a zejména NR 5G, se ukazuje, že právě tyto buňkové technologie zvládnou většinu aplikací ITS lépe, než zmíněné lokální síť IEEE 802.11p, a proto začínají v oblasti V2X převládat.

Buňkové technologie C-V2X obecně mají větší dosah spojení, než technologie DSRC, který se přímo promítne do dřívější viditelnosti nebezpečných a často jinak neviditelných překážek (porouchané nepojízdné vozidlo apod) na trase. To potom umožňuje vyšší rychlosti vozidel, aniž by se zvyšovalo nebezpečí nejrůznějších kolizí.

Všechna tato opatření zvyšují bezpečnost silniční dopravy, snižují spotřebu paliva a tím snižují nepříznivý vliv na životní prostředí, podporují navigaci vozidel a jejich autonomní řízení, vedou k nižším investičním a provozním nákladům na dopravní infrastrukturu a přinášejí řadu dalších benefitů.

Příbuzné pojmy: MTC, M2M, IoT, IoE, IIoT, D2D a Ad-hoc

MTC - Machine-Type Communication (komunikace strojového typu)

Způsob komunikace mezi stroji a jinými zařízeními **bez přímé spoluúčasti člověka**. Pro MTC je typický obvykle velký počet koncových terminálů (senzorů a aktuátorů), z nichž každý přenáší jen malé objemy dat - často nespojitě v čase; přenos nebývá kritický na latenci, žádoucí je však co nejnižší spotřeba terminálů, nabízející potom výměnu baterií za 5 až 10 let.

Příslušné komunikační kanály využívají rádiové, nebo metalické, anebo optické spoje. Typickou aplikací jsou dálkové automatické měřiče různých veličin v komunálním hospodářství, v zemědělství a zahradnictví apod. Některé aplikace MTC, jako např. přehledovací kamery aj., však vyžadují rychlé přenosy s přísnějšími požadavky na latenci.

M2M – Machine to Machine (komunikace mezi stroji)

Způsob komunikace, zdůrazňující přenos dat s malým zpožděním mezi dopravními prostředky, průmyslovými, stavebními a jinými stroji a přístroji, **opět bez spoluúčasti člověka**, které vede ke zvýšení efektivity jejich činnosti a předchází případným problémům jejich kooperace. Klasickou aplikací M2M jsou také nejrůznější dálková měření, nebo kontrolní aplikace apod.

IoT – Internet of Things (Internet věcí)

Pojem poprvé použitý v roce 1999, se v současnosti obvykle vztahuje k aktivní výměně informací mezi věcmi, které dosud nebyly propojeny. Zásadní rozdíl IoT oproti MTC a M2M je v tom, že v jistém segmentu komunikačního řetězce **může být přímo zapojen lidský faktor**.

Poznámka: dle výše uvedených definic je komunikace M2M podmnožinou pojmu Internet věcí IoT.

IoE – Internet of Everything (Internet mezi vším)

Jiný termín pro IoT poprvé použitý a ještě stále užívaný firmou Cisco, který zahrnuje nejen IoT implementovaný z věcí, ale zahrnující i data, průmyslové a jiné procesy a lidi.

IIoT- Industrial Internet of Things (průmyslový Internet věcí)

Zastřešující pojem pro technologii M2M, zaměřenou výhradně na průmyslové stroje a přístroje.

D2D – Direct Device to Device

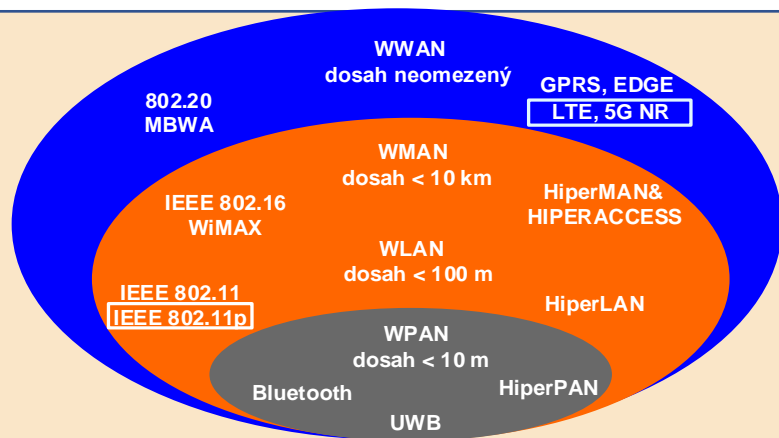
Přímá komunikace dvou, nebo více terminálů bez jakéhokoliv využití určité radiokomunikační sítě (viz projekt EU WINNER); D2D komunikace může být aktuální zejména v lokalitách nepokrytých základní buňkovou sítí, dále v havarijních situacích při dočasných poruchách této sítě a pro posílení její přenosové kapacity a také za účelem aplikací ve sféře veřejné bezpečnosti a osobní ochrany NSPS (National Security Public Safety). Důležitým přínosem komunikace D2D je úspora rádiových zdrojů (f , t) konvenčních sítí.

Ad-hoc sítě

V *ad-hoc* síti se navzájem spojují dva klienti, kteří jsou v rovnocenné pozici (peer-to-peer). Obě strany musí být v přímém rádiovém dosahu,

*Porovnání tří základních rádiových technologií systémů V2X/ITS:
DSRC (IEEE 802.11p); C-V2X (4G LTE, 5G NR); LP WAN (LoRa, Sigfox...)*

Tři základní rádiové technologie systémů pro komunikaci s vozidly: DSRX, C-V2X a LP WAN



DSRC
IEEE 802.11p



C-V2X
4G LTE → 5G NR

Pro komunikaci V2X se užívají v současnosti (Q1 2020) tři systémy veřejné pozemní radiokomunikace:

- **Systémy dedikované komunikace na krátké vzdálenosti DSRC** (Dedicated Short Range Communication); z nich je aktuální především jedna z variant bezdrátových systémů pro lokální komunikaci W-LAN, o to IEEE 802.11p, s dosahem až 1 km. Uplatnila se nejprve v r. 2015 v Japonsku a v r. 2017 v USA. V Evropě se objevuje technologie DSRC poprvé u vozů VW Golf 8 2019.
- **Systémy buňkové (celulární) komunikace C-V2X (Cellular V2X)** s celoplošným pokrytím; z nich je v současnosti aktuální LTE Rel. 16/17; evoluční vývoj standardu 4G LTE sice pokračuje, avšak v roce 2020 už nastupuje do praxe také standard 5G NR. Jeho velkou předností je to, že je schopen realizovat nejen vylepšenou širokopásmovou komunikaci eMBB, ale také masivní komunikaci strojového typu mMTC, a rovněž nízkolatenční komunikaci s vysokou spolehlivostí. Tak bude silniční provoz z hlediska bezpečnosti a efektivity postupně optimalizován a jeho nežádoucí dopady (emise ...) minimalizovány. Buňková technologie LTE a 5G NR se mohou provozovat jednak v módu přímé komunikace mezi vozidly C-V2V D2D (C-V2V Device to Device), jednak v módu síťové komunikace, užívající fixní infrastrukturu dané buňkové sítě.
- **Systémy nízkovýkonové rádiové komunikace LP WAN** (Low Power Wide Area Networks) Technologie LP WAN se hodí pro koncové terminály UT, které většinou vysílají po dlouhých pasívních intervalech malé objemy dat, často na velké vzdálenosti a při co nejmenší spotřebě napájecí energie a při malé potřebné šířce RF pásma. Používaná frekvenční pásma leží většinou pod frekvencí 1 GHz (např. 902 až 928 MHz). Konkrétně k nim náleží LP WAN: Lora, Sigfox, Nb IoT a další. Vzdálenost mezi UT a základnovou stanicí LP WAN může být až desítky kilometrů (chytrá města apod). Přenášená sdělení mají v průměru objem cca 20 až 256 bytů a běžně se opakují resp. inovují v intervalech několika sekund až dní, přičemž datová rychlost je většinou pod 5 kbit/s, může být ovšem i podstatně vyšší.

Konkrétní standardy systémů DSRC a C-V2X pro různé světové regiony

| Technology | Region | Standard |
|--------------|--------|--|
| 802.11p | US | IEEE 802.11-2012, IEEE 1609.2 - .4, SAE J2735 and SAE J2945/x series |
| 802.11p | Europe | "ITS-G5", ETSI ITS series |
| 802.11p | Japan | ARIB STD-109 |
| Cellular LTE | Global | 3GPP TS 22.185, TS 23.285 for V2X and LTE, and TS 36 series for radio access |
| Cellular 5G | Global | 3GPP TS 22.186; TS 23.501 for network architecture 3GPP 38 series for the radio access |

Komunikaci V2X podporují dvě hlavní technologie, a to W-LAN 802.11p a celulární technologie LTE a brzo také 5G NR. Tyto standardy se objevují v různých světových regionech pod různým označením, tak jak ukazuje tabulka výše.

K nim se řadí ještě třetí alternativa - nízkovýkonové sítě velkého dosahu LPWAN (Low-Power Wide Area Network), které se uplatní v celé řadě aplikací lokálního dosahu, jako jsou například systémy městského inteligentního parkování, systémy ochrany vozidel před odcizením, řízení světelných semaforů apod.

Technologické porovnání systémů DSRC a C-V2X v aplikacích V2X

Rel -14 C-V2X versus DSRC 802.11p porovnání technologií ve fyzické vrstvě

| Parametry | DSRC (802.11p) | R14 C-V2X |
|--------------------------------|--|--|
| Linková úroveň | | |
| získávání referenčních signálů | pokročilý odhad kanálu, nutný při vysokých rychlostech | nominální odhad kanálu, postačující při vysokých rychlostech |
| multiplexování | pouze TDM | TDM / FDM |
| přijímací diverzita | nepovinná | povinná |
| HARQ | neuvažuje se | povinné |
| kódování | konvoluční | turbo |
| typ modulace | OFDM | SC-FDM |

Porovnání funkcionalit systémů IEEE 802.11p, LTE a 5G NR pro komunikaci V2V

Porovnání základních funkcionalit tří základních přístupových technologií IEEE 802.11p, 3GPP LTE, LTE-A a 5G NR

LTE Rel.14 C-V2X představuje nezbytný vývojový stupeň, při cestě k nástupu budoucího systému 5G NR. Ten bude schopen zajistit komunikaci eMBB, dále masívní komunikaci strojového typu mMTC a rovněž ultraspolehlivou nízkolatenční komunikaci URLLC. Díky tomu bude zvládat nejnovější plánované oblasti využití ve světě inteligentních transportních systémů ITS.

| KLÍČOVÉ FUNKCIONALITY | D-SRC IEEE 802.11p | C-V2X Rel 14 LTE | C-V2X Rel 15 / 16 LTE/LTE A; 5G NR |
|---|--------------------|------------------|------------------------------------|
| Funkce mimo síť | ✓ | ✓ | ✓ |
| Podpora pro V2V | ✓ | ✓ | ✓ |
| Podpora bezpečnostně kritických operací | ✓ | ✓ | ✗* |
| Podpora pro V2P | ✓ | ✓ | ✓ |
| Podpora V2I | Omezená | ✓ | ✓ |
| Podpora pro multi-mediální služby | ✗ | ✓ | ✓ |
| Podpora síťového pokrytí | Omezená | ✓ | ✓ |
| Globální ekonomika | ✗ | ✓ | ✓ |
| Úsilí o regulaci a testování | ✓ | Omezená | ✗ |
| Velmi vysoká propustnost | ✗ | ✗ | ✓ |
| Velmi vysoká spolehlivost | ✗ | ✗ | ✓ |
| Širokopásmové určování rozsahu a přehledování | ✗ | ✗ | ✓ |
| Velmi nízká latence | ✗ | ✗ | ✓ |

Díky zpětné kompatibilitě budou vozidla s novou technologií 5G NR podporovat nejen nejnovější formy komunikace 5G NR, ale i komunikace se staršími variantami LTE-V2X. Vozidla vybavená technologií 802.11p mohou vysílat přes příslušné brány svá data k jádru EPC systému 4G a poté ke 5GC, později potom přímo k jádru 5GC sítí 5. generace.

Prozatímní přiděl frekvencí pro systémy C-V2X a DSRC

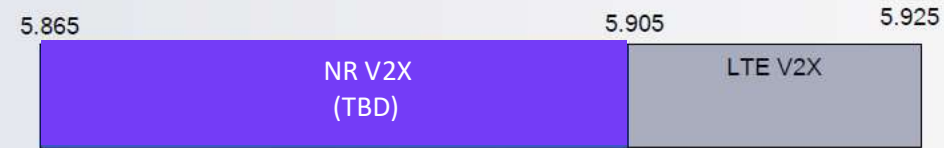
The 5G Automotive Association (5GAA) is a global cross-industry association that was formed in September 2016 to foster the development of connected and self-driving cars as well as intelligent transport systems.

