

6G ali kje so meje pete generacije

Tomi Mlinar¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

6G – where are the limits of fifth generation

Abstract. *This article describes anticipated requirements for the forthcoming fifth generation of mobile communications (5G) and tries to predict what services will have to wait for the next generation (6G), mainly due to technical immaturity. According to today's specifications of 3GPP we cannot expect from the 5G to simultaneously offer services to a large number of devices in a small space, with high precision, extremely high speeds and latencies of micro seconds. Some predicted services as real localization, virtual and augmented reality and similar should only be possible with the arrival of 6G or even later. The most promising 6G-enabling technologies could be cell-free networks, quantum communications, wireless power transfer, energy harvesting, intelligent structures and omnipresent artificial intelligence.*

1 Uvod

Peta generacija mobilnih komunikacij (5G) je danes kakšno leto oddaljena od masovne eksplozije. Vsekakor se to ne bo zgodilo po vsem svetu enakomerno, prav gotovo pa v gospodarsko in tehnološko razvitejših državah sveta, kot so Južna Koreja, ZDA, Kitajska in v določeni meri Evropa. Seveda je na mestu vprašanje, na katerih področjih izmed napovedanih se bo 5G najprej začela uporabljati. Po nekaterih razmišljanjih [1, 2, 3] naj bi omrežja 5G pokrila potrebe po povezljivosti visokohitrostnih naprav, kot so računalniki, pametni telefoni in povezana vozila, medtem ko naj bi področje interneta vsega (IoE, Internet of Everything), ki zahteva posebne lastnosti omrežja, počakalo na naslednjo generacijo. Po današnjih specifikacijah 3GPP, različic 15 in 16 [4,5], ne moremo pričakovati od sistema 5G, da bo hkrati nudil storitve velikemu številu naprav na majhnem prostoru, s centimetrovsko natančnostjo, izjemno velikimi hitrostmi in zakasnitvami reda nekaj deset mikro sekund. Prava lokalizacija, navidezna resničnost, obogatena resničnost in teleprisotnost naj bi bile mogoče šele s prihodom 6G ali celo kasneje.

Glede na razvoj dosedanjih petih generacij, lahko pričakujemo naslednjo generacijo (6G) okrog leta 2030, ki pa ne bo namenjena širokim množicam, ampak le ciljnim skupinam uporabnikov.

2 Zmogljivosti sistema 5G

2.1 Splošno o 5G

Po krovni definiciji [5] naj bi bil sistem 5G zgrajen tako, da bi omogočal optimalno podporo različnim

storitvam, različnim prometnim obremenitvam in različnim vrstam uporabnikov. Sistem 5G naj bi bil zmožen hkratne podpore različnih kombinacij zanesljivosti, zakasnitev, prepustnosti, lokalizacije in dostopnosti. ITU [6] in druge organizacije so izoblikovale tri glavne skupine storitev, ki naj bi zaznamovale 5G. To so: izboljšane širokopasovne komunikacije (eMBB, Enhanced Mobile Broadband), masovne komunikacije med napravami (mMTC, Massive Machine Type Communications) in zelo zanesljive komunikacije z majhnimi zakasnitvami (URLLC, Ultra Reliable Low Latency Communications). Vse to je mogoče le z vpeljavo novih tehnologij, tako na jedrnem kot na dostopovnem delu.

Iz opisanega lahko sklepamo, da bo prehod iz 4G v 5G izvedljiv in bodo dosežene zelene ravni pomembnejših parametrov, kot so npr. zakasnitev in zanesljivost, saj že imamo na razpolago tehnike, kot so brezžična programska določena omrežja (SON, Software-defined Networking), virtualizacija omrežnih funkcij (NFV, Network Function Virtualization), antenska tehnika MIMO (Multiple In Multiple Out), deljenje omrežja na rezine, prenos računske moči na rob omrežja in selitev komunikacij na področje frekvenčnega spektra mm-valov.

