

Wizja 6G: czynniki napędowe, czynniki umożliwiające, zastosowania i plan działania

Z jednej strony środowisko akademickie i przemysł już skierowały swoją uwagę w stronę technologii nowej generacji, znanej jako szósta generacja (6G). Główni gracze w branży komunikacji mobilnej zainicjowali wiele działań w celu zbadania potencjalnych technologii 6G. Z drugiej strony nadal istnieją różne głosy, takie jak Czy 6G jest potrzebne? lub Czy naprawdę potrzebujemy 6G? W związku z tym konieczne jest wyjaśnienie znaczenia i podstawowej motywacji rozwoju 6G i przekonanie czytelników, że 6G z pewnością pojawi się jak poprzednie generacje komunikacji mobilnej, zanim przejdziemy do szczegółów technicznych 6G. Ta część zapewni kompleksową wizję dotyczącą sił napędowych, przypadków użycia i scenariuszy użycia oraz zademonstruje podstawowe wymagania dotyczące wydajności i zidentyfikuje kluczowe czynniki umożliwiające rozwój technologii.

Tło

Era komunikacji mobilnej piątej generacji (5G) nadeszła w kwietniu 2019 r., kiedy trzej południowokoreańscy operatorzy komórkowi – SK Telecom, LG U+ i KT – konkurowali ze amerykańskim operatorem Verizon o uruchomienie pierwszej na świecie komercyjnej sieci 5G. W ciągu ostatnich dwóch lat byliśmy świadkami znacznej ekspansji zasięgu 5G na całym świecie i ogromnego wzrostu liczby subskrypcji 5G w głównych krajach. Na przykład pod koniec 2020 r. wskaźnik penetracji użytkownika 5G w Korei Południowej przekroczył 15,5%, podczas gdy Chiny wdrożyły ponad 700 000 stacji bazowych, aby obsłużyć około 200 milionów abonentów 5G. W przeciwieństwie do poprzednich generacji sieci komórkowych, które koncentrowały się na usługach komunikacyjnych zorientowanych na człowieka, 5G ma na celu nie tylko mobilny szerokopasmowy dostęp do Internetu, ale także masową komunikację typu maszynowego i niezwykle niezawodną komunikację o niskim opóźnieniu dla aplikacji o znaczeniu krytycznym (APP). Pojawienie się 5G rozszerza sferę komunikacji mobilnej z ludzi na rzeczy, od konsumentów do branż pionowych i od usług publicznych do hybrydowych aplikacji publiczno-prywatnych. Skala subskrypcji mobilnych znacznie się powiększa z zaledwie miliardów światowej populacji do niezliczonej łączności między ludźmi, maszynami i rzeczami. Wdrożenie sieci 5G ułatwi szeroką gamę nowych aplikacji, takich jak Industry 4.0, eHealth, Virtual Reality (VR), Internet of Things (IoT) i automatyczna jazda. W 2020 r. wybuch pandemii COVID-19 doprowadził do drastycznej utraty życia ludzkiego na całym świecie i przyniósł znaczne wyzwania dla działalności społecznej i gospodarczej. Jednak ten kryzys zdrowia publicznego podkreślił znaczenie sieci i infrastruktury cyfrowej w utrzymaniu funkcjonowania społeczeństwa i rodzin w kontakcie. W szczególności aplikacje 5G, takie jak zdalni chirurdzy, edukacja online, praca zdalna, wideokonferencje wysokiej rozdzielczości, pojazdy bez kierowców, dostawy bezzałogowe, roboty, bezkontaktowa opieka zdrowotna i autonomiczna produkcja, wykazały swoją użyteczność podczas walki z pandemią. 5G nadal jest w drodze do szerokiego wdrożenia na całym świecie, ale środowisko akademickie i przemysł już przeniósł swoją uwagę na technologie wykraczające poza 5G lub szóstą generacji (6G), aby zaspokoić przyszłe zapotrzebowanie na technologie informacyjno-komunikacyjne (ICT) w 2030 roku. Choć w społeczności bezprzewodowej trwają dyskusje na temat tego, czy istnieje potrzeba 6G lub czy liczenie generacji powinno zostać zatrzymane na 5, a nawet istnieje sprzeciw wobec mówienia o 6G w tym czasie, zainicjowano kilka pionierskich prac nad nowymi technologiami komunikacji mobilnej. W lipcu 2018 r. powołano grupę fokusową o nazwie Technologies for Network 2030 w ramach sektora standaryzacji Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (ITU-T). Grupa zamierza zbadać możliwości sieci na rok 2030 i kolejne lata [ITU-T NET-2030, 2019], kiedy to oczekuje się, że będą one wspierać nowe, przyszłościowe scenariusze, takie jak komunikacja typu holograficznego, inteligencja wszechobecna, Internet dotykowy, doświadczenie wielozmysłowe i cyfrowy bliźniak. Ponadto Komisja Europejska zainicjowała sponsorowanie działań badawczych wykraczających poza 5G, zgodnie z jej ostatnimi wezwaniem programu Horyzont 2020 – ICT-20 5G Long Term Evolution i ICT-52 Smart

Connectivity beyond 5G – gdzie na początku 2020 r. rozpoczęto serię pionierskich projektów badawczych dotyczących potencjalnych technologii 6G. Komisja Europejska ogłosiła również swoją strategię przyspieszenia inwestycji w europejską łączność gigabitową, w tym 5G i 6G, aby kształtować cyfrową przyszłość Europy [EU Gigabit Connectivity, 2020]. W październiku 2020 r. sojusz Next Generation Mobile Networks (NGMN) uruchomił swój nowy projekt 6G Vision and Drivers, mający na celu zapewnienie wczesnego i terminowego kierunku dla globalnych działań 6G. Na swoim spotkaniu w lutym 2020 r. Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny Sektora Radiokomunikacji (ITU-R) postanowił rozpocząć badanie przyszłych trendów technologicznych na rzecz przyszłej ewolucji Międzynarodowej Telekomunikacji Mobilnej (IMT) [ITU-RWP5D, 2020]. Tradycyjni czołowi gracze w dziedzinie komunikacji mobilnej, tacy jak Stany Zjednoczone, Chiny, Finlandia, Niemcy, Japonia i Korea Południowa, oficjalnie zainicjowali już swój krajowy program badawczy 6G. W Finlandii Uniwersytet w Oulu rozpoczął przełomowe badania 6G w ramach flagowego programu Akademii Finlandii o nazwie 6G-Enabled Wireless Smart Society and Ecosystem (6Genesis), który koncentruje się na kilku trudnych obszarach badawczych, w tym niezawodnej, niemal natychmiastowej, nieograniczonej łączności bezprzewodowej, rozproszonych obliczeniach i inteligencji, a także materiałach i antenach, które będą wykorzystywane w przyszłości w obwodach i urządzeniach. W październiku 2020 r. Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS) uruchomiło „Next G Alliance”, którego członkami założycielami są AT&T, T-Mobile, Verizon, Qualcomm, Ericsson, Nokia, Apple, Google, Facebook, Microsoft itp. Jest to inicjatywa branżowa, której celem jest promowanie północnoamerykańskiego przywództwa w technologii mobilnej 6G w ciągu następnej dekady dzięki działaniom kierowanym przez sektor prywatny. Kładąc silny nacisk na komercjalizację technologii, jej ambicją jest objęcie pełnego cyklu życia badań i rozwoju 6G, produkcji, standaryzacji i gotowości rynkowej. Już w 2018 r. grupa robocza 5G w Ministerstwie Przemysłu i Technologii Informacyjnych Chin rozpoczęła studium koncepcyjne potencjalnych technologii 6G, dzięki czemu Chiny stały się jednym z pierwszych krajów, które eksplorują technologię 6G. W listopadzie 2019 r. Ministerstwo Nauki i Technologii Chin oficjalnie rozpoczęło prace badawczo-rozwojowe w zakresie technologii 6G koordynowane przez ministerstwo wraz z pięcioma innymi ministerstwami lub instytucjami krajowymi. Grupa robocza ds. promocji z rządu odpowiada za zarządzanie i koordynację. Tymczasem na tym wydarzeniu powołano ogólną grupę ekspertów składającą się z 37 ekspertów z uniwersytetów, instytutów badawczych i przemysłu.

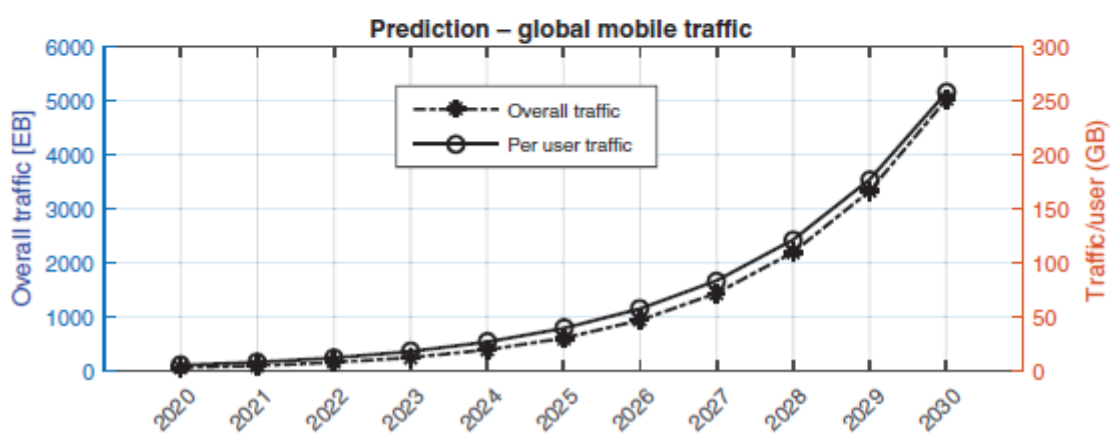
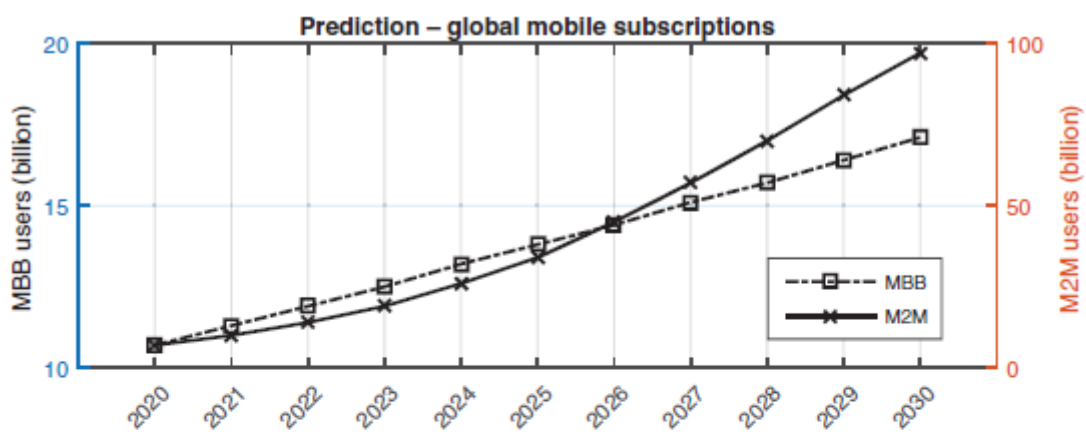
Eksplozywny ruch mobilny

