



Systemy 5G s nízkou latencí LCC

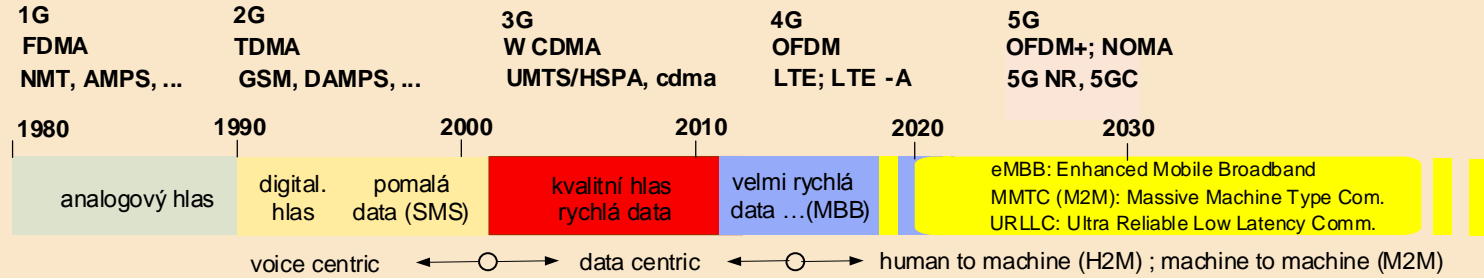
Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

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

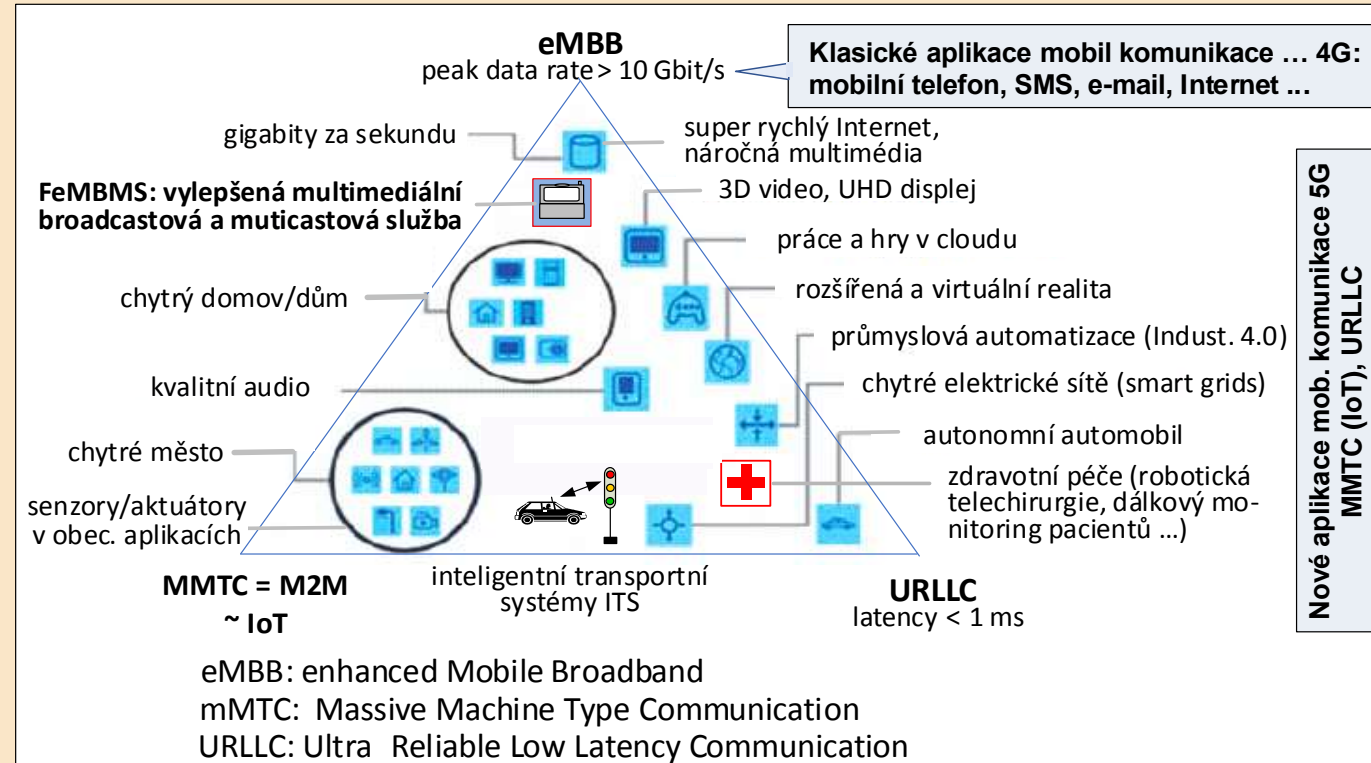
*Vývoj pozemní mobilní komunikace
od sítí 4G k sítím 5G*

Časový vývoj mobilních sítí a trojúhelník aplikací systémů 5G

Vývojová generace:
mnohonásobný přístup:
konkrétní systémy (RAN):
doba nástupu:
hlavní služby:



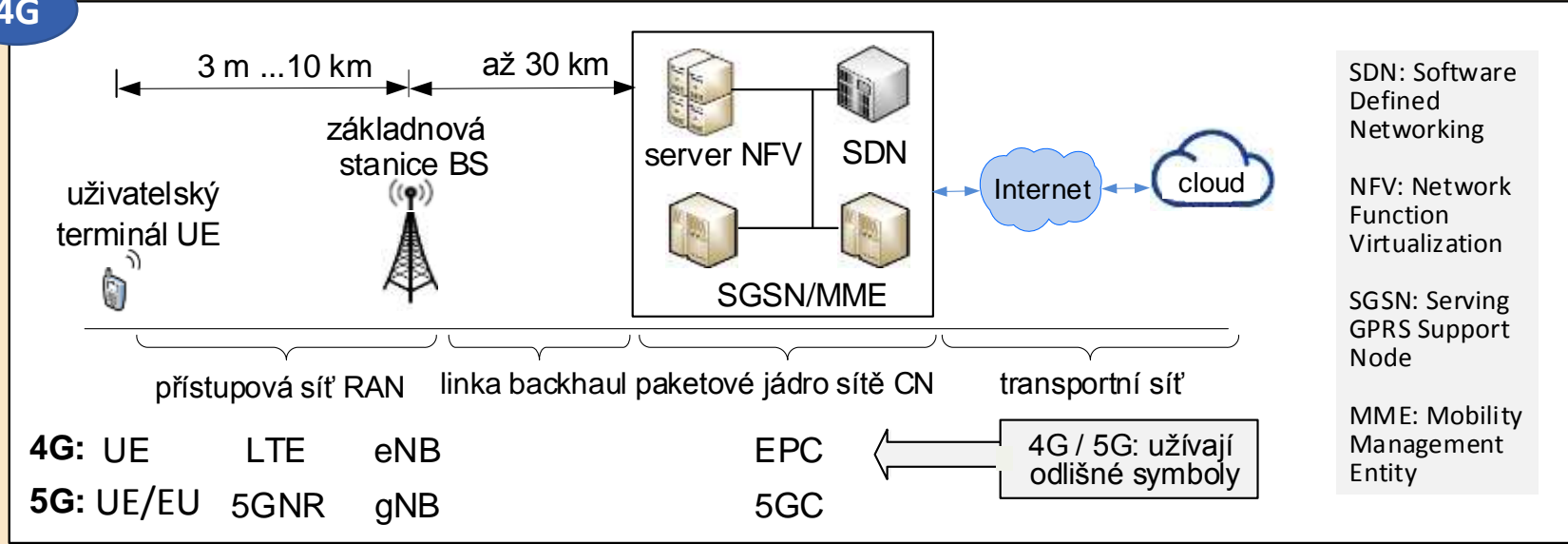
Mnohostranné aplikace buňkového systému 5G, vůči 4G rozšířené o MMTC a URLLC



Pátá generace mobilních komunikačních sítí (5G) bude plnit stále rostoucí nároky na vyšší uživatelskou datovou rychlost i propustnost, nižší latenci a vyšší účinnost

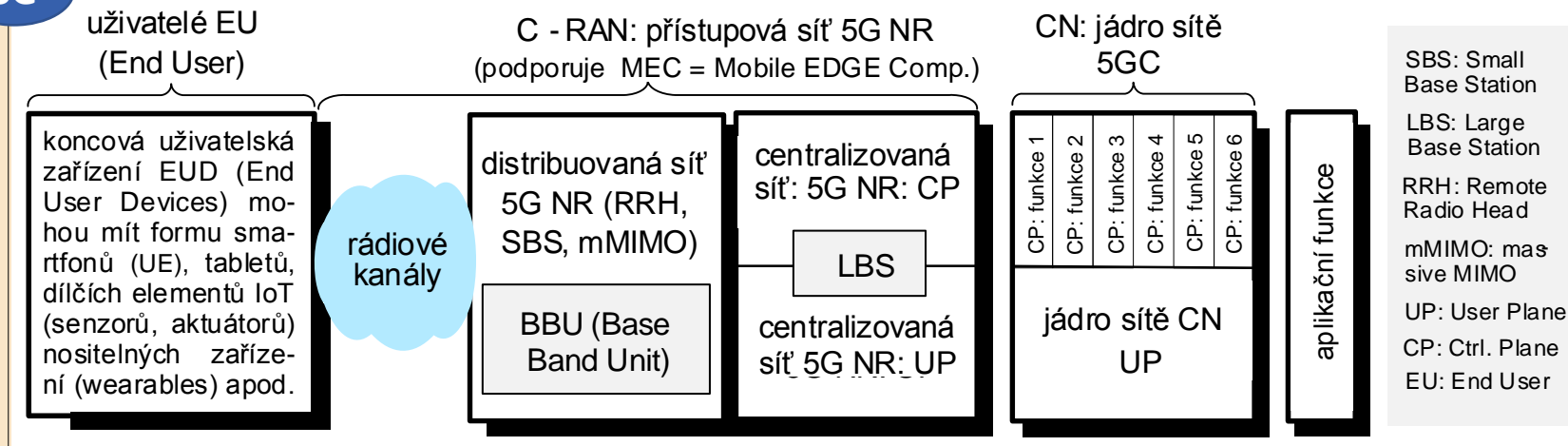
Architektura systému 4G a systému 5G

4G



4G: Mobilní uživatelské terminály UE (User Equipments) jsou spojené rádiovými kanály s fixní základnovou stanicí BS eNB, která je základní částí rádiové přístupové sítě RAN/LTE (Radio Access Network/Long Term Evolution). Ta využívá frekvenční rozsah 1 (FR1), omezený shora frekvencí cca 6 GHz. Stanice BS je propojena fixním širokopásmovým spojem „backhaul“ s jádrem sítě CN/EPC (Core Network /Evolved Packet Core), plněním funkce rádiové ústředny, databáze uživatelů a další. Jádro CN je spojeno s Internetem, nebo s jinými externími datovými systémy.

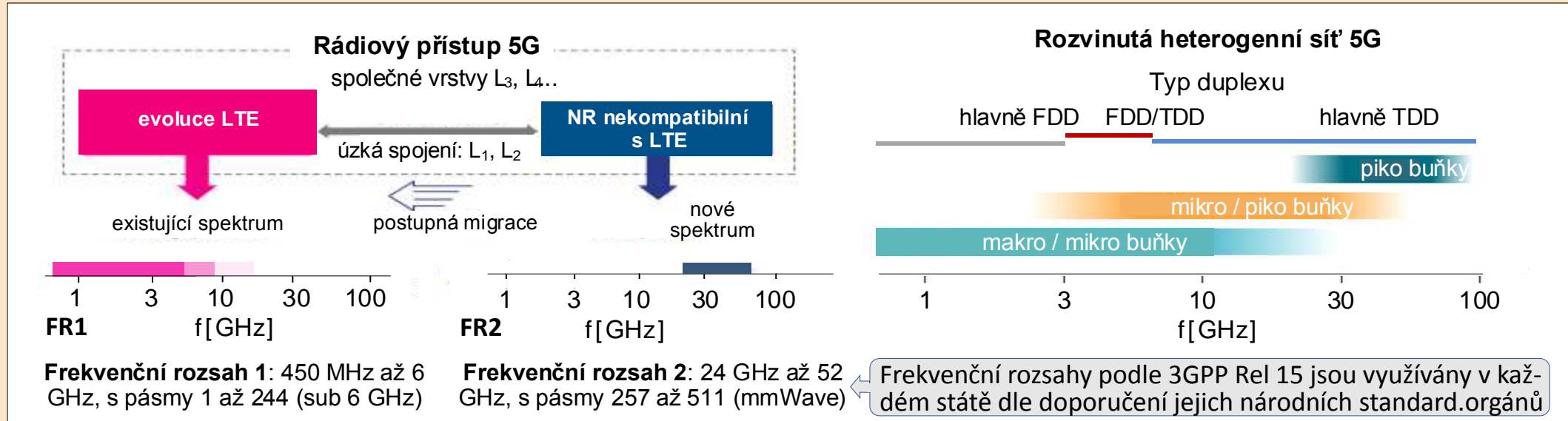
5G



5G: Uživatelé sítě 5G (EU) jsou vybaveni různými terminály (5G Devices), schopnými zajistit provoz eMBB, mMTC a URLLC. Nová servisní architektura 5G dělí přístupovou síť C-RAN na distribuovaný segment s malými základnovými stanicemi (SBS, mMIMO a RRH) a centralizovaný segment s oddělenými rovinami CP a UP a velkými stanicemi (LBS). Využívá se rozsah FR1 (pod 6 GHz), ale i FR2 (nad 24 GHz). V jádru CN jsou též rozdělené roviny CP a UP; díky separaci lze škálovat zdroje UP a CP nezávisle. Rovina CP je členěna do více kontrolních funkcí, což ulehčuje řízení systému. Činnost sítě 5G posiluje computing MEC a bloky SDN a NFV.