Delno se v 5G že vpeljuje tudi umetna inteligenca. Tehnika radijskega dostopa v oblaku (C-RAN, Cloud Radio Access), ki jo bo uporabljal 5G, predstavlja podlago za umetno inteligenco z izkoriščanjem velepodatkov. Na radijskem delu 5G se računska moč seli zelo blizu uporabnikom. Vpeljuje se t.i. tehnika "meglenega RAN" (ang. Fog-RAN), kar seveda zmanjšuje zakasnitve in porabo moči.

Izpolnjevanje določenih ključnih parametrov je nujno, da lahko omrežje zagotavlja storitve, kot npr. nadzor zrakoplovov brez posadke, obogateno resničnost, avtomatizacijo tovarn in podobno. Nadalje mora biti omrežje sposobno zagotavljati množico heterogenih storitev med dvema ekstremoma, npr. prenesti velike količine podatkov v čim krajšem času eni skupini uporabnikov in majhne količine podatkov v daljšem času drugi skupini uporabnikov. Potem so tu še različne zahteve za uporabo znotraj in zunaj stavb, lokalna povezljivost, velike gostote uporabnikov na majhnih površinah, pokrivanje večjih območij in nudenje storitev uporabnikom, ki se gibljejo z velikimi hitrostmi.

V vseh primerih gre za kombinacijo določenih ključnih parametrov, kot so zakasnitev, zanesljivost delovanja, točnost določanja lokacije, prenosna hitrost, doseg komunikacije oz. velikost celice, poraba energije,

hitrost premikanja uporabnika, nadaljevanje storitve pri prehajanju med omrežji in druge.

2.2 Lastnosti in omejitve 5G

Ključni indikatorji delovanja sistema 5G, ki so v [7] določeni za peto generacijo in so povzeti v preglednici 1, so določeni za storitve, ki jih poznamo danes ali pričakujemo jutri. Gotovo pa bo čas pokazal, da so nekateri od postavljenih parametrov nedosegljivi z današnjimi tehnologijami oz. se bodo storitve razvile toliko, da bo treba lestvico postaviti višje.

Preglednica 1. Ključni parametri sistema 5G

| Ključni parametri 5G | |
|--|---|
| Največja teoretična hitrost prenosa podatkov | 20 Gb/s DL ¹ 10 Gb/s UL ² |
| Spektralna učinkovitost | 30 b/s/Hz DL 15 b/s/Hz UL |
| Največja pasovna širina | agregirana celotna pasovna širina, ki je na voljo |
| Zakasnitev v kontrolni ravnini | 10 ms |
| Zakasnitev v uporabniški ravnini (UL ali DL) | 0,5 ms za URLLC 4 ms za eMBB 50 ms RTT ³ (LEO ⁴) 180 ms RTT (MEO ⁵) 600 ms RTT (GEO ⁶) |
| Zakasnitev pri prenosu majhnih paketov (20 bajtov) | < 10 s UL |
| Zanesljivost | 10 ⁻⁵ |
| Mobilnost | < 500 km/h |
| Frekvenčni spekter | do 100 GHz |

3 Ali potrebujemo 6G?

3.1 Splošno o 6G

Storitve in aplikacije se pospešeno razvijajo. Primeri IoE so lahko združevanje navidezne, obogatene in mešane resničnosti v t.i. razširjeno resničnost (XR, eXtended Reality), leteča prevozna sredstva, vmesniki med možgani in računalniki in povezana avtonomna vozila. Teh ni mogoče uvrstiti le v eno od treh glavnih skupin 5G (eMBB, URLLC ali mMTC). Za delovanje storitev IoE mora biti sistem sposoben zagotoviti hkrati visoko zanesljivost delovanja, nizke zakasnitve in visoke podatkovne hitrosti, tako v smeri proti uporabniku kot od njega.

