

IT a anatomie firmy

(Mobilní nejen 5G síť)

(pracovní dokument)



Jan Hintner

VŠE Praha, 2024



Mapa dokumentu podle kapitol textu (s odkazy)

[2] Mobilní síť
[2.1.6] Jádro mobilních sítí 4G
[4] Jádro mobilních sítí 5G
[5] Zásadní technologie a trendy v 5G sítích

Obsah

1.	Úvod	5
2.	Mobilní síť	6
2.1	Rozvoj mobilních sítí	6
2.1.1	Mobilní síť první generace (1G).....	6
2.1.2	Druhá generace GSM (2G).....	6
2.1.3	Třetí generace (3G).....	6
2.1.4	Čtvrtá generace LTE (4G).....	6
2.1.5	Pátá generace (5G).....	7
2.1.6	Šestá generace (6G).....	9
2.2	Prvky telekomunikací	10
2.3	Struktury v mobilních sítích	10
2.4	Architektura mobilních sítí	12
2.4.1	RAN – Radio Acces Network.....	13
2.4.2	BTS, eNB, gNB – základnová stanice.....	14
2.4.3	UE – User equipment.....	14
2.5	Provozní 5G režimy mobilních sítí	14
2.6	Význam mobilních služeb v moderní společnosti	16
3.	EPC (Evolved Packet Core)	17
3.1	MME (Mobility Management Entity)	17
3.2	HSS (Home Subscriber Server)	18
3.3	P-GW (Packet Data Network Gateway) – síťová paketová brána	18
3.4	S-GW (Serving gateway) – obslužná brána	19
3.5	IMS (IP Multimedia Subsystem)	19
4.	Prvky jádra 5G – NR	20
4.1	AMF (Access and Mobility Management Function)	20
4.2	SMF (Session Management Function)	20
4.3	UPF (User Plane Function)	21
4.4	PCF (Policy Control Function)	21
4.5	UDM (Unified Data Management)	22
4.6	AUSF (Authentication Server Function)	24
4.7	NEF (Network Exposure Function)	24
4.8	NRF (Network Repository Function)	25
4.9	Přístup k síti a autentizace v mobilních sítích	25
4.10	Rozdíly mezi SIM a eSIM	26
5.	Zásadní technologie a trendy v 5G sítích	29
5.1	Masivní MIMO	29
5.2	Dual Connectivity	29
5.3	Network Slicing – síťové řezy	31

5.4	Milimetrové vlny	31
6.	Závěr	32
7.	Zdroje	33

1. Úvod

Modernizace síťové infrastruktury nás provází již mnoho dekad a je na ní závislý téměř každý obyvatel. Nejedná se už jen o moderní země, ale i většina rozvojových zemí je dnes na mobilních sítích závislá, stejně jako nejedno odvětví státních ekonomik.

Společnost se dostává do bodu, kdy bezdrátovými technologiemi je možné doručit ohromné množství dat s vysokou spolehlivostí rychleji a dnes již i levněji než budovat fyzickou infrastrukturu. K posunu došlo s příchodem 5G sítí. Píší v množném čísle, jelikož neexistuje jedna 5G síť, ale jedná se o kombinaci několika různých. Každá z nich má své výhody a nevýhody. V mobilním bezdrátovém světě už to nejsou jen miliardy provolaných minut a odeslaných SMS, ale tisíce terabytů přenesených dat proudících nevědomky kolem nás.

Zatímco v některých zemích se určitá úroveň 5G pomalu stává standardem a začíná se hovořit o nové generaci 6G, jsou stále země, kde chybí pokrytí jako takové a jsou mnohdy pokryty jen hlavní lokality signálem GSM neboli 2G. Na druhé straně jsou pak země, kde již došlo k vypnutí této technologie a pokrytí tímto signálem již neexistuje a je nahrazeno sítí 4G, která je zároveň známa pod pojmem LTE neboli Long Term Evolution. A také síť 5G známe jako NR neboli New Radio. Ve světě dochází k postupnému vypínání 3G a 2G. V České republice došlo k vypnutí 3G sítě už u všech operátorů, a to obnášelo mnohé změny i u kritických složek státu, jejichž zařízení využívala právě 3G síť, a tak zde byla nutnost výměny zařízení u mnoha obyvatel. Muselo dojít též k dalším rozsáhlým investicím, které otevřely cestu k uvolňování frekvencí pro využití 5G sítí.

Dokument se zabývá 5G sítí, která se v roce 2019 nacházela před vrcholem inovační křivky společnosti Gartner s předpokladem, že v roce 2025 kolem 50 % světových operátorů bude mít spuštěno 5G v komerčním provozu. (O'Neill, 2019). Na vývoj mělo dopad mnoho faktorů včetně koronavirové krize, která měla pozitivní efekt v uvolňování prostředků na rozvoj 5G infrastruktury. V mnoha zemích má rozhodující dopad na rozvoj 5G infrastruktury i regulátor, a to může být jedním z problémů v rozvoji. V České republice má tato pravidla pod kontrolou Český telekomunikační úřad, který zvolil specifický přístup, kdy frekvence vhodné pro 5G rozdělil mezi několik operátorů a pro využití v průmyslu 4.0 je nutné zažádat o pronájem vhodné frekvence jednoho z operátorů, případně se domluvit na celé komerční službě.

2. Mobilní síť

Tato kapitola vychází z rešerše existujících zdrojů. Kapitola stručně dokumentuje vývoj mobilních sítí a vysvětluje, čeho bylo v jednotlivých generacích dosaženo a kde se nacházíme dnes. Následně rozebírá prvky mobilních sítí.

2.1 Rozvoj mobilních sítí

V následující části je krátce obsažen rozvoj mobilních sítí. Mobilní síť se začaly vyvíjet v průběhu 20. století. V počátcích bylo velmi problematické především pokrytí, energetická náročnost a samozřejmě kapacita. To se postupně začalo měnit s příchodem buněčných – celulárních sítí

Celulární síť prochází vývojovými cykly, které běžně označujeme jako generace. V současné době probíhá postupné zavádění 5. generace do běžného provozu především v ekonomicky vyspělých oblastech. Standardem jsou dnes pro komerční účely především síť 4. generace známé jako 4G či LTE.

2.1.1 Mobilní síť první generace (1G)

První komerčně používanou 1G sítí byla NTT v Japonsku (1979), v Evropě pak NMT. Motorola DynaTAC byla jedním z prvních komerčně prodávaných mobilních telefonů. V různých zemích se také využívaly různé standardy. Využívaly pásma 800-900 MHz s přenosovou rychlostí 1,2, později až 6,4 kb/s.

2.1.2 Druhá generace GSM (2G)

2G bylo spuštěno ve Finsku v roce 1991 jako GSM. Přineslo SMS, MMS a masové rozšíření mobilních telefonů. Populární byly tlačítkové telefony Nokia, Motorola a Sony Ericsson. 2G využívá pásma 900, 1800, 1900 MHz, přenos dat je digitální a šifrovaný. Maximální rychlost byla 9,6 - 14,4 kb/s, s GPRS až 160 kb/s a EDGE kolem 500 kb/s. GPRS oddělilo datový a hlasový svět, umožnilo nepřetržité připojení k internetu. TDMA umožnilo sdílení frekvenčních kanálů více zařízeními.

V ČR Eurotel (dnes O2) spustil první GSM síť v roce 1996 následován RadioMobilem (dnes T-Mobile) v roce 1997. Nakonec vstoupil na trh Oskar (dnes Vodafone) v roce 2000.

2.1.3 Třetí generace (3G)

3G vzniklo kvůli pomalému přenosu dat na GSM. Založeno bylo na standardu IMT-2000 (ITU) a UMTS (3GPP). Přineslo WCDMA pro zvýšení kapacity a rychlosti. Počáteční rychlost byla 384 kb/s, později s HSDPA až 14,4 Mb/s a HSDPA+ až 84,4 Mb/s. Využívá různá frekvenční pásma (800, 850, 900, 1700, 1900, 2100 MHz). Klíčovými přínosy 3G byla kapacita ke stahování hudby, hraní online her a počátkům internetových televizí. Nyní je většinou již vypnuto kvůli nákladnosti, a především potřebě uvolnění pásem pro 4G a 5G. V ČR získal 3G licenci jako první Eurotel v roce 2002, komerční provoz spustil v roce 2005. T-Mobile a Vodafone následovaly v roce 2006.

2.1.4 Čtvrtá generace LTE (4G)

Velice aktuální je v současnosti síť 4. generace, na níž stojí dnešní 5G síť po celém světě. Příchod čtvrté generace mobilních sítí, běžně označované jako 4G, představoval významný exponenciální skok v evoluci mobilních komunikačních technologií. Převážně se síť 4G staly standardem ve většině světových regionů. Schopnosti, které tato generace nabídla, byly před dvěma desetiletími mimo běžnou představivost. Na rozdíl od svých předchůdců původně 4G síť nezahrnovaly hlasové služby jako

integrální součástí. Toto omezení bylo později řešeno zavedením technologie Voice over LTE známé jako VoLTE.

Pravým vyjádřením 4G je LTE-Advanced (LTE-A), které odpovídá standardům nastaveným 3GPP Release 10, formalizovaným v roce 2011. Zařízení plně podporující standard LTE-A začala na trh pronikat kolem roku 2013. Významný příspěvek k vývoji této generace učinil japonský operátor NTT Docomo, který se zapojil do vývojového procesu již od roku 2004 a hrál klíčovou roli ve specifikaci 3GPP. (Cox, 2014)

Mezi kritické požadavky pro 4G patřila architektura založená pouze na přepínání paketů, nízké latenci, vyšší kapacitě, zvýšené rychlosti, podpoře většího počtu uživatelů a dat na jednom rádiovém kanálu. Navíc byly zavedeny technologie jako Multiple Input Multiple Output (MIMO). Technologie MIMO umožňuje současné používání několika vysílačů, čímž zvyšuje rychlost, stabilitu a spolehlivost připojení.

S příchodem 4G se začaly vést diskuse, jaký dopad mohou mít mobilní sítě na různé sektory, a to proto, že telekomunikační průmysl zaznamenal paradigmatický posun s 4G, neboť umožnil zavedení služeb, které dříve nebyly kvůli technologickým omezením proveditelné. To zahrnuje široké přijetí streamování videí ve vysokém rozlišení, pokročilé mobilní hry a vylepšené podnikové aplikace transformující způsob, jakým firmy a jednotlivci komunikují a interagují.

Dále měla implementace 4G hluboký vliv na sociální dynamiku a ekonomický rozvoj. Umožnila větší přístupnost k informacím a službám, čímž snižovala digitální propast v mnoha regionech. Vylepšené připojení podporované sítěmi 4G usnadnilo zlepšení v oblastech, jako je vzdělávání na dálku, telemedicína a e-správa, což významně přispělo k pokroku společnosti.

V kontextu globálního připojení hraje síť 4G klíčovou roli při překlenování propastí mezi městskými a venkovskými oblastmi. Schopnost technologie poskytovat vysokorychlostní internet v odlehlých lokalitách byla nástrojem pro podporu inkluze a rovného přístupu k digitálním zdrojům. Tento aspekt 4G byl podstatný a v souladu s cíli udržitelného rozvoje (SDG) Organizace spojených národů, zejména v oblasti kvalitního vzdělávání (SDG 4), průmyslu, inovací a infrastruktury (SDG 9) a snižování nerovností (SDG 10). (2020 Mobile Industry Impact Report: Sustainable Development Goals , 2020)

S přechodem na pátou generaci mobilních sítí je nezbytné uznat zásadní roli, kterou 4G hrála při přípravě půdy pro tento další skok v telekomunikační technologii. Přechod na 5G, ačkoli staví na úspěších 4G, má za cíl odemknout ještě revolučnější možnosti zahrnující ultra-nízkou latenci, masivní propojení zařízení a potenciál podporovat nově vznikající technologie, jako je internet věcí (IoT), autonomní vozidla a pokročilé aplikace umělé inteligence.

Čtvrtá generace mobilních sítí nejenže zrevolucionizovala telekomunikační sektor, ale měla také dalekosáhlý dopad na sociální struktury, ekonomický rozvoj a globální připojení. Jak postupujeme k sofistikovanějším technologiím, je třeba si uvědomit, že zásadní oblast moderního technologického světa začala právě na základech položených sítěmi 4G.

2.1.5 Pátá generace (5G)

Pátá generace mobilních sítí, známá jako 5G, představuje nejnovější evoluci v oblasti telekomunikací a nabízí významné vylepšení oproti předchozí 4G technologii. Klíčovými charakteristikami 5G jsou extrémně nízká latence, vyšší rychlosti přenosu dat, zvýšená spolehlivost a schopnost podporovat masivní množství připojených zařízení současně. Tato generace je navržena tak, aby umožnila nové aplikace a služby, které nebyly s předchozími generacemi technologicky proveditelné.

Z hlediska technického vývoje byl 5G standardizován 3GPP v Release 15, který označoval 5G fáze 1 a následně v Release 16 a 17. Tyto standardy definují základní architekturu sítí 5G a postupně zahrnují

vylepšení, jako je podpora pro ultra-spolehlivou a nízkolatenční komunikaci (uRLLC), vylepšenou mobilní širokopásmovou komunikaci (eMBB) a masivní komunikaci mezi stroji (mMTC). Tyto vlastnosti umožňují 5G síti podporovat širokou škálu aplikací od autonomních vozidel až po chytré městské infrastruktury a pokročilé průmyslové automatizace. V současné době je v běhu tvorba standardu Release 18 a zahájena příprava Release 19. V realitě se pak s prvky definovanými v jednotlivých standardech setkáváme o několik let později. Ačkoliv je tedy již v přípravě Release 19, v ekonomikách probíhá postupné nasazování technologií primárně představených v Release 15 a 16. Toto je spojeno s neexistujícím hardwarem podporujícím nové funkce a zároveň z životními cykly jednotlivých nasazených technologií, v souladu s investičním horizontem daných společností.

V České republice je rozvoj 5G sítí v plném proudu. Český telekomunikační úřad (ČTÚ) v roce 2020 provedl aukci kmitočtů pro 5G síť, ve které uspěli všichni tři hlavní mobilní operátoři v zemi – O2, T-Mobile a Vodafone. Operátoři se zavázali pokrýt 5G signálem minimálně 95% populace do roku 2024. Od té doby probíhá postupné budování 5G infrastruktury v různých částech země, počínaje velkými městy jako Praha, Brno a Ostrava. Zároveň se testují různé aplikace a služby založené na 5G, od průmyslové automatizace až po chytré městské projekty.

Ekonomický a sociální dopad 5G sítí je a bude značný. Síť 5G otevírá cestu pro digitalizaci celých průmyslových odvětví, zvyšuje produktivitu a efektivitu, a podporuje vznik nových obchodních modelů a služeb. V oblasti zdravotnictví například umožňuje rozvoj telemedicíny a vzdálených chirurgických zákroků. V dopravě podporuje rozvoj autonomních vozidel a inteligentních dopravních systémů, které mohou přispět k bezpečnější a efektivnější mobilitě.

