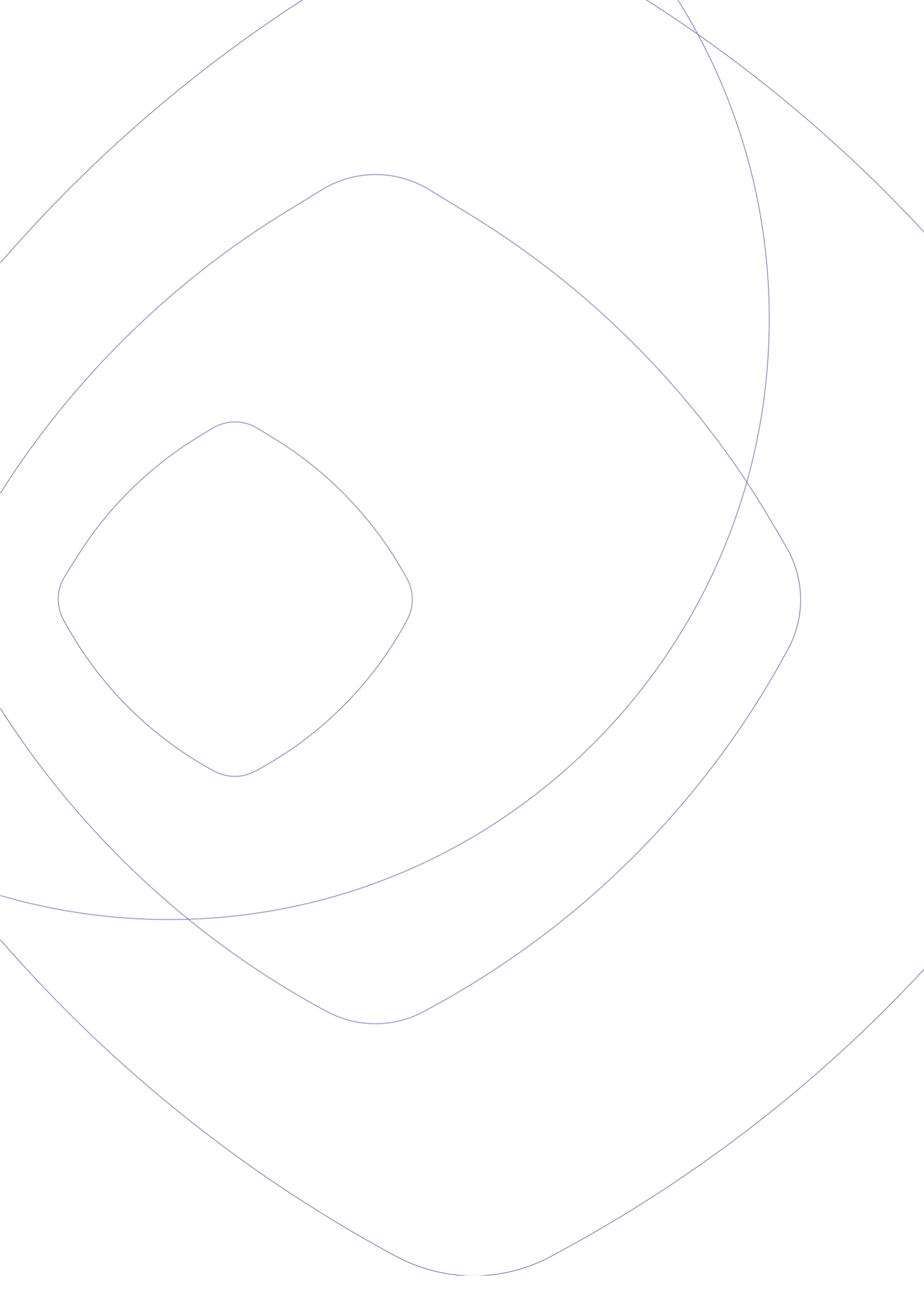


Vývoj 6G sítí v pásmech nad 100 GHz

Připraveno pro Ministerstvo
průmyslu a obchodu

Říjen 2024



Obsah

Seznam zkratk a vysvětlivek	4
Manažerské shrnutí.....	6
Management summary	7
1 Úvod	8
2 Rozbor problematiky sítí 6G	9
2.1 Vize mobilních telekomunikací do roku 2030 (IMT-2030)	9
2.2 Klíčové vlastnosti 6G.....	11
2.3 Vývoj standardizace od 5G k 6G.....	11
2.3.1 Vylepšování klíčových funkcí 5G	13
2.3.2 Aktualizace verze 5G-Advanced směřující k 6G	15
2.3.3 Shrnutí rozdílů mezi sítěmi 5G a 6G	17
3 Využití kmitočtových pásem nad 100 GHz	19
3.1 Vymezení pásem nad 100 GHz	19
3.2 Vlastnosti pásem nad 100 GHz.....	20
3.2.1 Útlum prostředí.....	20
3.2.2 Šíření signálu	22
3.2.3 Antény pro pásmo nad 100 GHz a jejich dopady na bilanci spoje	24
3.3 Potenciální vliv bezdrátové komunikace v pásmech nad 100 GHz na lidský organismus	25
4 Perspektivy využití pásma nad 100 GHz, analýza regulačních a normativních aspektů	27
4.1 Shrnutí fyzikálních východisek a očekávaných vlastností.....	27
4.1.1 Vlastnosti pásma.....	27
4.1.2 Splnění očekávaných vlastností.....	28
4.1.3 Naplnění aplikačních oblastí	29
4.2 Scénáře využití a možnosti licencování nových pásem pro 6G sítě	30
4.2.1 Radiová přístupová síť	30
4.2.2 Využití pásma nad 100 GHz pro přípojné sítě	32
4.2.3 Využití pásma nad 100 GHz pro lokální a osobní sítě	32
4.2.4 Mezinárodní koordinace spektra pro mobilní sítě	33
4.2.5 Zhodnocení využívání spektra pro 5G a analýza dalších potřeb pro 6G v Evropě	34
4.2.6 Možnosti licencování pásem nad 100 GHz.....	35
5 Závěry a doporučení.....	38

Seznam zkratek a vysvětlivek

V tomto přehledu jsou uvedeny významné zkratky užívané v této studii. V jednotlivých případech se mohou vykytovat zkratky použité výhradně na jednom místě v souvislosti s vysvětlením specifické technické vlastnosti, jejichž význam je lokálně vysvětlen a nevyskytují se v tomto seznamu.

3GPP	3rd Generation Partnership Project (Organizace standardizující mobilní sítě)
5G	Sítě páté generace
6G	Sítě šesté generace
AAS	Active Antenna Systems (aktivní anténní systémy)
AI	Artificial Intelligence (umělá inteligence)
CBRS	Citizens Broadband Radio Service (Občanská širokopásmová rádiová služba)
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications (Evropská konference poštovních a telekomunikačních správ)
C/I	Carrier to Interference
CQI	Channel Quality Indicator (škálovaná verze SINR používána u volby modulační kvality signálu)
ČRa	České radiokomunikace
D2D	Device-to-Device, Direct-to-Device (označení pro přímou komunikaci mezi zařízeními, případně přímé komunikace k zařízení v případě družicového doplňku k 6G)
dBm	Decibel-milliwatt (jednotka absolutní úrovně výkonu vztažená k hodnotě 1 mW)
dBμV	Decibel-mikrovolt (jednotka absolutní úrovně napětí vztažená k hodnotě 1 μV)
DL	Downlink (směr přenosu od poskytovatele k účastníkovi)
ECC	Electronic Communications Committee (Výbor pro elektronické komunikace)
EDRS	Evropský systém pro přenos dat
EESS	Earth exploration-satellite service (služba družicového průzkumu Země)
eMBB	Enhanced Mobile Broadband (zdokonalené mobilní širokopásmové připojení)
ESC	Environmental Sensing Capability (schopnost detekce prostředí)
ETSI	Evropský ústav pro telekomunikační normy
EU	Evropská unie
FCC	Federal Communications Commission (Federální komise pro komunikaci)
FDD	Duplex s frekvenčním dělením
FSS	Fixed-satellite service (pevná družicová služba)
FWA	Fixed Wireless Access (bezdrátový přístup k pevným sítím)
IMT	Mezinárodní mobilní telekomunikace
IoT	Internet of Things (Internet věcí)
ISS	Mezidružicová služba
ITU	International Telecommunications Union (Mezinárodní telekomunikační unie)
LoS	Line-of-Sight (komunikace na přímou viditelnost)
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network (nízkoenergetická síť pro rozsáhlé území)
Mbps	Megabit za sekundu
MFCN	Mobile Fix Communication Networks (mobilní/fixní komunikační sítě)

MIMO	Multiple-Input Multiple-Output (systém s více vstupy a výstupy)
mMTC	Massive Machine-Type Communications (Masivní komunikace mezi zařízeními)
ms	Milisekuda
MVNO	Mobile Virtual Network Operator (Operátor mobilní virtuální sítě)
N/A	Nedostupné
NLoS	Non-Line-of-Sight (Bez přímé viditelnosti)
NR	New Radio (označení radiové části sítě 5G)
PCI	Physical-Layer Cell Identity (označení buňky)
PPDR	Systém ochrany veřejnosti a odstraňování následků živelných pohrom
RR	Radio Regulations (Radiokomunikační řád)
RSPG	Skupina pro politiku rádiového spektra
RSRP	Reference Signal Receive Power (přijímaný výkon referenčního signálu)
SAS	Spectrum Access System (systém přístupu ke spektru)
SCS	Subcarrier spacing (rozteč subkanálů)
SDL	Supplementary DownLink (pásmo pro posílení downlinku ostatních pásem)
SINR	Signal-to-Interference-plus Noise Ratio (odstup signálu od šumu a interferencí)
SRR	Radary krátkého dosahu
SRS	Space Research Service (služba kosmického průzkumu)
SSB	Synchronisation Signal Block for NR (synchronizační sekvence)
TDD	Time Division Duplex (Duplex s časovým dělením)
TRP	Celkový vyzářený výkon
UAV	Bezpilotní vzdušné prostředky
U/D	Uplink/Downlink
UL	Uplink
ULS	Universal Licensing System
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications (Vysoce spolehlivá komunikace s nízkou latencí)
UTC	Koordinovaný světový čas
V2V	Vehicle-to-Vehicle (označení pro přímou komunikaci mezi vozidly)
WAS	Wireless Access System (Bezdrátový přístupový systém)
μs	Mikrosekuda

Manažerské shrnutí

Cílem studie je analyzovat současný stav a výhledy standardizace sítí 6G a shrnout současný stav poznání o pásmech nad 100 GHz uvažovaných pro mobilní sítě. Ke zpracování byly využity dostupné zdroje mezinárodních standardizačních organizací, odborné a vědecké články, jakož i vlastní zkušenosti zpracovatele. Studie obsahuje tři základní části:

- Rozbor problematiky sítí 6G, jejich postupného vývoje od 5G přes 5G-Advanced
- Analýzu možnosti využití kmitočtových pásem nad 100 GHz se zohledněním jejich specifik
- Prognózu možností využití pásma nad 100 GHz, zhodnocení přínosů, slabých stránek, možných způsobů licencování

Obecně se mobilní sítě budují na základě standardů organizace 3GPP, jejichž vývoj kontinuálně pokračuje. V blízké době můžeme očekávat dokončení specifikace 5G-Advanced, která přinese řadu nových vlastností naznačujících již další generaci 6G. Plnohodnotná síť 6G bude standardizovaná pravděpodobně k roku 2028 a praktické nasazení a využití se v řadě států i v Evropě očekává kolem roku 2030.

Kmitočtová pásma nad 100 GHz s omezením shora na kmitočtu 1 THz (sub-THz pásma) patří do skupiny milimetrových až sub-milimetrových vln, dle posledních výsledků výzkumu využitelných pro přenos ultra vysokými přenosovými rychlostmi. Toto pásmo bylo identifikováno jako jedno z pásem pro rozvoj mobilních sítí 6G po roce 2030. Dle rezolucí schválených při posledním setkání WRC-23 by měly být veškeré přípravné práce, studie využitelnosti, souběhu služeb atd. připraveny pro jednání Světové radiokomunikační konference v roce 2031, která bude klíčová pro jejich komerční otevření.

Pro kmitočtová pásma milimetrových vln je typický velmi omezený dosah v důsledku převažujícího charakteru šíření na přímou viditelnost a vysokého útlumu prostředí. Tato skutečnost současně s očekávanými malými rozměry anténních polí (dáno krátkými vlnovými délkami) povede k využití zejména pro pokrytí interiérů a relativně malých, ohraničených oblastí (stadiony, náměstí apod.) a přímou komunikaci mezi zařízeními (D2D, V2V). Na druhé straně umožní daleko přesnější lokalizaci a detekci objektů, jakožto druhotné funkce.

V kontextu vývoje požadavků, technologických úskalí a očekávaných investic (a jejich návratnosti) se zdá expanze do pásem nad 100 GHz ne příliš aktuální a potřebná spíše až v dlouhodobém výhledu (po roce 2040). Tedy až poté, co bude využito a plně vytěženo pásmo 26 GHz, případně další uvažovaná pásma koordinovaná mezinárodně pro mobilní komunikaci.

Možné základní režimy licencování pásem nad 100 GHz, jak se jeví při současné úrovni poznání:

- Pro aplikace s malým vyzářeným výkonem a pokročilými aktivními anténními systémy lze předběžně předpokládat provozní podmínky umožňující u mnohých 6G aplikací bezlicenční provoz (na základě všeobecného oprávnění).
- Pro specifické aplikace s vyšším vyzářeným výkonem v situacích, kdy by riziko vzájemného nežádoucího ovlivnění stanic nebylo uživateli akceptovatelné, bude uvažována i možnost udělování individuálních oprávnění.

Ve svém závěru studie doporučuje:

- Podrobně sledovat vývoj v oblasti a aktivně přispívat na mezinárodních fórech do diskuse o využívání a způsobu licencování pásem pro 6G sítě (ITU-R, WRC, RSPG, CEPT).
- Včas zaujmout stanoviska a formulovat strategii pro zavádění sítí 6G v ČR (vhodné období pro její formulování se jeví v letech 2025/26).
- Sledovat využití současných pásem, vývoj požadavků zákazníků a rozvoj služeb a na základě toho aktualizovat potřeby vyvíjet pásma nad 100 GHz, zejména z pohledu očekávaných investic a jejich reálné návratnosti.
- Podporovat vhodnými výzvami a způsobem financování výzkum a další odborné studie v této oblasti. V prvním období (cca 2025 až 2027) zaměřené na teoretické a experimentální práce prováděné akademickou sférou a výzkumnými organizacemi. V následujícím období (cca 2028 až 2030+) na aplikovaný výzkum a spolupráci výzkumných organizací a průmyslových podniků na konkrétních scénářích využití, vývoji a testování konkrétních produktů a řešení.

Management summary

The aim of the study is to analyze the current state and prospects of standardization of 6G networks and to summarize the current state of knowledge about bands above 100 GHz considered for mobile networks. Available resources from international standardization organizations, professional and scientific articles, as well as the compiler's own experience were used for processing. The study contains three basic parts:

- Analysis of the issue of 6G networks, their gradual development from 5G to 5G-Advanced
- Analysis of the possibility of using frequency bands above 100 GHz, considering their specifics
- Forecast of the possibilities of using the band above 100 GHz, evaluation of benefits, weaknesses, possible ways of licensing

In general, mobile networks are built based on the standards of the 3GPP organization, the development of which continues continuously. Soon, we can expect the completion of the 5G-Advanced specification, which will bring a number of new features indicating the next generation of 6G. A full-fledged 6G network will probably be standardized by 2028, and practical deployment and use in several countries and in Europe is expected around 2030.

Frequency bands above 100 GHz with an upper limit of 1 THz (sub-THz bands) belong to the group of millimeter to sub-millimeter waves, according to the latest research results usable for transmission at ultra-high transmission rates. This band has been identified as one of the bands for the development of 6G mobile networks after 2030. According to the resolutions approved at the last WRC-23 meeting, all preparatory work, studies of usability, service concurrency, etc. should be ready for the meeting of the World Radiocommunication Conference in 2031, which will be key to their commercial opening.

A very limited range is typical for millimeter wave frequency bands due to the predominant nature of line-of-sight propagation and high environmental attenuation. This fact, together with the expected small dimensions of the antenna arrays (due to the short wavelengths), will lead to use mainly for covering interiors and relatively small, limited areas (stadiums, squares, etc.). On the other hand, it will enable much more accurate localization and detection of objects, as a secondary function.

In the context of the development of requirements, technological challenges and expected investments (and their return), expansion into bands above 100 GHz does not seem very current and is only needed in the long term (after 2040). That is, only after the 26 GHz band has been used and fully exploited, or other considered internationally coordinated bands for mobile communication.

Possible basic modes of licensing in the band above 100 GHz, as it appears at the present state of knowledge, are as follows:

- For applications with low radiated power and advanced active antenna systems, operating conditions enabling license-free operation (based on general authorization) can be assumed for many 6G applications.
- For specific applications with higher radiated power in situations where the risk of unwanted mutual influence of stations would not be acceptable to users, the possibility of granting individual authorizations will also be considered.