Zelo verjetno bo ključna prednost 6G, da jo bo na vseh ravneh, kot je orkestracija in upravljanje omrežja, kodiranje in obdelava signalov fizične ravnine, manipulacija pametnih struktur, rudarjenje podatkov na ravni omrežja in naprav za komunikacijske storitve, ki

¹ DL (Down Link)–povezava proti uporabniku

² UL (Up Link)–povezava od uporabnika proti bazni postaji

³ RTT (Round Trip Time)–obhodni čas

⁴ LEO (Low Earth Orbit)–nizka zemeljska orbita (160–2000 km)

⁵ MEO (Medium Earth Orbit)–srednja zemeljska orbita (2000–35.000 km)

⁶ GEO (Geostationary Equatorial Orbit)–Geostacionarna zemeljska orbita (35.786 km)

temeljijo na poznavanju vsebine, v celoti krmilila umetna inteligenca [3].

3.2 Arhitektura 6G

Določeni avtorji [2] predvidevajo, da bo arhitektura radijskega dela 6G razdeljena v grobem na dve ravnini. Prvo bodo predstavljale pametne elektromagnetne površine (necelične strukture), ki bodo delovale na zelo visokih frekvencah (THz), v podporo pa jim bodo t.i. »drobne celice«, ki bodo delovale na mm-valovih. Slednje bodo omogočale mobilni in fiksni dostop. Za pokrivanje trenutnih »vročih točk« bodo uporabne bazne postaje na dronih ali fiksnih balonih.

Tehnologiji [8], ki naj bi se predvidoma uporabljali v 6G, sta tudi: brezžično napajanje in prejemanje radiofrekvenčne energije ter brezžične optične komunikacije (Li-Fi, Light-Fidelity).

6G pa ne bo pomenil le brezžičnih komunikacij. Uporaben bo tudi v osebnih računalnikih, ki bodo za interno komunikacijo uporabljali digitalne komunikacije površinskih valov.

Prenosne hitrosti po uporabniku bodo v 6G najmanj 10 Gb/s pa vse tja do 100 Gb/s. Spektralna učinkovitost se bo merila prostorsko, v b/s/Hz/m³. V preglednici 2 so povzeti verjetni ključni parametri sistema 6G [2,3].

Preglednica 2. Ključni parametri sistema 6G

| Ključni parametri 6G | |
|--|---|
| Največja teoretična hitrost prenosa podatkov | 1 Tb/s (simetrično) |
| Spektralna učinkovitost | 1000x današnje zmogljivosti, merjeno v b/s/Hz/m ³ |
| Skupna zakasnitev (E2E) | < 1 ms |
| Zakasnitev samo na radijskem delu | 10 ns |
| Zakasnitev zaradi obdelave | 10 ns |
| Zanesljivost delovanja (E2E) | 99,99999 % |
| Frekvenčni pasovi | - < 6 GHz - 30-300 GHz (mm-valovi) - > 300 GHz (področje THz) - ne-RF komunikacije (komunikacije z vidno svetlobo in optične komunikacije) |

3.3 Aplikacije 6G

Potencialne aplikacije [2], ki zahtevajo nadaljnji razvoj tehnologij v smeri 6G, bi lahko bile: multisenzorske aplikacije, povezani roboti in avtonomni sistemi brezžične interakcije na relaciji možgani-računalnik, veriženje blokov in tehnologije porazdeljene glavne knjige ter druge.

3.4 Trendi 6G

Uporaba prej omenjenih aplikacij bo verjetno povzročila naslednje smeri razvoja 6G [2]:

- razvoj pametnih površin (razvoj elektromagnetno aktivnih površin z uporabo meta materialov);
- množična majhnih količin podatkov (premik iz uporabe centraliziranih »big data« v uporabo masovno distribuiranih »small data«);

- od samoorganiziranih omrežij v samozadostna omrežja (SSN, Self-Sustaining Networks);
- konvergenca komunikacij, računalništva, nadzora, lokalizacije in zaznavanja;
- konec obdobja pametnih telefonov - nadomestile jih bodo nosljive naprave, pametni implantati itd.