S nástupem 5G sítí se otevírají nové možnosti pro internet věcí (IoT) a připojení nízkonákladových zařízení. RedCap (Reduced Capability) je novým standardem. Tento standard má přinést dostupnější IoT zařízení a zvýšit interoperabilitu. V současnosti mají IoT zařízení různé možnosti připojení, jako je WiFi, LPWAN, Bluetooth, LTE a 5G (Vance, 2023). Ačkoli se to může jevit jako výhoda a poskytovat výrobcům a zákazníkům široký výběr, realitou je, že roztržitý trh s nízkou interoperabilitou vede k pomalejšímu růstu, než se očekávalo. (Vance, 2023) RedCap by mohl začít tuto situaci měnit a sjednocovat IoT konektivitu v rámci 5G a 6G sítí.

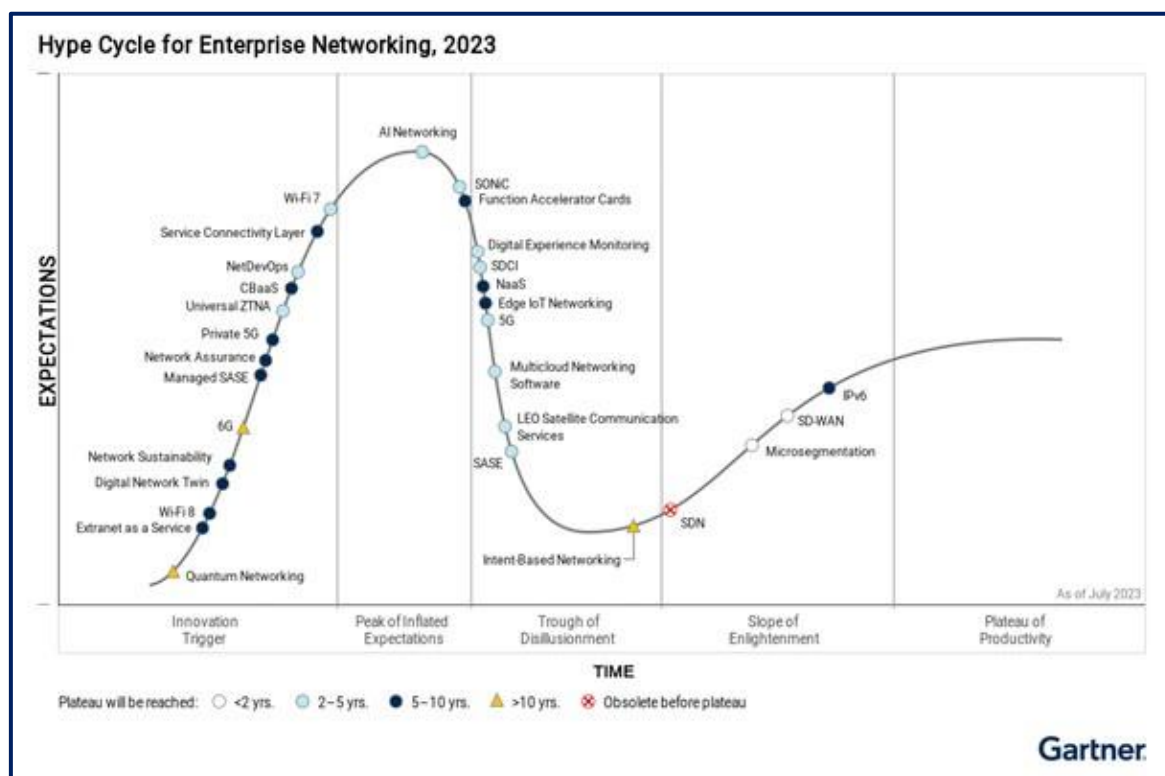
Z hlediska globálního připojení 5G přináší výzvy i příležitosti. I když 5G nabízí potenciál pro překlenutí digitální propasti, jeho nasazení vyžaduje značné investice do infrastruktury, což může být pro některé regiony obtížné. Současně však může 5G přispět k dosažení cílů udržitelného rozvoje (SDGs) tím, že umožní vzdálené vzdělávání, zlepšení zdravotnických služeb a efektivnější využívání zdrojů.

V kontextu přechodu na 5G je důležité zvážit interoperabilitu s existujícími 4G sítěmi a jinými technologiemi. Integrace 5G sítí s existujícími technologiemi a standardy je klíčová pro jejich plynulý vývoj a nasazení. Tento přechod také vyvolává otázky týkající se kybernetické bezpečnosti a ochrany soukromí, které vyžadují neustálou pozornost a inovace.

Pátá generace mobilních sítí (5G) představuje významný pokrok v telekomunikačních technologiích a má potenciál transformovat nejen telekomunikační průmysl, ale i širokou škálu dalších sektorů. Její úspěšná implementace a integrace do společnosti závisí na řešení technických, ekonomických a sociálních výzev, které s sebou přináší.

Společnost Gartner vydává graf nazvaný „Hype Cycle“ pro technologické inovace. Tento graf zahrnuje i specializovanou verzi zaměřenou na trendy v podnikových sítích. Graf sleduje vývoj a adaptaci technologií v průběhu času. Cykly začínají inovačním spouštěčem, následovaným vrcholem přehnaných očekávání dané technologie, poté klesá do oblasti rozčarování, následně se přesune na takzvaný svah osvětlení, a nakonec dosáhne přímky produktivity. Graf obsahuje i odhadovanou dobu, než se daná inovace dostane do přímky produktivity. Tento cyklus poskytuje vhled do situace, kde se aktuálně 5G síť nacházejí. Tento model pomáhá podnikům a investorům pochopit, kdy investovat do

technologií a kdy očekávat návratnost své investice. Hype Cycle společnosti Gartner je důležitým nástrojem pro navigaci v rychle se vyvíjejícím prostředí technologií všech technologických oblastí.



Obrázek 2-1 Hype Cycle 2023 (Zdroj: Gartner 2023)

Z uvedeného grafu je zřejmé, že technologie 5G aktuálně padají do oblasti rozčarování a jejich potenciál je globálně teprve před správným uchopením a realizací. Podle časového rámce Gartner by se na vrchol měly dostat během 2 až 5 let. Zároveň ale vidíme, že privátní 5G je teprve na počátku cyklu a do období produktivity se dostane dle odhadů během následujících 5-10 let. Vzhledem k tomu, že privátní sítě jsou primárně to, kde se projeví zásadní změny, které 5G sítě přinášejí, potvrzuje to fakt, že jsme na počátku skutečného rozvoje 5G.

2.1.6 Šestá generace (6G)

Po páté generaci mobilních sítí, známé jako 5G, která přinesla revoluční změny v telekomunikacích, se nyní odborná veřejnost začíná obracet k dalšímu velkému skoku v evoluci mobilních technologií – šesté generaci, zkráceně 6G. Zatímco 5G definovalo novou éru s extrémně nízkou latencí, vyššími rychlostmi přenosu dat a schopností podporovat obrovské množství připojených zařízení, 6G slibuje, že tuto evoluci posune ještě dále, otevře dveře dosud nepředstavitelným aplikacím a zcela transformuje způsob, jakým interagujeme s digitálním světem.

6G se předpokládá jako standard, který překročí stávající omezení mobilních sítí tím, že značně zvýší rychlosti přenosu dat až na terahertzové (THz) frekvence, což umožní dosažení dosud nepředstavitelných rychlostí a minimální latence a je to opět exponenciální evoluční krok ve vývoji mobilních sítí. Díky těmto vlastnostem se 6G stane základem pro vysoce náročné aplikace, jako jsou autonomní vozidla, rozšířená realita a virtuální realita, které vyžadují okamžitou reakci v reálném čase a extrémně vysoké datové propustnosti.

Integrace umělé inteligence (AI) přímo do sítě 6G umožní dynamickou správu sítě, optimalizaci výkonu a personalizované služby na základě okamžitého zpracování velkého množství dat. Kvantové komunikace, jež se u 6G také zkoumají, by mohly nabídnout zcela novou úroveň zabezpečení dat.

Vývoj 6G je však spojen s řadou technických a infrastrukturních výzev, včetně potřeby vývoje nových materiálů pro antény a vysílače schopné pracovat na THz frekvencích, jakož i vyřešení otázek spojených s dosahem signálu a jeho propustností skrze materiály. Kromě toho, zabezpečení a soukromí v sítích 6G vyvolávají další otázky, zejména v kontextu rozsáhlejšího nasazení AI a kvantových technologií.

Přestože je předpokládané nasazení 6G technologie ještě vzdálené, její potenciální ekonomický a sociální dopad je enormní. 6G by mohlo radikálně změnit industriální sektory tím, že umožní plně automatizovanou výrobu, inteligentní logistiku a zemědělství, a také otevře nové možnosti v oblasti zdravotnictví, vzdělávání a inteligentních městských služeb.

Pro dosažení těchto cílů je nezbytná mezinárodní spolupráce v oblasti výzkumu a standardizace, stejně jako rozvoj nových regulačních rámců, které podpoří globální nasazení a interoperabilitu 6G sítí. Také je klíčové, aby byly zohledněny otázky spravedlivého přístupu a digitálního rozdělení, aby 6G technologie mohla přinést užitek co nejširšímu spektru společnosti.

Stejně jako u přechodu z 4G na 5G, tak i u přechodu na 6G bude nezbytné soustředit se na interoperabilitu a plynulou integraci s existujícími technologiemi. Zatímco 5G již mění telekomunikační průmysl a otevírá dveře novým možnostem, 6G slibuje, že tyto možnosti posune ještě dál. Vývoj 6G tedy stojí na ramenou gigantů, kteří představují předchozí generace mobilních sítí, a zároveň k nim přidává novou dimenzi možností, které mají potenciál zcela změnit naše chápání mobilních a bezdrátových komunikací.

2.2 Prvky telekomunikací

V navazující části rozebírám fungování celého systému mobilních komunikací. Mým cílem je zprostředkovat pochopení klíčových komponent, které tvoří páteř mobilních sítí.

Postupně se zaměřím na základní principy fungování mobilních sítí. Mobilní sítě se skládají z mnoha vzájemně propojených komponent, které zajišťují bezproblémovou komunikaci mezi mobilními zařízeními. Klíčovým konceptem je buněčná struktura, která rozděluje oblast pokrytí sítě na menší buňky. V každé buňce se nachází základnová stanice (BTS, eNB, gNB), která komunikuje s mobilními zařízeními v dané oblasti. Přenos signálu v mobilních sítích probíhá bezdrátově pomocí rádiových vln. Signál je předáván mezi BTS a mobilním zařízením, a dále mezi BTS a dalšími síťovými prvky až do cílové destinace.

Pro pochopení následující analýzy považuji za důležité a málokdy zmiňované samotné fungování jednotlivých prvků architektury současných mobilních sítí 4G a 5G, která se skládá z mnoha komponent, jež spolupracují na zajištění bezproblémové komunikace.

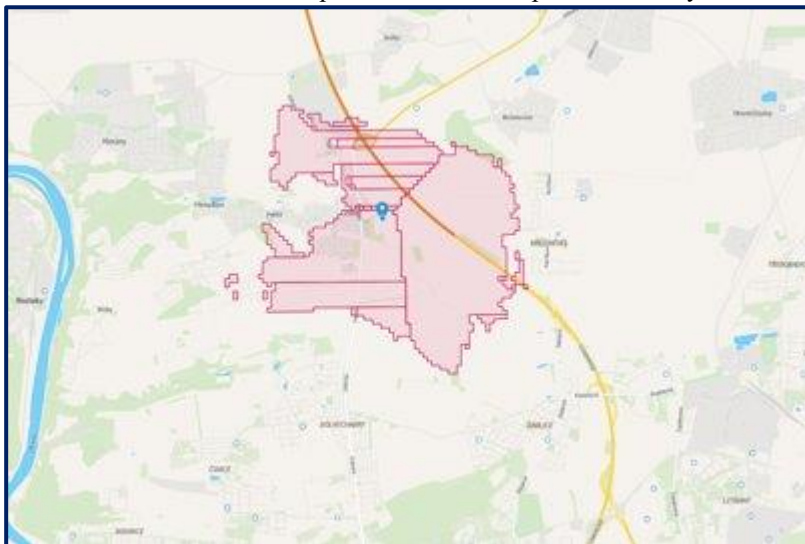
V kapitole se zaměřím na jednotlivé aspekty fungování mobilních sítí a poskytnu ucelený pohled na tuto klíčovou oblast moderní telekomunikace, abych je mohl dále rozšířit o technologické možnosti, které umožňují sítě páté generace. Na základě literární rešerše objasním, kde se tyto technologie nachází v současné době. A ty, u kterých to bude možné, budu ilustrovat na reálných praktických příkladech aplikovaných v České republice.

2.3 Struktury v mobilních sítích

Nejvyužívanějším konceptem je již zmíněná buněčná struktura. Buněčná struktura představuje základní koncept fungování moderních mobilních sítí. Oblast pokrytí sítě je rozdělena na menší oblasti, tzv.

buňky, které se typicky uspořádávají do šestihranného vzoru. Velikost buňky se liší v závislosti na požadované kapacitě a dostupných technologiích, pohybuje se v rozmezí od stovek metrů do desítek kilometrů. V každé buňce se nachází základnová stanice (BTS, eNB, gNB), která plní klíčovou roli v komunikaci s mobilními zařízeními v dané oblasti. Základnová stanice vysílá a přijímá signály na specifických frekvenčních pásmech, čímž zajišťuje přenos dat a hovorů mezi mobilními zařízeními a sítí.