In its conclusion, the study recommends:

- Follow developments in the area in detail and actively contribute to the discussion on the use and licensing of bands for 6G networks (ITU-R, WRC, RSPG, CEPT) in international forums.
- Take positions in time and formulate a strategy for the introduction of 6G networks in the Czech Republic (2025/26 appears to be a suitable period for its formulation).
- Simultaneously monitor the use of current bands, the development of customer requirements and the development of services, and based on this, update the need to use bands above 100 GHz, especially from the point of view of expected investments and their real return.
- To support research and other professional studies in this area with appropriate challenges and methods of financing. In the first period (approx. 2025 to 2027) focused on theoretical and experimental work carried out by academia and research organizations. In the following period (approx. 2028 to 2030+) for applied research in cooperation of research organizations and industrial enterprises on specific scenarios of use, development and testing of specific products and solutions.

1 Úvod

Cílem studie je analyzovat současný stav možností sítí 6G v pásmu nad 100 GHz, včetně definování základních výhod a nevýhod s ohledem na aplikační využití, spektrální vlastnosti a další. V návaznosti na výsledky prací prováděných v rámci ITU a 3GPP bude pro prostředí České republiky rozpracováno:

- Posouzení charakteristik pásma nad 100 GHz a jejich vhodnosti pro vývoj a provoz 6G sítí s důrazem na dosah a propustnost signálu; zajištění efektivity využití spektrálního pásma nad 100 GHz a optimalizace výkonu přenosu dat v těchto frekvenčních pásmech. Analýza možných interferencí a rušení přenosu a zavedení opatření k minimalizaci těchto problémů. Zajištění spolehlivého přenosu dat za různých povětrnostních podmínek a prostředí.
- Navržení strategií pro rozšíření pokrytí 6G sítí v pásmech nad 100 GHz s ohledem na terénní podmínky a možné překážky.
- Posouzení kapacity sítě a schopnosti zvládnout rostoucí počet zařízení připojených k 6G sítím v pásmech nad 100 GHz.
- Zohlednění možností zpětné kompatibility s existujícími 5G sítěmi a postupů pro hladký přechod mezi 5G a 6G sítěmi. Zohlednění následné možnosti integrace 6G sítí s existujícími 5G sítěmi a dalšími komunikačními infrastrukturami.
- Analýza a hodnocení současných regulačních a normativních aspektů týkajících se provozu 6G sítí v pásmech nad 100 GHz a zajištění souladu s příslušnými legislativními požadavky; licenční a provozní požadavky. Posouzení možných dopadů elektromagnetického záření na veřejné zdraví při provozu 6G sítí a implementace opatření pro minimalizaci rizik.
- Hodnocení energetické efektivity 6G sítí v pásmech nad 100 GHz a implementace opatření pro snížení spotřeby energie a zvýšení udržitelnosti provozu.

Ke zpracování byly využity dostupné zdroje mezinárodních standardizačních organizací, odborné a vědecké články, jakož i vlastní zkušenosti zpracovatele. Studie byla zpracována experty z Fakulty elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze v úzké součinnosti s Českým telekomunikačním úřadem a průběžně konzultována se zadavatelem během procesu tvorby. Bylo využito též předběžných výsledků souběžně zpracovávaných studií, zejména studie zaměřené na pásmo 26 GHz.

2 Rozbor problematiky sítí 6G

Dosud nevyužívané frekvence od 100 GHz do 3 THz jsou uvažovány pro příští generace bezdrátových komunikačních systémů kvůli velké potenciální šířce pásma. Tyto frekvence mohou nabídnout prostor pro aplikace, vyžadující vysoké přenosové rychlosti, ale přinášejí také mnoho nových technologických výzev a vyžadují si pokroky ve vývoji zařízení, mikroelektronických obvodů, softwaru, metod zpracování signálů, řízení komunikace a anténních systémů. Vedle technických výzev a příležitostí pro bezdrátovou komunikaci se otevírá možnost přesného určování polohy a sledování objektů a prostorů.

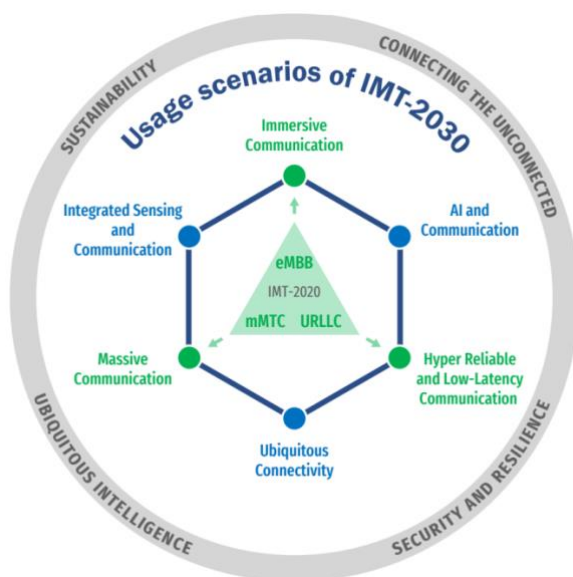
2.1 Vize mobilních telekomunikací do roku 2030 (IMT-2030)

Při specifikaci současně aktuální, tedy páté generaci mobilních sítí se vývojáři a standardizační instituce zaměřili hlavně na souběžný rozvoj těchto třech segmentů a aplikačních oblastí:

1. Pokročilé mobilní vysokorychlostní sítě (*Enhanced Mobile Broadband - eMBB*)
2. Vysoce spolehlivé komunikace s nízkým zpožděním (*Ultra-Reliable and Low Latency - URLLC*)
3. Masivní komunikace mezi zařízeními (*Massive Machine-Type Communication - mMTC*)

Transformaci těchto oblastí směrem k dalším generacím sítí přibližuje následující diagram (IMT-2030 – vize ITU-T pro rozvoj sítí směrem k roce 2030). Vedle rozvoje stávajících třech segmentů se přidávají nové výzvy a propojení s oblastmi ne úplně přímo souvisejícími s komunikací jako takovou (senzorika, AI).

Obrázek 1: Scénáře využití pro IMT-2030 (Zdroj¹)



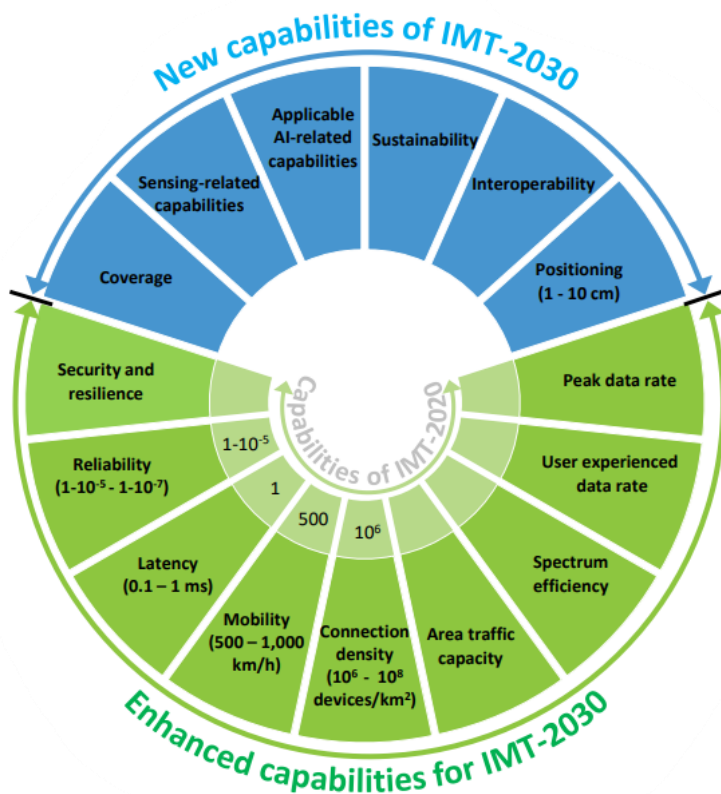
¹ Doporučení ITU-R M.2160-0 (11/2023). Rámec a celkové cíle budoucího vývoje IMT pro rok 2030 a dále.

Pro mobilní sítě 6G se v porovnání s 5G uvádějí cílové parametry prezentované v následující tabulce a návazném paprskovém grafu.

Tabulka 1: Cílové parametry pro mobilní sítě 6G v porovnání s 5G

	5G	6G
Špičková rychlost přenosu dat:	nižší desítky Gbit/s	50, 100, 200 Gbit/s
Běžně dostupná přenosová rychlost:	min. 100 Mbit/s	min. 300/500 Mbit/s
Hustota připojení:	1 mil. zařízení na km ²	až 100 mil. zařízení na km ²
Zpoždění mezi koncovými zařízeními:	řádově milisekundy – 10 ms	0,1 – 1 ms
Hustota provozu:	10 Mbit/s na 1 m ²	30/50 Mbit/s na 1 m ²
Mobilita:	do 500 km/h	500–1000 km/hod

Obrázek 2: Rámcové parametry pro mobilní sítě 6G zlepšené oproti 5G (zeleně) a nové oproti 5G (modře, Zdroj²)



² Doporučení ITU-R M.2160-0 (11/2023). Rámec a celkové cíle budoucího vývoje IMT pro rok 2030 a dále.

2.2 Klíčové vlastnosti 6G

Následující přehled ukazuje, na jaké oblasti je kladen důraz při vývoji 6G sítí pro jednotlivé skupiny vlastností dle³. Pro ilustraci je uvedena poslední verze loga a grafické znázornění významných vlastností sítí 6G.

Komunikace:

- Kapacita
- Přenosová rychlost
- Mobilita
- Pokrytí
- Hustota připojených zařízení



AI a výpočetní výkon:

- Přesnost výsledků
- Odezva výpočtů AI
- Výpočetní kapacita
- Škálovatelnost, přizpůsobitelnost

Spolehlivost systému

- Bezpečnost
- Integrita
- Dostupnost
- Doba zotavení systému

Integrované sledování a určování polohy:

- Rozsah
- Utajení
- Přesnost snímání
- Rozlišení
- Odezva

Energetická efektivita:

- Energetická efektivita sítě
- Nízká produkce CO₂
- ECO hodnocení
- Výdrž baterií



2.3 Vývoj standardizace od 5G k 6G

Mobilní sítě se budují na základě **standardů organizace 3GPP⁴** (3rd Generation Partnership Project, 3GPP). Organizace 3GPP pokračuje v činnosti při vytváření standardů od 3G přes 4G a 5G k 6G. Specifikace mají podobu skupiny technických norem – vydání konkrétní verze k danému datu, označovanou jako Release 15, 16 atd. Ve skutečnosti jde tedy nikoli o revoluční generační skoky, ale postupný inovační proces (proto též označení „mezigenerací“ 5G-Advanced apod.).

Přehled posledních verzí standardů pro mobilní sítě s význačnými charakteristikami uvádí příložená tabulka.

³ Taking 5G-Advanced to the next level and bridging into the 6G era, White paper, 2024 Nokia.

⁴ <https://www.3gpp.org/>

Tabulka 2: Přehled posledních verzí standardů pro mobilní sítě⁵

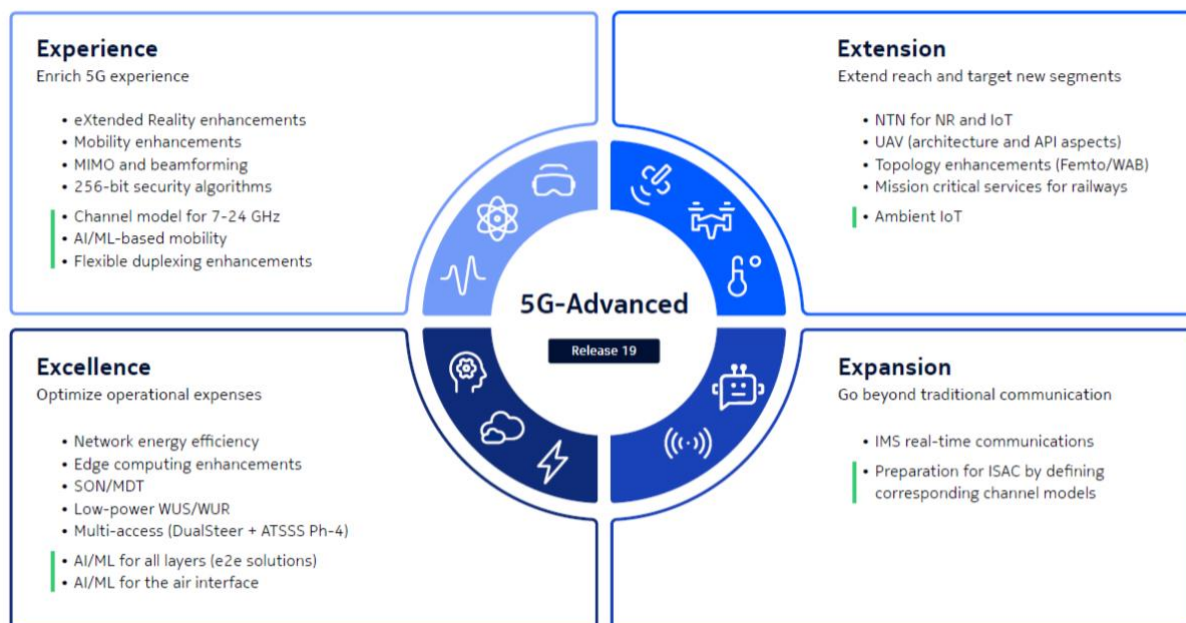
Release 15	2018 Q2	První specifikace generace 5G NR (New Radio). Podpora pro komunikaci Vehicle-to-x (V2x), IP Multimedia Core Network Subsystem (IMS), Future Railway Mobile Communication System.
Release 16	2020 Q3	Specifikace 5G – fáze 2: 5G enhancements, NR-based access to unlicensed spectrum (NR-U), Satellite access.
Release 17	2022 Q1	Rozvoj funkcí, které jsou i nadále důležité pro celkovou efektivitu a výkon 5G specifikuje skupina TSG RAN (Technical Specification Group Radio Access Network): MIMO, Spectrum Sharing enhancements, UE Power Saving and Coverage Enhancements. Další vylepšení systému 5G a příprava funkcí k realizaci nových funkcí a služeb: non-public networks, industrial Internet of Things, low complexity NR devices, edge computing in 5G, access traffic steering, network automation for 5G, network slicing, advanced V2X service, multiple USIM support, proximity-based services in 5G, 5G multicast broadcast services, Unmanned Aerial Systems (UAS), satellite access in 5G, 5G location services, Multimedia Priority Service.
Release 18	2023 Q4	Verze označovaná jako 5G-Advanced: Introducing further machine-learning based techniques at different levels of the wireless network. Edge computing, Evolution of IMS Multimedia Telephony Service, Smart Energy and Infrastructure, Vehicle-Mounted Relays, Low Power High Accuracy Positioning for industrial IoT scenarios, Enhanced Access to and Support of Network slicing, Satellite backhaul in 5G.

Rozšíření standardu do podoby 5G-Advanced se naplnilo verzí 3GPP Release 18 a nyní se začínáme sunout o další krok k Release 19. Obecně, mezi verzemi standardu většinou dochází k doladění vlastností z předchozích verzí, ale i k přidání nových funkcionalit. Nyní půjde o další vylepšení energetické účinnosti, zvýšení pokrytí a zlepšený mobility – ale zejména o přípravu podmínek k plynulému přechodu k vývoji 6G, včetně nových modelů kanálů, rozšířených možností plného duplexního přenosu, satelitní komunikace, a vývoje rámce pro plné využití AI/ML (umělé inteligence a strojového učení). Dokončení standardizace verze 19 předpokládáme do konce roku 2025 a komerční dostupnost přibližně jeden rok po dokončení standardu.

Přehled hlavních vlastností verze standardu 19 s vyznačenými oblastmi směřujícími k 6G uvádí následující diagram.

⁵ <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases>

Obrázek 3: Přehled hlavních vlastností verze standardu 19 s vyznačenými oblastmi směřujícími k 6G (zeleně, zdroj⁶)



2.3.1 Vylepšování klíčových funkcí 5G

Za zmínku stojí několik funkcí, které již dosáhly vysoké úrovně zralosti v Release 18 a nejsou ve verzi 19 dále rozšiřovány. Příkladem takových funkcí je podpora průmyslového IoT (Industrial IoT - IIoT), optimalizace pro přenos malých objemů dat (Small Data Transmission - SDT), Multi-SIM, využitelnost pro vysokorychlostní vlaky (High Speed Train - HST), dynamické sdílení spektra (Dynamic Spectrum Sharing - DSS), In-Device Coexistence (IDC) a duální připojení s využitím agregace nosných (Dual-Connectivity / Carrier Aggregation - DCCA). To ovšem neznamená, že vývoj je v daných oblastech ukončen, je pravděpodobné, že se na daný stav naváže a bude se dále rozvíjet v nějaké další verzi standardu.

V následujících odstavcích nastíníme funkce verze 19, které jsou signifikantní pro 5G-Advanced a posouvají standardizaci o krok dále.

2.3.1.1 Vylepšení podpory mobilní sítě pro rozšířenou realitu (eXtended Reality - XR)

Vylepšení směřují jednak do spotřebitelského sektoru v podobě multimediální podpory rozšířené reality v reálném čase (RXRM) a jednak do průmyslu pro podporu pracovních činností. V první řadě se jedná o využití 360° videa a prostorového 3D zvuku s čímž souvisí nutnost zajištění vysoké rychlosti přenosu dat současně s nízkým zpožděním (latence). Současně je ovšem řešena i úspora energie uživatelského zařízení přizpůsobená provozu XR, která je obecně náročná na objem přenášených a zpracovávaných dat (klade tedy vysoké nároky na výpočetní výkon procesoru a tím i jeho spotřebu).