Od połowy 2019 r. sieci 5G są wdrażane komercyjnie na całym świecie, a liczba subskrypcji 5G osiągnęła już ogromną skalę w niektórych regionach. Nowa generacja komunikacji mobilnej pojawia się zwykle co dekadę, więc zarówno środowisko akademickie, jak i przemysł zainicjowały eksplorację następcy 5G. Jednak w drodze do 6G pierwszym problemem, na jaki natrafiamy, jest wiele obaw, takich jak „Czy naprawdę potrzebujemy 6G?” lub „Czy 5G już wystarczy?”. Aby przesunąć tę barierę, społeczność bezprzewodowa musi najpierw wyjaśnić krytyczne siły napędowe rozwoju 6G. System nowej generacji jest napędzany wykładniczym wzrostem ruchu mobilnego i subskrypcji mobilnych oraz nowymi przełomowymi usługami i aplikacjami na horyzoncie. Ponadto jest również napędzany wewnętrzną potrzebą społeczeństwa komunikacji mobilnej, aby stale poprawiać wydajność sieci, a mianowicie wydajność kosztową, wydajność energetyczną, wydajność widma i wydajność operacyjną. Ponadto, wraz z pojawieniem się zaawansowanych technologii, takich jak sztuczna inteligencja (AI), komunikacja terahercowa (THz) i konstelacja satelitów na dużą skalę, sieć komunikacyjna może ewoluować w kierunku bardziej wydajnego i wydajnego systemu, aby lepiej spełniać wymagania obecnych usług i otwierać możliwość oferowania przełomowych usług, których dotychczas nigdy nie widziano. Ta sekcja przedstawia trend w ruchu mobilnym, który ma nadal gwałtownie rosnąć do 2030 r. Dwie kolejne sekcje pokażą potencjalne przypadki użycia i scenariusze użycia. Żyjemy w bezprecedensowej erze, w której wiele interaktywnych, inteligentnych produktów, usług i aplikacji pojawia się i ewoluuje szybko,

narzucając ogromne zapotrzebowanie na komunikację mobilną. Można przewidzieć, że system 5G będzie trudny do obsłużenia ogromnej ilości ruchu mobilnego w 2030 r. i później. W 2015 r. ITU-R opublikował raport [ITU-R M.2370, 2015], aby przeanalizować wzrost ruchu IMT w latach 2020–2030. Według tego raportu, głównymi czynnikami napędzającymi przewidywany wzrost ruchu są:

- **Korzystanie z wideo:** Korzystanie z usług wideo na żądanie będzie nadal rosnąć, a rozdzielczość tych filmów będzie nadal wzrastać. Ludzie chcą oglądać treści wizualne o wysokiej rozdzielczości, niezależnie od sposobu ich dostarczania. Badanie przeprowadzone przez Bell Labs wykazało, że strumieniowe przesyłanie wideo stanowiło prawie dwie trzecie całego ruchu mobilnego w 2016 r.
- **Proliferacja urządzeń:** Na świecie jest ponad pięć miliardów ludzi, którzy posiadają smartfony, a na rynku sprzedaje się ponad miliard nowych smartfonów rocznie. Stanowi to 66,5% światowej populacji. Ponadto różne nowe inteligentne urządzenia, takie jak elektronika noszona, okulary VR i inteligentne samochody, są podłączone do sieci komórkowych.
- **Wdrażanie aplikacji:** Szybkość rozprzestrzeniania się mobilnych aplikacji przyspiesza. Roczne globalne pobieranie aplikacji wyniosło 102 miliardy w 2013 r. i wzrosło do 270 miliardów w 2017 r. Większość aplikacji nie jest używana więcej niż raz po pobraniu. To przyjmowanie aplikacji i ich używanie przyczyni się do wzrostu ruchu mobilnego szerokopasmowego, a ponadto liczba regularnych aktualizacji tych setek miliardów aplikacji również zwiększy ruch mobilnego szerokopasmowego. Oprócz tych głównych czynników wzrostu ruchu danych, istnieją pewne inne cechy i trendy wpływające na ogólne zapotrzebowanie na ruch do 2030 r.
- **Wdrożenie IMT-2020:** Nowe technologie poprawią postrzeganą jakość doświadczenia (QoE) i zmniejszą koszt za bit, co z kolei spowoduje większe zapotrzebowanie na ruch.
- **Aplikacje i urządzenia typu maszyna-maszyna (M2M)** są również jednym z najszybciej rozwijających się segmentów usług mobilnych i ostatecznie zwiększonego zapotrzebowania na dane mobilne. Liczba połączeń M2M może być o kilka rzędów wielkości większa niż populacja świata. Miliardy maszyn potencjalnie wykorzystają sieci komórkowe do dostępu do usług online i łączenia się ze sobą.
- **Zwiększona rozdzielczość ekranu:** Ciągłe ulepszanie możliwości ekranu, np. 4K Ultra-High-Definition (UHD), oraz rosnące zapotrzebowanie na pobieranie i strumieniowanie wideo spowoduje większy ruch w sieciach komórkowych.
- **Proliferacja ekranów otoczenia lub powierzchni informacyjnych** dla urządzeń podłączonych do Internetu w celu wyświetlania aktualnych informacji, takich jak ekrany w windach i autobusach, zwiększy ruch.
- **Chmura obliczeniowa:** Oczekuje się, że popyt na mobilne usługi w chmurze wzrośnie, ponieważ użytkownicy coraz częściej korzystają z większej liczby usług, które muszą być powszechnie dostępne. Wraz ze wzrostem liczby użytkowników łączących się przez sieć komórkową z chmurą, mobilny ruch danych między terminalami mobilnymi, serwerami w chmurze i pamięcią masową w chmurze będzie nadal rosnąć.
- **Zastąpienie stałego łącza szerokopasmowego (FBB) łączem MBB:** Na obszarach i w sytuacjach, w których MBB jest używane jako alternatywa dla przewodowego łącza szerokopasmowego, takiego jak łącze miedziane, kablowe i światłowodowe, może to przyczynić się do zwiększenia ruchu IMT.
- **Streaming multimediiów:** Ludzie częściej używają swoich urządzeń mobilnych do strumieniowego przesyłania multimediiów, ze zwiększoną konsumpcją multimediiów jednokierunkowych ze względu na przesunięcie czasowe (rozszerzenie chmury), przesunięcie przestrzenne (dostępność treści w

dowolnym miejscu) i przesunięcie urządzenia (wiele ekranów, przełączanie między urządzeniami mobilnymi i przenośnymi). Telewizja na żywo nadal stanowi 90% światowych usług audiowizualnych w 2014 r., wzrastając o 4,2% w porównaniu z rokiem poprzednim; podczas gdy transmisja wideo OTT stanowi 4,4%, wzrastając o 37%. Większość ruchu audiowizualnego jest obecnie dostarczana przez sieci inne niż IMT, które zostaną przeniesione do sieci IMT. Innymi słowy, ruch w sieciach komórkowych będzie stale rósł w sposób wybuchowy ze względu na proliferację bogatych aplikacji wideo, zwiększoną rozdzielczość ekranu, komunikację M2M, mobilne usługi w chmurze itp. Zgodnie z szacunkami ITU-R [ITU-R M.2370, 2015] z 2015 r. globalny ruch mobilny osiągnie do 5016 EB1 miesięcznie w 2030 r. w porównaniu z 62 EB w 2020 r. Raport firmy Ericsson [Ericsson Report, 2020] ujawnia, że globalny ruch mobilny osiągnął 33 EB miesięcznie pod koniec 2019 r., co uzasadnia poprawność szacunków ITU-R. W ciągu ostatniej dekady liczba smartfonów i tabletów doświadczyła wykładniczego wzrostu ze względu na proliferację mobilnego szerokopasmowego dostępu do Internetu. Ten trend utrzyma się w latach dwudziestych XXI wieku, ponieważ penetracja smartfonów i tabletów jest nadal daleka od nasycenia, szczególnie w krajach rozwijających się. Tymczasem na rynku szybko pojawiają się nowe terminale użytkownika, takie jak elektronika noszona na ciele i okulary VR, które są przyjmowane przez konsumentów w niespotykanym dotąd tempie. W rezultacie oczekuje się, że całkowita liczba abonentów MBB na świecie osiągnie 17,1 miliarda do 2030 r., jak pokazano na rysunku .



Z drugiej strony, zapotrzebowanie na ruch na użytkownika MBB stale rośnie, oprócz rosnącej liczby użytkowników MBB. Wynika to głównie z popularności mobilnych usług wideo, takich jak YouTube, Netflix, a ostatnio także usługi krótkich filmów Tik-Tok, oraz stałej poprawy rozdzielczości ekranu na urządzeniach mobilnych. Ruch pochodzący z mobilnych usług wideo stanowi obecnie dwie trzecie całego ruchu mobilnego [Raport Ericssona, 2020] i szacuje się, że będzie bardziej dominujący w przyszłości. W niektórych krajach rozwiniętych silny wzrost ruchu przed 2025 r. będzie napędzany przez usługi bogatego wideo, a długoterminowa fala wzrostu będzie kontynuowana ze względu na penetrację rozszerzonej rzeczywistości (AR) i VRAPP. Średnie zużycie danych przez każdego użytkownika telefonu komórkowego miesięcznie, jak pokazano na rysunku, wzrośnie z około 5 GB w 2020 r. do ponad 250 GB w 2030 r. Oprócz komunikacji zorientowanej na człowieka, skala terminali M2M będzie rosła szybciej i zostanie nasycona nie wcześniej niż w 2030 r. Liczba subskrypcji M2M osiągnie 97 miliardów, czyli około 14 razy więcej niż w 2020 r. [ITU-R M.2370, 2015], stając się kolejną siłą napędową eksplozywnego wzrostu ruchu mobilnego.

Przykłady zastosowań

Wraz z pojawieniem się nowych technologii i ciągłą ewolucją istniejących technologii, np. holografii, robotyki, mikroelektroniki, nowej energii, fotoelektroniki, AI i technologii kosmicznej, w sieciach mobilnych można rozwijać wiele niespotykanych dotąd aplikacji. Aby wyraźnie podkreślić unikalne cechy i zdefiniować wymagania techniczne 6G, badacze ze społeczności bezprzewodowej próbowali przewidzieć przypadki użycia zakłócające:

Komunikacja typu holograficznego (HTC): W przeciwieństwie do tradycyjnych filmów 3D wykorzystujących paralaksę dwuoczną, prawdziwe hologramy mogą zaspokoić wszystkie wskazówki wizualne dotyczące obserwacji obiektów 3D gołym okiem w sposób możliwie najbardziej naturalny. Dzięki znacznemu postępowi technologii wyświetlania holograficznego w ostatnich latach, takiej jak HoloLens firmy Microsoft, przewiduje się, że jej zastosowanie stanie się rzeczywistością w ciągu następnej dekady. Zdalne renderowanie hologramów wysokiej rozdzielczości za pośrednictwem sieci komórkowej zapewni prawdziwie wciągające wrażenia. Na przykład holograficzna teleobecność pozwoli na wyświetlanie uczestników zdalnych jako hologramów w sali konferencyjnej lub umożliwi uczestnikom szkoleń lub edukacji online interakcję z ultrarealistycznymi obiektami. Jednak HTC wymaga ogromnych przepustowości rzędu terabitów na sekundę, nawet przy kompresji obrazu. Oprócz liczby klatek na sekundę, rozdzielczości i głębi kolorów w dwuwymiarowym (2D) wideo, jakość hologramu obejmuje również dane objętościowe, takie jak pochylenie, kąt i położenie. Jeśli obiekt jest reprezentowany za pomocą obrazów co $0,3^\circ$, hologram oparty na obrazie z polem widzenia 30° i pochyleniem 10° potrzebuje dwuwymiarowej tablicy 3300 oddzielnych obrazów. HTC wymaga również ultraniskiego opóźnienia dla prawdziwej immersji i wysokiej precyzji synchronizacji w ogromnych wiązkach powiązanych strumieni do rekonstrukcji hologramów. Rozszerzona rzeczywistość (ER): Łącząc rozszerzoną, wirtualną i mieszaną rzeczywistość, ER zaczyna wkraczać do praktycznych aplikacji w wieku 5G, ale wciąż jest w powijakach, analogicznie do usługi wideo na początku mobilnego Internetu. Aby osiągnąć ten sam poziom jakości obrazu, urządzenia ER z polem widzenia 360° potrzebują znacznie większej przepustowości danych w porównaniu do strumieniowego przesyłania wideo 2D. Aby uzyskać idealne wrażenia immersyjne, wymagana jest jakość wideo o wyższej rozdzielczości, wyższej liczbie klatek na sekundę, większej głębi kolorów i wysokim zakresie dynamiki, co prowadzi do zapotrzebowania na przepustowość ponad 1,6 Gb/s na urządzenie [Huawei VR Report, 2018]. Podobnie jak ruch wideo, który nasyca sieci 4G, proliferacja urządzeń ER będzie ograniczona przez ograniczoną przepustowość 5G ze szczytową szybkością 20 Gb/s, szczególnie na skraju komórki. Interaktywne aplikacje ER, takie jak gry immersyjne, zdalna chirurgia i zdalna manipulacja o znaczeniu

krytycznym, wymagają niskich opóźnień i wysokiej niezawodności, oprócz wysokiej przepustowości danych.