US:

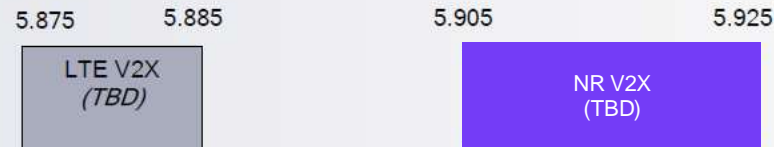


Based on 5GAA's proposal to FCC

China



EU



TBD: to be discussed

Systémy C-V2X se stávají skutečně globálním systémem, proto je nutné jim přidělit úseky frekvenčního spektra, které tomuto požadavku vyhovují. Z různých možností se stávají zcela jasně jednoznačnou volbou frekvenční segmenty v okolí 5,9 GHz. Tyto frekvence sice jsou již relativně vysoké, takže v porovnání s běžnějšími celulárními pásmy pod 2GHz se vyznačují větším útlumem při šíření LOS, výborným odrazem avšak horším ohybem a rozptylem při šíření NLOS, přesto však v podstatě představují pro systémy ITS optimální řešení, a to jak v současných aplikacích LTE V2X, tak v blízké budoucnosti v aplikacích NR V2X. Situaci v aplikacích ITS/V2X mohou zlepšovat také jiná LTE pásma a eventuálně pásma plánovaná pro síť 5G NR. Celulární koncepce C-V2X jsou zde vhodně doplňovány lokálními systémy WAN, které posilují celkové pokrytí i kapacitu. Některé z uvedených technologií mohou pracovat nejen v obvyklém síťovém režimu, ale i v režimu přímé komunikace D2D.

[1] https://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum.pdf (Huawei 5G Spectrum)

[2] Cellular-V2X Technology Overview. Qualcomm 80 PE732-63

[3] <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/spectrum-for-4g-and-5g.pdf>

Shrnutí základních přínosů komunikace V2V

Prudce rostoucí intenzita silniční dopravy a její zrychlení může vést k výraznému přetížení silniční sítě, což má za následek absolutní i relativní nárůst počtu silničních nehod. V USA Správní úřad NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) určil, že od roku 2017 musí být všechny nové osobní automobily vybaveny technologií V2V, nejdříve na bázi radiokomunikační technologií krátkého dosahu DSRC, později pak s aplikací buňkových technologií C-V2V užívajících buňkové systémy LTE 4G a posléze i systémy 5G NR.

Systémy V2X umožňují výměnu kritických informací mezi vozidlem a jeho okolím, čímž se zdokonaluje informovanost a tím snižuje nebezpečí kolizí. Kromě toho V2X zajišťuje spolehlivý přístup k velkému množství informací obsažených v cloudu. Například umožňuje snadnou dosažitelnost informací o provozu v reálném čase, HD mapování různých dat přicházejících od palubních i externích senzorů apod., které je užitečné nejen pro současné řidiče, ale bude klíčové pro navigaci samořiditelných aut v blízké budoucnosti

Automobilový průmysl se rozvíjí směrem k připojeným a autonomním vozidlům, které nabízejí mnoho benefitů:

- zvýšená bezpečnost motorové silniční dopravy, týkající jejich řidičů a ostatních cestujících, chodců, cyklistů ap.
- zvětšená průchodnost vozovek vedoucí k menšímu přetížení dopravy;
- snížená spotřeba pohonných hmot a tím i menší nepříznivý vliv na životní prostředí;
- nižší provozní náklady.

Systémy V2X využívající pásma v okolí relativně vysokých frekvencí cca 5,9 GHz, ať již buňkové C-V2X nebo dedikované DSRC, sebou nesou ovšem i řadu problémů. Jedním z nich je např. Dopplerův posun frekvence, ke kterému dochází např. při stacionárním vysílači o frekvenci f_0 , k němuž se přibližuje přijímač pohybující se rychlosti v . Přijímaná frekvence je $f = f_0 (1 + v/v_0)$. Dopplerův posun frekvence je potom $\Delta f = f - f_0$. Je-li např. $f_0 = 6$ GHz a $v = 500$ km/h, je $\Delta f = 2\,700$ Hz, což vede k variacím rádiového kanálu, dokonce i uvnitř subbrámce.

*Technologie W LAN pro komunikaci s vozidly V2X:
IEEE 802.11p*

Lokální bezdrátové standardy IEEE 802.11 pro komunikaci W-LAN

IEEE 802.11 je soustava standardů pro lokální bezdrátové sítě WLAN (Wireless Local Area Network) vyvíjená 11. pracovní skupinou IEEE LAN/MAN standardizační komise IEEE 802. K tomuto standardu přísluší množinu Dodatků (Amendment), označených písmeny a, b, ..., které využívají pásma v okolí 1,9 GHz; 2,4 GHz; 5 GHz; 6 GHz a 60 GHz. Z nich některá spadají do nelicenzovaných segmentů spektra, což pak může vést k interferencím např. s mikrovlnnými troubami. Tyto dílčí doplňky nespecifikují kompletní radiokomunikační systémy, nýbrž jen jejich nejnižší fyzickou vrstvu PHY (MAC) a nad ní zařazenou vrstvu řízení přístupu na média MAC (Medium Access Control), zbytek je záležitostí vyšších protokolů (na rozdíl např. od technologie [Bluetooth](#), která sama o sobě zajišťuje kompletně nejruznější služby).

IEEE 802.11p značí Dodatek pro specifikaci bezdrátového přístupu pro dopravní prostředky (auta, vlaky, ...), využívající pásmo 5.9 GHz (5.85–5.925 GHz).

Wi-Fi (nebo také **Wi-fi**, **WiFi**, **Wifi**, **wi-fi**, **wifi**) je v informatice označení pro několik standardů IEEE 802.11 popisujících původně bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích (WLAN). Samotný název WiFi vytvořilo Wireless Ethernet Compatibility Alliance. Tato technologie využívá bezlicenčního frekvenčního pásma, takže je ideální pro budování levné, ale výkonné sítě bez nutnosti pokládky kabelů a s tím spojených problémů. Název původně neměl žádný konkrétní význam, ale časem se z něj stala slovní hříčka wireless fidelity (bezdrátová věrnost) analogicky k [Hi-Fi](#) (high fidelity – vysoká věrnost).



This [Linksys WRT54GS](#) Wi-Fi router operates on the 2.4 GHz capable transmit 54 Mbit/s.

Přehled bezdrátových standardů IEEE 802.11 pro lokální komunikaci W-LAN

Dodatků standardu IEEE 802.11 je v současné době již tak velký počet, že jejich označení vyčerpává všechna písmena malé abecedy, a proto další přicházející je nutné specifikovat dvěma písmeny, jako například IEEE 802.11aa apod.

Standards and amendments [\[edit \]](#)

Within the IEEE 802.11 Working Group,^[55] the following IEEE Standards Association Standard and Amendments exist:

- IEEE 802.11-1997: The WLAN standard was originally 1 Mbit/s and 2 Mbit/s, 2.4 GHz RF and infrared (IR) standard (1997), all the others listed below are Amendments to this standard, except for Recommended Practices 802.11F a
- IEEE 802.11a: 54 Mbit/s, 5 GHz standard (1999, shipping products in 2001)
- IEEE 802.11b: Enhancements to 802.11 to support 5.5 Mbit/s and 11 Mbit/s (1999)
- IEEE 802.11c: Bridge operation procedures; included in the IEEE 802.1D standard (2001)
- IEEE 802.11d: International (country-to-country) roaming extensions (2001)
- IEEE 802.11e: Enhancements: QoS, including packet bursting (2005)
- IEEE 802.11F: Inter-Access Point Protocol (2003) Withdrawn February 2008
- IEEE 802.11g: 54 Mbit/s, 2.4 GHz standard (backwards compatible with b) (2003)
- IEEE 802.11h: Spectrum Managed 802.11a (5 GHz) for European compatibility (2004)
- IEEE 802.11i: Enhanced security (2004)
- IEEE 802.11j: Extensions for Japan (4.9-5.0 GHz) (2004)
- IEEE 802.11-2007: A new release of the standard that includes amendments a, b, d, e, g, h, i, and j. (July 2007)
- IEEE 802.11k: Radio resource measurement enhancements (2008)
- IEEE 802.11n: Higher-throughput improvements using MIMO (multiple-input, multiple-output antennas) (September 2009)
- IEEE 802.11p: WAVE—Wireless Access for the Vehicular Environment (such as ambulances and passenger cars) (July 2010)
- IEEE 802.11r: Fast BSS transition (FT) (2008)
- IEEE 802.11s: Mesh Networking, Extended Service Set (ESS) (July 2011)
- IEEE 802.11T: Wireless Performance Prediction (WPP)—test methods and metrics Recommendation cancelled
- IEEE 802.11u: Improvements related to HotSpots and 3rd-party authorization of clients, e.g., cellular network offload (February 2011)
- IEEE 802.11v: Wireless network management (February 2011)
- IEEE 802.11w: Protected Management Frames (September 2009)
- IEEE 802.11y: 3650–3700 MHz Operation in the U.S. (2008)
- IEEE 802.11z: Extensions to Direct Link Setup (DLS) (September 2010)
- IEEE 802.11-2012: A new release of the standard that includes amendments k, n, p, r, s, u, v, w, y, and z (March 2012)
- IEEE 802.11aa: Robust streaming of Audio Video Transport Streams (June 2012)
- IEEE 802.11ac: Very High Throughput <6 GHz;^[81] potential improvements over 802.11n: better modulation scheme (expected ~10% throughput increase), wider channels (estimate in future time 80 to 160 MHz), multi user MIMO;^[82]
- IEEE 802.11ad: Very High Throughput 60 GHz (December 2012) — see WiGig
- IEEE 802.11ae: Prioritization of Management Frames (March 2012)
- IEEE 802.11af: TV Whitespace (February 2014)
- IEEE 802.11-2016: A new release of the standard that includes amendments ae, aa, ad, ac, and af (December 2016)
- IEEE 802.11ah: Sub-1 GHz license exempt operation (e.g., sensor network, smart metering) (December 2016)
- IEEE 802.11ai: Fast Initial Link Setup (December 2016)

Základní parametry fyzické vrstvy některých standardů rodiny IEEE 802.11

Všechny tyto standardy jsou určeny pro komunikaci na krátké vzdálenosti do 1 km, avšak v konkrétních parametrech se liší

| IEEE 802.11 network PHY standards [hide] | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|-------------|--------------------------------|--|---------------------------|--|------------------------|------------|--|------------------------------------|---------------|--|
| Frequency range, or type | PHY | Protocol | Release date ^[12] | Frequency | Bandwidth | Stream data rate ^[13] | Allowable MIMO streams | Modulation | Approximate range ^[citation needed] | | | |
| | | | | (GHz) | (MHz) | (Mbit/s) | | | Indoor | Outdoor | | |
| 1–6 GHz | DSSS/FHSS ^[14] | 802.11-1997 | Jun 1997 | 2.4 | 22 | 1, 2 | N/A | DSSS, FHSS | 20 m (66 ft) | 100 m (330 ft) | | |
| | HR-DSSS ^[14] | 802.11b | Sep 1999 | 2.4 | 22 | 1, 2, 5.5, 11 | N/A | DSSS | 35 m (115 ft) | 140 m (460 ft) | | |
| | OFDM | 802.11a | Sep 1999 | 5 | 5/10/20 | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 (for 20 MHz bandwidth, divide by 2 and 4 for 10 and 5 MHz) | N/A | OFDM | 35 m (115 ft) | 120 m (390 ft) | | |
| | | 802.11j | Nov 2004 | 4.9/5.0 ^[D] ^[15] ^[failed verification] | | | | | ? | ? | | |
| | | 802.11p | Jul 2010 | 5.9 | | | | | ? | 1,000 m (3,300 ft) ^[16] | | |
| | | 802.11y | Nov 2008 | 3.7 ^[A] | | | | | ? | 5,000 m (16,000 ft) ^[A] | | |
| | ERP-OFDM(, etc.) | 802.11g | Jun 2003 | 2.4 | 20 | Up to 288.8 ^[B] | 4 | MIMO-OFDM | 38 m (125 ft) | 140 m (460 ft) | | |
| | HT-OFDM ^[17] | 802.11n | Oct 2009 | 2.4/5 | | | | | 40 | Up to 600 ^[B] | 70 m (230 ft) | 250 m (820 ft) ^[18] ^[failed verification] |
| | VHT-OFDM ^[17] | 802.11ac | Dec 2013 | 5 | 20 | Up to 346.8 ^[B] | 8 | MIMO-OFDM | 35 m (115 ft) ^[19] | ? | | |
| | | | | | | | | | | | 40 | Up to 800 ^[B] |
| | | | | | | | | | | | 80 | Up to 1733.2 ^[B] |
| | | | | | | | | | | | 160 | Up to 3466.8 ^[B] |
| | HE-OFDM | 802.11ax | September 2019 ^[20] | 2.4/5/6 | 20 | Up to 1147 ^[F] | 8 | MIMO-OFDM | 30 m (98 ft) | 120 m (390 ft) ^[G] | | |
| 40 | | | | | Up to 2294 ^[F] | | | | | | | |
| 80 | | | | | Up to 4803 ^[F] | | | | | | | |

Lokální standard IEEE 802.11p pro komunikaci v prostředí ITS: shrnutí vlastností

System IEEE 802.11p je doplňující návrh standardu IEEE 802.11, schválený v r. 2009, patřící do kategorie dedikovaných systémů pro rádiovou komunikaci krátkého dosahu DSRC (Dedicated Short-Range Communication); je znám též pod zkratkou WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment). Patří do širší kategorie sítí VANET (Wireless Ad hoc NETWORKS), kam dále náleží např. systémy ZigBee IEEE WiMAX aj.