Konkrétní systémová opatření se týkají správy rádiových zdrojů (RRM), rozšíření multimodality a nově pojaté klasifikace dílčích datových toků do různých tříd kvality služeb (QoS) a s tím související signalizace mezi terminály a základnovou stanicí i základnovou stanicí a jádrem sítě.

2.3.1.2 Vylepšení MIMO

Pokračující vývoj vícekanálového přenosu MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) má zajistit ještě vyšší kapacitu a stabilní datové komunikace za pohybu. Hlavní ambicí je posunout se technologicky až na 128 vysílacích portů. Momentálně se počítá

⁶ Taking 5G-Advanced to the next level and bridging into the 6G era, White paper, 2024 Nokia.

s 64 vysílacími porty, které zajistí přibližně o 20-40% vyšší spektrální účinnost oproti dnes běžně používaným řešením a 128 portů po dokončení vývoje a posunu do komerční fáze přinese další zlepšení. Plánuje se také vylepšení využívající multi-TRP (přenosový přijímací bod).

2.3.1.3 Vylepšení mobility

Mobilita založená na spolupráci fyzické vrstvy (PHY / L1) a vrstvy řízení přístupu k médiu (MAC / L2) byla představena již ve verzi 18, jako mobilita spouštěná nižší vrstvou (L1/L2 Triggered Mobility - LTM). Zahrnuje rychlou výměnu obsluhujících základnových stanic. Tato procedura pomáhá zejména zkrátit dobu přerušení během předání komunikace (handover) na pouhých 10-20 ms, ale přinese i řadu dalších zlepšení. Uvedený koncept LTM se dále vyvíjí a bude prakticky implementován ve verzi 19.

2.3.1.4 Zvýšení energetické efektivity

Energetická efektivita (Energy efficiency - EE) je i nadále klíčovým cílem směřujícím k zajištění dlouhodobé udržitelnosti. Funkce podporující energeticky úspornou činnost sítě se implementují již dlouho a zahrnují např. zapínání/vypínání buněk, dynamickou správu napájení zařízení. Jelikož nejvíce náročná na spotřebu energie je rádiová přístupová síť (RAN), směřují hlavní aktivity pro úsporu zejména do této oblasti.

Jednou z cest je dynamičtější výměna signalizačních zpráv, která umožní rychlejší zpětnou vazbu od uživatelských terminálů. Důležitou roli bude hrát umělá inteligence a strojové učení (AI/ML) aplikovaná v oblasti energetické účinnosti. Cílem je odhadnout uživatelské chování, pohyb terminálu apod. s cílem efektivněji plánovat radiové zdroje (a tím i potřebnou energii na napájení). Jde o to uspokojit požadavky tak, aby se redukovaly zdroje na minimum, aniž se to negativně projeví na uživatelské zkušenosti s využíváním služby.

S tím souvisí i zavedení mechanismu probouzení zařízení s nízkou spotřebou energie (wake-up signal), zejména pro podporu IoT zařízení, jako jsou průmyslové senzory, rozpracovaný též ve verzi 18. Ve verzi 19 se počítá s konečnou specifikací odpovídajících řešení (módy Idle a Inactive) a signalizace (Lower Power Synchronization Signal - LP-SS).

2.3.1.5 Satelitní připojení

Již dlouho se počítá s tím, že satelitní konektivita bude doplňovat pozemní síť při poskytování skutečně globálního pokrytí. 3GPP představila řešení pro neterestriální síť (NTN) již ve verzi 17. Teprve verze 19 však bude zahrnovat řešení umožňující umístit funkce základnové stanice na satelity. Cílí na zlepšení výkonu a snížení zpoždění, včetně podpory pro aplikace IoT NTN.

2.3.1.6 Funkce pro podporu UAV a UAM

3GPP již několik let intenzivně řeší podporu mobilní sítě pro obsluhu bezpilotních letadel (Uncrewed Aerial Vehicles - UAV). Roste také zájem o městskou leteckou mobilitu (Urban Aerial Mobility - UAM), jejíž cílem je zajistit udržitelnou leteckou osobní i nákladní dopravu ve městském prostředí, buď prostředky dálkově řízenými nebo s pilotem na palubě.

Aby bylo možné splnit požadavky leteckých fór, bude 3GPP ve verzi 19 studovat, jak blok zpřístupnění funkcí sítě (Network Exposure Function - NEF) může být rozšířen tak, aby podporoval interakce mezi mobilními operátory a řízením provozu UAV (UAV Traffic Management - UTM), např. pro plánování letu před misí i sledování letu během mise. Budou studovány mechanismy pro detekci a vyhýbání se letícím prostředkům (Detect and Avoid - DAA). Zaměří se na vylepšení architektury aplikační vrstvy pro monitorování stavu připojení UAV v reálném čase, stejně jako na podporu přímé komunikace mezi UAV ve stejné oblasti, a to při zajištění redundance komunikace a vysoké spolehlivosti služby.

2.3.1.7 Architektura a provozní efektivita

Standardy mobilních sítí se neustále vyvíjejí i v oblasti funkcí, které operátorům pomohou dosáhnout vyšší efektivity při správě a provozu sítě a služeb. Sada funkcí pro samoorganizaci/optimalizaci sítě (Self-Organizing/optimizing network - SON) a minimalizaci zkušebních testů (Minimization of

Drive Test - MDT) se bude ve verzi 19 nadále vyvíjet, aby umožnila podporu nových vlastností představených ve verzi 18. Například verze 19 bude pokrývat optimalizaci mobility (mobility robustness optimizations - MRO) včetně podmíněného předání spojení do vybraných sekundárních skupin buněk (conditional handover with candidate Secondary Cell Groups - SCG). Specifikace budou vyžadovat rozšíření výměny nových meziuzlových informací a vylepšení hlášení z terminálů pro ladění parametrů mobility. Vylepšení SON/MDT pomohou zlepšit provozní efektivitu 5G-Advanced a usnadní nasazování nových funkcí v síti.

Dalšího vylepšení se dočká IMS (IP Multimedia System) a jeho komunikační datový kanál. Očekává se, že tato vylepšení nabídnou operátorům nové obchodní příležitosti umožňující zpřístupnění síťových funkcí poskytovatelům aplikačních služeb i nových aplikací koncovým spotřebitelům (např. her).

Verze 19 dále posílí využití výpočtů na hraně sítě (edge computing). Sníží dopady na funkce řídicí roviny 5GC pro prostředí edge hostingu (Edge Hosting Environment - EHE) a přinese další optimalizace pro zajišťování aplikačních serverů na okraji sítě (Edge Application Server - EAS).

2.3.1.8 Posílení bezpečnosti

Kvantové počítače představují dlouhodobou hrozbu pro informační bezpečnost nejen pro aktuální data, ale také pro historická data, která mohla být shromážděna pro budoucí dekódování. Proto se připravuje implementace mechanismů s délkou klíče 256-bitů i pro mobilní sítě. Algoritmy by měly být vyvinuty a vyhodnoceny skupinou expertů ETSI SAGE (Security Algorithms Group of Experts) na žádost 3GPP. Verze 19 má za cíl zveřejnit 256bitové algoritmy pro radiové rozhraní sítě. Kromě algoritmů pro ochranu důvěrnosti a integrity by měl být zaveden režim ověřeného šifrování s dodatečnými daty (Authenticated Encryption with Additional Data - AEAD).

2.3.1.9 Topologická vylepšení

Ve verzi 19 budou dotaženy do stádia standardizace dvě topologie sítě: 5G femtobuňky a mobilní bezdrátové připojení základnových stanic (Wireless Access Backhaul - WAB). Femtobuňky 5G NR lze použít ke zlepšení vnitřního pokrytí 5G a odlehčení provozu z makro sítě. Práce na femtobuňkách bude zahrnovat mechanismy řízení přístupu a způsob, jak povolit přístup k místním službám z privátně provozované femtobuňky. Zařízení femtobuňky by měla pracovat v režimu plug-and-play, přičemž vlastníkem femtobuňky musí mít pod kontrolou okruh uživatelů, kteří ji mohou používat. Funkce WAB se týká provozu a využití pohyblivých základnových (retranslačních) stanic ve vozidlech, typicky veřejné dopravy (autobusy, vlaky) a jejich koordinace se standardní sítí fixních základnových stanic.

2.3.1.10 Podpora kritických služeb pro železniční dopravu

Rozšíření podpory kritických služeb pro železniční dopravu (Mission-critical services for railways) se postupně doplňuje v rámci specifikací 3GPP. Cílem je reagovat na aktuální požadavky provozovatelů železnic (International Union of Railways) a naplnit představu budoucího komunikačního drážního systému (Future Railway Mobile Communication System - FRMCS), jakožto náhrady a pokračovatele systému GSM-R, a to včetně interoperability. Specifikace RAN již ve verzi 18 doporučuje vyhrazené spektrum v oblasti 2,7 GHz pro migraci z GSM-R k FRMCS. Agregace více nosných i z jiných pásem bude specifikována ve verzi 19, čímž se dosáhne plná funkcionality RAN nezbytná pro kritickou drážní komunikaci a signalizaci.

2.3.2 Aktualizace verze 5G-Advanced směřující k 6G

5G-Advanced bude také důležitým přípravným krokem k 6G, a to hned v několika technických oblastech, jak bude popsáno podrobněji v následujících odstavcích.

2.3.2.1 Intenzivní využití AI/ML

Rozsáhlá studie metod a algoritmů AI/ML pro nižší vrstvy rádiového rozhraní (PHY a MAC) byla provedena již ve verzi 18. Zaměřila se na použití komprese/predikci CSI, polohování a řízení paprsků. Používání AI/ML bude standardizováno ve verzi 19, včetně generického rámce na podporu AI/ML pro jednostranné modely – tj. modely, které jsou trénovány buď terminálem, nebo základnovou stanicí. Tento rámec umožní celkovou správu ML, sledování výkonu, sběr dat a monitorování, výběr funkcí, aktivaci a deaktivaci, přepínání a návrat ke konvenčnímu fungování. Tím bude mj. zajištěno, že AI/ML nepřinese zhoršení, které by mohlo nastat např. kvůli nedostatečnému natrénování pro určité scénáře.

Verze 19 bude také obsahovat novou studii mobility založenou na AI/ML se zaměřením na předávání komunikace (handover) optimalizovaným pro vrstvu L3 s cílem zlepšení celkového výkonu mobility a zlepšení zkušenosti koncového uživatele se službami a provozem aplikací. Na síťové rovině bude AI/ML sloužit mimo jiné pro vylepšení úspory energie.

Pracovní skupina 3GPP SA6 odpovědná za aplikace a kritickou komunikaci se zaměří na podporu další aplikační vrstvy umožňující systematické využití AI/ML. To zahrnuje podporu pro další moduly, které budou přicházet, včetně vertikální aplikační vrstvy (Vertical Application Layer - VAL), přenosu a distribuce trénovacích dat. Součástí plánů je i případná studie zda a jak by šlo využít data z modelování digitálního dvojčete na straně sítě jako součást životního cyklu využití AI/ML. Společně tyto aktivity představují podporu AI/ML na všech vrstvách komunikace a napříč celou infrastrukturou mobilní sítě zahrnující RAN (radiový přístup), CN (jádro sítě) i vrstvy správy. Výsledkem by měl být lepší výkon pro koncového uživatele, optimalizace celkového výkonu sítě, efektivnější provoz a také snadnější nasazování nových funkcí a služeb.

2.3.2.2 Modelování kanálů pro nová pásma a nové použití

Na Světové radiokomunikační konferenci ITU 2023 (WRC-23) bylo dohodnuto řešit přidělení nové části licencovaného spektra pro mobilní komunikaci v oblasti 7–15 GHz (konkrétní uvažované úseky 7,125–8,4 GHz a 14,8–15,35 GHz), které mají potenciál poskytnout navýšení přenosové kapacity vzhledem k současně využívaným pásmům. V rámci přípravy pro jejich využití je nutné ověřit aktuální model rádiového kanálu používaný 3GPP, případně navrhnout zpřesnění nebo rozšíření tak, aby plně odrazily efekty šíření signálů v těchto pásmech.

Další oblastí, kde budou provedeny studie modelování kanálů, je podpora integrované detekce a komunikace (Integrated Sensing and Communication - ISAC). To může v budoucnu umožnit používání nových aplikací tyto „sledování jako služba“, kdy rádiové signály se vedle přenosu informací využijí pro detekci a sledování prostor a objektů, jako jsou UAV, vozidla, nebezpečné předměty na silnicích a železnici. Předpokladem pro to je mít spolehlivé a prostorově konzistentní modely rádiových kanálů, které umožňují modelovat a rozlišovat rádiové charakteristiky hledaných i nechtěných objektů.

2.3.2.3 Zařízení IoT využívající energii z okolí

Ve verzi 18 byla provedena prvotní studie internetu věcí s využitím energie z okolí (Ambient IoT). Na rozdíl od dřívějších systémů IoT mají zařízení ambient IoT velmi omezené možnosti napájení a akumulace energie, ale velkou výhodou je, že nevyžadují výměnu nebo externí dobíjení baterie. Navrhované použití zahrnuje sledování objektů pro logistické účely a v podstatě se jedná o rozšíření známých RFID systémů (tzv. pasivní tagy) na větší vzdálenosti. Studie dospěla k předběžnému závěru, že koncept ambient IoT je proveditelný a přínosný, proto další pracovní skupina rozpracuje řešení v rámci verze 19. Zároveň je třeba práci koordinovat s jinými skupinami, a sice RAN a SA, včetně systémové architektury. Počítá se s využitím pásma FR1 (frekvenční rozsah do 7,125 GHz) v režimu licencovaného spektra s frekvenčním duplexem (FDD). Podporovány budou dva typy zařízení:

- Zařízení se špičkovou spotřebou energie cca 1 μ W, s akumulací energie, ale bez přenosu dat ve směru downlink.
- Zařízení s maximální spotřebou energie několik stovek μ W, s akumulací energie a využitím obou směrů přenosu.

Důležitou součástí budou podrobné výkonnostní studie jak z hlediska napájení, tak bilance rádiového přenosu a studie koexistence zařízení mezi sebou.

2.3.2.4 Flexibilní režimy duplexního přenosu

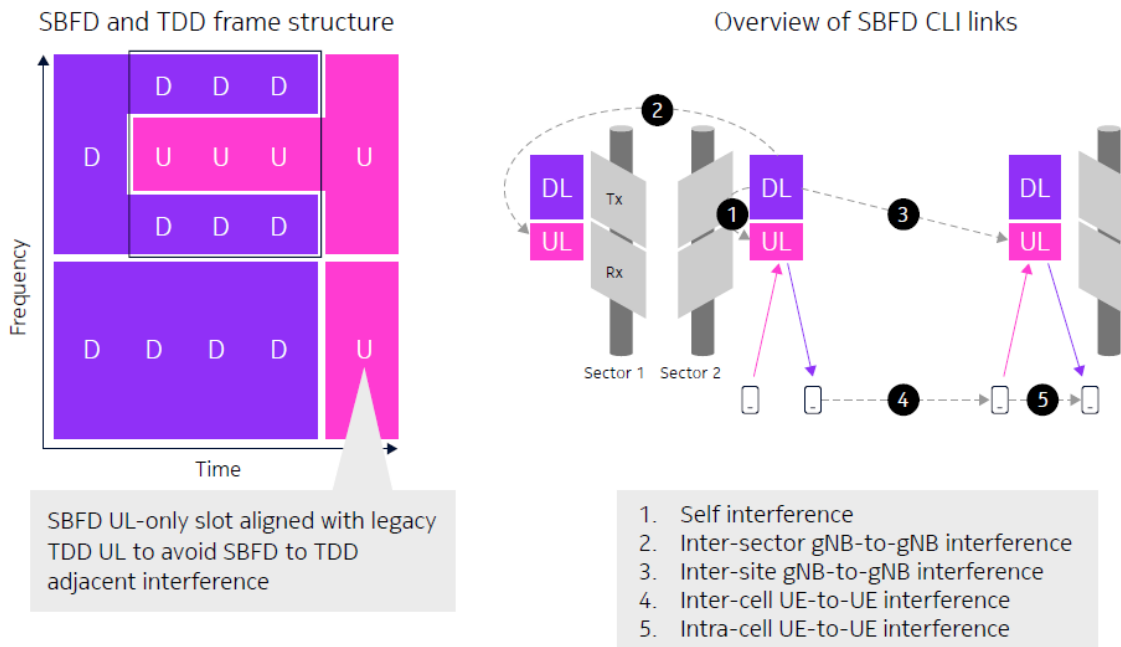
Ve verzi 18 zahájila skupina 3GPP rozsáhlou studii flexibilnějších duplexních metod pro nepárová pásma. Zahrnovala posouzení výkonnosti a potenciálu dynamického duplexu s časovým dělením (TDD) a také metody sub-band full duplex (SBFD). Motivací pro to je dosáhnout lepšího pokrytí, kapacity a zpoždění pro směr uplink tak, aby byla možná flexibilnější konfigurace rádiových zdrojů, ovšem za cenu složitějších postupů a signalizace pro zajištění koexistence. Metoda SBFD umožňuje souběžné uplinkové a downlinkové přenosy v jednom okamžiku na různých frekvencích (vybraných subpásmech) vyčleněných z celkového dostupného pásma kmitočtů, což umožní rychlejší odezvy a datové výměny ve srovnání s metodou TDD, která umožňuje exkluzivně v daném okamžiku (časovém slotu) využít celé dostupné pásmo pouze pro uplink, nebo downlink.