Rádiový přístup a frekvenční pásma systému 5G

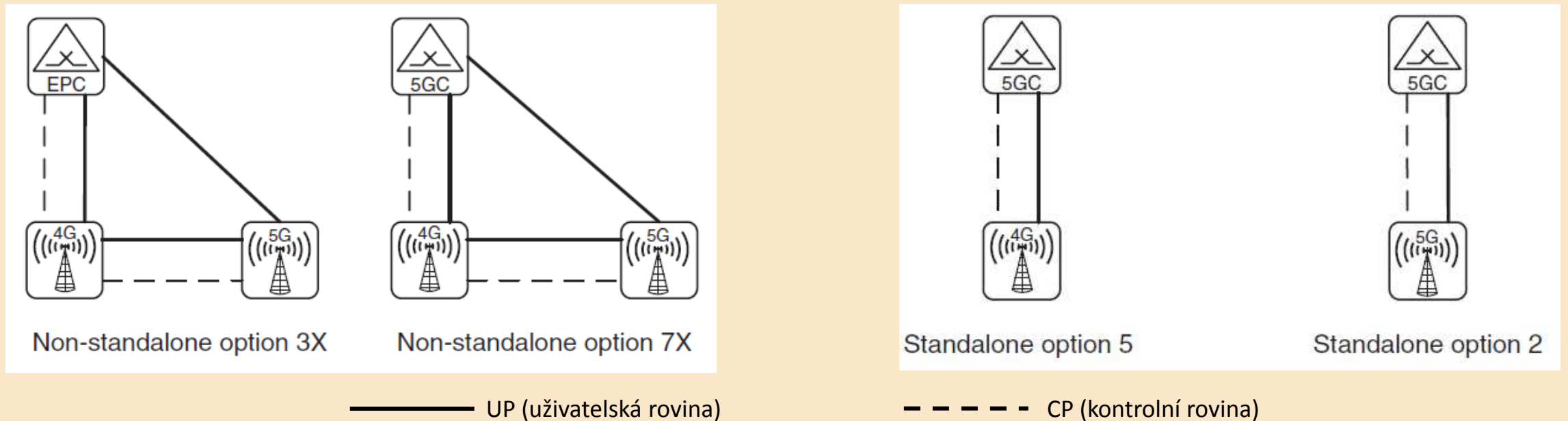
Pátá generace mobilních komunikačních sítí (5G) bude splňovat stále rostoucí nároky na velmi vysokou uživatelskou datovou rychlost i systémovou propustnost, nižší síťovou latenci, ale také větší energetickou i spektrální účinnost a spolehlivou konektivitu. Následující obrázky ukazují tři hlavní aplikační oblasti systémů 5G, dále jejich frekvenční pásma a heterogenní buňkovou strukturu HetNet:



- Rádiový přístup systému 5G a odpovídající úseky frekvenčního spektra od 0,5 do 100 GHz;
- heterogenní buňková koncepce systému 5G, která obsahuje konvenční makrobuňky využívající tradiční decimetrová pásma, ale i mikrobuňky a pikobuňky, přesouvající se do centimetrové a dokonce i milimetrové oblasti.

V dosavadním spektru od cca 500 MHz do 3 GHz lze dosáhnout velmi dobrého pokrytí (na nejnižších frekvencích i v makrobuňkách), pásmo 3,4 GHz až 3,8 GHz budou využívat nové služby, vyžadující vyšší kapacitu v městských oblastech. Nejvyšší pásma od 26 GHz až do milimetrové oblasti mohou nabídnout v prostředí heterogenních sítí extrémně vysokou kapacitu.

Strategie přechodu od sítí 4G k sítím 5G



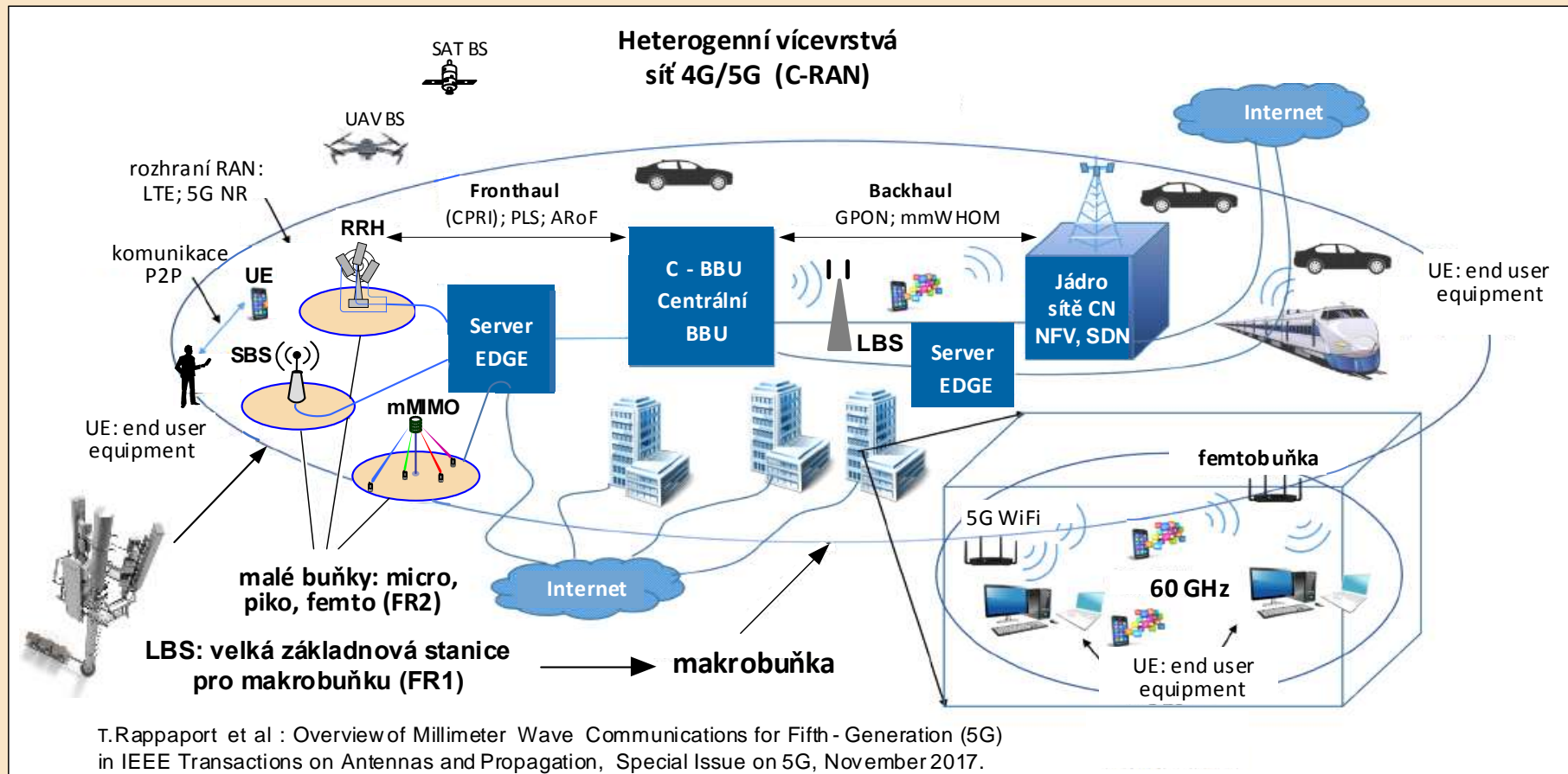
V počátku svého rozvoje po roce 2020 sítě 5G nedokáží zajistit kompletně celý mobilní provoz, a proto bude nutná jejich těsná kooperace se sítěmi 4G LTE. Po dlouhou dobu tedy musí být uživatelům k dispozici jak dosavadní terminály 4G UE, tak nové terminály 5G UE. Tento režim, označovaný zkratkou NSA (Non Stand Alone), bude mít několik variant (Options), z nichž dvě základní ukazuje obr. vlevo. Po dalším zdokonalování však veškerý provoz bude zajišťovat už jen „čistý“ systém 5G, což označuje zkratka SA (Stand Alone); příklady tohoto módu ukazuje obrázek vpravo.

Stručný popis problematiky módu NSA a módu SA je obsažen v lit. [1], velmi důkladný rozbor různých variant těchto módů přináší lit. [2].

[1] Chandramouli D., et al.: 5G for the connected world. Wiley, 2019.

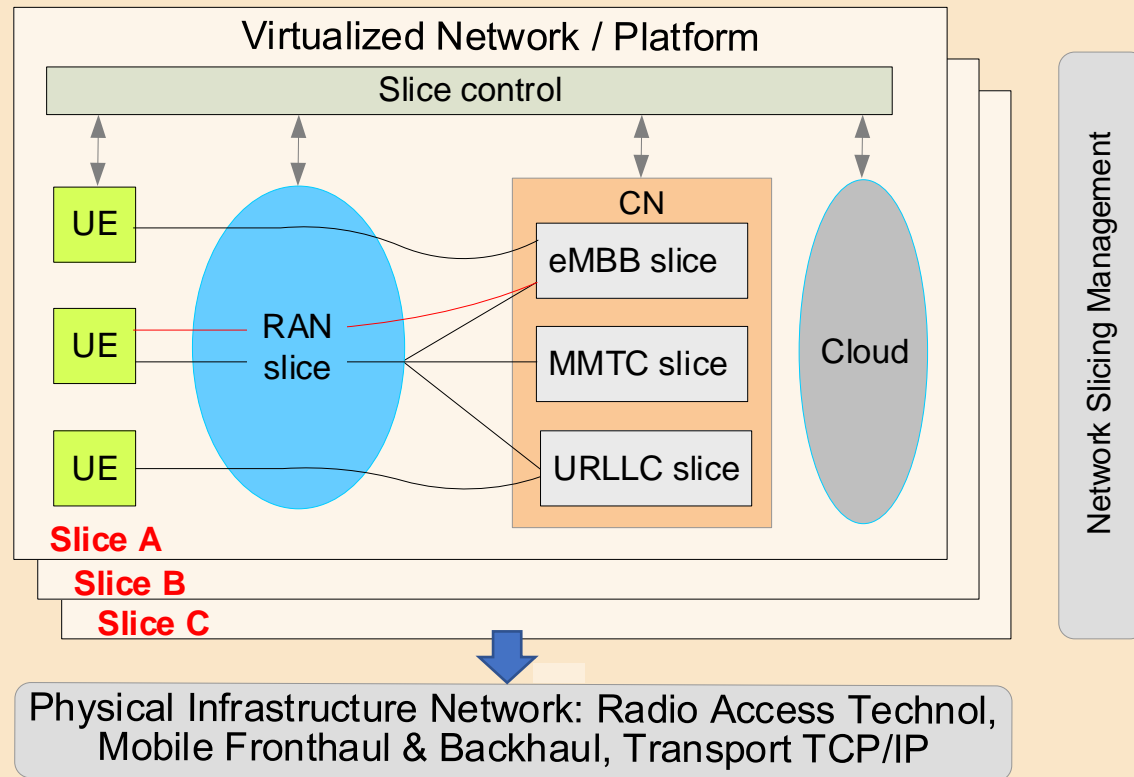
[2] GSMA White Paper: “Road to 5G: Introduction and Migration, April 2018”

Vícevrstvá heterogenní architektura systémů 4G/5G



V nové vícevrstvé architektuře 4G/5G jsou prostorově odděleny rádiové hlavičky RRH (Remote Radio Head) od jednotek základního pásma BBU (Base Band Unit); síť RAN je doplněna o servery EDGE pro mobilní koncový computing MEC (Mobile Edge Computing), v jádru CN přibývají bloky pro virtualizaci síťových funkcí NFV (Network Function Virtualization) a pro softwarově definované síťování SDN (Software Def. Networking). Přístup do systému zde zprostředkuje několik variant rádiového rozhraní MAIV (Multiple Air Interface Variants). Kooperace mezi různými přístupovými technologiemi RAT (Radio Access Tech) je založena na tvrdém handoveru „inter-RAT“, který bude implementován na úrovni jádra sítě (CN). Systém 5G bude integrován se systémy 5G WiFi a bezpilotní letadly UAV i družicemi SAT. Bude v něm také implementována pokročilá multimediální vysílací a multikastová služba eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Service), jež v módu P2MP umožní sítím 5G realizaci nových multimediálních aplikací, a to v oblasti IoT, v komunikaci záchranných služeb a služeb orientovaných na TV vysílání apod.

Technika plátkování (slicingu) v sítích 4G/5G



Důvody pro plátkování sítě NS (Network Slicing):

Různé aplikace 5G mají rozdílné nároky na požadované funkcionality. Avšak současné generace sítí představují „jeden systém pro všechno“ („one size fits all“), který není schopen efektivně plnit tyto různorodé požadavky.

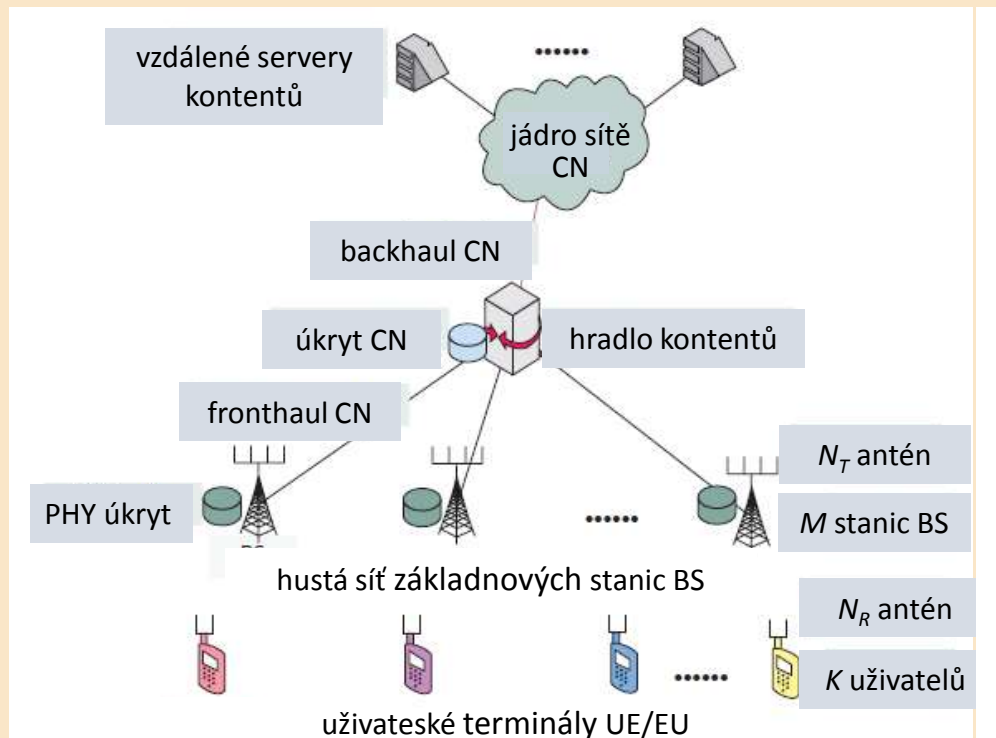
Řešením je zde plátkování sítě NS (Network Slicing), jež dává operátorům možnost vytvářet a provozovat mnohonásobné sítě za pomoci jejich dělení do vícenásobných virtuálních sítí, jež působí na společné síťové infrastruktuře, zahrnující přístup RAN, síť backhaul a jádro CN.