System IEEE 802.11p rozšiřuje aplikace o rádiový přístup v prostředí pozemních inteligentních dopravních systémů ITS (Intelligent Transportation System), především pak komunikaci mezi vozidly označovanou obecně symbolem V2V (Vehicle to Vehicle) a také mezi vozidly a jejich okolím V2X (Vehicle to Everything). Hlavním přínosem ITS je zvýšení bezpečnosti silničního provozu a jeho efektivity. Zvýšení bezpečnosti, zejména havarijních situací s vážnými následky je nejcennějším atributem. Zvýšení efektivity se projeví v energetické oblasti snížením spotřeby pohonných hmot a tím i produkce CO₂, v oblasti provozní zvýšením průchodnosti vozovek, zrychlením dopravy apod.

Základní metodou mnohonásobného přístupu je u IEEE 802.11p multiplex OFDM. Od výchozího standardu IEEE 802.11a se liší hlavně v parametrech fyzické vrstvy PHY (Physical) i vrstvy MAC (Medium Access Control):

- Využívá pásmo o šířce 75 MHz, rozprostírající se od 5 850 do 5 925 MHz;
- Podporuje šířky pásma na jeden RF kanál 10 MHz, oproti 20 MHz u IEEE 802.11a;
- Oproti 802.11a podporuje poloviční bitové rychlosti, tedy 3/4,5/6/9/12/18/24 a 27 Mbit/s.
- Využívá modulace BPSK/QPSK/16QAM/64QAM, stejné jako IEEE 802.11a
- Počet subnosných na jeden symbol je 52, tedy stejný jako u sítě IEEE 802.11a;
- Délka symbolů OFDM je 8 μ s, oproti 4 μ s u sítě 802.11a
- Ochranný interval GI = 1,6 μ s, oproti GI = 0,8 μ s u sítě 802.11a
- Dosah ve vnějším prostředí až 1 000 m, oproti 140 m u sítě 802.11a

Buňkové technologie W W A N pro komunikaci s vozidly C-V2X:

4G LTE a 5G NR

Základy technologie radiokomunikačních buňkových systémů 4G LTE

Signál LTE ve frekvenční oblasti

Signál LTE ve frekvenční oblasti f obsahuje v alokovaném pásmu síť ortogonálních subnosných vln s rozestupy $\Delta f = 15$ kHz. Tomu potom odpovídá v časové oblasti t sekvence OFDM symbolů o délce

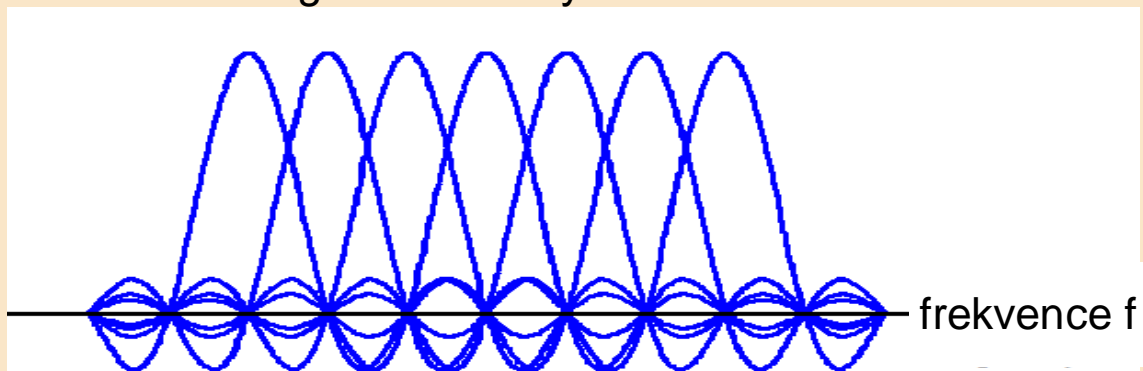
$$T_u = (1/15 \cdot 10^3)^{-1} = 66,66 \dots \mu\text{s}$$

Alokované šířky pásma jsou

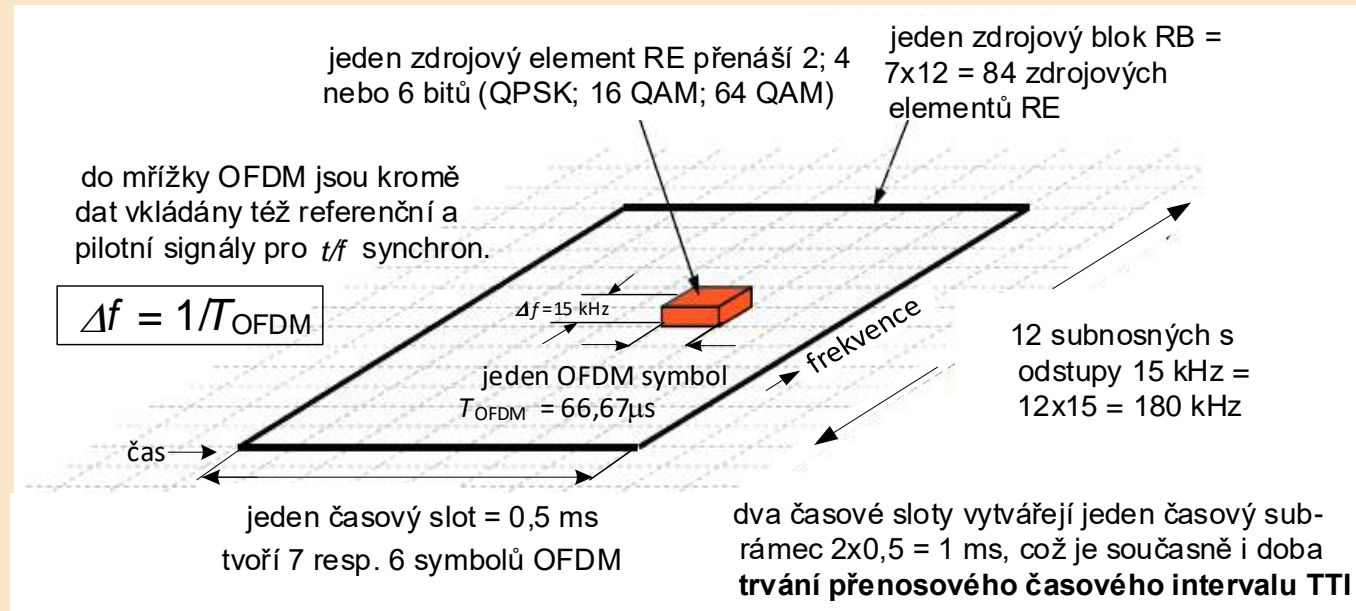
1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz

Při jejich agregaci lze dosáhnout maximální kompozitní šířky pásma až 5×20 MHz = 100 MHz. Pokročilejší varianty LTE jsou velmi dobře slučitelné s anténní technologií MIMO.

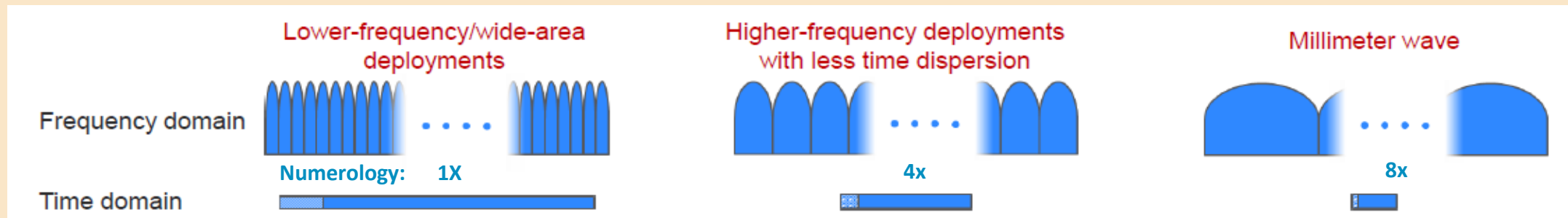
Ortogonální kanály OFDM



Fixní struktura multiplexu OFDM systému 4G/LTE a přechod k variabilní koncepci 5G



Struktura signálů OFDMA v síti 5G NR vychází z txf mřížky, podobné jako u 4G LTE, avšak s výrazně variabilní numerologií. V časové doméně je opět určena základním odstupem subnosných $\Delta f = 15 \text{ kHz}$, odpovídajícím tzv. numerologii 1x. Navíc ale definuje ještě numerologie 2x; 4x; 8x a 16x s odstupy subnosných vln zvětšenými na 30; 60; 120 a 240 kHz, které potom vedou od původní doby trvání OFDM symbolu $T_{\text{OFDM}} = 66,67 \text{ ms}$ ke zkráceným dobám 33,33; 16,67; 8,33 a 4,17 ms (3GPP/Rel. 15). Úměrně tomu se redukuje i délka slotů a subrámců a tedy i intervalu TTI. Jelikož v některých aplikacích jsou i redukované sloty příliš dlouhé, zavádí se v systému 5G NR ještě třída mini-slotů, které dále zkracují interval TTI.



Velmi vysoká spolehlivost URC dosahovaná u standardů 4G LTE a 5G NR

Příčiny nespolehlivosti v sítích 4G/5G:

Komunikaci s velmi vysokou spolehlivostí URC v sítích 4G/5G ohrožuje několik typů poruch RI (Reliability Impairments):

1. Zmenšený výkon užitečného signálu (Decreased power of the useful signal)

Spolehlivost komunikace URC ohrožují základní rušivé mechanismy šíření vln v pozemských kanálech, jako je únik (fading) a zastínění. Tomu lze čelit hlavně vhodnou volbou typu modulace a kanálového kódování MCT (Modulation Coding Technology). Volba MCT musí být optimalizována pro krátké kódové bloky, jež jsou pro URC typické. Slibným řešením zde jsou polární kódy PC, představující novou třídu lineárních blokových kódů, které řeší problematiku ochranného kanálového kódování neortodoxním způsobem (Prof. Arikan, Turkey)

2. Nekontrolovatelné interference (Uncontrollable interference), zejména v bezlicenčních pásmech

Bezlicenční pásma pro 5G jsou sice snadno dostupná, avšak působí v nich četné interference. Ty se ale mohou objevit i v licencovaných pásmech, zejména v prostředí malých mikro a femto buněk a při přímé komunikaci terminálů D2D.

3. Vyprázdnění zdrojů vlivem konkurence (Resource depletion due to competition)

4. Malá adaptabilita dosavadních komunikačních protokolů ke komunikaci URC (Communication protocol reliability mismatch)

5. Poruchovost infrastruktury systému URC (Equipment failure)

I když je kompletní infrastruktura systému URC realizována ze součástek s velmi vysokou spolehlivostí, její poruchy během provozu nelze nikdy vyloučit, a to hlavně v důsledku nestandardních pracovních podmínek (přírodní katastrofy apod).

Metody zvýšení spolehlivosti komunikace URC v sítích 4G/5G

Kanálové kódování FEC (Forward Error Correction): přidávání redundantních (ochranných) bitů k datovým bitům.

Opakované vysílání ARQ (Automatic Repeat Query): chybné úseky přenosu jsou v přijímači detekčními kódy indikovány; vysílač je pak automaticky zpětným kanálem požádán o jejich opakované vysílání.

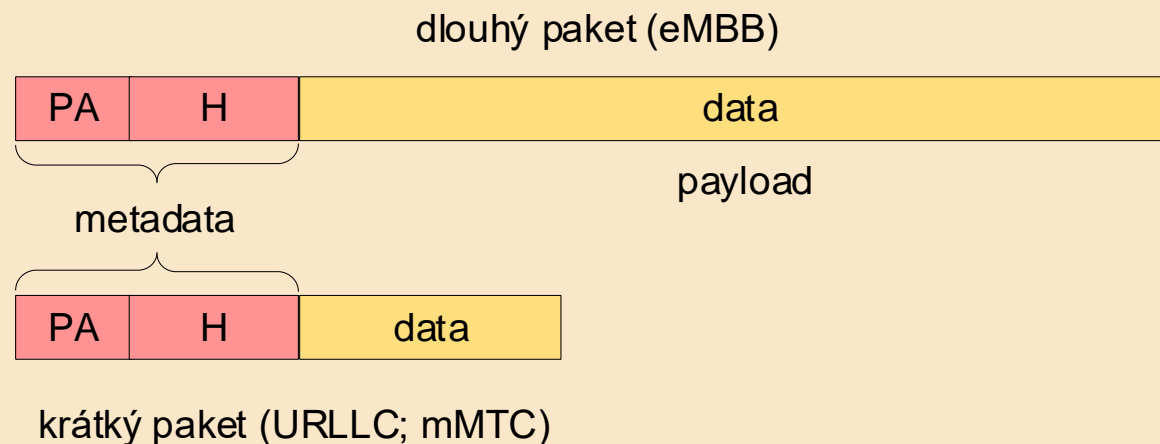
Hybridní ARQ = HARQ: vysílání ARQ doplněné o adaptivní kanálové kódování FEC

Diverzita RD (Radio Diversity): podstatou diverzity je vytvoření více rádiových kanálů mezi vysílačem a přijímačem, které přenášejí stejný informační signál, avšak mají vzájemně co nejslaběji korelované úniky.