Předmětem výzkumu jsou zejména koordinační algoritmy a mechanismy ke zmírnění interferencí. Nicméně návrh rádiových rozhraní pro SBFD s sebou nese dodatečné náklady a vyšší složitost, protože vyžaduje implementaci laditelných RF filtrů na vstupu přijímače pro potlačení vlastního i cizího rušení. Musí se prověřit i koexistence sousedního kanálu používaných různými operátory v režimu SBFD. Je pravděpodobné, že se SBFD podaří reálně nasadit až v rámci standardu 6G, vzhledem k naznačeným úkolům a výzvám, které je potřeba dořešit.

V následujícím obrázku je vlevo znázorněna schematicky struktura rámce pro dvě sousedící základnové stanice s časovými sloty pro směry přenosu uplink (U, UL) a downlink (D, DL). Vpravo je pak schematicky znázorněna základnová stanice se dvěma sektory, jiná základnová stanice a mobilní terminály (UE). Pod nimi jsou pak číselně označeny možné interference mezi signály, které je třeba eliminovat pro maximalizaci přenosové výkonnosti:

1. Vlastní interference mezi vysílačem a přijímačem – redukováno konstrukčním řešením a ochranným intervalem mezi směry přenosu.
2. Interference mezi vysílačem a přijímačem různých sektorů téže základnové stanice – redukováno konstrukčním řešením, optimalizací přidělování časových poloh a systémem automatickým omezováním vysílacího výkonu.
3. Interference mezi vysílačem a přijímačem různých základnových stanic – redukováno konstrukčním řešením, optimalizací přidělování časových poloh a systémem automatickým omezováním vysílacího výkonu.
4. Interference mezi vysílačem a přijímačem terminálů připojených k různým základnovým stanicím – redukováno konstrukčním řešením, optimalizací přidělování časových poloh a systémem automatickým omezováním vysílacího výkonu.
5. Interference mezi vysílačem a přijímačem terminálů připojených k téže základnové stanici – redukováno konstrukčním řešením a ochranným intervalem mezi směry přenosu.

Obrázek 4: Znáornění možností flexibilního přidělování prostředků pro oba směry přenosu (Zdroj⁷)



2.3.3 Shrnutí rozdílů mezi sítěmi 5G a 6G

Další posun komunikace v reálném čase

- Zlepšení podpory pro IMS datový kanál
- Dostatečný výkon pro XR E2E
- Řešení řízení pro E2E XR, vč. rozšíření kapacity a lepší podpory QoS

AI/ML ve všech vrstvách komunikace

- Nasazení AI/ML pro rádiové rozhraní i jádro sítě, včetně efektivního trénování, správy dat a zajištění důvěryhodnosti

Zlepšená energetická účinnost

- Efektivnější rádiové rozhraní přizpůsobené pro úsporné režimy, včetně souvisejících AI/ML algoritmů
- Zajištění rámce pro redukci energie síťové infrastruktury

Architektura a provozní vylepšení

- Vylepšení pro SON / MDT, Edge Cloud, IMS datový kanál, femtobuňky, WAB atd.

MIMO a mobilita

- Podpora pro 64 (128) kanálů
- Lepší řízení rádiových svazků
- Robustnější mechanismy pro podporu mobility a nižší doby přerušování při přechodu mezi buňkami

Flexibilní duplexní režimy

- Vylepšené pokrytí uplinkem a snížení zpoždění pro nepárová pásma

⁷ Taking 5G-Advanced to the next level and bridging into the 6G era, White paper, 2024 Nokia.

- Zavedení dynamického TDD a konceptu SBF

Zařízení IoT s napájením energií z okolí

- Výzkum zařízení IoT s ultra-nízkým příkonem a jejich napájení radiovou energií z okolí (Ambient IoT)

Modelování kanálů pro nové případy použití

- Modely kanálů využitelné pro sledování objektů v okolí
- Modely pro pásma v rozsahu 7-24 GHz

NTN a UAV

- Podpora pro spolupráci se satelitním sektorem, včetně IoT
- Vylepšení pro UAV s podporu řízení a koordinace provozu

Vylepšení topologie

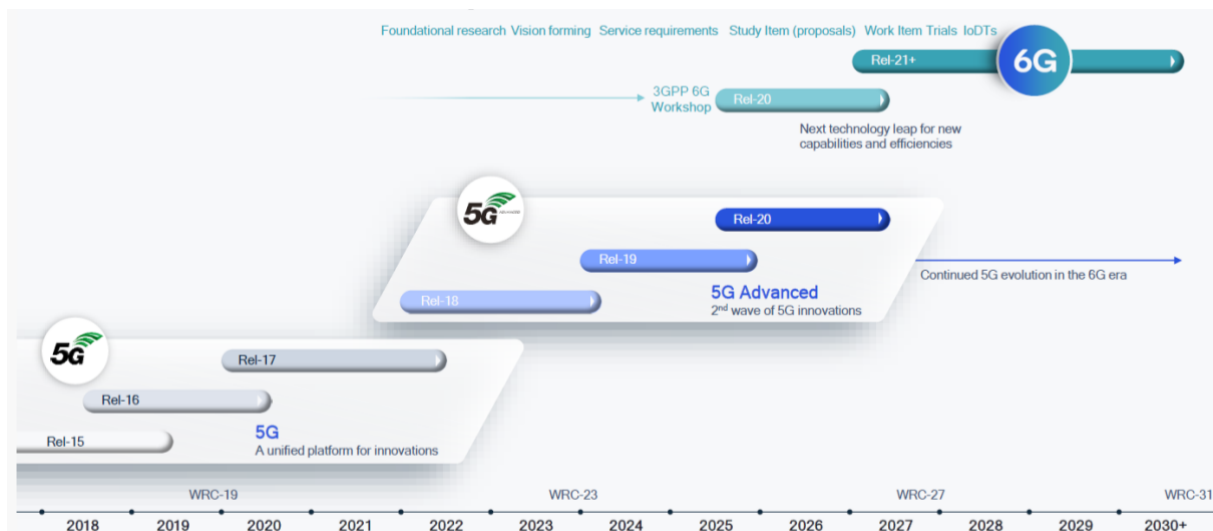
- Vylepšení RAN pro podporu 5G femtobuněk

256bitové zabezpečení algoritmy

- Zvýšení zabezpečení pro radiové rozhraní

Časový harmonogram postupných kroků při přechodu od 5G, přes 5G-Advanced k 6G ukazuje následující diagram. Je zřejmé, že podle plánu bude plně 6G verze standardu (Release) s číslem 21 s očekávaným vydáním v roce 2028.

Obrázek 5: Časový harmonogram postupných kroků při přechodu od 5G, přes 5G-Advanced k 6G (Zdroj⁸)



⁸ @QCOMResearch, 3GPP roadmap towards 6G, CEPT Workshop on 6G Mobile Communications, 30 June 2023

3 Využití kmitočtových pásem nad 100 GHz

Pásmo nad 100 GHz se dnes běžně nevyužívají ke komunikaci. Značná část tohoto spektra je určena pro aplikace pasivních radioastronomických služeb, pasivních služeb družicového průzkumu Země a pasivních služeb kosmického výzkumu. Vymezení podmínek pro mobilní či jiné komunikační sítě se očekává na Světové radiokomunikační konferenci až v roce 2031. Do té doby budou probíhat výzkumné práce, experimenty a diskuse v rámci odborné komunity.

3.1 Vymezení pásem nad 100 GHz

Dle Národní kmitočtové tabulky - Vyhlášky o plánu přidělení kmitočtových pásem⁹ se jedná o následující typy vln. V současných úvahách jsou ve hře pásma zhruba do kmitočtů něco málo nad 300 GHz, perspektivně případně až do 1 THz (sub-THz pásma).

Tabulka 3: Označení typů vln s extrémně krátkou délkou

Číslo pásma N	Symbole	Rozsah kmitočtů	Odpovídající názvy pásem
11	EHF	30 až 300 GHz	milimetrové
12	---	300 až 3000 GHz	decimilimetrové

Vysílání v řadě dílčích pásem nad 100 GHz je dnes zakázáno, protože jsou přidělena pasivní družicové službě průzkumu Země a službě kosmického výzkumu: 100-102, 109,5-111,8, 114,25-116, 148,5-151,5, 164-167, 182-185, 190-191,8, 200-209, 226-231,5, 250-252 GHz.

Jsou stanoveny některé další podmínky, např.:

- Pásmo 122-123 GHz (střední kmitočet 122,5 GHz) a 244-246 GHz (střední kmitočet 245 GHz) jsou určena pro průmyslové, vědecké a lékařské účely (ISM).
- V pásmech 105-109,5 GHz, 111,8-114,25 GHz a 217-226 GHz je využívání omezeno pouze na radioastronomii provozovanou v kosmu.
- V těch částech rozsahu 275-450 GHz, které jsou využívány radioastronomickými aplikacemi, mohou být vytvořeny podmínky (např. minimální separační vzdálenosti nebo vyloučené úhly) k zajištění ochrany radioastronomických observatoří před aplikacemi pozemní pohyblivé nebo pevné služby případ od případu.
- Využívání spektra v rozsahu 275-1000 GHz pasivními službami nebrání využívání tohoto spektra aktivními službami.
- Všechny kmitočty v rozsahu 1000-3000 GHz mohou být využívány aktivními i pasivními službami.

Reálné využití pásem nad 100 GHz pro mobilní sítě 6G a vyšší je předmětem výzkumu a do budoucna si vyžádá aktualizaci Národní kmitočtové tabulky, a to na základě usnesení mezinárodních koordinačních aktivit. K nim dochází v pravidelných intervalech 4 roky v rámci Světových radiokomunikačních konferencí, kdy poslední proběhla v roce 2023 (WRC-23).

⁹ Vyhláška č. 105/2010 Sb.

K dotčenému pásmu byla vydána Rezoluce č. 255¹⁰. Zde se konstatuje, že s ohledem na celosvětové požadavky na rozvoj mobilních telekomunikačních služeb, požadavky na různé scénáře použití a aplikace, jako je vylepšené mobilní vysokorychlostní připojení, intenzivní komunikace s množstvím rozptýlených zařízení (senzorů) a mimořádně spolehlivá komunikace s nízkým zpožděním budou potřeba (po roce 2030 a dále) větší souvislé bloky spektra, než jsou v nyní dostupných frekvenčních pásmech.

Proto je třeba s předstihem dokončit studium využitelnosti, sdílení s jinými službami apod. tak, aby bylo možné přijmout finální závěry na Světové radiokomunikační konferenci v roce 2031, a to s přihlédnutím k technickým a provozním charakteristikám pozemních systémů IMT, včetně pokroku v technologiích a spektrální účinnosti, předpokládaným scénářům nasazení pro systémy IMT-2030 a souvisejícími požadavky na vysoký datový provoz i k ochraně služeb, kterým je kmitočtové pásmo přiděleno primárně. Jde o pásma: 102–109,5 GHz, 151,5–164 GHz, 167–174,8 GHz, 209–226 GHz a 252–275 GHz.

Na toto usnesení navazuje Rezoluce č. 721¹¹, které se týká navazujícího frekvenčního pásma 275-325 GHz.

Veškeré přípravné práce, studie využitelnosti, souběhu služeb atd. pro uvedená pásma by měly být připraveny pro jednání Světové radiokomunikační konference v roce 2031.

3.2 Vlastnosti pásem nad 100 GHz

Rádiová komunikace v subTHz pásmech nabízí díky velké souvisle využitelné šířce pásma potenciál vysoké přenosové kapacity pro datové služby, který lze využít v různých aplikacích. Nicméně využití těchto kmitočtových pásem je silně ovlivňováno jak fyzikálními zákonitostmi (šíření elektromagnetické vlny), geometrií vlastního hardwaru (např. tvar a rozměry antén), ale i omezenou výkonností současných obvodů pro zpracování signálu.

Tyto fyzikální zákonitosti se promítají do výkonové bilance rádiového spoje, která bude silně ovlivňovat primární požadavek vysoké přenosové rychlosti v těchto sítích. Jde především o minimální úroveň výkonu na vstupu přijímače a rovnoměrný útlum v celé šířce pásma přenosu (toto lze kompenzovat na základě znalostí parametrů přenosového kanálu). Pro dosažení minimální požadované výkonové úrovně na straně přijímače lze v rámci výkonové bilance pro danou vzdálenost a kmitočet měnit následující parametry: úroveň vysílaného výkonu, zisk vysílací antény, zisk přijímací antény.

Z hlediska šíření elektromagnetické vlny v subTHz pásmech je nutné volit taková kmitočtová pásma, kde dochází k minimálnímu útlumu na molekulách kyslíku (O₂) a molekulách vody (H₂O). Jako perspektivní se jeví kmitočtová pásma cca. 80 – 100 GHz, 140 – 160 GHz a 220 – 240 GHz. Nicméně i zde se bude projevovat vysoký útlum šíření volným prostorem, který je přímo závislý na kvadrátu kmitočtu a kvadrátu vzdálenosti. Toto má zásadní vliv na výkonovou bilanci rádiového spoje. Dalším specifickým je malá hloubka vniku elektromagnetické vlny do materiálu (nízký průnik vlny překážkami), při interakci elektromagnetické vlny s materiálem dochází k odrazům a rozptylu elektromagnetické vlny na rozhraní vzduch – materiál. Některé zmíněné vlastnosti a omezení dále rozvedeme. Využitelnost pásma nad 100 GHz se mimo poměrně velké množství vědeckých článků zabývá i souhrnná zpráva ITU-R¹².

3.2.1 Útlum prostředí

Při zvažování využití vyšších kmitočtových pásem je nutné vzít v první řadě v úvahu fakt nárůstu útlumu šířením volným prostorem. Při posunu komunikace z běžně využívaných pásem pro mobilní komunikaci řádově jednotky GHz do pásem stovek GHz, tedy na stokrát vyšší frekvence naroste útlum šíření volným prostorem o 40 dB. Na vyšších frekvencích lze zvýšený útlum kompenzovat anténami s vysokým ziskem, které soustředí vyzařovaný výkon do užšího úhlového svazku. To bude rozdíl oproti dnešním typickým řešením antén pro základnové stanice, kdy se používají antény pokrývající 120° vysílací sektor (typicky 3 sektory, tj. 3 antény na buňku).

Samozřejmě existuje více možností pro realizaci antén s vysokým ziskem, ale realizovatelnost pro rozsah stovek GHz není vždy triviální, mimo jiné z důvodu splnění požadavku širokopásmového provozu. Například antény složené z pole fázovaných

¹⁰ RESOLUTION 255 / WRC-23: Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications (IMT) identification in the frequency bands [102-109.5 GHz, 151.5-164 GHz, 167-174.8 GHz, 209-226 GHz and 252-275 GHz] for the future development of IMT

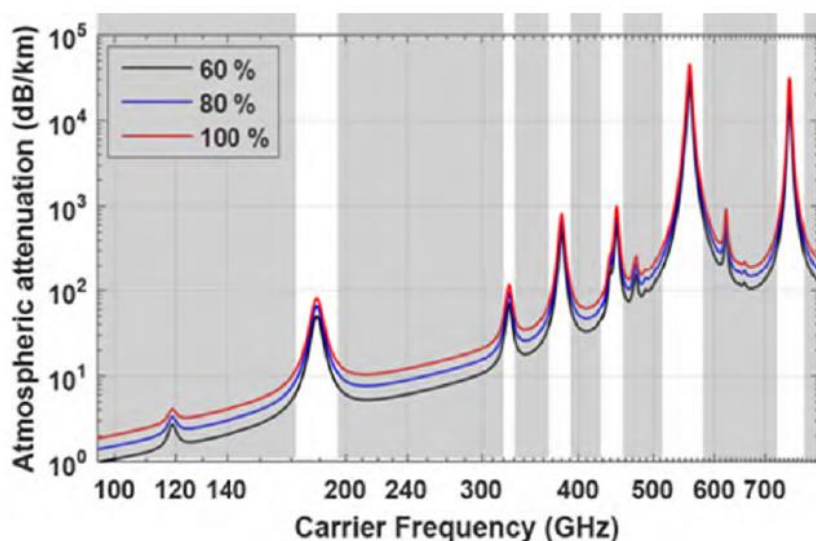
¹¹ RESOLUTION 721 / WRC-23: Studies on potential new allocations to fixed, mobile, radiolocation, amateur, amateur-satellite, radio astronomy, Earth exploration-satellite (passive and active) and space research (passive) services in the frequency range 275-325 GHz

¹² Report ITU-R M.2541-0 (05/2024): Technical feasibility of IMT in bands above 100 GHz

článků jsou dobře zavedenou technologií na nižších frekvencích. Tento přístup, který se také používá v systémech 5G, se stává náročnějším, pokud navrhujeme systémy s většími dílčími šířkami pásma¹³.

Druhý důležitý rozdíl mezi nízkými a vysokými frekvencemi představuje atmosférický útlum. Ztráty způsobuje absorpce, která plynule narůstá a dále se projevuje v podobě několika spektrálně úzkých absorpčních vrcholů, jak ukazuje následující graf, typicky v oblasti 183 GHz, 325 GHz, 380 GHz, 450 GHz, 550 GHz a 760 GHz. Mezi těmito absorpčními vrcholy je ovšem možno umístit dostatečně široká pásma pro komunikaci¹⁴.

