

Prehľad

Revolúcia alebo evolúcia? Technické požiadavky a úvahy o smerom k mobilnej komunikácii 6G

Saddam Alraih ¹, Ibraheem Shayea ², Mehran Behjati ¹, Rosdiadee Nordin ^{1,*}, Nor Fadzilah Abdullah ¹
Asma' Abu-Samah ¹ a Dalia Nandi ³

¹ Department of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Selangor, Malaysia; eng.alraih@gmail.com (S.A.); mehran.behjati@ukm.edu.my (M.B.); fadzilah.abdullah@ukm.edu.my (N.F.A.); asma@ukm.edu.my (A.A.-S.)

² Katedra elektroniky a komunikačnej techniky, Fakulta elektrotechniky a elektroniky, Istanbulská technická univerzita, Istanbul 34467, Turecko; ibr.shayea@gmail.com alebo shayea@itu.edu.tr

³ Indický inštitút informačných technológií (IIIT), Kalyani 741235, India; daliadas311@gmail.com

* Korešpondencia: adee@ukm.edu.my

Abstrakt: Od uvedenia mobilnej komunikácie piatej generácie (5G) sa v odvetví mobilných telekomunikácií diskutuje o tom, či je 5G "evolúciou" alebo "revolúciou" oproti predchádzajúcim starším mobilným sieťam, ale teraz, keď je 5G už niekoľko rokov komerčne dostupná, sa smerovanie výskumu nedávno zmenilo na nadchádzajúcu generáciu mobilného komunikačného systému, známu ako šiesta generácia (6G), od ktorej sa očakáva, že prinesie výrazné a evolučné, ak nie revolučné zlepšenie mobilných sietí. Očakáva sa, že prísluš extrémne vysokých prenosových rýchlostí (v terabitoch), umelej inteligencie (AI), ultra nízkej latencie, takmer nulovej/nízkej spotreby energie a obrovského množstva pripojených zariadení zvýši konektivitu, udržateľnosť a dôveryhodnosť a poskytne niektoré nové služby, ako napríklad skutočne pohlcujúcu "rozšírenú realitu" (XR), vysoko verný mobilný hologram a novú generáciu zábavy. Šiesta generácia a jej

rozvinuli svoje smery na realizáciu budúcej technológie 6G, ktorá by mala byť hotová už v roku 2028. V tomto článku sa podáva prehľad o mobilnej technológii 6G vrátane jej vize, požiadaviek, podporných technológií a výziev. Medzitým je predstavených celkovo 11 komunikačných technológií vrátane terahertzovej (THz) komunikácie, komunikácie vo viditeľnom svetle (VLC), viacnásobného prístupu, kódovania, bezbunkového masívneho viacnásobného vstupu a výstupu (CF-mMIMO), bezenergetického rozhrania, inteligentného odrazového povrchu (IRS) a infúzie umelej inteligencie/strojového učenia (ML) do techník bezdrôtového prenosu. Okrem toho tento článok porovnáva 5G a 6G z hľadiska služieb, kľúčových technológií a komunikačných techník. Nakoniec sa v ňom rozoberajú kľúčové budúce smery a technologický vývoj v 6G.

Kľúčové slová: 6G; po 5G; budúce siete; mobilné siete novej generácie; terahertz; VLC; bezdrôtové prenosy



skontrolovať
aktualizácie

Citácia: Alraih, S.; Shayea, I.; Behjati, M.; Nordin, R.; Abdullah, N.F.; Abu-Samah, A.; Nandi, D. Revolution or Evolution? Technické požiadavky a úvahy smerom k mobilnej komunikácii 6G. *Sensors* **2022**, *22*, 762. <https://doi.org/10.3390/s22030762>

Akademický redaktor: Jae-Hyun Kim

Prijaté: 28. novembra 2021

Prijaté: 13. januára 2022

Uverejnené: 20. januára 2022

Poznámka vydavateľa: MDPI zostáva neutrálne, pokiaľ ide o právne nároky v publikovaných mapách a inštitucionálnych afiliáciách.



Autorské práva: © 2022 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, Švajčiarsko. Tento článok je článkom s otvoreným prístupom šíreným podľa podmienok a pravidiel licencie Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Úvod

Rýchly nárast inteligentných nových technológií a ich funkcií (napr. interaktívne služby v reálnom čase) prispel k výraznému nárastu bezdrôtovej dátovej prevádzky, ktorú súčasná sieť nedokáže dostatočne podporovať, a to ani v prípade systémov piatej generácie (5G) [1]. To naznačuje, že dostupné nasadené mobilné siete nebudú schopné plne a efektívne držať krok s meniacimi sa technickými normami. Okrem toho sa predpokladá, že do roku 2030 vznikne rozvinutejšia digitálna spoločnosť, ktorej hybnou silou bude takmer okamžité a neobmedzené bezdrôtové pripojenie [2]. To podnietilo vývoj šiestej generácie (6G) s cieľom splniť vysoké technické štandardy nových metód prenosu s efektívnym využívaním frekvenčného spektra a energie [1,3].

Očakáva sa, že mobilné siete 6G budú podporovať veľmi hustú sieť spájajúcu 500 miliárd zariadení [4]. Jej kapacita môže byť až 1000-krát vyššia ako kapacita 5G. Prostredníctvom mobilnej siete 6G s vyšším frekvenčným spektrom môžu používatelia očakávať ešte vyššiu rýchlosť (kde sa očakáva 100- až 1000-násobne vyššia rýchlosť prenosu dát, než akú ponúka 5G), zvýšenú kapacitu a ešte nižšiu latenciu, ktorá môže podporiť perspektívy nových aplikácií vrátane presnej medicíny, predpovedania spravodajských katastrof a virtuálnej reality (VR). 6G by ponúklo najmä rýchlosť prenosu dát v Gb/s až Tb/s vďaka využitiu viacpásmového vysokorozšíreného spektra, ktoré zahŕňa pásmo 1 - 3 GHz, pásmo milimetrových vln (mmWave) (30 - 300 GHz) a terahertzové pásmo (THz) (0,06 - 10 THz) [5,6].

Vzhľadom na trend vývoja predchádzajúcich mobilných sietí by počiatočná mobilná sieť 6G prevzala súčasnú architektúru a silné stránky 5G, ako sú vyššie frekvenčné pásma a optimalizovaný decentralizovaný sieťový systém. Hoci mobilná technológia 6G poskytne budúcim ultrahustým sieťam niekoľko výhod, pred štandardizáciou systému 6G bude ešte potrebné upozorniť na niekoľko problémov, diskutovať o nich a následne ich riešiť. Preto vykonanie prieskumného dokumentu, ktorý zohľadňuje rôzne aspekty a diskutuje o technických výzvach z rôznych hľadísk, prispeje k dosiahnutiu týchto cieľov. V literatúre existuje množstvo renomovaných prehľadových časopisov a bielych kníh o 6G, ktoré boli publikované. Existujú stovky prehľadových článkov týkajúcich sa technológie 6G, ale v tomto dokumente sa vyberá len niekoľko renomovaných článkov, o ktorých sa bude diskutovať, a zdôraznia sa ich obmedzenia, ako je zhrnuté v nasledujúcich odsekoch.

Výskumná práca [7] predstavuje rozsiahly prehľad existujúceho vývoja v oblasti 6G. Okrem toho poukazuje na spoločenské a technologické trendy, ktoré vedú k hnutiu 6G. Potom sú vysvetlené najnovšie aplikácie, ktoré chápu požiadavky spôsobené hnacími trendmi 6G. Okrem toho sa v nej rozoberajú požiadavky potrebné na dosiahnutie aplikácií 6G. V článku sa potom uvádza podrobný opis rozhodujúcich podporných technológií a stručný prehľad existujúcich výskumných projektov a činností vrátane normalizačného úsilia smerujúceho k rozvoju 6G. Nakoniec sa uvádza zhrnutie poznatkov získaných z najnovšieho výskumu a rozpracúvajú sa technické ťažkosti, s ktorými sa stretávame, čo by predstavilo smerovanie budúceho výskumu v oblasti 6G.

Prehľadová štúdia v [8] je tiež ďalšou rozsiahlou prehľadovou prácou zameranou na vývoj bezdrôtovej technológie smerom k sieťam 6G. Zameriava sa najmä na najnovšie architektonické úpravy súvisiace so sieťami 6G, ktoré sú definované univerzálnym trojrozmerným (3D) pokrytím, nástupom všadeprítomnej umelej inteligencie (AI) a vylepšeným zásobníkom sieťových protokolov. Okrem toho autori diskutujú aj o príslušných aspirujúcich technológiách, ktoré pomáhajú vytvárať udržateľné a sociálne bezchybné siete, zahŕňajúce THz a komunikáciu vo viditeľnom svetle (VLC), blockchain, nové komunikačné paradigmy a symbiotické rádio. Ako tvrdia autori, cieľom štúdie je ponúknuť zvýšené usmernenie na uľahčenie budúceho výskumu v oblasti zeleného 6G.

Odkaz [9] predstavuje dôkladnú diskusiu o 6G na základe prehľadu vývoja 5G vrátane vízií a požiadaviek, technologického vývoja a výziev. Cieľom je riešiť otázky kapacity, pokrytia a rýchlosti prenosu dát používateľov, ako aj rýchlosti pohybu mobilných komunikačných systémov.

Alternatívna štúdia prieskumu sa uskutočnila aj v [10]. V článku sa rozoberajú najžiadanejšie oblasti výskumu z najnovšej literatúry, ktoré majú spoločné smerovanie pre projekty 6G. Prispieva najmä k preskúmaniu zásadných otázok a možných atribútov komunikácie 6G, ako sú (i) vízia a hlavné vlastnosti, (ii) výzvy a možné riešenia a (iii) výskumné aktivity. Rozsiahle skúmanie týchto sporných výskumných tém sa uskutočnilo s ohľadom na motiváciu ich jednotlivých čiastkových oblastí, aby bolo možné urobiť jasný, konkrétny a stručný záver.

Následná revízná práca sa uskutočnila aj v [11], ktorá zvažovala odlišný prístup k revízii. V práci sa uvádza a diskutuje vzorka prípadov použitia "internetu vecí" (IoT), ktoré poukazujú na rôzne typy jeho implementácií. Prípady použitia sú vybrané z najviac výskumne aktívnych segmentov, ktoré môžu využívať výhody 6G a jeho podporných tech-

nológii. Patria sem oblasti zdravotníctva, dopravy, inteligentných sietí a priemyslu 4.0. Okrem toho sa uvádza niekoľko praktických problémov, ktoré sa vyskytli, a skúsenosti získané pri implementácii týchto prípadov použitia. V tomto prehľade sa diskutuje o kľúčových požiadavkách týchto prípadov, ako aj o tom, ako sa prekrývajú s hlavnými hnacími silami nadchádzajúcej generácie bezdrôtových sietí.

Historická prehľadová štúdia o minulých sieťových technológiách a spôsobe, akým určili súčasné trendy v sieťach 6G, bola prvýkrát prezentovaná v [12]. Následne sa v nej rozpracovali štyri hlavné oblasti sietí 6G: distribuovaná AI, inteligentné okrajové výpočty v reálnom čase, 3D interkomy a inteligentné rádio. Okrem toho rozpracúva aj určité potenciálne vývojové technológie v každej oblasti popri súvisiacich výzvach v oblasti bezpečnosti a ochrany osobných údajov, ktoré sa objavujú. V prehľade sa napokon uvádza správa o možnom použití 6G.

Okrem toho sa v prehľadovej štúdii [13] kriticky hodnotí vízia bezdrôtovej komunikácie 6G a jej sieťová štruktúra. V štúdii sa uvádza prehľad rôznych kritických technických výziev, ktoré sa vyskytli, určité potenciálne riešenia relevantné pre štvrtú generáciu (4G), prenosové procesy na fyzickej vrstve, návrhy sietí a bezpečnostné opatrenia.

Hoci každý príspevok načrtol niekoľko prínosov, žiaden komplexný príspevok sa nezaobera technickými výzvami, nezdôrazňuje potenciálne aplikácie a kľúčové technológie a techniky transmisie. Preto je cieľom tohto článku poskytnúť ďalší a odlišný príspevok k literatúre ako prehľadový článok v porovnaní s ostatnými článkami o 6G, ktoré boli vybrané a diskutované predtým.

V prehľadovej štúdii sa skúmajú kľúčové zlepšenia, ktoré prináša technológia 6G, a porovnávajú sa s predchádzajúcimi mobilnými technológiami. To zahŕňa rýchlosť prenosu dát, kapacitu systému, latenciu a ďalšie kľúčové zlepšenia, ako je podpora optimálneho pokrytia s veľmi vysokou mobilitou, mobilné okrajové výpočty, umožnenie rozšírenej reality (AR) a spoľahlivosť pripojenia. V dokumente sa tiež rozoberajú kľúčové podporné technológie, ktoré budú hlavným faktorom umožňujúcim technológii 6G dosiahnuť vytýčené ciele. To zahŕňa spektrum komunikačných technológií, ako je THz komunikácia a VLC. Diskutuje sa aj o kľúčových technických výzvach a budúcich trendoch, na ktoré sa upozorňuje. Okrem toho tento dokument porovnáva 5G a 6G z hľadiska služieb, technológií a umožňujúcich kľúčových technológií.

Zvyšok článku je štruktúrovaný takto: V časti 2 je zhrnutý vývoj mobilnej bezdrôtovej komunikácie od prvej generácie (1G) po 6G. V časti 3 sa uvádzajú prípady použitia a aplikácie 6G. Ďalej sa v časti 4 rozoberajú požiadavky 6G. Následne sú v časti 5 predstavené technológie rádiového frekvenčného spektra (RF) 6G. V časti 6 sú potom uvedené kľúčové technológie umožňujúce 6G a príslušná príprava a implementácia. Ďalej sa v časti 7 uvádza niekoľko výziev 6G. Následne sú v časti 8 uvedené budúce smery vývoja technológií 6G. Nakoniec oddiel 9 uzatvára prehľadový článok.

2. Vývoj mobilnej komunikácie

V tejto ére bezdrôtových komunikačných sietí zaznamenal mobilný komunikačný priemysel, najmä jeho prenosové technológie a frekvenčné pásma, mimoriadny rast od mobilného systému až po pripravovaný mobilný systém 6G. Každá generácia má svoje špecifické vlastnosti, systémy a potenciály [14].

Mobilná sieť 1G, ktorá sa pri rečových službách spolieha na analógový prenos, začala vznikať začiatkom 80. rokov. V roku 1979 bol prvýkrát spustený mobilný systém Nippon Telephone and Telegraph (NTT), ktorý začal fungovať v japonskom Tokiu. O dva roky neskôr spustila svoj mobilný systém aj Európa. Najznámejšie analógové systémy boli Total Access Communication Systems (TACS) a Nordic Mobile Telephones (NMT) [15]. Hoci 1G bol prvým mobilným systémom, spôsobil revolúciu v technológiách vtedajších mobilných systémov. Používal analógový prenosový signál, ktorý podporoval len hlasové služby s minimálnou prenosovou rýchlosťou do 2,4 kb/s. Okrem toho pracoval vo frekvenčnom rozsahu 800 - 900 MHz so šírkou pásma 40 MHz a 30 kHz kanála

kapacitu. Prvá generácia používala multiplexovanie s frekvenčným delením (FDM). Keďže 1G používala na prenos analógový signál, vyskytli sa niektoré problémy, ako napríklad nízka kvalita hovorov, vysoká spotreba energie a slabé zabezpečenie dátovej kapacity [16].

V roku 1991 bola následne zavedená mobilná sieť druhej generácie (2G). Koncepčne táto mobilná sieť zahŕňa rovnomerné rozmiestnenie niekoľkých základňových staníc (BS) po celom svete, ktoré poskytujú viacero prístupových bodov (t. j. FDMA, viacnásobný prístup s kódovým delením (CDMA) a viacnásobný prístup s časovým delením (TDMA)) [17], aby používatelia mohli navzájom komunikovať. V súlade s tým sa technológie 2G, ako napríklad 2G Global System for Mobile Communications (GSM), 2,5G General Packet Radio Service (GPRS) a 2,75G Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE), spoliehajú na algoritmus kompresie a dekompresie (kodek) [18]. V porovnaní s 1G poskytovalo 2G niektoré ďalšie služby, ako napríklad "službu krátkych správ" (SMS) a "multimediálnu službu" (MMS), a poskytovalo lepšiu kvalitu služieb. Okrem toho bolo 2G vylepšené tak, aby mohlo pracovať vo frekvenčnom rozsahu 850 - 1900 MHz a s rýchlosťou prenosu dát do 64 kb/s. Druhá generácia využívala TDMA a CDMA. Celkovo 2G poskytovala kvalitnejšie služby mobilnej komunikácie a šifrovaný prenos dát pomocou digitálnej technológie [19].

Mobilná sieť sa ďalej rozvíjala zavedením tretej generácie (3G). Tretia generácia zahŕňa technické normy IMT-2000, ktoré obsahujú prvky spoľahlivosti a rýchlosti, konkrétne rýchlosť prenosu dát najmenej 200 kbps [20]. Vďaka vyššej rýchlosti pripojenia sa sieť transformovala z bežnej mobilnej siete na prenosné multimediálne zariadenia (napr. počítače, herné konzoly a tablety). Okrem kvalitných internetových služieb ponúka 3G aj lepšiu bezpečnosť prostredníctvom funkcií overovania používateľov pri pripájaní k iným bezdrôtovým zariadeniam [17]. V súlade s tým sú tri základné technológie pre sieť 3G: CDMA2000, širokopásmový viacnásobný prístup s kódovým delením (WCDMA) a časovo synchrónny viacnásobný prístup s kódovým delením (TD-SCDMA).

Po 3G sa zaviedla sieť 4G, v rámci ktorej mohli používatelia pristupovať k sieti kedykoľvek a kdekoľvek. Štvrtá generácia je synonymom pojmu "MAGIC", ktorý označuje "mobilné multimediálne riešenia kdekoľvek, globálnu mobilitu prostredníctvom integrovaných bezdrôtových a prispôbených služieb" [14]. Prostredníctvom 4G môžu používatelia využívať plynulý prístup k sieti a prenos IP od konca do konca, ako aj riadenie kvality služieb (QoS) s vyššou kvalitou služieb, mobilitou a rýchlosťou prenosu dát 20 Mb/s.