Přednosti plátkování sítě NS:

NS má vůči starším koncepcím čtyři následující velké výhody:

- **Dynamický management:** operátor může dynamicky vytvářet a řídit síťové plátky, přizpůsobené rozdílným scénářím trhu; tyto plátky tedy může škálovat, modifikovat, odstraňovat apod.
- **Podpora selekce síťových plátků:** síť může vybírat vhodné plátky pro specifické uživatelské terminály UE, zařízení, služby a předplatitele; síťové plátky připojené k terminálu UE lze vyměnit.
- **Simultánní přístup:** určitý terminál UE může mít současný přístup k více síťovým plátkům.
- **Izolace:** dílčí síťové plátky jsou izolovány; služby v jednom neovlivňují služby nabízené jinými.

Caching v mobilních sítích 4G/5G



Jednou z klíčových technologií systémů 5G, které podporují až tisícnásobné zvýšení své kapacity vůči standardům 3G/4G, jsou velmi husté rádiové sítě s malými buňkami, ilustrované obrázkem vlevo. Koncepce hustých základnových stanic BS přibližuje síťové elementy k uživatelům (UE/EU), což pak podstatně zvyšuje spektrální účinnost systému na jednotku plochy.

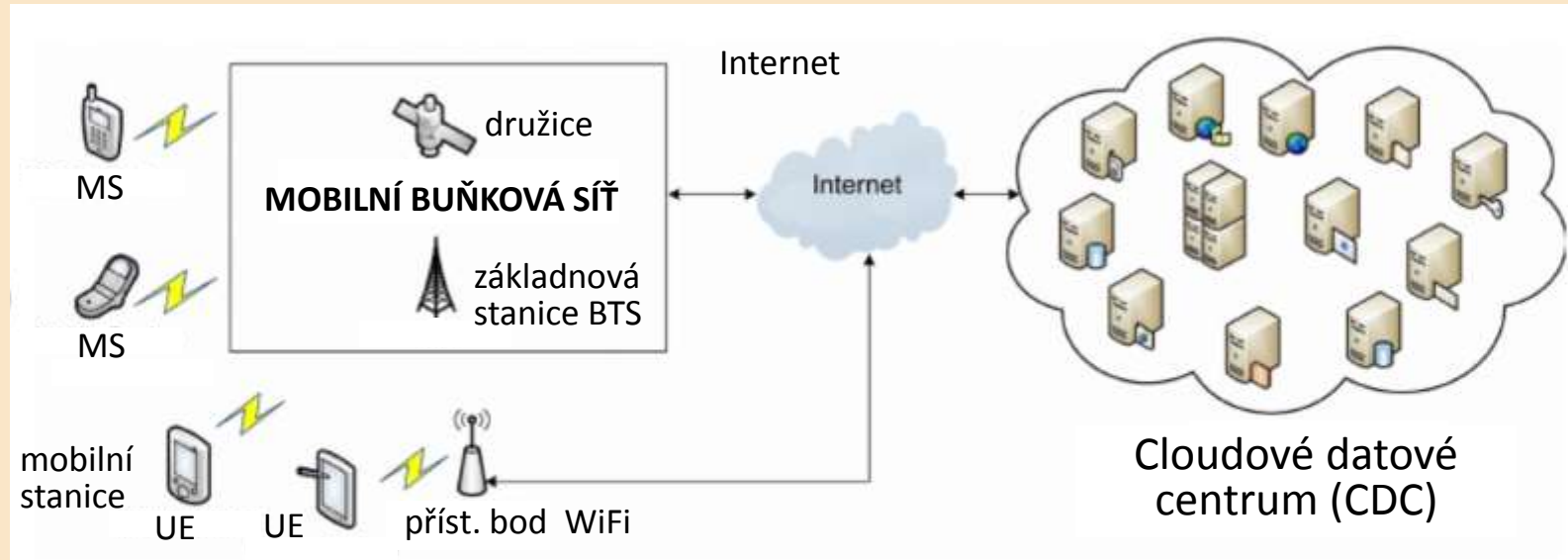
Zde je zobrazena zdokonalená strategie, která kromě cachingu v jádru sítě CN využívá navíc také caching ve fyzické vrstvě PHY. Ten zavádí do základnových stanic pomocnou vedlejší informaci (side information), podporující v rádiové síti mezi partnerskými vysíláči kooperaci MIMO, jež dále výrazně navyšuje spektrální účinnost. Koncepce cachingu navíc není omezena na základnové stanice BS. PHY caching může být totiž rozšířen také na uživatelské terminály UE/EU. Potom několik uživatelů využívá cachingové kontenty současně a přitom vysílá mnohonásobné datové toky i k dalším uživatelům.

Souběžné rádiové přístupové sítě RAN, ale i sítě backhaul, spojující RAN s jádrem sítě CN, nezvládají prudce rostoucí požadavky uživatelů na přenos kapacitně náročných multimediálních obsahů, stahování velkých objemů dat apod. K řešení této situace napomáhá tzv. caching (uložení, zachycení). Tato technika spočívá v uložení populárních obsahů, generovaných obvykle v originálních vzdálených cloudech, v lokálních úložištích – „úkrytech“. Ta mohou být situována do jádra sítě CN, nebo do stanic BS sítě RAN, blízkých uživatelům (rádiový caching). Úložiště jsou realizována mezilehlými servery, odkud si mohou uživatelé tyto kontenty i vícekrát stáhnout. Tím se eliminuje jejich redundandní přenos na velké vzdálenosti.

Caching může výrazně zvýšit kapacitu i kvalitu služeb, zejména v okrajových lokalitách buněk. Strategie budování rádiového cachingu usiluje o dosažení kompromisu mezi náklady (cenou) přenosové šířky pásma v dlouhých trasách backhaul, která je obvykle vysoká a mezi cenou pamětí, která je naopak nízká.

Tradiční mobilní cloud computing MCC v sítích 2G, 3G ...

Mobilní stanice MS sítí druhé a třetí generace směřovaly v minulých letech ke koncepci smartphonů, které již podporují řadu aplikací velmi náročných na početní operace. Jejich možnosti jsou však v oblasti výpočetních výkonů, ale i kapacity paměti, úschoven dat a energetické spotřeby omezené. Tento problém řeší mobilní (multi - access) cloud computing (MCC).



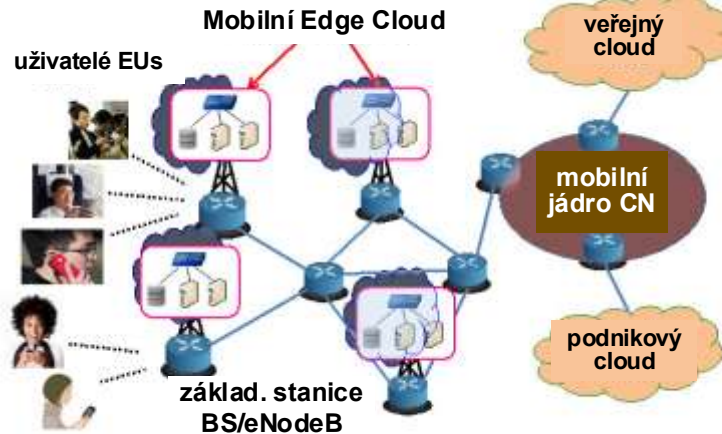
Cloud computing CC je poskytování výpočetních služeb, databází, úschoven, aplikací a jiných IT zdrojů veřejným i soukromým uživatelům (klientům) z externích serverů, dostupných z internetu. Přístup umožňuje např. prohlížeč web, nebo e-mail.

Mobilní cloud computing MCC vzniká integrací cloud computingu s uživatelskými terminály (MS, UE) mobilních systémů. Ty pak disponují virtuálně neomezenými výpočetními výkony, kapacitami paměti i úschoven dat. Přístup do cloudu je umožněn klientům MCC buď přes buňkové sítě, či sítě WiFi, jež mají menší energetickou spotřebu i latenci; možný je i satelitní přístup.

Slabinami MCC v mobilních sítích jsou velká latence E2E, způsobená odlehlostí cloudu od koncových uživatelů EU, náchylnost k zahlcení provozu pomocné komunikace a její vysoká cena, velké cloudy mají i značnou energetickou spotřebu. Některé tyto slabiny řeší nové koncepce mobilního koncového computingu MEC, FOG computingu a cloudletů.

Mobile EDGE Computing a FOG Computing

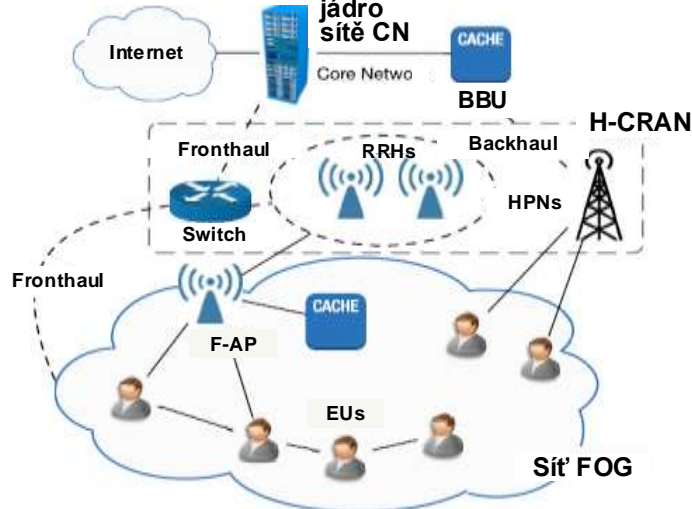
Mobile Edge Computing - An Important Ingredient of 5G Networks



Mobilní koncový computing MEC (Mobile Edge Computing, Multi-Access Edge Computing), je distribuovaná architektura, založená na cloud computingu a IT službách. Nevyužívá však externí cloud, nýbrž komerční aplikační servery MEC, lokalizované uvnitř buňkové sítě, a to co nejbližší k jejím koncovým uživatelům EU, tedy např. přímo v základnové stanici BS, nebo v jiném koncovém uzlu sítě RAN. Koncepce MEC tak umožňuje mobilním terminálům UE realizovat operace náročné na velký výpočetní výkon a velkou kapacitu úschoven dat. Přináší ale i nízkou latenci přenosu, úsporu šířky pásma a energetické spotřeby a zmenšení nebezpečí zahlcení. Technika MEC se úspěšně uplatňuje v oblasti autonomních vozidel, dopravním managementu, v dálkové robotické chirurgii, v managementu chytrých energetických soustav (smart grid) apod.

Gupta L., et al: Mobile Edge Computing – An IEEE Softwarization, March 2016

Fog is cloud close to ground: From Core to edge



FOG Computing je novější koncepce cloud computingu (CC) se sníženou latencí a malým nebezpečím zahlcení. Skládá se ze tří vrstev. Nejvyšší je třetí vrstva, kterou tvoří klasické výkonné cloudové datové centrum (DC). V nejnižší první vrstvě se nacházejí koncoví uživatelé EU (End Users), k nimž patří senzory (IoT), smartphony, tablety, chytrá vozidla apod. Zcela nová prostřední vrstva, označovaná jako H-CRAN/FogNet), v sobě kombinuje: 1) heterogenní síť H-CRAN, obsahující vylepšené rádiové hlavice eRRH, dále výkonové stanice HPN (High Power Node), spínače, jednotky BBU a jádro sítě CN. apod, 2) síť FogNet s přístupovými body F-AP (FOG-Access Point) a případně dalšími bloky. Tyto elementy jsou soustředěny na konec sítě, kde přímo - a velice úsporně - sdílejí počítačové a paměťové kapacity a realizují vzájemný distribuovaný management, čímž odlehčují nadřazené centrum DC. Náročné operace jsou ale řešeny ve spojení tímto centrem.

Mukherjee, M., Shu L.: Survey of Fog Computing: Fundament...IEEE Commun. Survey and Tutorials, 3Q 2018

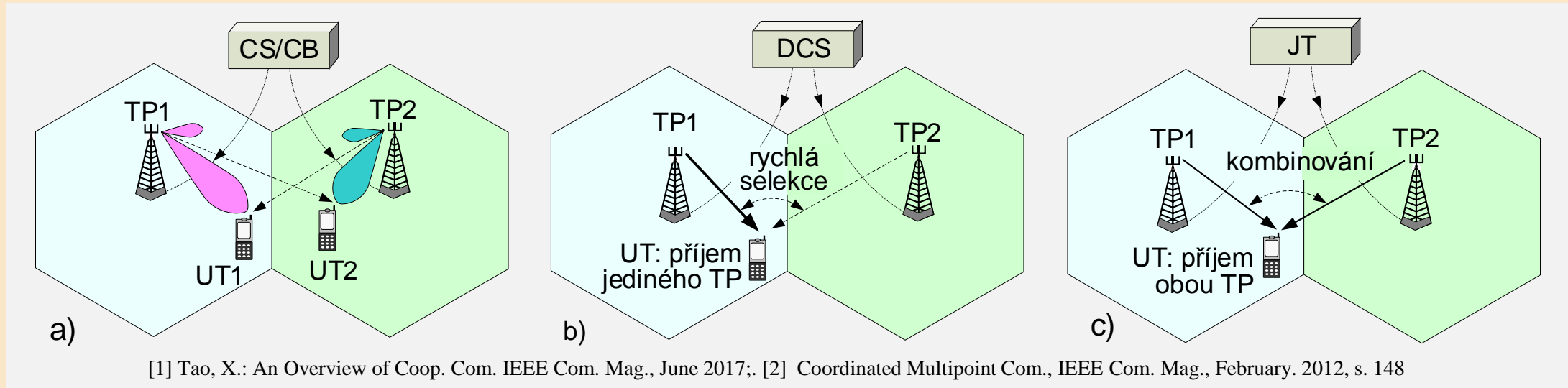
Technologie MEC a FOG computingu si jsou blízké, jisté rozdíly zde ale existují. MEC přesouvá procesní a paměťové zdroje do lokalit, v nichž se nacházejí služby zajišťované danou sítí. Ve FOG computingu jsou výpočetní, komunikační a paměťové zdroje lokalizovány v blízkosti zařízení a systémů koncových uživatelů, kde podporují geograficky rozprostřené a na latenci citlivé aplikace, často ze sv+ta IoT.