Ekvalizace EQ (Equalization): základem ekvalizéru v přijímači je "inverzní frekvenční filtr", který kompenzuje amplitudové a fázové zkreslení rádiového kanálu, vznikající např. mnocestným šířením.

Prokládání ILV (Interleaving): záměrné, přesně definované změny přirozeného pořadí bitů, prováděné v prokladači zařazeném ve vysílači před modulátorem a opětovné obnovení původního pořadí, realizované v přijímači; tím se shluky chyb převedou na chyby osamocené, které lze už snadno běžnými ochrannými kódy (blokovými, konvoučnými apod., korigovat).

Problémy kanálového kódování v radiokomunikačních sítích URC s paketovým přenosem



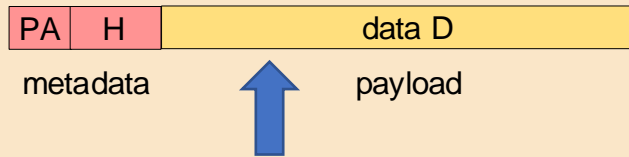
Sítě 4G/5G jsou založeny na technice přenosu s přepojováním paketů PS (Packet Switching). Ta nabízí v porovnání se starším přepojováním okruhů CS (Circuit Switching) podstatně vyšší efektivitu ve využití rádiových kanálů, kompatibilitu s Internetem a další přednosti. U paketových systémů se typický paket skládá z preamble PA (PreAmble) a ze záhlaví H (Header), obsahujících tzv. metadata, za nimiž následuje datový úsek D (payload). U dlouhých paketů je délka tohoto úseku mnohem větší, než délka metadata, tj. $D \gg PA+H$ a díky tomu na ně lze aplikovat klasickou Shannonovu teorii (*Shannon showed that it is possible to send a message reliably by using many unreliable carriers of information, as long as the number of messages is lower than what is dictated by the channel capacity*).

Při komunikaci URLLC a mMTC v sítích 5G NR je účinné kanálové kódování složitější. V tomto módu se většinou přenášejí krátká sdělení s nízkou bitovou rychlostí (< 500 bit/s) a se silnou ochranou přenosu. Pro přenos jsou zde proto vhodné krátké pakety. Avšak u těch platí relace $D \approx PA+H$, takže zátěž metadata je velká a propustnost omezená (výrazně suboptimální). Kromě toho se krátké pakety nemohou přiblížit k Shannonovým požadavkům na bezchybný přenos. V těchto aplikacích jsou potom nevhodné nejen turbo kódy, nýbrž i kódy LDPC.

Slibným řešením zde jsou polární kódy PC, představující novou třídu lineárních blokových kódů, které řeší problematiku ochranného kanálového kódování neortodoxním způsobem.

Problémy kanálového kódování v radiokomunikačních sítích URRC s paketovým přenosem

Dlouhé pakety: $D \gg PA+H$ (eMBB)

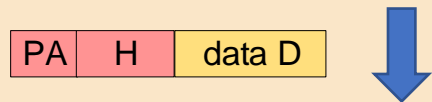


A Mathematical Theory of Communication

By C. E. SHANNON

Reprinted with corrections from *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

Krátké pakety: $D \approx PA+H$ (mMTC, URLLC)



July, 2018



Huawei Technologies Co. Ltd., has presented a special award to Turkish professor Dr. Erdal Arıkan, the inventor of polar codes for 5G. "As engineers," Arıkan said in his acceptance speech, "there is no greater reward than seeing our ideas turn into reality."

Základní výsledek Shannonovy teorie: u radiokomunikačního kanálu s omezenou šířkou pásma a při působení šumu AWGN, v případě přenosu velmi dlouhých paketů, kdy $D \gg PA+H$, vždy existuje takový ochranný kanálový kód, dovolující s velmi vysokou pravděpodobností dokonalou rekonstrukci uživatelských dat D .

V praxi mají používané kódy omezenou délku, avšak i ty se neustále zdokonalují, takže již existují jejich varianty schopné snížit chybovost přenosu na úroveň, jež je přijatelná pro danou konkrétní aplikaci.

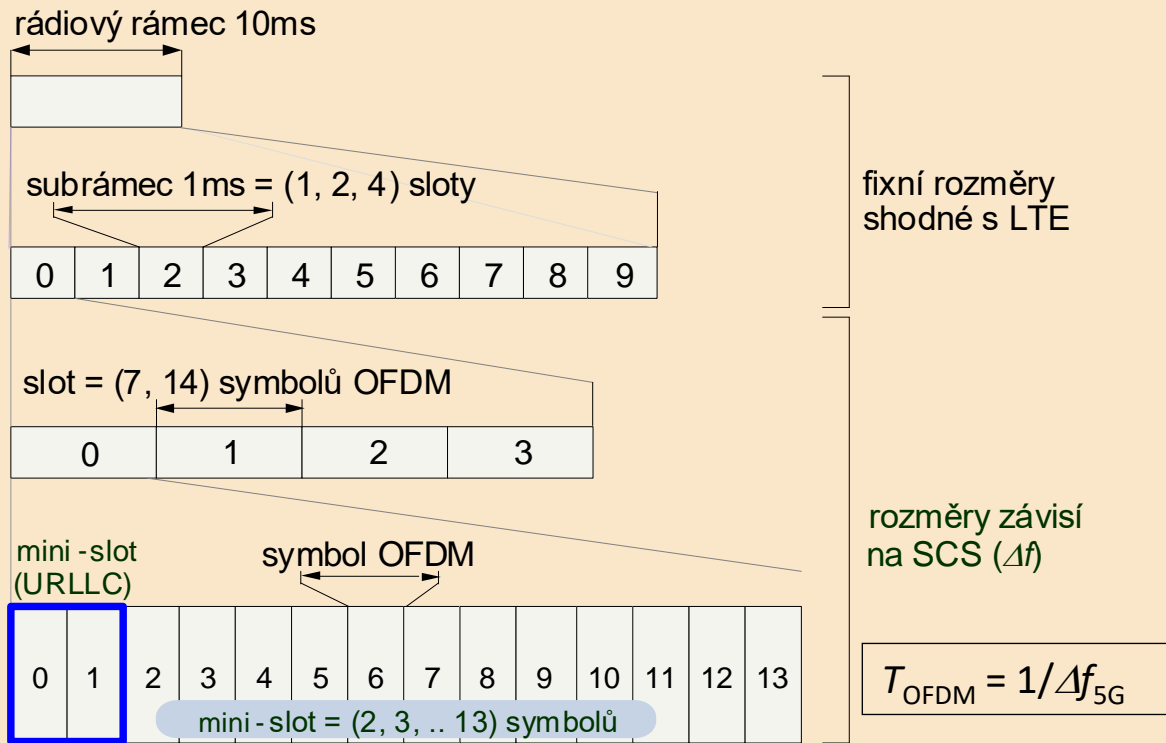
Notice: In long packets communication both the thermal noise and the distortions introduced by the propagation channel are averaged out due to the law of large numbers; however, when n is small (short packets) such averaging cannot occur.

V rádiovém kanálu při přenosu krátkých paketů Shannonovu teorii není možné použít (*v tomto případě nelze aplikovat zákon velkých čísel*). V nedávných letech však bylo dosaženo v problematice kanálového kódování velkého pokroku. Klíčový je zejména objev polárních kódů (PC) které jsou schopné zajistit velmi spolehlivý přenos krátkých paketů, a to cestou nových velice efektivních komunikačních protokolů. Tak např. při mnohoživatelské komunikaci na trase DL (P2MP), je možné optimální volbou délky paketů a kódové rychlosti dosáhnout vysoké spolehlivosti přenosu krátkých paketů, i když za cenu mírného zvětšení objemu přenášených dat.

Prof. Arıkan published a basic paper on polar codes in 2008. Huawei invested in his research and built on his original findings to help bring polar codes from the lab to industrial application. Polar codes are now a part of 5G standards

Bioglio V, et al.: Design of Polar Codes in 5G New Radio. arXiv:1804.04389v2 [cs.IT] 9 Jan 2019

Variabilní (škálovatelné) numerologie v systému 5G NR



| Odstup subnosných vln Δf_{5G} | 15 kHz | 30 kHz (2x15 kHz) | 60 kHz (4x15 kHz) | 15x2n kHz (n = 3, 4, ..) |
|---------------------------------------|--|---|---|-----------------------------|
| Trvání OFDM symbolu T_{OFDM} | 66,67 μs | 33,33 μs | 16,67 μs | 66,67 / 2^n μs |
| Trvání cyklického prefixu | 4,69 μs | 2,34 μs | 1,17 μs | 4,69 / 2^n μs |
| OFDM symbol včetně CP | 71,35 μs | 35,68 μs | 17,84 μs | 71,35 / 2^n μs |
| Počet OFDM symbolů na slot | 7 (konfigurace 1) 14 (konfigurace 2) | 7 14 | 7 14 | 14 |
| Doba trvání slotu | 500 μs , nebo 1000 μs | 250 μs , nebo 500 μs | 125 μs , nebo 250 μs | 1000 / 2^n μs |
| Počet slotů na subrámeček | 1 (1 ms) | 2 (0,5 ms) | 4 (0,25 ms) | 8, 16, ... |
| Doba trvání mini-slotu | 142 nebo 241 μs | 71 μs | 36 μs | 71,35 / 2^n μs |

Rádiový rámeček (10 ms) je v 5G NR vždy složen z 10 subrámečků (1 ms), tj. stejně jako v LTE. Další numerologie je ale odlišná: každý subrámeček obsahuje 1, nebo 2, nebo 4 sloty. Každý slot nese 14_{NCP} nebo 12_{ECP} symbolů OFDM.

Mini-slot obsahuje 1 až 13 symbolů OFDM, jeho nejkratší verze odpovídá jednomu symbolu OFDM (66,67 μs) a může startovat v libovolném čase (bez čekání na pořadí).

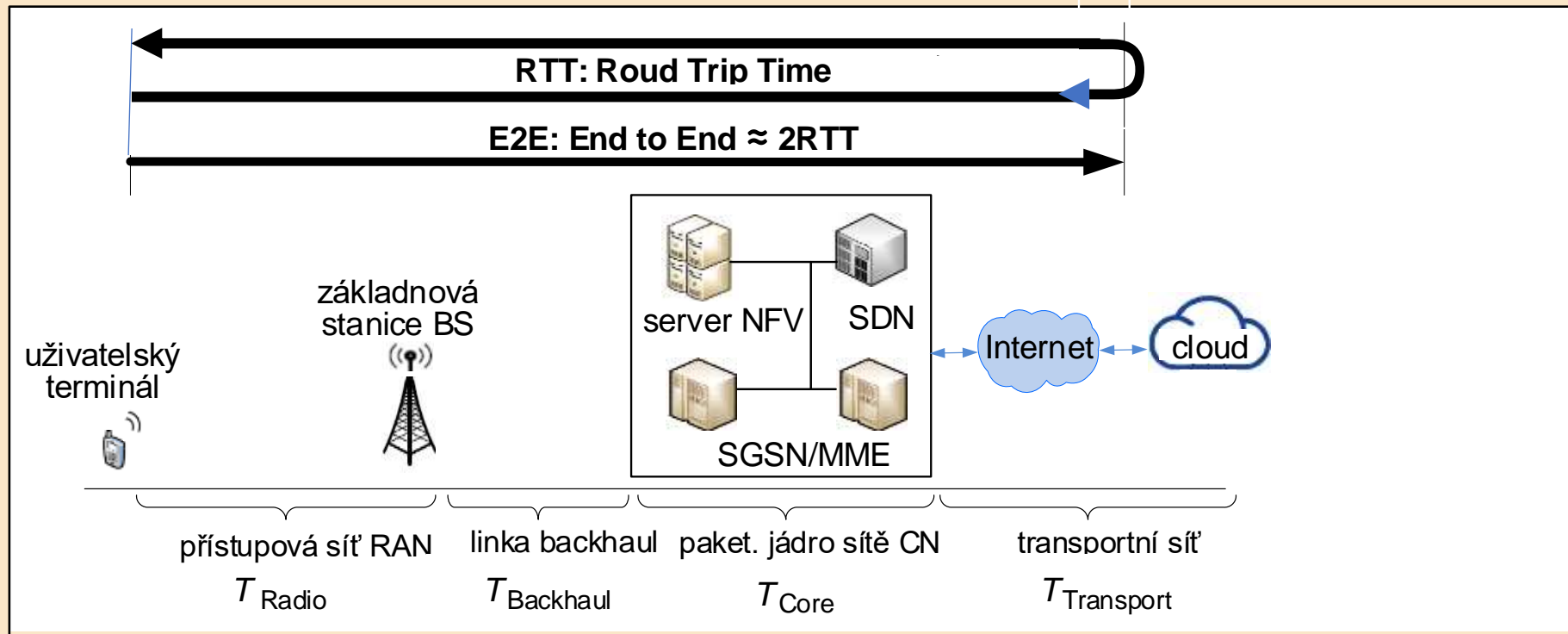
Interval TTI tvoří buď 1 minislot, jež má 1 až 13 symbolů OFDM, nebo 1 slot se 14 (12) symboly OFDM.