Obrázek 6: Graf znázorňující kmitočtovou závislost přídavného útlumu způsobeného průchodem elektromagnetické vlny atmosférou pro různé relativní vlhkosti prostředí^{15,16}



Avšak i v oblasti s velkým útlumem mohou fungovat systémy pro velmi krátký dosah (několik desítek metrů) a bezpečnou komunikaci (útlum brání interferencím či případnému odposlechu z větší vzdálenosti). Nicméně dosti velká část spektra až do téměř 300 GHz vykazuje přídavný útlum menší než 10 dB/km. Tyto oblasti frekvenční pásma lze použít pro vysokorychlostní 6G mobilní bezdrátové sítě s dosahem pokrytí až 1 km, možná i více. Velká část spektra mezi 600 a 800 GHz vykazuje pak extrémní útlumy 100 až 200 dB/km, které způsobí při potenciálním využití nutnost snížení poloměru buňky na 100 m. Dá se však předpokládat vývoj a využití elektronicky řízených směrových antén s velmi vysokým ziskem, které budou rozměrově malé a zřejmě umožní efektivnější využití i takto vysokých pásem¹⁷.

Modelování útlumu prostředí je obsahem doporučení ITU-R P.676-13¹⁸.

Je velmi dobře známo, že hydrometeory, jako je déšť, kapky mlhy, sníh a kroupy způsobují značný útlum pro frekvence nad 10 GHz. Např. signály v pásmu 73 GHz jsou zeslabovány o 10 dB/km při intenzitě srážek 50 mm/h. Zajímavé je, že déšť při zvýšení frekvence ze 100 GHz na 500 GHz nezpůsobí již žádný extrémní nárůst útlumu, jak je patrné z dalšího grafu. Pro

¹³ T. S. Rappaport et al., "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in IEEE Access, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522

¹⁴ Josep M. Jornet, Edward W. Knightly, Daniel M. Mittleman: Wireless communications sensing and security above 100 GHz. Nature Communications | (2023), <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36621-x>. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-36621-x>

¹⁵ T. S. Rappaport, J. N. Murdock, and F. Gutierrez, Jr., "State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications," Proc. IEEE, vol. 99, no. 8, pp. 1390-1436, Aug. 2011.

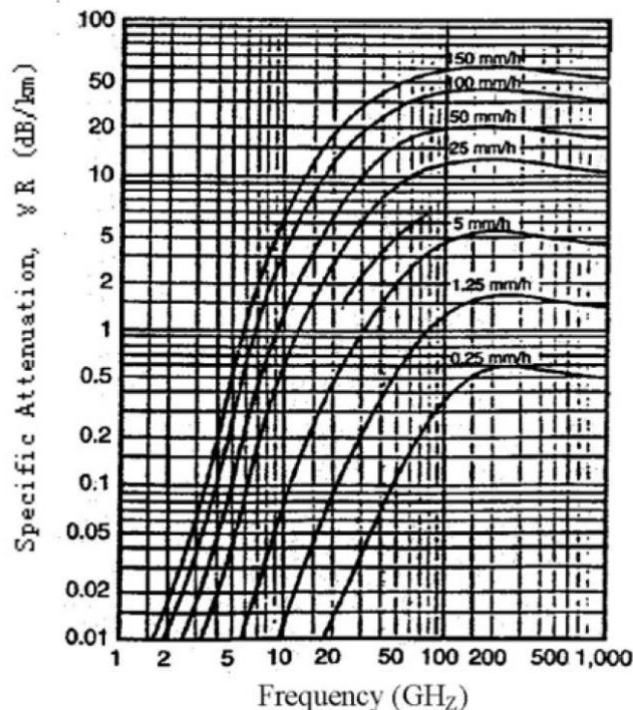
¹⁶ J. Ma, R. Shrestha, L. Moeller, and D. M. Mittleman, "Invited article: Channel performance for indoor and outdoor terahertz wireless links," APL Photon., vol. 3, no. 5, Feb. 2018.

¹⁷ Josep M. Jornet, Edward W. Knightly, Daniel M. Mittleman: Wireless communications sensing and security above 100 GHz. Nature Communications | (2023), <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36621-x>. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-36621-x>

¹⁸ Doporučení ITU-R P.676-13 (08/2022): Attenuation by atmospheric gases and related effects

předpokládané velikosti buněk ve městech v nižších stovkách metrů půjde vliv hydrometeorů kompenzovat přiměřeným ziskem antény (dosažitelný tvarováním svazků anténního pole s mnoha prvky)¹⁹.

Obrázek 7: Frekvenční závislost útlumu v dB/km způsobeného srážkovou činností dané intenzity v mm/hod^{20,21}



Navzdory starším konvenčním názorům se nyní ukazuje, že atmosféra není neprůchozí pro signály v pásmu 100–1000 GHz, pokud se vyhneme špičkám útlumu způsobeným absorpcí. Dá se předpokládat, že směrová, elektronicky říditelná anténní pole s vysokým ziskem umožní mobilní komunikaci až do 1 THz, kde lze překonat útlumy, o kterých se dříve předpokládalo, že jsou neúnosné. Nutno však připomenout, že všechny aktivní komunikační služby, které využijí frekvence nad 100 GHz, musí být navrženy tak, aby nedocházelo k rušení významně existující komunity pasivního sledování pro astronomické účely a monitorování planety Země. Úzce směrové antény tomu mohou napomáhat, je však třeba dále zkoumat meze pro stanovení limitů rušení nebo vliv postranních laloků antén, aby se zabránilo interferenci s nadzemní satelity.

3.2.2 Šíření signálu

Předmětem výzkumu je stále šíření signálů nad 100 GHz v zastavěném území a vliv různých stavebních materiálů. V těchto oblastech frekvencí je nutno řešit i vliv např. drsnosti povrchu a jemu odpovídající rozptylové parametry. Ještě mnoho měření v městských, příměstských a venkovských oblastech za různých podmínek bude nutno provést pro studium charakteristik kanálu a jeho následné modelování (odhad parametrů)²².

V typickém vnitřním prostředí konvenční bezdrátové systémy pracují na frekvencích, kde je absorpce u mnoha materiálů nízká a kde je mnoho povrchů hladkých ve srovnání s (delší) vlnovou délkou. Obecně se předpokládá, že mezi vysílačem a přijímačem vzniká vícenásobné šíření s množstvím signálových cest, takže příjem v jakémkoli místě je tvořen superpozicí mnoha různě zpožděných vln. Naproti tomu bezdrátový kanál na frekvencích blízkých 1 THz je úplně jiný. Typicky se šířící vlna je zeslabena o hodně vyšším útlumem a při interakci s většinou povrchů nedochází k dostatečně významným odrazům. Výsledkem je, že vnitřní i venkovní prostředí jsou obvykle mnohem „řidší“ a vysílač a přijímač spojuje méně signálových cest.

¹⁹ T. S. Rappaport et al., "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in IEEE Access, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522

²⁰ T. S. Rappaport, J. N. Murdock, and F. Gutierrez, Jr., "State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications," Proc. IEEE, vol. 99, no. 8, pp. 1390-1436, Aug. 2011.

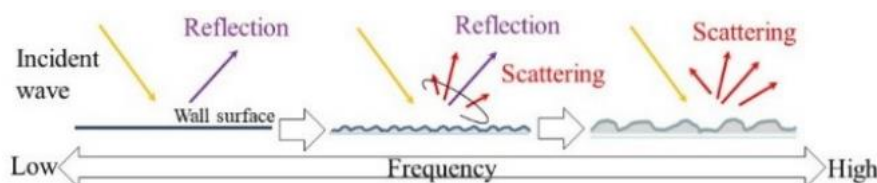
²¹ Z. Qingling and J. Li, "Rain attenuation in millimeter wave ranges," in Proc. 7th Int. Symp. Antennas, Propag. EM Theory (ISAPE), Oct. 2006.

²² T. S. Rappaport et al., "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in IEEE Access, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522

Navíc kvůli „neprůhlednosti“ mnoha objektů včetně lidí, jsou obvykle blokovány cesty přímé viditelnosti (LOS), což může představovat problém pro udržení konektivity. Nicméně vzhledem k milimetrové vlnové délce není situace tak dramatická, jako u optického záření. Difuzní rozptyl z drsných povrchů lze v řadě případů využít k udržení spojení, i když při nižším odstupu signálu od šumu.

Následující schéma názorně ukazuje, jak se stejný povrch (zeď pokrytá omítkou a nátěrem) jeví z pohledu signálu s různou vlnovou délkou. Pro vlnové délky, které jsou podstatně větší, než nerovnost povrchu (zrnka v materiálu omítky a nátěru), se jeví povrch jako hladký a dochází primárně k odrazům od plochy zdi. Naopak u vlnových délek kratších a srovnatelných s drsností povrchu, dochází k rozptylu signálu do blízkého okolí.

Obrázek 8: Frekvenční závislost odrazu a rozptylu, jak se jeví stejný materiál (povrch zdi) pro různě vysoké frekvence²³



Část signálu proniká zvenku do interiéru budov, což je velmi důležité pro vnitřní příjem signálu mobilních sítí (in-door), včetně příjmu uvnitř dopravních prostředků (vlak, autobusy). S rostoucí frekvencí jde ovšem o signál s nižší a nižší intenzitou, takže obecně vyšší frekvence nejsou pro pokrytí interiéru vhodné. Tento problém mohou vyřešit opakovače signálu, nebo umístění vnitřních základnových stanic v podobě femto- a piko-buněk.

Hodnoty útlumu jsou různé pro různé konstrukční materiály budov (skleněné výplně, cihlové zdi, železobetonové či ocelové konstrukce). Porovnání pro sklo (obyčejné bez pokovení) a obvodovou zeď (cihlová s omítkou) jsou uvedeny v následujících tabulkách pro tři různé frekvence. V řádcích je uvedena různá polarizace vln (V/H) a ve sloupcích vedle střední hodnoty (Mean) i směrodatná odchylka (STD).

Tabulka 4: Hodnoty útlumu při průniku do interiéru pro sklo (vlevo) a zeď (vpravo) pro tři různé hodnoty frekvencí (Zdroj²⁴)

Pol.	28 GHz		73 GHz		140 GHz	
	Mean (dB)	STD (dB)	Mean (dB)	STD (dB)	Mean (dB)	STD (dB)
V-V	1.53	0.60	7.17	0.17	10.22	0.22
V-H	20.63	1.32	37.65	0.53	46.92	2.05
H-V	22.25	0.88	36.92	1.11	37.37	1.79
H-H	1.48	0.54	7.15	0.44	10.43	0.55

Pol.	28 GHz		73 GHz		140 GHz	
	Mean (dB)	STD (dB)	Mean (dB)	STD (dB)	Mean (dB)	STD (dB)
V-V	4.15	0.59	2.57	0.61	8.46	1.22
V-H	25.59	2.85	24.97	0.58	27.28	1.77
H-V	25.81	0.65	23.38	0.65	26.00	1.42
H-H	3.31	1.13	3.17	0.68	9.31	0.61

Experimenty potvrzují teoretické předpoklady, a proto nelze očekávat, že by se pásma nad 100 MHz používala pro kombinované pokrytí vnější a vnitřní. Buď půjde o pokrytí vnějších, jasně vymezených prostranství (např. náměstí), nebo pokrytí interiéru interními základnovými stanicemi (přístupovými body), podobně, jako se pokrývají interiéry sítěmi Wi-Fi.

Vlastnosti šíření elektromagnetických vln v oblasti blízké 1 THz, lépe než vlny v nižších oblastech spektra, vytvářejí podmínky pro detekci polohy objektů s očekávanou přesností na centimetry, a to dokonce i v prostředí bez přímé viditelnosti (NLOS). Pro praktické využití je ovšem třeba projít ještě dlouhou cestou. Připravované specifikace 6G ale již dnes počítají velmi vážně s touto aplikační oblastí a uvádějí ji jako významnou přidanou hodnotu.

²³ Minoru Inomata; Wataru Yamada; Nobuaki Kuno; Motoharu Sasaki; Koshiro Kitao; Mitsuki Nakamura; Hironori Ishikawa; Yasuhiro Oda - Scattering Effect up to 100 GHz Band for 6G. 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=9391482>

²⁴ T. S. Rappaport et al., "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in IEEE Access, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522

3.2.3 Antény pro pásmo nad 100 GHz a jejich dopady na bilanci spoje

Zvýšení nosné frekvence vede k adekvátnímu snížení vlnové délky a tím i k menším rozměrům anténních prvků. Pro orientaci uvádíme v tabulce postupné snižování délky vlny s narůstající frekvencí.

Tabulka 5: Příkladů vlnové délky signálů na vybraných frekvencích

Frekvence v GHz	Vlnová délka
80	3,75 mm
140	2,1 mm
220	1,3 mm

Velikost vlastní antény i vzdálenosti mezi jednotlivými prvky se zmenší, což umožní navrhnout více-anténní architektury s velmi velkým počtem antén v jednom anténním poli (s velkou hustotou prvků), tedy docílit prostorovou diverzitu pro masivní MIMO a dobré podmínky pro účinné elektronické tvarování svazků (dosažení vysokých zisků antén v požadovaném směru a omezení interferencí v ostatních směrech).

V uvažovaných pásmech lze předpokládat užití následujících typů antén:

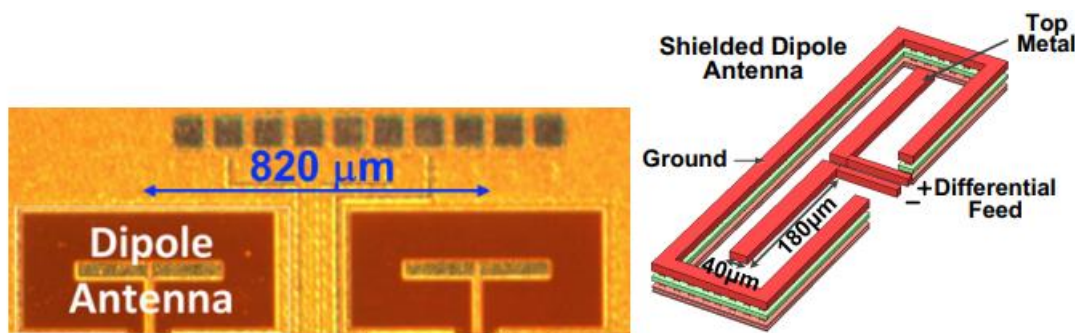
- Trychtýřové antény
- Parabolické antény
- Patch antény
- SIW antény (Surface Integrated Waveguide)

Trychtýřové antény budou vhodné pro testovací měření a spojení bod – bod. To samé platí pro parabolické antény, u kterých jejich vysoký zisk je na úkor šířky svazku (čím větší zisk, tím menší šířka svazku). Parabolická anténa je tedy vhodná také pro spojení bod – bod.

Pro komerční nasazení 6G se jeví jako nejvhodnější antény/anténní řady planárního typu (patch antény). Pro zvýšení zisku lze jednotlivé antény sdružovat do anténních řad / polí. Takováto geometrie zajistí úzký směrový svazek a tím i vysoký zisk antény. Zároveň se v sítích 6G předpokládá využití tvarování svazků (beamforming), stejně jako u sítí 5G. To představuje nadstavbu na fázovanými anténními řadami, kde lze operativně měnit parametry anténního svazku / svazků dle požadavků sítě na zajištění optimálního spojení.

Technologie výroby planárních struktur je vhodná i pro sériovou výrobu antén (např. leptací technologie). Planární antény, případně SIW antény se integrují přímo v Si čípech a lze tak realizovat elementární RF TX/RX modul pro sestavu anténní řady určené pro beamforming. U takovýchto typů antén lze optimalizovat zisk a směrovou charakteristiku tak, aby byl optimálně pokryt zájmový prostor (např. kancelářské prostory).

Obrázek 9: Příklad části anténního pole integrovaného na čipu s miniaturními dipóly pro pásmo 210 GHz²⁵



Na obrázku je pro představu znázorněna fotografie matrice dvojice stíněných dipólových antén na čipu, vyrobených technologií 32 nm CMOS SOI. Navržena je pro cílovou frekvenci 210 GHz. Vzdálenost mezi anténami je pouze 820 µm a každá větev dipólu je dlouhá pouze 180 µm.

V takových případech, s ohledem na vlnové délky, je nutné brát do úvahy rozměry i vlastní geometrii zařízení (vysílač / přijímač) – typicky v mobilním terminálu bude uspořádání součástek v okolí antény silně ovlivňovat přenosové vlastnosti (absorpce, odrazy, rozptyly). Zde je nutné vynaložit ještě mnoho výzkumné a experimentální práce.

Typ (konstrukce) antén pro použití v oblasti 6G (subTHz pásma) bude dán požadavky konkrétní úlohy (včetně zajištění dostatečné úrovně výkonu na přijímací straně). Jednotlivé konstrukce se budou lišit dle oblasti použití (např. IoT, Short-Range Communications, On-Body Communications, wireless AP atd.).

S odvoláním na parametry ovlivňující výkonovou bilanci radiového spoje lze konstatovat, že dosah takového radiového spoje na daném kmotočtu lze ovlivnit vysílacím výkonem a ziskem jak vysílací, tak přijímací antény. Pokud zahrneme do úvah vedle parametrů ovlivňujících výkonovou bilanci i legislativní omezení, lze předpokládat, že v rámci podmínek daného pásma bude regulováno EIRP (ekvivalentní izotropický vyzářený výkon), který představuje součin výkonu a zisku vysílací antény. Z toho plyne, že zvyšování zisku antén za účelem kompenzace vysokého útlumu prostředí má své limity a nelze na něj spoléhat bez výhrad.