Komerčné využívanie 5G sa začalo už v roku 2019 po dokončení pôvodného kompletného súboru štandardov 5G. Zavedenie 5G znamená začiatok globálnej digitálnej éry s revolučnými štandardmi bezdrôtových technológií, najmä pokiaľ ide o rýchlosť prenosu dát, latenciu, mobilitu a dokonca aj počet pripojených zariadení [21]. Používatelia 5G môžu očakávať obrovské zlepšenia, napríklad rýchlosť prenosu dát až 10 Gb/s, výrazne nižšiu latenciu (na úrovni takmer 10 ms) pri vyššej kapacite, spoľahlivosti a QoS [22,23]. Vlastnosti 5G skutočne odlišujú túto pokročilú mobilnú sieť od jej predchodcov. Na rozdiel od svojich predchodcov 5G ako prvá využíva pásmo mmWave, novú technológiu frekvenčného pásma. Okrem toho je 5G ústrednou infraštruktúrou internetu vecí a dokáže integrovať množstvo nových technológií, ako je komunikácia medzi zariadeniami (D2D), softvérovo definované siete (SDN) a masívne viacnásobné vstupy a výstupy (mMIMO) [24 - 27]. 5G znamená revolučný vývoj komunikačných sietí.

Pomocou jedinej platformy 5G ponúka rôzne služby, od pokročilej mobilnej širokopásmovej komunikácie, automatizovaného riadenia a VR až po internet vecí. S rýchlym technologickým pokrokom a inováciami v poslednom desaťročí, ktoré presahujú 5G, aby sa uspokojili rastúce technologické potreby a požiadavky na všetkých úrovniach sú nevyhnutné.

Rok 2030 má byť predovšetkým rokom spustenia prvého komerčného systému pre technológiu 6G. Predpokladá sa, že do roku 2030 vznikne globálna digitálna spoločnosť, ktorá bude vo veľkej miere poháňaná vysoko pokročilým a takmer okamžitým bezdrôtovým pripojením [28,29]. Na tento účel bude 6G zohrávať ústrednú úlohu pri integrácii bezproblémového bezdrôtového pripojenia a rôznych technologických funkcií (napr. ukladanie do vyrovnávacej pamäte, komunikácia, výpočtová technika, riadenie, zobrazovanie, navigácia, určovanie polohy, radar a snímanie), ktoré podporujú plnohodnotné vertikálne aplikácie. 6G je v podstate samosprávny stroj, ktorý dokáže napodobniť ľudskú inteligenciu a vedomie a

ponúka rôzne spôsoby komunikácie a interakcie s inteligentnými terminálmi (napr. prostredníctvom mozgových vln alebo nervových signálov, očí, prstov a hlasu).

Ako vízia do budúcnosti a vďaka tomu, že 6G potenciálne využíva veľmi veľké spektrum v porovnaní s predchádzajúcimi generáciami [30], 6G výrazne zvýši rýchlosť prenosu dát, a to až 100-1000-krát rýchlejšie ako 5G [5]. V sieťach 6G budú preto k dispozícii stovky Gb/s až Tb/s spojov využívajúcich viacpásmové vysokorozšírené spektrum [31]. V tejto kombinácii sa napríklad využíva pásmo 1 - 3 GHz, pásmo 30 - 300 GHz v mm vlnách a pásmo 0,06 - 10 THz v THz. Okrem toho, pokiaľ ide o kapacitu, 6G má za cieľ prudko zvýšiť kapacitu až 1000-krát viac ako 5G. Napríklad objekty na úrovni vyšších biliónov budú pripojené k 6G, zatiaľ čo mobilné zariadenia na úrovni miliardy sa pripájajú k 5G. Aj z hľadiska latencie bude 6G poskytovať latenciu do 10-100 μ s. Inými slovami, vývoj mobilných komunikačných sietí od 2G po 5G sa sústredil na obsluhu ľudí, čo znamená, že latencia závisela od reakčných časov človeka, ako je reakčný čas zraku (~10 ms), reakčný čas sluchu (~100 ms) a reakčný čas vnímania (~1 ms) [3].

Očakáva sa, že šiesta generácia výrazne zmení vývoj bezdrôtových sietí od pripojených vecí k pripojenej inteligencii. Okrem toho je 6G potrebná na podporu všadeprítomných služieb umelej inteligencie od jadra siete až po koncové zariadenia [10]. Inými slovami, AI bude zásadným faktorom pri navrhovaní a optimalizácii protokolov, architektúr a prevádzky 6G [9,32].

3. Prípady použitia a aplikácie 6G

V tejto časti sa uvádzajú niektoré potenciálne prípady použitia a aplikácie 6G pre priemysel a verejných spotrebiteľov. Piata generácia sa vyvíja a to, čo bolo nasadené v 5G, sa zameriava najmä na mobilné širokopásmové pripojenie, zatiaľ čo ostatné aspekty 5G, ako je automatizácia, nízka latencia a vysoká spoľahlivosť pre výrobu, elektronické zdravotníctvo, hry a pripojené vozidlá, ešte len prídu a sú predmetom vydania 16, 17 a 18 [33-35]. Sieťová technológia sa vyvíja smerom k flexibilnej a agilnej infraštruktúre a očakáva sa, že 6G, podobne ako predchádzajúce generácie, bude ovplyvnená dnešnými novými technológiami.

Očakáva sa, že kľúčové témy "dvanástich globálnych megatrendov", ktoré navrhla skupina Visionary Innovation Group spoločnosti Frost & Sullivan [36], budú do roku 2030 formovať celú spoločnosť. Sieť 6G bude spĺňať požiadavky mnohých nadchádzajúcich technologických trendov a tém, ako sú továrne budúcnosti, autonómna mobilita a smerovanie k "nulovému" svetu ("nulová" energia, dotyk a chyby).

Komunikačné systémy doteraz prenášali údaje, ktoré komunikovali s dvoma ľudskými zmyslami, sluchom a zrakom. Jedným z hlavných cieľov 6G je preto prenos údajov súvisiacich s ďalšími ľudskými zmyslami, ako sú hmat, čuch a chuť. Tento prenos ďalších ľudských zmyslov sa vzťahuje na štvrtý rozmer (4D), ktorý umožní komunikačným systémom prenášať ďalšie zmyslové informácie, ako je napríklad znečistenie ovzdušia, hluk a svetlo. V tejto súvislosti možno 6G všeobecne charakterizovať ako integráciu medzi komunikáciou a zmyslami, ktorá by viedla k oveľa inteligentnejším, relevantným a personalizovaným službám a účinne a prirodzene by integrovala fyzický a virtuálny svet dohromady [37].

Šiesta generácia bude tiež využívať mobilnú technológiu na poskytovanie umelej inteligencie každému, kdekoľvek a kedykoľvek, ktorá bude využívať bezdrôtovú sieť 6G ako senzorovú sieť. Preto integráciou komunikácie so snímaním a AI bude 6G inteligentnou sieťou, ktorá otvorí a sprístupní niekoľko nových priemyselných aplikácií, ako je inteligentná analýza videa, všadeprítomné inteligentné systémy v reálnom čase a inteligentné služby pre zákazníkov. V nasledujúcich bodoch sú uvedené niektoré z potenciálnych aplikácií 6G [38,39]:

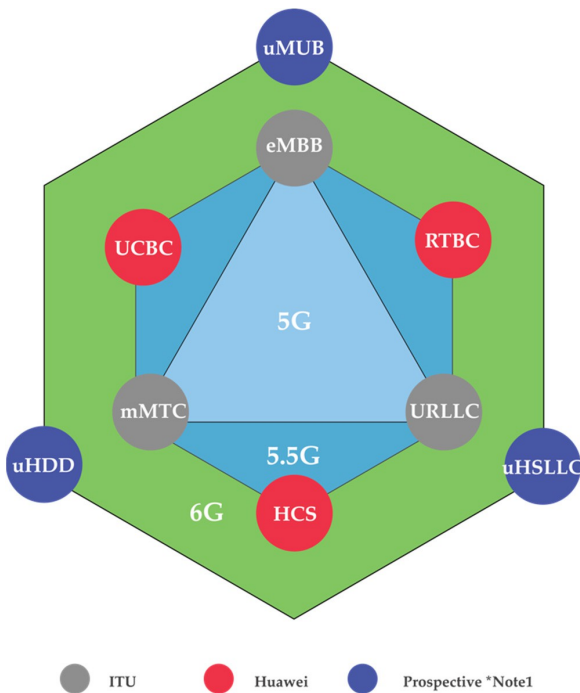
- Doprava: autonómne vozidlá spolupracujúce s prostredím a kooperujúce riadenie.
- Maloobchod: transakcie takmer v reálnom čase a bez dotyku od výroby až po spotrebu.
- Výroba: autonómne a dynamicky rekonfigurovateľné výrobné linky založené na dopyte takmer v reálnom čase.
- Zdravotníctvo: roboticky riadená chirurgia, chirurgické zákroky na diaľku a rozšírené možnosti presnej chirurgie.

- Priemysel/verejnosť: kooperatívna výroba, masívna vstavaná inteligencia, nasadenie nízkoenergetických senzorov v dodávateľskom reťazci a okolí.
- Vysoko verné hranie: Hrajte okamžite bez sťahovania, s možnosťou predplatného a modelom priamej distribúcie.
- Robotická výstavba: autonómne zariadenie staveniska, plánovanie a výstavba v reálnom čase na stavenisku.
- Okamžité doručenie: rozsiahla logistika vozového parku a dynamické miesta doručenia.
- Autonómia: autonómia procesov, autonómia kognitívnych procesov, virtuálni agenti a analytika, vykonávanie založené na umelej inteligencii a strojovom učení (ML) a inteligentný podnik.
- Skutočne pohlcujúca rozšírená realita (XR): Kombinácia VR, AR a zmiešanej reality (MR) a jej využitie v oblasti zábavy, medicíny, vedy a vzdelávania.
- Vysoko verný mobilný hologram: ako mediálna technológia novej generácie na poskytovanie služieb v reálnom čase.

V 6G sa ultraspolahlivá komunikácia s nízkou latenciou (uRLLC), rozšírené mobilné široké pásmo (eMBB) a masívna komunikácia strojového typu (mMTC) rozšíria o ďalšie tri dimenzie [40], ktorými sú všadeprítomné mobilné ultraširoké pásmo (uMUB), ultravysoká hustota dát (uHDD) a ultravysokorýchlostná komunikácia s nízkou latenciou (uHSLLC). Pritom uMUB v systémoch 6G umožňuje prenos ľubovoľného požadovaného výkonu v celej oblasti vesmír-vzduch-pozemské-morské. Zatiaľ čo uHSLLC poskytuje ultravysoké rýchlosti a veľmi nízku latenciu, uHDD spĺňa kritériá hustoty dát a vynikajúcej spoľahlivosti. Okrem toho si pripravované služby uMUB, uHDD a uHSLLC vyžadujú komplexný spoločný návrh komunikačných, snímacích a výpočtových schopností.

S cieľom zlepšiť prípady použitia 5G sa tri nové prípady použitia povýšili ako 5.5G na hlavné tri prípady použitia 5G, ktorými sú širokopásmová komunikácia v reálnom čase (RTBC), širokopásmová komunikácia orientovaná na uplink (UCBC) a harmonizovaná komunikácia a snímanie (HCS) [41]. Podľa vízie a poslania spoločnosti Huawei tieto tri prípady povedú za hranice internetu všetkého. (IoE), čo umožní inteligentný IoE.

Porovnanie kľúčových scenárov 5G, 5.5G a 6G je znázornené na obrázku 1. Očakáva sa, že šiesta generácia zdedí niektoré funkcie a technológie 5G, vyvinie niektoré súčasné prenosové technológie na základe budúcich požiadaviek a revolučne zmení niektoré technológie na základe požadovaných prípadov použitia.



Obrázok 1. Porovnanie prípadov použitia systémov 5G a 6G. * Poznámka 1: Ref. [40].

Na realizáciu uvedených aplikácií vo veľkom rozsahu je potrebná sieť s extrémne vysokou rýchlosťou prenosu dát, spoľahlivosťou a energetickou účinnosťou. V ďalšej časti sa podrobne rozoberajú požiadavky 6G.

4. Požiadavky na 6G

Pri porovnaní 6G s 5G sa 5G zameriava viac na rýchlosť, masovú konektivitu, spoľahlivosť a latenciu, zatiaľ čo navrhované smery zamerania pre 6G sú udržateľnosť, konektivita pokrytia, synchronizácia, geolokácia a dôveryhodnosť [37].

Piata generácia je schopná dosiahnuť nízku latenciu jednej milisekundy, pričom nebola navrhnutá so zaručenou časovou synchronizáciou. Preto existuje časový rozdiel medzi rôznymi tokmi alebo rôznymi reláciami generovanými rôznymi objektmi, ktoré potrebujú vzájomnú interakciu. V 6G sa budú navzájom integrovať viaceré objekty, a to buď vo virtuálnom, alebo fyzickom svete. Preto musia byť časové rozdiely medzi všetkými objektmi a komunikačnými spojeniami v rámci určitého limitu, aby sa zabezpečila prirodzená reakcia a interakcia medzi nimi. Na druhej strane, časový jitter je veľmi dôležitý aj pre budúce komunikácie, ktoré presahujú možnosti 5G. Keďže interakcia objektov v 6G je nevyhnutná, potreba kvalitnej geolokácie s vysokým rozlíšením zohráva pri realizácii 6G zásadnú úlohu.

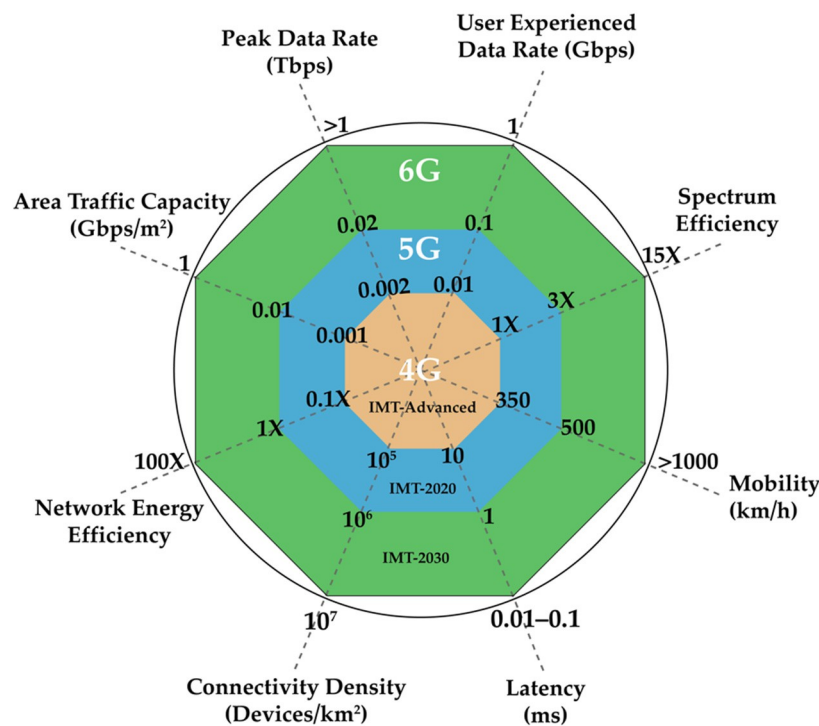
Ďalším kritickým problémom 6G, ktorý by sa mal náležite vyriešiť, je konektivita. Budúca sieť nepotrebuje len ultra vysokorýchlostné pripojenie, ale aj odolnosť a adaptívne a prispôsobiteľné pripojenie. Napríklad pri prenose 4D videa je potrebné preniesť veľké množstvo údajov v rozsahu terabitov za sekundu, preto sú spolu s vysokou šírkou pásma potrebné inteligentné algoritmy na komprimáciu údajov, napríklad s pomocou umelej inteligencie na predpovedanie ďalšieho postoja tváre.

Na druhej strane, takýto rozsiahly prenos dát si vyžaduje masívne spätné pripojenie s nízkou latenciou. Okrem toho 6G vyžaduje flexibilný prístup k spektru, informácie o stave kanála (CSI) s vysokým rozlíšením a predkódovanie pre distribuované mMIMO, vysokokapacitný uplink, vyššiu kapacitu a kvalitu siete pre mobilný cloud XR a nízkoenergetické, vysoko presné určovanie polohy [42–44]. Ďalším cieľom 6G v oblasti pripojenia je prekonanie digitálnych rozdielov, keď má každý bez ohľadu na svoju polohu dôstojný prístup k sieťovým službám. Ďalším extrémom je masívna komunikácia zariadení s nízkym výkonom alebo "vecí", ktorá re-kvizuje využitie zdrojov na vysokú hustotu pripojenia, ale ktorá zároveň podporuje včasný, efektívny a spoľahlivý mechanizmus doručovania údajov. Sieť 6G by poskytovala veľmi vysokú špičkovú prenosovú rýchlosť, až 1 - 10 Tb/s, s veľmi nízkou latenciou, až 10 - 100 μ s, ale to všetko je potrebné dosiahnuť pri oveľa nižšej spotrebe energie nielen na jednotku dát, ale aj ako celková spotreba energie [45].

Celkovo 6G ponúka pozoruhodné sieťové možnosti, ktoré sú nevyhnutné pre realizáciu inteligentnej informačnej spoločnosti do roku 2030. Na obrázku 2 sú uvedené technické požiadavky 6G v porovnaní s požiadavkami 4G a 5G, ktoré zahŕňajú tieto prvky 6G [28]:

- (1) Efektívnosť frekvenčného spektra 5 až 10-krát vyššia ako v prípade 5G;
- (2) Špičková prenosová rýchlosť najmenej 1 Tb/s alebo v niektorých prípadoch až 10 Tb/s, ktoré zahŕňajú bezdrôtový prenos dát THz a predný prenos (x-haul) [46];
- (3) Rýchlosť prenosu dát 1 Gb/s alebo v určitých prípadoch (napr. vnútorný hotspot) až 10 Gb/s;
- (4) Desiatkrát vyššia hustota pripojenia ako v prípade 5G, ktorá dokáže udržať až 10⁷ zariadení na plochu (v km^2) a kapacitu prevádzky v oblasti až do 1 Gb/s na plochu (v m^2) pre hotspot;
- (5) Bezdrôtová sieť, ktorá môže podporovať rôzne (alebo niekedy aj protichodné) požiadavky [47];
- (6) Vysoká mobilita (≥ 1000 km/h) a oneskorenie vo vzduchu 10–100 μ s pre prijateľnú kvalitu zážitku (QoE) v prípadoch, ktoré zahŕňajú hyper-HSR a letecké systémy;
- (7) Obrovská hustota pripojenia až 10⁷ zariadení/ km^2 , čo znamená 10-násobok hustoty pripojenia v porovnaní s 5G; okrem toho kapacita prenosu v oblasti až 1 Gb/s/ m^2 pre scenáre, ako sú hotpoty;
- (8) 10–100-krát vyššia energetická účinnosť ako v 5G;

(9) 5-10-krát vyššia účinnosť spektra ako v 5G.



Obrázok 2. Kľúčové možnosti sietí 6G [48].