Internet dotykowy: zapewnia niezwykle niskie opóźnienie typu End-to-End (E2E), aby spełnić czas reakcji wynoszący 1 milisekundę (ms) lub mniej, osiągając limit ludzkiego zmysłu. W połączeniu z wysoką niezawodnością, wysoką dostępnością, wysokim bezpieczeństwem, a czasami wysoką przepustowością, pojawia się wiele zakłócających aplikacji w czasie rzeczywistym. Będzie odgrywać kluczową rolę w monitorowaniu w czasie rzeczywistym i zdalnym zarządzaniu przemysłowym dla Przemysłu 4.0 i inteligentnej sieci. Na przykład dzięki immersyjnym transmisjom audiowizualnym dostarczanych przez strumieniowanie ER lub HTC, wraz z danymi z czujników dotykowych, operator ludzki może zdalnie sterować maszynami w miejscu otoczonym zagrożeniami biologicznymi lub chemicznymi, a także zdalną chirurgią robotyczną wykonywaną przez lekarzy z odległości setek mil. Typowe sterowanie w pętli zamkniętej, zwłaszcza w przypadku urządzeń lub maszyn obracających się szybko, jest bardzo wrażliwe na czas, gdzie oczekuje się opóźnienia E2E poniżej 1 ms.

Doświadczenie wielozmysłowe: Człowiek ma pięć zmysłów (wzrok, słuch, dotyk, węch i smak), aby postrzegać otoczenie zewnętrzne, podczas gdy obecna komunikacja koncentruje się wyłącznie na mediach optycznych (tekst, obraz i wideo) i akustycznych (audio, głos i muzyka). Zaangażowanie zmysłów smaku i węchu może stworzyć w pełni immersyjne doświadczenie, które może przynieść pewne nowe usługi w przemyśle spożywczym i teksturalnym [ITU-T NET-2030, 2019]. Ponadto zastosowanie komunikacji dotykowej odegra ważniejszą rolę i podniesie szeroki zakres aplikacji, takich jak zdalna chirurgia, zdalne sterowanie i immersyjne gry. Jednak ten przypadek użycia wiąże się z rygorystycznym wymogiem niskiego opóźnienia.

Cyfrowy bliźniak : Cyfrowy bliźniak służy do tworzenia kompletnej i szczegółowej wirtualnej kopii fizycznego (czyli rzeczywistego) obiektu. Kopia oprogramowania jest wyposażona w szeroki zakres cech, informacji i właściwości związanych z oryginalnym obiektem. Taki bliźniak jest następnie używany do produkcji wielu kopii obiektu z pełną automatyzacją i inteligencją. Wczesne wdrożenia cyfrowego bliźniaka przyciągnęły znaczną uwagę wielu branż pionowych i producentów. Jednak oczekuje się, że jego pełne wdrożenie zostanie zrealizowane wraz z rozwojem sieci 6G.

Powszechna inteligencja: Wraz z rozprzestrzenianiem się mobilnych inteligentnych urządzeń i pojawieniem się nowego stylu połączonego sprzętu, takiego jak roboty, inteligentne samochody, drony i okulary VR, przewiduje się, że inteligentne usługi bezprzewodowe będą się rozwijać. Te inteligentne zadania opierają się głównie na tradycyjnych technologiach AI wymagających dużej mocy obliczeniowej: widzeniu komputerowym, jednoczesnej lokalizacji i mapowaniu (SLAM), rozpoznawaniu twarzy i mowy, przetwarzaniu języka naturalnego, sterowaniu ruchem, aby wymienić tylko kilka. Ponieważ urządzenia mobilne mają ograniczone zasoby obliczeniowe, pamięci masowej i łączności, sieci 6G będą oferować wszechobecną inteligencję w sposób AI-as-a-Service, wykorzystując rozproszone zasoby obliczeniowe w chmurze, na brzegu mobilnym i urządzeniach końcowych oraz rozwijając wydajne pod względem komunikacji mechanizmy uczenia maszynowego (ML) i zakłóceń. Na przykład humanoidalny robot, taki jak Atlas z Boston Dynamics, może odciążyć swoje obciążenie obliczeniowe dla SLAM w kierunku zasobów przetwarzania brzegowego, aby poprawić dokładność ruchu, wydłużyć żywotność baterii i stać się lżejszym poprzez usunięcie niektórych wbudowanych komponentów obliczeniowych. Oprócz zadań wymagających dużej mocy obliczeniowej, wszechobecna inteligencja ułatwia również zadania AI wrażliwe na czas, aby uniknąć ograniczeń opóźnienia przetwarzania w chmurze, gdy wymagane są szybkie decyzje lub reakcje na warunki.

Inteligentny transport i logistyka: W 2030 r. i później miliony autonomicznych pojazdów i dronów zapewniają bezpieczny, wydajny i ekologiczny ruch ludzi i towarów. Połączone autonomiczne pojazdy

mają rygorystyczne wymagania dotyczące niezawodności i opóźnień, aby zagwarantować bezpieczeństwo pasażerów i pieszych. Bezzałogowe statki powietrzne, zwłaszcza rój dronów, otwierają możliwości dla szerokiej gamy niespotykanych dotąd aplikacji, jednocześnie wprowadzając zaskakujące wymagania dla sieci mobilnych.

Ulepszona komunikacja pokładowa: Wraz z rozwojem gospodarki, sfera aktywności ludzi i częstotliwość ich przemieszczania się gwałtownie wzrosną w ciągu następnej dekady. Liczba pasażerów podróżujących samolotami komercyjnymi, helikopterami, pociągami dużych prędkości, statkami wycieczkowymi i innymi pojazdami będzie ogromna, co spowoduje gwałtowny wzrost zapotrzebowania na wysokiej jakości usługi komunikacyjne na pokładzie. Pomimo wysiłków podejmowanych w poprzednich generacjach do czasu 5G, niezaprzeczalnym jest, że łączność pokładowa jest daleka od zadowalającej w większości przypadków ze względu na wysoką mobilność, częste przełączanie, rzadki zasięg sieci naziemnych, ograniczoną przepustowość i wysoki koszt komunikacji satelitarnej. Opierając się na technologiach wielokrotnego użytku do wystrzeliwania w kosmos i masowej produkcji satelitów, wdrażanie wielkoskalowych konstelacji satelitarnych, takich jak Starlink firmy SpaceX, staje się rzeczywistością, umożliwiając opłacalne i wysokoprzepustowe globalne pokrycie. Należy o tym pamiętać, że 6G ma być zintegrowanym systemem sieci naziemnych, konstelacji satelitarnych i innych platform powietrznych, aby zapewnić bezproblemowe pokrycie 3D, które oferuje wysokiej jakości, tanie i globalne usługi komunikacyjne w roamingu.

Globalna wszechobecna łączność: Poprzednie generacje komunikacji mobilnej koncentrowały się głównie na gęsto zaludnionych obszarach metropolitalnych, głównie scenariuszach wewnętrznych. Jednak duża populacja w odległych, rozproszonych i wiejskich obszarach nie ma dostępu do podstawowych usług ICT, co pogłębia znaczną przepaść cyfrową wśród ludzi na całym świecie. Poza tym ponad 70% powierzchni Ziemi pokrywa woda, gdzie rozwój morskich aplikacji wymaga pokrycia siecią zarówno powierzchni wody, jak i pod wodą. Jednak wszechobecny zasięg na całej planecie z wystarczającą przepustowością, akceptowalną jakością usług (QoS) i przystępnym kosztem jest daleki od rzeczywistości. Z jednej strony, technicznie niemożliwe jest, aby sieci naziemne obejmowały odległe obszary i ekstremalne topografie, takie jak ocean, pustynia i obszary wysokogórskie. Jednocześnie oferowanie usług komunikacji naziemnej dla słabo zaludnionych obszarów jest zbyt kosztowne. Z drugiej strony satelity Geostationary Earth Orbit (GEO) są drogie w rozmieszczeniu, a ich pojemność jest obecnie ograniczona do kilku Gbps na satelitę, co jest przeznaczone wyłącznie dla użytkowników z wyższej półki, takich jak przemysł morski i lotniczy. Jak wspomniano wcześniej, rozmieszczenie dużej konstelacji satelitów Low Earth Orbit (LEO) umożliwi tanie i wysokoprzepustowe globalne usługi komunikacyjne. Przewiduje się, że system 6G wykorzysta synergii sieci naziemnych, konstelacji satelitów i innych platform powietrznych, aby zrealizować wszechobecną łączność dla globalnych użytkowników MBB i rozległych aplikacji IoT.

Scenariusze użytkowania

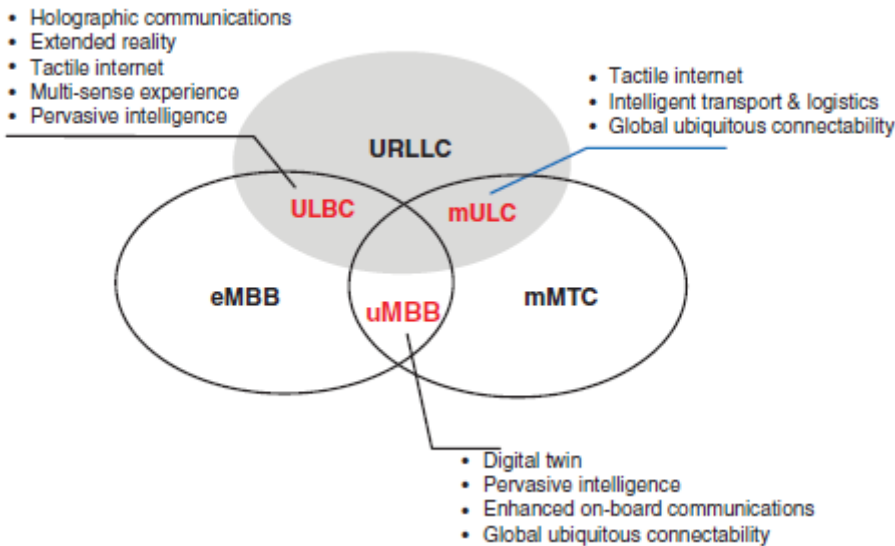
W lutym 2013 r. Grupa robocza ITU-R 5D zainicjowała dwa elementy badania w celu analizy wizji IMT na rok 2020 i przyszłych trendów technologicznych dla naziemnych systemów IMT, znanych jako IMT-2020. IMT-2020 miał spełniać bardziej zróżnicowane wymagania QoS wynikające z szerokiej gamy pionowych aplikacji i usług, z którymi nigdy nie zetknęli się abonenci telefonii komórkowej w poprzednich generacjach. Ponadto szeroka gama możliwości byłaby ściśle powiązana z tymi zamierzonymi różnymi scenariuszami użytkowania i aplikacjami. Część wyników badania została przeniesiona do zalecenia ITU-R M.2083 wydanego w 2015 r. [ITU-R M.2083, 2015], w którym najpierw zdefiniowano trzy scenariusze użytkowania:

- Ulepszony mobilny szerokopasmowy (eMBB): mobilny szerokopasmowy internet zajmuje się przypadkami użycia zorientowanymi na człowieka, dotyczącymi dostępu do treści multimedialnych, usług, chmury i danych. Wraz z rozprzestrzenianiem się inteligentnych urządzeń (smartfonów, tabletów i elektroniki noszonej) oraz rosnącym zapotrzebowaniem na strumieniowe przesyłanie wideo, zapotrzebowanie na mobilny szerokopasmowy internet stale rośnie, wyznaczając nowe wymagania dla tego, co ITU-R nazywa ulepszonym mobilnym szerokopasmowym internetem. Ten scenariusz użycia wiąże się z nowymi przypadkami użycia i wymaganiami dotyczącymi ulepszonych możliwości i coraz bardziej płynnego korzystania z usług. eMBB obejmuje różne przypadki, w tym zasięg rozległy i punkty dostępowe, które mają różne wymagania. W przypadku punktu dostępowego, tj. obszaru o dużej gęstości użytkowników, wymagana jest bardzo duża przepustowość ruchu, podczas gdy wymagania dotyczące mobilności są niskie, a szybkość transmisji danych użytkownika jest wyższa niż w przypadku zasięgu rozległego. Bezproblemowy zasięg i średnia do wysokiej mobilność są pożądane w przypadku zasięgu rozległego, ze znacznie ulepszoną szybkością transmisji danych niż istniejące szybkości transmisji danych. Jednak wymagania dotyczące szybkości transmisji danych mogą być złagodzone w porównaniu z punktami dostępowymi.