3.3 Potenciální vliv bezdrátové komunikace v pásmech nad 100 GHz na lidský organismus

Pásma uvažovaná v oblasti 100 až 300 GHz pro síť 6G patří do stejného okruhu neionizujících typů záření, jako již dříve posuzovaná pásma při nástupu 5G. Zde odkazujeme na informaci NRL.²⁶

Je zřejmé, že technologie 6G budou postupně nasazovány i do nižších pásem využívaných dnešními mobilními systémy, včetně pásma 26 GHz. Účinky na lidský organismus v těchto pásmech se nebudou lišit od účinků současně provozovaných systémů 4G a 5G, jelikož základní přenosové principy a vysílací limity výkonu jsou shodné.

Základním projevem expozice v plánovaném frekvenčním pásmu sítí šesté generace, obdobně jako v přechodných generacích a ostatních pásmech využívaných mobilními sítěmi, je ohřev tkáně. S ohledem na vysoké frekvence a nízkou hloubku vniku vlny do tkáně je primární ohřev působen na povrchu těla, avšak díky vysoké prokrvenosti pokožky může působit i ohřev objemový. Působený ohřev je biochemicky hlavním rizikovým faktorem expozice²⁷, slouží však i jako výhodný dozimetrický faktor (indikace případné zvýšené intenzity záření), jelikož expozice bez ohřevu není možná. Expozici lze tedy omezit nejvyšším povoleným ohřevem pokožky, který je pro běžné expoziční scénáře přímo úměrný plošné hustotě energie

²⁵ Z. Wang et al., "A CMOS 210-GHz fundamental transceiver with OOK modulation," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 49, no. 3, pp. 564–580, Mar. 2014.

²⁶ Informace č. 20/2019 Národní referenční laboratoře (NRL) pro neionizující elektromagnetická pole a záření - Rizika expozice člověka elektromagnetickému poli v telekomunikační síti páté generace

²⁷ Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics 118(5):483-524; 2020.

dopadající na povrch těla. Pro expozici dosahující alespoň několika minut, lze za konzervativní expoziční limit považovat hustotu zářivého toku 10 W/m^2 ²⁸, tedy hodnotu používanou i v rámci frekvenčních pásem sítí čtvrté a páté generace.

Specifikem sítí šesté generace je použití vyšších frekvencí. S ohledem na vysoké ztráty volným prostorem lze tedy oproti sítím předchozí generace a nižším pásmům předpokládat nutnost využití vysoce směrových svazků. Zvolíme-li jako obecný fyzikální model Gaussův svazek, bude hustota zářivého toku (dozimetrická veličina) v centru vyzařující apertury (nejhorší expoziční scénář) $S_0 \sim D^2/A^2$ přímo úměrná kvadrátu vzdálenosti D mezi vysílačem a přijímačem a nepřímo úměrná kvadrátu plochy A vysílačící apertury. Jelikož u běžných systému používajících směrový svazek, bude, bez ohledu na frekvenci, plocha A úměrná kvadrátu vlnové délky, vyplývá odtud, že při požadavku na stejnou bitovou rychlost, stejnou šířku pásma a stejnou konstrukci přijímače, bude hustota zářivého toku nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky.

Nepřímá úměrnost maximální expozice na čtvrté mocnině vlnové délky může znamenat, že anténní systémy se směrovým svazkem, které jsou v sítích čtvrté a páté generace považovány za hygienicky nevýznamné, mohou na vyšších frekvencích uvažovaných pro sítě šesté generace být expozičně významné, pokud by exponované osobě byla dovolena expozice v blízkosti apertury.

Nicméně dopady uvažovaných pásem a využití úzce směrových svazů jsou a v následujícím období budou předmětem intenzivního výzkumu, a to i v souladu s tím, jak se budou formovat názory na využití pásem nad 100 GHz a bude probíhat postupný standardizační proces. Jeho součástí budou i adaptivní systémy pro cílené směřování svazků, využívající cesty šíření s minimálními ztrátami, které ve výsledku zajistí soustředění výkonu mimo lidské tělo, představující pro signál vysoký útlum. Velká část aplikací, zejména pro vnitřní pokrytí, bude také pracovat s malým vyzářeným výkonem a lze tedy předpokládat, že expozice bude bezpečně pod úrovní dnes známých hygienických limitů.

Je zřejmé, že musí být provedeny pečlivé studie k analýze dopadů, který má záření v oblasti řádově THz na organismy. Zároveň se nabízí otázka, zda by takové záření mohlo být v některých případech použito jako bezpečnější a dostatečně účinná náhrada za metody využívající ionizující záření, jako je rentgenové záření a CT/PET skenování²⁹.

²⁸ Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics 118(5):483-524; 2020.

²⁹ T. S. Rappaport et al., "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in IEEE Access, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522

4 Perspektivy využití pásma nad 100 GHz, analýza regulačních a normativních aspektů

4.1 Shrnutí fyzikálních východisek a očekávaných vlastností

4.1.1 Vlastnosti pásma

Kmitočtová pásma nad 100 GHz s omezením shora na kmitočtu 1 THz (sub-THz pásma, zatím se však počítá s reálným využitím do cca 300 GHz) patří do skupiny milimetrových až sub-milimetrových vln, dle posledních výsledků výzkumu využitelných pro přenos ultra vysokými přenosovými rychlostmi. Toto pásmo bylo identifikováno jako jedno z pásem pro rozvoj mobilních sítí 6G po roce 2030.

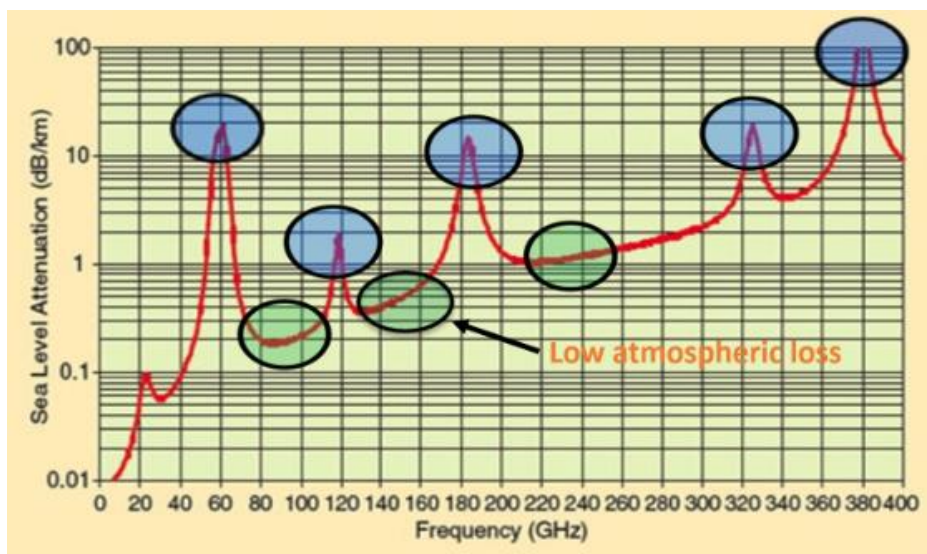
Pro kmitočtová pásma milimetrových vln je typický velmi omezený dosah v důsledku převažujícího charakteru šíření na přímou viditelnost a vysokého útlumu prostředí. Tato skutečnost současně s očekávanými malými rozměry anténních polí (dáno krátkými vlnovými délkami) povede k využití zejména pro pokrytí interiérů a relativně malých, ohraničených oblastí (stadiony, náměstí apod.). Rozšíření využití pásma nad 100 GHz je možné realizovat pomocí rekonfigurovatelných inteligentních povrchů (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS) umožňujících řízeně pokrýt i malé oblasti mimo přímou viditelnost. Toto se jeví vhodné například v průmyslu.

Různá frekvenční pásma trpí různou atmosférickou absorpcí (např. absorpcí molekul kyslíku a vody), což má za následek přidavné ztráty úrovně signálu při šíření volným prostorem. Kromě stávajícího využití spektra pro aplikace s krátkým dosahem v pásmu 60 GHz, budou pravděpodobně použita pro komunikaci na velmi malou vzdálenost (WLAN, WPAN) i pásma 120, 183, 325 a 380 GHz (modré kroužky v grafu). Graf také ukazuje pásma 77, 140 a 240 GHz (zelená kolečka), která vykazují pouze 1 dB/km nebo méně ztráty oproti útlumu šířením volným prostorem a jsou vhodná pro širokopásmová mobilní zařízení s delším dosahem a pro aplikace ve fixním bodě.

Kanály nad 92 GHz jsou charakteristické nízkou vlnovou délkou, velkou šířkou pásma a úzkým vyzařovacím paprskem. Kanál tedy bude citlivý na změny v časové, frekvenční i prostorové doméně a dá se očekávat, že bude nestacionární, tedy parametry budou značně proměnné v čase. Kromě toho se nestacionarita může projevit v různém způsobem v různých scénářích, což bude klást vysoké nároky na adaptivní metody implementované v přijímači a vysílači a na řízení přístupu k radiovým zdrojům.³⁰

³⁰ Report ITU-R M.2541-0 (05/2024): Technical feasibility of IMT in bands above 100 GHz

Obrázek 10: Graf ukazující útlumové špičky (modř) způsobené absorpcí atmosféry a okna (zeleně)³¹



Shrnutí vlastností subTHz pásem:

- Vysoký útlum volným prostorem – útlum na molekulách kyslíku a molekulách vody
- Jako nejvhodnější komunikační pásma se jeví 80 GHz, 140 GHz, 220 GHz
- Vhodné pro komunikace na krátké vzdálenosti (short-range communications), typicky jednotky až dolní desítky metrů, za určitých podmínek stovky metrů (anténní řady) až jednotky km (např. při použití parabolických antén)
- Vhodné pro vnitřní (in-door) aplikace, kde nedochází k dynamickým změnám mikroklimatu (vlhkost)
- Nízký průnik materiálem – dochází k rozptylu na rozhraní vzduch/materiál
- Vysoký efekt rozptylu vlny na materiálu (drsnost materiálu) – se zvyšujícím se kmitočtem se rozptyl zvyšuje – tento negativní vliv v oblasti komunikace se využívá např. při diagnostice materiálů

4.1.2 Splnění očekávaných vlastností

Dle specifikace IMT-2030, která udává vize ITU-T pro rozvoj sítí směrem k roce 2030, se od sítí 6G očekávají určité klíčové vlastnosti. To, jak pásma nad 100 GHz umožní jejich splnění, uvádí souhrnně následující tabulka.

Tabulka 6: Splnění očekávaných vlastností sítí 6G dle IMT-2030 s případným použitím pásem nad GHz

Klíčové vlastnosti	Očekávání pro 6G	Vztah k pásmům nad 100 GHz
Maximální rychlost přenosu dat	50, 100, 200 Gbit/s	Tyto rychlosti jsou reálně dosažitelné s pásmy šířky 1 GHz a více, což je možné pouze v oblasti kmitočtů nad 100 GHz.
Běžně dostupná přenosová rychlost	min. 300/500 Mbit/s	Rychlosti jsou splnitelné i v nižších oblastech spektra, záleží však na množství současně komunikujících terminálů.
Hustota připojení	až 100 mil. zařízení na km ²	Hustota zařízení přímo souvisí s šířkou spektra, ale záleží i na mnoha dalších faktorech.

³¹ Y. Xing and T. S. Rappaport, "Propagation Measurement System and Approach at 140 GHz-Moving to 6G and Above 100 GHz," 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647921. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=8647921>

Zpoždění mezi koncovými zařízeními	0,1 – 1 ms	Zpoždění nesouvisí přímo s přenosovou rychlostí a šířkou spektra. Záleží na délce rámce datové komunikace a procedurách datové výměny mezi základnovou stanicí a terminálem.
Hustota provozu	30/50 Mbit/s na 1 m ²	Tato hustota provozu je reálně dosažitelné s pásmy šířky 1 GHz a více, což je možné pouze v oblasti kmitočtů nad 100 GHz.
Mobilita	500–1000 km/hod	Nesouvisí přímo s šířkou spektra, spíše s optimalizací rádiové vrstvy a komunikačního protokolu.
Přesnost určování polohy	1 – 10 cm	Přesnost určování polohy blížící se k 1 cm je možná pouze v oblasti extrémně krátkých vln, tedy v oblasti kmitočtů nad 100 GHz.

4.1.3 Naplnění aplikačních oblastí

Dle doporučení ITU-R M.2160-0 (11/2023) jsou definovány tři základní a tři integrující oblasti, které jsou dle očekávání naplnitelné v kontextu pásem nad 100 GHz dle uvedené tabulky.

Tabulka 7: Naplnění očekávaných aplikačních oblastí sítí 6G dle IMT-2030 s případným použitím pásem nad GHz

Oblasti uplatnění	Očekávané aplikace	Pokrytí potřeb pásmy nad 100 GHz	Pozn.:
Pokročilé mobilní vysokorychlostní sítě	Video 8k, 360° video, XR, multimodální komunikace apod.	Přenosová kapacita s vysokou rezervou pro velkou hustotu terminálů.	Splnitelné i v nižších frekvenčních pásmech.
Vysoce spolehlivá komunikace s nízkým zpožděním	Průmysl, doprava, energetika.	Přímo nesouvisí s těmito pásmy.	Předpokládáme spíše využití v interiérech (výrobní haly apod.).
Masivní komunikace mezi zařízeními	Internet věcí, senzory, inteligentní města a budovy.	Nepředpokládá se využití těchto pásem.	Spíše jde o malé objemy dat mezi zařízeními s velkou hustotou.
Všudypřítomná komunikace	Plné pokrytí území i interiéru. Komunikace mezi roboty a prvky AI.	Zde může jít o značné objemy dat, kde je široké pásmo výhodou.	
Integrovaná detekce a určování polohy	Sledování polohy a detekce objektů.	Pro přesnosti 1 cm a méně jsou nutné extrémně krátké vlny.	
AI a komunikace	Výměna dat pro trénování, využití AI pro optimalizaci sítě.	Zde může jít o značné objemy dat, kde je široké pásmo výhodou.	

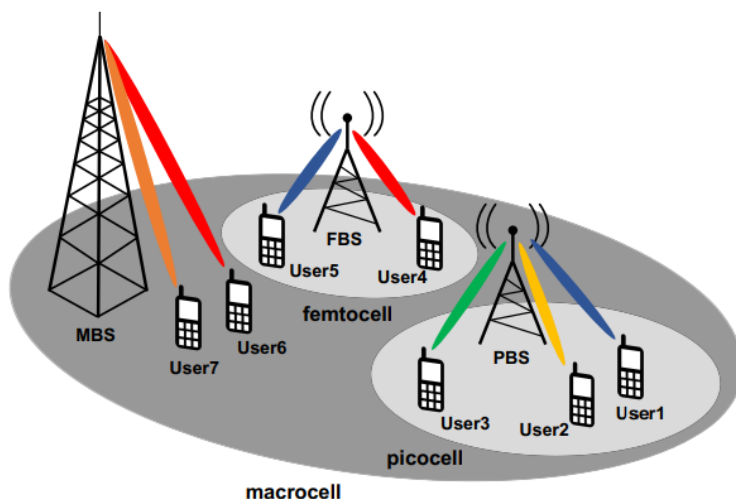
4.2 Scénáře využití a možnosti licencování nových pásem pro 6G sítě

4.2.1 Radiová přístupová síť

V souladu s potřebou konektivity s vysokou přenosovou rychlostí lze realizovat infrastrukturu pomocí základnových stanic s velkým počtem antén (>100) a tvarováním svazků poskytujících vysokorychlostní bezdrátový přístup pro uživatele rozprostřenými v prostoru s využitím více prostorových kanálů současně od různých základnových stanic. To do určité míry omezuje nutnost využití extrémně širokých pásem, protože existující pásma jsou velmi efektivně sdílena velkým množstvím paralelních komunikačních relací (prostorový multiplex) a na poměrně dlouhou dobu může být saturováno využitím pásma 26 GHz.

V souladu s trendem využívání vyšších kmitočtových pásem bude docházet k zahušťování vybraných oblastí signálem ze základnových stanic pokrývajících lokálně omezenou oblast (femto-cell, pico-cell), přičemž plošné pokrytí oblastí zajistí jako dosud základnové stanice ve standardních (nižších a středních) kmitočtových pásmech (macro-cell), jak naznačuje následující obrázek.

Obrázek 11: Znárodnění globálního pokrytí za pomoci velkých buněk (macro-cell) a lokální doplňování konektivity extrémně malými buňkami (femto-cell, pico-cell)³²



Obecně se pro síť 6G budou využívat jak stávající pásma mobilních sítí, tak pásma nová. Po roce 2030 se dá předpokládat, že původní pásma hovorové komunikace GSM již budou využita pro aktuální síť 5G / 6G. Po dostatečně dlouhou dobu pak bude zajištěna kompatibilita sítí 5G a nastupujících 6G nad danou množinou pásem, která budou vyžívána podle charakteru oblastí, terénu i očekávané hustoty terminálů, objemu komunikace a skladby využívaných služeb.

V následující tabulce je uveden potenciál pásem nad 100 GHz vzhledem k velikosti a charakteru pokrývané oblasti.

³² P. Heydari. Transceivers for 6G Wireless Communications: Challenges and Design Solutions. IEEE CICC 2021/ Session 12: mm-Wave Circuits and Transceivers/ Paper 12-1.