Koordinované mnohobodové vysílání a příjem CoMP (DL)

Koordinované rozvrhování a formování svazku CS/CB (coordinated scheduling and coordinated beamforming)

Dynamická velmi rychlá selekce buňky DCS/DPS (dynamic cell selection/dynamic point select.)

Společné vysílání JT (Joint Transmission) ze dvou sousedících buněk (either coherent nor noncoherent)

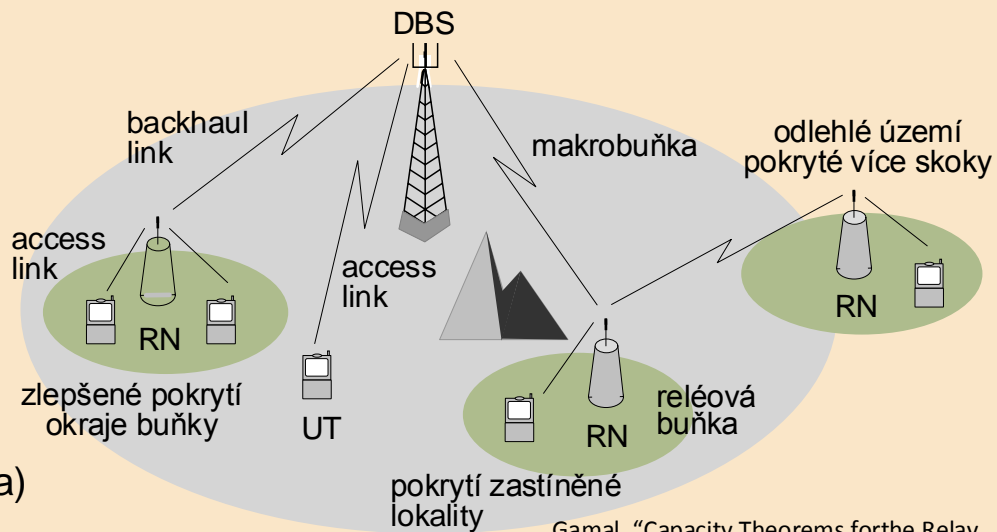


Díky centrálnímu rozvrhování může každý vysílací bod TP tvarovat svůj vyzařovací diagram tak, aby jeho maximum směřovalo pouze k jeho terminálu UT; ve směru druhého terminálu má diagram nulu, takže interference jsou zde potlačeny.

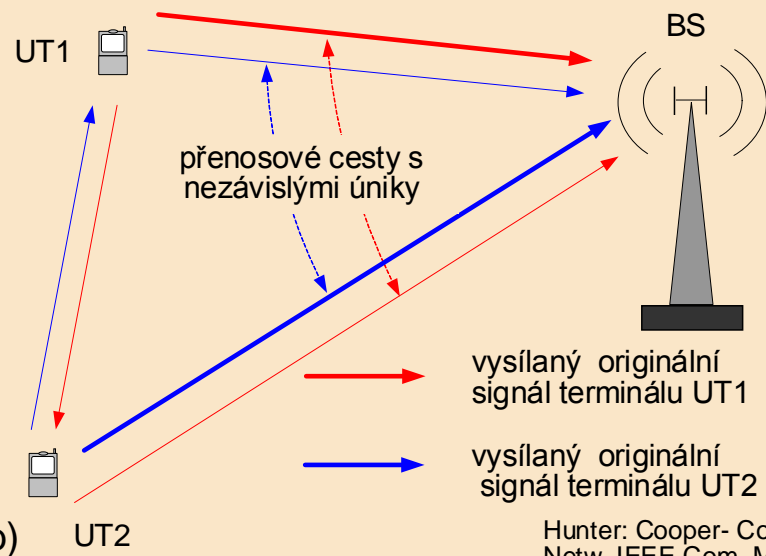
Pro daný terminál mají oba body TP jeho data. Tato data však vysílá vždy jen jediný z nich, a to ten jehož rádiový kanál má momentálně lepší parametry. Přepínání mezi body TP probíhá relativně velmi rychle (v intervalech řádu milisekund).

Stejná data se vysílají z více bodů TP současně k jedinému uživatelskému terminálu UT, kde se koherentně, nebo nekoherentně kombinují.

Klasické a kooperativní radioreléové techniky v mobilních sítích



a)
Gamal, "Capacity Theorems for the Relay Channel," *IEEE Trans. Info. Th.*, Sept. 1979
DBS: Donor Base Station; RN: Relay Node; UT: User Terminal



b)
Hunter: Cooper- Comm. in Wireless Netw. *IEEE Com. Mag.*, Oct. 2004.

Klasická radioreléová technika

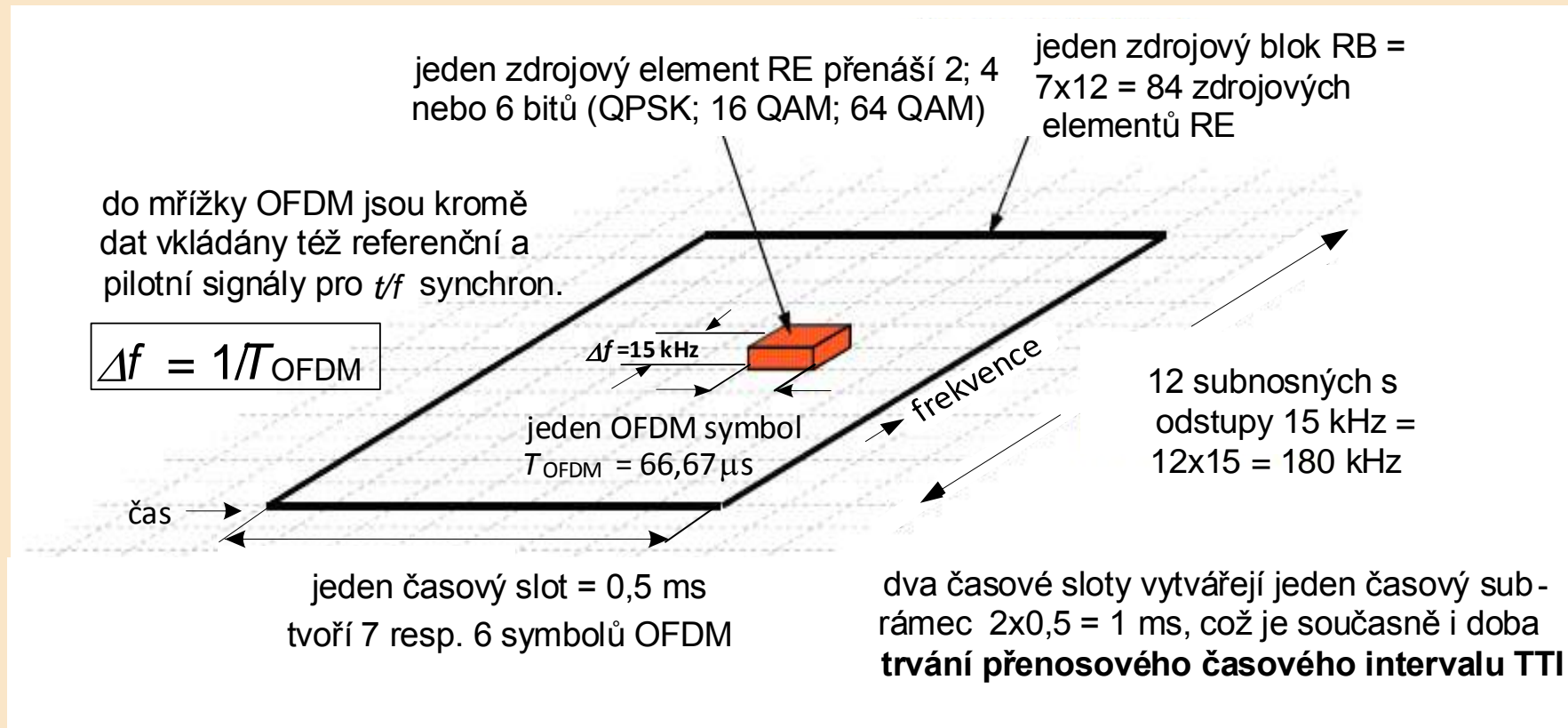
Reléové uzly RN (Relay Node) zlepšují pokrytí v zastíněných a dalších kritických oblastech. Zvětšují hustotu infrastruktury celého systému, což vede ke zkracování průměrných vzdáleností přijímač-vysílač a tedy i ke zvyšování poměrů SINR. To se pak projeví ve zvýšené spolehlivosti spojení, značném zvětšení kapacity sítě a též v poklesu energetické spotřeby v UT.

Kooperativní radioreléová technika

Dva partnerské uživatelské terminály UT1 a UT2 vysílají svá vlastní data přímo ke společné základnové stanici BS. Každý z nich je však schopen také přijímat signály druhého terminálu a ty předávat, spolu se svými vlastními daty, ke stanici BS. Jsou-li oba terminály dostatečně od sebe vzdálené, pak oba kanály vytvářené určitým terminálem, tedy kanál přímý i předávaný, jsou statisticky nezávislé. Avšak mají-li být přijímány jedinou přijímací anténou, musí být ortogonální, což lze zajistit vhodným prostorově časovým kódem apod. Takto vytvořená „umělá“ vysílací diverzita zlepšuje pokrytí, spolehlivost přenosu, imunitu vůči únikům a zvyšuje kapacitu. Uvedená koncepce je technicky dobře zvládnuta, legislativním problémem však může být využívání určitého mobilního terminálu (UT1) jiným terminálem (UT2), bez vzájemné předchozí dohody

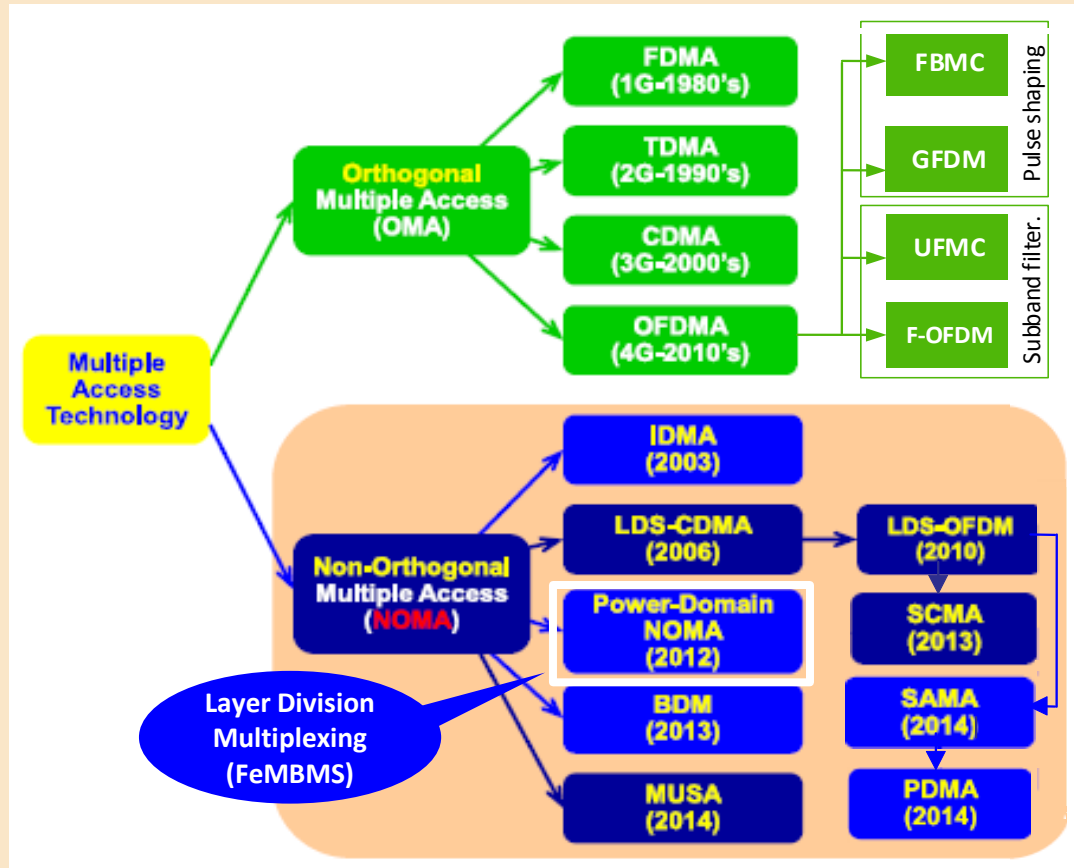
Nové technologie v sítích 4G/5G

Frekvenčně časová struktura multiplexu OFDM systému 4G LTE



U systému 4G LTE je mnohonásobný přístup realizován ortogonálním frekvenčním multiplexem OFDM, s odstupem subnosných vln 15 kHz. Časově je přenos členěn do časových rámců 10 ms, z nichž každý obsahuje 10 subrámců. Subrámeček se dělí do dvou slotů 0,5 ms, po 7 resp. 6 symbolech OFDM. Jeden fyzický zdrojový blok RB, o době trvání shodné se slotem 0,5 ms, je přenášen na 12 subnosných s pásmy Df po 15 kHz, tedy zaujímá segment $12 \times 15 = 180 \text{ kHz}$. Přenosový časový interval TTI má délku 1 ms, shodnou s časovým subrámečkem.

Klasifikace přístupových technik OMA a NOMA pro síť 5G



Výhody mnohonásobného přístupu NOMA vůči OMA:

- Dovoluje zvýšit počty uživatelů a podpořit jejich diferenciaci v masových aplikacích eMTC / URLLC (IoT).
- Zvyšuje spektrální účinnost SE a propustnost na hranicích buněk (každý zdrojový blok užívá více uživatelů).
- Nežádá perfektní CSI na UL, stačí info o síle signálu; tím se snižuje latence přenosu a přetížení signalizací.
- Aplikace SIC ale komplikuje techniku přijímačů a navíc vyžaduje perfektní informaci o stavu kanálu CSI.