V tabuľke 1 sú zhrnuté rozdiely medzi 5G a 6G. Z nej vyplýva, že 6G prinesie dramatické zmeny v mobilnej komunikácii. Okrem toho možno konštatovať, že 6G zvýši rýchlosť prenosu dát, latenciu, frekvenčné spektrum a hustotu pripojenia až 10-100-krát v porovnaní s 5G.

Tabuľka 1. Porovnanie komunikačných techník 5G a 6G [28,40,48-54].

Charakteristika	5G	6G
Prevádzková frekvencia	3 GHz-300 GHz	Do 1 THz
Špičková prenosová rýchlosť	20 Gb/s	1 Tbps
Latencia	1 ms	10-100 μs
Mobilita	500 km/h	>1000 km/h
Dostupné spektrum	30 GHz	10-100-krát vyššia ako 5G
Spektrálna účinnosť	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Energetická účinnosť	Vysoká	Mimoriadne vysoký
Hustota pripojenia	10 ⁶ zariadení/km ²	10 ⁷ zariadení/km ²
Pokrytie	99.99%	99.9999%
Presnosť polohovania	Presnosť merača	Centimetrová presnosť
Integrácia satelitu	Čiastočné	Úplne
Integrácia automatizácie	Čiastočné	Úplne
Informovanosť o sieti	Čiastočná zrozumiteľnosť	Všadeprítomná inteligencia
Spôľahlivosť	1-10-5	1-10-9
Úroveň služieb	VR/AR/3D	Hmatová stránka
XR	Čiastočné	Plne

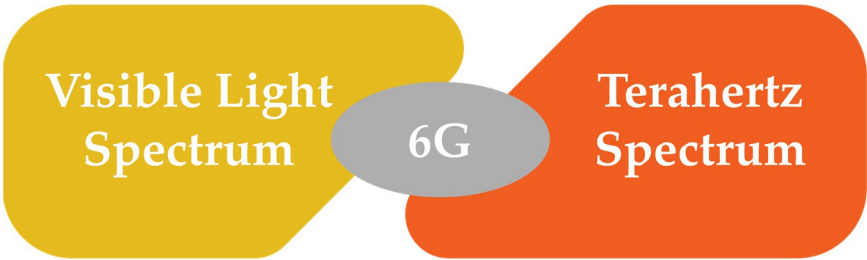
Tabuľka 1. Kont.

Charakteristika	5G	6G
Haptická komunikácia	Čiastočné	Plne
Komponenty inteligentného mesta	Oddelené	Integrovaná stránka
IRS	-	Áno
Normy	5G/NR	-
Základná sieť	IoT	IoE
HetNets	Flexibilné	Mimoriadne flexibilné
Scenáre používania	EMBB, URLLC a mMTC	uMUB, uHSLLC a uHDD
Hlavné technológie	mmWave, mMIMO, UDN, SDN	THz, SM-MIMO, laser a VLC, kvantové technológie, blockchain, AI/ML
Aplikácie	VR/AR/360° videá, UHD videá, V2X, IoT, Inteligentné mesto/továreň/domácnosť, telemedicína a nositeľné zariadenia	Holografický, hmatový/haptický internet, plnosmyslový a realita, plne automatizovaná jazda, priemyselný internet, cestovanie do vesmíru, hlbinné prehliadky a internet bio-nano vecí.
Flexibilné spektrum	Flexibilný duplex	Voľný duplex

5. Technológie 6G RF spektra

Jedným z kľúčových prvkov mobilnej komunikácie novej generácie je vysielacie frekvenčné spektrum. Mobilné siete zaznamenali v priebehu rokov pozoruhodný nárast, najmä pokiaľ ide o zdroje frekvenčného spektra (pre každú generáciu), vzhľadom na rastúce požiadavky na vyššiu rýchlosť alebo rýchlosť prenosu údajov. Keďže sa očakáva, že vývoj 6G ponúkne výrazne vyššie prenosové rýchlosti (až Tb/s), očakáva sa prevádzka na vyšších frekvenciách pre dostupné spektrum a šírku pásma. VLC aj THz sú spektrá s veľmi sľubnými vyhliadkami na realizáciu vízie 6G [49].

Na obrázku 3 sú uvedené dve hlavné technológie spektra 6G, zatiaľ čo v tabuľke 2 sú zhrnuté rôzne technológie komunikácie spektra pre 5G a 6G vrátane mm vln, THz a VLC.



Obrázok 3. Technológie spektra 6G.

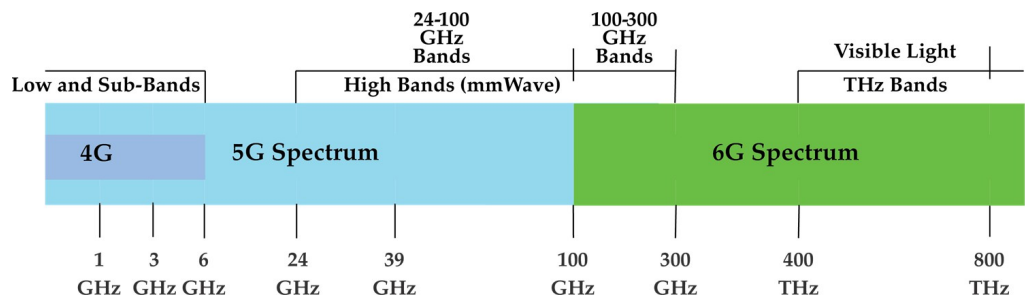
5.1. THz spektrum

THz vlny sú elektromagnetické vlny so spektrom od 0,1 do 10 THz (licencované spektrum) a vlnovou dĺžkou od 30 do 3 000 mikróvov. Spektrum spadá do prechodovej oblasti medzi makroelektronikou a mikrofototechnikou, konkrétne medzi mikrovlnami (od ich spodného pásma) a infračerveným svetlom (až po jeho vyššie pásmo) [55]. Hoci frekvenčné pásmo (ktoré siaha od mikrovln po optické vlny) pre THz nemusí byť úplne rozvinuté, THz komunikácia vykazuje silné stránky bohatých zdrojov spektra a vysokej prenosovej rýchlosti, ktoré ponúkajú veľmi hodnotný širokopásmový bezdrôtový prístup pre budúcu mobilnú komunikáciu [56]. Okrem toho je THz komunikácia spojená s rozsiahlym rozsahom šírky pásma (až do 10 THz). Okrem jej schopnosti

peniknúť do vizuálne netransparentných objektov, THz komunikácia umožňuje aj interakciu objektov v mikrorozmeroch (napr. nanosiete) vďaka anténam so zmenšenou mierkou (λ približne 1 mm pre 300 GHz). Na obrázku 4 sú znázornené pásma spektra pre generácie 4G až 6G vrátane pásiem mmvln, THz a VLC.

Tabuľka 2. Porovnanie technológií 5G (mmvlny) a 6G (THz a VLC).

	Technológia 5G	Technológia 6G	
	mmWaves	THz	VLC
Frekvenčné pásmo	3 GHz-99 GHz	100 GHz - 10 THz	430 THz-790THz
Podporná rýchlosť prenosu údajov	Gigabity za sekundu	Terabity za sekundu	Gigabity za sekundu
Strata šírenia	Nízka strata šírenia (v porovnaní s THz)	Vysoká strata šírenia	Vysoká
Podvodná komunikácia	Nie	Nie	Áno
Odkaz	NLOS	NLOS	LOS
Spektrum	Licencované	Licencované	Bez licencie
Elektromagnetické rušenie	Áno	Áno	Nie
Preniknúť cez nepriehľadné objekty	Áno	Áno	Nie
Výzvy	Návrh obvodu, vysoká strata šírenia	Molekulárna absorpcia, výzvy pri návrhu obvodov, vyššie straty pri šírení (v porovnaní s mmWave), vysoká strata prieniku	Malé pokrytie, vyžaduje RF uplink, tmavé objekty absorbujú svetelné vlny, trpia šumom spôsobeným iným zdrojom svetla
Komunikácia o životnom prostredí	Vnútorne/vonkajšie prostredie	Vnútorne/vonkajšie prostredie	Prevažne vo vnútri
Potenciál	Široké pásmo, malá veľkosť antény, sústredené lúče, možno kompenzovať stratu na ceste a umožniť priestorový multiplex.	Veľká šírka pásma (100x mmWave), malé rozmery antény, fokusované lúče	Nízkonákladový hardvér, nízke rušenie, bezlicenčné spektrum
Potenciálne aplikácie	Prístup k malým bunkám, mobilný prístup a bezdrôtový backhaul	Autonómne vozidlá, cloud, mobilné siete HetNet	Li-Fi, systém identifikácie pomocou viditeľného svetla, nemocničné roboty, podvodná komunikácia a dopravné komunikačné systémy
Prenosový výkon	Vysoká	Vysoká	Nízka



Obrázok 4. Pásma spektra 4G, 5G a 6G.

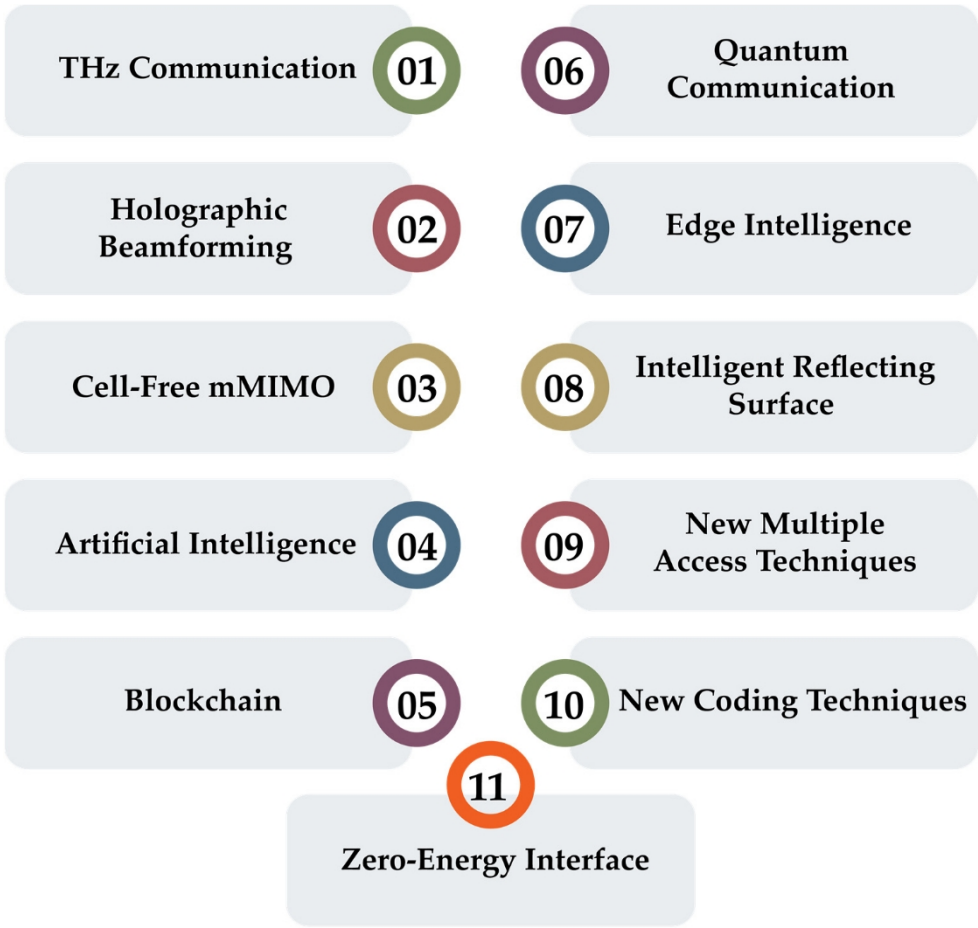
5.2. Spektrum viditeľného svetla

Optická bezdrôtová komunikácia (OWC) využívajúca infračervené, viditeľné a ultrafialové spektrum sa považuje za doplnok mobilnej komunikácie založenej na rádiových vlnách. V rámci OWC má viditeľné svetlo so spektrom od 430 do 790 THz (nelicencované spektrum) najvyšší potenciál vďaka širokému využitiu svetelných diód (LED) a

technologický pokrok. V prípade LED sa na rozdiel od predchádzajúcich osvetľovacích technológií môžu rýchlo meniť úrovne intenzity svetla, čo umožňuje rôzne spôsoby kódovania údajov vo vyžarovanom svetle [57]. VLC využíva LED na účely osvetlenia aj vysokorýchlostnej dátovej komunikácie. Na rozdiel od typických RF pásiem predstavuje VLC ultravysokú šírku pásma (THz) a opakované použitie frekvencie a neobmedzený prístup k spektru bez elektromagnetického rušenia [58]. Využitie viditeľného spektra a technológií VLC (pre spoje krátkeho dosahu) je nevyhnutné na dosiahnutie výkonu optických vlákien pre mobilnú sieť 6G. Súčasná technológia VLC v interiéri je však dnes pevne stanovená v rozsahu niekoľkých desiatí megabitu za sekundu až 100 Mb/s na vzdialenosť 5 m. Napriek tomu môže spustenie nových svetelných zdrojov založených na technológii micro-LED (vzhľadom na absenciu formovania lúča a komerčných hotových svetelných zariadení) vyriešiť takéto obmedzenia. Použitím jednodiodovej LED v laboratóriu môže takáto inovácia poskytnúť takmer 10 Gb/s a šírku pásma viac ako 1 GHz.

6. Podporné faktory pre 6G a príslušnú technickú prípravu a implementáciu

Mnohé technológie, ako napríklad THz komunikácia, holografické formovanie lúčov (HBF), mMIMO, AI, blockchain a kvantová komunikácia (QC), patria medzi top technológie ako kľúčové technológie 6G. Tieto technológie sú opísané v nasledujúcej podkapitole. Obrázok 5 predstavuje najdôležitejšie kľúčové technológie umožňujúce 6G.



Obrázok 5. Kľúčové podporné technológie 6G.

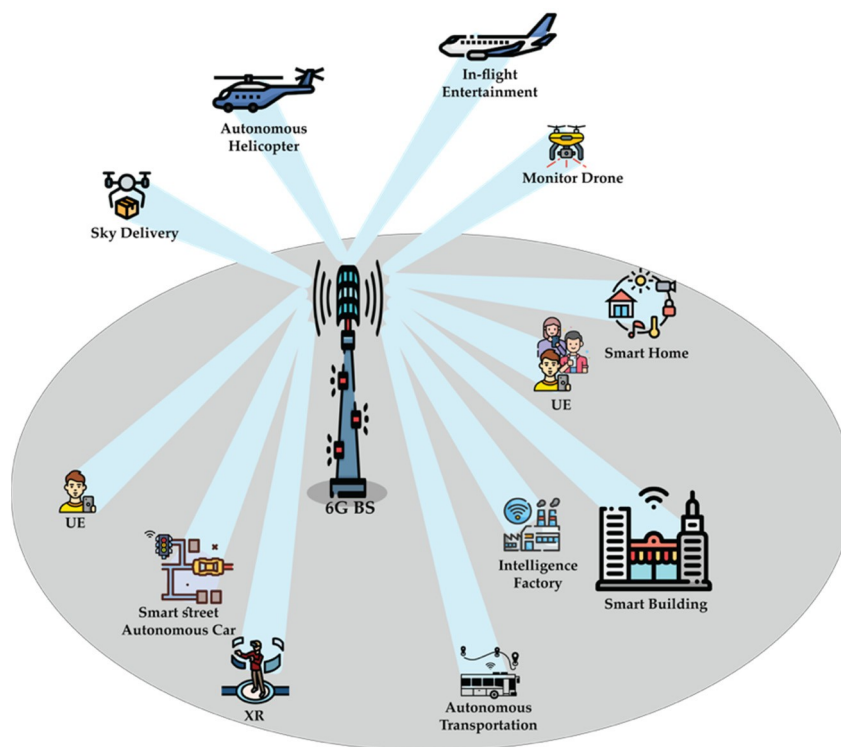
6.1. THz komunikácia

Keďže ide o prvý bezdrôtový komunikačný systém s ultravysokou rýchlosťou komunikácie, na podporu funkcií, ktoré si vyžadujú prenosové rýchlosti v jednotkách Tb/s, je potrebné používať frekvenčné pásma s frekvenciou vyššou ako 0,1 THz. Kapacita rádiového pásma je nedostatočná na uspokojenie rýchlo rastúceho globálneho dopytu po bezdrôtovej komunikačnej technológii, ktorá

podnietila rastúci záujem o THz komunikáciu [59] pre sieť 6G. Obrovské zdroje šírky pásma v oblasti THz (ktorá sa pohybuje od 0,1 THz do 10 THz) riešia obmedzenia niektorých technológií pri zvládaní vysokej rýchlosti. Prostredníctvom využitia pásma THz možno optimalizovať využitie 6G s výrazne zvýšenou šírkou pásma, kapacitou, rýchlosťou a bezpečnosťou siete. Pásmo THz navyše dokáže držať krok s kapacitou buniek v nanorozmeroch až po mikrometre nad 10 m bez toho, aby sa znížila rýchlosť v komunikácii [60] a podporil sa internet nano vecí (IoNT) [61,62].

6.2. Holografické formovanie lúča

Formovanie lúča [63] je technika, ktorá využíva na vysielanie a prijímanie cielený úzký lúč s veľmi vysokým ziskom pomocou anténnych sústav. Dosahuje to sústredením výkonu v malom uhlovom rozsahu. Formovanie lúča zlepšuje pokrytie a priepustnosť a zároveň zvyšuje pomer signálu k rušeniu plus šumu (SINR), čo sa môže využiť na monitorovanie osôb. HBF, ako je znázornené na obrázku 6, je pokročilejšia technika formovania lúča, ktorá využíva softvérovo definovanú anténu (SDA). VF signály z rádia sú vedené cez optický hologram na zadnú stranu antény (holografická doska) a až potom sa tvar a smer lúča upraví tak, aby odrážal tieto drobné prvky [64]. Použitie HBF umožňuje systémom 6G a zariadeniam internetu vecí flexibilne a efektívne zdieľať rádiové frekvencie [65,66]. Okrem toho HBF zvyšuje presnosť určovania polohy v sieťach 6G a IoT až na centimetre [67].