- Ultra-niezawodna komunikacja o niskim opóźnieniu (URLLC): Ten scenariusz ma na celu obsługę zarówno komunikacji zorientowanej na człowieka, jak i krytycznej komunikacji typu maszynowego. Jest to przełomowa promocja w stosunku do poprzednich generacji systemów komórkowych, które koncentrowały się wyłącznie na usługach dla abonentów mobilnych. Otwiera możliwość oferowania bezprzewodowych aplikacji o znaczeniu krytycznym, takich jak automatyczna jazda, komunikacja między pojazdami obejmująca bezpieczeństwo, bezprzewodowe sterowanie procesami produkcji przemysłowej lub produkcyjnej, zdalna chirurgia medyczna, automatyzacja dystrybucji w inteligentnej sieci i bezpieczeństwo transportu. Charakteryzuje się surowymi wymaganiami, takimi jak ultraniskie opóźnienie, ultraniezawodność i dostępność.

- Masowa komunikacja typu maszynowego (mMTC): Ten scenariusz obsługuje masową łączność z ogromną liczbą podłączonych urządzeń, które zazwyczaj mają bardzo rzadkie transmisje danych odpornych na opóźnienia. Takie urządzenia, np. zdalne czujniki, siłowniki i sprzęt monitorujący, muszą być tanie i mieć niskie zużycie energii, co pozwala na bardzo długą żywotność baterii do 10 lat ze względu na możliwość zdalnego wdrożenia IoT.

Można zauważyć, że te scenariusze użycia 5G nie mogą spełnić wymagań technicznych wyżej wymienionych przypadków użycia 6G. Na przykład użytkownik, który nosi lekkie okulary VR, aby grać w interaktywnie immersyjne gry, wymaga nie tylko ultrawysokiej przepustowości, ale także niskiego opóźnienia. Autonomiczne pojazdy na drodze lub latające drony potrzebują wszechobecnej łączności o wysokiej przepustowości, wysokiej niezawodności i niskim opóźnieniu. W społeczności bezprzewodowej przeprowadzono pewne dyskusje dotyczące potencjalnych scenariuszy użycia 6G. Na przykład Jiang i inni zastosowali holistyczną metodologię do zdefiniowania scenariuszy 6G poprzez rozszerzenie zakresu obecnych scenariuszy użycia, jak pokazano na rysunku.

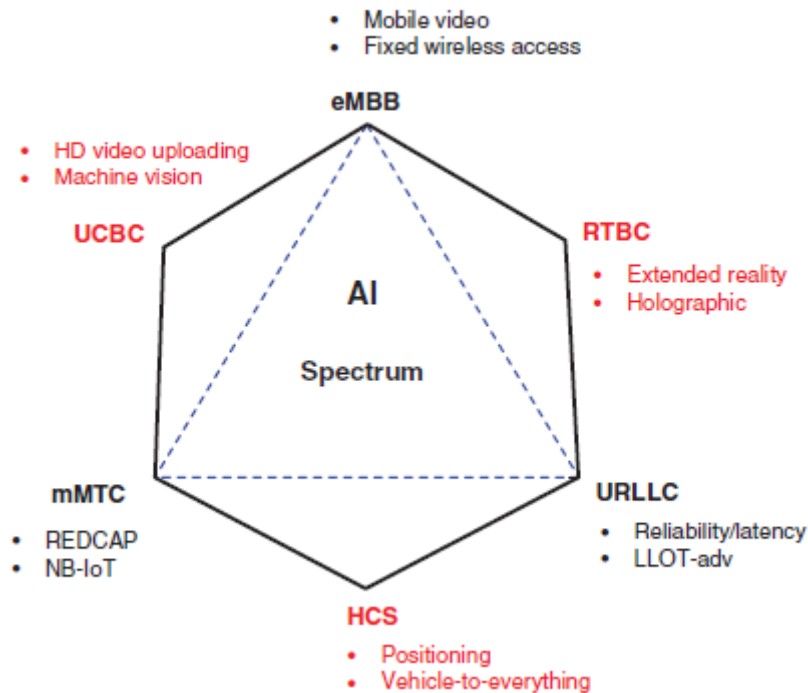


Proponuje się trzy nowe scenariusze, aby spełnić wymagania wyżej wymienionych przypadków użycia, które obejmują nakładające się obszary scenariuszy 5G, aby utworzyć kompletny zestaw.

- **Wszechobecny mobilny szerokopasmowy (uMBB):** Aby wspierać wysokiej jakości komunikację pokładową i globalną wszechobecną łączność, usługa MBB powinna być dostępna na całej powierzchni Ziemi w erze 6G, nazywana wszechobecnym MBB lub uMBB. Oprócz wszechobecności, innym ulepszeniem uMBB jest znaczący wzrost przepustowości sieci i szybkości transmisji dla punktów dostępowych, aby obsługiwać usługi zakłócające, np. grupa użytkowników noszących lekkie okulary VR zbierająca się w małym pomieszczeniu, w którym wymagana jest szybkość transmisji danych wynosząca kilka Gbps na użytkownika. Scenariusz uMBB będzie podstawą cyfrowego bliźniaka, wszechobecnej inteligencji, ulepszonej komunikacji pokładowej i globalnej wszechobecnej łączności, jak pokazano na rysunku. Oprócz kluczowych wskaźników efektywności (KPI), które są stosowane do oceny eMBB (takich jak szczytowa szybkość transmisji danych i szybkość transmisji danych odczuwana przez użytkownika), inne KPI stają się równie krytyczne jak inne w uMBB, tj. mobilność, zasięg i pozycjonowanie.
- **Ultraniezawodna komunikacja szerokopasmowa o niskim opóźnieniu (ULBC)** obsługuje aplikacje wymagające nie tylko URLLC, ale także ekstremalnie wysokiej przepustowości, np. wciągające gry oparte na HTC. Oczekuje się, że przypadki użycia HTC, ER, Internetu dotykowego, doświadczenia wielozmysłowego i wszechobecnej inteligencji skorzystają na tym scenariuszu.
- **Masywna, ultraniezawodna komunikacja o niskim opóźnieniu (mULC)** łączy cechy zarówno mMTC, jak i URLLC, co ułatwi wdrażanie masywnych czujników i siłowników w branżach pionowych. Wraz z eMBB, URLLC i mMTC trzy nowe scenariusze wypełniają luki pomiędzy nimi, a następnie tworzony jest kompletny zestaw scenariuszy użytkowania w celu obsługi wszystkich rodzajów przypadków użycia i aplikacji w sieci 6G, jak pokazano na rysunku.

Istnieją również inne definicje możliwych scenariuszy użytkowania. Na przykład Huawei ogłosił swoją wizję wykraczającą poza system 5G [HuaweiNetX2025, 2021], która może poprawić interakcje w czasie rzeczywistym dla poszczególnych użytkowników, zwiększyć możliwości komórkowego Internetu rzeczy i zbadać nowe scenariusze, w tym Uplink-Centric Broadband Communication (UCBC), Real-Time Broadband Communication (RTBC) i Harmonized Communication and Sensing (HCS), dla lepszego, inteligentnego świata. 5.5G ma na celu ewolucję od Internetu wszystkiego do inteligentnego Internetu wszystkiego i oczekuje się, że w rezultacie stworzy zupełnie nową wartość.

- UCBC przyspiesza inteligentną modernizację branż. UCBC zapewnia ultraszerokopasmowe doświadczenie łącza w górę.



Opierając się na możliwościach 5G, umożliwi 10-krotny wzrost przepustowości łącza w górę. Jest to idealne rozwiązanie dla producentów, którzy muszą przesyłać filmy w maszynowym widzeniu i masowym szerokopasmowym Internecie rzeczy, przyspieszając inteligentną modernizację. UCBC znacznie poprawia również wrażenia użytkownika telefonów komórkowych w pomieszczeniach wymagających intensywnego zasięgu. Dzięki agregacji wielopasmowego łącza w górę i technologiom masywnych anten łącza w górę, przepustowość łącza w górę i wrażenia użytkownika w tych scenariuszach mogą również ulec znacznej poprawie.

- RTBC zapewnia wciągające, realistyczne wrażenia. RTBC obsługuje dużą przepustowość i niskie opóźnienia komunikacyjne. Ma na celu zapewnienie 10-krotnego wzrostu przepustowości przy określonym opóźnieniu, tworząc w ten sposób wciągające wrażenia dla interakcji fizyczno-wirtualnych, takich jak XR Pro i hologramy. Wykorzystuje typowych operatorów do szybkiego rozszerzania możliwości sieciowych oraz mechanizm doświadczenia XR międzywarstwowego E2E do budowania możliwości interakcji w czasie rzeczywistym o dużej przepustowości.

- HCS jest zaprojektowany, aby umożliwić połączone samochody i połączone drony, scenariusze, w których autonomiczna jazda jest kluczowym wymogiem. HCS głównie umożliwia scenariusze V2X i bezałogowych statków powietrznych (UAV), które stawiają autonomiczną jazdę jako kluczowy wymóg. Scenariusze te wymagają bezprzewodowych sieci komórkowych z możliwościami komunikacji i percepcji. Na podstawie możliwości 5G, UCBC umożliwi pięciokrotny wzrost przepustowości łącza w górę. Jest to idealne rozwiązanie dla producentów, którzy muszą przesyłać filmy w maszynowym widzeniu i masowym szerokopasmowym IoT, przyspieszając ich inteligentną aktualizację.

- Nowy tryb użytkownika poniżej 100 GHz zmaksymalizuje wydajność widmową. Widmo jest najważniejszym zasobem w branży bezprzewodowej, a aby osiągnąć wizję branży, 5.5G potrzebuje

więcej widm w segmencie poniżej 100 GHz. Różne typy widm mają różne cechy. Na przykład, widmo symetryczne FDD charakteryzuje się niskim opóźnieniem, widmo TDD charakteryzuje się dużą przepustowością, a mmWave może osiągnąć ultra-dużą przepustowość i niskie opóźnienie. W tym kontekście jednym z głównych celów jest wykorzystanie pełnego potencjału widma. Nadzieją jest osiągnięcie maksymalnej wydajności widmowej poprzez przebudowę wykorzystania widma poniżej 100 GHz poprzez rozdzielenie łącza w górę i w dół oraz elastyczną agregację na żądanie we wszystkich pasmach częstotliwości.

- Inteligencja sprawi, że połączenia 5G będą inteligentniejsze. W erze 5G operatorzy muszą radzić sobie ze znacznie większą liczbą pasm częstotliwości i typów terminali, usług i klientów. Biorąc to pod uwagę, 5G wymaga inteligentnej penetracji z wielu perspektyw, aby rozwinąć sieć L4 High Autonomous Driving Network (High ADN) i L5 Full ADN.