Škálovatelná numerologie multiplexu OFDM systému 5G NR; doby trvání symbolů, slotů a minislotů a s tím související další parametry nejsou fixní, nýbrž se odvozují od různých odstupů subnosných vln SCS Δf_{5G} . Odstup subnosných je $\Delta f_{5G} = 15 \text{ kHz} \cdot 2^n$, kde $n = -2, 0, 1, \dots, 5$. Např. při $n = 0$ je $\Delta f_{5G} = 15 \text{ kHz}$ a trvání OFDM symbolu 66,67 μs , avšak při $n = 5$ je $\Delta f_{5G} = 480 \text{ kHz}$ a trvání OFDM symbolu jen 4,17 μs . **Časový mini-slot** obsahuje 2 až 13 symbolů OFDM a může být polohován nezávisle vůči začátku standardního slotu.

[1] Nomor Research: 5G Frame Structure, Munich August 2017

[2] Zaidi A. et al: Designing for the Future, The 5G NR PHY.. Ericsson Tech. Rev, 1 - 2018

Příspěvky k latenci systému LTE v uživatelské rovině UP při paketovém přenosu



V buňkových sítích při přenosu paketů je zpoždění v rovině UP způsobeno několika složkami

- jednosměrným přenosovým časem E2E paketů ve fyzické vrstvě T_{Radio} (též OWD: One Way Delay)
- časem $T_{backhaul}$ nutným pro spojení po lince backhaul, kterou realizují metalické resp. rádiové resp. optické spoje
- procesním časem T_{Core} v jádru sítě CN
- zpožděním v komunikaci mezi jádrem CN a Internetem/cloudem $T_{Transport}$

Celkový jednosměrný přenosový čas T současných systémů LTE lze potom vyjádřit vztahem

$$T = T_{Radio} + T_{Backhaul} + T_{Core} + T_{Transport}$$

Požadavky na velmi nízkou latenci v komunikaci LLC sítí 4G LTE a 5G NR

| Aplikace | latence (ms) |
|--------------------------------------|--------------|
| automatizovaná výroba Industry 4.0 | 0,25 až 10 |
| inteligentní dopravní systémy ITS | 10 až 100 |
| robotika a teleprezentace | ≤ 1 |
| virtuální realita (VR) | ≤ 1 |
| telemedicina (robotická zdrav. péče) | 1 až 10 |
| náročné zábavní hry | 1 |
| chytré elektrorozvodné sítě (VVN...) | 1 až 100 |
| autonomně řízená vozidla | 2 až 5 |

Poznámky:

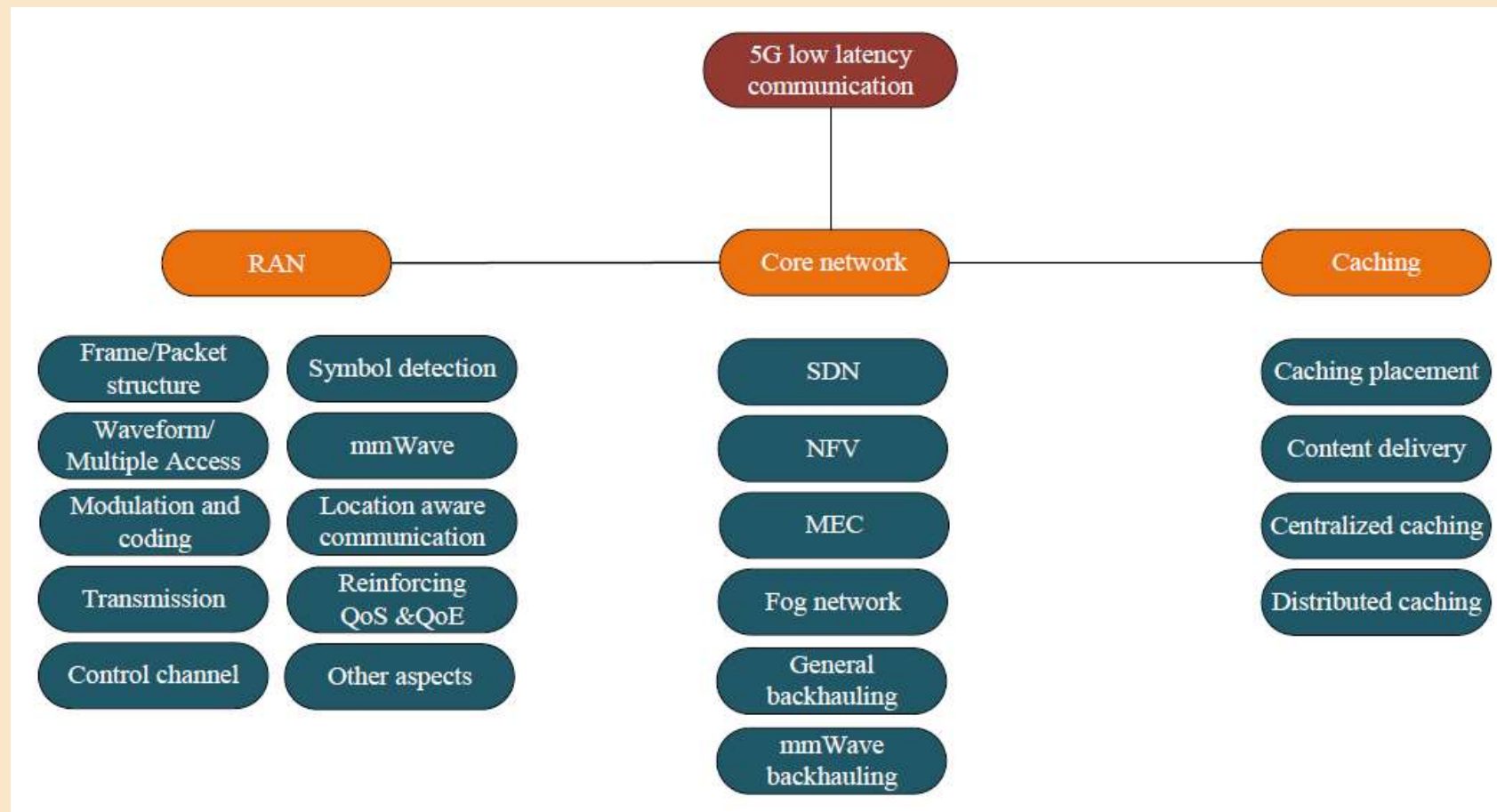
1. V systému 4G LTE se dosahuje latence E2E řádu 30 až 50 ms, u systému 4G LTE-A klesá tato latence k hodnotám 10 ms.
 2. Minimální hodnoty latence E2E pro nejnáročnější aplikace systému 5G URLLC jsou pod hodnotou 1 ms,
 3. V aplikacích kde dochází k přímé interaci „člověk – stroj“ je latence výrazně závislá na lidských smyslech (tak např. časová rozlišovací schopnost lidského zraku je cca 10 ms apod.
- V aplikacích Industry 4.0 je definována navíc rychlost ztráty paketů $PLR = 10^{-9}$, pro aplikace ITS je potom $PLR = 10^{-3}$ až 10^{-5}

V síti 4G LTE ale i 5G NR se rozeznává latence v uživatelské rovině UP (U-Plane) a latence v kontrolní rovině CP (C-Plane).

Latence v rovině UP se vyjadřuje pomocí jednosměrného přenosového času resp. latence paketů (E2E tj. end to end delay, resp. OWD tj. one way transmission time resp. one way delay) od uživatelského terminálu UE až ke připojení na koncovou destinaci tj. Internet nebo cloudové úložiště. Dvojnásobek tohoto času se označuje zkratkou RTT (tj. Round Trip Time).

Latence v rovině C je přechodový čas, jež vyžaduje uživatelský terminál UE k přepnutí z nečinného stavu do aktivního stavu

Tři různé přístupy k dosažení nízké latence v systému 5G URLLC

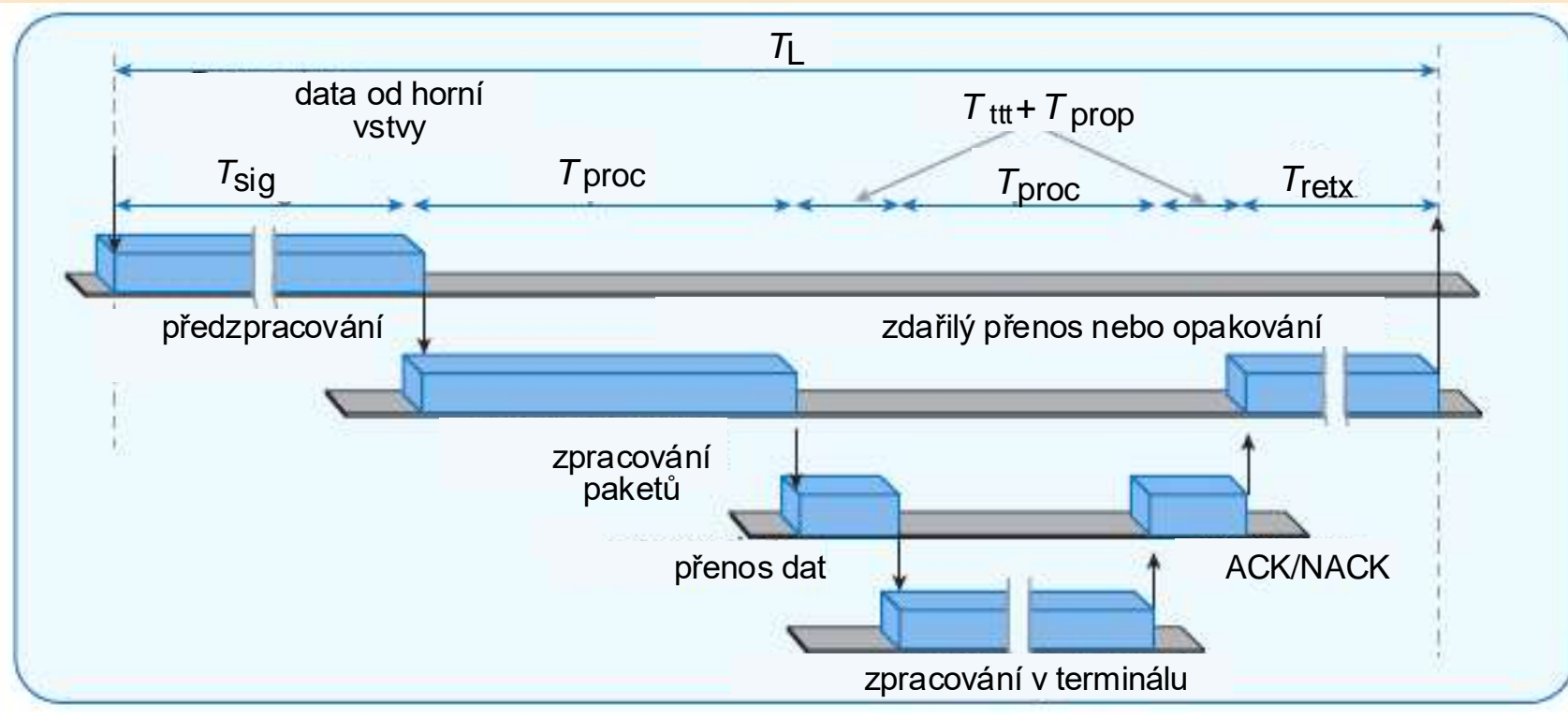


Technické inovace vedoucí v systému 5G k dosažení nízké latence tj. k realizaci služeb LLC (URLLC) lze rozdělit do tří skupin, určených hesly: (1) Řešení RAN; (2) Řešení CN; (3) Řešení technikami Cachingu.