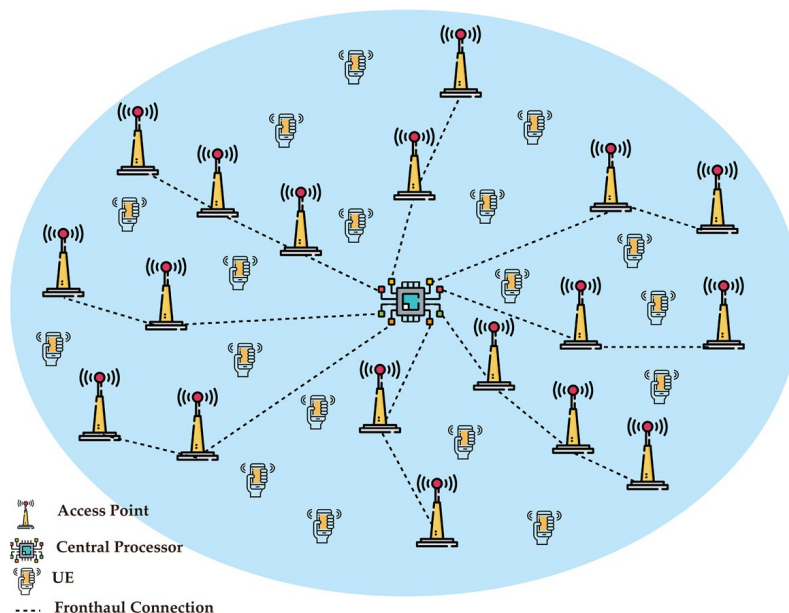


Obrázok 6. Holografické formovanie lúča.

6.3. Technológia mMIMO bez buniek (CF-mMIMO)

mMIMO sa začína zavádzať na niektorých trhoch po celom svete, ale stále ide o relatívne nezrelú technológiu, ktorá by mala dozrieť a poskytnúť viac aplikácií a prípadov použitia v 6G. Jednou zo súčasných výziev širokopásmového pripojenia je poskytovanie stabilnej/spoľahlivej kvality služieb v oblasti pokrytia. Využitie bezbunkovej (distribuovanej) technológie mMIMO sa považuje za jedno z potenciálnych riešení na zlepšenie pokrytia v budúcnosti. V bezbunkových štruktúrach by sa všetky distribuované mMIMO mali javiť ako jedno fyzické spoločne umiestnené mMIMO, aby vytvorili ultra mMIMO.

CF-mMIMO (obrázok 7) sa považuje za spektrálne a energeticky efektívny systém, ktorý dokáže súčasne obslúžiť množstvo používateľov prostredníctvom rovnakého rádiového zdroja. Zároveň dokáže účinne znížiť spotrebu vyžarovacieho výkonu a zmierniť rušenie medzi susednými používateľskými terminálmi. Popri mnohých výhodách mMIMO však jeho výkonnosť obmedzujú náročné problémy, ako je zložitý postup predkódovania, časová synchronizácia v duplexe s časovým delením (TDD) [68] a veľká réžia spätnej väzby CSI.



Obrázok 7. Masívne MIMO bez buniek.

Ako sa uvádza v časti 4, jedným z hlavných obmedzení 5G je otázka časovej synchronizácie. V scenári v reálnom čase bude viacero objektov navzájom spolupracovať vo fyzickom alebo vo virtuálnom svete, preto v CF-mMIMO bude okrem réžie CSI a alokácie zdrojov dôležitá aj časová synchronizácia.

6.4. Umelá inteligencia (AI)

AI [69] nie je súčasťou sietí staršej generácie (od 1G po 4G) [64]. Je súčasťou siete 5G, oficiálne od najnovšieho dodatku v špecifikáciách 3GPP (3rd Generation Partnership Project) Release 18 [35], od ktorej sa očakáva prínos pre telekomunikačný sektor s rozvojom rôznych pozoruhodných aplikácií [70–73]. Ako súčasť novej siete 6G zohráva umelá inteligencia zásadnú úlohu pri revolúcii v komunikácii a automatizácii, napríklad v procese odovzdávania [74–78], pridelovania zdrojov [79,80] a výberu siete. Okrem toho integrácia AI do sietí 6G vedie k vyššiemu výkonu, najmä ak ide o aplikácie citlivé na oneskorenie. Koniec koncov, AI aj ML sú kľúčové technológie pre 6G [49]. Ak vezmeme do úvahy prípad ML, jej algoritmy sa môžu efektívne využívať na pridelovanie zdrojov BS a blízky optimálny výkon. Okrem toho inteligentné materiály používané vo verejnom prostredí (napr. budovy alebo pouličné osvetlenie) môžu využívať sieť s prispôbenými zmenami (na rádiové vlny). Okrem toho môžu techniky hlbokého učenia pomôcť zvýšiť presnosť určovania polohy vo vnútri budov [81].

6.5. Blockchain

Blockchain [82–85] je súčasťou revolúcie pre budúce mobilné komunikačné technológie. Prostredníctvom rôznych vlastností blockchainu (napr. auditovateľnosť, decentralizácia, nemennosť a transparentnosť), ktoré sú nevyhnutné pre komunikáciu 6G, lepšie bezpečnostné funkcie umožňujú bezpečný prístup ku kritickým údajom v rôznych sieťových subjektoch a neskrotná distribuovaná účtovná kniha obsahujúca všetky údaje je zdieľaná medzi všetkými relevantnými subjektmi [86]. Okrem toho blockchain ponúka aj množstvo výhod pri orchestrácii zdrojov a budúcich 6G

prístup k sieti. Okrem kryptomien je blockchain užitočný aj pre finančné a sociálne služby, riadenie rizík a zdravotnícke zariadenia. Úloha blockchainu v rôznych aplikačných oblastiach bola skúmaná vo viacerých štúdiách [87]. Existuje mnoho významných výhod 6G s využitím blockchainu; napríklad 6G bude môcť efektívnejšie monitorovať a kontrolovať využívanie a zdieľanie zdrojov s využitím blockchainu [88]. Na blockchaine v 6G sa dajú vytvoriť aj nové obchodné perspektívy, tvorba hodnôt a konkurenčné výhody, ktoré umožnia vytvoriť udržateľné a škálovateľné modely spoločností [89].

6.6. Kvantová komunikácia

Rovnako ako predtým opísané technológie, QC [90] je ďalšou kritickou technológiou 6G, ktorá poskytuje neobmedzenú bezpečnosť komunikácie. Kritickým rozdielom medzi konvenčnou binárnou komunikáciou a QC je, či je možné odhaliť odpočúvanie na mieste [91]. Vďaka použitiu kvantových princípov nie je možné získať prístup k údajom zakódovaným v kvantovom stave (pomocou fotónov alebo kvantových častíc) alebo ich duplikovať bez toho, aby sa údaje zmenili (napr. korelácia spletených častíc a neodcudziteľný zákon). Okrem toho superpozičná povaha qubitov v QC vedie k vyššej rýchlosti prenosu údajov. V súčasnosti existuje mnoho typov QC vrátane kvantovej distribúcie kľúčov, kvantového zdieľania tajomstva, kvantovej teleportácie a kvantovej bezpečnej priamej komunikácie [92]. Významnou výhodou tejto technológie je, že môže výrazne zlepšiť bezpečnosť a spoľahlivosť údajov. Zásah protivníka v QC môže zmeniť kvantový stav. Z tohto dôvodu príjemca nemôže o interferencii zostať nepovšimnutý [28]. Okrem toho QC výrazne zlepšuje efektívnosť siete tým, že poskytuje informácie v reálnom čase a mimoriadne rýchlo reaguje na požiadavky používateľa [93]. QC sa môže zlepšiť aj pri poskytovaní ultra nízkej latencie v sieťach 6G. Ďalšie funkcie, ktoré QC poskytuje, sú [94]:

- sa spolieha na qubit;
- urýchlí spracovanie údajov pre modely ML a hlbokého učenia;
- umožňuje súčasné spracovanie miliónov zariadení;
- umožňuje efektívnejšie spracovanie veľkého množstva údajov.

6.7. Edge Intelligence

Piata generácia sľubuje zmeny v troch rôznych oblastiach: vyššia rýchlosť, návrh systému SDN a podpora pre edge computing. Posledná z nich môže mať transformačný vplyv, pretože v skutočnosti to, čo edge computing ponúka, je pre koncových používateľov siete 5G. Poskytuje možnosť mať systémy, ktoré bežia lokálne alebo na veľmi blízkych okrajoch bez toho, aby boli globálne. Preto je pre koncových používateľov žiaduce, aby mali k dispozícii prostredie, ktoré by mohlo poskytovať súkromné, bezpečné a efektívne pripojenie k okrajovému serveru. Takýto systém by mohol uľahčiť spúšťanie pracovných záťaží umelej inteligencie, analýzu údajov a šifrovanie anonymizácie ťažby na lokálnom mieste [95,96].

Jedným z prvých používateľov edge computingu pre systémy mobilných sietí 5G je spoločnosť SK Telecom. Vypracovali plán implementácie architektúry mobilných hrán na dekon- tralizáciu serverovej architektúry v celej Južnej Kórei, čo viedlo k zníženiu komunikačných oneskorení až o 60 % [97]. Je to tiež súčasť úsilia o splnenie jedného z "trojuholníka 5G", t. j. URLLC, ktorý by mal ponúknuť oneskorenie blízke 1 ms.

5G však čelí niektorým architektonickým obmedzeniam, ako je napríklad škálovateľnosť siete. Jednou z vecí, ktoré by sa mali vziať do úvahy, je, že sieťové rezy sa musia implementovať do jednotlivých sieťových smerovačov, čo môže viesť k určitým problémom so škálovateľnosťou. Predpokladá sa, že v 6G by mala byť k dispozícii nová architektúra s rôznymi prístupmi na podporu sieťových plátok [96].

Ďalším obmedzujúcim faktorom, ktorému 5G čelí, je využitie mmWave. Hoci mmWave môže poskytovať vyššiu rýchlosť komunikácie, je obmedzená na komunikáciu na krátke vzdialenosti. V 6G je trendom poskytovať vyššie rýchlosti prostredníctvom THz komunikácie, čo ďalej obmedzuje komunikačný dosah. Preto, aby sa zabezpečila konektivita pre veci v prostredí, musia všetky zariadenia prijímať služby pod prístupovým bodom (AP) v ich blízkosti. Takýto typ pripojenia je zraniteľný voči nesúladu rýchlostí, napr. existencia

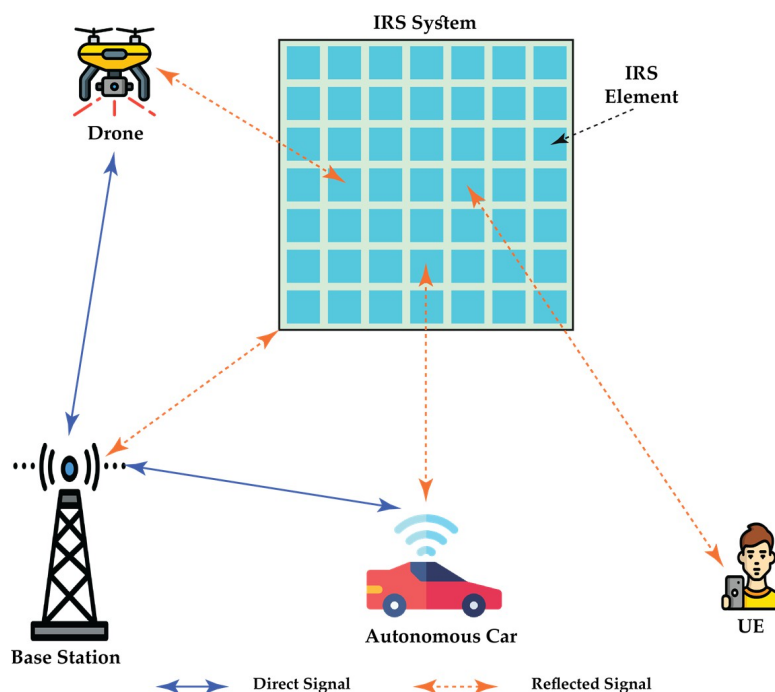
veľmi vysoký koniec na jednej strane AP a nižšie pásmo a nižšia rýchlosť na druhej strane. To vedie k potrebe rozšírenia funkcií okrajových počítačov [96].

Očakáva sa, že 6G s inteligentným využívaním metód umelej inteligencie bude smerovať k robustným okrajovým schopnostiam na zvládnutie komunikačného nesúladu, ako aj k novej základnej architektúre na inteligentnejšie okrajové výpočty [98]. Očakáva sa teda, že existujúca technológia edge computing sa do roku 2030 vyvinie na technológiu inteligencie edge.

6.8. Inteligentný reflexný povrch (IRS)

IRS (intelligent reflecting surface), nový koncept v bezdrôtovej komunikácii, je rozšírením mMIMO [99]. V poslednom čase sa považuje za sľubnú technológiu, ktorá je vysoko schopná znížiť energetickú náročnosť bezdrôtových sietí a tiež dosiahnuť teoreticky neporovnateľné a mMIMO prírastky [100,101]. IRS zahŕňa veľkú plochu, ktorá je umiestnená nad stenou alebo rovným povrchom. Pozostáva zo značného počtu nízkonákladových odrazových elektronických komponentov, ktoré majú rekonfigurovateľné premenné, ako sú konvenčné odrazové polia, ako aj varaktorové diódy alebo mikroelektricko-mechanické systémy, ktorých rezonančnú frekvenciu možno elektronicky regulovať.

Keďže IRS je pomerne jednoduchá na inštaláciu a spotrebúva málo energie, komunikácia s podporou IRS sa môže použiť na výrazné zvýšenie pokrytia sietí 6G v rôznych možných situáciách [102–104]. IRS sa môže napríklad použiť na pokrytie vonkajších stien budov vo vonkajšom mestskom prostredí. To poskytuje príležitosť na zlepšenie pokrytia a zvýšenie energetickej účinnosti sietí 6G v mestách. IRS možno použiť najmä na povrchu vysokých budov, čím sa vytvorí virtuálne spojenie priamej viditeľnosti (LoS) medzi AP a IRS, čo je výhodné najmä vtedy, keď je priama cesta extrémne zatienená [105]. Okrem toho, z dôvodu rozsiahleho nasadenia IRS môže dôjsť k výraznému zníženiu elektromagnetického žiarenia produkovaného sieťovými in- fraštruktúrami v meste. IRS sa môže použiť aj na pokrytie vnútorných stien vo vnútornom prostredí s cieľom zlepšiť lokálnu konektivitu rôznych typov zariadení, ako sú mobilné telefóny a tablety, ktorých prevádzka závisí od bezdrôtového pripojenia. IRS sa môže špecificky použiť v stropoch a podzemných stenách, aby ponúkol požadovanú konektivitu niekoľkým používateľom súčasne [102]. Na obrázku 8 je znázornený IRS.



Obrázok 8. Inteligentný reflexný povrch.

6.9. Nové techniky viacnásobného prístupu

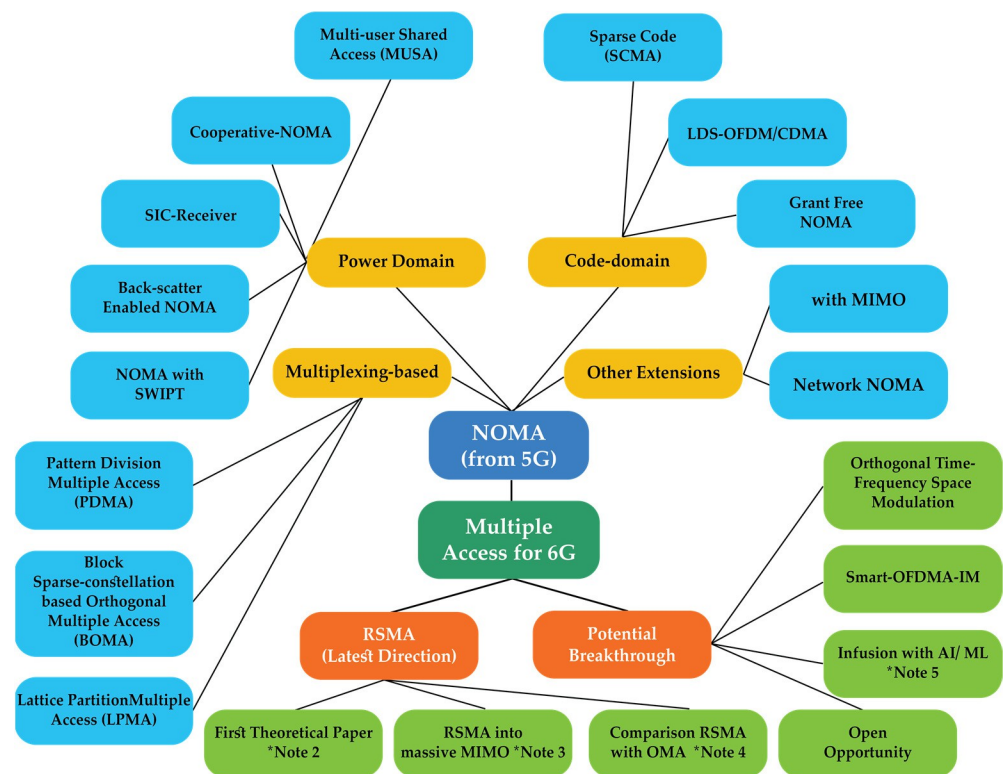
Predchádzajúce generácie bunkových sietí prijali radikálne odlišné techniky viacnásobného prístupu s jednou spoločnou myšlienkou: mať na strane prijímača ortogonálne signály pre rôznych používateľov. Vzhľadom na vznikajúce aplikácie a s cieľom splniť potrebu obrovského počtu spojení s rôznymi požiadavkami na latenciu a priepustnosť dochádza v sieťach 6G k zmene filozofie návrhu, pričom sa prechádza od ortogonálneho viacnásobného prístupu (OMA) k návrhu neortogonálneho viacnásobného prístupu (NOMA). NOMA ukladá používateľov na rovnaký časovo-frekvenčný zdroj a rozlišuje ich vo výkonovej oblasti. V porovnaní s konvenčnými schémami OMA umožňuje NOMA používateľom súčasne zdieľať rovnaké bloky prostriedkov, ktoré sú výhodné na podporu mnohých spojení v spektrálne efektívnej komunikácii. Doteraz boli navrhnuté rôzne technológie NOMA vrátane NOMA vo výkonovej oblasti (PD-NOMA), viacnásobného prístupu s delením vzoru (PDMA), viacnásobného prístupu s riedkym kódom (SCMA), zdieľaného prístupu viacerých používateľov (MUSA) atď [106]. Nedávno sa ako výkonná a robustná neortogonálna prenosová technika a stratégia riadenia rušenia pre bunkové siete objavil viacnásobný prístup s rozdelením rýchlosti (RSMA) [107].