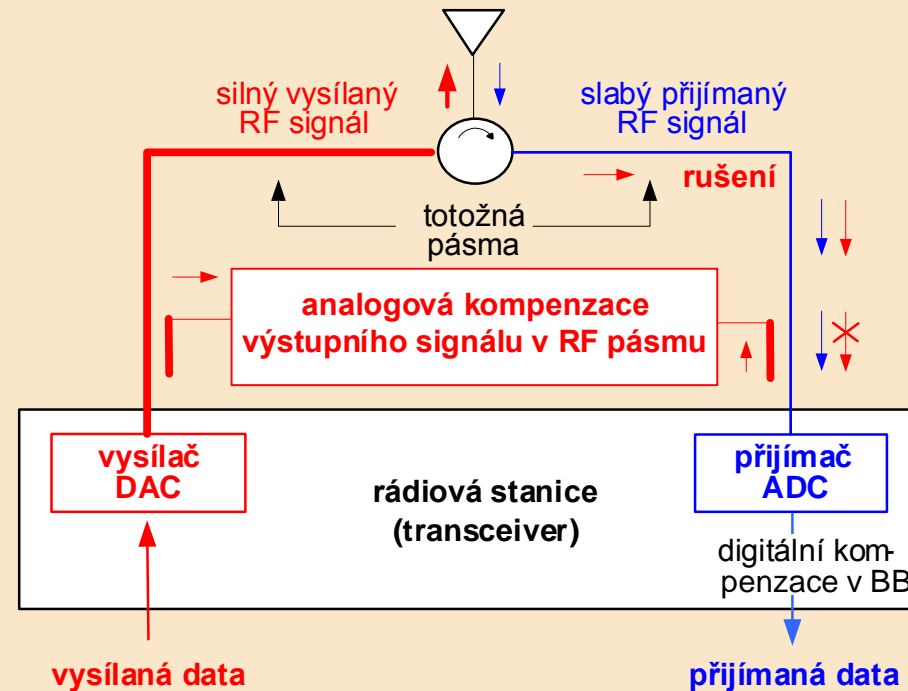
Techniky mnohonásobného přístupu MA sítí 5G se dělí na ortogonální formáty OMA a neortogonální NOMA.

- **OMA (Orthogonally Multiple Access):** signály uživatelů jsou vzájemně ortogonální, a tedy se neovlivňují. Do této třídy patří FDMA, TDMA, CDMA a OFDMA. Avšak vzhledem k omezenému počtu ortogonálních zdrojových bloků mohou OMA aplikovat jen omezené počty uživatelů, se širokopásmovou komunikací eMBB. Masivní konektivitu žádanou v sítích 5G (až 10^6 terminálů na 1 km^2 , zejména pro Massive IoT), systémy OMA nezvládají.

- **NOMA (Non OMA)** odstraňuje řadu slabín OMA, tím že se ve vysílači užívá neortogonální alokace zdrojů. Signály různých uživatelů jsou vkládány do téhož kanálu technikou superpozičního kódování SC. Přijímané signály se podrobují detekci MUD, s postupnou eliminací interferencí SIC (successive interference cancellation). Aktuální je NOMA, nazývaná **PDM (power domain multiplexing)**, jejíž verze MUST (multiuser superposition transmission), která je určena pro sestupnou trasu DL systému 3GPP LTE-A; jejími přednostmi jsou zvýšená kapacita a kvalita přenosu na této trase, při relativní jednoduchosti UE přijímače.

V sítích 5G se zavede přenosový mód P2MP (point-to-multi-point) s multiplexem LDM (layered division multiplexing), přinášející velké zvýšení kapacity a spektrální účinnosti; využije se ve službách eMBMS, ale i v TV systému ATSC 3.0.

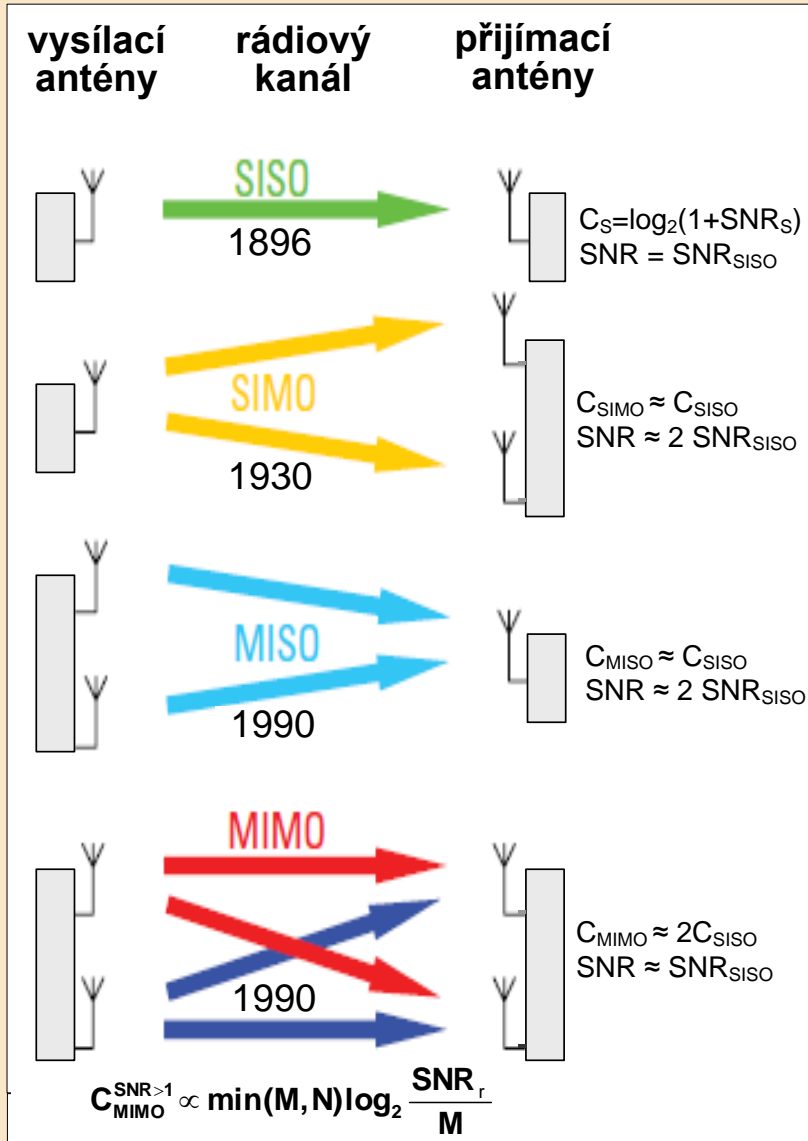
Plný duplex v jediném pásmu (IBFD)



Rádiový duplexní provoz mezi dvěma účastníky značí obousměrné spojení, probíhající současně. Realizuje se buď metodou frekvenčního duplexu FDD - ve dvou různých rádiových kanálech, nebo v jediném kanálu formou časového duplexu TDD, avšak s časovým střídáním vysílání a příjmu. Duplex FDD resp. TDD tedy vždy vyžaduje dvojnásobné pásmo než simplex.

System plného duplexu IBFD (In Band Full Duplex), umožňující plně duplexní provoz v jediném kanálu s nezvětšeným pásmem, je založen na technice potlačení vlastních interferencí SIC (Self Interference Cancellation). Vysílaný signál přichází od koncových stupňů vysílače přes anténní výhybku (duplexer) do antény a je vysílán. Avšak slabá izolace výhybky dovoluje části tohoto signálu vcházet i do přijímače, v němž potom může způsobovat rušení. Proto je zde kompenzačním obvodem, využívajícím vzorek vysílaného signálu, ještě v analogové vysílané podobě těsně před vstupem do přijímače, předběžně potlačován. Zbývající potřebné potlačení je realizováno po demodulaci již v digitálním traktu přijímače.

Systemy s mnoha anténami MAS: principy technologií SISO/SIMO/MISO a MIMO_{ST}



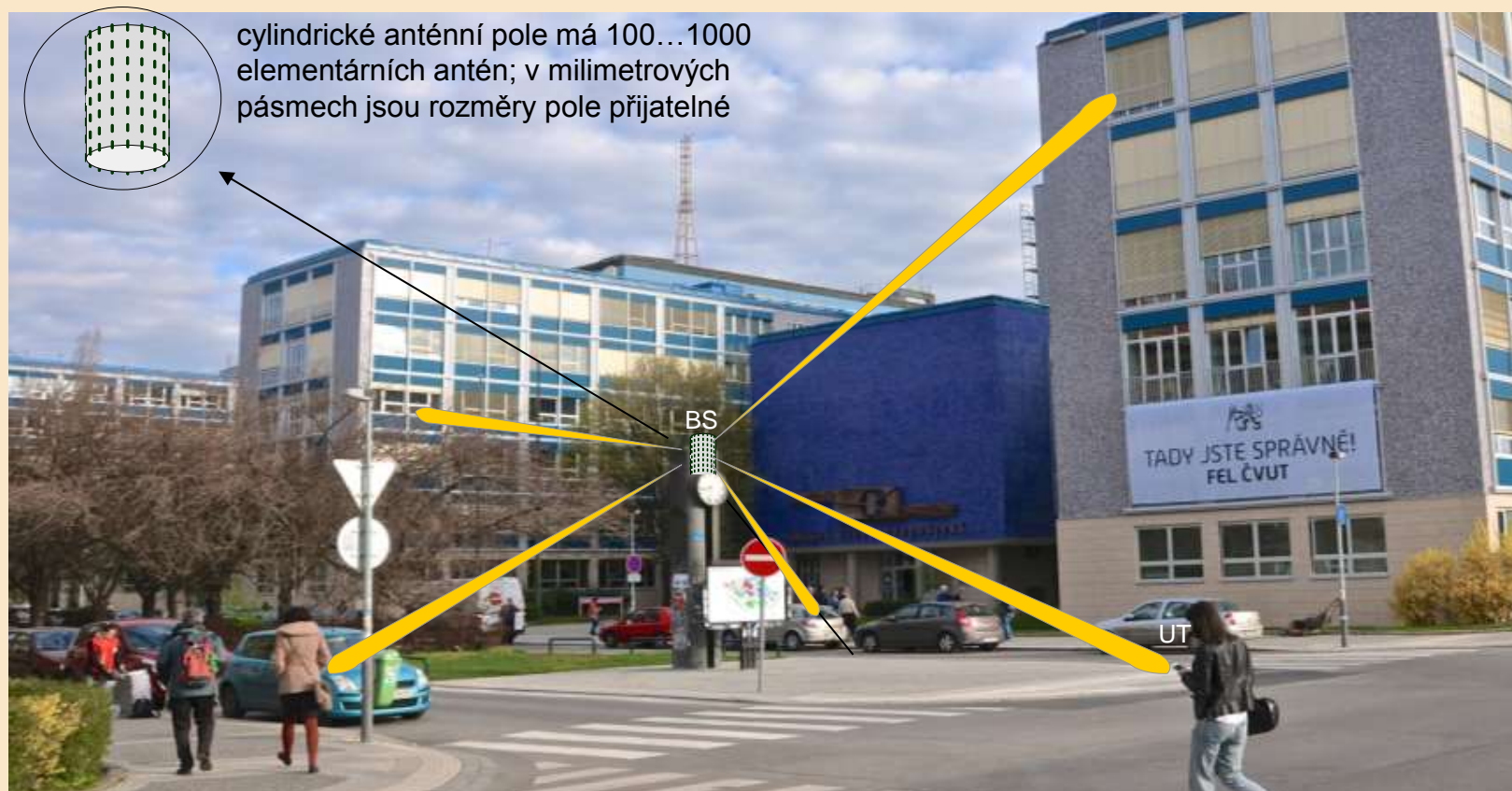
Prostý rádiový přenos SISO: přenáší se jen jeden modulační datový tok, po jediné rádiové cestě, přičemž zde nepůsobí žádná ochrana vůči únikům. Přenosová kapacita C_0 je dána Shannonovým vztahem $C_0 = B \log_2(1 + S/N)$.

Přijímací resp. vysílací prostorová diverzita SIMO / MISO: přenáší se jediný modulační datový tok po více rozdílných, pokud možno co nejméně vzájemně korelovaných cestách; tím se zvyšuje imunita proti únikům, šumu i interferencím (oproti SISO), a to přímo úměrně počtu přijímacích resp. vysílacích antén; přenosová kapacita se však téměř nemění. Přitom není nutné zvětšovat původní vysílací výkon ani šířku rádiového pásma (vůči ekvivalentnímu systému SISO).