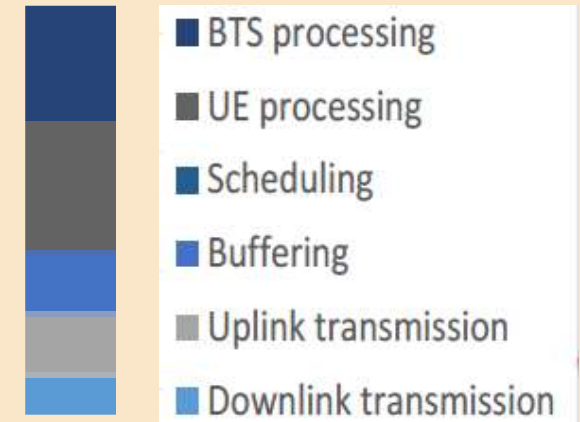
Dále se probírá jen Řešení RAN, zahrnující:

- novou strukturu rámců a paketů
- nové typy signálů a mnohonásobného přístupu
- nové typy modulací a kódů
- přenosová schémata
- obohacené kontrolní kanály
- nízkolatenční symbolová detekce
- agregace mm vln
- cloudová síť RAN
- vylepšené koncepce QoS a QoE
- minimalizace latence na energetické bázi
- komunikační formáty na bázi lokačních technik

Složky latence ve fyzické vrstvě PHY systému 5G URLLC na trase DL



PHY Latency Component

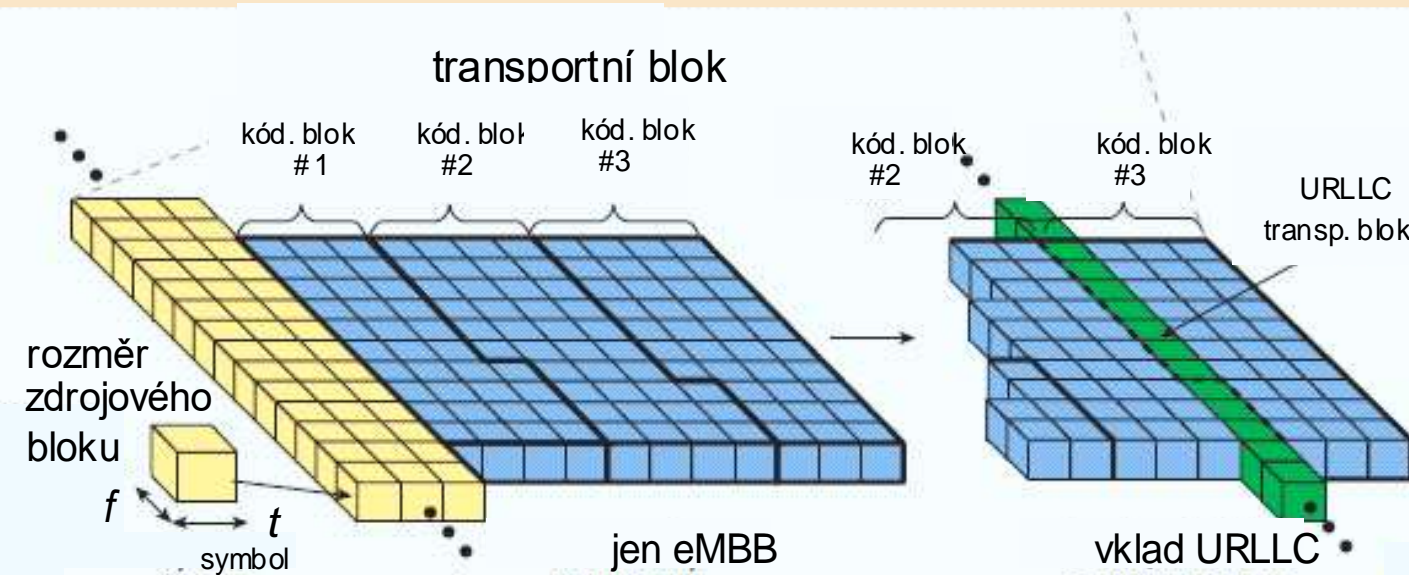


Celková latence T_{Radio} v přístupové síti RAN (fyzické vrstvě PHY) má následujících pět složek:

$$T_{\text{Radio}} = T_{\text{sig}} + T_{\text{proc}} + T_{\text{ttt}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{retx}}$$

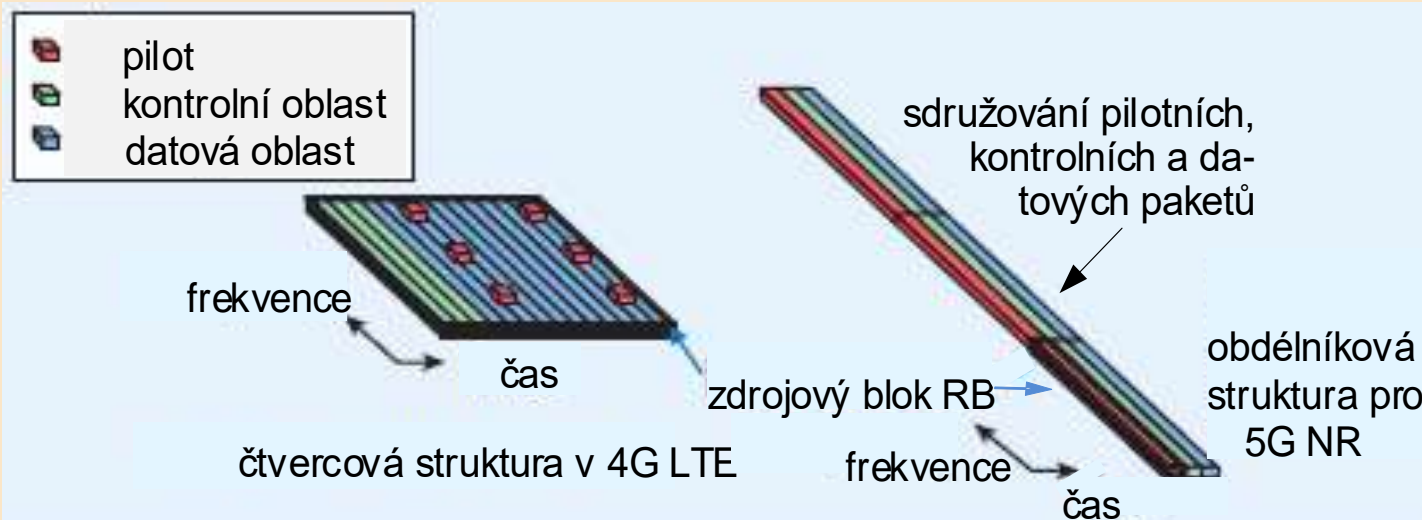
- T_{sig} je předprocesní čas (preprocessing time), vyžadovaný pro výměnu signalizace;
- T_{proc} je čas nutný k realizaci kódování a dekódování a k odhadu kanálu (cod/dec, channel estimation);
- T_{ttt} je čas potřebný k odeslání paketu (time-to-transmit latency);
- T_{prop} je čas nutný k přenosu rádiového signálu od vysílače k přijímači (signal propagation time);
- T_{retx} je čas potřebný pro opakování přenosu (time taken by retransmission ARQ).

Rozvrhování URLLC paketů do eMBB a pakety URLLC komprimované v čase



a) Zajištění priority přenosu dat kritických na latenci URLLC před službami eMBB a mMTC

Je-li v síti 5G požadován na DL v určitém čase přenos konkrétní služby URLLC, základnová stanice musí vyslat paket URLLC okamžitě. Právě probíhající přenos paketů eMBB resp. mMTC je proto nutné ihned přerušit a některé ze symbolů eMBB nahradit symboly z URLLC paketu (obr. a). Jelikož přerušení není předem ohlášeno aktivní mobilní stanicí UE, kvalita příjmu služeb eMBB a mMTC se tím výrazně zhorší. Problém vzájemné koexistence služeb v systému 3GPP NR je velice závažný, a proto je řešen zvláštními technikami.



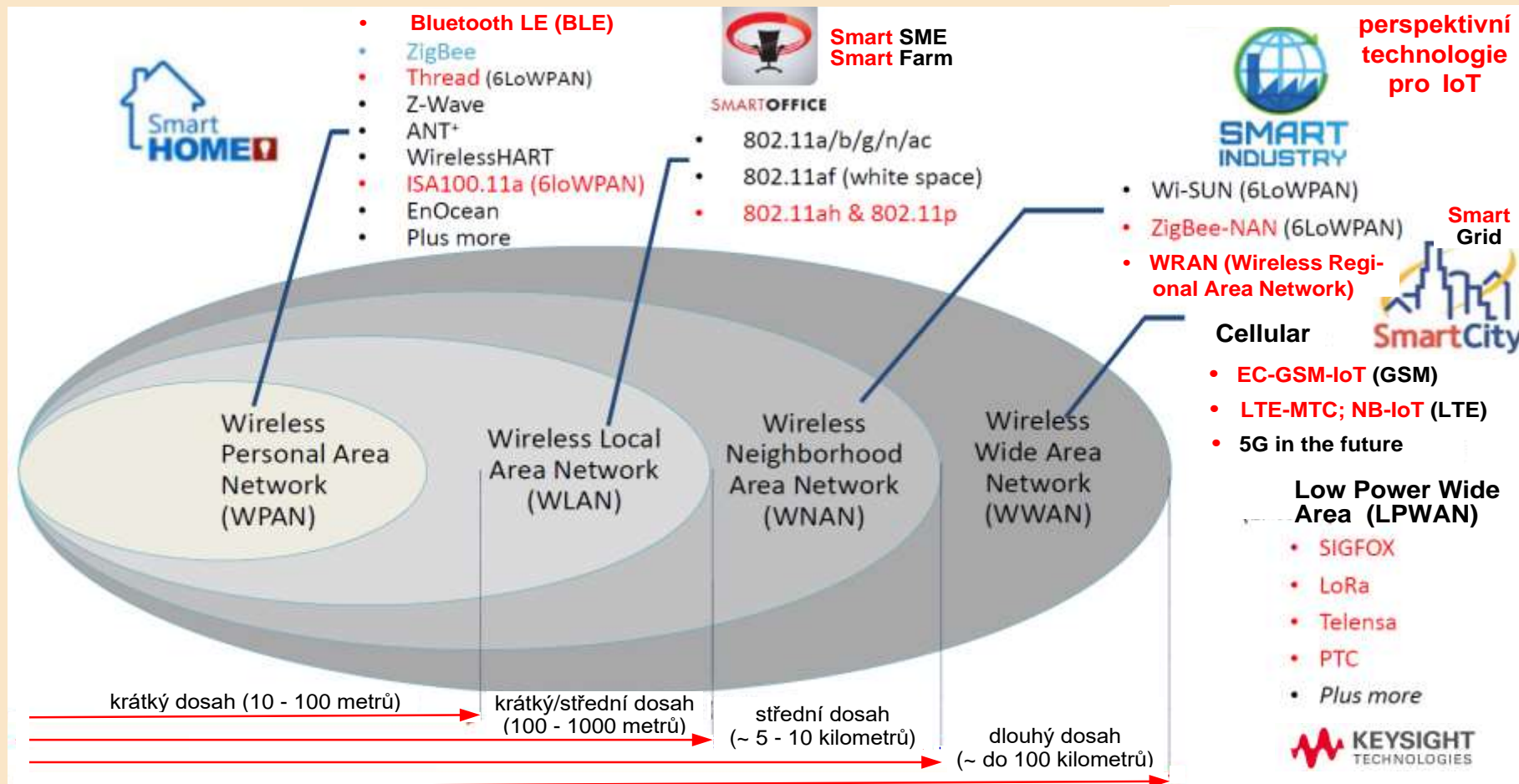
b) Flexibilní struktura paketů

Malou latenci systému 5G URLLC v porovnání se 4G LTE lze dále podpořit tak, že se minimalizuje přenosová latence T_{ttt} a procesní latence T_{proc} . Přenosová latence T_{ttt} se zmenší přechodem od čtvercové struktury paketů 4G LTE na obdélníkovou strukturu (obr. 7), výrazně stlačenou v časové oblasti a rozšířenou ve frekvenční oblasti. Ke zmenšení latence T_{proc} jsou zde navíc tři složky paketu, a to pilotní, kontrolní a datová, sduženy a tak vytvářejí „potrubní zpracování“ celého mechanismu zachycení kanálu, dekódování kontrolního kanálu a detekování dat.

Přehled konkrétních rádiových systémů pro Internet věcí

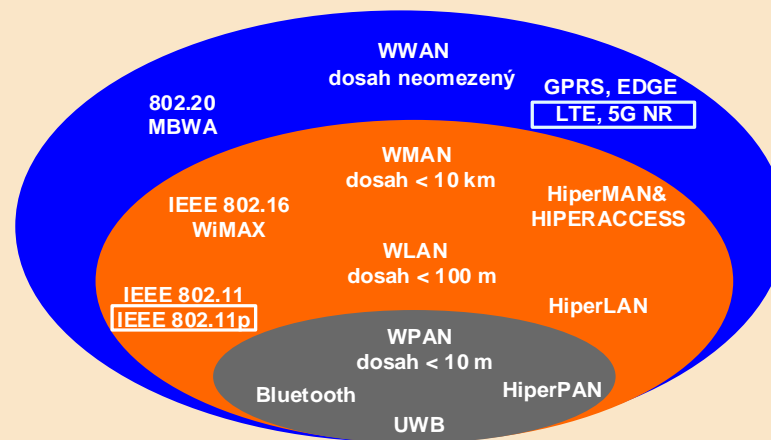
Dvě základní třídy rádiových systémů určených pro Internet věcí IoT (komunikaci MTC):

- upravené veřejné rádiové sítě, ať již lokálního typu (WiFi, Bluetooth, ZigBee apod), nebo metropolitní sítě s větším dosahem (WiMAX, WRAN), případně celoplošné buňkové sítě všech generací, tedy síť GSM/2G a UMTS-HSPA/3G a zejména síť LTE/4G a perspektivně 5G. Tyto sítě jsou ale primárně určené pro komunikaci HTC, takže pro komunikaci MTC (M2M) s odlišnými požadavky je nezbytné je výrazně modifikovat, resp. vytvořit jejich nové „MTC varianty“.
- speciální jednoúčelové rádiové sítě, označované jako proprietární nebo dedikované, které jsou určené právě jen pro aplikace v IoT. Ty často využívají bezlicenční frekvenční pásma (ISM).