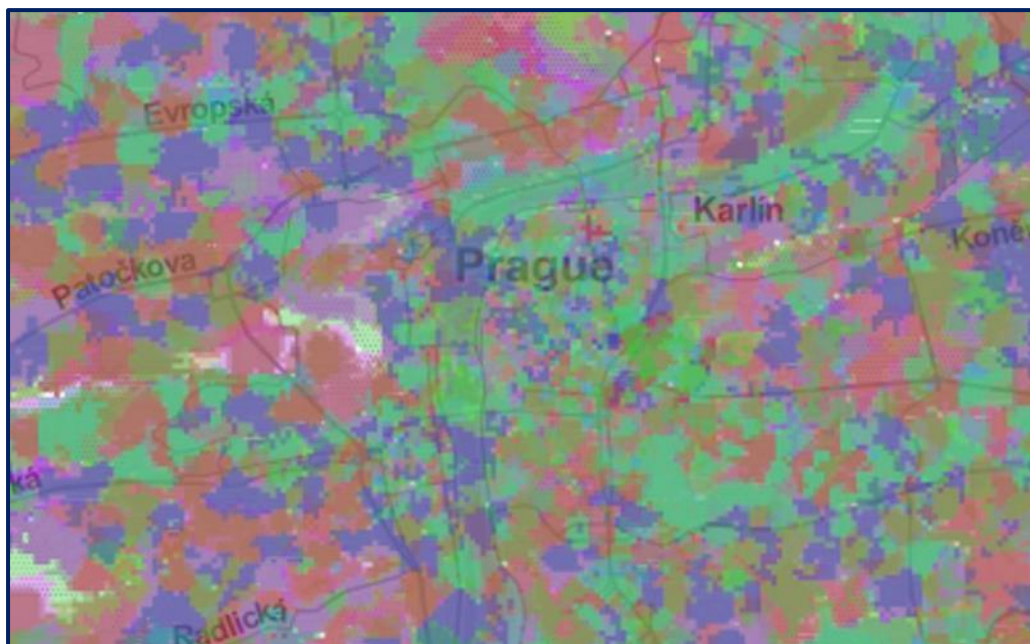
Přenos signálu mezi BTS a mobilním zařízením probíhá bezdrátově pomocí rádiových vln. Konkrétní frekvenční



Obrázek 2-2: Rozdělení na buňky (Zdroj: autor)

pásma se liší v závislosti na technologii a dostupnosti. Klíčovým aspektem buněčné struktury je předávání signálu. Pokud se mobilní zařízení pohybuje v rámci sítě, dochází k plynulému předávání signálu mezi BTS, čímž se zajišťuje bezproblémová komunikace bez přerušení hovoru nebo datového připojení.

Buněčná struktura umožňuje efektivní využití dostupných frekvenčních pásem, zvyšuje kapacitu sítě a zajišťuje optimální kvalitu signálu v oblastech s vysokou hustotou uživatelů. Díky své flexibilitě a škálovatelnosti se stala základem pro moderní mobilní sítě a vykořisťování poskytovanou širokou škálou služeb s vysokou kvalitou a dostupností. Tato struktura je využita v majoritě situací a danou formou je pokrýváno ve většině případů. (Wright, 2004)



Obrázek 2-3 Buněčná struktura základnových stanic v Praze (Zdroj: autor)

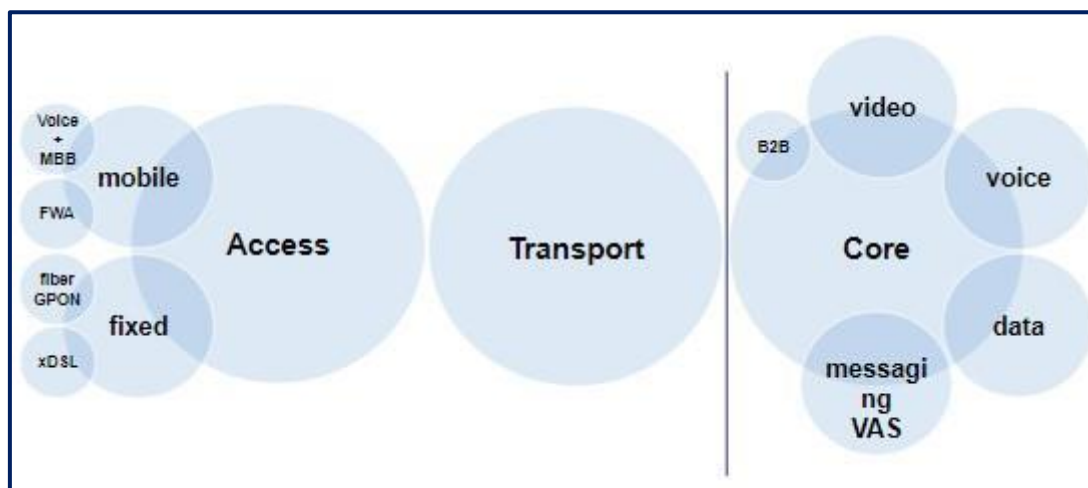
V terénech, kde hůře prostupuje signál a není možné využít buněčnou strukturu, se používá struktura přímého propojení bodů, nejčastěji se využívá pro pokrytí tunelů (například metro). Stanice jsou propojeny speciálním vyzařovacím kabelem, který vyzařuje signál po celé své délce. Pražské metro bylo kompletně pokryto v roce 2022 a Česká republika se v této oblasti, co se týče mobilních technologií, řadí na evropskou špičku. Využívaná je také často ve velkých objektech, jako jsou nákupní centra a další budovy, kde prostupnost signálu z venkovních BTS není dostačující. Zároveň často bývá kombinovaná s mesh strukturou sítě, kde vzájemně bezdrátově komunikuje mnoho zařízení a dál šíří signál. Mesh struktury jsou často použity v privátních mobilních sítích výrobních podniků.

Na popularitě a důležitosti získává v posledních letech bezbuněčný typ struktury mobilní sítě prostřednictvím satelitů, kde se satelity nachází v různých vzdálenostech a pokrývají povrch pomocí elektromagnetického vlnění. Pro mobilní signál bude využita orbita LEO (Low Earth Orbit) – nízká oběžná dráha, kdy se satelity pohybují ve výšce kolem 780 km nad zemí.

Cestou by mohly být právě drobné satelity, jaké využívá například společnost SpaceX k celkovému úspěchu, ale je potřeba vyřešit ještě mnoho problémů. (Leyva-Mayorga, 2020) Mnoho autorů se domnívá, že vzhledem k probíhající standardizaci a nasazování budou satelitní sítě doplňovat pozemní sítě 5G a vyšších generací. Aby byla komunikace prostřednictvím satelitů co nejefektivnější, měly by být použity techniky, které toho dosáhnou. Jednou z takových technik je Multi-Connectivity (MC), při které může být uživatel současně připojen k více gNB. (Majamaa, 2023) Zatím však tyto techniky nejsou v satelitním prostředí dobře prozkoumané, ale začínají se objevovat společnosti a země, které je testují a posouvají tyto trendy kupředu.

2.4 Architektura mobilních sítí

Kapitola se věnuje architektuře moderní mobilní sítě 5G a 4G. Představují prvky, které tyto sítě v základu tvoří a zabývá se tím, jak jsou dnes řešeny. Při spojení těchto prvků dohromady vzniká mobilní síť. Níže je schéma, které tuto architekturu zobrazuje. Postupně rozeberu jednotlivé části.



Obrázek 2-4: Schéma architektury sítě (Zdroj: autor)

Hlavními prvky jsou dvě části sítě, které můžeme dále rozdělit. První tvoří RAN, jež se stará o propojení mezi mobilními zařízeními a jádrem sítě. Ta se dále skládá ze dvou částí. Access neboli přístupová - tu tvoří jak samotná koncová zařízení zákazníků/uživatelu sítě, tak základnové stanice a jejich řadiče a ovladače. A transportní část sítě, která je přenosovou částí sítě a spojuje základnové stanice a jejich řadiče s jádrem sítě. Propojuje jádro a přístupovou síť mezi sebou navzájem typicky pomocí optických kabelů, mikrovlnných spojů, satelitních sítí, které přenáší informace mezi nimi. Druhá polovina sítě je pak jádro sítě, jež zpracovává data z RAN a obsahuje informace o uživateli a zařízeních.

2.4.1 RAN – Radio Acces Network

RAN představuje klíčovou část mobilní telekomunikační infrastruktury, která umožňuje mobilním zařízením připojení k síti a přenos dat. V nové generaci sítí se využívá RAN nazvaná NR-RAN. Je součástí 5G technologie, která přináší vylepšení ve srovnání s předchozími verzemi.

NR-RAN přináší řadu inovací oproti předchozím generacím, jako je využití milimetrových vln (mmWave), Massive MIMO antény nebo síťové virtualizace. MmWave frekvence umožňují extrémně vysoké přenosové rychlosti a kapacitu, ale vyžadují hustější síť buněk kvůli kratšímu dosahu. Massive MIMO zvyšuje spektrální efektivitu a umožňuje obsloužit více uživatelů současně pomocí prostorového multiplexování. Virtualizace RAN (vRAN) odděluje softwarové funkce od hardwaru a umožňuje flexibilní a škálovatelné nasazení pomocí standardních serverů. Dalším nastupujícím trendem bude integrace Multi-access Edge Computing (MEC), které přináší výpočetní a úložné kapacity blíže k uživatelům na hraně sítě pro aplikace s nízkou latencí. (Zhu, 2023) Probíhají výzkumy, jak bude možné toto využít v kombinaci s Massive MIMO. Je otázkou, jestli se potvrdí aplikovatelnost a v jakém horizontu se prosadí další rozvoj MEC.

5G RAN také podporuje techniky jako Network Slicing nebo Dual Connectivity (souběžné připojení k 4G a 5G), což jsou funkce, kterým se budu věnovat v dalších částech dokumentu. Pro plynulou migraci na novější technologie je nutné zajistit koexistenci se staršími technologiemi. S nastupujícím NR-RAN se stále používá E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), což je rádiová část sítě 4G LTE. E-UTRAN a NR-RAN tedy spolu koexistují, aby zajistily plynulý přechod mezi sítěmi a zachovaly kompatibilitu s existujícími zařízeními.

Zásadní začíná být otevřená rádiová přístupová síť OpenRAN nebo O-RAN, iniciativa řízená průmyslem. Využívá inteligentní kontroléry rádiové přístupové sítě (RAN) a otevřená rozhraní pro usnadnění efektivního sdílení spektra mezi LTE a NR RAN. (Gopal, 2024) Řešení podporující O-RAN postupně začínají implementovat i čeští operátoři, je to cesta k vyšší kontrole a kompatibilitě sítí bez nutnosti závislosti na jednotlivých dodavatelích.

2.4.2 BTS, eNB, gNB – základnová stanice

Základnová stanice (BTS) je klíčovým prvkem v mobilních sítích, který zajišťuje bezdrátovou komunikaci mezi mobilními zařízeními a infrastrukturou sítě. Základními komponentami BTS jsou vysílací a přijímací systémy (antény), transceivery pro modulaci a demodulaci signálů a duplexory pro sdílení antény. Typ antény a její parametry ovlivňují pokrytí, kapacitu a kvalitu signálu. BTS disponuje síťovým propojením, které zahrnuje platební spojení s centrální infrastrukturou sítě realizované optickým kabelem nebo mikrovlnným spojem. Kromě toho BTS komunikuje s centrálními síťovými prvky pomocí řídicích kanálů. (11)

V sítích se využívají různé typy BTS, jako jsou makrobuňky (velké buňky poskytující rozsáhlé pokrytí s větším dosahem, obvykle umístěné na stožárech a budovách), mikrobuňky (menší buňky s vyšší kapacitou poskytující pokrytí v hustě osídlených oblastech, obvykle umístěné na lampách a sloupech) a pikobuňky (lokální buňky s nejvyšší kapacitou poskytující pokrytí uvnitř budov), umožňují mobilním operátorům flexibilitu při navrhování sítě a pokrývání různých oblastí s odlišnými potřebami.

V sítích 4G-LTE se BTS označují jako eNB v 5G – gNB s tím, že 5G využívá nadále eNB stanice sítě 4G. V kontextu moderních sítí 5G hrají roli technologie v BTS, jako je již zmiňované MIMO, které využívá více antén pro vícenásobné vysílání a příjem signálů, a beamforming, jenž umožňuje zaměřit signál směrem k mobilním zařízením, přináší zvýšenou kapacitu a odolnost proti rušení. (What is eNB and gNB?, 2024)

V České republice naši tři mobilní operátoři mají aktuálně několik tisíc BTS. Společnost O2 disponuje kolem 6000 BTS, stejně tak společnost T-Mobile má podobný počet a společnost Vodafone kolem 4000 BTS základnových stanic.

2.4.3 UE – User equipment

UE je termín používaný v telekomunikačních sítích pro označení mobilních zařízení, která uživatelé používají k připojení a komunikaci v síti. Tato zařízení mohou být mobilní telefony, tablety, modemová zařízení pro připojení k notebooku, průmyslové stroje, senzory IoT nebo zařízení pro komunikaci mezi vozidly (V2X). UE funguje jako koncový bod v síti a umožňuje uživatelům využívat služby poskytované operátorem. Jsou vybaveny rádiovými moduly pro komunikaci s přístupovými body v síti a modulem pro SIM kartu fyzickou nebo eSIM. UE jsou navrženy s důrazem na mobilitu, energetickou účinnost a bezpečnost, disponují funkcemi pro šifrování dat a autentizaci uživatelů.

2.5 Provozní 5G režimy mobilních sítí.

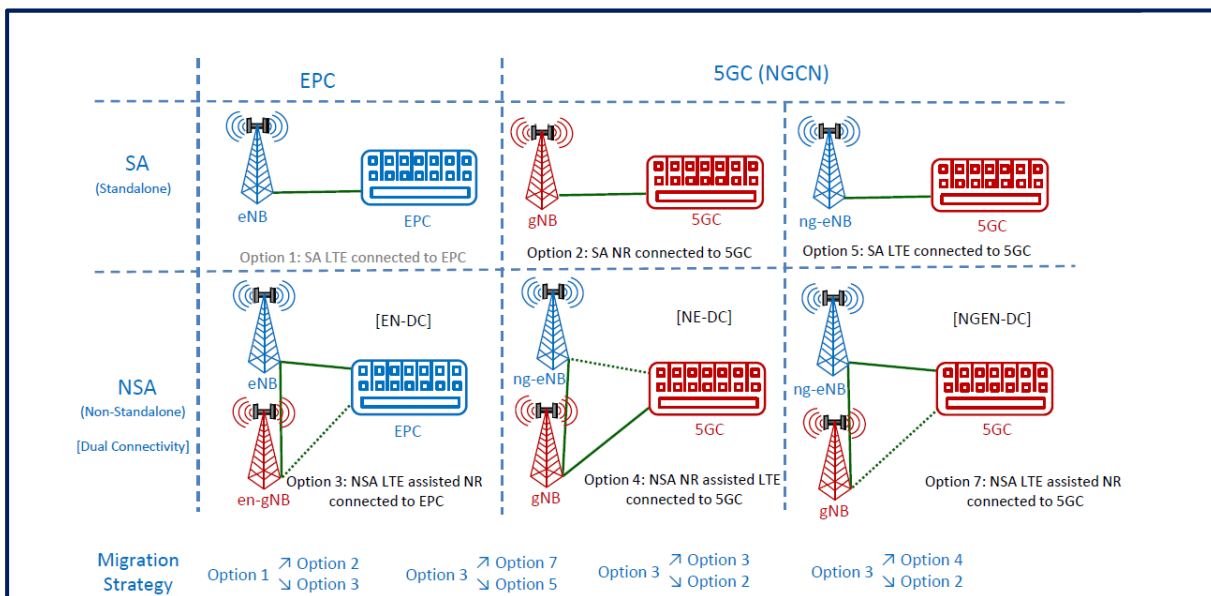
Architektura 5G sítě podporuje několik provozních režimů, které umožňují flexibilní a postupné nasazení nových technologií při zachování zpětné kompatibility s existujícími 4G LTE sítěmi. Mezi hlavní provozní režimy patří Standalone (SA), Non-Standalone (NSA).