Prostorový multiplex MIMO: přenáší se více různých datových toků-vrstev (layers, streams) po více rozdílných slabě korelovaných cestách, vytvářených více anténami ve vysílači i v přijímači; tím se vytváří prostorový multiplex, zvyšující přenosovou kapacitu celého systému to při původním nezvětšeném výkonu vysílače a při původní nezvětšené šířce rádiového (RF) pásma (vůči systému SISO). Počet nezávislých vrstev se nazývá rank systému MIMO

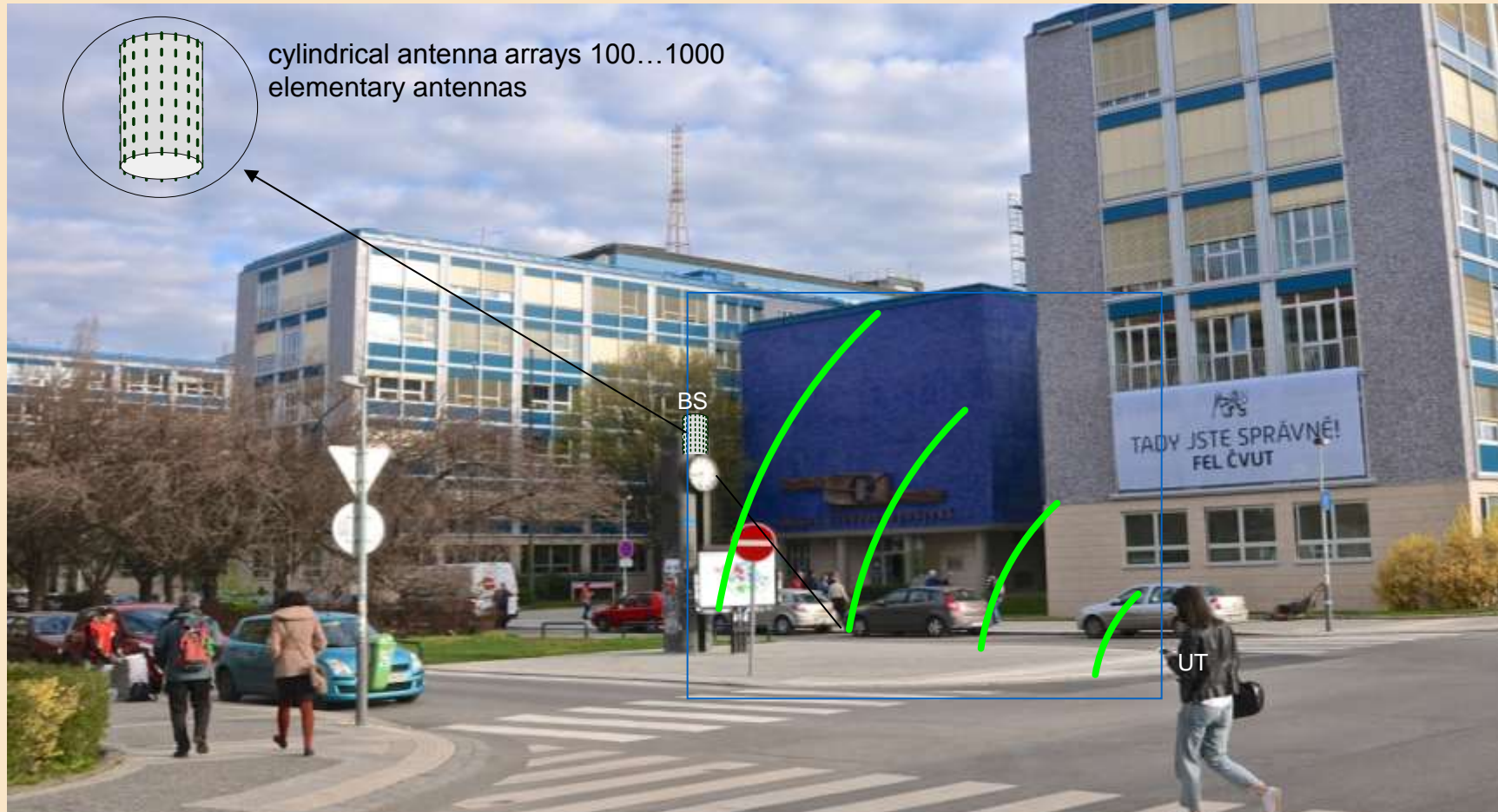
dílčí antény vysílačů resp. přijímačů musí být od sebe dostatečně vzdáleny (min. $\lambda/2$ i více)

System masivní MIMO na trase DL



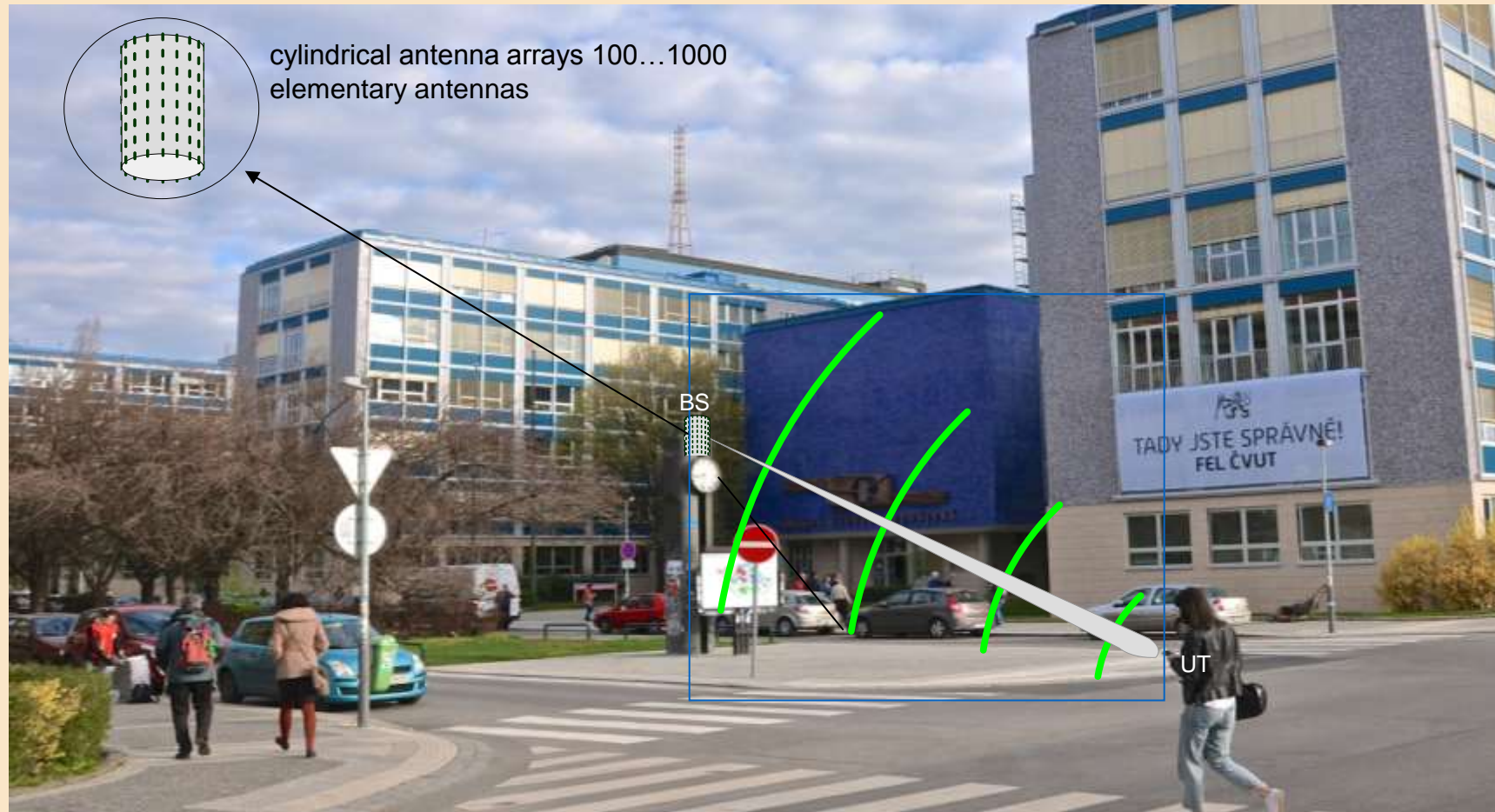
Základnová stanice BS, obsahující M elementárních antén, vysílá k N uživatelským terminálům UT (UE) na trase DL signály ve formě velmi úzkých směrových svazků. Všechny tyto signály potom mohou aplikovat techniku prostorového multiplexu SDMA (Space Division Multiple Access) a tedy využívat stejné pásmo. Díky tomu se na DL mohutně zvýší spektrální i energetická účinnost systému. Navíc se sníží úroveň určitých typů interferencí. Z hlediska zdravotního je zejména důležité, že svazek vysílaný z BS k určitému terminálu UT, zasáhne jen jeho majitele, kdežto expozice všech ostatních osob v dané buňce bude zanedbatelná (to je ovšem velký pokrok vůči starším systémům, které měly na BS původně všesměrové-a později pouze sektorizované antény). Ke sledování pohyblivých stanic UT je ale nutné stále udržovat pomocné oboustranné spojení BS \leftrightarrow UT, což systému umožňuje periodicky aktivovat znalost matice kanálu H (= CSI-Channel State Information). Ta se určuje odhadem, založeným na periodickém vysílání pilotních sekvencí, vkládaných mezi vysílaná data.

System masivní MIMO na trase UL



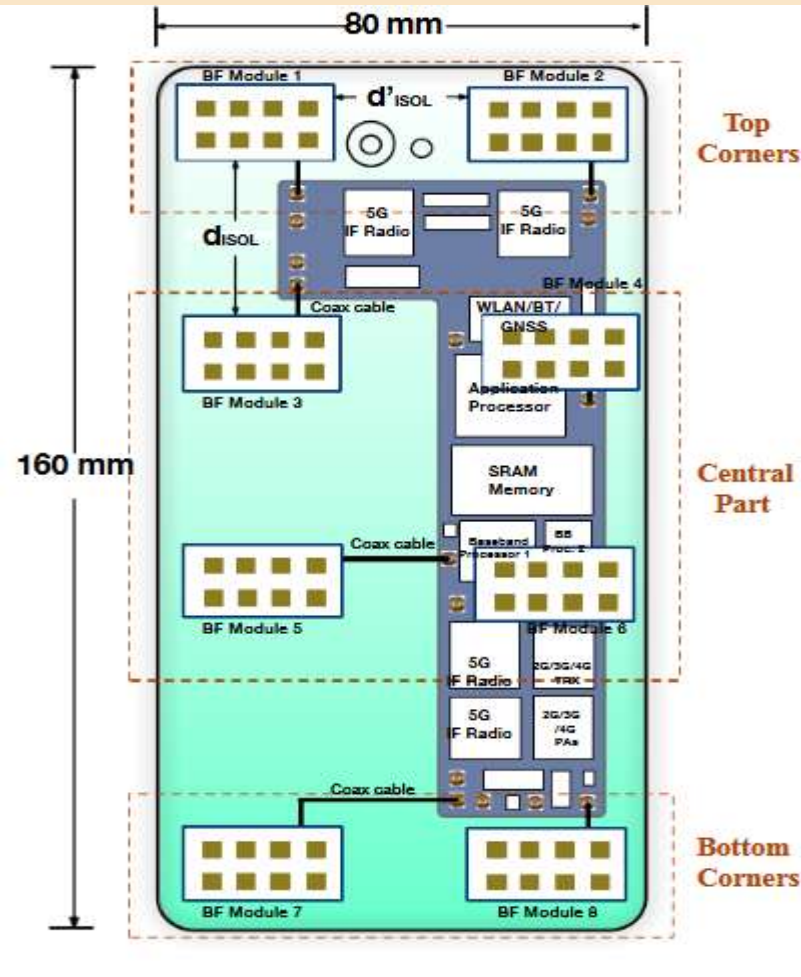
Na trase UL vysílá uživatelský terminál UT, vybavený většinou jedinou anténou s velmi malou směrovostí, signál směrem k anténnímu poli zákl. stanice BS. Toto pole však může díky velkému počtu elementárních antén, při znalosti matice H , formovat přijímací diagram s ostrými maximy zaměřenými na jednotlivé uživatelské terminály UT. Proto i na trase UL lze využít prostorový multiplex SDMA a vysílání všech terminálů UT realizovat v jediném společném frekvenčním pásmu. Tím se též na trase UL výrazně zvýší jak spektrální, tak energetická účinnost systému..

System masivní MIMO na trase UL



Na trase UL vysílá uživatelský terminál UT, vybavený většinou jednou anténou s velmi malou směrovostí, signál směrem k anténnímu poli zákl. stanice BS. Toto pole však může díky velkému počtu elementárních antén, při znalosti matice H , formovat přijímací diagram s ostrými maximy zaměřenými na jednotlivé uživatelské terminály UT. Proto i na trase UL lze využít prostorový multiplex SDMA a vysílání všech terminálů UT realizovat v jediném společném frekvenčním pásmu. Tím se též na trase UL výrazně zvýší jak spektrální, tak energetická účinnost systému..

Architektura modulů pro formování svazků BF v mobilním terminálu UE systému 5G



Prototyp mobilního terminálu 5G UE, s využitím anténní architektury DPA-MIMO, která umožňuje díky aplikaci mm vln jak formování svazků BF, tak i multiplex MIMO; zařízení obsahuje osm RF modulů po osmi anténách typu path, tj. celkem 64 antén.

Zobrazená architektura využívá novou techniku MIMO na bázi distribuovaného fázovaného pole DPA-MIMO (Distributed Phased Array-MIMO), jež nabízí možnosti výrazné rekonfigurovatelnosti. Tato koncepce se používá jak pro formování svazků BF (Beam Forming) tj. pro prostorovou diverzitu, tak pro prostorový multiplex MIMO. Skládá se z osmi BF modulů, z nichž každý obsahuje osm dílčích anténních elementů typu „path antenna“. Prostorová diverzita BF, poskytující zvýšenou spolehlivost přenosu, vyžaduje malou vzájemnou vzdálenost dílčích anténních elementů, nepřesahující velikost $\lambda_0/2$, kde je λ_0 je pracovní délka vlny ve volném prostředí. To potom vede k ostrému vyzařovanému svazku s malými parazitními postranními laloky, a tedy k žádanému velkému anténnímu zisku i účinnosti modulu. Prostorový multiplex MIMO pro dosažení co nejvyššího prostorového multiplexního zisku a tedy i zvýšení přenosové kapacity, naopak požaduje, aby anténní elementy měly mezi sebou vzdálenost d_{isol} větší, než několika λ_0 . Toto dilema řeší zobrazený anténní systém DPA-MIMO. Vzájemná vzdálenost dílčích anténních elementů v každém BF modulu je menší než $\lambda_0/2$, což zaručuje velký diversitní zisk. Vzájemná vzdálenost BF modulů je naopak větší než několika λ_0 , takže je současně dosaženo velkého multiplexního zisku. Implementace nové architektury DPA-MIMO v mobilních terminálech se setkává nejen s uvedenými rozměrovými problémy. Popisovaná koncepce DPA-MIMO má totiž i velkou energetickou spotřebu, která je pro omezené kapacity akumulátorů terminálu UE značně kritická.

První mobilní terminál páté generace 5G: SAMSUNG Galaxy S10 5G

Samsung Galaxy S10 is a line of [Android](#)-based [smartphones](#) manufactured, released and marketed by [Samsung Electronics](#). The Galaxy S10 series is a celebratory series of the 10th anniversary of the Samsung Galaxy S flagship line, its top line of phones next to the Note models. Unveiled during the "Samsung Galaxy Unpacked 2019" press event held on 20 February 2019, the devices started shipping in certain regions such as Australia and the United States on 6 March 2019, then worldwide on 8 March 2019. It is the tenth generation of Samsung's [Galaxy S series](#) of smartphones.

As has been done since the [Galaxy S6](#), Samsung unveiled flagship **Galaxy S10** and **Galaxy S10+** models, differentiated primarily by screen size and an additional front-facing camera on the S10+. In addition, Samsung also unveiled a smaller model known as the **Galaxy S10e**, as well as a larger:

5G-compatible version, the Galaxy S10 5G.