V dnešných bezdrôtových sieťach prístupové body bežne využívajú viac ako jednu anténu, čo otvára dvere spracovaniu viacerých antén. Kľúčovým stavebným prvkom zostupného kanála viacanténových sietí je viacanténový (Gaussov) vysielací kanál (BC). NOMA bol pôvodne navrhnutý pre BC s jednou anténou (single-input single-output; SISO). Na rozdiel od BC SISO, ktorý je degradovaný a v ktorom možno používateľov zoradiť na základe ich kanálových intenzít, viacanténový BC nie je degradovaný a používateľov nemožno zoradiť na základe ich kanálových intenzít. To je dôvod, prečo superpozičné kódovanie NOMA nedosahuje kapacitu [108]. RSMA je všeobecnejšia a výkonnejšia schéma viacnásobného prístupu, ktorá sa spolieha na lineárne predkódované rozdelenie rýchlosti s postupným rušením rušenia (SIC) na dekódovanie časti rušenia a zvyšnú časť rušenia považuje za šum. To poskytuje príležitosť na zvýšenie rýchlosti a QoS a zníženie zložitosti. V súčasnosti však stále chýba informačná a komunikačná teoretická analýza v konkrétnych scenároch s cieľom pochopiť prínosy z hľadiska spektrálnej účinnosti, spoľahlivosti a zníženia režie spätnej väzby CSI v porovnaní s konvenčnými stratégiami používanými v 5G.

Napriek viacerým novým návrhom zameraným na techniky viacnásobného prístupu je navyše veľmi málo poznatkov o výkonnosti týchto techník na splnenie požiadaviek 6G. Okrem toho sa zatiaľ neskúmalo využitie potenciálnych možností na včlenenie AI/ML do nových techník viacnásobného prístupu. V súčasnosti bolo navrhnutých niekoľko schém viacnásobného prístupu ako kandidátov na vlnové formy 6G. V najnovšej literatúre sa však ako najslubnejší kandidát na viacnásobný prístup, ktorý by mal spĺňať požiadavky 6G, navrhuje RSMA [109]. Na obrázku 9 je uvedená klasifikácia potenciálnych techník viacnásobného prístupu 6G.

6.10. Nové techniky kódovania

S rozvojom sietí 5G sa modernizácia komunikačných technológií a zariadení blíži k Shannonovým limitom. V tradičnej Shannonovej teórii informácie možno správny prenos informácie dosiahnuť na základe kódovacích schém priamej korekcie chýb. S rastúcim počtom zariadení internetu vecí je však veľmi náročné importovať obrovské množstvo údajov do základnej siete a ľahko môže dôjsť k zablokovaniu siete a poklesu kvality služieb. Existujúce modulačné a kódovacie techniky sú navyše nedostatočné pre aplikácie 6G pracujúce v pásme THz.



Obrázok 9. Klasifikácia potenciálnych techník viacnásobného prístupu pre 6G. * Poznámka 2: Ref. [109].

* Poznámka 3: Ref. [110], * Poznámka 4: Ref. [111], * Poznámka 5: Ref. [108].

Preto sú pre rôzne prípady použitia 6G kľúčové nové techniky kódovania. Pre aplikácie internetu vecí, ktoré vyžadujú krátke pakety, sa v systémoch 5G na použitie v prevádzkových a riadiacich kanáloch uplink/downlink použili kódy s nízkou hustotou kontroly parity (LDPC) a polárne kódy s krátkou dĺžkou bloku. Kódy s krátkou dĺžkou bloku však majú zníženú spoľahlivosť, takže nie je možné jednoducho zaručiť bezchybný prenos [112]. To môže viesť k zvýšeniu pravdepodobnosti chýb a vyššej požiadavke na retransmisie, čo nie je vhodné pre aplikácie 6G zahŕňajúce požiadavky na ultranízku latenciu alebo obmedzené energetické možnosti. Okrem toho aplikácie s nízkou spotrebou energie často nie sú vhodné na retransmisie, pretože to vyžaduje, aby zariadenie zostalo v režime bez spánku dlhší čas, čo vedie k zvýšeniu spotreby energie.

Na druhej strane, kódy s väčšou dĺžkou bloku zvyčajne vedú k zvýšeniu latencie. Nové stratégie kódovania by preto mali zahŕňať korekciu chýb v priamom smere a mali by zahŕňať nové iteračné mechanizmy retransmisie/spätnej väzby a metódy založené na ML. V prípade dlhých kódových slov v kanáloch bez blednutia sú existujúce metódy, ako napríklad turbo dekódovanie a šírenie viery, vysoko efektívne a dokážu pracovať blízko Shannonových teoretických limitov [113].

V [114] bolo navrhnutých niekoľko techník kódovania a modulácie THz signálu, ako sú vysokorychlostné a vysoko presné mechanizmy získavania a sledovania, kódovanie tvaru vlny a kanála, priama modulácia THz, hybridná modulácia THz a modulácia vysielať THz.

Medzitým bol v [115] navrhnutý kognitívny prenos informácií založený na "teórii poštovej schránky" 6G. Teória poštovej schránky vyžaduje menšie množstvo údajov na prenos, pričom sa dosahuje vyššia spoľahlivosť rozhodovania pomocou kognitívneho prenosu informácií. Je založená na koncepcii dvojitého inteligentného agenta, ktorý integruje komunikačné, výpočtové a ukladacie schopnosti. Vyznačuje sa schopnosťami samoorganizácie, samoučenia, samoadaptácie a nepretržitého vývoja na základe hodnoty informácií. Na stránke .

proces interpretácie informačnej hodnoty závisí od atribútov údajov, ako sú polarita, závislosť, názornosť, konvergencia, dynamika a sledovateľnosť.

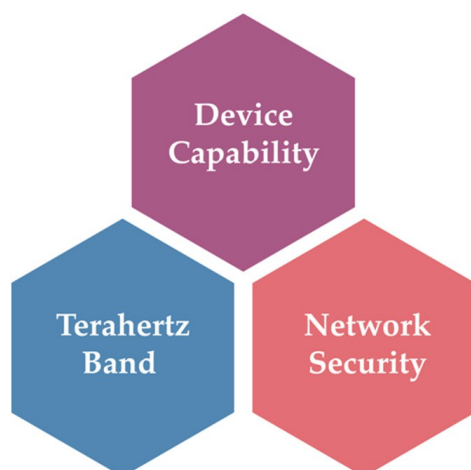
6.11. Rozhranie s nulovou spotrebou energie

Pokiaľ ide o energetickú účinnosť, konečnú víziu 6G s nulovou spotrebou energie možno do veľkej miery dosiahnuť kombináciou efektívneho návrhu hardvéru pre inteligenciu v zariadení, architektúry prijímača s veľmi nízkou spotrebou energie, zdokonalených techník zberu energie a komunikačných schém s nulovou spotrebou energie v masívnej, ale škálovateľnej komunikácii strojového typu (MTC) [116]. V tejto súvislosti možno skúmať výrazné zníženie spotreby energie zohľadnením spotreby energie ekosystému inteligentného zariadenia ako celku namiesto jednotlivých prvkov s jednotlivými anténami a vysielačmi. Po druhé, s prudkým rozvojom zariadení založených na zbere energie, ktoré vychádzajú na trh, je potrebné zdokonaľiť architektúru siete MTC, aby sa prispôsobila vývoju s podstatne odlišnými požiadavkami. Môže napríklad dopĺňať komunikáciu spätného rozptylu okolia (AmBC), sľubnú technológiu, ktorá oddeľuje nosiče potrebné na prenos energie do zariadení a umožňuje komunikáciu spätného rozptylu. Pri AmBC môžu zariadenia so spätným rozptylom medzi sebou komunikovať moduláciou a odrážaním prijatých RF signálov z okolitých zdrojov, ako sú napríklad vlny z blízkych RF veží [117]. Najnovšie [118,119] rozpracovali doplnkové aspekty požiadaviek na bezpečnosť a kvalitu takýchto schém na ekologickejšiu komunikáciu. Approach spotrebuje podstatne menej energie ako konvenčný vysielač nahradením napäťovo riadeného oscilátora a výkonových zosilňovačov. Tento prístup však stále naráža na rušenie priamou cestou, spätné šírenie, koexistenciu so staršími prijímačmi a okolitý signál s neznámou rýchlosťou sa meniacou fázou a amplitúdou.

Na doplnenie vývoja hardvéru pre nulovú spotrebu energie sa očakáva, že v 6G sa v plnej miere uplatní inteligencia v zariadení a nulové komunikačné schémy. Prvá z nich sa týka aplikácie ML a AI na vytvorenie kontextovo alebo aplikačne orientovaného riadenia energie na efektívne využívanie batérie, inteligentného komprimovaného snímania, senzorových rozhraní riadených udalosťami alebo adaptívnych komunikačných protokolov na optimalizáciu prenosu údajov [120]. Stále prebieha vývoj koncepcie nulových komunikačných schém, ale možno ju považovať najmä za optimalizáciu požiadaviek na kvalitu prostredníctvom architektúry alebo návrhu zariadenia pri zohľadnení aspektu koncových vrstiev PHY až APP (E2E), najmä so zavedením pásma THz, technológií ako CF-mMIMO a IRS, heterogénnych scenárov MTC a rozdielných požiadaviek na aplikácie [121].

7. Výzvy 6G

Pri aplikácii mobilnej siete 6G existuje niekoľko technických problémov, ktoré sú uvedené na obrázku 10 a ktoré by sa mali riešiť, aby sa splnili globálne technologické požiadavky. V nasledujúcich podkapitolách sa rozoberajú niektoré z kľúčových problémov 6G.



Obrázok 10. Významné výzvy 6G.

7.1. Schopnosť zariadenia

Technické možnosti mobilných zariadení by mali byť kompatibilné s novými funkciami 6G vzhľadom na rozsiahle využívanie mobilnej siete 5G [122]. Keďže mobilné zariadenia podporujúce 5G nie sú kompatibilné s niektorými novými funkciami 6G, zlepšenie technických možností mobilných zariadení pre 6G môže prispieť k vyšším nákladom. Podpora priepustnosti 1 Tb/s, AI, XR a integrovaného snímania s komunikačnými funkciami pomocou jednotlivých zariadení je však náročná. Niekoľko ďalších dôležitých bodov, ktoré zvyšujú problémy so schopnosťami zariadení pri zavádzaní 6G, sú:

- Hardvér pre výskum a vývoj 6G ešte stále nie je pripravený. Vybavenie a moderné laboratória pomáhajú vývojárom a konštruktérom zariadení testovať a vyvíjať zariadenia a vytvárať kompatibilitu s technológiou 6G.
- Priemyselný štandard ešte stále nie je dokončený. Neexistujú žiadne normy pre zariadenia, ktoré by mohli pracovať s 6G, čo komplikuje situáciu pre výrobcu zariadenia. Navyše organizácie ako 3GPP, ktoré zabezpečujú štandardizáciu mobilných technológií, stále nedefinovali štandardy technológie 6G.
- Návrh obvodov pre 6G zariadenie pri THz si vyžaduje množstvo overovacích prác vo fáze výskumu a vývoja. V súčasnom štádiu existuje množstvo výskumných prác zameraných na charakterizáciu a modelovanie na úrovni THz, najmä prvé práce o THz [123] a práce z NYU Wireless [124].

7.2. THz pásmo

Aby bolo možné uspokojiť dopyt po budúcich aplikáciách, potrebu vyšších prenosových rýchlostí a nižšej latencie, musí každá generácia bunkového systému otvoriť nové pásma. Na základe fyzikálnych zákonov sa zdá, že spektrum za hranicami mmvln je vhodné na komunikáciu na krátke vzdialenosti a snímanie okolia [37]. Na rozdiel od mmWave je k dispozícii veľké množstvo spektra vo frekvenčnom rozsahu 90 až 120 GHz, ktorý je známy aj ako nízky terahertz. Hoci pásmo THz sa vzťahuje na frekvenčný rozsah 0,1 až 10 THz [125,126], v literatúre sa termínom THz spektrum označuje frekvenčný rozsah niekde medzi 100 GHz a 750 GHz, ktorý sa považuje za horné mmWave, ktoré sa v súčasnosti používajú v aplikáciách 5G [127,128].

Hoci vysoké frekvencie umožňujú vysokú rýchlosť prenosu dát, nevýhodou je, že čím vyššia je frekvencia, tým vyšší je útlm signálu a tým kratší je komunikačný dosah. Používanie smerových antén v mmWave sa však začalo s 5G a ukázalo sa, že správnym návrhom smerovej antény možno zvýšiť komunikačnú vzdialenosť. Na druhej strane, v 6G je potrebné urobiť kompromis medzi rýchlosťou prenosu dát, komunikačnou vzdialenosťou a cieľovými prípadmi použitia/aplikáciami.

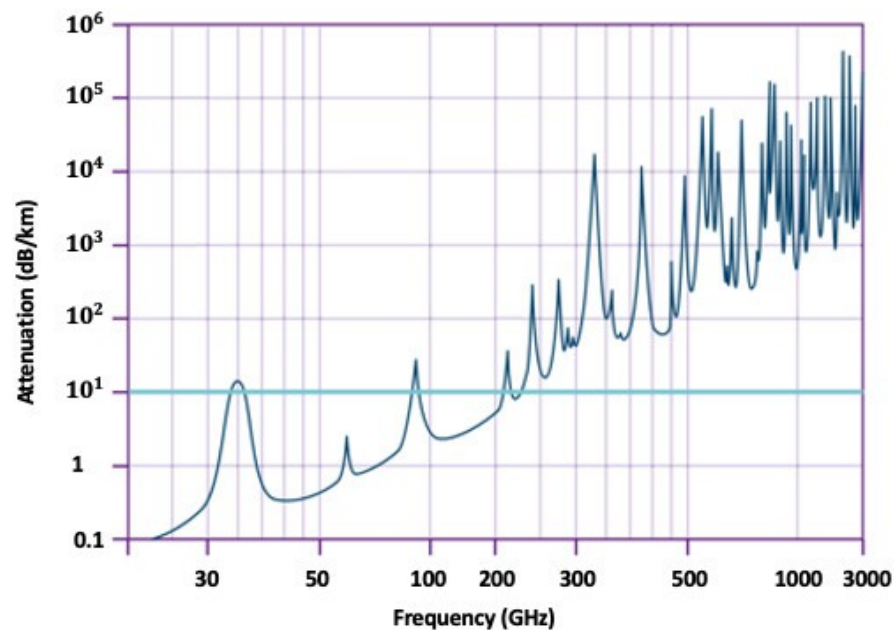
Frekvenčné pásmo THz nie je nové, v posledných desaťročiach sa už využíva napríklad v lekárskech prístrojoch a satelitnej rádiovkej komunikácii. Prenesenie pásma THz do bunkovej komunikácie je však nové a na prispôbenie tohto frekvenčného pásma novým prípadom použitia je potrebné vykonať rôzne druhy kompromisov.

Na jednej strane je využitie vyšších frekvenčných pásiem obmedzené rýchlosťou najmodernejších technológií a na druhej strane neexistuje nákladovo efektívne zariadenie na komerčné využitie. Keďže THz pásmo sa využíva na rôzne aplikácie, tranzistorové technológie dokážu vyrobiť zosilňovače až do rozsahu 1 THz. Avšak ich kombinácia a

balenie spolu s hlavným prúdom CMOS na digitálne spracovanie signálu si vyžaduje mnoho krokov, ktoré sú pokročilé z hľadiska technológie aj vedy [37]. Preto sú potrebné nové hardvérové komponenty, napríklad na výkonové zosilnenie, vzorkovanie a spracovanie. Na druhej strane, komunikácia na veľké vzdialenosti je spojená s výrazne

vyššou absorpciou a stratami pri šírení v atmosfére, ako je zrejmé z obrázku 11. Aby bolo možné riešiť samotné atmosférické straty, mali by sa najprv identifikovať charakteristiky šírenia vo frekvenčnom rozsahu THz; potom by sa mali zodpovedajúcim spôsobom navrhnuť vysielacie, ktoré by podporovali vysokofrekvenčné pásmo, široký rozsah šírky pásma, výkon, citlivosť a nízke hodnoty šumu. Okrem toho sa musia vytvoriť nové modely viaccestných kanálov, ktoré by riešili problém frekvenčného rozptylu vzhľadom na potrebný široký rozsah pásma [129]. V súčasnosti

Dostupné metódy modulácie a kódovania sú tiež nedostatočné na podporu THz pásma, pričom vývoj nových metód je zložitý a náročný. Vďaka vysokým stratám prieniku v pásme THz a následne komunikácii na krátku vzdialenosť sa problém rušenia obmedzí na kratšiu vzdialenosť, t. j. rušenie sa musí zmierniť viac lokálne v porovnaní s existujúcimi technikami rušenia v 4G a 5G. Vzhľadom na trend unifikácie širšieho pásma a adaptívneho frekvenčného rozsahu sa však predpokladá, že problém rušenia s inými koexistujúcimi technológiami (prípady použitia THz) bude kritický a mal by sa účinne riešiť pred realizáciou 6G.



Obrázok 11. Atmosférický útlm rádiových vln od 30 GHz do 3 THz [130].

Na zabezpečenie výskumu a inovácií v oblasti THz komunikácie je potrebné najprv vykonať štúdiu správania kanála a charakteristík šírenia THz komunikácie. Na druhej strane je potrebné vedieť, na ktoré časti spektra THz pásma sa treba zamerať pri budúcej komunikácii a aká veľká šírka pásma je v tomto frekvenčnom rozsahu k dispozícii.

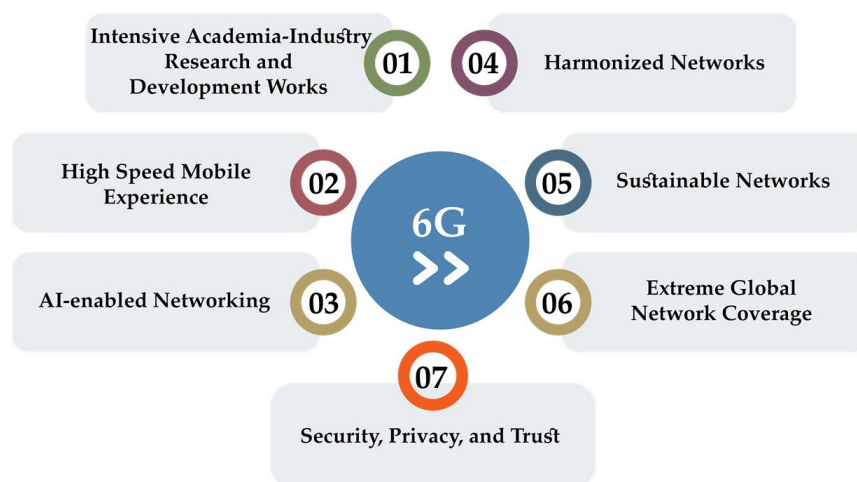
Okrem toho je z hľadiska vývoja hardvéru poskytovanie vysokorýchlostnej komunikácie, napríklad terabitov za sekundu, veľmi náročné, pretože v tomto frekvenčnom rozsahu je potrebné presunúť elektronické obvody na viac optických obvodov a bude potrebná veľká šírka pásma. Pri využívaní vysokofrekvenčného rozsahu existujú aj zdravotné a bezpečnostné obavy, v ktorých by sa v záujme bezpečnosti používateľov malo zvážiť a na zariadeniach uplatniť obmedzenie výkonu.