V režimu SA jsou rádiová přístupová síť (RAN) i páteřní síť (5GC) založeny čistě na 5G technologiích a standardech. 5G zařízení se připojují k 5G základnovým stanicím (gNB) pomocí nových rádiových rozhraní NR (New Radio). Veškerý provoz a signalizace probíhá přes 5G komponenty, bez závislosti na LTE. Režim SA poskytuje plný potenciál 5G z hlediska výkonu, kapacity a nízké latence, ale vyžaduje úplné pokrytí 5G signálem a podporu 5G na straně koncových zařízení, která je v současné době

minimální. Režim SA představuje čistou 5G síť bez závislosti na starších technologiích. Poskytuje nejvyšší výkon, kapacitu a nejnižší latenci, což je klíčové pro nové pokročilé služby jako průmyslový IoT, autonomní vozidla nebo vzdálenou chirurgii. SA také umožňuje plné využití virtualizace a „softwarizace“ sítě pro flexibilní a efektivní správu zdrojů. Na druhou stranu vyžaduje SA kompletní upgrade infrastruktury i koncových zařízení, což je časově i finančně náročné. V současné době je pokrytí 5G sítěmi i penetrace 5G smartphonů a dalších zařízení velmi omezené, takže masové nasazení SA bude možné až v delším časovém horizontu.

Režim NSA kombinuje novou 5G rádiovou síť (NR) s páteří sítě EPC původně vyvinutou pro 4G LTE. Uživatelská zařízení se připojují duálně k 5G NR i LTE eNB a využívají 5G pro přenos uživatelských dat, zatímco signalizace a řídicí funkce jsou zajišťovány přes LTE. NSA umožňuje rychlejší a méně nákladné zavedení 5G služeb s využitím existující LTE infrastruktury. Nevyžaduje úplné pokrytí 5G a podporuje i starší 4G zařízení. Nabízí vyšší přenosové rychlosti a kapacitu než LTE, ale nedosahuje plného potenciálu 5G. Režim NSA kombinuje nový rádiový přístup 5G NR s existujícím jádrem LTE sítě. To umožňuje rychlejší a levnější zavádění 5G služeb v oblastech, kde již LTE funguje. NSA nabízí vyšší rychlosti a kapacitu než samotné LTE díky využití širších frekvenčních pásem a pokročilejších anténních technik. Zároveň podporuje i stávající 4G zařízení. NSA je proto vhodným řešením pro zvýšení kapacity a uživatelské zkušenosti v krátkodobém horizontu, zejména v hustě obydlených oblastech. Nevyžaduje dramatické změny architektury sítě a umožňuje postupnou migraci k 5G. Nevýhodou je, že NSA nenabízí nejpokročilejší funkce 5G vyžadující nové jádro sítě, jako síťové řezy či ultra nízkou latenci. (5G Implementation Guidelines, 2019)

Volba vhodného provozního režimu závisí na obchodní strategii operátora, dostupnosti spektra, nákladech a technologické připravenosti. Očekává se postupná evoluce od integrace s LTE přes NSA až k plně samostatným 5G sítím, tak jak poroste pokrytí a penetrace 5G zařízení. Koexistence a spolupráce různých režimů a generací mobilních sítí bude klíčová pro hladký přechod k 5G éře.



Obrázek 2-5 Provozní režimy moderních mobilních sítí (5G Deployment and Beyond, 2023)

V současné době se infrastruktura nejen v České republice, ale ve většině vyspělých ekonomikách, které budují 5G sítě, nachází ve variantě 3. Máme infrastrukturu 4G a jádro 4G, zároveň budujeme pokrytí 5G a tím škálujeme o něco možnosti 4G. Jak bude vypadat další krok nemohu zcela jistě určit, ale dle mé predikce se operátoři vydají variantou 7, která stále primárně využívá radiových prvků 4G sítě, ale již na 5G jádru, protože infrastruktura 4G v ČR je velmi dobrá.

2.6 Význam mobilních služeb v moderní společnosti

Před tím, než se budu věnovat další kapitole, chtěl bych shrnout, jaký dopad má zavedení mobilních sítí do každodenního života společnosti jednadvacátého století. Mobilní služby se staly nedílnou součástí moderní společnosti a zásadně změnily způsob, jakým lidé komunikují, pracují, vzdělávají se a tráví volný čas. S rozšířením chytrých telefonů a neustálým zlepšováním mobilních sítí se mobilní služby staly a stávají dostupnějšími a všudypřítomnými více než kdykoliv předtím.

Jedním z hlavních přínosů mobilních služeb je zlepšení komunikace. Hlasové hovory, textové zprávy a videohovory umožňují lidem zůstat ve spojení s rodinou, přáteli a kolegy bez ohledu na jejich geografickou polohu. Mobilní komunikace usnadňuje udržování vztahů na dálku, což je zvláště důležité v době globalizace a zvýšené mobility. Mobilní služby také transformovaly způsob, jakým lidé přistupují k informacím a využívají je. S mobilním internetem mají uživatelé okamžitý přístup k obrovskému množství informací, ať už se jedná o zprávy, vzdělávací materiály nebo zábavu. Tato dostupnost informací podporuje celoživotní vzdělávání, usnadňuje rozhodování a přispívá k informovanější společnosti.

V pracovním prostředí mobilní služby umožňují flexibilitu a produktivitu. Zaměstnanci mohou přistupovat k pracovním e-mailům, dokumentům a aplikacím ze svých mobilních zařízení, což jim umožňuje pracovat odkudkoli a kdykoli. Tato flexibilita podporuje rovnováhu mezi pracovním a soukromým životem a umožňuje vznik nových pracovních modelů, jako je práce na dálku a mobilní kanceláře.

Mobilní služby také přetvářejí způsob, jakým lidé nakupují a provádějí transakce. Mobilní platby a m-commerce umožňují uživatelům nakupovat zboží a služby přímo z jejich mobilních zařízení, což přináší pohodlí a úsporu času. Mobilní bankovníctví usnadňuje správu financí a provádění finančních transakcí odkudkoli, čímž podporuje finanční začlenění a přístup k finančním službám pro širší populaci.

V oblasti zdravotnictví mobilní služby umožňují telemedicínu a vzdálené monitorování pacientů. Pacienti mohou prostřednictvím mobilních aplikací komunikovat se zdravotnickými pracovníky, přistupovat ke svým zdravotním záznamům a přijímat personalizované zdravotní pokyny. Tyto služby zlepšují přístup ke zdravotní péči, zejména ve venkovských a nedostatečně obsluhovaných oblastech.

Mobilní služby také hrají důležitou roli v nouzových a krizových situacích. Mobilní sítě mohou šířit nouzová varování a informace, což pomáhá chránit veřejnost a koordinovat záchranné operace. Lokalizační služby mohou pomoci záchranářům najít osoby v nouzi a nasměrovat je na bezpečná místa.

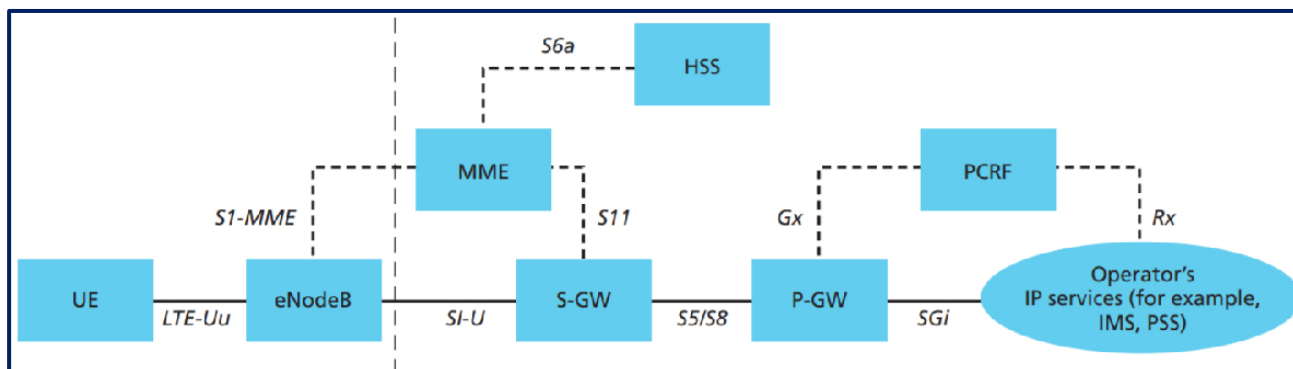
I přes mnoho výhod přinášejí mobilní služby také některé výzvy a obavy. Patří mezi ně otázky bezpečnosti a ochrany soukromí, jako je ochrana osobních údajů anebo rizika kybernetických útoků. Nadměrné používání mobilních zařízení může také vést k problémům, jako je závislost na digitálních technologiích, nedostatek osobní komunikace a možné zdravotní a sociální problémy.

Celkově však mobilní služby zásadně pozitivně ovlivnily moderní společnost. Zlepšily komunikaci, přístup k informacím, produktivitu, pohodlí a kvalitu života. S neustálým vývojem mobilních technologií a vznikem nových inovativních služeb bude význam mobilních služeb v našem každodenním životě i nadále růst. Společnost a jednotlivci se budou muset přizpůsobit a naučit se efektivně a zodpovědně využívat tyto služby, aby maximalizovali jejich přínosy a minimalizovali potenciální negativní dopady.

Zároveň začíná období, kdy mobilní sítě budou mít dopad nejen v interakcích uživatelů, ale také v různých aplikacích v podnicích s postupným příchodem a dostupností 5G sítí a privátních 5G sítí.

3. EPC (Evolved Packet Core)

EPC představuje novou generaci síťové architektury pro 4G mobilní síť. Nahrazuje tak starší systém MSC (Mobile Switching Center) a přináší řadu klíčových vylepšení. Hlavní předností EPC je jeho virtualizovaná a cloudově-nativní povaha. To umožňuje operátorům mobilních sítí flexibilně škálovat síťové kapacity dle aktuální poptávky a snižovat tak náklady na provoz. Zároveň se zvyšuje celková rychlost a výkon sítě, čímž se zlepšuje uživatelský komfort. Umožnilo také zavádění inovativních služeb, jako je VoLTE (Voice over LTE) a IoT.



Obrázek 6 Schéma architektury jádra LTE sítě. (Chan, 26)

Ve schématu výše jsou jednotlivé prvky jádra sítě 4G LTE, které obhospodařují jednotlivé kroky při interakci s UE, komunikace začíná u UE popsaného výše a následně přechází přes eNodeB tedy radiovou síť, do jednotlivých prvků EPC.

3.1 MME (Mobility Management Entity)

Mobility Management Entity je klíčovou komponentu zajišťující bezproblémovou mobilitu uživatelských zařízení v moderních mobilních sítích. MME plní komplexní roli řídicího elementu. Slouží jako vstupní brána do sítě a ověřuje identitu uživatelů a jejich oprávnění k přístupu k síťovým službám. Má v sobě implementace robustních bezpečnostních protokolů, a zajišťuje vysokou úroveň ochrany a integrity síťového prostředí. Podpora flexibilních mechanismů autorizace umožňuje diferencovaný přístup k službám na základě profilu uživatele a tarifního plánu. MME aktivně sleduje pohyb uživatelských zařízení v síti a v reálném čase aktualizuje jejich registrační informace. Sofistikované algoritmy pro predikci mobility optimalizují proces předávání hovorů a dat mezi buňkami, čímž se minimalizují výpadky a zaručuje se plynulý uživatelský komfort. Podpora vertikálního handoveru umožňuje bezproblémové přechody mezi technologiemi 4G a 5G, zajišťující optimální konektivitu v závislosti na dostupných síťových zdrojích. Funguje také jako informační centrum, které průběžně informuje uživatelská zařízení o relevantních síťových parametrech, jako je dostupnost služeb, kvalita signálu a parametry QoS. Zároveň v sobě uchovává profil z HSS a ověřuje totožnost uživatele. V MME probíhá neustálá dynamická výměna informací, která umožňuje optimalizaci síťového výkonu a zajišťuje optimální konfiguraci uživatelských zařízení pro dosažení nejlepšího možného uživatelského dojmu. (Erik Dahlman, 2014)

Architektura MME je navržena tak, aby byla škálovatelná a vysoce dostupná. Může být nasazena v redundantních párech nebo clusterech, aby se zajistila odolnost vůči chybám a nepřerušovaný provoz sítě. MME komunikuje s ostatními entitami sítě prostřednictvím standardizovaných rozhraní, jako jsou S1-MME (s eNodeB), S6a (s HSS), S11 (s S-GW) a S10 (s ostatními MME)

Hraje klíčovou roli v implementaci a monitorování QoS pro datové přenosy a hovory v síti. Sofistikované algoritmy pro rozdělování a prioritizaci síťových zdrojů zajišťují plynulý chod služeb s požadovanou úrovní kvality, i v případě přetížení sítě. Podpora diferencovaných QoS profilů umožňuje uspokojit

specifické požadavky uživatelů a aplikací, čímž se zajišťuje optimální alokace síťových kapacit. (Functions of main LTE packet core elements, 2012)

MME je tedy zásadní složkou architektury sítě 4G LTE, která umožňuje bezproblémovou mobilitu, správu relací a zajišťuje zabezpečené a efektivní fungování sítě.

3.2 HSS (Home Subscriber Server)

Home Subscriber Server je klíčová databázová entita v 5G síťové architektuře, která slouží jako centrální úložiště informací o užívatelích a jejich zařízeních. Poskytuje 5G síťovým funkcím, jako je MME a SMF, kritické informace pro autentizaci, autorizaci a správu uživatelských relací.

HSS uchovává profily uživatelů, které zahrnují:

- IMSI: Identifikátor účastníka mobilní sítě
- MSISDN: Telefonní číslo
- Klíče pro autentizaci a šifrování: Bezpečnostní parametry pro přístup k síti a ochranu dat
- Předplatné a služby: Informace o tarifu, aktivních službách a QoS parametrech
- Seznamy PDN: Povolené PDN (Packet Data Network) pro přístup k internetu
- Lokalizační informace: Poslední známá poloha zařízení

HSS má na starost ve 4G především řízení mobility. Sledování a aktualizace polohy uživatelů při přechodu mezi buňkami. Dále zajišťuje Autentizaci a autorizaci a v neposlední řadě slouží k ověřování identity uživatelů a jejich oprávnění k přístupu k síti a službám a také ke správě relací, jejich nastavení, udržování a ukončování.