*Nízkovýkonové technologie dlouhého dosahu pro komunikaci s vozidly V2X:
LP-WAN*

Systemy LP WAN: technologie LoRa a Sigfox



V aplikacích Internetu věcí IoT i jiných se vystačí s rádiovou komunikací na krátké vzdálenosti, řádu desítek metrů až jeden kilometr. V tomto případě se uplatní technologie WiFi, Bluetooth a ZigBee. Avšak v oblasti průmyslu, dopravy, civic ale i IoT se často objevuje potřeba zajistit rádiové spojení na vzdálenosti o jeden až dva řády větší, tedy až desítky kilometrů, přičemž přenášené datové toky jsou obvykle velice malé.

Požadavky rádiového přenosu by mohly v těchto případech splňovat systémy buňkové, nebo družicové radiokomunikace. Ty však nejsou vhodné pro přenos „krátkých“ dat, často v časově nespojitém přenosu. V uvedených scénářích by potom měly zbytečně velkou energetickou spotřebu i přenosovou kapacitu a tím i vysoké nároky na RF šířku pásma, náročnou instalaci v dosud nepokrytých oblastech. Jejich pořizovací i provozní náklady by potom byly vysoké.

V takových případech se právě mohou úspěšně uplatnit systémy LP WAN, k nimž náleží technologie LoRa WAN, Sigfox, NB IoT a další. Tak například síť LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) nacházejí uplatnění v mobilních systémech, kde poskytují možnost automatického snímání a přenosu nejrůznějších dat, a to přímo – bez jakékoliv spoluúčasti buňkových, nebo jiných hromadných sítí, takže přenášená data nikdy neopustí daný systém. Stávají se tak nedílným složkou soustav pouličního osvětlení, světelných semaforů, systémů pro kontrolu rychlosti silničních vozidel, parkovišť vozidel atd.

Typické příklady systémů LP WAN: technologie LoRa a Sigfox

Technologie LoRa

LoRa (Long Range Radiocommunication) je určena pro spojení na relativně velké vzdálenosti 15 až 30 km ve volném terénu a až 5 km v městském prostředí, při nízké energetické spotřebě. Používá se technika rozprostřeného spektra (frequency modulated chirp), se šířkami RF pásma 125 kHz nebo 250 kHz. Přenosové rychlosti se mohou měnit mezi 250 bit/s až 50 kbit/s.

Pro systém LoRa je v Evropě vyhrazeno pásmo 863 až 870 MHz (preferenčně 868 MHz). Na jeden přístupový bod může být připojeno až 1 milion koncových zařízení (devices).

LoRa zajišťuje věrné obousměrné spojení (FDD) a proto se uplatňuje např. v chytrých elektrorozvodných sítích, v chytrých domech a městech, nadějně jsou aplikace v zemědělství apod.

Technologie Sigfox

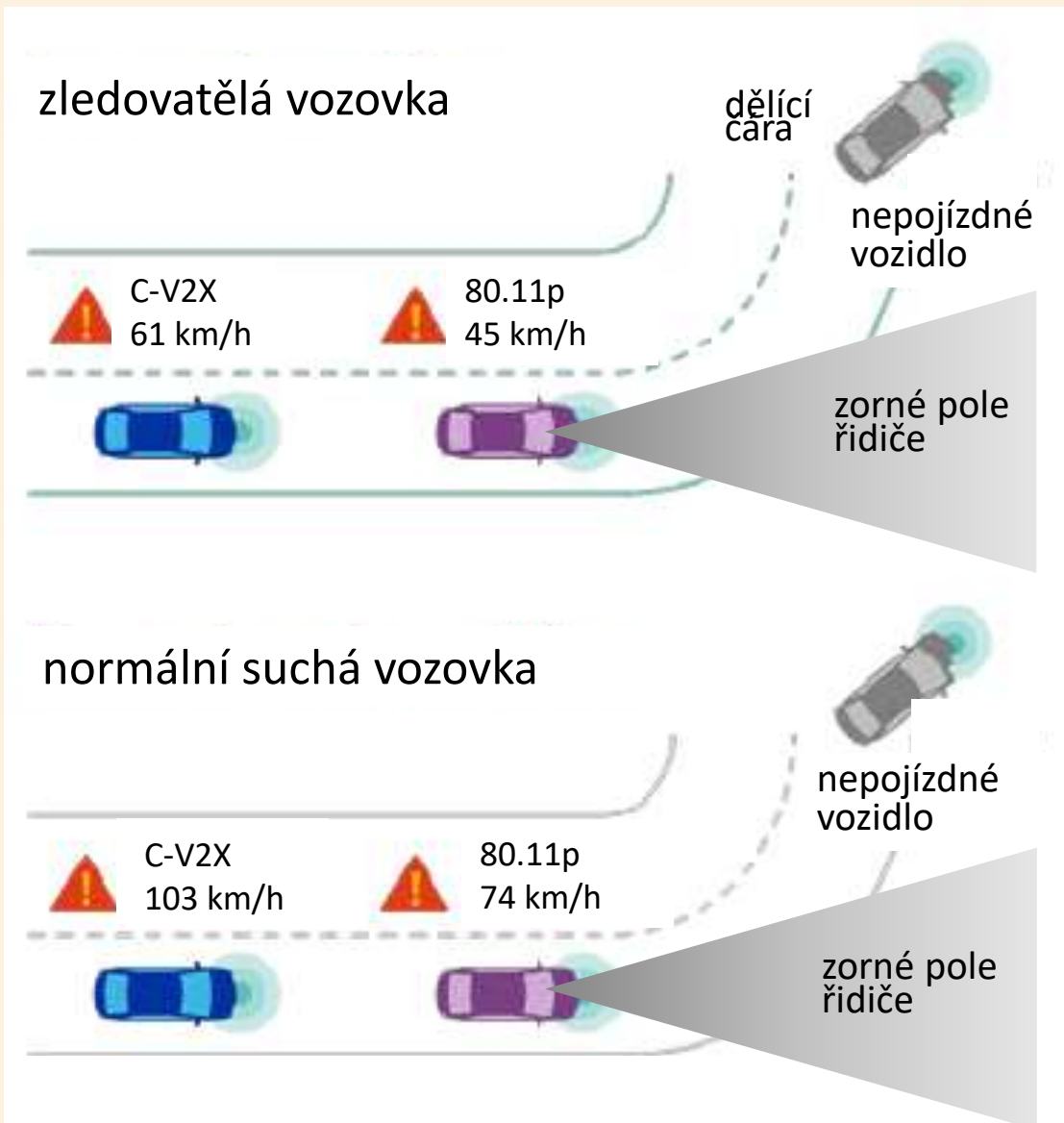
je výrazně úzkopásmová, takže je vhodná pro aplikace, v nichž se občasně vysílají z koncových zařízení (devices) velmi pomalu krátká sdělení (12 bytů) a to v celkovém počtu až 140 sdělení na jeden objekt za jediný den. Dosah systému je 30 až 50 km ve volném terénu a až 10 km ve městech. Komunikace je sice obousměrná, avšak trasa DL má omezenou kapacitu.

Vysílací výkon koncových zařízení je 20 dBm (tj. 100 mW), využívá se modulace DBPSK, zaručující velkou energetickou účinnost. K přenosu jsou určena bezlicenční pásma 868 nebo 915 MHz. Pro zvýšení spolehlivosti přenosu jsou data vysílána třikrát na třech různých frekvencích a přijímána více základnovými stanicemi v okolí, vybavenými účinnými anténními systémy, umístěnými na věžích apod.

K hlavním aplikacím Sigfox náleží poplachové (alarm) systémy, parkovací systémy, měřiče odběru vody, elektřiny, monitoring domácností a životního prostředí a další aplikace z oblasti Industry 4.0, smart city apod.

Příklady konkrétních aplikací systémů V2X/ITS

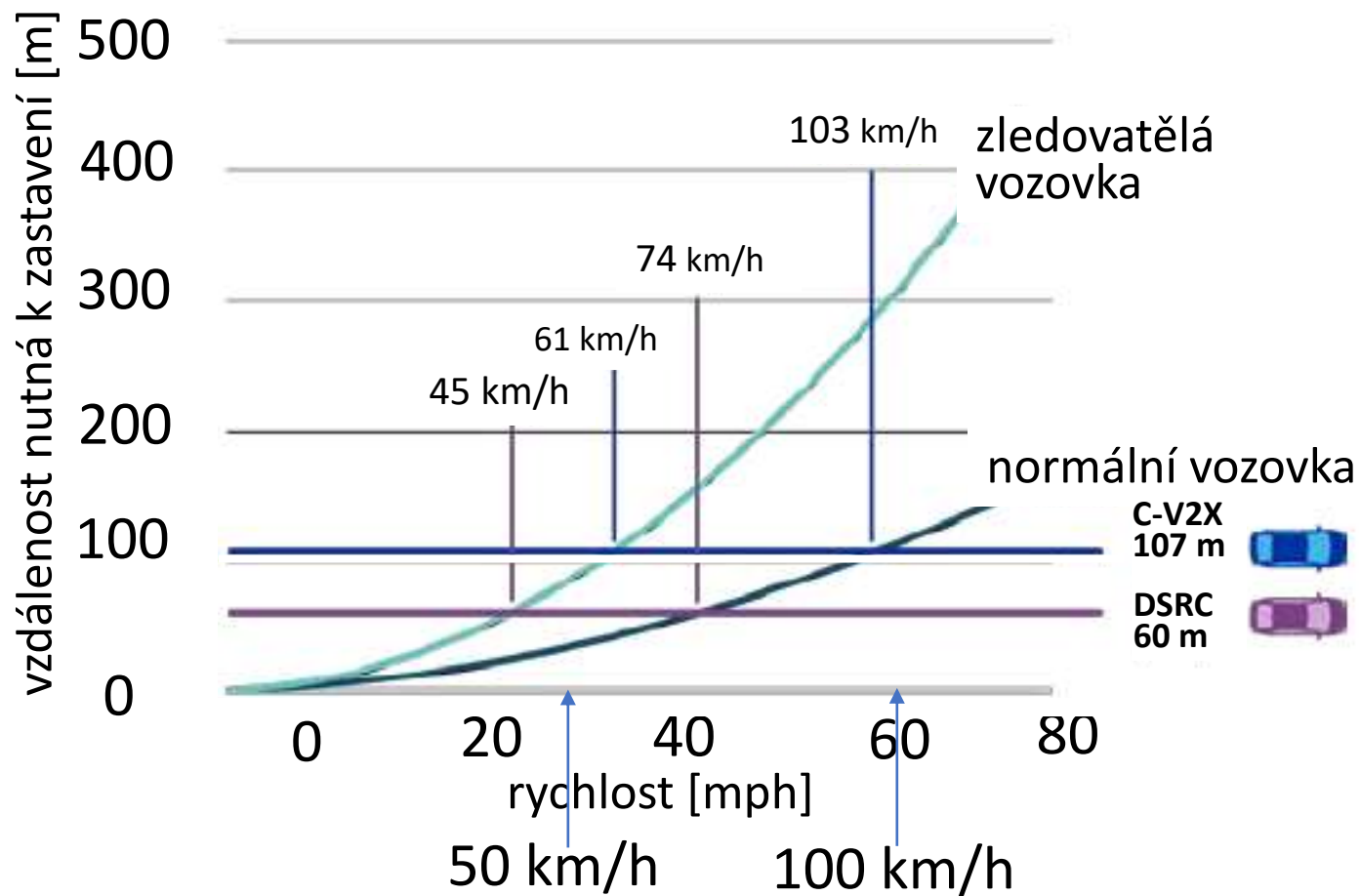
Buňková komunikace C-V2X se sítěmi 5G zvyšuje bezpečnost a efektivitu silničního provozu



Obrázek vlevo ilustruje scénáře jízdy několika vozidel v jednom směru, a to po normální a po zledovatělé vozovce. Při využití standardu 801.12p, kdy nepojízdné vozidlo, nacházející se pro vozidla jedoucí za ním ve „slepé“ zóně, vysílá varovný signál, musí na normální vozovce přibližující se vozidlo udržovat rychlost pod 74 km/h, kdežto na zledovatělé vozovce jen 45 km/h, kdy je ještě zaručeno bezpečné zastavení před nepojíždícím vozidlem, vylučující vzájemnou kolizi. Naproti tomu při využití celulární komunikace C-V2X s větším dosahem, přibližující se vozidlo přijme varovný signál dříve a tedy ve větší vzdálenosti. Tudíž může bezpečně zastavit před kontaktem s nepojíždícím vozidlem, přestože cestuje vyšší rychlostí (např. 61 km/h a 103 km/h) pro zledovatělou a normální vozovku).