7.3. Zabezpečenie siete

Keďže 6G sa bude vo veľkej miere využívať na pripojenie mnohých mobilných zariadení, inteligentných zariadení v oblasti automatizácie, umelej inteligencie, XR, satelitov a inteligentných miest, kapacita bezpečnostných techník pre 5G by bola pre 6G nedostatočná. Na vytvorenie spoľahlivého zabezpečenia siete pre 6G sú potrebné inovatívne kryptografické techniky, integrované techniky zabezpečenia siete a techniky zabezpečenia fyzickej vrstvy [3], najmä pri nižších nákladoch a zložitosti bez ohrozenia bezpečnosti siete.

8. Budúce smery vývoja technológie 6G

Súčasná vízia a koncepcia 6G poskytuje komplexný pohľad na budúce výskumné cesty a významné prekážky pri implementácii mobilných sietí 6G. Budúce smery výskumu súvisiace s 6G (obrázok 12) sú opísané v nasledujúcich podkapitolách.



Obrázok 12. Budúce trendy a smery vývoja technológie 6G.

8.1. Intenzívny výskum a vývoj medzi akademickou obcou a priemyslom

Hoci 5G nedosiahlo svoje úplné komerčné nasadenie, niektoré štáty v posledných rokoch vypracovali osobitné politiky na vytvorenie 6G [3]. Vo Fínsku sa v roku 2018 začala osemročná iniciatíva s rozpočtom 290 miliónov USD, nazvaná 6Genesis Flagship program, ktorej cieľom je vybudovať ekosystém 6G [131]. Okrem Spojeného kráľovstva a Nemecka, ktoré investujú do technológií 6G, ako je napríklad kvantová technológia, začali Spojené štáty skúmať mobilné siete 6G založené na technológii THz, zatiaľ čo Čína vyhlásila svoj zámer vytvoriť 6G. Rozvoj 6G vzbudil záujem aj viacerých podnikov vrátane veľkého dodávateľa testovacích a meracích zariadení, spoločnosti Keysight Technologies, ktorá má potenciál dominovať na celosvetovom trhu s technológiami, službami a riešeniami 6G. Niekoľko veľkých korporácií vrátane spoločností Ericsson, Huawei, Nokia a Samsung vyhlásilo, že sa angažujú vo výskume a vývoji 6G [132,133]. Okrem toho spoločnosti Ericsson, Nokia a SK Telecom vytvorili strategické partnerstvo v oblasti výskumu 6G [134].

Ďalšia spolupráca je medzi Massachusetským technologickým inštitútom (MIT) a spoločnosťou Ericsson [135]. Cieľom MIT a Ericssonu je realizovať dva výskumné projekty, ktoré sa zameriavajú na vzor najmodernejšieho hardvéru na napájanie mobilných sietí 5G a 6G. Rýchlosť, výpočtový výkon a energetická účinnosť kognitívnych sietí sú hlavnými témami týchto dvoch výskumných projektov. Prvý projekt bude skúmať základné štúdie o počítačových materiáloch a čipoch na báze lítium-iónov, ktoré kopírujú štruktúru ľudského mozgu, aby spotrebovali len zlomok energie dnešných návrhov čipov na báze kremíka. Druhý projekt sa zameriava na objavovanie metód, ako je zber energie z rádiových signálov a iných zdrojov, a nenáročných návrhov energetických systémov na vykonávanie jednoduchých úloh, ako je autonómne pripojenie a ovládanie s minimálnou až nulovou potrebou nabíjania.

8.2. Vysokorýchlostný mobilný zážitok

Očakáva sa, že bezdrôtové siete 6G prinesú vyššie prenosové rýchlosti, približne Tb/s, ktoré sa líšia podľa typu použitej technológie. Takéto technológie môžu zahŕňať THz komunikáciu, vysokofrekvenčné formovanie lúčov, lepšie metódy kódovania a plány prístupu ku kanálu. Túto oblasť kľúčových ukazovateľov výkonnosti 6G je potrebné podrobne preskúmať. Zariadenie na prípravu a ukladanie údajov potrebné na pripojenie budúcich bezdrôtových sietí 6G k okrajovým inteligentným zariadeniam možno dosiahnuť integráciou platforiem cloud/edge/mist s bezdrôtovými platformami. Okrem toho metrika kvality fyzickej skúsenosti (QoPE) podporuje prepojenie technológií AI - odvodených ľudských poznatkov, QoS a QoE, ktoré ponúka podporu rôznymi spôsobmi. V tejto súvislosti je nevyhnutné spomenúť, že QoPE podporuje XR a holografickú komunikáciu, ktorá umožňuje ľudskému mozgu prakticky vnímať akýkoľvek zážitok. So zavedením a používaním sietí a technológií 6G sa zlepši aj súčasná bezpečnosť siete a opatrenia na jej ochranu. Preto sa vynakladá úsilie na integráciu nových techník, ako napr.

bezpečné kódovanie kanálov, adaptácia na základe kanálov, kvantová distribúcia kľúčov a kvantová teleportácia s budúcimi bezdrôtovými sieťami 6G [136].

8.3. Siete s podporou umelej inteligencie

Očakáva sa, že svet komunikácie bude profitovať z potenciálu bezdrôtových sietí 6G v podobe celosvetového pokrytia a služieb s rôznou úrovňou QoS. Siete šiestej generácie vybavujú celú sieť úložnými a výpočtovými schopnosťami rozšírenými z centrálnej časti cloudu na jeho okraj alebo na vzdialené zariadenie na strane klienta. Hlavná úloha techniky umelej inteligencie v hyperinteligentných sieťach 6G je celkom zrejmá. Základné sieťové procesy možno pochopiť vykonaním ďalších skúmaní logických riešení AI. Hybridné centralizované-distribúované konfigurácie AI podporujú lepšie využitie informácií získaných zo zariadení IoT a spracovateľských schopností týchto zariadení. Je tiež možné pripraviť model učenia prostredníctvom celosvetového servera v centrálnych cloudoch a satelitoch. Treba však poznamenať, že prenos údajov zo zariadení IoT na centrálny server v jednom kroku nemusí byť niekedy možný. Preto sa prijíma postupný, hierarchický prenos údajov, pri ktorom sa údaje prenášajú z koncových zariadení do okrajových uzlov a globálnych uzlov.

8.4. Harmonizované siete

Budúca harmonizácia je ďalšou dôležitou oblasťou, ktorú treba zvážiť počas perspektívneho výskumu 6G. Harmonizácia zahŕňa začlenenie nanosietí, uzlov (vyžadujúcich frekvencie vyššie ako 100 GHz), samočinných D2D a CF-MIMO. Na dosiahnutie tejto harmonizácie vo výskume 6G možno použiť lepšie techniky vizualizácie rádiového prístupu, pretože tieto techniky podporujú programovateľnosť, ako aj abstrakciu, čo vedie k harmonizácii siete. Harmonizácia siete je jednou z najočakávanejších vlastností pokročilých sietí 6G založených na službách a musí sa pripísať adaptabilite, opätovnému uľahčeniu používania a nezávislosti od optimálnej pomoci. To je možné len vtedy, keď je 6G vybavená niečím nad rámec tradičných cloudových sieťových kapacít 5G. Inými slovami, očakáva sa, že 6G ponúkne architektúru bez serverov alebo iné takéto výpočtové paradigmy úpravou starších mobilných architektur z hľadiska signalizačných techník a rozhraní. Harmonizácia siete musí tiež ponúkať vysokú spoľahlivosť, zodpovednosť, dostupnosť a zodpovednosť, aby sa zabezpečilo správne vykonávanie. Všetky uvedené vlastnosti možno do harmonizácie siete začleniť prostredníctvom spoločného návrhu komunikácie a riadenia [136,137] a priestorovo-časového návrhu siete [138,139] alebo iných medziúrovňových techník, ako aj výpočtových techník, ako je blockchain [140]. Okrem toho sa zistilo, že predpovedanie trajektórie, zdrojov a využitia spektra tiež prináša lepšie výsledky harmonizácie.

8.5. Udržateľné siete

V tomto rýchlo sa meniacom svete je potrebné vo veľkom rozsahu zaviesť udržateľné postupy v komunikačných systémoch. Verma a kol [141] predložili myšlienku podpory 6G komunikácie prostredníctvom využitia hybridnej optimalizácie veľryby škvrnitej hyeny; tento postup umožňuje lepší výber hláv zhlukov. Okrem toho sa využíva aj technika offloadingu s pomocou kombinovaného a transferového učenia na delegovanie časti centralizovaných služieb na okrajové výpočtové zariadenia v okolí. Tomu predchádzalo zavedenie koncepcie plánovania v sieťach 5G a 6G BS vo verzii 15 [142] a neskôr vylepšené vo verzii 16 [33]. Táto prax umožňuje správne plánovať plán spánku a budenia BS s cieľom optimalizovať energetickú náročnosť. Wang et al. navrhli [143], že plán prebúdzania BS sa môže plánovať pomocou hybridných bunkových sietí s energetickým napájaním, čo vedie k zlepšeniu energetickej účinnosti a modifikácii sieťových zdrojov. Rovnakým spôsobom možno zvoliť stratégie prepínania, vyvažovania a smerovania zaťaženia siete. Energia prenosov sa optimalizuje aj integráciou techník optimalizácie AI do sietí 6G. Charef a kol [144] navrhli zvýšenie výkonnosti plánovania pracovných cyklov pomocou hybridných modelov ML s cieľom dosiahnuť vyšší výkon QoS pre masívne a 3D MTC.

8.6. Extrémne globálne pokrytie siete

Optimalizovaná 3D lokalizácia spolu s plánovaním siete je nevyhnutná počas inštalácie lietajúcich relé alebo BS. Bezpilotným lietadlám (UAV) alebo dronom sa pripisujú obmedzenia zdrojov a kapacity a zahŕňajú heterogénne spracovanie, preto je nevyhnutné vykonávať takýto výskum. Medzi ďalšie dôležité problémy týkajúce sa celosvetového sieťového pokrytia, ktoré je potrebné preskúmať a zohľadniť v budúcom výskume, patrí využitie technológie na zabezpečenie inteligentných mechanizmov 3D roamingu pre heterogénne siete a tiež zabezpečenie toho, aby rôzni operátori podporovali bezpečnú a spoľahlivú interoperabilitu. Budúci výskum musí vyhodnotiť optimalizáciu založenú na FL (fuzzy logike), ktorá zahŕňa lokálne tréňovanie ML modelov rôznymi sieťami. Siete v optimalizácii založenej na FL zahŕňajú zdieľanie aktualizácií modelov namiesto zdieľania informácií, čo vedie k lepšiemu ekosystému 6G na celom svete a zároveň zabezpečuje univerzálne pokrytie siete. Okrem toho boli odhad kanála a dynamická optimalizácia spojenia identifikované aj ako populárne témy budúceho výskumu, ktoré vedú k rozsiahlemu globálnemu pokrytiu. Efektívnejšie a rozumnejšie riešenia globálneho pokrytia možno vyvinúť implementáciou komplexných postupov.

8.7. Bezpečnosť, súkromie a dôvera

Očakáva sa, že služby a technológie 5G a 6G v blízkej budúcnosti ovládnu svet a ponúknu lepšie služby a technológie pre koncových zákazníkov, komunikácie, podniky, vlády atď. Takýto vývoj vytvorí obrovský vektor útokov, ktorému sa pripisuje vysoké riziko pre podniky a jednotlivcov. Napriek tomu sa zdá, že správne vykonávanie sietí 6G je náročné vzhľadom na zastarané techniky zabezpečenia, súkromia, integrity, dostupnosti a autenticity v sieťach 4/5G. Lepšie vykonávanie technológií 6G je však možné integráciou vedľajšieho bezpečnostného plánu na splnenie vyvíjajúcich sa a komplexných potrieb spojených so súkromím údajov, súkromím polohy, súkromím identity a súkromím metaúdajov. Na záver môžeme vyvodiť, že budúci výskum v oblasti 6G sa musí zamerať na vývoj lepších a lacnejších bezpečnostných a ochranných prvkov [145].

9. Závery

V súčasnosti sa nachádzame na začiatku komerčnej fázy 5G, o ktorej sa hovorí, že spôsobí zásadnú revolúciu - alebo prinajmenšom evolúciu - v odvetví mobilných bezdrôtových komunikácií. Revolučný aspekt 5G sa týka toho, ako "rozširuje" prípady použitia, ktoré sa predtým zameriavali len na mobilné širokopásmové pripojenie, na ďalšie prípady použitia: mimoriadne spoľahlivú komunikáciu s nízkou latenciou a masívnu komunikáciu strojového typu. Preto sa v odvetví mobilnej komunikácie objavil termín "trojuholník 5G".

Hoci 5G sa v niektorých krajinách a regiónoch len spustilo a väčšinou je ešte len v plienkach, výskumníci a vývojári už vykonávajú štúdie a experimenty týkajúce sa vývoja 6G, najmä v súvislosti s novými komunikačnými technikami a technológiami. Šiesta generácia je pripravovaný mobilný systém, ktorého uvedenie na trh sa očakáva v roku 2030 a ktorý výrazne zmení budúce mobilné bezdrôtové siete. Z tohto prehľadu vyplýva, že "trojuholník 5G" sa bude vyvíjať smerom k "šesťuholníku 6G" tým, že poskytne ďalšie rozmery na odomknutie nových prípadov priemyselného využitia. Okrem toho 6G poskytne extrémnu rýchlosť prenosu dát a ultra nízku latenciu, ktorá sa predpokladá až na úrovni 10 Tb/s, resp. 10-100 μ s. Okrem toho zvýši účinnosť spektra a hustotu pripojenia na 10-100-krát vyššiu ako 5G. Okrem toho 6G prinesie nové aplikácie nad rámec IoE, čo umožní inteligentné IoE a víziu 100 % inteligentného pripojenia všetkého. Šiesta generácia je érou bezproblémových interakcií medzi strojmi a ľuďmi, inteligencie vecí a zjednotenia virtuálneho a fyzického sveta. Mimoriadne vysoká spoľahlivosť, mimoriadne vysoká flexibilita, mimoriadne vysoká úroveň súkromia a bezpečnosti a všadeprítomné pokrytie sú hlavnými kľúčmi vízie 6G.

Tento článok poskytuje komplexný prehľad technológie 6G vrátane jej vízie, prípadov použitia a aplikácií, technických požiadaviek a frekvenčných spektier. Okrem toho sa v ňom rozoberajú kľúčové technológie podporujúce 6G a kľúčové výzvy, ktoré je potrebné riešiť.

na realizáciu komerčných systémov 6G. Okrem toho sa uvádza porovnanie 5G a 6G z hľadiska najdôležitejších kľúčových ukazovateľov výkonnosti. Nakoniec sa v tomto prehľade uvádzajú budúce smery v technológii 6G.

Autorské príspevky: Konceptualizácia, S.A. a R.N.; metodológia, R.N. a M.B.; validácia, M.B., N.F.A. a A.A.-S.; formálna analýza, R.N.; vyšetovanie, R.N.; písanie - pôvodný návrh, S.A. a I.S.; písanie - recenzia a úprava, S.A., I.S., M.B., R.N., N.F.A., A.A.-S. a D.N.; vizualizácia, S.A. a R.N.; dohľad, I.S., R.N., N.F.A. a A.A.-S.; získavanie finančných prostriedkov, R.N. Všetci autori si prečítali publikovanú verziu rukopisu a súhlasili s ňou.

Financovanie: Túto prácu podporil Úrad pre vedecký výskum vzdušných síl: FA2386-20-1-4045 (UKM Ref: KK-2020-007).

Vyhlásenie inštitucionálnej revízie komisie: Neuplatňuje sa.

Vyhlásenie o informovanom súhlase: Neuplatňuje sa.

Vyhlásenie o dostupnosti údajov: Neuplatňuje sa.

Konflikt záujmov: Autori neuvádzajú žiadny konflikt záujmov.