HSS spravuje aktivní uživatele v síti, umožňuje jejich registraci a deregistraci. To zajišťuje, že síť má aktuální informace o všech připojených zařízeních a užívatelích. Aktualizace profilů uživatelů HSS umožňuje dynamickou změnu parametrů a nastavení uživatelských profilů. To zahrnuje například aktualizaci tarifu, preferencí služeb nebo kontaktních informací. (3GPP TS 23.003: "Numbering, Addressing and Identification", 2023)

HSS umožňuje izolaci a konfiguraci specifických síťových segmentů pro různé typy služeb. To umožňuje operátorům optimalizovat síťové zdroje pro specifické požadavky dané služby, jako je vysoká propustnost pro streamování videa nebo nízká latence pro kritické aplikace v reálném čase. Dále operátorům HSS poskytuje informace o užívatelích, které lze využít k optimalizaci a personalizaci služeb. Ti tak mohou nabízet uživatelům relevantní a užitečné služby, které odpovídají jejich individuálním potřebám a preferencím. Uchovává a spravuje důvěrné informace o užívatelích a zajišťuje jejich bezpečnost. To zahrnuje šifrování uživatelských dat, ochranu před neoprávněným přístupem a implementaci bezpečnostních protokolů pro autentizaci a autorizaci.

V propojení sítě 4G a 5G je HSS tak klíčovou součástí, která umožňuje efektivní správu uživatelů, síťových služeb a zajišťuje bezpečnost a ochranu soukromí v 4G a 5G prostředí. Je to komplexní komponenta s rozhraními pro komunikaci s MME, SMF, autentizačním centrem a dalšími síťovými prvky. (Sauter, 2017)

3.3 P-GW (Packet Data Network Gateway) – síťová paketová brána

Dalším klíčovým prvkem jádra mobilní sítě je v současné generaci sítí P-GW, který je ekvivalentem SGSN, který se používal v sítích do 3. generace. Packet Data Network Gateway (P-GW) je v mobilních sítích LTE a NSA 5G, prvkem, který zajišťuje datové služby pro UE. Tento síťový prvek slouží jako brána mezi mobilní sítí LTE/5G a externími datovými sítěmi, jako je internet nebo síť IP Multimedia Subsystem (IMS).

P-GW je zodpovědný za přidělování IP adres mobilním zařízením, směrování datového provozu mezi mobilní sítí a externími sítěmi a také za zajištění připojení k různým službám, včetně hlasových a video služeb. P-GW také provádí úlohy jako je účtování a omezování rychlosti přenosu dat, které jsou důležité pro správu a optimalizaci využití sítě. (P-GW Administration Guide, 2022)

3.4 S-GW (Serving gateway) – obslužná brána

S-GW dalším prvkem jádra 4G sítě, který slouží k propojení UE s internetovou sítí. Jeho hlavní funkcí je směrování datového provozu mezi UE a internetem, což umožňuje uživatelům přístup k různým službám a aplikacím. S-GW přebírá řízení a směrování datového provozu od BTS nebo jiných rádiových přístupových bodů a zajišťuje jeho přenos do internetové sítě pomocí veřejného nebo privátního IP sítě. To zahrnuje přenos datových toků, hlasových hovorů, multimediálních zpráv a dalších služeb. Další důležitou funkcí S-GW je správa mobility uživatelů. To znamená, že S-GW sleduje polohu UE a umožňuje jim plynulý přechod mezi různými rádiovými přístupovými body bez přerušení služeb. Toto je klíčové pro poskytování nepřetržitého mobilního připojení v pohybu. (The Serving Gateway (S-GW) is the user-plane node connecting the EPC to the LTE RAN., 2011)

S-GW rovněž vykonává různé funkce, jako je směrování, tunelování a zabezpečení datového provozu. To zahrnuje filtrování nežádoucího obsahu, šifrování a autentizaci uživatelů a kontrolu přístupu do sítě. A využívá se také například při zajišťování zákonných odposlechnů. (5G : What's the NRF ?, 2023)

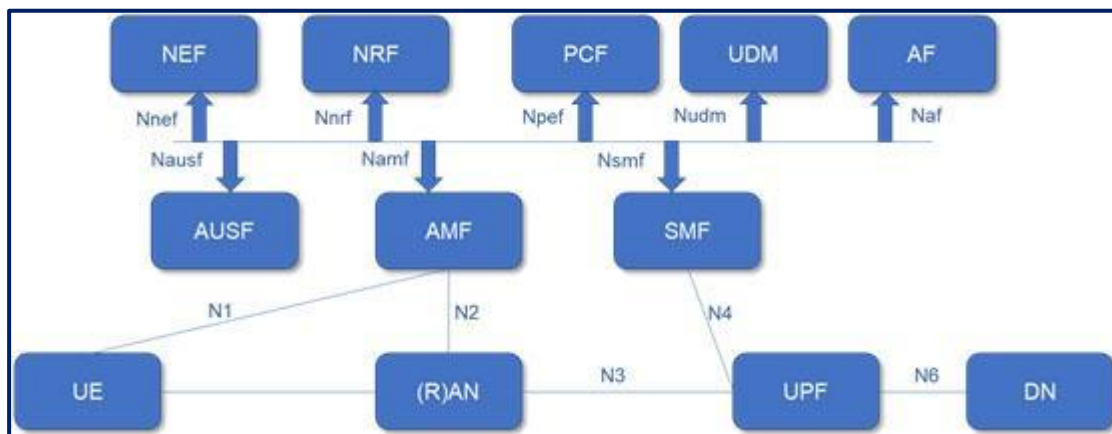
3.5 IMS (IP Multimedia Subsystem)

IMS, zkráceně IP Multimedia Subsystem, je architektura navržená pro poskytování multimediálních služeb v IP sítích, jako je například internet. Jedná se o standardizovaný systém, který umožňuje integraci různých typů služeb, včetně hlasových hovorů, videokonferencí, posílání zpráv a multimediálních aplikací.

Hlavním cílem IMS je umožnit poskytování těchto služeb prostřednictvím IP protokolu (Internet Protocol), což vede k efektivnímu využití síťových zdrojů a zlepšení kvality služeb. IMS poskytuje rozhraní pro integraci různých aplikací a zařízení, což umožňuje uživatelům komunikovat a sdílet obsah bez ohledu na typ zařízení nebo síťového prostředí.

Další důležitou funkcí IMS je podpora služeb přes různé typy sítí, včetně pevných i mobilních sítí. To umožňuje uživatelům přístup k službám a komunikaci s ostatními bez ohledu na jejich umístění nebo používanou síťovou technologii. IMS poskytuje základ pro hlasové volání přes LTE (VoLTE) – Voice over LTE VoWifi – Voice over Wifi, videohovory a další služby. IMS také komplementárně poskytuje funkce pro správu uživatelských identit a autentizaci, což zajišťuje bezpečný přístup do sítě a chrání uživatele před neoprávněným přístupem. (Jujjuru, 2008)

4. Prvky jádra 5G – NR



Obrázek 7 Schéma architektury jádra 5G sítě (Marcin Dryjanski, 2017)

V 5G architektuře se prvky rozšířili o další, které umožňují využívat inovací, které 5G síť přináší a zároveň prvky využívané v 4G síti se transformují do jiných, které zajišťují stejné funkce a něco navíc k zvýšení efektivity. U některých prvků zase došlo k rozdělení a jednotlivé úlohy obsluhuje několik samostatných prvků

4.1 AMF (Access and Mobility Management Function)

Access and Mobility Management Function je centrálním prvkem 5G jádra, který zodpovídá za řízení přístupu UE k síti a správu jejich mobility. Hlavním úkolem AMF je ověřování a autorizace UE při jejich připojení k síti. AMF komunikuje s Unified Data Management (UDM) databází, kde jsou uloženy informace o uživateli a jejich oprávněních. Po úspěšné autentizaci AMF povolí UE přístup k síťovým službám a přidělí mu dočasnou identitu (5G-GUTI). AMF také řídí mobilitu UE v rámci sítě, včetně handoverů mezi buňkami při pohybu uživatele. Při přechodu UE do nové oblasti AMF koordinuje předání kontextu s cílovou AMF a zajišťuje kontinuitu služeb.

Další funkcí AMF je spolupráce s SMF při ustanovení a řízení datových relací pro UE. AMF předává požadavky UE na datové služby a QoS do SMF a zajišťuje ustanovení odpovídajících síťových prostředků. V architektuře 5G jádra může existovat více instancí AMF pro zajištění vysoké dostupnosti, škálovatelnosti a rozdělení zátěže. AMF komunikuje s ostatními síťovými funkcemi přes standardizovaná rozhraní a protokoly jako HTTP/2 nebo gRPC. (3GPP Technical Specification: "System architecture for the 5G System (5GS)" (TS 23.501), 2023) Což je také jedná z velkých výhod 5G standardizace komunikace přes běžné protokoly nikoliv proprietární řešení.

AMF nahrazuje MME ze sítě 4G, poskytuje vylepšenou flexibilitu a škálovatelnost oproti MME, což umožňuje podporu nových služeb a použití v síti 5G. AMF také podporuje nové funkce, jako je network slicing, které umožňují operátorům sítě poskytnout vlastní virtuální síť pro různé druhy služeb a zařízení.

4.2 SMF (Session Management Function)

Session Management Function je klíčovou komponentou 5G jádra, která zodpovídá za správu datových relací a přidělování síťových prostředků pro jednotlivé služby. Když koncové zařízení UE požaduje datové připojení, zasílá žádost do AMF. AMF pak kontaktuje příslušnou SMF, která ustanoví datovou relaci a vyjedná parametry kvality služeb QoS s PCF. SMF alokuje UE dočasnou IP adresu a vytvoří

profil datového provozu, který definuje oprávněné služby, prioritu, garantovanou šířku pásma a další aspekty. Tyto informace pak předává do UPF, která zajišťuje vlastní přenos uživatelských dat. (Gaurav Gangwal, 2023)

SMF může pro jedno UE vytvořit více datových relací s různými parametry QoS, což umožňuje podporu různorodých služeb s odlišnými nároky na síťové prostředky. Příkladem může být požadavek na videohovor s nízkou latencí a stahování velkého souboru na pozadí. SMF také řídí ukončení datových relací a uvolnění přidělených prostředků. V průběhu relace může SMF dynamicky upravovat parametry QoS na základě aktuálního zatížení sítě nebo požadavků aplikací. Stejně jako ostatní funkce 5G jádra, i SMF podporuje virtualizaci a může být nasazena jako softwarová komponenta na standardních serverech, což zvyšuje flexibilitu a škálovatelnost celého systému. (Singh N. , What is the 5G Session Management Function (SMF)?, 2022)

4.3 UPF (User Plane Function)

User Plane Function je stěžejním prvkem datové roviny 5G sítě, který zajišťuje vlastní přenos a zpracování uživatelských dat. UPF představuje evoluci SAE Gateway (S-GW a P-GW) z předchozí generace mobilních sítí. Hlavním úkolem UPF je směrování a předávání datových paketů mezi koncovými zařízeními a externími datovými sítěmi, jako je internet nebo privátní IP síť. UPF přijímá pakety z Radio Access Network (RAN) a na základě instrukcí od SMF je směruje do příslušné cílové sítě nebo služby. UPF také aplikuje na datový provoz pravidla pro kvalitu služeb (QoS), jako je prioritizace citlivých aplikací, omezování rychlosti nebo tvarování provozu. Kromě toho může UPF provádět inspekci paketů pro účely účtování, legálního odposlechu nebo detekce bezpečnostních hrozeb. (What is the 5G User Plane Function (UPF)?, 2024)

Klíčovou inovací 5G UPF je možnost flexibilního nasazení ve formě distribuovaných "mini" UPF na okraji sítě v blízkosti uživatelů. Toto uspořádání, nazývané Multi-access Edge Computing (MEC) což je další z funkcí 5G které se budou později věnovat, umožňuje zpracovávat datový provoz lokálně s velmi nízkou latencí, což je kritické pro aplikace jako je autonomní řízení, průmyslová automatizace nebo rozšířená realita. Dalším benefitem je snížení zátěže na páteřní síť a efektivnější využití síťových zdrojů. UPF také hraje klíčovou roli v podpoře další již zmíněné funkce network slicing, kdy lze vytvářet izolované logické sítě s vyhrazenými prostředky pro konkrétní služby nebo zákazníky. Každý síťový řez může mít vlastní UPF s specifickou konfigurací a parametry QoS. 5G UPF je navržena jako plně virtualizovaná a softwarově definovaná komponenta, kterou lze snadno škálovat a integrovat do cloudového prostředí pomocí kontejnerů nebo virtuálních strojů. (Singh N. , What is the 5G User Plane Function (UPF)?, 2022)

4.4 PCF (Policy Control Function)

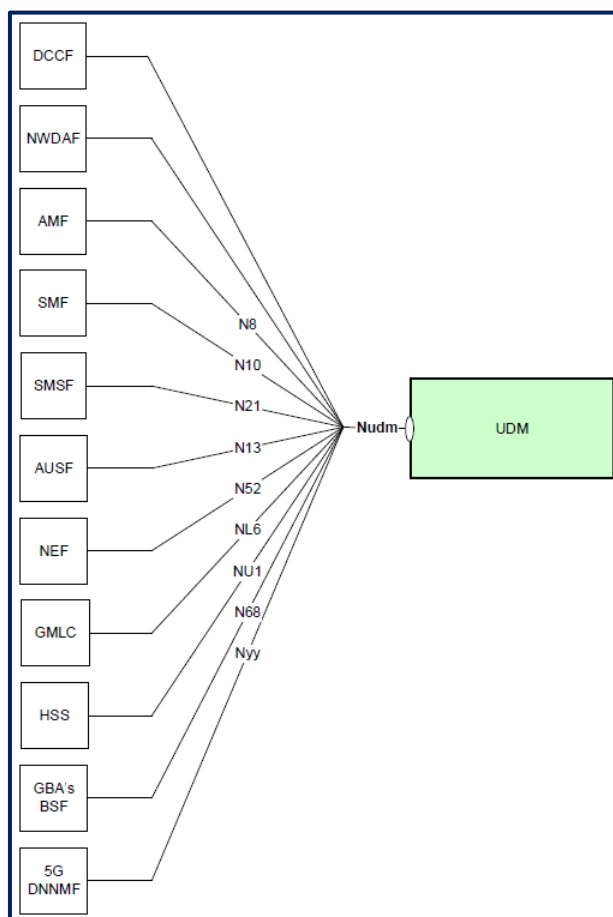
Policy Control Function je centrálním bodem 5G jádra pro správu a prosazování síťových politik a pravidel pro řízení datového provozu. PCF, jak již bylo zmíněno úzce spolupracuje s ostatními síťovými funkcemi, zejména s SMF a UPF, aby zajistila odpovídající zacházení s datovými toky podle definovaných kritérií. Hlavním úkolem PCF je rozhodovat o autorizaci a parametrech datových relací na základě uživatelských profilů, typu služby a aktuálního stavu sítě. PCF získává informace o uživateli a jejich oprávněních z UDM a na jejich základě vytváří sadu pravidel pro každou datovou relaci. Tato pravidla mohou zahrnovat limity přenosové rychlosti, prioritizaci určitých aplikací, účtování dat nebo omezení přístupu k některým službám. PCF předává tato pravidla do SMF, která je uplatňuje při ustanovení a řízení datových relací. PCF také dynamicky monitoruje stav sítě a zátěž jednotlivých síťových funkcí. V případě přetížení nebo nedostatku prostředků může PCF upravit pravidla tak, aby optimalizovala výkon sítě a zajistila dodržení SLA pro prioritní služby. PCF také umožňuje definovat rozdílné politiky pro jednotlivé síťové řezy v rámci network slicing. Každý řez může mít vlastní sadu pravidel a parametrů QoS v souladu s požadavky dané služby. Díky tomu lze na společné infrastruktuře

provozovat služby s různými charakteristikami, od nezaručeného (best-effort) přístupu k internetu po kritickou komunikaci s garantovanými parametry.

