

# Revoluce ve vývoji systémů mobilní komunikace: 5G

Článek popisuje síť mobilní komunikace od počátků až po současný stav a naznačuje vývoj směrem k sítím 5. generace. The article describes mobile communication networks from beginning to present days and indicates trends towards the 5G mobile networks.

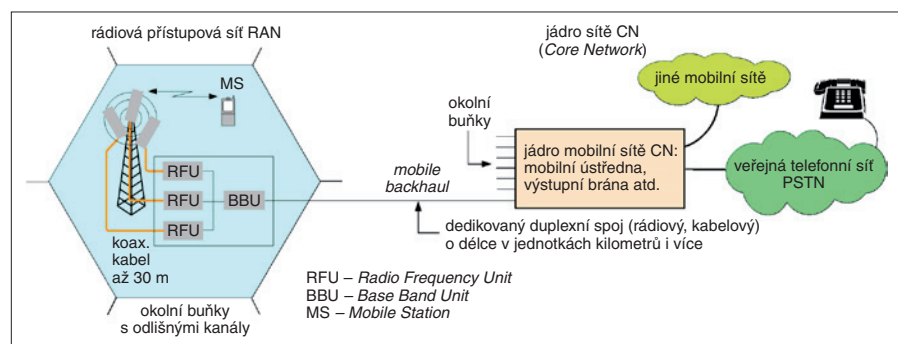
Již od počátků rádiové komunikace se objevovaly pokusy realizovat zařízení pro osobní rádiovou komunikaci. Tyto snahy však začaly dostávat legislativní rámec až po druhé světové válce, kdy se např. v USA objevily jednoduché rádiové stanice (*walkie-talkie*), které toto spojení umožňovaly. V následujících le-

terech (4G). Vývoj rádiových komunikačních sítí 3G a 4G je stimulován hlavně požadavky na přenos jakostního obrazu a na rychlé datové služby spojené s internetem.

Přestože uplatnění sítí předchozích generací ještě ani zdaleka nekončí, světové průmyslové a akademické výzkumné ústavy a také standardizační instituce zaměřené na legislativní otázky se již intenzivně zajímají o síť 5. generace (5G). I přesto, že požadavky na klasické, zejména hlasové radiokomunikační služby budou stále aktuální a jejich rozšiřování bude hlavně v rozvojových zemích pokračovat, dostávají se u sítí 5. generace do popředí také otázky nových provozních módů

výchozímu vývojovému stupni z 80. let minulého století. Obsluhované území (stát, kontinent apod.) je zde rozděleno na pomyslné šestiúhelníkové makrobuňky o rozměrech řádu jednotek kilometrů i více. Každá z nich má svoji jedinou základnovou stanici BS (*Base Station*), v níž se nachází několik mnohokanálových rádiových jednotek RFU (*Radio Frequency Unit*), obsahujících několik dílčích vysílačů a přijímačů. Zde je umístěna také jejich společná jednotka pro zpracování signálu v základním pásma BBU (*Base Band Unit*). Jednotky RFU a BBU jsou uloženy ve společně klimatizované kabině a koaxiálním kabelem spojeny s anténou, obvykle situovanou na přílehlém vysokém stožáru nebo na jiném vyvýšeném místě. Stanice BS vytvářejí rádiovou přístupovou síť RAN (*Radio Access Network*), umožňující spojení s uživatelskými mobilními stanicemi MS (*Mobile Stations*), označovanými také jako terminály anebo hovorově mobily. Síť RAN je rovněž propojena soustavou dedikovaných spojů (*mobile backhaul*) s fixním jádrem sítě CN (*Core Network*). Tyto spoje bývají realizovány rádiovými mikrovlnnými linkami, jejich funkci mohou plnit i propůjčené veřejné telekomunikační sítě. Hlavní částí jádra CN je rádiové přepojovací centrum RSC (*Radio Switching Centrum*). To je v podstatě analogii telefonní ústředny v klasické kabelové telefonní síti, avšak s tím podstatným rozdílem, že musí propojovat nejen stacionární, ale i mobilní uživatele sítě. Jádro sítě CN zabezpečuje provoz obvykle několika desítek až stovek základnových stanic BS. Realizuje vzájemnou komunikaci uživatelů dané mobilní sítě a díky propojení s veřejnou telefonní sítí PSTN (*Public Switching Telecommunication Network*) a popř. i dalšími externími sítěmi mohou uživatelé komunikovat také s vnějším světem. Aby se spolu sousedící buňky vzájemně nerušily, nesměly v této výchozí konfiguraci využívat stejné frekvenční kanály. Soubor kanálů přidělený určité buňce se však mohl opakovat v buňkách dostatečně od ní vzdálených, a to minimálně asi o dvojnásobek jejich poloměru.