The Galaxy S10e, S10 and S10+ launch prices started at \$749, \$899 and \$999, while the S10 5G's launch price is \$1299.

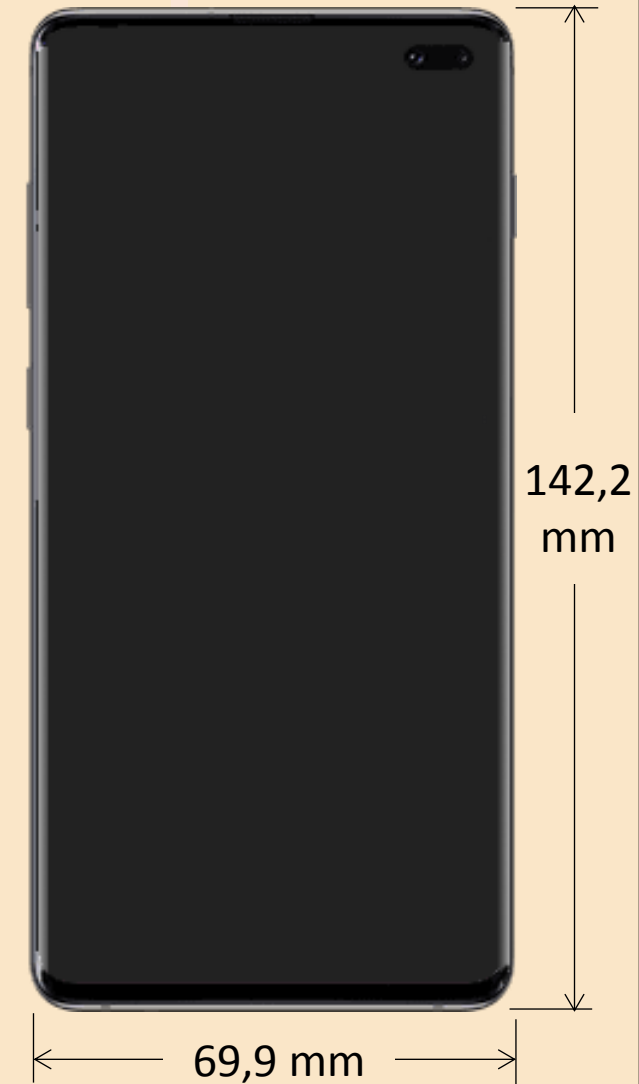
Type: Phablet (Phone & Tablet)

Dimensions (model S10e): 142,2 mm x 69,9 mm x 7,9 mm

Mass: (model S10e): 150 g

Connectivity: Bluetooth 5, WiFi (b, g, n, ac, ax), 3G/LTE

Battery Capacity – model S10 5G: 4 500 mAh.



Samsung Galaxy S10 5G
the world's first smartphone
able connect to 5G network

*Rádiová komunikace s velmi nízkou latencí
LLC (Low Latency Communication)*

Požadavky na latenci E2E v některých službách systému 5G LCC

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:

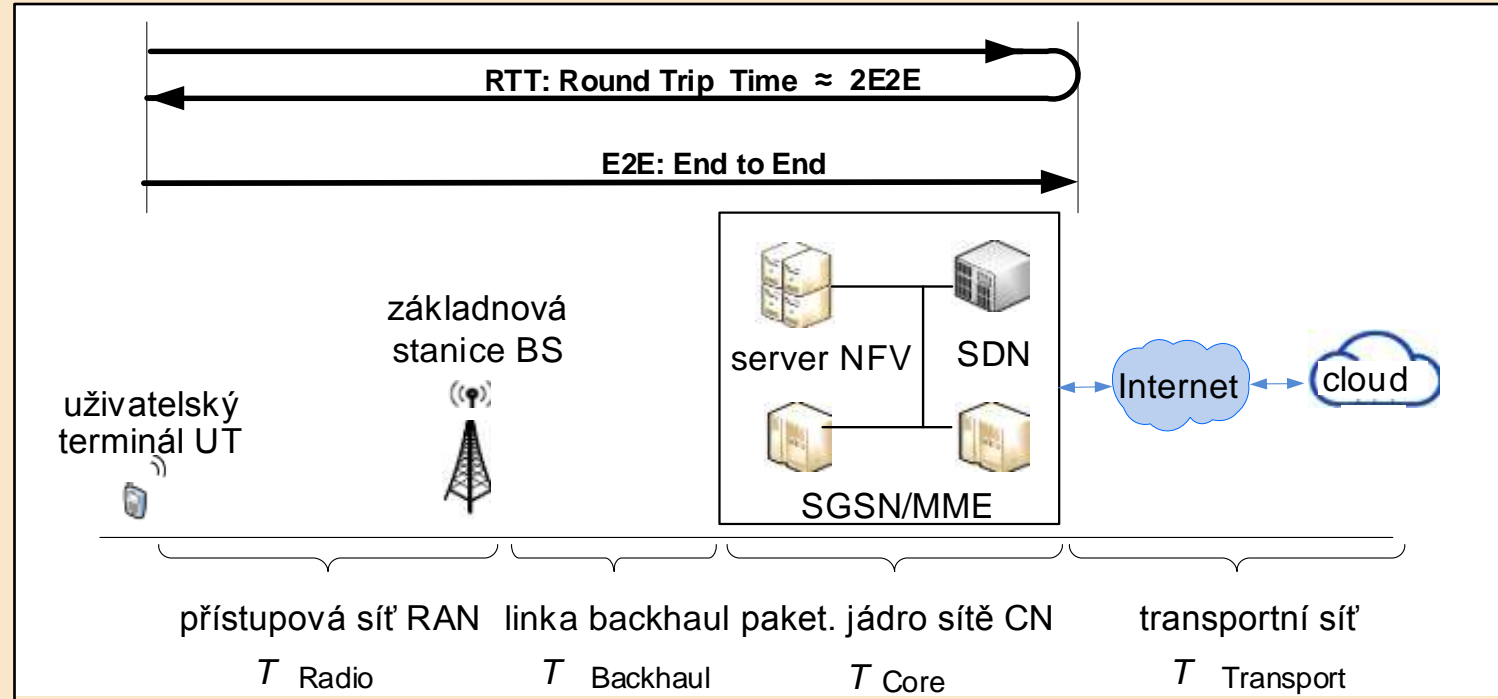
1. V systému 4G LTE se dosahuje latence E2E řádu 30 až 50 ms, u systému 4G LTE-A klesá tato latence k hodnotám 10 ms.
 2. Minimální hodnoty latence E2E pro nejnáročnější aplikace systému 5G URLLC jsou pod hodnotou 1 ms,
 3. V aplikacích kde dochází k přímé interaci „člověk – stroj“ je latence výrazně 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

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



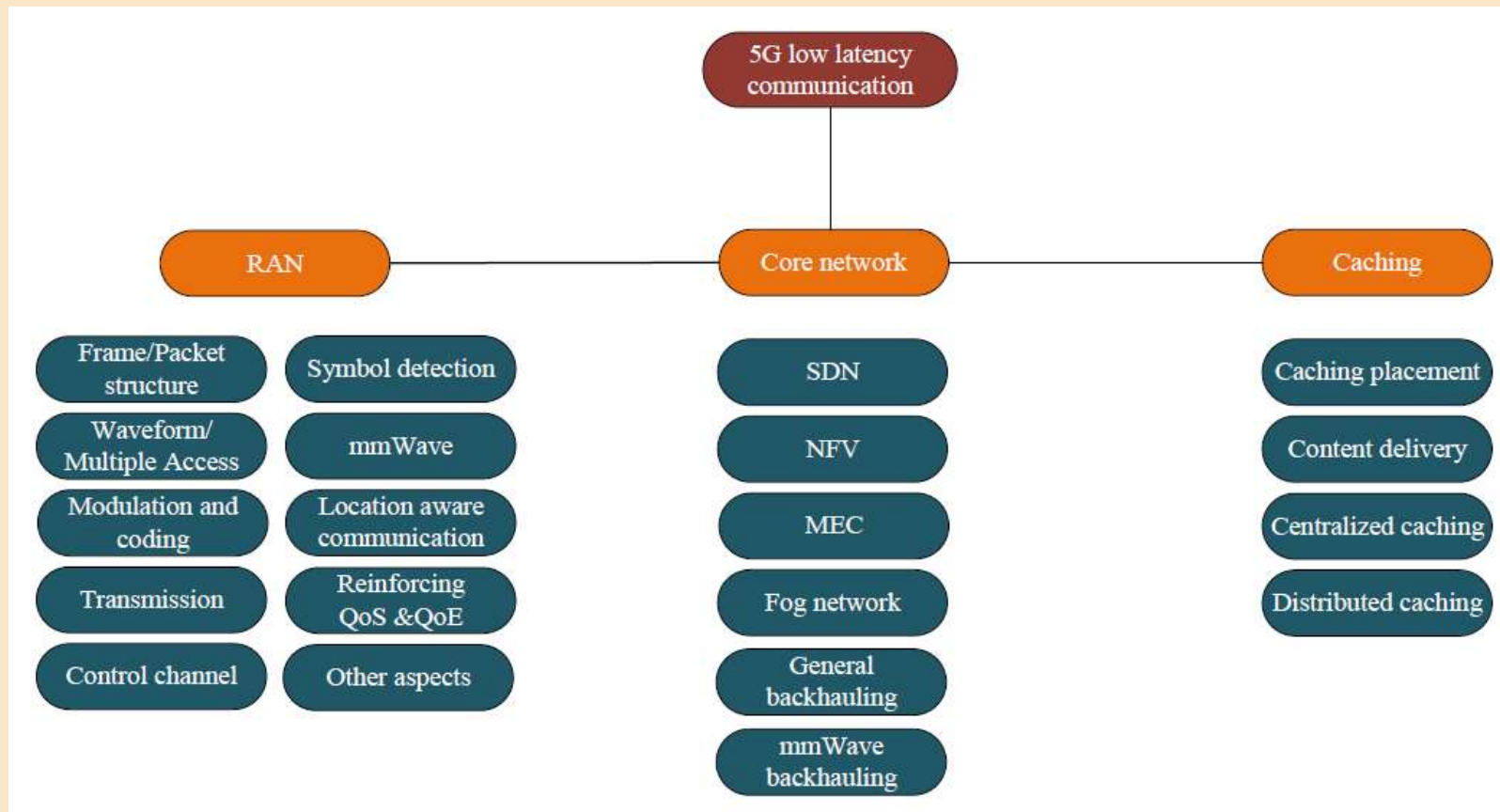
V buňkových sítích při přenosu paketů je zpoždění v rovině UP způsobeno několika složkami

- 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

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

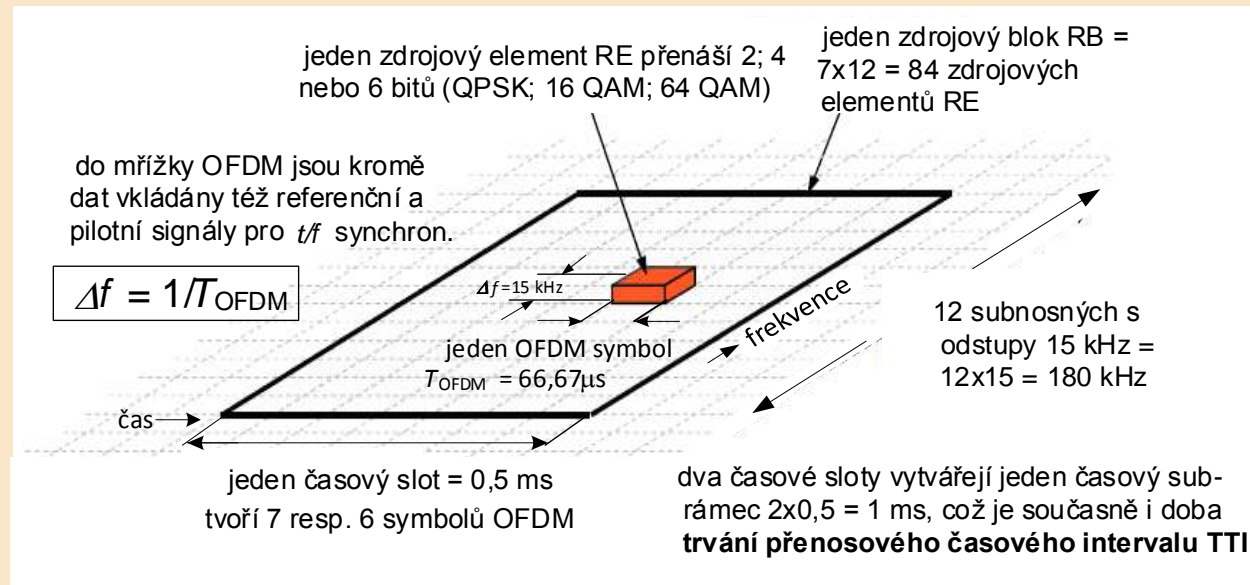
Tři různé přístupy k dosažení nízké latence v systému 5G URLLC



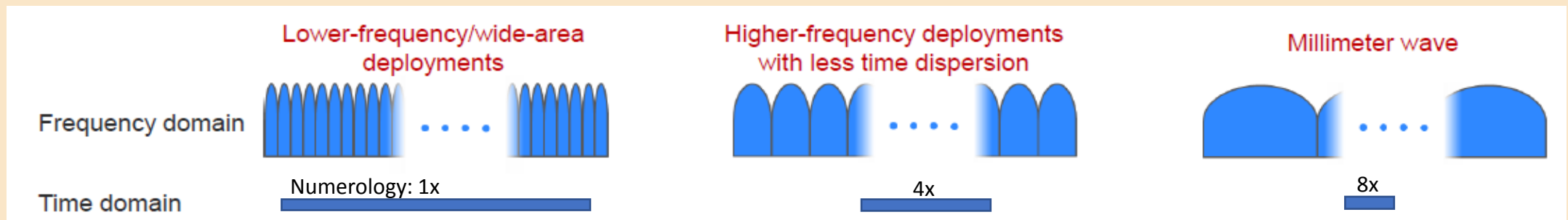
Technické inovace vedoucí v systému 5G k dosažení nízké latence tj. k realizaci služeb LLC (URLLC) lze rozdělit do tří skupin, určených hesly: (1) Řešení RAN; (2) Řešení CN; (3) Řešení technikami Cachingu.