4.5 UDM (Unified Data Management)

Unified Data Management je centrální databázi 5G jádra, která uchovává informace o uživateli, jejich profilech, oprávněních a předplacených službách. UDM konsoliduje několik entit z předchozí generace mobilních sítí, jako jsou Home Subscriber Server, autentizační centrum nebo Equipment Identity Register (EIR).

Primárním účelem UDM je poskytovat ostatním síťovým funkcím, zejména AMF a AUSF, data potřebná pro ověřování uživatelů a řízení přístupu k síťovým službám. Při pokusu UE o připojení k síti AMF zasílá dotaz do UDM, aby získala bezpečnostní klíče a profil daného uživatele. UDM také generuje autentizační vektory, které AUSF používá k ověření identity UE pomocí protokolu 5G AKA. Kromě toho UDM uchovává informace o předplacených službách, datových balíčcích a kreditu uživatelů. Tyto údaje jsou využívány PCF a CHF pro účely autorizace služeb a účtování. UDM spravuje registr mobilních zařízení EIR, který obsahuje databázi identifikátorů zařízení (IMEI) a jejich stav (povoleno, odcizeno, zakázáno). Tyto informace slouží k blokování přístupu nežádoucích nebo nedůvěryhodných zařízení k síti. UDM je také navržena jako škálovatelná a neustále dostupná komponenta s podporou geografické redundance. Důležitou funkcí kterou zajišťuje je také bezpečnost a ochrana citlivých uživatelských dat pomocí šifrování, autentizace a řízení přístupu. (5G/NR - Network Architecture - UDM)



Obrázek 4-8 Schéma sběru dat v UDM (5G/NR - Network Architecture - UDM)

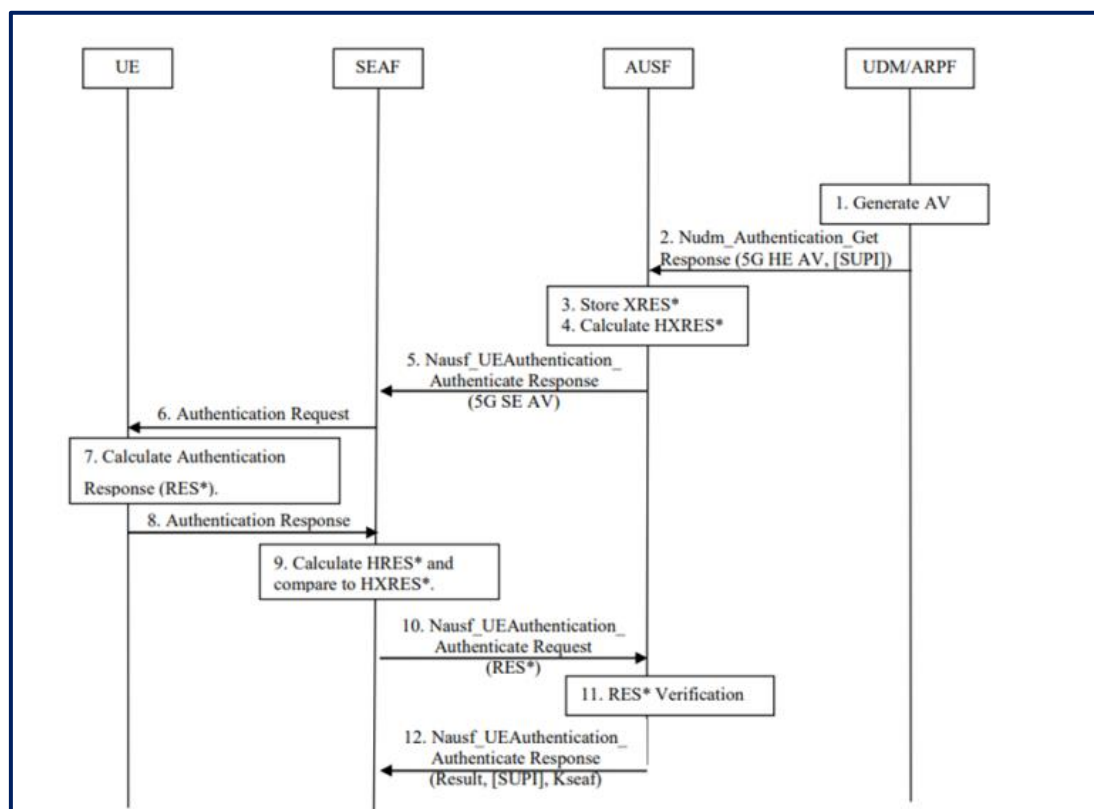
Tabulka 4-1: Vztahy komponent s UDM (Zdroj: Autor)

Prvek	Funkce v UDM
DCCF (Data Collection Configuration Function)	Interaguje s UDM, aby na-konfigurovala způsob sběru uživatelských dat pro různé služby.
NWDAF (Network Data Analytics Function)	Vyměňuje analytická data s UDM za účelem optimalizace výkonu sítě a uživatelské zkušenosti.
AMF (Access and Mobility Management Function)	Koordinuje s UDM pro autentizaci a udržování uživatelských profilů pro správu mobility.
SMF (Session Management Function)	Spolupracuje s UDM na správě sezení a uživatelských dat týkajících se připojení a přístupu ke službám.
SMSF (Short Message Service Function)	Spoléhá na UDM pro ukládání a načítání SMS souvisejících uživatelských dat.
AUSF (Authentication Server Function)	Ověřuje uživatelské přihlašovací údaje s UDM během procesu autentizace.
NEF (Network Exposure Function)	Využívá UDM k řízení expozice uživatelských dat externím síťovým funkcím.
GMSC (Gateway Mobile Location Centre)	Přistupuje k lokalizačním uživatelským datům z UDM pro služby vyžadující informace o poloze.
HSS (Home Subscriber Server)	Dřívější funkce ze 4G, která interaguje s UDM pro správu dat odběratelů při přechodu na 5G.
GBA's BSF (Generic Bootstrapping Architecture's Bootstrapping Server Function)	Využívá UDM pro bezpečnou výměnu uživatelských dat v procesu bootstrapování.
5G DNNMF (5G Dynamic Network Node Management Function)	Potenciálně vlastní nebo proprietární funkce interagující s UDM pro dynamické řízení a konfiguraci sítě.

4.6 AUSF (Authentication Server Function)

Authentication Server Function je specializovanou bezpečnostní komponentou 5G jádra, která zajišťuje ověřování identity uživatelů a koncových zařízení při jejich připojení k síti. AUSF úzce spolupracuje s UDM, odkud získává bezpečnostní klíče a profily uživatelů potřebné pro autentizační proces.

Hlavním úkolem AUSF je provádět oboustranné ověření mezi UE a sítí pomocí protokolu 5G AKA (Authentication and Key Agreement). Když se UE pokouší připojit k síti, AMF zašle žádost do AUSF s identifikátorem uživatele (SUPI) a dočasnou identitou zařízení (5G-GUTI). AUSF pak získá z UDM odpovídající autentizační vektor, který obsahuje sdílené tajemství (klíč K) a očekávanou odpověď (XRES). AUSF odešle UE výzvu RAND a autentizační token AUTN. UE pomocí svého klíče K a algoritmu f2 vypočítá očekávanou odpověď RES a porovná ji s přijatým AUTN. Pokud se shodují, UE odešle vypočtený RES zpět do AUSF, která jej porovná s XRES. Pokud se obě hodnoty shodují, je identita UE úspěšně ověřena. Zároveň UE ověří identitu sítě pomocí přijatého AUTN. V průběhu 5G AKA si UE a AUSF odvodí sadu bezpečnostních klíčů pro šifrování a integritu následné komunikace. AUSF předá tyto klíče do AMF, která je distribuuje ostatním síťovým funkcím. AUSF také podporuje nové bezpečnostní mechanismy 5G, jako je ochrana permanentních identifikátorů (SUCI), anti-tracking nebo řízení přístupu na základě výsledku ověření (NSSAA). (AUSF (Authentication Server Function) In 5G-NR, 2023)



Obrázek 4-9: Schéma průběhu autentizačního procesu v 5G (32)

4.7 NEF (Network Exposure Function)

Network Exposure Function představuje inovativní prvek 5G jádra, který umožňuje kontrolované zpřístupnění vybraných síťových služeb a schopností externím aplikacím a partnerům. NEF funguje jako agregační bod a jednotné rozhraní pro interakci mezi jádrem 5G a externími entitami, jako jsou aplikační servery, podniky nebo třetí strany. Hlavním cílem NEF je umožnit vývoj nových služeb a obchodních modelů založených na využití síťových informací a funkcí. NEF poskytuje sadu standardizovaných API

(Application Programming Interface), přes které mohou autorizované aplikace přistupovat k různým síťovým službám. (Network Exposure Function (NEF), 2022)

Mezi typické případy použití patří zjišťování polohy uživatelů, získávání informací o kvalitě služeb QoS, ovlivňování směrování datového provozu, spouštění síťových funkcí nebo přístup k účtovacím datům. NEF také umožňuje externím aplikacím přispívat svými daty a obohacovat tak síťové služby. Příkladem může být integrace geografických informací pro optimalizaci handoveru nebo využití informací o využití aplikace pro přizpůsobení nastavení QoS. NEF zajišťuje bezpečnost a ochranu soukromí při sdílení dat pomocí mechanismů jako OAuth2, TLS nebo řízení přístupu na základě oprávnění. Důležitým aspektem je zachování kontroly operátora nad sdílenými daty a funkcemi. NEF proto poskytuje nástroje pro definici politik a pravidel, které určují, které informace lze sdílet, s kým a za jakých podmínek. NEF také podporuje monetizaci síťových aktiv formou zpoplatnění přístupu k API nebo dat. Tím otevírá operátorům nové příležitosti pro generování příjmů a spolupráci s partnery z různých odvětví, od dopravy přes průmysl 4.0 až po chytrá města. (5G Security Assurance Specification (SCAS) for the Network Exposure Function (NEF) , 2021) (Nafees, 2020)

4.8 NRF (Network Repository Function)

Network Repository Function je centrálním registrem a objevovací službou pro síťové funkce a služby v 5G jádru. NRF udržuje databázi všech dostupných síťových funkcí (NF), jejich instancí, schopností a rozhraní. Každá NF se při spuštění zaregistruje u NRF a pravidelně obnovuje svou registraci. NRF také monitoruje stav a dostupnost jednotlivých NF pomocí pravidelných kontrol živosti. Hlavním úkolem NRF je umožnit efektivní objevování a výběr síťových funkcí ostatními komponentami 5G jádra. Když některá NF potřebuje navázat komunikaci s jinou NF, zašle dotaz do NRF s požadovanými kritérii, jako je typ služby, podporované rozhraní nebo lokace. NRF vyhledá ve své databázi odpovídající instance NF a vrátí jejich identifikátory, adresy a další potřebné informace. Díky tomu mohou síťové funkce dynamicky navazovat spojení a přizpůsobovat se aktuální topologii a stavu sítě. NRF také podporuje automatické obnovení spojení v případě výpadku nebo přetížení některé z NF. (5G : What's the NRF ?, 2023)

NRF tak hraje klíčovou roli v podpoře síťové virtualizace a cloudifikace. Díky centralizované správě a objevování služeb umožňuje flexibilní a agilní nasazení síťových funkcí v podobě virtualizovaných kontejnerů nebo mikroslužeb. Síťové funkce mohou být dynamicky děleny do jednotlivých instancí, dále škálovány a přemísťovány v závislosti na aktuální poptávce a dostupných prostředcích, aniž by to vyžadovalo ruční rekonfiguraci ostatních komponent. NRF také usnadňuje integraci síťových funkcí od různých dodavatelů a podporuje migraci z fyzické na virtualizovanou a cloudovou infrastrukturu.

4.9 Přístup k síti a autentizace v mobilních sítích

Mobilní zařízení se k síti připojují prostřednictvím procesu autentizace, který ověřuje identitu zařízení a uživatele a zajišťuje, že mají oprávnění k přístupu k síťovým službám. Autentizace představuje zásadní bezpečnostní mechanismus chránící síť před neoprávněným přístupem a zaručující dostupnost síťových zdrojů pouze autorizovaným uživatelům a zařízením.

V současných mobilních sítích se pro autentizaci nejčastěji používá SIM (Subscriber Identity Module) karta v kombinaci s PIN (Personal Identification Number) kódem. SIM karta je malý vyměnitelný čip vkládaný do mobilního zařízení, který obsahuje unikátní identifikátory jako IMSI (International Mobile Subscriber Identity) a autentizační klíče sloužící k ověření identity uživatele vůči síti. SIM karta rovněž ukládá další data, například kontakty, SMS zprávy a síťová nastavení.

Proces autentizace s využitím SIM karty probíhá následovně – Při zapnutí mobilního zařízení nebo pokusu o připojení k síti zařízení odešle autentizační požadavek spolu s IMSI získaným ze SIM karty. Síťové autentizační centrum (AUC) vyhledá příslušné autentizační klíče pro danou SIM a vygeneruje náhodnou výzvu (RAND), kterou odešle zpět do zařízení. SIM karta výzvu zpracuje pomocí svého

autentizačního algoritmu a tajného klíče (Ki) uloženého na kartě a vypočte očekávanou odpověď (SRES), již odešle zpět do sítě. Síť provede stejný výpočet a porovná přijatou odpověď s očekávanou hodnotou. V případě shody je autentizace úspěšná a zařízení se připojí k síti.

SIM karta je obvykle chráněna další vrstvou a tou je PIN kód, obvykle 4-8 místné číslo, poskytuje dodatečnou vrstvu zabezpečení chránící SIM kartu před neoprávněným použitím. Uživatel musí při vložení SIM karty do zařízení zadat správný PIN, aby získal přístup k síťovým službám. Po určitém počtu chybných pokusů o zadání PIN kódu (typicky 3) se SIM karta zablokuje a je nutné zadat odblokovací kód PUK (PIN Unblocking Key). (Zuriati Ahmad Zukarnain, 2022)

S příchodem embedded SIM (eSIM) a integrated SIM (iSIM) technologií se objevují nové metody autentizace nahrazující tradiční fyzické SIM karty. eSIM je programovatelný čip integrovaný přímo do zařízení, který umožňuje vzdálenou správu a zřizování odběratelských profilů bez nutnosti fyzické výměny SIM karty. iSIM jde ještě dál a integruje SIM funkcionalitu přímo do čipsetu zařízení, což dále zjednodušuje design zařízení a zlepšuje zabezpečení.