Původní síť obsahovala ze začátku pouze velké makrobuňky o zhruba stejných rozměrech, a proto byla označována jako homogenní. Každá rádiová stanice BS zde disponovala stejným počtem rádiových kanálů, a mohla tedy obsluhovat stejný počet účastníků nacházejících se v její buňce. Počet zájemců o mobilní provoz se však již od počátků této techniky začal velmi rychle a navíc prostorově nerovnoměrně zvětšovat, a to zejména v centrech měst, supermarketech apod. Tam byla síť přetížena a vlivem toho se zhoršovala kvalita spojení. Významné zlepšení situace přináší moderní heterogenní síť HetNet (*Hetero-*



Obr. 1. Původní homogenní buňková síť s velkými makrobuňkami; elektronika základnové stanice BS (RFU, BBU) je umístěna ve skřínce u paty anténního stožáru

tech počet zájemců o osobní pozemní mobilní komunikaci přístupnou široké veřejnosti postupně narůstal. Díky současně probíhajícímu prudkému vývoji techniky – zejména monolitických integrovaných obvodů – bylo okolo roku 1980 možné uvést v USA do života první veřejný pozemní mobilní komunikační systém. Ten měl tzv. buňkovou strukturu (objevenou již v roce 1946), která mohla zajistit dostupnost individuálního rádiového spojení v podstatě na libovolně velkém území a pro neomezený počet uživatelů. A to vše při velmi efektivním využití kmitočtového prostoru, který se postupně stával „nedostatkovým“ zbožím. Tehdejší analogová první generace (1G) mobilních systémů byla určena jen pro přenos hlasu. Na počátku 90. let však přišla do provozu druhá, již digitální generace (2G), a to nejprve v podobě evropského systému GSM (*Global System for Mobile Communications*) a záhy nato i podobných systémů v USA a dalších částech světa. Ty kromě hlasové komunikace mohly přenášet i krátké textové zprávy SMS (*Short Message Services*). Po roce 2000 vešel do života systém 3. generace (3G) s označením HSPA (*High Speed Packet Access*), jehož používání nyní kulminuje. A v současné době je již naplno budován také globální systém LTE (*Long Term Evolution*), náležející do 4. gene-

a dalších náročných datových služeb. Velmi aktuální je zejména automatická „strojová“ komunikace M2M (*Machine-To-Machine*) mezi neživými objekty, která se uplatní v chytrých silnoproudých sítích (*smart grids*), chytrých domech a městech (*smart homes and cities*), v elektronickém zdravotnictví (*e-health*) apod. Uvedené aplikace kladou na koncepci systémů 5G značně různorodé požadavky, které může efektivně splnit jedině důkladná inovace dosavadní architektury systému a zavedení nových technických zařízení. S ohledem na všeobecnou energetickou krizi by měla nová koncepce vést k vyšší energetické účinnosti EE (*Energy Efficiency*) a s ohledem na rostoucí nedostatek kmitočtového spektra také k vyšší spektrální účinnosti SE (*Spectral Efficiency*). V úlohách kritických na zpoždění, jako jsou např. videokonference, rádiové systémy pro dálkové řízení (*remote control*) apod., by mělo být zajištěno také co nejmenší zpoždění (*latence*) přenosu. Naznačme dále, jakými cestami bude těchto náročných cílů dosahováno.