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

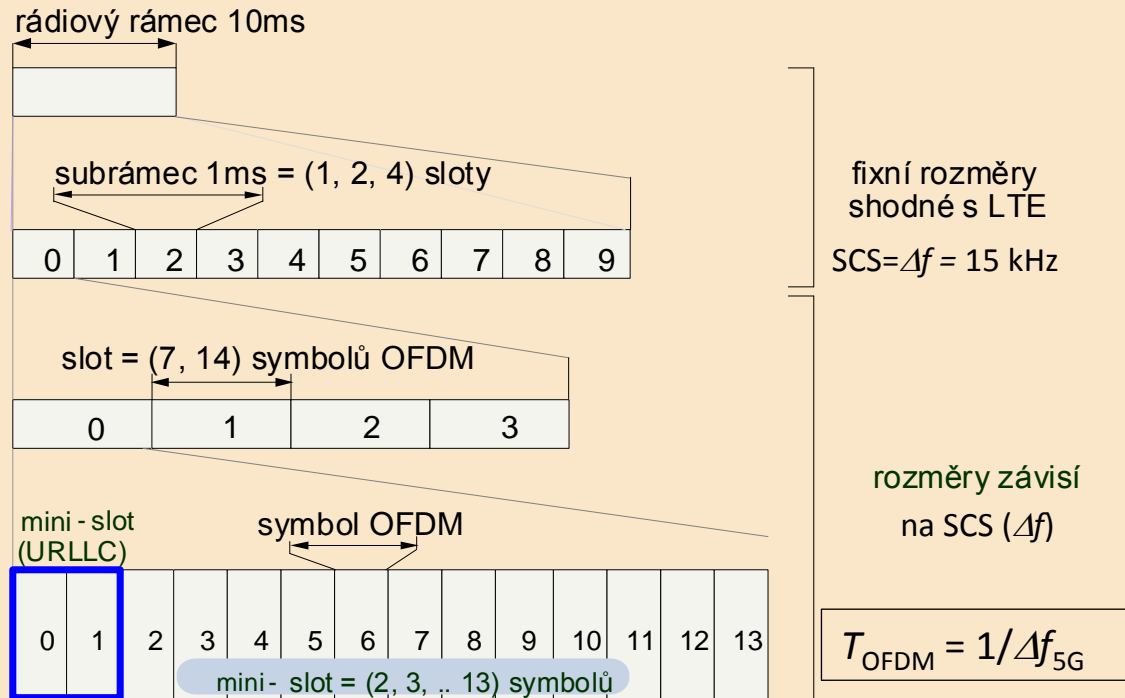
Fixní struktura multiplexu OFDM systému 4G/LTE a přechod k variabilní koncepci 5G



Struktura signálů OFDMA v síti 5G NR vychází z t/f 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 $T_{\text{OFDM}} = 66,67 \mu\text{s}$ ke zkráceným dobám 33,33; 16,67; 8,33 a 4,17 μs (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.



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	66,67 μ s	33,33 μ s	16,67 μ s	66,67 / 2 ⁿ μ s
Trvání cyklického prefixu	4,69 μ s	2,34 μ s	1,17 μ s	4,69 / 2 ⁿ μ s
OFDM symbol včetně CP	71,35 μ s	35,68 μ s	17,84 μ s	71,35 / 2 ⁿ μ s
Počet OFDM symbolů na slot	7 (konfigurace 1) 14 (konfigurace 2)	7 14	7 14	14
Doba trvání slotu	500 μ s, nebo 1000 μ s	250 μ s, nebo 500 μ s	125 μ s, nebo 250 μ s	1000 / 2 ⁿ μ s
Počet slotů na subrámeček	1 (1 ms)	2 (0,5 ms)	4 (0,25 ms)	8, 16, ...
Doba trvání mini slotu	142 nebo 241 μ s	71 μ s	36 μ s	71,35 / 2 ⁿ μ s

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 μ s) a může startovat v libovolném čase (bez čekání na pořadí).

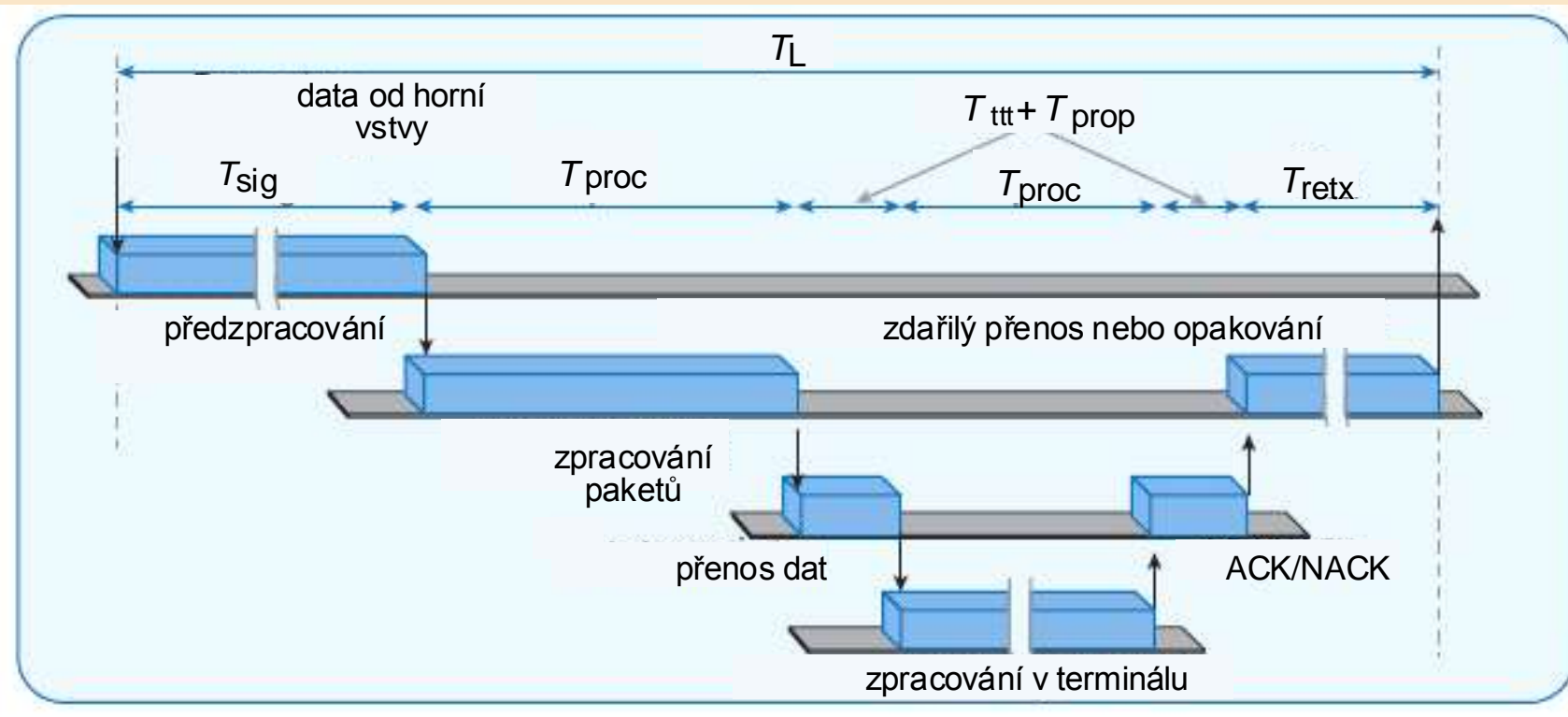
Interval TTI tvoří buď 1 minislot, jež má 1 až 13 symbolů OFDM, nebo 1 slot se 14 (12) symboly OFDM.

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 μ s, avšak při $n = 5$ je $\Delta f_{5G} = 480 \text{ kHz}$ a trvání OFDM symbolu jen 4,17 μ s. **Časový mini-slot** obsahuje 2 až 13 symbolů OFDM a může být polohován nezávisle vůči začátku standardního slotu.

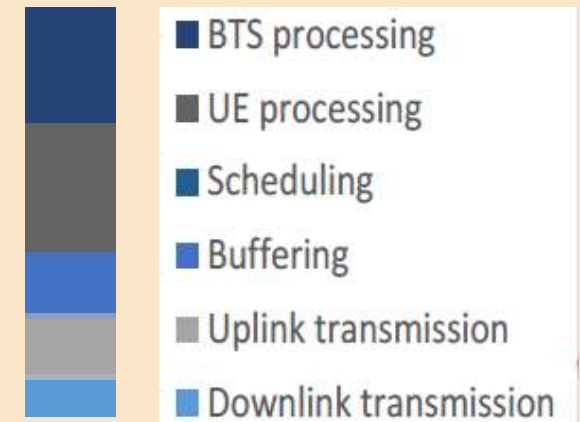
[1] Nomor Research: 5G Frame Structure, Munich August 2017

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

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



PHY Latency Component

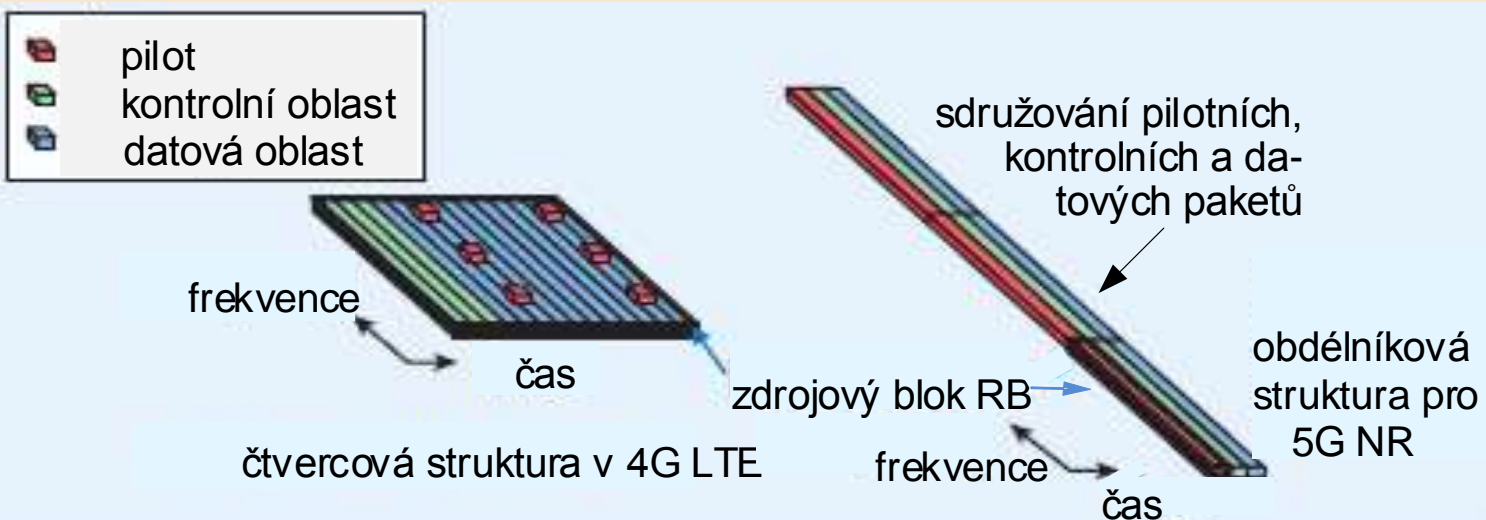
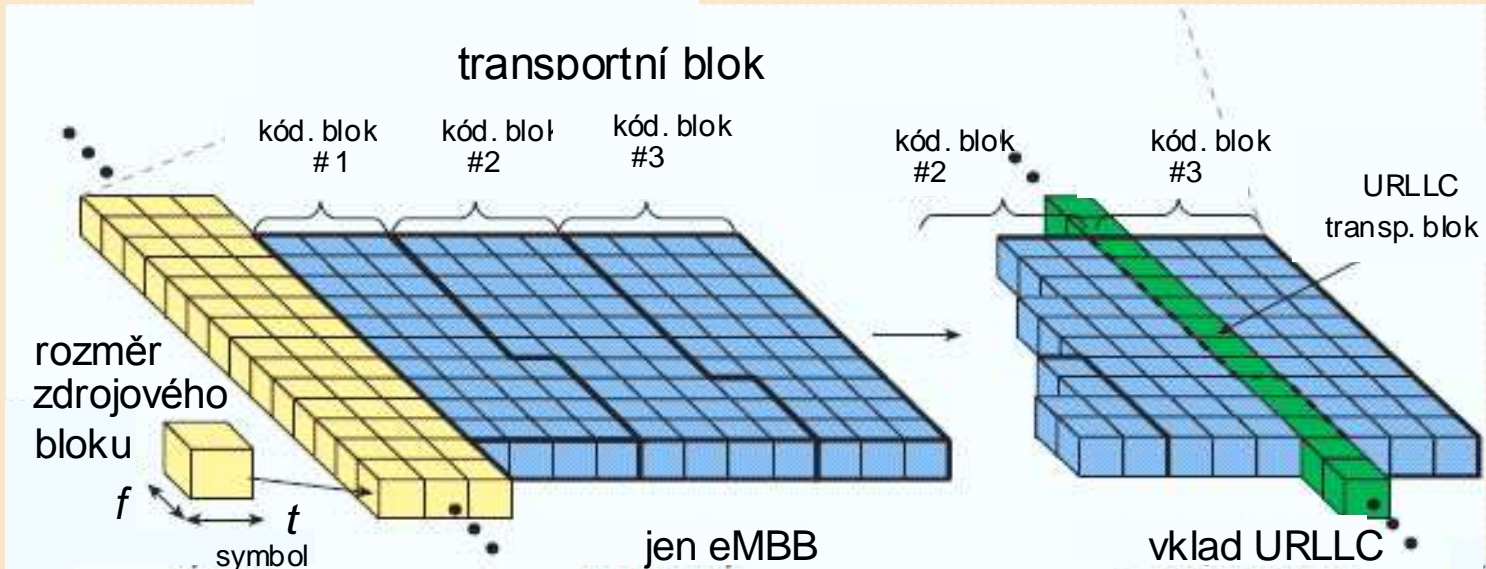


Celková latence T_{Radio} v přístupové síti RAN (fyzické vrstvě PHY) má následujících pět složek:

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

- 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



Děkuji za pozornost!

Václav Žalud