Kromě SIM-based autentizace podporují mobilní síť 5G také pokročilejší autentizační protokoly, jako například EAP (Extensible Authentication Protocol) a AKA (Authentication and Key Agreement). Tyto protokoly nabízejí robustnější zabezpečení a umožňují vzájemnou autentizaci mezi zařízením a sítí, kdy se nejen zařízení prokazuje síti, ale i síť prokazuje svou identitu zařízení.

Autentizace mobilních zařízení v síti je nezbytná pro zajištění bezpečnosti, integrity a důvěrnosti komunikace. V kombinaci s dalšími bezpečnostními mechanismy, jako je šifrování přenášených dat a řízení přístupu k síťovým zdrojům, vytváří komplexní bezpečnostní rámec moderních mobilních sítí. S evolucí SIM technologií a zaváděním pokročilých autentizačních protokolů se bezpečnost a flexibilita přístupu k mobilním sítím dále zvyšuje, což je zásadní v éře masového rozšíření mobilních a IoT zařízení.

4.10 Rozdíly mezi SIM a eSIM

eSIM je moderní alternativou k tradiční fyzické SIM kartě. Hlavní rozdíl spočívá v jejich fyzické formě. Tradiční SIM karta je samostatný fyzický čip, který se vkládá do mobilního zařízení a existuje v různých velikostech (mini-SIM, micro-SIM, nano-SIM). eSIM je integrovaný čip zabudovaný přímo do zařízení, který není uživatelsky vyměnitelný a nevyžaduje fyzický slot na SIM kartu.

Kromě fyzické podoby je další významný rozdíl je v programovatelnosti. Tradiční SIM karta je předem naprogramovaná a vydaná mobilním operátorem, přičemž změna operátora vyžaduje fyzickou výměnu SIM karty. eSIM je programovatelná a umožňuje vzdálenou správu a zřizování různých odběratelských profilů, což uživateli umožňuje měnit operátory nebo tarify bez nutnosti výměny fyzické SIM karty.

Liší se také v kapacitě profilů. Tradiční SIM karta obsahuje jeden odběratelský profil odpovídající jednomu mobilnímu operátorovi, zatímco eSIM může uložit více odběratelských profilů současně, což umožňuje uživateli snadno přepínat mezi různými operátory nebo tarify.

eSIM nabízí větší flexibilitu a pohodlí ve srovnání s tradiční SIM kartou. Používání tradiční SIM karty vyžaduje fyzickou manipulaci a v případě změny operátora návštěvu prodejny nebo zaslání nové SIM karty.

Využití obou typů SIM karet má dnešní době také různé využití. zatímco tradiční SIM karty se používají především v mobilních telefonech, tabletech a některých nositelných zařízeních. eSIM nachází uplatnění v širší škále zařízení, včetně chytrých hodinek, notebooků, vozidel a IoT zařízení, kde je fyzický prostor omezený a vyžaduje se větší flexibilita.

Standardizace těchto technologií je také odlišná. Tradiční SIM karty jsou standardizovány organizací ETSI (European Telecommunications Standards Institute), zatímco eSIM je standardizována organizací GSMA (GSM Association) v rámci specifikací Remote SIM Provisioning (RSP). (eSIM Whitepaper, 2018)

Hlavní výhodou eSIM je flexibilita a pohodlí pro uživatele, kteří mohou snadno měnit operátory nebo tarify bez nutnosti výměny fyzické SIM karty. eSIM také umožňuje výrobcům zařízení vytvářet kompaktnější a odolnější design bez slotu na SIM kartu. Pro mobilní operátory eSIM může znamenat možnost využít nových obchodních příležitostí a umožňuje efektivnější správu odběratelských profilů.

Navzdory výhodám eSIM je adopce této technologie zatím pozvolná a tradiční SIM karty zůstávají široce používané. Přechod na eSIM vyžaduje podporu ze strany mobilních operátorů, výrobců zařízení i regulačních orgánů. S rostoucí poptávkou po flexibilních a škálovatelných řešeních se však očekává, že se eSIM stane v budoucnu dominantní technologií pro mobilní konektivitu. (Hyggor da Silva Medeiros, 2024)

Technologie eSIM přináší několik dalších výhod a potenciálních aplikací, které stojí za zmínku.

Jednou z hlavních výhod eSIM je usnadnění globálního roamingu. Cestovatelé mohou snadno získat místní datový tarif v navštívené zemi bez nutnosti fyzicky vyměňovat SIM karty. Stačí si stáhnout a aktivovat místní profil eSIM, což může ušetřit náklady na roaming a poskytuje pohodlnější zážitek z cestování.

Díky eSIM mohou mobilní operátoři nabízet flexibilnější a personalizovanější tarify, například krátkodobé datové balíčky pro specifické události nebo lokality. Výrobci zařízení mohou vytvářet inovativní produkty s integrovanou nezávislou mobilní konektivitou nebo automobily s vestavěnými eSIM pro služby připojených vozidel.

V oblasti internetu věcí má eSIM významný potenciál zjednodušit a škálovat nasazení a správu připojených zařízení. S eSIM mohou výrobci IoT zařízení předřizovat konektivitu a vzdáleně spravovat odběratelské profily, což eliminuje potřebu fyzické manipulace se SIM kartami a umožňuje hladké nasazení a aktualizace zařízení v terénu, což může přinést benefity a zvýšenou efektivitu při průmyslových nasazeních

Zabezpečení je dalším důležitým aspektem eSIM. Integrovaná povaha eSIM poskytuje vyšší úroveň zabezpečení ve srovnání s tradičními vyměnitelnými SIM kartami. eSIM jsou odolnější vůči fyzickým útokům a pro hackery je obtížnější je klonovat nebo pozměnit. Specifikace GSMA pro eSIM také zahrnují instrukce k robustním bezpečnostním opatřením, jako je šifrování, bezpečná výroba a zřizování profilů. (eSIM Whitepaper, 2018)

I přes své výhody čelí adopce eSIM určitým výzvám a omezením. Jedním z problémů je kompatibilita zařízení, protože ne všechna mobilní zařízení v současné době podporují eSIM a tento stav bude přetrvávat.

V neposlední řadě je také negativním faktorem, že k aktivaci eSIM je nutné být již připojen ke konektivě například přes WiFi. Zatímco s fyzickou SIM kartou tento problém není.

A ačkoliv na jednu stranu eSIM mohou přinášet již zmíněné bezpečnostní výhody, existují i rizika a obavy ohledně zachování soukromí a ochrany dat, jelikož eSIM umožňují vzdálenou správu a zřizování profilů, je tedy důležité zajistit, aby byla zavedena přísná opatření na ochranu soukromí a zabezpečení dat, která chrání osobní údaje a informace uživatelů před neoprávněným přístupem nebo zneužitím.

Navzdory těmto výzvám se očekává, že eSIM budou i nadále získávat na popularitě a stanou se v nadcházejících letech převládající technologií pro mobilní konektivitu. S tím, jak se technologie vyvíjí a

přijímá, bude eSIM utvářet budoucnost mobilní komunikace a umožňovat nové a inovativní způsoby, jak zůstat připojen v neustále propojeném světě.

5. Zásadní technologie a trendy v 5G sítích

Abych mohl plně analyzovat stav mobilních sítí v ČR a rozebrat, proč začínají být relevantní 5G sítě, zaměřím se ještě na několik zásadních technologií a trendů souvisejících s rozvojem 5G sítí. 5G přináší revoluci v mobilních komunikacích a umožňuje širokou škálu nových aplikací a služeb. Aby bylo možné plně využít potenciál 5G, je zapotřebí několik zásadních technologií, které tvoří základ moderních 5G sítí. Tyto technologie spolupracují na poskytování vyšší rychlosti, nižší latence, větší spolehlivosti a celkově lepší zákaznické zkušenosti.

5.1 Masivní MIMO

Masivní MIMO je klíčovou technologií v sítích 5G, která představuje významný pokrok oproti tradičním MIMO systémům. Využívá velkého počtu antén (desítky až stovky) na základnové stanici, což umožňuje zvýšení kapacity a spolehlivosti bezdrátové komunikace.

Princip fungování masivního MIMO spočívá v prostorové multiplexaci a diverzitě. Velký počet antén umožňuje vytvořit více nezávislých datových toků ve stejném frekvenčním pásmu, což vede k výraznému zvýšení spektrální účinnosti a celkové kapacity sítě.

Masivní MIMO také umožňuje tvarování a zacílení rádiových svazků (beamforming) na konkrétní uživatele. Základnová stanice dokáže směřovat energii signálu přímo k zamýšleným příjemcům a minimalizovat interferenci, což zvyšuje dosah signálu, zlepšuje pokrytí a snižuje rušení mezi uživateli. Přispívá také k energetické účinnosti sítě díky zacílení signálu a potlačení interferencí. To vede k nižší spotřebě energie na základnových stanicích a ekologičtějším provozu sítě.

V současné době je tato technologie na mnoha místech již standardem a je jedním z hlavních symbolů technologického pokroku současných 5G sítí. Nicméně vzhledem k nárůstu všech parametrů je potřeba vylepšovat i tuto technologii. Autoři se věnují čistění kontaminace signálu, kdy dochází například k rušení od ostatních buněk. (Muhammad, 2024) Implementace masivního MIMO přináší výzvy. Studie se také zabývají zvýšenou komplexitou hardwaru a signálového zpracování, vysokými nároky na výpočetní výkon a potřebou přesné znalosti stavu kanálu (CSI). (HU, 2017) Tato technologie se nadále rozvíjí a pozornost je směřována na algoritmy využívající strojového a hlubokého učení ke zvýšení efektivity. (Yan, 2022) Autoři upozorňují, že je nutné především testování v praxi, což je vždy klíčové pro rozvoj nových technologií. Budoucí vývoj směřuje k dalšímu zvyšování počtu antén, využití vyšších frekvenčních pásem a integraci s jinými technologiemi, jako je bezdrátové síťování s využitím inteligentních povrchů. Tyto pokročilé koncepty slibují další zlepšení kapacity, spolehlivosti a energetické účinnosti bezdrátových sítí.

5.2 Dual Connectivity

Dual Connectivity (DC) je klíčovou technikou v sítích 5G, která umožňuje zařízením simultánně udržovat spojení se dvěma různými základnovými stanicemi nebo vrstvami sítě. Cílem je zlepšit kvalitu služeb, navýšit propustnost a zajistit plynulejší předávání mezi buňkami. Přináší výhody jako zvýšenou propustnost, vyšší spolehlivost a efektivní využití spektra.

Architektura DC v 5G umožňuje zařízení navázat souběžné spojení se základnovou stanicí v páteřní vrstvě (makrobuňka) a přístupové vrstvě (malá buňka). Páteřní vrstva zajišťuje široké pokrytí na nižších frekvencích, zatímco přístupová vrstva využívá vyšší frekvence (např. mmWave) pro vysokou kapacitu a propustnost.

Efektivní fungování DC vyžaduje koordinaci mezi základnovými stanicemi, využití specializovaných protokolů a rozdělení funkcí mezi hlavní a sekundární uzel. Na rozdíl od Carrier Aggregation (CA) umožňuje DC použití různých technologií a připojení k různým základnovým stanicím.

DC umožňuje vyvažování zátěže mezi vrstvami sítě. Může také přispět k energetické účinnosti sítě. Implementace DC však vyžaduje pečlivé plánování a optimalizaci sítě.

Před implementací se řešilo především, zda a jak je nasazení efektivní v porovnání s předáváním zařízení mezi buňkami napřímo. Například zpracování v rámci Pražské konference SIMUtools, kdy autoři došli k závěrům, že DC je efektivnější než přímé předávání i v rámci milimetrových vln. (POLESE, 2016) V současné době tak majorita operátorů využívá této technologie při implementaci svých 5G NSA sítí.

Dual Connectivity je klíčovou funkcí v sítích 5G, která umožňuje operátorům využít silné stránky různých síťových vrstev a technologií pro dosažení vylepšeného výkonu a uživatelské zkušenosti. DC hraje zásadní roli při realizaci plného potenciálu 5G konektivity a je obzvláště výhodná ve scénářích s vysokými nároky na pokrytí a kapacitu.

Níže přikládám funkci v praxi. Můj mobilní telefon byl v jednu chvíli připojen ke dvěma různými základnovým stanicím a zároveň na několika radiových frekvencích.



Obrázek 5-1: Dual Connectivity a Carrier Aggregation (Zdroj: autor)

5.3 Network Slicing – síťové řezy

Síťové řezy jsou klíčovou technologií v sítích 5G, která umožňuje efektivní využití síťových zdrojů pro různé typy služeb a aplikací. Tato technologie vytváří logicky oddělené virtuální sítě, tzv. síťové řezy (network slices), na stejné fyzické infrastruktuře, přičemž každý řez je optimalizován pro specifické požadavky dané služby.

Koncept síťových řezů vychází z principů virtualizace síťových funkcí (NFV) a softwarově definovaných sítí (SDN). NFV umožňuje virtualizaci síťových funkcí a jejich spouštění na standardních serverech, zatímco SDN poskytuje centralizovanou správu a programovatelnost sítě. Díky kombinaci NFV a SDN lze vytvářet flexibilní síťové řezy přizpůsobené potřebám různých odvětví.

Síťové řezy v 5G jsou charakterizovány parametry jako šířka pásma, latence, spolehlivost a zabezpečení. Každý řez může mít vlastní sadu parametrů a lze jej nezávisle spravovat a škálovat. Architektura Network Slicing je definována standardy 3GPP Release 15 a skládá se z několika klíčových komponent, včetně správce řezů a oddělených instancí řídicí a uživatelské roviny pro každý řez.

Studie zabývající se síťovými řezy primárně řeší, jak umožnit jejich vytváření a správu pro různé klíčové oblasti jako zdravotnictví nebo dopravu. Autoři dochází k závěrům, že implementace síťových řezů vyžaduje implementaci inovací na všech úrovních infrastruktury včetně potřeby podpůrného softwaru. Shodují se, že do budoucna tato technologie může umožnit zvýšení celkové kvality života obyvatel. (Singh R. M., 2022) S tímto se plně ztotožňuji, a ačkoliv dnes ještě uplatnění v praxi není plně možné, do budoucna to přinese mnoho benefitů. Síťové řezy umožní výhody v efektivitě využití síťových zdrojů, možnost nabízet diferencované služby s různými úrovněmi kvality a tím i nové obchodní příležitosti. Zavedení však přináší i výzvy, jako efektivní správu a orchestraci řezů či zajištění bezpečnosti a izolace mezi řezy. Vše je zmiňované napříč studii.