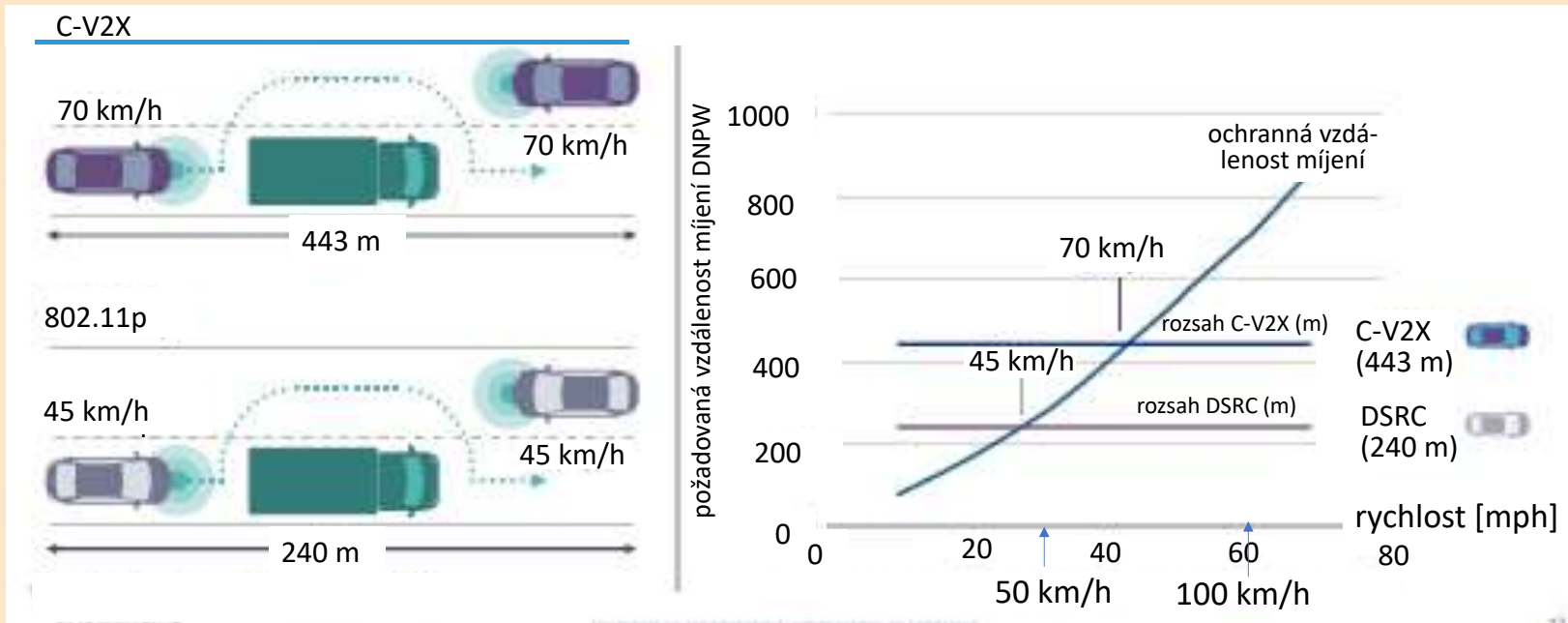
Buňková komunikace C-V2X se sítěmi 5G zvyšuje bezpečnost a efektivitu silničního provozu

Odhad vzdálenosti nutné k zastavení:
reakční doba řidiče + brzdná dráha



Obrázek ilustruje scénáře jízdy několika vozidel v jednom směru, a to po normální a po zledovatělé vozovce. Při využití standardu 801.12p, kdy nepojížděné vozidlo, nacházející se pro vozidla jedoucí za ním ve „slepé“ zóně, vysílá varovný signál, musí na normální vozovce přibližující se vozidlo udržovat rychlost pod 75 km/h, kdežto na zledovatělé vozovce jen 45 km/h, kdy je ještě zaručeno bezpečné zastavení před nepojížděným vozidlem, vylučující vzájemnou kolizi. Naproti tomu při využití celulární komunikace C-V2X s větším dosahem, přibližující se vozidlo přijme varovný signál dříve a tedy ve větší vzdálenosti. Tudíž může zastavit před kontaktem s nepojížděným vozidlem, přestože cestuje vyšší rychlostí (např. 61 km/h a 103 km/h pro zledovatělou a normální vozovku).

Zvýšení bezpečnosti předjíždění při aplikaci technologií V2V



Obrázek výše znázorňuje situaci, ve které osobní vozidlo sleduje velký kamión a následkem toho má omezené možnosti sledování okolního provozu. V témže čase se k němu blíží druhé vozidlo, jedoucí opačným směrem v sousedním pruhu. Čím vyšší jsou rychlosti obou vozidel, tím rychleji se k sobě přibližují a tím nebezpečnější je situace, chce-li první vozidlo předjet kamión.

Při obou formách komunikace (C-V2X i DSRC) druhé vozidlo vysílá nepřetržitě varovný signál. Ten přijímá první vozidlo a na základě toho potom rozhodne, zda je možné bezpečné předjetí kamiónu. Při komunikaci DSRC při rychlosti obou vozidel 45 km/h, požadovaná vzdálenost mezi oběma vozidly, zaručující jejich bezpečné míjení, je cca 240 metrů. Při komunikaci C-V2X, díky většímu dosahu spojení, je bezpečná vzdálenost jejich míjení 443 metrů, je tedy větší. Obě vozidla se však mohou pohybovat - při stejném stupni bezpečnosti - vyšší rychlostí.

Konečným výsledkem aplikací techniky V2X je, oproti konvenční koncepci, zvýšení bezpečnosti silničního provozu; aplikace celulární technologie C-V2X přináší navíc - v porovnání s aplikací DSRC - zvýšení plynulosti tohoto provozu.

Aplikace telekomunikačních systémů a zejména rádiového systému 5G v telemedicině

Pod pojmem telemedicína se rozumí distribuce různých zdravotnických služeb a informací s využitím elektronických informačních a telekomunikačních technologií. Tento fenomén zprostředkuje dálkový klinický kontakt mezi pacientem a zdravotnickým personálem, využívaný k diagnostice, monitorování a následnému léčení pacientů. Důležitým odvětvím tohoto oboru je dálková chirurgie (telesurgery), umožňující chirurgovi provádět zákroky na pacientovi, který je prostorově vzdálen. V současnosti se v telechirurgii často používá **robotický systém da Vinci**. Ten obsahuje výkonný počítač a přidružené robotické technologie, umožňující chirurgovi sedět u ovládacího pultu blízko od pacienta a provádět příslušné chirurgické výkony v reálném čase pomocí joysticků. Ty ovládají několik robotických ramen s potřebnými nástroji, které implementují vlastní operaci. Jeden kamerový systém také zobrazuje trojrozměrný zvětšený obraz operované oblasti. U prvních variant systému da Vinci byla vzdálenost mezi chirurgem a pacientem jen několik metrů. Avšak již v r. 2001 byla realizována skutečně špičková dálková operace (cholecystectomy-operace žlučníku) operačním týmem v New York City a pacientem ve francouzském Strasbourgu (6 230 km), nazvaná „Lindbergh Operation“ - na počest prvního přeletu oceánu C. Lindbergem. K dálkovému spojení byla využita **speciální podmořská optická linka Appolo** s optimalizovanou kompresí signálu, zajišťující minimální latenci a maximální spolehlivost. Celková latence RTT oboustranného spojení byla 135 ms, což pro daný zákrok nebylo ideální, avšak u této konkrétní aplikace ještě dostačovalo. Dnes jsou již běžná spojení na vzdálenosti řádu desítek až stovek km, dostupné zákaznické internetové linky.



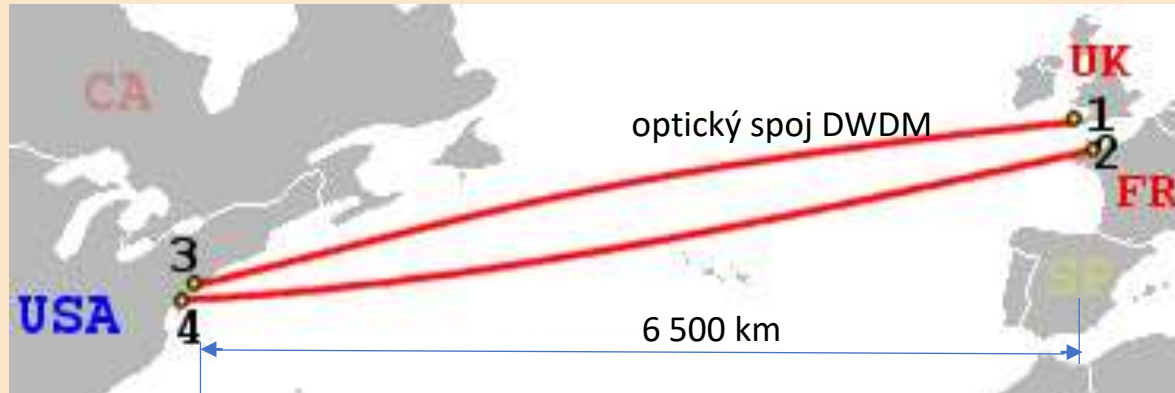
Robotický chirurgický systém da Vinci v základním „lokálním“ provedení

Velkou perspektivu v oblasti telechirurgie představují **komunikační sítě 5G**. Ty mohou splnit zejména velmi náročné požadavky na latenci a spolehlivost, při využití všech specifických výhod bezdrátového spojení. Jeden z prvních pokusů tohoto typu byl uskutečněn v lednu r. 2019 v Číně, a to na zvířecím „pacientovi“ na vzdálenost 30 mil. V únoru 2019 na konferenci v Barceloně tým chirurgů demonstroval možnosti dálkové chirurgie s využitím sítě 5G již na skutečném pacientovi. A zakrátko nato, znovu v Číně a s pomocí 5G, byl proveden chirurgický zákrok na lidském mozku, tentokrát na vzdálenost 1 800 mil.

Při operacích na velké vzdálenosti však zůstává stále velkým problémem latence rádiového přenosu. Ten může částečně vyřešit počítačem podporovaná robotická chirurgie, při níž je řídicí počítač, kontrolující celý chirurgický proces, umístěn pouze několik metrů od vlastního robotického pracoviště. Vzdálený chirurg tento proces jen kontroluje a případně provádí nutné korekce, které vůči latenci více tolerantní.

Různé telekomunikační techniky používané v telemedicině

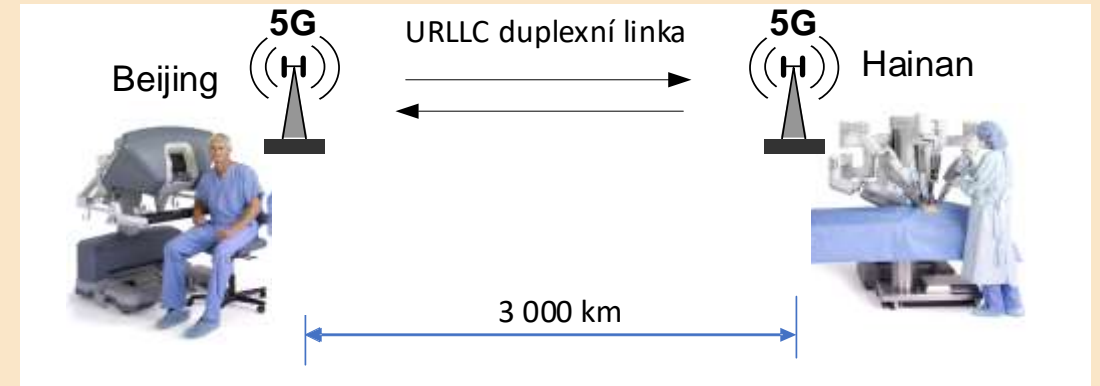
Podmořský optický širokopásmový spoj Appolo



Optický komunikační systém Appolo byl využit v roce 2001 k první dálkové operaci žlučníku („Lindbergh Operation“)

Appolo je podmořský optický komunikační systém, který spojuje východ USA (New Jersey, New York) s Evropou (Cornwall, Lannion). Optické spojení s multiplexem DWDM (dense wavelength division multiplexing) má dva nezávislé segmenty, o celkové délce cca 13 000 km. Ty mohou kombinovat až 16 kanálů s šířkami pásma po 200 MHz, poskytující celkovou kapacitu 3,2 Tbit/s. Vzhledem k velké délce a tedy velkému útlumu, jsou v obou segmentech optických spojů kaskádně zařazeny erbiem dotované optické vláknové výkonové zesilovače EDFA. Multiplex DWDM v optické transportní síti (OTN) umožňuje koexistenci různých přenášených služeb, které jsou díky progresivním kryptografickým technikám, velmi důkladně zajištěny vůči nepřátelským pokusům o narušení či zneužití přenosu.

Radiokomunikační systém 5G



Buňkový systém 5G byl využit v březnu r. 2019 v Číně k první dálkové velice náročné operaci lidského Mozku. Rádiové systémy 5G mohou splnit velmi náročné požadavky na spolehlivost a na latenci spojení, při využití všech specifických výhod bezdrátové technologie. V březnu r. 2019 se podařilo týmu čínských chirurgů realizovat operaci lidského mozku (Parkinsonova choroba) s aplikací technologie sítí 5G firmy Huawei. Vzdálenost mezi pacientem a operujícím lékařem byla cca 3 000 km. Konvenční technologie 4G není v daných aplikacích použitelná, neboť nemá k dispozici nové speciální metody pro maximalizaci spolehlivosti a minimalizaci latence přenosu.

Poznámka: družicové spoje s geostacionárními satelity, parkujícími ve výšce cca 37 000 km nad rovníkem, jsou pro účely telemedicíny též nevhodné; jejich latence je nejméně cca 200 ms, což je pro danou aplikaci nepřijatelné.

Děkuji za pozornost!

Václav Žalud