Tabulka 8: Využitelnost pásem nad 100 GHz vzhledem k velikosti a charakteru pokrývané oblasti a služby

Oblasti využití	Potenciál pásem nad 100 GHz	Pozn.:
Plošné pokrytí – velké buňky	Nepřichází v úvahu	Nízký dosah, nízký průnik do interiérů
Pokrytí liniových staveb (dálnice, železniční koridory)	Nepřichází v úvahu, pouze omezené části liniových staveb, jako jsou nádraží, hraniční přechody, mýtné brány apod.	Nízký dosah, nízký průnik do interiérů. Pásmo nad 100 GHz jsou ale vhodná pro přímou komunikaci mezi vozidly (V2V).
Pokrytí omezených prostranství (náměstí, parky, hřiště)	Vhodné využití ve chvíli, kdy bude vyčerpán potenciál pásem 26 GHz či dalších pod 100 GHz.	
Pokrytí velkých interiérů (haly, kongresová a nákupní centra)	Vhodné využití ve chvíli, kdy bude vyčerpán potenciál pásem 26 GHz či dalších pod 100 GHz.	
Pokrytí interiérů (kanceláře, obytné prostory)	Vhodné využití ve chvíli, kdy bude vyčerpán potenciál pásem 26 GHz či dalších pod 100 GHz.	Využití konceptu femto a piko buněk
Pokrytí výrobních a skladových hal privátními průmyslovými sítěmi	Vhodné využití ve chvíli, kdy bude vyčerpán potenciál pásem 26 GHz či dalších pod 100 GHz.	Vhodná kombinace komunikace a detekce polohy
Přímá komunikace mezi zařízeními (D2D)	Vhodné využití pro přímou komunikaci na nízkou vzdálenost max. desítek metrů.	

Příklady využití a možné scénáře jsou také předmětem zprávy ITU-R³³. Jsou uvažovány zejména následující možnosti:

- **Vnitřní hotspot** ve velké zasedací místnosti či **venkovní hotspot**. Malé základnové stanice mohou vyřešit potřeby aplikací, které vyžadují extrémně vysoké datové rychlosti, jako je holografický displej atd. Prostory, jako je velká zasedací místnost představují relativně uzavřená prostředí. Vzhledem k velkému útlumu v pásmech nad 92 GHz lze k flexibilnímu vytvoření bezdrátového připojení k venkovním základnovým stanicím použít směrové antény s vysokým ziskem nebo rozsáhlá anténní pole, která mohou poskytnout vyšší zisky a vylepšit útlumovou bilanci. Nasazení základnových stanic s vyšší hustotou může uživatelům poskytnout lepší pokrytí, ale také přináší problémy s rušením, které ale nebude tak kritické v takto vysokých částech spektra, kde je větší útlum cesty a nižší průnik přes překážky.
- **Vysokorychlostní spoj krátkého dosahu**. Vysokorychlostní spoje typu bod-bod (peer-to-peer) mohou také využívat klíčové vlastnosti rádiových pásem ve vyšších oblastech spektra. Zde se s výhodou dá uplatnit přímá komunikace mezi zařízeními a funkcionality mesh sítě. Datový provoz základnové stanice je tím odlehčen a také zpoždění mezi mobilními zařízeními je nižší. Komunikace zařízení-zařízení (D2D) a vozidlo-vozdilo (V2V) jsou dva reprezentativní typy tohoto druhu spojení známé již ze sítě 5G. Vnitřní přímá komunikace mezi zařízeními (D2D) počítá i s nasazením levných zařízení s nižšími vysílacími výkony a anténami mnohem menšími ve srovnání s běžným zařízením. Vzdálenost mezi komunikujícími zařízeními bude pravděpodobně menší než 5 m.
- **Privátní síť v průmyslu**, typicky založené na pokrytí hal, výrobních prostor a přilehlých prostranství mohou těžit jak z vysoké přenosové rychlosti, tak z možnosti detekce objektů a přesného sledování polohy.

³³ Report ITU-R M.2541-0 (05/2024): Technical feasibility of IMT in bands above 100 GHz

- **Aplikace v dopravě.** Vysokorychlostní adaptivní spojení mezi anténami na střeších vlaků a infrastrukturou lze použít pro přenos jak bezpečnostních informací, tak souhrnných údajů o cestujících. Uvnitř vozidel lze pak pro cestující vytvořit pohybující se hotspot.

Je ovšem počítat s tím, že při extrémních přenosových rychlostech bude dosah velmi malý. Například dosažitelné vzdálenosti komunikace o rychlosti 100 Gbit/s na přímou viditelnost při kmitočtu 300 GHz a šířce pásma 30 GHz budou podle typu prostoru pouze 18 až 30 metrů.

4.2.2 Využití pásma nad 100 GHz pro přípojně síť

Bezdrátové sítě šesté generace budou nabízet na radiovém rozhraní podstatně vyšší kapacitu, což se promítne i do potřeby ultra-vysoko-kapacitní přípojně sítě (tzv. mobilní **backhaul**). Ne všechny základnové stanice je možné připojit optickými vlákny, i když jejich zastoupení se zvyšuje. Tam, kde zůstává nutnost radioreléových bezdrátových spojů, využívají se dnes pásma v oblasti 80, případně 60 GHz. Ta jsou ovšem limitována cca na provozní rychlosti 10 Gbit/s. Vyšší dostupné kapacity mohou i na této úrovni sítě vyřešit do budoucna dosud nevyužitá částí spektra nad 100 GHz s šířkami kanálů řádově ve vyšších jednotkách až desítkách GHz. Lze očekávat poskytnutí přenosové schopnosti srovnatelné s optickými vlákny pro uvažované účely. Toto řešení je použitelné pro scénáře nebo prostředí, kde optická vlákna nelze nasadit nebo je jejich nasazení obtížné. Přístupové uzly mohou být ve formě tradiční fixně umístěné základnové stanice nebo mohou být flexibilně rozmístěnými či pohybujícími se (létajícími) základnovými stanicemi.

Současné podmínky pro správu spektra však zatím brání přidělování dostatečně širokých a souvislých pásem pro komunikaci na těchto frekvencích, protože je vyhrazeno několik relativně úzkých pásem s cílem chránit služby pasivního monitorování. Patří mezi ně radioastronomie a průzkum Země pomocí satelitů využívajících senzory, které mohou být rušeny aktivními vysíláči. Zkoumají se metody a provádějí experimenty, které ukazují, že sdílení spektra nad 100 GHz aktivními a pasivními službami je proveditelné, např. zavedením adaptivních komunikačních systémů, které v reálném čase sledují přítomnost pasivních uživatelů a zamezují rušení automatickým přepínáním pásem mimo aktuálně sledovanou oblast.³⁴

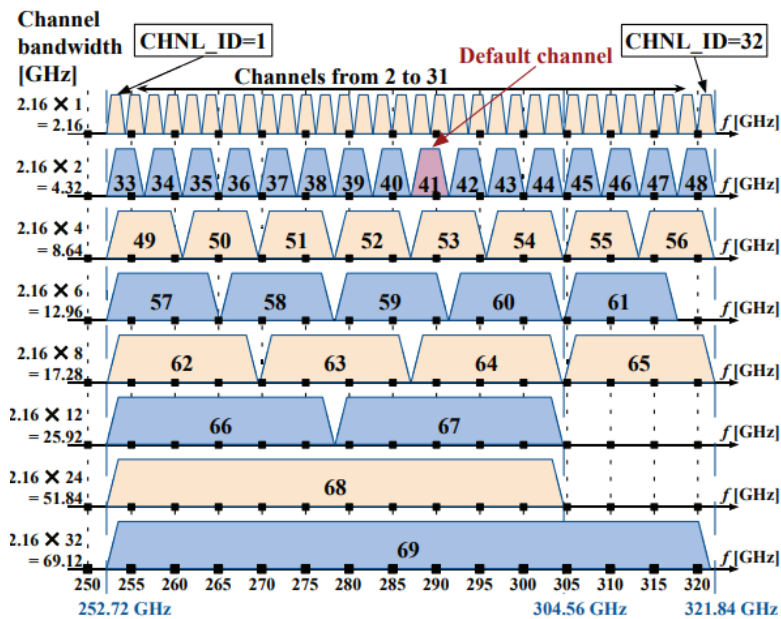
4.2.3 Využití pásma nad 100 GHz pro lokální a osobní síť

Vedle mobilních sítí dle specifikací 3GPP se rozvíjí bezdrátová komunikace dle standardů IEEE. Konkrétně zde zmíníme standard IEEE 802.15.3d pro lokální a osobní síť (Wireless Personal Area Networks - WPAN).

Zařízení dle specifikace IEEE 802.15.3d by mělo pracovat na sub-THz frekvencích mezi 252,72 GHz a 321,84 GHz. Celkem existuje 69 překrývajících se kanálů. K dispozici je 8 podporovaných šířek pásem s kanály šířky od 2,16 GHz, jak ukazuje následující diagram.

³⁴ Michele Polese, Viduneth Ariyaratna, Priyangshu Sen, Jose V. Siles, Francesco Restuccia, Tommaso Melodia, Josep M. Jornet: Dynamic spectrum sharing between active and passive users above 100 GHz. COMMUNICATIONS ENGINEERING, 2022, <https://doi.org/10.1038/s44172-022-00002-x>

Obrázek 12: Znárodnění pásma a dělení do kanálů pro WPAN sítě³⁵



I když je k dispozici standard a jasná představa o využití daného pásma, na praktické aplikace se ještě čeká. Zejména se pracuje na vývoji vysílačích a přijímacích zařízení s požadovanými vlastnostmi a také anténních prvků, což ještě určitou dobu potrvá, než se dostaneme do komerčního stádia využití.

4.2.4 Mezinárodní koordinace spektra pro mobilní sítě

Mezinárodní koordinace spektra na celosvětové úrovni probíhá v pravidelných intervalech 4 roky v rámci Světových radiokomunikačních konferencí, kdy poslední proběhla v roce 2023 (WRC-23). Uvádíme zde souhrn těch rezolucí WRC-23, která se týkají spektra pro mezinárodní mobilní komunikaci.

Klíčová pro pásma nad 100 GHz je Rezoluce č. 255³⁶. Na ní navazuje Rezoluce č. 721, která se týká navazujícího frekvenčního pásma 275-325 GHz. Dle těchto rezolucí, které zahrnují cílené pásma nad 100 GHz, by měly být veškeré přípravné práce, studie využitelnosti, souběhu služeb atd. připraveny pro jednání Světové radiokomunikační konference v roce 2031, která bude klíčová pro jejich komerčnímu otevření.

Dalších pásem pro mobilní komunikaci situovaných v nižších oblastech kmitočtů se týká Rezoluce č. 256³⁷. V rámci ní radiokomunikační sektor ITU vyzval k dokončení podkladů pro specifikaci pásem v nižších oblastech spektra pro pozemní sítě IMT tak, aby bylo možné přijmout finální závěry na Světové radiokomunikační konferenci v roce 2027. Jedná se o tato zvažovaná frekvenční pásma:

- 4 400–4 800 MHz nebo jejich části v Regionu 1 (vč. Evropy) a Regionu 3
- 7 125–8 400 MHz nebo jejich části v Regionu 2 a Regionu 3
- 7 125–7 250 MHz a 7 750–8 400 MHz nebo jejich části v Regionu 1 (vč. Evropy)
- 14,8–15,35 GHz

Evropa nicméně na Světové radiokomunikační konferenci WRC-23 aktivně nenavrhovala studium dalších pásem pro IMT uvedených v Rezoluci č. 256 ITU-R. Studijní bod je proto výsledkem kompromisu, který zohlednil požadavky ostatních regionů

³⁵ IEEE 802.15.3d

³⁶ RESOLUTION 255 (WRC-23): Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications (IMT) identification in the frequency bands [102-109.5 GHz, 151.5-164 GHz, 167-174.8 GHz, 209-226 GHz and 252-275 GHz] for the future development of IMT

³⁷ RESOLUTION 256 (WRC-23): Sharing and compatibility studies and development of technical conditions for the use of International Mobile Telecommunications (IMT) in the frequency bands 4 400-4 800 MHz, 7 125-8 400 MHz (or parts thereof), and 14.8-15.35 GHz for the terrestrial component of IMT

a postupy projednávání ITU zohledňující principy konsensu. Pro podmínky v Evropě proto budou podstatné zejména závěry odborných skupin CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) a pozice Evropské unie.

Současný stav a postoj k těmto pásmům je v CEPT následující:

- Studium možností pro IMT v uvedených pásmech je svěřeno příslušným pracovním skupinám. Úvodní diskuse k uvedeným pásmům zatím nepřinesly stabilnější předběžné varianty k projednávání, nicméně jako výchozí stav je uvažována pozice Evropy na WRC-23, která tato pásma nedoporučila pro IMT z důvodů provozu řady kritických aplikací a systémů, jako je zajištění komunikací NATO, ale i zajišťování družicových komunikací v Evropě.
- Pásmo 4 400–4 800 MHz je intenzivně využíváno leteckými a námořními systémy v CEPT a po celém světě nepřetržitě v režimu 24/7 pro podporu národní bezpečnosti a pro humanitární pomoc. Kromě toho je nutné zajistit koexistenci se systémy rádiových výškoměrů v pásmu 4200–4400 MHz a dalšími systémy v uvedeném pásmu.
- Pásmo 7 125-8 400 MHz je intenzivně využíváno satelitními službami (downlink 7,25-7,75 GHz, uplink 7,9-8,4 GHz) a pozemními systémy nepřetržitě v režimu 24/7 na podporu národní bezpečnosti a pro humanitární pomoc. Dále pro dočasné video-spojení PTP v rozsahu frekvencí 7–8,5 GHz, a to pro přenosné a pohyblivé stanice.
- Pásmo 14,8-15,35 GHz využívá služba leteckých mobilních aplikací, pevná služba pro vládní služby na územích CEPT i na mezinárodní úrovni po celém světě nepřetržitě v režimu 24/7 k podpoře národní bezpečnosti a pro humanitární pomoc. Různé vesmírné agentury provozují v tomto pásmu komunikaci pro současné i budoucí mise, včetně misí s lidskou posádkou.

4.2.5 Zhodnocení využívání spektra pro 5G a analýza dalších potřeb pro 6G v Evropě

Skupina RSPG provedla hodnocení postupu nasazování 5G v Evropě (strategie licencí kmitočtů, průběh aukcí, postup zavádění atd.) s cílem získat znalosti o tom, co bylo úspěšné a co je ještě potřeba řešit, aby byly získány informace při navrhování strategií pro další generaci mobilních sítí 6G.³⁸

Aby se včas zpřístupnil potřebný nový přiděl harmonizovaného spektra pro 6G, je nutné podporovat výzkumné práce a studie využitelnosti v pásmech 100 GHz až 1 THz.

RSPG konstatuje, že implementace 5G probíhá zejména v primárních pásmech určených pro 5G:

- A. Pásmo 700 MHz bylo v EU harmonizováno již v roce 2016. Původně bylo plánováno a používáno v některých státech již pro 4G a nyní se začalo používat pro 5G. Pásmo poskytuje dobré pokrytí, ale díky nízké šířce pásma nabízí nižší přenosové rychlosti.
- B. Pásmo 3,6 GHz je primární pásmo pro realizaci sítí 5G v Evropě s harmonizovaným spektrem 400 MHz.
- C. Pásmo 26 GHz je dosti odlišně využíváno v jednotlivých členských státech EU. Zavádění 5G bylo pomalé i v těch členských státech, které toto pásmo zpřístupnily trhu. Pásmo tzv. milimetrových vln (mmW) může vyřešit požadavky na velmi vysokou kapacitu v hustě obydlených oblastech a znamená potenciál pro nové typy sítí, služeb i nové obchodní modely. Ale zároveň toto pásmo neposkytuje plošné pokrytí z důvodu odlišných charakteristik šíření signálu ve srovnání s ostatními pásmy a znamená velké investice do sítí, které zatím ne vždy musí být vyhodnoceny jako dostatečně rychle návratné.

Fáze testování v pásmu 26 GHz stále probíhá, komerční využití již v některých zemích začalo a očekává se, že se bude zvyšovat, protože se v nadcházejících letech zlepší dostupnost zařízení a provozovatelé mobilních sítí budou ochotni zahušťovat své sítě (např. budou reagovat na požadavky uživatelů na řešení pevného bezdrátového přístupu).

S nástupem 5G byla zavedena nová řešení pro dynamičtější a sdílené využívání spektra. Očekává se, že tato potřeba poroste s rozvojem 5G a zaváděním 6G.

- Dynamické sdílení spektra uvnitř sítě umožňuje sdílet radiové zdroje na vyžádání v reálném čase mezi technologiemi 4G a 5G (později se očekává i 6G). To přináší příležitost k rychlému zavedení nových technologií zákazníkům, aniž by bylo nutné vyřadit starší technologie.
- Některé členské státy také zavedly modely závazků pronájmu (zejména v pásmu 3,6 GHz) pásem provozovatelů mobilních sítí třetím stranám (např. průmyslovým podnikům pro privátní 5G) a modely sdílení mezi provozovateli mobilních sítí (zejména v pásmu 26 GHz).