Síťové řezy jsou zásadní pro realizaci vize 5G jako univerzální platformy pro různorodé služby. Umožňují vytváření přizpůsobených virtuálních sítí na společné infrastruktuře, což vede k efektivnějšímu využití zdrojů a vyšší flexibilitě. V současnosti není možné tuto službu v sítích standardních operátorů využívat, jelikož její dostupnost je podmíněna nasazením 5G podle 3GPP Release 15 nebo vyšší. (Mirko Cano Soveri, 2023)

5.4 Milimetrové vlny

Milimetrové vlny jsou další z klíčových funkcionalit 5G sítí. Pracují na vysokých frekvencích mezi 30 a 300 GHz, což přináší několik výhod. Kratší vlnové délky umožňují vytváření užších paprsků, které poskytují lepší rozlišení a zabezpečení pro přenos dat. Milimetrové vlny také mohou přenášet velké množství dat s krátkým zpožděním a díky větší dostupné šířce pásma se zvyšuje rychlost přenosu a zamezuje se zahlcení v nízkofrekvenčním pásmu.

Ekosystém 5G milimetrových vln vyžaduje rozsáhlou infrastrukturu, ale může dosáhnout mnohonásobně vyšší rychlosti přenosu dat ve srovnání se sítěmi 4G LTE nebo standardním 5G. Komponenty milimetrových vln jsou navíc menší, což umožňuje jejich kompaktnější nasazení v bezdrátových zařízeních.

I přes mnoho výhod čelí milimetrové vlny různým výzvám. Krátké vlnové délky a úzké paprsky omezují propagační vzdálenost, což vyžaduje rozsáhlou infrastrukturu pro pokrytí celé oblasti základnovou stanicí. S tím jsou spojeny vysoké náklady. Milimetrové vlny jsou také snadno blokovány překážkami, jako jsou zdi, listí nebo lidské tělo. Pro zmírnění těchto fyzikálních problémů je zapotřebí kombinace dalších 5G funkcí, jako je masivní MIMO. (Xiwen Wang, 2020)

Současné studie se zaměřují na různé typy zaměřování signálu a vývoj antén pro využití v odlišných oblastech a také na bezpečnost a energetickou efektivitu.

Výsledkem jsou různé typy antén, které umožňují naklápění v různých úhlech například pro efektivní šíření v tunelech. (Tao Hong, 2021) Jiní autoři řeší zase efektivitu propagace signálu milimetrových vln pomocí dronů. (Pang, 2021) Vzhledem k narůstající potřebě vyšší kapacity sítě kvůli vyšším objemům dat ať už s ohledem na množství připojených zařízení nebo vyšší nároky na kvalitu například 8K videa bude z mého pohledu do budoucna potřeba využívat této technologie v kombinaci s Masivním MIMO. Z tohoto důvodu se jiní autoři věnují například spojení beamformingu a mMIMO v propagaci milimetrových vln, aby při extrémním množství docházelo ke správnému doručování potřebných signálů. (Tarafer, 2023)

V neposlední řadě jsou 5G sítě často spojovány s konspirací o zdravotních dopadech. I proto nadále probíhají výzkumy zkoumající dopady na lidské zdraví, vzhledem k tomu, že milimetrové vlny využívají vysokých frekvenčních pásem. V aktuální studii autoři testovali přímé vystavení prasečí kůže signálům 26GHz. Výsledky neukázali žádné negativní dopady. Autoři testovali přímé kontinuální vystavení záření nejdéle po 30 minut bez negativních efektů. (Foroughimehr, 2024) Je otázkou, proč nebyl zvolen i delší interval. A další výzkum bude určitě nutný i v této oblasti.

6. Závěr

Tento dokument se zabýval analýzou stavu a rozvoje mobilních sítí 5G. Hlavním cílem bylo poskytnout ucelený pohled na danou problematiku, zhodnotit situaci. Byl představen historický vývoj mobilních sítí a byly vysvětleny klíčové technologické principy, na nichž 5G staví. Následně byla rozebrána architektura 5G sítí a její odlišnosti od předchozích generací. Pozornost byla věnována také specifickým prvkům 5G, jako je využití Massive MIMO, Dual Connectivity a dalších technologií 5G.

7. Zdroje

- 2020 Mobile Industry Impact Report: Sustainable Development Goals . (9 2020). Získáno 7. 11 2023, z GSMA: <https://www.gsma.com/betterfuture/wp-content/uploads/2021/12/2020-Mobile-Industry-Impact-Report-SDGs.pdf>
- (9. 2 2024). Načteno z nPerf: <https://www.nperf.com/cs/awards/cz/2023/mobile/czechia>
- 3GPP Technical Specification: "System architecture for the 5G System (5GS)" (TS 23.501). (19. 12 2023). Získáno 17. 2 2024, z <https://www.3gpp.org/DynaReport/23501.htm>
- 3GPP TS 23.003: "Numbering, Addressing and Identification". (23. 6 2023). Získáno 24. 1 2024, z <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=729>
- 5G : What's the NRF ? (8. 7 2023). Získáno 17. 2 2024, z <https://gooram.medium.com/5g-whats-the-nrf-7db7a83cb1bd>
- 5G Deployment and Beyond. (24. 12 2023). Načteno z <https://forum.huawei.com/enterprise/en/5g-deployment-and-beyond/thread/738920856656166912-667213872962088960>
- 5G Implementation Guidelines. (8 2019). Získáno 5. 3 2024, z <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2019/03/5G-Implementation-Guideline-v2.0-July-2019.pdf#page=20&zoom=100,414,638>
- 5G Security Assurance Specification (SCAS) for the Network Exposure Function (NEF) . (1 2021). Získáno 17. 2 2024, z https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/133500_133599/133519/16.02.00_60/ts_133519v160200p.pdf
- 5G/NR - Network Architecture - UDM. (nedatováno). Získáno 14. 3 2024, z https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Core_UDM.html
- Álex Colás, J. B. (31. 7 2019). *The status of the 2G/3G network sunset*. Načteno z Nae.: <https://nae.global/en/the-status-of-the-2g-3g-network-sunset/>
- AUSF (Authentication Server Function) In 5G-NR. (7. 4 2023). Získáno 21. 1 2024, z <https://techteworld.com/ausf-authentication-server-function-in-5g-nr/>
- Bílý, V. (nedatováno). Načteno z <https://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>
- Cox, C. (2014). *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications, 2nd Edition*.
- Dvořák, L. (14. 5 2021). *Využitelnost a efektivita 5G mobilního Internetu*. Získáno 10. 4 2024, z https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/77813/DvorakL_VyuzitelnostEfektivita_JK_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Erik Dahlman, S. P. (2014). *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*.
- eSIM Whitepaper. (3 2018). Získáno 24. 2 2024, z <https://www.gsma.com/esim/wp-content/uploads/2018/12/esim-whitepaper.pdf>
- Foroughimehr, N. C. (24. 4 2024). *Exploring skin interactions with 5G millimeter-wave through fluorescence lifetime imaging microscopy*. Načteno z <https://doi.org/10.3390/electronics13091630>
- Functions of main LTE packet core elements. (7. 1 2012). Získáno 18. 12 2023, z <https://www.lteandbeyond.com/2012/01/functions-of-main-lte-packet-core.html>
- Gaurav Gangwal, K. G. (17. 8 2023). *The 5G Core Network Demystified*. Získáno 18. 2 2023, z [https://infohub.delltechnologies.com/en-US/p/the-5g-core-network-demystified/#:~:text=The%205G%20core%20is%20responsible,\(QOS\)%20for%20end%20users.](https://infohub.delltechnologies.com/en-US/p/the-5g-core-network-demystified/#:~:text=The%205G%20core%20is%20responsible,(QOS)%20for%20end%20users.)
- Gopal, S. G. (14. 4 2024). *ProSAS: An O-RAN approach to spectrum sharing between NR and LTE*. Načteno z Cornell University Library, arXiv.org: <https://www.proquest.com/working-papers/prosas-o-ran-approach-spectrum-sharing-between-nr/docview/3039626451/se-2>

- HU, S. R. (2017). *Beyond Massive-MIMO: The Potential of Data-Transmission with Large Intelligent Surfaces*. Získáno 15. 3 2024, z <https://arxiv.org/pdf/1707.02887.pdf>
- Hyggor da Silva Medeiros, L. d. (2 2024). *Embedded-SIM (E-SIM) an Overview in Latin America: Implementation, Availability, Advantages and Disadvantages*. Načteno z https://www.researchgate.net/publication/378245748_Embedded-SIM_E-SIM_an_Overview_in_Latin_America_Implementation_Availability_Advantages_and_Disadvantages
- Chan, H. (2012. 3 26). Získáno 15. 1 2024, z <https://hersheng.blogspot.com/2012/03/architecture-of-lte-network-and-working.html>
- Jujjuru, J. (2008). Získáno 18. 12 2023, z <https://www2.rivier.edu/journal/roaj-spring-2008/j134-jujjuru.pdf>
- Knopp, R. (21. 7 2022). *3GPP 5G RAN architecture*. Získáno 15. 1 2024, z <https://slices-ri.eu/wp-content/uploads/2.Knopp-3GPP-5G-RAN-architecture.pdf>
- Leyva-Mayorga, I. S. (2020). *EO small-satellite constellations for 5G and beyond-5G communications*. Načteno z Ithaca: <https://www.proquest.com/working-papers/leo-small-satellite-constellations-5g-beyond/docview/2328199930/se-2>
- Majamaa, M. M. (20. 8 2023). *Satellite-Assisted Multi-Connectivity in Beyond 5G*. Načteno z <https://doi.org/10.1109/wowmom57956.2023.00073>
- Marcin Dryjanski, P. (5. 6 2017). Získáno 16. 1 2024, z <https://www.grandmetric.com/5g-core-network-a-short-overview/>
- Mirko Cano Soveri, D. G. (10. 7 2023). *5G Network slice management*. Získáno 18. 3 2024, z 3GPP: <https://www.3gpp.org/technologies/slice-management>
- Mobile Infrastructure Sharing*. (12. 3 2014). Načteno z ITU: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regulatory-Market/Documents/CostaRica/Presentations/Session8_Daniel%20Leza%20-%20Mobile%20Infrastructure%20Sharing%20-%202012%20March%202014.pdf
- Muhammad, K. S. (30. 4 2024). *Pilot contamination in massive MIMO systems: Challenges and future prospects*. Načteno z <https://www.proquest.com/working-papers/pilot-contamination-massive-mimo-systems/docview/3049794266/se-2>
- Nafees, S. (8. 7 2020). *Network exposure and the case for connected drones*. Získáno 2024, z <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/6/network-exposure-and-the-case-for-connected-drones>
- Network Coverage Maps*. (nedatováno). Načteno z GSMA: <https://www.gsma.com/coverage/#689>
- Network Exposure Function (NEF)*. (2022). Získáno 17. 2 2024, z <https://www.amdocs.com/sites/default/files/2022-11/NEF-datasheet-9nov22.pdf>
- O'Neill, L. (8 2019). *Gartner report provides reality check on the 5G hype*. Načteno z <https://searchnetworking.techtarget.com/feature/Gartner-report-provides-reality-check-on-the-5G-hype>
- Pang, X. T. (4 2021). *Energy-efficient design for mmWave-enabled NOMA-UAV networks*. Načteno z <https://doi.org/10.1007/s11432-020-2985-8>
- P-GW Administration Guide*. (14. 4 2022). Získáno 18. 12 2023, z https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/asr_5000/21-27/pgw-admin/21-27-pgw-admin/m_pgwoview.html
- POLESE, M. M. (19. 7 2016). *Performance Comparison of Dual Connectivity and Hard Handover for LTE-5G Tight Integration*. Načteno z <https://arxiv.org/pdf/1607.05425>
- Sauter, M. (2017). *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*.
- Simic, I. (8 2007). Získáno 17. 1 2024, z https://www.researchgate.net/publication/228643976_Evolution_of_mobile_base_station_architectures

- Singh, N. (9. 12 2022). *What is the 5G Session Management Function (SMF)?* Získáno 8. 3 2024, z <https://techcommunity.microsoft.com/t5/azure-for-operators-blog/what-is-the-5g-session-management-function-smf/ba-p/3693852>
- Singh, N. (8. 12 2022). *What is the 5G User Plane Function (UPF)?* Získáno 11. 3 2024, z <https://techcommunity.microsoft.com/t5/azure-for-operators-blog/what-is-the-5g-user-plane-function-upf/ba-p/3690887>
- Singh, R. M. (17. 3 2022). *Analysis of network slicing for management of 5G networks using machine learning techniques.* Načteno z <https://doi.org/10.1155/2022/9169568>
- Subhra Prosun Paul, V. D. (6 2023). *A FULL-SCALE ANALYSIS ON CHALLENGES AND ISSUES OF NEXT GENERATION (5G) COMMUNICATION IN HETEROGENEOUS WIRELESS NETWORK BASED ENTERPRISE APPLICATIONS.*
- Tao Hong, S. Z. (4. 1 2021). *Design of mmWave Directional Antenna for Enhanced 5G Broadcasting Coverage.* Načteno z <https://doi.org/10.3390/s21030746>
- Tarafter, P. &. (3. 3 2023). *Deep reinforcement learning-based coordinated beamforming for mmWave massive MIMO vehicular networks.* Načteno z <https://doi.org/10.3390/s23052772>
- The Serving Gateway (S-GW) is the user-plane node connecting the EPC to the LTE RAN.* (2011). Získáno 18. 12 2023, z <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/serving-gateway>
- Vance, J. (30. 8 2023). *Will RedCap 5G spark IoT gold rush?: Scaled-down version of 5G could spark a surge in wearables, industrial IoT, surveillance.* Načteno z <https://www.proquest.com/docview/2859232182?pq-origsite=summon&sourcetype=Trade%20Journals>
- WANG, H. C. (2016). *Dual connectivity for LTE-advanced heterogeneous networks.*
- What is eNB and gNB?* (9. 1 2024). Získáno 28. 1 2024, z <https://teletopix.org/what-is-enb-and-gnb/>
- What is the 5G User Plane Function (UPF)?* (12. 3 2024). Získáno 14. 3 2024, z <https://www.amantyatech.com/5g-user-plane-function-upf>
- Wright, E. (2004). *Practical Telecommunications and Wireless Communications.*
- Xiwen Wang, L. G. (2020). *When 5G Meets Industry 4.0.*
- Yan, L. W. (27. 2 2022). *5G massive MIMO signal detection algorithm based on deep learning.* Načteno z <https://doi.org/10.1155/2022/9999951>
- Zhu, M. G. (11. 4 2023). *Multi-access edge computing (MEC) based on MIMO: A survey.* Načteno z Sensors: <https://doi.org/10.3390/s23083883>
- Zuriati Ahmad Zukarnain, A. M. (12. 4 2022). *Authentication Securing Methods for Mobile Identity: Issues, Solutions and Challenges.* Získáno 22. 2 2024, z <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/4/821>