Odkazy

- Shayea, I.; Azmi, M.H.; Rahman, T.A.; Ergen, M.; Han, C.T.; Arsad, A. Spectrum Gap Analysis with Practical Solutions for Future Mobile Data Traffic Growth in Malaysia. *IEEE Access* **2019**, *7*, 24910-24933. [CrossRef]
- David, K.; Berndt, H. Vízia a požiadavky 6G: Je vôbec potrebná nad rámec 5G? *IEEE Veh. Technol. Mag.* **2018**, *13*, 72-80. [CrossRef]
- Yang, P.; Xiao, Y.; Xiao, M.; Li, S. 6G bezdrôtová komunikácia: Vízia a potenciálne techniky. *IEEE Netw.* **2019**, *33*, 70-75. [CrossRef]
- Benn, H. *Hyper pripojenie s 6G*; TelecomTV, 2020. Dostupné online: <https://www.telecomtv.com/content/what-next-for-wireless-infrastructure-summit/hyper-connectivity-with-6g-40147/> (prístup 12. decembra 2021).
- Andrews, J.G.; Buzzi, S.; Choi, W.; Hanly, S.V.; Lozano, A.; Soong, A.C.; Zhang, J.C. Čo bude 5G? *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **2014**, *32*, 1065-1082. [CrossRef]
- Shayea, I.; Abd. Rahman, T.; Hadri Azmi, M.; Arsad, A. Rain attenuation of millimetre wave above 10 GHz for terrestrial links in tropical regions. *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* **2018**, *29*, e3450. [CrossRef]
- De Alwis, C.; Kalla, A.; Pham, Q.-V.; Kumar, P.; Dev, K.; Hwang, W.-J.; Liyanage, M. Survey on 6G frontiers: Prehľad trendov, aplikácií, požiadaviek, technológií a budúceho výskumu. *IEEE Open J. Commun. Soc.* **2021**, *2*, 836-886. [CrossRef]
- Huang, T.; Yang, W.; Wu, J.; Ma, J.; Zhang, X.; Zhang, D. Prieskum zelenej siete 6G: Architektúra a technológie. *IEEE Access* **2019**, *7*, 175758-175768. [CrossRef]
- Chen, S.; Liang, Y.-C.; Sun, S.; Kang, S.; Cheng, W.; Peng, M. Vízia, požiadavky a technologický trend 6G: Ako riešiť výzvy týkajúce sa pokrytia systému, kapacity, rýchlosti prenosu dát používateľov a rýchlosti pohybu. *IEEE Wirel. Commun.* **2020**, *27*, 218-228. [CrossRef]
- Alsharif, M.H.; Kelechi, A.H.; Albreem, M.A.; Chaudhry, S.A.; Zia, M.S.; Kim, S. Bezdrôtové siete šiestej generácie (6G): (6G): vízia, výskumné aktivity, výzvy a potenciálne riešenia. *Symmetry* **2020**, *12*, 676. [CrossRef]
- Barakat, B.; Taha, A.; Samson, R.; Steponenaite, A.; Ansari, S.; Langdon, P.M.; Wassell, I.J.; Abbasi, Q.H.; Imran, M.A.; Keates, S. 6G Opportunities Arising from Internet of Things Use Cases: A Review Paper. *Future Internet* **2021**, *13*, 159. [CrossRef]
- Wang, M.; Zhu, T.; Zhang, T.; Zhang, J.; Yu, S.; Zhou, W. Security and privacy in 6G networks: Nové oblasti a nové výzvy. *Číslica. Komunita. Netw.* **2020**, *6*, 281-291. [CrossRef]
- Nawaz, F.; Ibrahim, J.; Awais, M.; Junaid, M.; Kousar, S.; Parveen, T. Prehľad vízie a výziev technológie 6G. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **2020**, *11*, 643-649. [CrossRef]
- Kalra, B.; Chauhan, D.K. Porovnávacie štúdiá mobilnej bezdrôtovej komunikačnej siete: 1G až 5G. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol. Res.* **2014**, *2*, 430-433.
- Ibrahim, J. 4G Funkcie. *Bechtel Telecommun. Tech. J.* **2002**, *1*, 11-14.
- Gupta, A.; Jha, R.K. Prieskum siete 5G: Prehľad 5G siete: architektúra a nové technológie. *IEEE Access* **2015**, *3*, 1206-1232. [CrossRef]
- Sharma, P. Vývoj mobilných bezdrôtových komunikačných sietí - od 1G po 5G, ako aj budúce perspektivy komunikačných sietí novej generácie. *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.* **2013**, *2*, 47-53.
- Farooq, M.; Ahmed, M.I.; Al, U.M. Budúce generácie mobilných komunikačných sietí. *Acad. Contemp. Res. J.* **2013**, *2*, 24-30.
- Sah, D.H.N. Stručná história mobilných generácií a satelitného bezdrôtového komunikačného systému. 2017. Dostupné online: <https://www.jetir.org/papers/JETIR1712170.pdf> (prístup 27. júla 2021).
- Kumar, A.; Liu, Y.; Sengupta, J. Vývoj mobilných bezdrôtových komunikačných sietí: 1G až 4G. *Int. J. Electron. Commun. Technol.* **2010**, *1*, 68-72.
- Soldani, D.; Manzalini, A. Horizont 2020 a ďalšie: O operačnom systéme 5G pre skutočnú digitálnu spoločnosť. *IEEE Veh. Technol. Mag.* **2015**, *10*, 32-42. [CrossRef]

22. Agiwal, M.; Roy, A.; Saxena, N. Bezdrôtové siete novej generácie 5G: N.: Komplexný prehľad. *IEEE Commun. Surv. Školiteľ: prof.* **2016**, *18*, 1617-1655. [CrossRef]
23. Shafi, M.; Molisch, A.F.; Smith, P.J.; Haustein, T.; Zhu, P.; De Silva, P.; Tufvesson, F.; Benjebbour, A.; Wunder, G. 5G: výukový prehľad noriem, skúšok, výziev, nasadenia a praxe. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **2017**, *35*, 1201-1221. [CrossRef]
24. Zhou, Z.; Dong, M.; Ota, K.; Wang, G.; Yang, L.T. Energy-efficient resource allocation for D2D communications underlying cloud-RAN-based LTE-A networks. *IEEE Internet Things J.* **2015**, *3*, 428-438. [CrossRef]
25. Wu, J.; Dong, M.; Ota, K.; Li, J.; Yang, W.; Wang, M. Fog-computing-enabled cognitive network function virtualization for an information-centric future Internet. *IEEE Commun. Mag.* **2019**, *57*, 48-54. [CrossRef]
26. Wu, J.; Dong, M.; Ota, K.; Li, J.; Guan, Z. Bezpečná správa klastrov založená na analýze veľkých objemov dát pre optimalizovanú riadiacu rovinu v softvérovo definovaných sieťach. *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* **2018**, *15*, 27-38. [CrossRef]
27. Hassan, R.; Qamar, F.; Hasan, M.K.; Aman, A.H.M.; Ahmed, A.S. Internet vecí a jeho aplikácie: A comprehensive survey. *Symetria* **2020**, *12*, 1674. [CrossRef]
28. Zhang, Z.; Xiao, Y.; Ma, Z.; Xiao, M.; Ding, Z.; Lei, X.; Karagiannis, G.K.; Fan, P. 6G bezdrôtové siete: Kľúčové technológie: vízia, požiadavky, architektúra a kľúčové technológie. *IEEE Veh. Technol. Mag.* **2019**, *14*, 28-41. [CrossRef]
29. Latva-aho, M. Výzvy v oblasti rádiových prístupových sietí do roku 2030. Dostupné na internete: https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201810/Documents/Matt_Latva-aho_Presentation.pdf (prístup 13. decembra 2021).
30. Qamar, F.; Siddiqui, M.U.A.; Hindia, M.; Hassan, R.; Nguyen, Q.N. Issues, challenges, and research trends in spectrum management: Komplexný prehľad a nová vízia navrhovania sietí 6G. *Electronics* **2020**, *9*, 1416. [CrossRef]
31. Cacciapuoti, A.S.; Sankhe, K.; Caleffi, M.; Chowdhury, K.R. Beyond 5G: THz-based medium access protocol for mobile heterogeneous networks. *IEEE Commun. Mag.* **2018**, *56*, 110-115. [CrossRef]
32. Letaief, K.B.; Chen, W.; Shi, Y.; Zhang, J.; Zhang, Y.-J.A. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks. *IEEE Commun. Mag.* **2019**, *57*, 84-90. [CrossRef]
33. 3GPP. Vydanie 16. Dostupné online: <https://www.3gpp.org/release-16> (prístup 19. decembra 2021).
34. 3GPP. Vydanie 17. Dostupné online: <https://www.3gpp.org/release-17> (prístup 19. decembra 2021).
35. 3GPP. Vydanie 18. Dostupné online: <https://www.3gpp.org/release18> (prístup 19. decembra 2021).
36. Frost & Sullivan. Skupina Visionary Innovation Group. Dostupné online: <https://www.frost.com/research/visionary-innovation/> (prístup 19. decembra 2021).
37. Surrey, USA 6G Wireless: Nová strategická vízia. 2021. Dostupné online: <https://www.surrey.ac.uk/sites/default/files/2020-11/6g-wireless-a-new-strategic-vision-paper.pdf> (prístup 15. decembra 2021).
38. Redshaw, T. *Význam 5G pre špeciálne operácie budúcnosti*; Strategická latencia uvoľnená: Livermore, CA, USA, 2021; p. 293.
39. Redshaw, T. Reigniting Value through Frontier Technologies; TelecomTV, 2020. Dostupné online: <https://www.telecomtv.com/content/what-next-for-wireless-infrastructure-summit/reigniting-value-through-frontier-technologies-40133/> (prístup 11. decembra 2021).
40. Zong, B.; Fan, C.; Wang, X.; Duan, X.; Wang, B.; Wang, J. 6G technológie: Kľúčové faktory, základné požiadavky, systémové architektúry a podporné technológie. *IEEE Veh. Technol. Mag.* **2019**, *14*, 18-27. [CrossRef]
41. Wang, D. David Wang zo spoločnosti Huawei: Vymedzenie 5.5G pre lepší, inteligentný svet; Huawei: 2020. Dostupné online: <https://www.huawei.com/en/news/2020/11/mbbf-shanghai-huawei-david-wang-5dot5g> (prístup 20. decembra 2021).
42. Rajatheva, N.; Atzeni, I.; Bjornson, E.; Bourdoux, A.; Buzzi, S.; Dore, J.-B.; Erkucuk, S.; Fuentes, M.; Guan, K.; Hu, Y. White paper on broadband connectivity in 6G. *arXiv* **2020**, arXiv:2004.14247.
43. Saarnisaari, H.; Dixit, S.; Alouini, M.-S.; Chaoub, A.; Giordani, M.; Kliks, A.; Matinmikko-Blue, M.; Zhang, N.; Agrawal, A.; Andersson, M. A 6G white paper on connectivity for remote areas. *arXiv* **2020**, arXiv:2004.14699.
44. Behjati, M.; Mazlan, M.H.; Ramly, A.M.; Nordin, R.; Ismail, M. Aká je hodnota obmedzenej spätnej väzby pre novú generáciu bunkových systémov? *Wirel. Pers. Commun.* **2020**, *110*, 1127-1142. [CrossRef]
45. Huawei. 5G Power: Vytvorenie ekologickej siete, ktorá znižuje náklady, emisie a spotrebu energie. Dostupné online: <https://www.huawei.com/en/technology-insights/publications/huawei-tech/89/5g-power-green-grid-slashes-costs-emissions-energy-use> (ak- cessed on 15 December 2021).
46. Boulageorgos, A.-A.A.; Alexiou, A.; Merkle, T.; Schubert, C.; Elschner, R.; Katsiotis, A.; Stavrianos, P.; Kritharidis, D.; Chartsias, P.-K.; Kokkonien, J. Terahertzové technológie na zabezpečenie kvality skúseností optickej siete v bezdrôtových systémoch po 5G. *IEEE Commun. Mag.* **2018**, *56*, 144-151. [CrossRef]
47. Aazhang, B.; Ahokangas, P.; Alves, H.; Alouini, M.; Beek, J.; Benn, H.; Bennis, M.; Belfiore, J.; Strinati, E.; Chen, F. *Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence (White Paper)*; Latva-aho, M., Leppänen, K., Eds.; 6G Flagship; University of Oulu: Oulu, Finsko, 2019; Volume 9.
48. Séria, M. Vízia IMT - Rámec a celkové ciele budúceho rozvoja IMT na rok 2020 a neskôr. *Odporúčame. ITU* **2015**, *2083*, 1-19.
49. Strinati, E.C.; Barbarossa, S.; Gonzalez-Jimenez, J.L.; Ktenas, D.; Cassiau, N.; Maret, L.; Dehos, C. 6G: The next frontier: Od holografického posielania správ k umelej inteligencii pomocou subterahertzovej komunikácie a komunikácie vo viditeľnom svetle. *IEEE Veh. Technol. Mag.* **2019**, *14*, 42-50. [CrossRef]

50. Shaukat, A. 5G vs. 6G: čo to je a kedy to tu bude? Electronics 360: 2021. Dostupné online: <https://electronics360.globalspec.com/article/16447/5g-vs-6g-what-is-it-and-when-will-it-be-here> (prístup 13. augusta 2021).
51. Giordani, M.; Polese, M.; Mezzavilla, M.; Rangan, S.; Zorzi, M. Smerom k sieťam 6G: Prípady použitia a technológie. *IEEE Commun. Mag.* **2020**, *58*, 55–61. [\[CrossRef\]](#)
52. Björnson, E.; Larsson, E.G. Ako energeticky efektívny môže byť bezdrôtový komunikačný systém? In Proceedings of the 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 28.–31. októbra 2018; pp. 1252–1256.
53. Alsharif, M.H.; Nordin, R.; Abdullah, N.F.; Kelechi, A.H. Ako zabezpečiť, aby boli kľúčové bezdrôtové technológie 5G šetrné k životnému prostrediu: A review. *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* **2018**, *29*, e3254. [\[CrossRef\]](#)
54. Mousa, S.H.; Ismail, M.; Nordin, R.; Abdullah, N.F. Efektívne techniky zdieľania širokého spektra založené na technológii CR smerom k 5G: prehľad. *J. Commun.* **2020**, *15*, 122–147. [\[CrossRef\]](#)
55. Zhao, Y.; Yu, G.; Xu, H. 6G Mobile Communication Network: *arXiv* **2019**, arXiv:1905.04983. [\[CrossRef\]](#).
56. Wells, J. Rýchlejšie ako vlákno: Budúcnosť bezdrôtových sietí s rýchlosťou viac G/s. *IEEE Microw. Mag.* **2009**, *10*, 104–112. [\[CrossRef\]](#)
57. Pathak, P.H.; Feng, X.; Hu, P.; Mohapatra, P. Komunikácia, vytváranie sietí a snímanie pomocou viditeľného svetla: Prehľad, potenciál a výzvy. *IEEE Commun. Surv. Školiteľ: prof.* **2015**, *17*, 2047–2077. [\[CrossRef\]](#)
58. Haas, H. LiFi je technológia 5G, ktorá mení paradigmu. *Rev. Phys.* **2018**, *3*, 26–31. [\[CrossRef\]](#)
59. Chen, Z.; Ma, X.; Zhang, B.; Zhang, Y.; Niu, Z.; Kuang, N.; Chen, W.; Li, L.; Li, S. A survey on terahertz communications. *China Commun.* **2019**, *16*, 1–35. [\[CrossRef\]](#)
60. Akyildiz, I.F.; Jornet, J.M.; Han, C. Terahertzové pásmo: Ďalšia hranica pre bezdrôtovú komunikáciu. *Phys. Commun.* **2014**, *12*, 16–32. [\[CrossRef\]](#)
61. Elayan, H.; Amin, O.; Shubair, R.M.; Alouini, M.-S. Terahertzová komunikácia: The Opportunities of Wireless Technology beyond 5G. In Zborník príspevkov z medzinárodnej konferencie 2018 o pokročilých komunikačných technológiách a sieťach (CommNet), Marrákeš, Maroko, 2.–4. apríla 2018; s. 1–5.
62. Elayan, H.; Shubair, R.M.; Kiourti, A. On Graphene-Based THz Plasmonic nano-Antennas. In Proceedings of the 16th Mediteranean Microwave Symposium (MMS), Abu Dhabi, Spojené arabské emiráty, 14.–16. november 2016; s. 1–3.
63. Molisch, A.F.; Ratnam, V.V.; Han, S.; Li, Z.; Nguyen, S.L.H.; Li, L.; Haneda, K. Hybridné formovanie lúčov pre masívne MIMO: A survey. *IEEE Commun. Mag.* **2017**, *55*, 134–141. [\[CrossRef\]](#)
64. Elmeadawy, S.; Shubair, R.M. 6G Wireless Communications: Budúce technológie a výskumné výzvy. In Zborník medzinárodnej konferencie o elektrických a počítačových technológiách a aplikáciách (ICECTA), Ras Al Khaimah, Spojené arabské emiráty, 19. – 21. novembra 2019; s. 1–5.
65. Black, E.J. Holografické formovanie lúča a MIMO. *Pivotal Commware 2017*, nepublikované.
66. Elmeadawy, S.; Shubair, R.M. Umožňujúce technológie pre budúce bezdrôtové komunikácie 6G: *arXiv*: príležitosti a výzvy. **2020**, arXiv:2002.06068.
67. Kim, J.H. 6G a internet vecí: H., 6. *J. Manag. Anal.* **2021**, *8*, 316–332. [\[CrossRef\]](#).
68. Mazlan, M.H.; Behjati, M.; Nordin, R.; Ismail, M. Investigation of Pilot Training Effect in Massive-MIMO TDD System. In Proceedings of the IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Kuching, Malajzia, 23.–25. november 2015; s. 230–235.
69. Jackson, P.C. *Úvod do umelej inteligencie*; Courier Dover Publications: Mineola, NY, USA, 2019.
70. AlHajri, M.I.; Ali, N.T.; Shubair, R.M. Klasifikácia vnútorného prostredia pre aplikácie internetu vecí: Prístup strojového učenia. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **2018**, *17*, 2164–2168. [\[CrossRef\]](#)
71. AlHajri, M.; Alsindi, N.; Ali, N.; Shubair, R. Classification of Indoor Environments Based on Spatial Correlation of RF Channel Fingerprints. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, PR, USA, 26. júna – 1. júla 2016; s. 1447–1448.
72. AlHajri, M.I.; Ali, N.T.; Shubair, R.M. Indoor Localization for IoT Using Adaptive Feature Selection: A Cascaded Machine Learning Approach. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **2019**, *18*, 2306–2310. [\[CrossRef\]](#).
73. AlHajri, M.I.; Ali, N.T.; Shubair, R.M. A Machine Learning Approach for the Classification of Indoor Environments Using RF Signatures. In Proceedings of the IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Anaheim, CA, USA, 26.–29. novembra 2018; s. 1060–1062.
74. Angjo, J.; Shayea, I.; Ergen, M.; Mohamad, H.; Alhamadi, A.; Daradkeh, Y.I. Handover Management of Drones in Future Mobile Networks: Technológie 6G. *IEEE Access* **2021**, *9*, 12803–12823. [\[CrossRef\]](#)
75. Shayea, I.; Ergen, M.; Azmi, M.H.; Çolak, S.A.; Nordin, R.; Daradkeh, Y.I. Key challenges, drivers and solutions for mobility management in 5g networks: Prieskum. *IEEE Access* **2020**, *8*, 172534–172552. [\[CrossRef\]](#)
76. Abdulraqeb, A.; Mardeni, R.; Yusoff, A.; Ibraheem, S.; Saddam, A. Self-optimization of handover control parameters for mobility management in 4G/5G heterogeneous networks. *Autom. Control. Comput. Sci.* **2019**, *53*, 441–451. [\[CrossRef\]](#).
77. Alraih, S.; Nordin, R.; Shayea, I.; Abdullah, N.F.; Alhamadi, A. Zníženie ping-pongového efektu odovzdávania v sieťach 5G a ďalších. In Proceedings of the IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), Riga, Lotyšsko, 7.–8. októbra 2021; s. 97–101.
78. Shayea, I.; Ismail, M.; Nordin, R.; Mohamad, H.; Abd Rahman, T.; Abdullah, N.F. Novel handover optimization with a coordinated contiguous carrier aggregation deployment scenario in LTE-advanced systems. *Mob. Inf. Syst.* **2016**, *2016*, 4939872. [\[CrossRef\]](#).