Wymagania dotyczące wydajności

Aby dobrze obsługiwać przypadki użycia zakłócającego i aplikacje w 2030 r. i później, system 6G zapewni ekstremalne pojemności i wydajność. Podobnie jak minimalne wymagania dotyczące wydajności technicznej interfejsów radiowych IMT-2020, określone w ITU-R M.2410 [ITU-R M.2410, 2017], szereg ilościowych lub jakościowych wskaźników KPI jest wykorzystywanych do określania wymagań technicznych dla 6G. Większość wskaźników KPI stosowanych do oceny 5G jest nadal ważna dla 6G, podczas gdy niektóre nowe wskaźniki KPI zostaną wprowadzone do oceny nowych funkcji technologicznych, które są krótko przedstawione w następujący sposób:

- Maksymalna szybkość transmisji danych to najwyższa szybkość transmisji danych w idealnych warunkach, np. wszystkie możliwe do przypisania zasoby radiowe (z wyłączeniem zasobów radiowych do synchronizacji warstwy fizycznej, sygnałów odniesienia, pasm ochronnych i interwałów ochronnych) dla odpowiedniego kierunku łącza są wykorzystywane dla pojedynczej stacji mobilnej. Jest ona proporcjonalna do szerokości pasma kanału i szczytowej wydajności widmowej w tym paśmie. Wymaganie to jest definiowane w celu oceny w scenariuszach użytkowania eMBB. Tradycyjnie, jest to najbardziej symboliczny parametr różnicujący różne generacje systemów mobilnych. Napędzany zarówno zapotrzebowaniem użytkowników, jak i postępem technologicznym, takim jak komunikacja THz, oczekuje się, że osiągnie do 1 Tbps, czyli kilkadziesiąt razy więcej niż 5G, które ma szczytową szybkość 20 Gbps dla łącza w dół i 10 Gbps dla łącza w górę.

- Maksymalna wydajność widmowa jest ważnym wskaźnikiem KPI do pomiaru postępu technologii interfejsu powietrznego. Minimalne wymagania w IMT-2020 dotyczące szczytowej wydajności widmowej to 30 bps/Hz w łączu w dół i 15 bps/Hz w łączu w górę, zakładając konfigurację anteny umożliwiającą osiem strumieni przestrzennych w łączu w dół i cztery strumienie przestrzenne w łączu w górę. Na podstawie danych empirycznych oczekuje się, że zaawansowane technologie radiowe 6G o wyższym stopniu swobody przestrzennej mogłyby osiągnąć trzykrotnie wyższą wydajność widmową w porównaniu z systemem 5G.

- Szerokość pasma sygnału to maksymalna zagregowana szerokość pasma systemu. Szerokość pasma może być obsługiwana przez pojedyncze lub wiele nośników RF. System 5G musi obsługiwać minimalną szerokość pasma 100 MHz i do 1 GHz w pasmach wyższych częstotliwości powyżej 6 GHz. Aby osiągnąć szczytową szybkość transmisji Tbps, 6G musi obsługiwać szerokości pasma do 10 GHz w przypadku pracy w pasmach wyższych częstotliwości lub nawet wyższą szerokość pasma w komunikacji THz lub bezprzewodowej komunikacji optycznej (OWC). Podobnie jak 5G, będzie działać w skalowalnych pasmach, aby wspierać elastyczność widmową.

- Szybkość transmisji danych odczuwana przez użytkownika jest definiowana jako 5-ty percentyl (5%) funkcji dystrybucji skumulowanej (CDF) przepustowości użytkownika. Przepustowość użytkownika jest definiowana jako liczba poprawnie odebranych bitów w jednostkach danych usługi (SDU) dostarczonych do warstwy 3 w określonym okresie czasu w trybie aktywnym. Innymi słowy, użytkownik mobilny może uzyskać co najmniej tę szybkość transmisji danych w dowolnym czasie lub miejscu z prawdopodobieństwem 95%. Bardziej sensowne jest zmierzenie postrzeganej wydajności, zwłaszcza na skraju komórki, i odzwierciedlenie jakości projektu sieci, takiego jak gęstość lokalizacji, architektura i optymalizacja międzykomórkowa. W scenariuszu wdrożenia 5G w gęstym mieście, docelowa szybkość transmisji odczuwana przez użytkownika jest definiowana jako 100 Mb/s w łączu w dół i 50 Mb/s w łączu w górę. Oczekuje się, że 6G może oferować dziesięciokrotnie wyższe od oczekiwanych przez użytkownika szybkości transmisji, nawet do 1 Gb/s, a nawet więcej.

- 5-ty percentyl wydajności widmowej użytkownika jest definiowany jako 5-ty percentyl (5%) CDF znormalizowanej przepustowości użytkownika. Znormalizowana przepustowość użytkownika jest definiowana jako liczba poprawnie odebranych bitów w SDU dostarczonych do warstwy 3 w określonym okresie czasu podzielona przez przepustowość kanału. Przepustowość kanału w tym kontekście jest definiowana jako efektywna przepustowość pomnożona przez współczynnik ponownego wykorzystania częstotliwości, gdzie efektywna przepustowość jest odpowiednio znormalizowaną przepustowością roboczą, biorąc pod uwagę stosunek łącza w dół i łącza w górę. Oczekuje się, że ten KPI będzie promował dziesięciokrotnie więcej niż IMT-2020, co odpowiada poprawie szybkości transmisji danych odczuwanej przez użytkownika, jak podano w Tabeli :

Deployment environment	Downlink (bps/Hz)	Uplink (bps/Hz)
Indoor hotspot	3	2.1
Dense urban	2.25	1.5
Rural	1.2	0.45

- Średnia wydajność widmowa to łączna przepustowość wszystkich użytkowników mobilnych (liczba poprawnie odebranych bitów, tj. liczba bitów zawartych w SDU dostarczonych do Warstwy 3 w określonym okresie czasu) podzielona przez szerokość pasma kanału określonego pasma podzielona przez liczbę punktów transmisji i odbioru (TRxP). Oczekuje się, że średnia wydajność widmowa poprawi się dwa do trzech razy w porównaniu z IMT-2020, jak podano w Tabeli :

Deployment environment	Downlink (bps/Hz/TRxP)	Uplink (bps/Hz/TRxP)
Indoor hotspot	25	15
Dense urban	20	10
Rural	10	5

- Opóźnienie można podzielić na dwie kategorie: opóźnienie płaszczyzny użytkownika i opóźnienie płaszczyzny sterowania. Pierwsze to opóźnienie czasowe indukowane w sieci radiowej od wysłania pakietu u źródła do momentu jego odebrania przez miejsce docelowe, zakładając, że stacja mobilna jest w stanie aktywnym. Mówiąc konkretnie, jest ono definiowane jako jednokierunkowy czas potrzebny do pomyślnego dostarczenia małego pakietu warstwy aplikacji (np. ładunek 0-bajtowy z nagłówkiem IP) z punktu wejściowego protokołu radiowego warstwy 2/3 SDU do punktu wyjściowego protokołu radiowego warstwy 2/3 SDU interfejsu radiowego w łączu w dół lub łączu w górę w sieci dla

danej usługi w warunkach bez obciążenia. W 5G minimalne wymagania dotyczące opóźnień płaszczyzny użytkownika wynoszą 4 ms dla eMBB i 1 ms dla URLLC. Przewiduje się, że wartość ta zostanie dodatkowo zmniejszona do 100 μ s lub nawet 10 μ s. Opóźnienie płaszczyzny sterowania odnosi się do czasu przejścia ze stanu „najbardziej wydajnego pod względem zużycia baterii” (np. stanu bezczynności) do rozpoczęcia ciągłego transferu danych (np. stanu aktywnego). Minimalne opóźnienie płaszczyzny sterowania powinno wynosić 20 ms w 5G i oczekuje się, że zostanie również znacząco poprawione w 6G. Oprócz opóźnienia bezprzewodowego, opóźnienie w obie strony lub opóźnienie E2E jest bardziej znaczące, ale również skomplikowane ze względu na dużą liczbę zaangażowanych jednostek sieciowych. W 6G opóźnienie E2E można rozpatrywać jako całość.

- Mobilność oznacza maksymalną prędkość stacji mobilnej obsługiwanej przez sieć z zapewnieniem akceptowalnej jakości usług (QoS) i jakości usług (QoE). Aby wesprzeć scenariusz wdrożenia pociągów dużych prędkości, najwyższa mobilność obsługiwana przez 5G wynosi 500 km/h. Zdefiniowano różne klasy mobilności:

- Stacjonarna: 0 km/h

- Piesza: 0–10 km/h

- Pojazdowa: 10–120 km/h

- Pojazdowa o dużej prędkości: 120–500 km/h

W 6G maksymalna prędkość 1000 km/h jest celem, jeśli weźmie się pod uwagę systemy komercyjnych linii lotniczych.

- Gęstość połączeń to KPI stosowany w celu oceny w scenariuszu użytkownika mMTC. Biorąc pod uwagę ograniczoną liczbę zasobów radiowych, minimalna liczba urządzeń o zrelaksowanej jakości usług (QoS) na kilometr kwadratowy (km²) wynosi 106 w 5G, co przewiduje się, że zostanie dodatkowo ulepszone 10-krotnie do 107 na km².

- Efektywność energetyczna jest ważna dla realizacji opłacalnych sieci komórkowych i zmniejszenia całkowitej emisji dwutlenku węgla (CO₂) dla zielonych ICT, odgrywając kluczową rolę z punktu widzenia społeczno-ekonomicznego. Efektywność energetyczna sieci i urządzenia może być związana z obsługą następujących dwóch cech:

- (a) Efektywna transmisja danych w obciążonym przypadku;

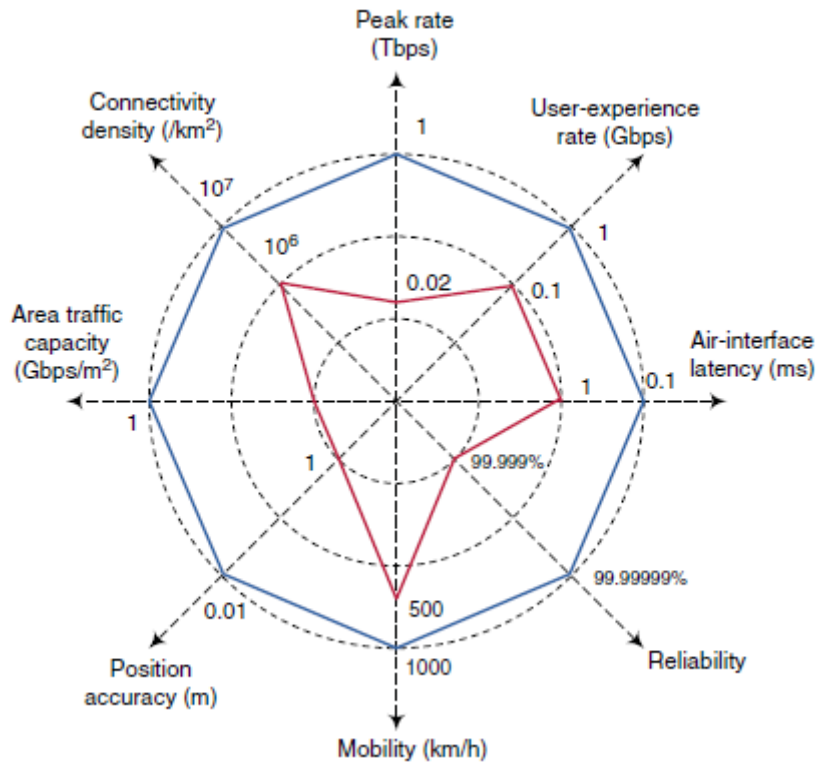
- (b) Niskie zużycie energii, gdy nie ma danych.

Sieć i urządzenia mobilne powinny mieć możliwość obsługi wysokiego współczynnika uśpienia i długiego czasu trwania uśpienia przy niskim zużyciu energii. Współczynnik uśpienia to ułamek niezajętych zasobów czasu (dla sieci) lub czasu uśpienia (dla urządzenia) w okresie czasu odpowiadającym cyklowi sygnalizacji sterującej (dla sieci) lub cyklowi nieciągłego odbioru (dla urządzenia), gdy nie ma transferu danych użytkownika. Ponadto czas trwania uśpienia, tj. ciągły okres czasu bez transmisji (dla sieci i urządzenia) i odbioru (dla urządzenia), powinien być wystarczająco długi. Po wczesnym wdrożeniu sieci 5G pojawiły się już pewne skargi na jej wysokie zużycie energii, chociaż efektywność energetyczna na bit została znacznie poprawiona w porównaniu z poprzednimi generacjami. W sieciach 6G ten wskaźnik KPI byłby 10–100 razy lepszy niż w sieci 5G, co pozwoliłoby na poprawę efektywności energetycznej na bit przy jednoczesnym zmniejszeniu ogólnego zużycia energii w branży mobilnej.