3.5 Tehnologije 6G

Podporo prej opisanim storitvam in aplikacijam bodo predvidoma nudile izboljšane ali nove tehnologije, ki so našteje v nadaljevanju [3].

1. Razširjena umetna inteligenca

Umetna inteligenca bo prisotna: na fizični ravni pri ocenjevanju kanala in kodiranju, pri razporejanju omrežnih virov, kot je nadzor prometa in upravljanje s predpomnilnikom, pri varnosti in preverjanju avtentičnosti uporabnika, dinamičnem formiranju in upravljanju s topologijo celic, predvidevanju in detekciji napak itd. Pravo moč 6G naj bi dodala t.i. »kolektivna umetna inteligenca«, združena s teorijo iger.

2. Kontekstne komunikacije z radarjem

Z uporabo radarskih tehnologij se izboljša zavedanje mobilnega terminala ali naprave IoT o okolici. S podatki iz radarjev in umetno inteligenco se bo lokaliziralo morebitne prisluškovalce in posledično prilagodilo komunikacije.

Kontekstualni podatki, ki jih bo zbiral uporabniški terminal, bodo pomagali omrežju pri predvidevanju naslednjih premikov terminalov.

3. Necelična omrežja

Brezpilotni letalniki bodo poleg radijskega pokrivanja služili tudi kot ponudniki vsebine in računski strežniki. Z umetno inteligenco se bo dinamično določalo poti brezpilotnih letalnikov in optimiziralo ostale parametre – topologija omrežja se bo dinamično spreminjala. Brezžični prenos energije bo omogočil stalno gibanje brezpilotnih letalnikov.

4. Metamateriali in inteligentne strukture

Pričakuje se, da bodo antenske strukture na osnovi metamaterialov postale standardna oprema mobilnih terminalov, kar bo omogočilo uporabo tehnike MIMO tudi na strani uporabniških terminalov.

Druga zanimiva tehnologija so t.i. *fluidne antene*, narejene iz prevodne ali ionizirane tekočine, ki se jo lahko poljubno oblikuje za dano okolje, kjer se razširja signal. Predvidevajo, da lahko ena programsko določena fluidna antena nadomesti klasično anteno MIMO. Fluidna struktura omogoča optimizacijo položaja in oblike antene, kar omogoči velik dobitok raznosmernosti in razvrščanja, medtem ko se izpostavljenost uporabnikov elektromagnetnim poljem pomembno zmanjša.

Programsko določeni materiali (SDM, Software Defined Materials) lahko zagotavljajo nadzorovano radijsko okolje. Programske nastavljive metapovršine lahko povsem spremenijo zgradbo oddajnikov. Zadnje raziskave [9] kažejo, da lahko metapovršine programiramo tako, da se spreminja faza, amplituda,

frekvenca in celo orbitalni kotni moment elektromagnetnega valovanja, kar pomeni moduliranje radijskega signala brez mešalnika in RF-verige.

5. Komunikacije z vidno svetlobo

Te komunikacije uporabljajo belo svetlobo LED za kodiranje informacij v optične frekvence. Vsaka povezava bi lahko dosegla prenosno hitrost do 500 Mb/s [10]. Uporabne so pri komunikaciji med vozili, kjer komunikacija potekala med prednjimi in zadnjimi lučmi dveh vozil, ali tam, kjer je uporaba radijskih valov manj učinkovita, kot npr. na letalih, pri podvodnih komunikacijah ali v medicinskih ustanovah.

6. Brezžični prenos moči in pridobivanje energije

Ta tehnologija bi lahko zaživela, ker bodo (a) komunikacijske razdalje precej manjše in (b) uporabniški terminali, zaradi velikih računskih potreb in izvajanja procesov umetne inteligence, energetsko zelo požrešni. Radiofrekvenčni signali lahko postanejo pomemben vir energije za nizkoenergetske naprave.