## Vývoj architektury buňkových radiokomunikačních sítí

Na obr. 1 je zjednodušeně zobrazena část buňkové (celulární) sítě, odpovídající jejímu

genous Network), které se začaly objevovat po roce 2000. Ty jsou vytvářeny postupným doplňováním základní struktury makrobuňek mnohem menšími piko-, popř. femtobuňkami o velikostech řádu jen desítek metrů. Jejich základové stanice BS však disponují zhruba stejným počtem kanálů jako původní velké buňky, takže výrazně zvyšují provozní kapacitu sítě. Tyto malé buňky se umísťují do lokalit s předpokládaným intenzivním provozem (centra měst, univerzitní kampu-

a nízkou latencí přenosu, však úspěšně zvládnají např. optické sítě DROF (*Digital Radio over Fiber*), které jsou schopny přenášet přímo rádiové signály s digitálními modulacemi. Tento nový segment v RAN je označován anglickým termínem *mobile fronthaul*. Centrální kabinety CO, v nichž jsou umístěny jednotky BBU, jsou z důvodů kooperace rovněž vzájemně propojeny a podobně jako u homogenní sítě z obr. 1 napojeny na jádro dané mobilní sítě CN.

využívány radioreléové spoje nebo jiné propůjčené veřejné komunikační sítě.

Všechny tyto techniky kromě výrazného navýšení spektrální a energetické účinnosti celé přístupové sítě také usnadňují její inovaci, zejména rychlou adaptaci na různé nové metody přenosu. V důsledku uvedených atributů klesají pořizovací i provozní náklady.

## Pokrokové metody komunikace připravované pro sítě 5. generace

Sítě 5. generace (5G) budou využívat nejen novou architekturu C-RAN, ale i mnoho dalších, zcela nových metod zpracování signálu. Pro ilustraci uvedme alespoň některé nejzajímavější z nich.

### Rozšíření frekvenčního pásma

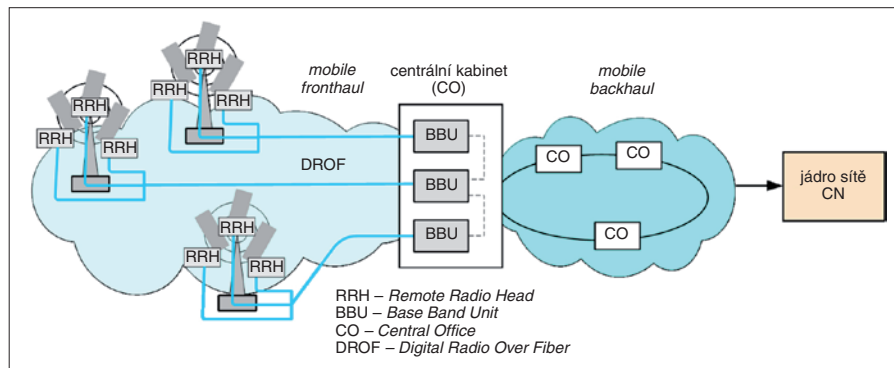
Splnění velkých požadavků na kapacitu systému 5G bude vyžadovat mnohem širší frekvenční prostor. Ten lze získat osvojením nových frekvenčních pásem uvolněných televizí v důsledku její digitalizace („digitální dividenda“) a také systematickým pronikáním do nových, zatím nevyužívaných milimetrových vlnových délek (tj. frekvencí nad 30 GHz).