- Przepustowość obszaru to miara całkowitego ruchu mobilnego, jaki sieć może obsłużyć na jednostkę obszaru, odnosząca się do dostępnej przepustowości, wydajności widma i zagęszczenia sieci. Minimalne wymaganie dla sieci 5G to 10 Mb/s na metr kwadratowy (m^2), co w niektórych scenariuszach wdrożenia, takich jak wewnętrzne punkty dostępowe, powinno osiągnąć 1 Gb/s/ m^2 .
- Niezawodność odnosi się do zdolności do przesyłania określonej ilości ruchu w ustalonym czasie z dużym prawdopodobieństwem powodzenia. Wymaganie to jest definiowane w celu oceny w scenariuszu użycia URLLC. W sieciach 5G minimalne wymaganie dotyczące niezawodności jest mierzone prawdopodobieństwem powodzenia wynoszącym $1-10^{-5}$ przy przesyłaniu pakietu danych o rozmiarze 32 bajtów w ciągu 1 ms, biorąc pod uwagę jakość kanału krawędzi zasięgu w scenariuszu wdrożenia makrośrodowiska miejskiego. Oczekuje się, że w systemie nowej generacji nastąpi poprawa co najmniej o dwa rzędy wielkości, tj. $1-10^{-7}$ lub 99,999 99%.
- Dokładność pozycjonowania usługi pozycjonowania 5G jest lepsza niż 10 m. Wyższa dokładność pozycjonowania ma duże zapotrzebowanie w wielu pionowych i przemysłowych aplikacjach, szczególnie w środowisku wewnętrznym, którego nie można objąć satelitarnymi systemami pozycjonowania. Dzięki zastosowaniu stacji radiowej THz, która ma duży potencjał w zakresie pozycjonowania o wysokiej dokładności, oczekuje się, że dokładność obsługiwana przez sieci 6G osiągnie poziom centymetrów (cm).
- Pokrycie w definicji wymogu 5G koncentruje się głównie na otrzymanej jakości sygnału radiowego w obrębie pojedynczej stacji bazowej. Strata sprzężenia, która jest definiowana jako całkowita długoterminowa strata kanału na łączu między terminalem a stacją bazową i obejmuje zyski anteny, utratę ścieżki i zacienienie, jest wykorzystywana do pomiaru obszaru obsługiwanego przez stację bazową. W sieciach 6G znaczenie zasięgu powinno zostać znacznie rozszerzone, biorąc pod uwagę, że zasięg będzie globalnie wszechobecny i zostanie przeniesiony z 2D w sieciach naziemnych do 3D w zintegrowanym systemie naziemno-satelitaro-powietrznym.
- Bezpieczeństwo i prywatność są niezbędne do oceny, czy działanie sieci jest wystarczająco bezpieczne, aby chronić infrastrukturę, urządzenia, dane i aktywa. Główne zadania bezpieczeństwa sieci komórkowych to poufność, która zapobiega ujawnianiu poufnych informacji nieupoważnionym podmiotom, integralność gwarantująca, że informacje nie zostaną zmodyfikowane w sposób niezgodny z prawem, oraz uwierzytelnianie zapewniające, że komunikujące się strony są tymi, za których się podają. Z drugiej strony prywatność staje się wysokim priorytetem w celu rozwiązania rosnących obaw i przepisów dotyczących prywatności, takich jak ogólne rozporządzenie o ochronie danych (RODO) w Europie. Niektóre KPI można zastosować do ilościowego pomiaru bezpieczeństwa i prywatności, np. procent zagrożeń bezpieczeństwa zidentyfikowanych przez algorytmy identyfikacji zagrożeń, za pomocą których można ocenić skuteczność wykrywania anomalii.
- Wydatki kapitałowe i operacyjne (OPEX) są kluczowym czynnikiem pomiaru przystępności cenowej usług mobilnych, wpływającym w znacznym stopniu na sukces komercyjny systemu mobilnego. Wydatki operatora komórkowego można podzielić na dwa główne aspekty: wydatki kapitałowe (CAPEX), czyli koszty poniesione na budowę infrastruktury komunikacyjnej, oraz wydatki operacyjne (OPEX) wykorzystywane na konserwację i eksploatację.

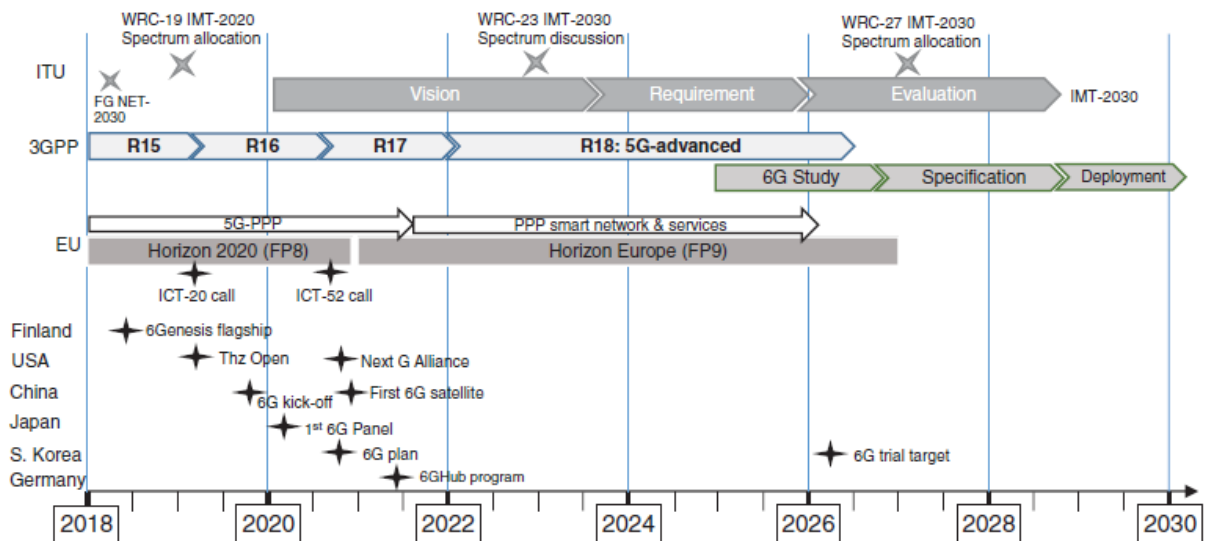
Ze względu na zagęszczenie sieci operatorzy komórkowi cierpią z powodu presji wysokich wydatków inwestycyjnych (CAPEX). Tymczasem rozwiązywanie problemów w sieciach komórkowych (awarie systemów, cyberataki i degradacja wydajności itp.) nadal nie może uniknąć operacji ręcznych. Operator komórkowy musi utrzymywać grupę operacyjną składającą się z dużej liczby administratorów sieci o wysokim poziomie wiedzy, co prowadzi do kosztownego OPEX, który jest obecnie trzykrotnie wyższy od CAPEX i stale rośnie. Podczas projektowania 6G wydatki będą kluczowym czynnikiem do

rozważenia. Aby zapewnić ilościowe porównanie wydajności między 5G i 6G, wizualizowano osiem reprezentatywnych wskaźników KPI, jak pokazano na rysunku.



Inicjatywy badawcze i plan działania

Chociaż w społeczności bezprzewodowej trwają dyskusje na temat tego, czy istnieje potrzeba 6G i czy liczenie generacji powinno zostać zatrzymane na 5, zainicjowano kilka pionierskich prac badawczych nad technologiami bezprzewodowymi nowej generacji. Ta sekcja przedstawia czytelnikom aktualny postęp w badaniach 6G prowadzonych przez reprezentatywne instytucje, tj. ITU i Third Generation Partnership Project (3GPP), główne kraje i firmy. Ponadto, możliwa mapa działania dotycząca definicji, specyfikacji, standaryzacji i regulacji jest przedstawiona na rysunku.



ITU

Jako wskaźnik nowego horyzontu dla przyszłego społeczeństwa cyfrowego i sieci, w lipcu 2018 r. powołano grupę fokusową ITU-T „Technologie dla sieci 2030” (FG NET-2030) [ITU-T NET-2030, 2019]. Jej celem jest zidentyfikowanie luk i wyzwań technologicznych w zakresie możliwości sieci na rok 2030 i kolejne lata, kiedy to oczekuje się spełnienia ekstremalnych wymagań dotyczących wydajności w celu obsługi przełomowych przypadków użycia, takich jak komunikacja typu holograficznego, Internet dotykowy, sieci wielozmysłowe i cyfrowy bliźniak. Chociaż koncentruje się ona głównie na sieciach komunikacji stacjonarnej, przyszła architektura sieci, wymagania, przypadki użycia i możliwości sieci zidentyfikowanych w tej grupie będą stanowić wytyczne dla definicji mobilnego systemu 6G. Ponadto sektor ITU-R opublikował niedawno zalecenie M.2150 zatytułowane „Szczegółowe specyfikacje interfejsów radiowych International Mobile Telecommunications (IMT)-2020”, które można uznać za sfinalizowanie specyfikacji 5G. Wraz z wielkim sukcesem osiągniętym przez ITU w zakresie ewolucji IMT-2000 (trzeciej generacji (3G)), IMT-Advanced (4G) i IMT-2020 (5G), podobny proces zostanie zastosowany ponownie w celu rozwoju IMT do roku 2030 i później. Zgodnie z procesem IMT, ITU-R rozpoczyna badanie wizji ITU w zakresie 6G jako pierwszego kroku, a następnie publikuje minimalne wymagania i kryteria oceny dla IMT do roku 2030 i później w połowie lat dwudziestych XXI wieku, a następnie przejdzie do zaproszenia do składania wniosków i fazy oceny. Na spotkaniu w lutym 2020 r. grupa robocza ITU-R 5D postanowiła rozpocząć badanie przyszłych trendów technologicznych [ITU-R WP5D, 2020] i planuje zakończyć to badanie na spotkaniu w czerwcu 2022 r. Zaprosiła organizacje wewnątrz i na zewnątrz ITU-R do dostarczenia danych wejściowych na spotkania w czerwcu i październiku 2021 r., co pomoże opracować pierwszy projekt „Trendów technologicznych przyszłości do 2030 r. i później”. ITU-R jest również odpowiedzialny za organizację światowej konferencji radiokomunikacyjnej (WRC), która reguluje przydział częstotliwości i odbywa się co trzy do czterech lat. Na przykład kwestia przydziału widma dla systemu 5G została zatwierdzona na WRC-19. Oczekuje się, że WRC prawdopodobnie zaplanowane na 2023 r. (WRC-23) omówi kwestie widma dla 6G, a przydział widma dla komunikacji 6G może zostać formalnie ustalony w 2027 r. (WRC-27).

Projekt partnerstwa trzeciej generacji

Na początku 2019 r. 3GPP zamroziło specyfikacje Release 15 jako początkową wersję standardów 5G. W lipcu 2020 r. ukończono kolejne wydanie (tj. Release 16) jako ulepszenie początkowych standardów 5G. Obecnie 3GPP określa bardziej zaawansowaną wersję (Release 17), która ma zostać ukończona w 2021 r. pomimo opóźnienia spowodowanego pandemią COVID-19. Napędzany przez wielu kluczowych interesariuszy z tradycyjnego przemysłu mobilnego, szerokiej gamy pionów i przemysłu pozaziemskiego, jest postrzegany jako najbardziej wszechstronne wydanie w historii 3GPP pod względem zawartości funkcji, w tym NR w sieciach pozaziemskich, NR poza 52,6 MHz, ulepszenie łącza bocznego NR, automatyzacja sieci itp. Ponadto 3GPP ogłosiło swoją ewolucję 5G w kierunku 5.5G z nową oficjalną nazwą 5G-Advanced, która zostanie ujednolicona w wydaniu 18 i późniejszych. Zgodnie z doświadczeniami zdobytymi w poprzednich generacjach, 6G będzie przełomowym systemem, który zostanie opracowany bez ograniczeń wstecznej kompatybilności. Równocześnie zatem oczekuje się, że 3GPP zainicjuje przedmiot badania dla 6G około roku 2025, po czym nastąpi faza specyfikacji, aby zagwarantować pierwsze komercyjne wdrożenie 6G do 2030 r.