³⁸ RSPG23-026 FINAL RADIO SPECTRUM POLICY GROUP: The development of 6G and possible implications for spectrum needs and guidance on the rollout of future wireless broadband networks. Brussels, 14 June 2023

- Objevují se mechanismy pro dynamické sdílení spektra mezi různými pozemními mobilními sítěmi i jinými typy sítí, např. pro mimořádné události a jiné dočasné potřeby a mohly by se dále rozvíjet v širším měřítku i pro 6G.

Rostoucí potřeby vertikálně a lokálně užívaného spektra.

- Některé členské státy již přidělily spektrum pro místní a vertikální aplikace a potřeby spektra pro ně stále rostou. Současné národní implementace zahrnují vyhrazené spektrum, např. v pásmech 400 MHz, 2,3 GHz a v harmonizovaných pásmech 2,6 GHz, 3,6 GHz a 26 GHz.
- V některých členských státech dobrovolná harmonizace v pásmech 410–430 a 450–470 MHz reaguje na požadavky uživatelů, zejména ze strany veřejných služeb.
- Kromě toho vydala Komise pověření CEPT „o technických podmínkách týkajících se sdíleného využívání frekvenčního pásma 3,8–4,2 GHz pro pozemní bezdrátové širokopásmové systémy poskytující připojení k místní síti v Unii“. Kromě vnitrostátních iniciativ bude pokračovat práce na definování harmonizovaných technických podmínek (předpoklad harmonizace v roce 2025) pro pozemní bezdrátové širokopásmové připojení s nízkým a středním výkonem (WBB LMP, předpokládané použití pro lokální a kampusové sítě).
- Pásmo 42 GHz bude v rámci druhého stupně pásem mmW možným rozšířením nad pásmem 26 GHz. Pásmo 42 GHz a 26 GHz, jak je doporučeno ve stanovisku RSPG 21-024, mohou umožnit lokální využití spektra. Toto pásmo je předmětem samostatné studie³⁹

Jelikož platí technologická neutralita, stávající harmonizovaná pásma, dnes užívaná pro GSM, LTE a 5G, budou zpřístupněna a využívána také pro 6G.

RSPG dále připomíná potřebu spektra osvobozeného od licence nebo spektra s omezenou licencí pro zajištění části provozu 6G a poskytování privátních a osobních sítí. Toto spektrum usnadní konektivitu pro koncové uživatele, komunikaci mezi stroji a nasazení dalších aplikací, které nevyžadují předvídatelnou kvalitu služeb.

Nepozemní rádiové sítě by se mohly stát důležitou doplňkovou vrstvou připojení k službám pozemního připojení, např. poskytovat pokrytí v nedostatečně obsluhovaných oblastech, poskytovat globální konektivitu pro logistiku a dopravu, podporovat pomoc při katastrofách a sloužit jako záložní vrstva nebo backhaul pro pozemní sítě.

Pro podporu rozvoje a zavádění 6G je zásadní proaktivní pozice. To zahrnuje další práci skupiny RSPG na včasném rozpoznání potřeb spektra, aby spuštění sítí 6G mohlo být zahájeno po roce 2030.

Pracovní skupina RSPG pro Vizi 6G projednává mimo jiné provozní a uživatelské modely pro 6G. K okruhům otázek, které skupina intenzivně řeší, patří například následující:

- Privátní aplikace a sítě 5G/6G (ve vyhrazeném pásmu spektra, ve veřejném pásmu spektra i podporované veřejnými mobilními sítěmi).
- Spuštění sítí 6G - koordinované načasování spuštění v EU, podpora jednotného trhu, role sdílení spektra, včetně dynamického sdílení.
- Možnosti využití částí spektra osvobozených od licence.
- Využití neterestriálních sítí (role NTN, základnové stanice UAV, satelity) a důsledky pro správu spektra.
- Udržitelnost a bezpečnost.

4.2.6 Možnosti licencování pásem nad 100 GHz

Vzhledem k vlastnostem šíření a praktické využitelnosti budou pásma nad 100 GHz nejbližší k pásmu 26 GHz, v současnosti přiřazenému k 5G sítím. I když toto pásmo v ČR dosud není využíváno v komerčním provozu, již s ním jsou určité praktické zkušenosti z experimentálního provozu a existuje poměrně jasná představa o variantách jeho využití a licencování. Tuto problematiku podrobně rozebírá samostatná studie⁴⁰. Z ní je možno shrnout nejzásadnější fakta takto:

- V ČR je podle plánu využití rádiového spektra č. PV-P/2/10.2020-10 pásmo 26,5 – 27,5 GHz určeno pro poskytování bezdrátových širokopásmových služeb elektronických komunikací. V daném úseku je vymezeno pět sousedních bloků o šířce 200 MHz s časově děleným duplexem TDD. Využívání kmitočtů se zatím předpokládá na základě individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů (v tuto chvíli umožněno pouze pro experimentální účely).

³⁹ Analýza současného a budoucího využití pásma 42 GHz, Studie GTA pro Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2024.

⁴⁰ Analýza a návrh procesu využívání a přidělování kmitočtů v pásmu 26 GHz, GTA, MPO, 2024.

- Pásmo nabízí potenciál zejména pro účely tzv. vertikálního sektoru. Z hlediska provozovaných kmitočtových pásem lze vymezit tyto varianty:
 - Pokud využívání rádiového spektra vyžaduje individuální oprávnění, zajistí udělení kmitočtů přímou kontrolou uživatele nad přidělenými kmitočty.
 - Alternativním řešením je získání práva na využívání kmitočtů prostřednictvím pronájmu kmitočtů od subjektu, který je držitelem práva (např. mobilní operátor). Tento postup je umožněn v ČR již i v jiných pásmech 4G/5G a je využíván i v řadě dalších evropských států.
 - Další možností je využívání kmitočtových pásem na základě všeobecného oprávnění. Příkladem je provoz kampusové či průmyslové sítě uvnitř budovy či uzavřeného areálu, kde je nízká pravděpodobnost rušení od jiných uživatelů.
 - Jiným způsobem je dodání řešení „na klíč“ od provozovatele sítí elektronických komunikací nebo služeb. Poskytnuté řešení může mít formu velkoobchodního přístupu, roamingu, virtuální privátní sítě, síťového segmentování/vrstvení (Network Slicing).
- Lze identifikovat čtyři potenciální modely pro zabezpečení bezdrátové konektivity pro vertikální sektor, které se liší různými stupni oddělení od veřejných sítí:
 - Maximální stupeň oddělení je vybudování a provoz privátní sítě.
 - Způsoby založené na využití prvků veřejné sítě a přístupu k příslušnému kmitočtovému pásmu na velkoobchodní úrovni, je možné rozdělit do tří skupin:
 - sdílení infrastruktury veřejné přístupové sítě RAN (Radio Access Network), případně prostřednictvím RAN slicing, pokud je k dispozici, případně MORAN (Multi Operator RAN) nebo MOCN (Multi Operator Core Network).
 - sdílení RAN i jádra sítě (core)
 - plné poskytnutí služby operátorem, přičemž úloha vertikálního subjektu je omezená na správu aplikační úrovně.

ČTÚ předpokládá tři případy použití pásma 26 GHz:

- Pevný bezdrátový přístup (FWA) - počáteční primární využití
- 5G ve venkovním prostředí (potenciálně MNO, ale pravděpodobněji kampusové sítě)
- 5G v interiérech (kampusové sítě, případně v kombinaci s exteriérem).

Poté, co bude využito a vytěženo pásmo 26 GHz, případně další uvažovaná pásma koordinovaná mezinárodně pro mobilní komunikaci, tak se ukáže, zda potřeby rostou takovou měrou, že je nutné přistoupit k komerčnímu využití pásem nad 100 GHz. Dá se předpokládat, že v ČR k tomu nedojde dříve než mezi léty 2035 a 2040.

Možné základní režimy licencování pásem nad 100 GHz:

- Pro aplikace s malým vyzářeným výkonem a pokročilými aktivními anténními systémy lze předběžně předpokládat provozní podmínky (například vyzářený výkon nebo spektrální výkonová hustota, šířka kanálů apod.) umožňující u mnohých 6G aplikací bezlicenční provoz (tj. na základě všeobecného oprávnění).
- Pro specifické aplikace s vyšším vyzářeným výkonem, resp. obecněji v situacích, kdy by sdílení rádiového spektra a s tím spojené určité riziko vzájemného nežádoucího ovlivnění stanic nebylo uživateli akceptovatelné, bude pravděpodobně projednávána i možnost udělování individuálních oprávnění.

V návaznosti na scénáře diskutované v rámci licencování pásma 26 GHz uvádíme formou tabulek komentáře, zda a jakým způsobem by je šlo použít i pro pásma nad 100 GHz (mimo spojů typu bod-bod, které mají specifický charakter vzhledem k úzce směrovým svazkům signálu).

Tabulka 9: Relevantnost scénářů přidělování radiových zdrojů uvažovaných pro pásmo 26 GHz vzhledem k budoucímu posunu do pásem nad 100 GHz

Scénáře přidělování radiových zdrojů uvažované pro pásmo 26 GHz	Relevantnost pro pásma nad 100 GHz
1. přidělení kmitočtů pro konkrétní základovou stanic	Je možné, ale málo pravděpodobné – pro pokrytí zájmových lokalit bude třeba větší počet základnových stanic.
2. přidělení kmitočtů pro definovanou provozní oblast pro více základnových stanic	Bude patřit k základním způsobům pro pokrytí exteriérů
3. plošné přidělení konkrétního kmitočtového bloku	Nebude pravděpodobné vzhledem k lokálnímu charakteru využití
4. přidělení výhradně pro využití v interiéru	Pravděpodobný způsob užití

Tabulka 10: Relevantnost scénářů licencování kmitočtů uvažovaných pro pásmo 26 GHz vzhledem k budoucímu posunu do pásem nad 100 GHz

Scénáře licencování kmitočtů uvažované pro pásmo 26 GHz	Relevantnost pro pásma nad 100 GHz
1. přidělení/zpřístupnění kmitočtů na základě všeobecného oprávnění	Základní uvažovaná varianta pro systémy s nízkým výkonem
2. přidělení/zpřístupnění kmitočtů na základě individuálního oprávnění na základě žádosti	Varianta pro systémy s vyšším vyzářeným výkonem pro externí aplikace
3. přidělení/zpřístupnění kmitočtů na základě výběrového řízení	Varianta pro systémy s vyšším vyzářeným výkonem pro externí aplikace

Tabulka 11: Relevantnost scénářů licencování kmitočtů z hlediska územního rozsahu uvažovaných pro pásmo 26 GHz vzhledem k budoucímu posunu do pásem nad 100 GHz

Scénáře licencování kmitočtů uvažované pro pásmo 26 GHz z hlediska územního rozsahu	Relevantnost pro pásma nad 100 GHz
1. celostátní pokrytí	Nebude technicko-ekonomicky možné
2. lokální varianta A – geografické vymezení dle administrativního členění (např. kraj, okres, město, obec)	Možná varianta pro použití v exteriéru, ovšem pro malé území na úrovni obce
3. lokální varianta B – geografické vymezení determinováno technickými parametry (dosahem) sítě	Pravděpodobná varianta pro použití v exteriéru, pokrytí lokalit nízkého rozsahu, jako je náměstí a centra obcí

5 Závěry a doporučení

Mobilní sítě se budují na základě standardů organizace 3GPP (3rd Generation Partnership Project, 3GPP), jejichž vývoj kontinuálně pokračuje. Ve skutečnosti jde tedy nikoli o revoluční generační skoky, ale postupný inovační proces. V blízké době můžeme očekávat dokončení specifikace 5G-Advanced, která přinese řadu nových vlastností naznačujících již další generaci 6G. Plnohodnotná síť 6G bude standardizovaná pravděpodobně k roku 2028 (Release 21) a praktické nasazení a využití se v řadě států i v Evropě očekává kolem roku 2030. Podrobnější popis vlastností a procesu přechodu od 5G k 6G je podrobně popsán v separátní kapitole této studie.

Kmitočtová pásma nad 100 GHz s omezením shora na kmitočtu 1 THz (sub-THz pásma, zatím se však počítá s reálným využitím do cca 300 GHz) patří do skupiny milimetrových až sub-milimetrových vln, dle posledních výsledků výzkumu využitelných pro přenos ultra vysokými přenosovými rychlostmi. Toto pásmo bylo identifikováno jako jedno z pásem pro rozvoj mobilních sítí 6G po roce 2030.

Mezinárodní koordinace spektra na celosvětové úrovni probíhá v pravidelných intervalech 4 roky v rámci Světových radiokomunikačních konferencí, kdy poslední proběhla v roce 2023 (WRC-23). Rezoluce č. 255 doporučuje vymežit pásma 102-109,5 GHz, 151,5-164 GHz, 167-174,8 GHz, 209-226 GHz a 252-275 GHz pro mobilní sítě a služby. Na ní navazuje Rezoluce č. 721, která se týká navazujícího frekvenčního pásma 275-325 GHz. Dle těchto rezolucí by měly být veškeré přípravné práce, studie využitelnosti, souběhu služeb atd. připraveny pro jednání Světové radiokomunikační konference v roce 2031, která bude klíčová pro jejich komerční otevření.

Pro kmitočtová pásma nad 100 GHz je typický velmi omezený dosah v důsledku převažujícího charakteru šíření na přímou viditelnost a vysokého útlumu prostředí. Tato skutečnost současně s očekávanými malými rozměry anténních polí (dáno krátkými vlnovými délkami) povede k využití zejména pro pokrytí interiérů a relativně malých, ohraničených oblastí (stadiony, náměstí apod.).

Na základě současného stavu vědomostí se však nedá předpokládat razantní nárůst požadavků od 5G k 6G pro běžné uživatele. Již technologie LTE-A (4G) je pro většinu dnešních potřeb postačující a není příliš velká motivace běžných uživatelů přecházet od 4G k 5G. Podobná situace se bude pravděpodobně opakovat při přechodu z 5G na 6G a před hráči na trhu bude velká výzva, jak přesvědčit uživatele o přínosech 6G. V tomto kontextu se zdá expanze do pásem nad 100 GHz ne příliš aktuální a potřebná spíše až v dlouhodobém výhledu (po roce 2040). Jisté je, že technologický vývoj pokračuje a je třeba přicházet s novými technologiemi, vlastnostmi a službami. Otázkou je reálný přínos a skutečný užitek pro člověka, pokud pomíneme technologické nadšence a ty, kteří nemohou existovat bez nejnovějších modelů dostupných na trhu. Ostatně těžiště inovací se bude stále více přesouvat spíše do oblastí průmyslu, dopravy, zdravotnictví, zemědělství, obrany a komunikace strojů.

Poté, co bude využito a vytěženo pásmo 26 GHz, případně další uvažovaná pásma koordinovaná mezinárodně pro mobilní komunikaci, ukáže se, zda potřeby rostou takovou měrou, že je nutné přistoupit k komerčnímu využití pásem nad 100 GHz. Dá se předpokládat, že v ČR k tomu nedojde dříve než mezi léty 2035 a 2040.

Možné základní režimy licencování pásem nad 100 GHz jsou tyto:

- Pro aplikace s malým vyzářeným výkonem a pokročilými aktivními anténními systémy lze předběžně předpokládat provozní podmínky (například vyzářený výkon nebo spektrální výkonová hustota, šířka kanálů apod.) umožňující u mnohých 6G aplikací bezlicenční provoz (tj. na základě všeobecného oprávnění).
- Pro specifické aplikace s vyšším vyzářeným výkonem, resp. obecněji v situacích, kdy by sdílení rádiového spektra a s tím spojené určité riziko vzájemného nežádoucího ovlivnění stanic nebylo uživateli akceptovatelné, bude pravděpodobně projednávána i možnost udělování individuálních oprávnění.

Podrobnější rozbor možností využití a scénářů licencování je v návaznosti na současně aktuální pásmo 26 GHz uveden v textu studie.

Doporučujeme podrobně sledovat vývoj v oblasti a aktivně přispívat na mezinárodních fórech do diskuse o využívání a způsobu licencování pásem pro 6G sítě (ITU-R, WRC, RSPG, CEPT). Včas zaujmout stanoviska a doporučení a formulovat strategii pro zavádění sítí 6G v ČR (vhodné období pro její formulování se jeví v letech 2025/26). Podporovat vzdělávání a rozvoj know-how v dané oblasti.

Zároveň doporučujeme sledovat využití současných pásem, vývoj požadavků zákazníků a rozvoj služeb a na základě toho aktualizovat potřeby vyžít pásma nad 100 GHz, zejména z pohledu očekávaných investic a jejich reálné návratnosti.

Dále doporučujeme podporovat vhodnými dotačními výzvami a způsobem financování výzkum a další odborné studie v této oblasti. V prvním období (cca 2025 až 2027) zaměřené na teoretické a experimentální práce prováděné akademickou sférou a výzkumnými organizacemi. V následujícím období (cca 2028 až 2030+) na aplikovaný výzkum a spolupráci výzkumných organizací a průmyslových podniků na konkrétních scénářích využití, vývoji a testování konkrétních produktů a řešení. Pro tyto účely bude nutné zpřístupnit v dostatečném předstihu příslušné části spektra pro experimentální využití.



Grant Thornton

www.granthornton.cz

© 2024 Grant Thornton Advisory k.s. All rights reserved.

Grant Thornton Advisory k.s. je česká firma Grant Thornton International Ltd. (Grant Thornton International). Odkazy na Grant Thornton se vztahují ke Grant Thornton International nebo ke členským firmám. Grant Thornton International a členské firmy nejsou mezinárodním partnerstvím. Služby jsou nezávisle poskytovány jednotlivými členskými firmami.