### Zvýšení spektrální účinnosti

V sítích předchozích generací se již začaly prosazovat techniky několika antén ve vysílání i v přijímání – MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), zvyšující spektrální účinnost rádiového přenosu. Například jejich zatím nejdokonalejší verze 8x8 MIMO, jež je specifikována v systému LTE-A, může

zvýšit datovou rychlost jediného terminálu v porovnání s klasickým systémem s jedinou vysílací a jedinou přijímací anténou SISO (*Single Input Single Output*) až osmkrát, přičemž není nutné zvětšovat vysílací výkon nebo šířku pásma (v porovnání se SISO). V systému 5G bude technika MIMO dále zlepšována. Počet antén na miniaturním mobilním terminálu sice zůstane malý, avšak počet antén na základnové stanici bude běžně dosahovat několika stovek (obecně bude větší než asi desetinásobek počtu mobilních terminálů v dané buňce).

Tento systém, označovaný jako velmi velké MIMO (VLM, tj. *Very Large MIMO*) nebo také masivní MIMO, umožní vysílat data od základnové stanice k velkému počtu mobilních terminálů ve společné nezářezané časově-frekvenční doméně, tj. paralelně v čase a v nezářezaném pásmu (obr. 3). Velký po-

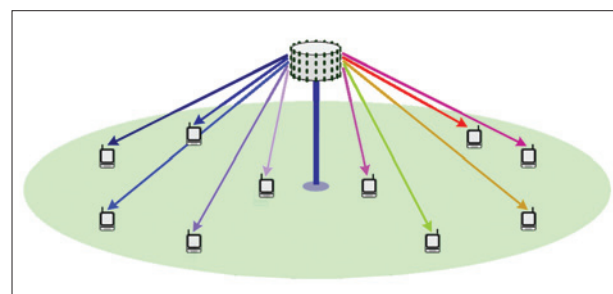


Obr. 2. Moderní rádiová přístupová síť C-RAN s velkým počtem rozptýlených rádiových hlav RRH, které jsou spojeny optickou distribuční sítí DROF (fronthaul) s jednotkami BBU, koncentrovanými do kabinetů CO; ty jsou potom napojeny na jádro sítě CN

sy, letiště apod.), který zvládají lépe než velké makrobuňky. Vysílače v malých buňkách vystačí s menším dosahem, a tedy i s menšími výkony, což vede za jinak stejných podmínek i ke značným úsporám energie v jejich provozu. U malých buněk ale roste nebezpečí vzájemných „mezibuňkových“ interferencí, které je nutné řešit koordinací činnosti jejich základnových stanic.

Buňkové struktury je možné dále zdokonalit prostorovým oddělením obou bloků základnové stanice BS, které je naznačeno na obr. 2. Oddělení spočívá v tom, že rádiové jednotky RFU se přesunou těsně k anténě (na vrchol stožáru apod.), čímž se eliminují citelné ztráty ve spojovacích kabelech; tyto separované jednotky jsou označovány jako vzdálené rádiové hlavice RRH (*Remote Radio Head*). Jednotka základního pásma BBU proto může zůstat v původní kabině těsně vedle stožáru. Výhodnější však je její přemístění do společného centrálního kabinetu CO BBU (*Central Office BBU* neboli *BBU pool*), v němž jsou potom umístěny také jednotky BBU mnoha dalších okolních buněk příslušejících jedinému svazku. Touto koncentrací se sníží náklady na energii na provoz celé přístupové sítě. Kromě toho se značně usnadní vzájemné propojení jednotek BBU a tím i jejich koordinovaná činnost. Ta pak umožňuje účinně potlačit interference mezi buňkami, což se přímo promítá do zvýšení spektrální účinnosti systému (úspor nedostatkového kmitočtového prostoru). Centralizované jednotky BBU jsou potom ovšem vzdálené od svých rádiových jednotek RRH až na několik desítek kilometrů. Jejich vzájemné náročné propojení, vyžadující značnou šířku pásma

Popsanou koncepci heterogenní rádiové přístupové sítě RAN je možné dále ještě zdokonalit využitím nových cloudových technologií. Operátor potom využívá k plnění potřebných funkcí místo dedikovaného fixního hardwaru komerční servery v datových centrech, k nimž se připojuje prostřednictvím internetu. Všemí těmito úpravami vzniká síť C-RAN, znázorněná na obr. 2, která v součas-