Branża

W branży mobilnej prawdziwymi siłami napędowymi są dostawcy, operatorzy komórkowi i producenci urządzeń. Stąd punkty widzenia branży, zwłaszcza głównych dostawców, odgrywają ważną rolę w rozwoju nowej generacji. W styczniu 2020 r. NTT Docomo opublikowało swój dokument „5G Evolution and 6G”, a następnie innych głównych graczy.

Europa

Kładziemy nacisk na badania 6G w Europie, ponieważ ich programy są nie tylko najwcześniejsze na świecie, ale także najbardziej przejrzyste i otwarte, z bogatymi informacjami dostępnymi publicznie. W ciągu ostatniej dekady Europa z powodzeniem przeprowadziła badania i rozwój 5G w ramach partnerstwa publiczno-prywatnego w zakresie infrastruktury 5G (5G-PPP). Niektóre kluczowe koncepcje i technologie 5G, takie jak wirtualizacja funkcji sieciowych (NFV) i mobilne przetwarzanie brzegowe (MEC), znane również jako wielodostępne przetwarzanie brzegowe, zostały zaproponowane i znormalizowane przez Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych (ETSI). W kwietniu 2018 r. Uniwersytet w Oulu w Finlandii ogłosił pierwszy na świecie projekt badawczy 6G o nazwie 6G-Enabled Wireless Smart Society and Ecosystem (6Genesis) jako część flagowego programu Akademii Finlandii. Koncentruje się on na przełomowych badaniach 6G z czterema powiązаныmi ze sobą obszarami strategicznymi: łącznością bezprzewodową, przetwarzaniem rozproszonym, urządzeniami i technologią obwodów oraz usługami i aplikacjami. Po opublikowaniu pierwszej na świecie Białej Księgi 6G we wrześniu 2019 r. jako rezultatu pierwszego Szczytu 6G Wireless, opublikowano serię białych ksiąg obejmujących 12 konkretnych obszarów zainteresowań, takich jak ML, inteligencja brzegowa, lokalizacja, wykrywanie i bezpieczeństwo. W ramach ósmego Programu Ramowego (FP8) Badań i Rozwoju Technologicznego, znanego również jako Horyzont 2020, Komisja Europejska rozpoczęła badania wykraczające poza 5G poprzez zaproszenie ICT-20-2019 „5G Long Term Evolution”. Osiem pionierskich projektów zostało rozpoczętych na początku 2020 r. po konkurencyjnym procesie selekcji, w którym konsorcja składające się z dostawców, operatorów komórkowych, środowiska akademickiego, instytucji badawczych, małych firm i pionów złożyły łącznie 66 wysokiej jakości wniosków. Na początku 2021 r. ruszyła kolejna partia projektów badawczych skupiających się na 6G, sponsorowanych w ramach konkursu ICT-52-2020 „Inteligentna łączność poza 5G”. Po sukcesie programu Horizon2020 5G-PPP, badania i rozwój 6G w Europie będą kontynuowane w ramach nadchodzącego partnerstwa publiczno-prywatnego (PPP) „Inteligentna sieć i usługi” w ramach dziewiątego programu ramowego (FP9), zwanego również Horizon Europe. W lutym 2020 r. Komisja Europejska ogłosiła również przyspieszenie inwestycji w europejską „GigabitConnectivity”, w tym 5G i 6G, aby kształtować cyfrową przyszłość Europy [EU Gigabit Connectivity, 2020].

Stany Zjednoczone

W 2016 r. Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych Obrony USA (DARPA) wraz z firmami z branży półprzewodników i przemysłu obronnego, takimi jak Intel, Micron i Analog Devices, utworzyła wspólny uniwersytecki projekt mikroelektroniczny (JUMP) z sześcioma centrami badawczymi, aby zająć się istniejącymi i pojawiającymi się wyzwaniem w technologiach mikroelektronicznych. Centrum Konwergentnej Komunikacji i Wykrywania TeraHertz (ComSecTer) ma na celu opracowanie technologii dla przyszłej infrastruktury komórkowej. Federalna Komisja Łączności (FCC) ogłosiła w marcu 2019 r., że otwiera licencje eksperymentalne na wykorzystanie częstotliwości od 95 GHz do 3 THz dla 6G i więcej, wspierając testowanie komunikacji THz. W październiku 2020 r. ATIS uruchomiło „Next G Alliance” z członkami założycielami, w tym AT&T, T-Mobile, Verizon, Qualcomm, Ericsson, Nokia, Apple, Google, Facebook, Microsoft itp. Jest to inicjatywa branżowa, która ma na celu promowanie północnoamerykańskiego przywództwa w technologii mobilnej 6G w ciągu następnej dekady poprzez działania kierowane przez sektor prywatny. Z silnym naciskiem na komercjalizację technologii, jej ambicją jest objęcie całego cyklu życia badań i rozwoju 6G, produkcji, standaryzacji i gotowości rynkowej. Inna amerykańska firma, SpaceX, która słynie z rewolucyjnej innowacji w zakresie raket wielokrotnego użytku, ogłosiła projekt Starlink w 2015 r. Starlink to bardzo duża konstelacja satelitów komunikacyjnych LEO, której celem jest oferowanie wszechobecnych usług dostępu do Internetu na całej planecie. FCC zatwierdziła swój plan pierwszego etapu wystrzelenia 12 000 satelitów, a rozważany

jest kolejny wniosek o 30 000 dodatkowych satelitów. Od pierwszego startu w maju 2019 r. pomyślnie rozmieszczono ponad 1100 satelitów, co stanowi 19-krotność liczby startów w kosmos. W pierwszej połowie 2021 r. setki satelitów Starlink zostały rozmieszczone w kilkunastu startach, co pozwoliło na osiągnięcie poprzedniego planu rozmieszczania 120 satelitów miesięcznie w dwóch startach. W chwili pisania tego tekstu usługa Starlink oferowała usługi komercyjne przy użyciu ponad 1500 satelitów, a liczba abonentów przekroczyła 60 000. To przesada, gdy ktoś twierdzi, że Starlink zastąpi 5G lub że będzie to skrót od 6G, ale wpływ tak bardzo dużej konstelacji satelitów LEO na 6G powinien być poważnie brany pod uwagę w branży mobilnej.

Chiny

Już w 2018 r. grupa robocza 5G w Ministerstwie Przemysłu i Technologii Informacyjnych Chin rozpoczęła studium koncepcyjne potencjalnych technologii 6G, dzięki czemu Chiny stały się jednym z pierwszych krajów, które badały technologię 6G. W listopadzie 2019 r. Ministerstwo Nauki i Technologii Chin oficjalnie rozpoczęło prace badawczo-rozwojowe nad technologią 6G koordynowane przez ministerstwo wraz z pięcioma innymi ministerstwami lub instytucjami krajowymi. Grupa robocza ds. promocji z rządu odpowiada za zarządzanie i koordynację. Ponadto na tym wydarzeniu powołano ogólną grupę ekspertów składającą się z 37 ekspertów z uniwersytetów, instytutów badawczych i przemysłu. W listopadzie 2020 r. pomyślnie wystrzelono pierwszego eksperymentalnego satelitę 6G opracowanego przez Uniwersytet Nauki Elektronicznej i Technologii Chin. Jego zadaniem jest testowanie komunikacji z kosmosu przy użyciu widma terahercowego o wysokiej częstotliwości. Wiodąca chińska firma ICT, Huawei, poinformowała, że firma znajduje się obecnie na początkowym etapie badań nad 6G. Przedstawiono mapę drogową rozwoju 6G z głównymi kamieniami milowymi, w tym wizję 6G do około 2023 r., standaryzację do 2026 r., wdrożenie odpowiednich technologii do 2028 r. i wstępne wdrożenie komercyjne do 2030 r. W 2020 r. inny gigant sprzętu telekomunikacyjnego ZTE i jeden z trzech chińskich operatorów komórkowych China Unicom zainicjowali współpracę w zakresie innowacji technologicznych i standardów 6G. Niedawno pod przewodnictwem Huawei i China Mobile utworzono konsorcjum o nazwie 6G Alliance of Network AI (6GANA), skupiające się na integracji technologii AI z siecią komórkową w celu obsługi AI jako usługi (AlaaS) w systemie nowej generacji.

Japonia

Pod koniec 2017 r. japońskie Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Komunikacji powołało grupę roboczą w celu zbadania technologii bezprzewodowych nowej generacji. Ich ustalenia wskazują, że 6G powinno zapewnić prędkość transmisji co najmniej dziesięć razy szybszą niż 5G, niemal natychmiastowe połączenie i masowe połączenie 10 milionów urządzeń na kilometr kwadratowy. Na początku 2020 r. japoński rząd powołał specjalny panel, w którym znaleźli się przedstawiciele sektora prywatnego i środowiska akademickiego, aby omówić rozwój technologiczny, potencjalne przypadki użycia i politykę. Japonia podobno zamierza przeznaczyć około 2 miliardów dolarów na zachęcanie sektora prywatnego do badań i rozwoju technologii 6G.

Korea Południowa

Korea Południowa ogłosiła plan uruchomienia pierwszego testu 6G w 2026 r. i oczekuje się, że wyda około 169 milionów dolarów w ciągu pięciu lat na opracowanie kluczowych technologii 6G. Test ma na celu osiągnięcie szczytowej szybkości transmisji danych 1 Tbps i ekstremalnie niskiego opóźnienia, które jest dziesięć razy niższe niż w przypadku 5G. Rząd Korei Południowej będzie promował programy badawcze w sześciu kluczowych obszarach (hiperwydajność, hiperprzepustowość, hiperprecyzja, hiperprzestrzeń, hiperinteligencja i hiperzaufanie), aby zapobiegawczo zabezpieczyć technologię nowej generacji. Ponieważ technologia 5G firmy Huawei jest zakazana w Stanach Zjednoczonych, Australii i Wielkiej Brytanii, Samsung Electronics przyspiesza swoje globalne ambicje, aby stać się

głównym dostawcą usług telekomunikacyjnych. Samsung Research utworzył Next-Generation Communication Research Center na podstawie Standard Research Team firmy Samsung Research, który bada 6G, jako największy spośród jednostek Samsung Research. LG Electronics ogłosiło swoje ambicje, aby przewodzić globalnej standaryzacji 6G i tworzyć nowe możliwości biznesowe. W ramach kontynuacji uruchomiło 6G Research Center w styczniu 2019 r. oraz Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST).

Kluczowe technologie

Aby sprostać ekstremalnym wymaganiom wydajnościowym w przypadku przełomowych zastosowań i aplikacji, opracowano przełomowe technologie transmisji radiowej i sieciowania, a następnie zastosowano je do zbudowania systemu 6G. Do tej pory społeczność bezprzewodowa przedstawiła pewne poglądy na temat potencjalnych technologii za pośrednictwem publikacji naukowych, dokumentów informacyjnych, tematów projektów badawczych itp. Ta sekcja zapewnia czytelnikom pełny obraz potencjalnych czynników technologicznych 6G, które można podzielić na kilka grup:

- Nowe widmo składające się z komunikacji mmWave, THz i optycznej komunikacji bezprzewodowej
- Nowy interfejs powietrzny obejmujący masywne MIMO, inteligentną powierzchnię odbijającą i wielokrotny dostęp nowej generacji
- Nowe sieciowanie obejmujące otwartą sieć dostępu radiowego (RAN) i sieci pozaziemskie
- Nowy paradygmat wzmocniony przez konwergencję komunikacji, obliczeń i czujników, a także integrację z technologią sztucznej inteligencji.