79. Nizam, F.; Roslee, M.; Yusoff, Z.; Nmenme, P.U.; Singh, K.; Mohamad, H.; Osman, A.F.; Shayea, I.A.M. Efficient radio resource allocation scheme for 5G networks with device-to-device communication. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* **2021**, *11*, 5588-5600. [CrossRef].
80. Mahamod, U.; Mohamad, H.; Shayea, I.; Asuhaimi, F.A.; Othman, M. Utility Function Based Resource Block Scheduling in Wireless Networks. In Proceedings of the 26th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Kuala Lumpur, Malajzia, 11.-13. októbra 2021; pp. 286-291.
81. Nicolette, E. 6G bude musieť využívať blockchain, strojové učenie a AI: výskum; eeDesignit: 2020. Dostupné online: <https://www.eedesignit.com/6g-will-need-to-leverage-blockchain-machine-learning-and-ai-research/> (prístup 17. septembra 2021).
82. Zheng, Z.; Xie, S.; Dai, H.-N.; Chen, X.; Wang, H. Blockchain challenges and opportunities: Prehľad. *Int. J. Web Grid Serv.* **2018**, *14*, 352-375. [CrossRef]
83. Ahram, T.; Sargolzaei, A.; Sargolzaei, S.; Daniels, J.; Amaba, B. Blockchain Technology Innovations. In Proceedings of the 2017 IEEE Technology & Engineering Management Conference (TEMSCON), Santa Clara, CA, USA, 8.-10. júna 2017; s. 137-141.
84. Yaga, D.; Mell, P.; Roby, N.; Scarfone, K. Blockchain technology overview. *arXiv* **2019**, arXiv:1906.11078.
85. Zheng, Z.; Xie, S.; Dai, H.; Chen, X.; Wang, H. An Overview of Blockchain Technology: Architektúra, konsenzus a budúce trendy. In Zborník z medzinárodného kongresu IEEE o veľkých dátach (BigData Congress), Honolulu, HI, USA, 25. - 30. júna 2017; str. 557-564.
86. Ahmad, I.; Shahabuddin, S.; Kumar, T.; Okwuibe, J.; Gurtov, A.; Ylianttila, M. Security for 5G and Beyond. *IEEE Commun. Surv. Školiteľ: prof.* **2019**, *21*, 3682-3722. [CrossRef].
87. Monrat, A.A.; Schelén, O.; Andersson, K. Prieskum blockchainu z hľadiska aplikácií, výziev a možností. *IEEE Access* **2019**, *7*, 117134-117151. [CrossRef]
88. Xu, H.; Klaine, P.V.; Onireti, O.; Cao, B.; Imran, M.; Zhang, L. Blockchain-enabled resource management and sharing for 6G communications. *Digit. Commun. Netw.* **2020**, *6*, 261-269. [CrossRef].
89. Yrjölä, S. Ako by mohol blockchain transformovať 6G smerom k otvoreným ekosystémovým obchodným modelom? In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Dublin, Írsko, 7.-11. júna 2020; s. 1-6.
90. Manzalini, A. Kvantová komunikácia v budúcich sieťach a službách. *Quantum Rep.* **2020**, *2*, 221-232. [CrossRef]
91. Hu, J.-Y.; Yu, B.; Jing, M.-Y.; Xiao, L.-T.; Jia, S.-T.; Qin, G.-Q.; Long, G.-L. Experimentálna kvantovo bezpečná priama komunikácia s jednotlivými fotónmi. *Light: Sci. Appl.* **2016**, *5*, e16144. [CrossRef].
92. Zhang, W.; Ding, D.-S.; Sheng, Y.-B.; Zhou, L.; Shi, B.-S.; Guo, G.-C. Kvantovo bezpečná priama komunikácia s kvantovou pamäťou. *Phys. Rev. Lett.* **2017**, *118*, 220501. [CrossRef].
93. Nawaz, S.J.; Sharma, S.K.; Wyne, S.; Patwary, M.N.; Asaduzzaman, M. Quantum machine learning for 6G communication networks: (1): Súčasný stav a vízia do budúcnosti. *IEEE Access* **2019**, *7*, 46317-46350. [CrossRef].
94. Dogra, A.; Jha, R.K.; Jain, S. Prieskum nad rámec siete 5G s príchodom 6G: architektúra a nové technológie. *IEEE Access* **2020**, *9*, 67512-67547. [CrossRef]
95. Verma, D. Distribuovaná umelá inteligencia pre inteligenciu na okraji. Dostupné online: https://smartcomp2019.weebly.com/uploads/5/7/2/8/57_280841/distributed-ai-edge-intelligence-sanitized_1.pdf (prístup 19. decembra 2021).
96. Verma, D. AI Enabled Network Insights; TelecomTV: 2020. Dostupné online: <https://www.telecomtv.com/content/what-next-for-wireless-infrastructure-summit/ai-enabled-network-insights-40134/> (prístup 17. decembra 2021).
97. Jun-ho, J. SKT spolu s AWS prvýkrát na svete presadzuje službu 5G Edge Cloud; Korea IT Times: 2020. Dostupné online: <http://www.koreaitimes.com/news/articleView.html?idxno=97487> (prístup 14. decembra 2021).
98. Peltonen, E.; Bennis, M.; Capobianco, M.; Debbah, M.; Ding, A.; Gil-Castiñeira, F.; Jurmu, M.; Karvonen, T.; Kelanti, M.; Kliks, A. 6G white paper on edge intelligence. *arXiv* **2020**, arXiv:2004.14850.
99. Pan, C.; Ren, H.; Wang, K.; Kolb, J.F.; Elkhassan, M.; Chen, M.; Di Renzo, M.; Hao, Y.; Wang, J.; Swindlehurst, A.L. Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Princípy, aplikácie a smery výskumu. *IEEE Commun. Mag.* **2021**, *59*, 14-20. [CrossRef]
100. Chen, Z.; Ma, X.; Han, C.; Wen, Q. Smerom k inteligentnej 6G terahertzovej komunikácii s odrazovým povrchom: Prehľad. *China Commun.* **2021**, *18*, 93-119. [CrossRef]
101. Liu, S.; Xiao, L.; Zhao, M.; Xu, X.; Li, Y. Analýza výkonu inteligentného odrazového povrchu v systémoch MIMO s viacerými používateľmi. In Zborník časopisu Journal of Physics: Conference Series, Zhejiang, Čína, 22.-23. mája 2020; s. 012078.
102. Long, W.; Chen, R.; Moretti, M.; Zhang, W.; Li, J. A Promising Technology for 6G Wireless Networks: Inteligentný reflexný povrch. *J. Commun. Inf. Netw.* **2021**, *6*, 1-16.
103. Kisseleff, S.; Martins, W.A.; Al-Hraishawi, H.; Chatzinotas, S.; Ottersten, B. Rekonfigurovateľné inteligentné povrchy pre inteligentné mestá: B.: výskumné výzvy a príležitosti. *IEEE Open J. Commun. Soc.* **2020**, *1*, 1781-1797. [CrossRef]
104. Di Renzo, M.; Zappone, A.; Debbah, M.; Alouini, M.-S.; Yuen, C.; De Rosny, J.; Tretyakov, S. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: Ako to funguje, stav výskumu a cesta vpred. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **2020**, *38*, 2450-2525. [CrossRef].
105. Wu, Q.; Zhang, S.; Zheng, B.; You, C.; Zhang, R. Inteligentná bezdrôtová komunikácia s podporou odrazového povrchu: A tutorial. *IEEE Trans. Commun.* **2021**, *69*, 3313-3351. [CrossRef]

106. Wei, Z.; Yang, L.; Ng, D.W.K.; Yuan, J.; Hanzo, L. On the performance gain of NOMA over OMA in uplink communication systems. *IEEE Trans. Commun.* **2019**, *68*, 536–568. [CrossRef].
107. Zhou, G.; Mao, Y.; Clerckx, B. Rate-Splitting Multiple Access for Multi-Antenna Downlink Communication Systems: IEEE Transactions on Wireless Communications: Spectral and Energy Efficiency Tradeoff; IEEE Transactions on Wireless Communications: 2021. Dostupné online: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9650662> (prístup 20. decembra 2021).
108. Miscopein, B.; Doré J.-B.; Strinati, E.; Kténas D.; Barbarossa, S. Air Interface Challenges and Solutions for Future 6G Networks. 2019. Dostupné online: <https://hal.univ-brest.fr/DRT/cea-01986524v2> (prístup 2. októbra 2021).
109. Dizdar, O.; Mao, Y.; Han, W.; Clerckx, B. Rate-Splitting Multiple Access: Nová hranica pre vrstvu PHY 6G. In Zborník 92. konferencie o technológiách vo vozidlách IEEE (VTC2020-Fall), Victoria, BC, Kanada, 18. novembra - 16. decembra 2020; str. 1–7.
110. Dizdar, O.; Mao, Y.; Clerckx, B. Rate-splitting multiple access to mitigate the curse of mobility in (massive) MIMO networks (Viacnásobný prístup s rozdelením rýchlosti na zmiernenie preklatia mobility v (masívnych) sieťach MIMO). *arXiv* **2021**, arXiv:2102.06405. [CrossRef]
111. Clerckx, B.; Mao, Y.; Schober, R.; Jorswieck, E.; Love, D.J.; Yuan, J.; Hanzo, L.; Li, G.Y.; Larsson, E.G.; Caire, G. Is NOMA efficient in multi-antenna networks? Kritický pohľad na techniky viacnásobného prístupu novej generácie. *IEEE Open J. Commun. Soc.* **2021**, *2*, 1310–1343. [CrossRef].
112. Liva, G.; Gaudio, L.; Ninacs, T.; Jerkovits, T. Návrh kódu pre krátke bloky: *arXiv* **2016**, arXiv:1610.00873.
113. Tataria, H.; Shafi, M.; Molisch, A.F.; Dohler, M.; Sjöland, H.; Tufvesson, F. 6G Wireless Systems: Vízia, požiadavky, výzvy, poznatky a príležitosti. *Proc. IEEE*, **2021**, *109*, 1166–1199. Dostupné online: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9390169> (prístup 8. septembra 2021).
114. Lu, Y.; Zheng, X. 6G: prehľad technológií, scenárov, výziev a súvisiacich otázok. *J. Ind. Inf. Integr.* **2020**, *19*, 100158. [CrossRef].
115. Hao, Y.; Miao, Y.; Chen, M.; Gharavi, H.; Leung, V. 6G kognitívna informačná teória: Pohľad na poštovú schránku. *Big Data Cogn. Comput.* **2021**, *5*, 56. [CrossRef].
116. Mahmood, N.H.; Böcker, S.; Munari, A.; Clazzer, F.; Moerman, I.; Mikhaylov, K.; Lopez, O.; Park, O.-S.; Mercier, E.; Bartz, H. White paper on critical and massive machine type communication towards 6G. *arXiv* **2020**, arXiv:2004.14146.
117. Van Huynh, N.; Hoang, D.T.; Lu, X.; Niyato, D.; Wang, P.; Kim, D.I. Ambient backscatter communications: Súčasný prehľad. *IEEE Commun. Surv. Školiteľ: Mgr.* **2018**, *20*, 2889–2922. [CrossRef]
118. Li, X.; Zheng, Y.; Khan, W.U.; Zeng, M.; Li, D.; Ragesh, G.; Li, L. Bezpečnosť fyzickej vrstvy kognitívnej spätnej komunikácie v prostredí pre zelený internet vecí. *IEEE Trans. Green Commun. Netw.* **2021**, *5*, 1066–1076. [CrossRef].
119. Li, X.; Zheng, Y.; Alshehri, M.D.; Hai, L.; Balasubramanian, V.; Zeng, M.; Nie, G. Kognitívne siete AmBC-NOMA IoV-MTS s IQI: analýza spoľahlivosti a bezpečnosti. *IEEE Trans. Intell. Trans. Syst.* **2021**, 1–12. [CrossRef]
120. Chatterjee, B.; Cao, N.; Raychowdhury, A.; Sen, S. Context-aware intelligence in resource-constrained IoT nodes: Príležitosti a výzvy. *IEEE Des. Test* **2019**, *36*, 7–40. [CrossRef].
121. Polese, M.; Jornt, J.M.; Melodia, T.; Zorzi, M. Toward end-to-end, full-stack 6G terahertz networks. *IEEE Commun. Mag.* **2020**, *58*, 48–54. [CrossRef]
122. Chowdhury, M.Z.; Shahjalal, M.; Ahmed, S.; Jang, Y.M. 6G bezdrôtové komunikačné systémy: *arXiv* **2019**, arXiv:1909.11315. [CrossRef].
123. Ju, S.; Shah, S.H.A.; Javed, M.A.; Li, J.; Palteru, G.; Robin, J.; Xing, Y.; Kanhere, O.; Rappaport, T.S. Rozptyľové mechanizmy a modelovanie pre terahertzovú bezdrôtovú komunikáciu. In Proceedings of the ICC 2019-IEEE International Conference on Communications (ICC), Shanghai, Čína, 20. - 24. mája 2019; s. 1–7.
124. WIRELESS, N. Terahertzová (THz) komunikácia a snímanie. Dostupné online: <https://wireless.engineering.nyu.edu/terahertz-thz-communications-and-sensing/> (prístup 23. októbra 2021).
125. Han, C.; Wu, Y.; Chen, Z.; Wang, X. Terahertzová komunikácia (TeraCom): *arXiv*: výzvy a vplyv na bezdrôtové systémy 6G. **2019**, arXiv:1912.06040.
126. Tekbiyik, K.; Ekti, A.R.; Kurt, G.K.; Görçin, A. Terahertzové komunikačné systémy: Výzvy, novinky a normalizačné úsilie. *Phys. Commun.* **2019**, *35*, 100700. [CrossRef].
127. Rouhi, K.; Hosseininejad, S.E.; Abadal, S.; Khalily, M.; Tafazolli, R. Viackanálová terahertzová komunikácia v blízkom poli pomocou Reprogramovateľného digitálneho metapovrchu na báze grafénu. *J. Lightwave Technol.* **2021**, *39*, 6893–6907. [CrossRef].
128. Bakhtiari, B.; Oraizi, H.; Khalily, M. Design of Graphene-based Terahertz Absorbers by Artificial Intelligence. In Proceedings of 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Düsseldorf, Nemecko, 22.–26. marca 2021; pp. 1–5.
129. Nielsen, M.A.; Chuang, I. Quantum Computation and Quantum Information; 2002. Dostupné online: <https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.1463744?journalCode=ajp> (prístup 20. augusta 2021).
130. Tataria, H.; Shafi, M.; Molisch, A.F.; Dohler, M.; Sjöland, H.; Tufvesson, F. 6G Wireless Systems: Vízia, požiadavky, výzvy, Insights, and Opportunities. *Proc. IEEE* **2021**, *109*, 1166–1199. [CrossRef].
131. Katz, M.; Matinmikko-Blue, M.; Latva-Aho, M. 6Genesis flagship program: Budovanie mostov k bezdrôtovej inteligentnej spoločnosti a ekosystému s podporou 6G. In Zborník z 10. latinskoamerickéj konferencie o komunikáciách IEEE (LATINCOM), Guadalajara, Mexiko, 14. - 16. novembra 2018; s. 1–9.
132. Kharpal, A. *Generálny riaditeľ spoločnosti Huawei hovorí, že pracuje na 6G, ale táto technológia je stále vzdialená približne 10 rokov*; CNBC: 2019. Dostupné online: <https://www.cnbc.com/2019/09/26/huawei-ceo-working-on-6g-but-its-still-10-years-off.html> (prístup 13. októbra 2021).

133. Schroeder, S. *Zabudnite na 5G, Samsung už pracuje na 6G*; Mashable SEA: 2019. Dostupné online: <https://sea.mashable.com/tech/4202/forget-5g-samsung-is-already-working-on-6g> (prístup 20. októbra 2021).
134. Mu-Hyun, C. *SK Telecom bude spolupracovať so spoločnosťami Nokia a Ericsson na výskume 6G*; ZDNet: 2019. Dostupné online: <https://www.zdnet.com/article/sk-telecom-to-collaborate-with-nokia-ericsson-in-6g-research/> (prístup 19. decembra 2021).
135. Thomson, E.A. *MIT a Ericsson uzavreli dohody o spolupráci pri výskume novej generácie mobilných sietí*; Massachusetts Institute of Technology (MIT): Cambridge, MA, USA, 2021; dostupné online: <https://news.mit.edu/2021/mit-ericsson-enter-collaboration-agreements-research-next-generation-mobile-networks-0804> (prístup 16. decembra 2021).
136. Girgis, A.M.; Park, J.; Liu, C.-F.; Bennis, M. Prediktívne riadenie a spoločné navrhovanie komunikácie: M.: A Gaussian Process Regression Approach (Prístup regresie Gaussovhovho procesu). In Proceedings of the IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Atlanta, GA, USA, 26.-29. mája 2020; s. 1-5.
137. Ayidh, A.A.; Nadas, J.B.; Ghannam, R.; Zhao, G.; Imran, M.A. Communication and Control Co-Design Using MIMO Wireless Network. In Proceedings of the UK/China Emerging Technologies (UCET), Glasgow, Spojené kráľovstvo, 21.-22. augusta 2019; s. 1-5.
138. Wei, L.; Zhao, S.; Bourahla, O.F.; Li, X.; Wu, F.; Zhuang, Y.; Han, J.; Xu, M. End-to-End Video Saliency Detection via a Deep Contextual Spatiotemporal Network. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* **2020**, *32*, 1691-1702. [CrossRef]
139. Sun, F.; Li, S.; Wang, S.; Liu, Q.; Zhou, L. CostNet: A Concise Overpass Spatiotemporal Network for Predictive Learning. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **2020**, *9*, 209. [CrossRef]
140. Hewa, T.; Gür, G.; Kalla, A.; Ylianttila, M.; Bracken, A.; Liyanage, M. The Role of Blockchain in 6G: Challenges, Opportunities and Research Directions. In Zborník príspevkov z 2. samitu o bezdrôtových technológiách 6G (6G SUMMIT), Levi, Fínsko, 17. - 20. marca 2020; s. 1-5.
141. Verma, S.; Kaur, S.; Khan, M.A.; Sehdev, P.S. Smerom k ekologickej komunikácii v masívnom internete vecí s podporou 6G. *IEEE Internet Things J.* **2020**, *8*, 5408-5415. [CrossRef]
142. 3GPP. Verzia 15. Dostupné online: <https://www.3gpp.org/release-15> (prístup 27. augusta 2021).
143. Wang, H.; Huang, M.; Zhao, Z.; Guo, Z.; Wang, Z.; Li, M. Stratégia budenia základňovej stanice v celulárnych sieťach s hybridnými zdrojmi energie pre siete 6G v prostredí internetu vecí. *IEEE Internet Things J.* **2020**, *8*, 5230-5239. [CrossRef].
144. Charef, N.; Mnaouer, A.B.; Bouachir, O. Energetický model založený na umelej inteligencii na adaptívne plánovanie pracovného cyklu v bezdrôtových sieťach. In Proceedings of the International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Dubaj, Spojené arabské emiráty, 31. októbra - 2. novembra 2021; s. 1-6.
145. Soleymani, S.A.; Goudarzi, S.; Anisi, M.H.; Movahedi, Z.; Jindal, A.; Kama, N. PACMAN: Privacy-Preserving Authentication Scheme for Managing Cybertwin-Based 6G Networking; IEEE Transactions on Industrial Informatics: 2021. Dostupné online: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9582763> (prístup 13. decembra 2021).