7. Rodovno razvrščanje

Na optičnem delu elektromagnetnega spektra je tehnika rodovnega razvrščanja (OAM, Orbital Angular Momentum) že dolgo poznana, v 6G pa bi se jo lahko uporabilo tudi na radijskem delu spektra, predvsem za razdalje nekaj metrov, kot je to primer pri industrijskih aplikacijah. Raziskava [11] je pokazala, da se lahko dosežejo prenosne hitrosti do 2,5 Tb/s s spektralno učinkovitostjo 95,7 b/s/Hz. Po raziskavi [12] so sicer sistemi, ki uporabljajo omenjeno tehniko na področju radijskih frekvenc elektromagnetnega spektra, še zelo primitivni.

8. Kvantne komunikacije in omrežja

Kvantne komunikacije se lahko uporabijo za zelo varne prenose podatkov. Inherentna lastnost kvantnega prepletanja je, da ne omogoča kloniranja ali dostopanja brez opazne spremembe signala. Kvantne komunikacije so mogoče tudi za prenos signalov na velike razdalje, čeprav poskusi na frekvencah milimetrskih valov [13] dajejo dobre rezultate do razdalje manj kot 100 m. Za regeneracijo in redistribucijo kvantnega ključa se lahko, kot zaupanja vredna vozlišča, uporabijo brezpilotni letalniki ali sateliti.

9. Mikrovalovna fotonika

Zahteve novih generacij, kot npr. množična povezljivost in velike prenosne zmogljivosti, postavljajo izzive današnjemu razvoju elektronike. Zelo verjetna rešitev je v integraciji radijskih in optičnih tehnologij - integrirani mikrovalovni fotoniki [14]. Današnje sisteme mikrovalovne fotonike sestavljajo optično vlakno in diskretne komponente, ki so energetsko potratne, neprilagodljive in omejeno razširljive. Cilj integrirane mikrovalovne fotonike je preseči omejitve z vključevanjem teh gradnikov v t.i. fotonika integrirana vezja (PIC, Photonic Integrated Circuits).

3.6 Izzivi 6G

Predvidena selitev računalniške moči na rob omrežja oz. čim bližje uporabniku, s tem pa porazdelitev podatkov po robovih omrežja, omejuje polno operativnost umetne inteligence. Omrežje se bo delilo na zelo majhne celice za večjo zmogljivost in manjše zakasnitve.

Pri gostitvi omrežja bo imela vsaka bazna postaja mnogo možnosti za povezljivost. Način, kako se bo uporabnik povezal, bo imel velik vpliv na interferenčni vzorec. Primer hitro spreminjajoče se interferenčne dinamike lahko predstavljajo celice na dronih in hitro gibajoča se omrežja vozil. Dobro modeliranje dinamike motenj bo eden od izzivov, zato bo potrebno razviti nova matematična orodja za analizo in optimizacijo.

Umetna inteligenca bo igrala pomembno vlogo tudi pri odločitvah uporabniških naprav. Za to bo potrebna velika računrska moč in posledično velika poraba energije. Za delovanje teh naprav bo potrebno razviti nove materiale, ki bodo omogočili delovanje na širokem naboru frekvenc, z velikimi dobitki in visoko inteligenco.

Pri milijardah naprav, ki bodo vsakodnevno aktivne v omrežju, bo varnost igrala pomembno vlogo. Za to bo v 6G potreben nov holističen pristop k varnosti.

4 Sklep

Peta generacija omrežij nam verjetno ne bo ponudila vsega, kar se napoveduje danes. Tako lahko pričakujemo nadaljnji razvoj tehnologij, ki bodo omogočale storitve, ki se napovedujejo že danes, prav gotovo pa bo šele širša uporaba omrežij 5G pripeljala do novih spoznanj, kaj dejansko potrebujemo in kar bi lahko rešila nova šesta generacija.