Obr. 3. Zjednodušené schéma systému MU-MIMO: základnová stanice má stovky antén, které koncentrují vysílanou energii do mimořádně úzkých svazků (beamforming) individuálně zaměřených na jednotlivé MS, čímž se výrazně zvýší energetická účinnost sítě; dílčí kanály ke stanicím MS jsou nekorelované, a proto mohou využívat stejné frekvenční pásmo, což vede ke zvýšení spektrální účinnosti sítě; desítky levných MS s jedinou anténou tvoří multiuživatelský systém MU-MIMO s výrazně lepší spektrální účinností, a tedy i propustností větší než MIMO; další zlepšení přinášejí MS s několika anténami, které jsou však dražší a energeticky náročnější

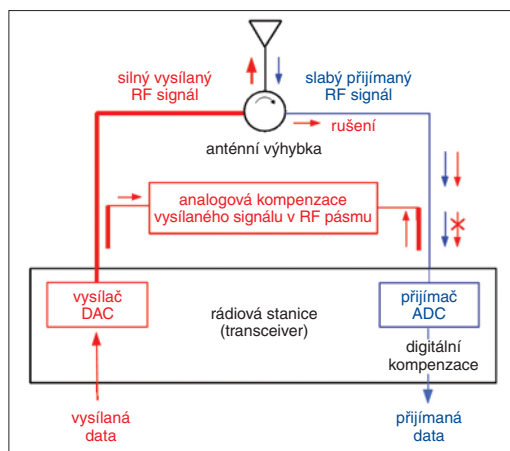
né době představuje nejmodernější koncepci přístupových sítí. Písmeno C je zde interpretováno nejen anglickým termínem *cloud*, ale také termíny *centralized processing*, *collaborative radio* a také *clean* (tj. s malým vlivem na životní prostředí). Ke spojení mezi centrálními kabinety CO a jádrem sítě CN jsou

čet antén v základnové stanici navíc dovládí směrovat signály k jednotlivým terminálům MS v ostrých anténních svazcích, což povede k dalšímu nárůstu energetické účinnosti systému a také k výraznému zmenšení interferencí jak se sousedními směrovými svazky, tak se svazky jiných buněk.

### Plně duplexní provoz v jediném kanálu

U mobilních systémů je běžný duplexní provoz, umožňující každému účastníkovi současné vysílání a příjem. Ten se realizuje buď technikou frekvenčního duplexu FDD (*Frequency Division Duplex*), tj. ve dvou samostatných rádiových kanálech (na dvou nosných vlnách), nebo v jediném kanálu formou časového duplexu TDD (*Time Division Duplex*), tj. na jediném nosné vlně, avšak s časovým střídáním vysílání a příjmu. V obou případech duplexní provoz vyžaduje dvojnásobné pásmo v porovnání se simplexním, tj. prostým jednosměrným provozem. V posledních několika letech však byl vyvinut systém umožňující plně duplexní provoz v jediném kanálu a souběžně v čase. Jeho podstatu ukazuje obr. 4. Vlastní vysílaný signál vchá-

zí přes anténní výhybku do antény a je řádně vysílán. Avšak vlivem nedostatečné izolace této výhybky směřuje i na vstup přijímače, v němž by ale způsoboval neúnosné rušení



Obr. 4. Zjednodušená koncepce plně duplexní rádiové stanice pro současné vysílání a příjem (full duplex)

(interference). Proto je zde kompenzačním obvodem, ještě v analogové vysílané podobě, předběžně potlačován. Zbývající potřebné potlačení je realizováno po demodulaci již v digitálním traktu přijímače. Tento věrný plný duplex v porovnání s klasickými duplexy FDD a TDD zdvojnásobuje přenosovou

kapacitu celého systému. To potom má, spolu s technikou masivního MIMO, mimořádně příznivý vliv na zvyšování spektrální i energetické účinnosti celého systému.