Večje spremembe v 6G bodo verjetno; integracija treh skupin (eMBB, URLLC in mMTC) v eno, s skupnim imenom MBRLC (Mobile Broadband Reliable Low Latency Communications) [2], premik komunikacij na frekvenčna območja terahertzov, izgradnja samozadostnih omrežij ter integracija satelitskih omrežij LEO, prizemnih omrežij in omrežij brezpilotnih letalnikov. Vsa komunikacija dobiva še eno dimenzijo: analiza in optimizacija sistema 6G bo zahtevala pokrivanje treh dimenzij.

Spremeniti se bo moral koncept iz zdajšnjega radio-centričnega načina omrežja v integriran način, ki ga označujemo s kratico 3CLS (Communications, Computing, Control, Localization, and Sensing) [2], ki ga bo poganjala umetna inteligenca. Verjetno se bo spremenila zdajšnja paradigma komunikacije med pametnim telefonom in bazno postajo v nov način komunikacije terminalov s pametnimi površinami. Komunikacijske površine 6G bodo preko brezžičnega prenosa energije zagotavljale napravam, kot so senzorji in implantati, osnovno napajanje.

6G bodo zaznamovale prihajajoče tehnologije, kot npr. kvantne komunikacije in integracija radiofrekvenčnih povezav z neradijskimi povezavami (optičnimi, nevronskimi, molekularnimi ...).

Danes je skoraj nemogoče napovedati, ali bodo omrežja 6G res potrebovala deset let za svoj razvoj in ali bomo ponujene storitve tudi vsi uporabljali. Če sklepamo iz današnjega stanja tehnologije (4G in 5G), lahko predvidimo, da se bodo generacije še vedno razvijale, gotovo pa to ne bo pomenilo takšnega globalnega preskoka, kot ga je pomenil prehod iz 3G v 4G.

Literatura

- [1] Pablo Valerio: "5G is already here, 6G will arrive soon", <https://iot.eetimes.com/wi-fi-expecting-next-gen-1-lax-approval-in-july/>, June 19, 2018
- [2] Walid Saad, Mehdi Bennis, and Mingzhe Chen: "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems", https://www.researchgate.net/publication/331396903_A_Vision_of_6G_Wireless_Systems_Applications_Trends_Technologies_and_Open_Research_Problems, February 2019
- [3] Faisal Tariq et al.: "A Speculative Study on 6G", https://www.researchgate.net/publication/331159423_A_Speculative_Study_on_6G, February 2019
- [4] ETSI TS 123 501 V15.2.0 (2018-06): System Architecture for the 5G System (3GPP TS 23.501 version 15.2.0 Release 15)
- [5] 3GPP TS 22.261 V16.8.0 (2019-06): 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 16)
- [6] Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges, ITU, Geneva, 2018
- [7] 3GPP TR 38.913 V15.0.0 (2018-06): 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 15)
- [8] Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges, ITU, Geneva, 2018
- [9] W. Tang, J. Dai, M. Chen, X. Li, Q. Cheng, S. Jin, K. K. Wong, and T. J. Cui, "A programmable metasurface based RF chain-free 8PSK wireless transmitter," IET Electronics Letters, 2019
- [10] C. Chen, R. Bian and H. Haas, "Omnidirectional transmitter and receiver design for wireless infrared uplink transmission in LiFi," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops, Kansas City, USA, 2018
- [11] J. Wang, J.-Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, and A. E. Willner, "Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing," Nature Photonics, vol. 6, pp. 488-496, Jun. 2012
- [12] P. Miklavčič, M. Vidmar, B. Batagelj, "Patch-monopole monopulse feed for deep reflectors", Electronic Letters, 2018, vol. 54, No. 24, str. 1364-1366
- [13] N. Hosseinidehaj and R. Malaney, "Quantum Entanglement Distribution in Next-Generation Wireless Communication Systems", arXiv:1608.05188v1 [quant-ph] 18 Aug 2016
- [14] European Network for High Performance Integrated Microwave Photonics, COST, <https://euimwp.eu/>