### Závěr

Nástup sítí 5. generace bude představovat ve vývoji mobilní komunikace skutečně revoluční krok vpřed. Kromě generační inovace a rozšíření dosavadních personálních služeb obohatí sortiment úloh o rádiovou komunikaci strojového typu MTC (*Machine Type Communication*; M2M) a o přímou komunikaci D2D (*Device-To-Device*) mezi uživatelskými terminály. V současné době je již v celosvětovém měřítku v plném proudu studijní etapa zaměřená na zdokonalování dosavadních a vývoj zcela nových koncepcí systému a techniky vhodné pro síť 5. generace. Tento článek uvádí některé poznatky získané v této vývojové fázi, které je však nutné považovat pouze za určitá možná řešení aktuálních problémů sítí 5G. Jeho definitivní specifikace lze očekávat v období let 2016 až 2018, uvádění do života bude začínat okolo roku 2020.

doc. Ing. Václav Žalud, CSc.,  
katedra radioelektroniky  
FEL ČVUT v Praze

## CAN 2020 aneb o budoucnosti sběrnice CAN

Společnost CiA (CAN in Automation) oznámila, že uspořádá sérii seminářů zaměřených na budoucnost protokolu CAN FD – CAN 2020.

Protokol CAN byl navržen v roce 1986. A stačilo pouhých pět let, než se poprvé objevil v automobilovém průmyslu, tenkrát jako součást legendárního mercedesu třídy S, modelu W140. Očekává se, že v roce 2016 bude do provozu uvedeno 1,8 milionu uzlů s protokolem CAN. Lze tedy říci, že protokol ušel pěknou cestu. Nyní je ovšem čas zaměřit se na budoucnost, a to zejména proto, že je možné očekávat, že i nový protokol CAN FD brzy najde uplatnění v silničních vozidlech.

Protokol CAN FD byl poprvé oficiálně představen v roce 2012 na třinácté mezinárodní konferenci o sběrnici CAN na hradě Hambach u německého města Neustadt. Dů-

vodem vzniku CAN FD byl požadavek automobilového průmyslu na větší šířku pásma pro síť CAN. Od té doby vznikly komunikační procesory pro CAN FD a první automobil vybavený protokolem CAN FD by mohl na silnici vyjet již v roce 2019 či 2020. Protokol CAN FD by měl postupně nahradit klasické protokoly CAN. Stále však bude možné navázat na klasickou sběrnici s přenosovou rychlostí 1 Mb/s. Ovšem CAN FD nabízí delší rámce s užitečným zatížením až 64 bytů.

V první generaci bude CAN FD používat hvězdicovou či hybridní topologii s přenosovou rychlostí do 2 Mb/s. Předpokládá se, že po určité době bude možné v automobilech tuto rychlost navýšit až na 5 Mb/s s vyhrazenými kruhovými topologiemi. Pro ostatní uživatele tu bude jednodušší lineární topologie s velmi krátkými větvemi.

Společnost CiA se rozhodla v následujících letech pořádat sérii setkání za účelem bližšího seznámení se s protokolem CAN FD a jeho možným budoucím využitím. Účast na těchto setkáních bude pro členy sdružení zcela bez poplatku. Pro nečleny bude malé vstupné kompenzující výdaje (CiA je neziskové sdružení, a nepořádá tedy tato setkání za účelem výtěžku).

Program prvního setkání CAN 2020 bude pokrývat základní technické informace o protokolu CAN FD, dopady na protokoly vyšších vrstev, včetně CANopen a J1939, a bude se také zabývat problémy, které mohou potkat vývojáře komunikačních systémů při používání většího toku bitů. Setkání je určeno především pro „decision-makers“ v oblastech vývoje zařízení, technického marketingu a návrhu systémů.

(jč)

# AUTOMA

[www.automa.cz](http://www.automa.cz)  
váš průvodce světem automatizační techniky