Fala milimetrowa

Technologia mmWave została wprowadzona przez nowe radio 5G i uważa się, że pozostanie niezbędnym elementem przyszłych sieci 6G. W porównaniu ze starszymi technologiami RF działającymi poniżej 6 GHz, znacznie poszerza ona dostępną przepustowość o nowe częstotliwości nośne do 300 GHz. Jak wykazało twierdzenie Shannona, tak duża przepustowość zwiększy przepustowość kanału i zaspokoi nadchodzące pragnienie wyższych szybkości transmisji danych. Tymczasem krótsza długość fali prowadzi również do mniejszego rozmiaru anteny. W ten sposób nie tylko poprawia przenośność i poziom integracji urządzeń, ale także pozwala zwiększyć wymiary układów antenowych, a ponadto zawęzić wiązki, co jest korzystne dla określonych aplikacji, takich jak radary wykrywające i zabezpieczenia warstwy fizycznej. Ponadto absorpcja atmosferyczna i molekularna wykazuje bardzo zmienne charakterystyki przy różnych częstotliwościach w paśmie mmWave, co zapewnia potencjał dla różnych przypadków użycia. Z jednej strony, niskie tłumienie można zaobserwować w określonych pasmach, takich jak 35, 94, 140 i 220 GHz, co umożliwi transmisję na duże odległości przy tych częstotliwościach. Z drugiej strony, poważne straty propagacji występują w niektórych „szczytach tłumienia”, takich jak 60, 120 i 180 GHz, co może być korzystne dla sieci ukrytych krótkiego zasięgu z rygorystycznymi wymaganiami bezpieczeństwa. Korzyści technologii mmWave wiążą się z ceną odrębnych wyzwań technicznych. Przede wszystkim, szeroka szerokość pasma w paśmie mmWave i wysoka moc transmisji mogą prowadzić do poważnych nieliniowych zniekształceń sygnału, narzucając wyższe wymagania techniczne dla układów scalonych niż dla urządzeń RF. Tymczasem, ponieważ efektywny zasięg transmisji mmWave, szczególnie w paśmie 60 GHz, jest poważnie ograniczony przez absorpcję atmosferyczną i molekularną, kanały mmWave są powszechnie zdominowane przez ścieżkę Line-of-Sight (LOS). Staje się to poważną wadą, która jest dodatkowo wzmocniona przez słabą dyfrakcję przy tej krótkiej długości fali, co powoduje znaczne blokowanie w scenariuszach z gęstą obecnością przeszkód małej skali, takich jak pojazdy, piesi, a nawet ludzkie ciało. Wysoka strata propagacji i

zależność od LOS również znacznie zwiększają wrażliwość stanu kanału na mobilność, tj. wpływ zaniku jest znacznie bardziej znaczący niż w pasmach RF.

Komunikacja terahercowa

Pomimo obecnej obfitości w nadmiarowości widmowej, mmWave nie jest wystarczające, aby poradzić sobie ze wzrastającą tchórzostwem w zakresie przepustowości przez kolejną dekadę. Dlatego też, patrząc w przyszłość ery 6G, oczekuje się, że technologie bezprzewodowe działające na jeszcze wyższych częstotliwościach, takich jak pasma częstotliwości THz lub optyczne, odegrają zasadniczą rolę w RAN następnej generacji, zapewniając ogromne szerokości pasma. Podobnie jak mmWave, fale THz również cierpią na wysoką utratę ścieżki i dlatego w dużym stopniu polegają na antenach kierunkowych i kanałach LOS, zapewniając jednocześnie bardzo mały zasięg. Jednak gdy dostępne jest silne łącze LOS, wysoka częstotliwość zapewnia znacznie większą przepustowość niż jakikolwiek starszy system, umożliwiając jednocześnie zapewnienie ultrawysokiej wydajności w zakresie przepustowości, opóźnień i niezawodności. Ponadto, w porównaniu zarówno z systemami mmWave pracującymi na niższych częstotliwościach, jak i bezprzewodowymi systemami optycznymi pracującymi w wyższych pasmach częstotliwości, systemy komunikacji THz nie są tak wrażliwe na efekty atmosferyczne, co ułatwia zadania kształtowania wiązki i śledzenia wiązki. Kształtuje to komunikację THz w dobre rozwiązanie uzupełniające oprócz głównych technologii RF dla konkretnych przypadków użycia, takich jak komunikacja wewnętrzna i bezprzewodowa sieć szkieletowa; i konkurencyjną opcję dla przyszłych cyberfizycznych aplikacji z ekstremalnymi wymaganiami QoS. Ponadto wysoka częstotliwość pozwala również na mniejszy rozmiar anteny dla wyższego poziomu integracji. Zatem przewiduje się, że ponad 1000 anten może być wbudowanych w pojedynczą stację bazową THz (BS), aby zapewnić setki superwąskich wiązek jednocześnie i przewyższyć wysokie straty propagacyjne. Zatem obsługa ekstremalnej przepustowości ruchu i ogromnej łączności odblokowuje jej zastosowanie w ultramasywnej komunikacji typu maszynowego, takiej jak Internet-wszystkiego (IoE). Niemniej jednak, podczas gdy THz przewyższa mmWave pod wieloma względami, to również napotyka poważne wyzwania techniczne, zwłaszcza w aspekcie implementacji niezbędnych obwodów sprzętowych, w tym anten, wzmacniaczy i modulatorów. Przede wszystkim, było to najbardziej krytyczne wyzwanie dla praktycznego wdrożenia technologii THz, aby wydajnie modulować sygnały pasma podstawowego na takie nośne o wysokiej częstotliwości za pomocą układów scalonych.

Komunikacja bezprzewodowa optyczna

Komunikacja bezprzewodowa optyczna wskazuje na komunikację bezprzewodową, która wykorzystuje pasma częstotliwości podczerwieni (IR), światła widzialnego lub ultrafioletu (UV) jako medium transmisyjne. Jest to obiecująca technologia uzupełniająca dla tradycyjnej komunikacji bezprzewodowej działającej w pasmach RF. Pasma optyczne może zapewnić niemal nieograniczoną przepustowość bez zezwolenia regulatorów widma na całym świecie. Może być stosowane w celu realizacji szybkiego, taniego dostępu dzięki dostępności emiterów i detektorów optycznych. Ponieważ fale IR i UV mają podobne zachowanie jak światło widzialne, ryzyko bezpieczeństwa i zakłócenia można znacznie ograniczyć, a obawy dotyczące promieniowania radiowego dla zdrowia ludzi można wyeliminować. Oczekuje się, że będzie miało unikalne zalety w scenariuszach wdrożeniowych wrażliwych na zakłócenia elektromagnetyczne, takich jak komunikacja pojazdów w inteligentnych systemach transportowych, oświetlenie pasażerów samolotów i urządzenia medyczne. Pomimo swojej przewagi, OWC cierpi z powodu takich wad, jak szum światła otoczenia, straty atmosferyczne, nieliniowość diod elektroluminescencyjnych (LED), dyspersja wielościeżkowa i błędy wskazywania. Systemy OWC działające w paśmie światła widzialnego są powszechnie określane jako Visible Light Communications (VLC), które ostatnio przyciągnęły wiele uwagi zarówno ze strony środowiska akademickiego, jak i przemysłu. VLC działa w zakresie częstotliwości 400–800 THz. W odróżnieniu od

technologii RF w niższym zakresie THz, które wykorzystują anteny, VLC opiera się na źródłach oświetlenia – zwłaszcza diodach LED – oraz matrycach czujników obrazu lub fotodiod do implementacji transceiverów. Dzięki tym transceiverom można łatwo osiągnąć dużą przepustowość przy niskim zużyciu energii (100 mW dla 10–100 Mb/s) bez generowania zakłóceń elektromagnetycznych lub radiowych. Wysoka wydajność energetyczna, długa żywotność (do 10 lat) i niski koszt popularnych diod LED, oprócz nielicencjonowanego dostępu do widma, sprawiają, że VLC jest atrakcyjnym rozwiązaniem dla przypadków użycia wrażliwych na żywotność baterii i koszty dostępu, takich jak masowe IoT i bezprzewodowe sieci czujników (WSN). Co więcej, VLC wykazuje również lepszą wydajność propagacji niż technologie RF w niektórych scenariuszach pozaziemskich, takich jak przestrzeń kosmiczna i podwodna, co może być ważnym aspektem przyszłego ekosystemu 6G. Nazemna komunikacja typu punkt-punkt OWC, znana również jako komunikacja Free-Space Optical (FSO), odbywa się w paśmie bliskiej podczerwieni. Wykorzystując mocną, wysoko skoncentrowaną wiązkę laserową w nadajniku, system FSO może osiągnąć wysoką szybkość transmisji danych, tj. 10 Gb/s na długość fali, na duże odległości (do 10 000 km). W ten sposób oferuje on opłacalne rozwiązanie dla wąskiego gardła backhaul w sieciach naziemnych, umożliwia połączenia krzyżowe między platformami kosmicznymi, powietrznymi i naziemnymi oraz ułatwia łącza międzysatelitarne o dużej przepustowości dla powstającej konstelacji satelitów LEO. Ponadto, w wyniku ostatnich postępów w dziedzinie nadajników i detektorów optycznych w stanie stałym do komunikacji UV bez zasięgu (LOS) o szerokim zasięgu i wysokim poziomie bezpieczeństwa, obserwuje się także wzrost zainteresowania komunikacją w paśmie UV.

Massive MIMO

Massive Multiple-Input Multiple-output (Massive MIMO) zostało już zastosowane jako krytyczny komponent 5G NR. Dzięki dużej liczbie anten energia transmisji może skupić się z ekstremalną ostrością na niewielkim obszarze. Kierunkowość może przynieść znaczną poprawę wydajności widmowej i efektywności energetycznej. Massive MIMO jest opłacalne dzięki wykorzystaniu niedrogich, niskoprecyzyjnych komponentów RF, gdzie setki tanich wzmacniaczy mocy o mocy wyjściowej rzędu miliwatów mogą zastąpić drogie, wysoce liniowe wzmacniacze mocy stosowane w konwencjonalnych systemach. W przypadku niższych częstotliwości NR wykorzystuje umiarkowaną liczbę anten (do 64 anten nadawczych i odbiorczych po stronie stacji bazowej około 700 MHz). W przypadku wyższych częstotliwości można zastosować większą liczbę anten (NR obsługuje do 256 anten nadawczych i odbiorczych około 4 GHz) przy tym samym rozmiarze sprzętu, co zwiększa możliwości kształtowania wiązki i MU-MIMO. Ponieważ liczba sygnałów odniesienia jest proporcjonalna do liczby anten transmisyjnych, masywne MIMO musi działać w trybie TDD, wykorzystując wzajemność kanałów. Analogowe formowanie wiązki jest zazwyczaj pożądane dla jeszcze wyższych częstotliwości (w zakresie mmWave), ograniczając transmisję do jednego kierunku wiązki na jednostkę czasu i łańcuch radiowy. Oczekuje się, że masywne MIMO odegra również kluczową rolę w interfejsie lotniczym 6G, szczególnie w przypadku wdrażania wyższych pasm częstotliwości mmWave i pasm THz. Liczba elementów antenowych zostanie dodatkowo zwiększona do niezwykle dużej liczby, narzucając wyzwania techniczne na schematy wstępnego kodowania, algorytmy wykrywania, implementację RF, upośledzenia sprzętowe i zarządzanie zakłóceniami. Aby zapewnić sukces 6G, oczekuje się bardziej wydajnych widmowo, energooszczędnych i ekonomicznych schematów masywnego MIMO. Oprócz kolokowanego masywnego MIMO, rodzaj rozproszonego schematu masywnego MIMO, określanego jako bezkomórkowy masywny MIMO, ostatnio przyciągnął dużą uwagę zarówno ze strony środowiska akademickiego, jak i przemysłu. Nie ma komórek ani granic komórek. Duża liczba rozproszonych punktów dostępu (AP) obsługuje mniejszą liczbę użytkowników w tym samym zasobie czasowo-częstotliwościowym, oferując jednolity QoS dla wszystkich użytkowników w celu wyeliminowania problemu niedostatecznej obsługi na skraju komórki konwencjonalnych sieci komórkowych. Zbadano

różne aspekty bezkomórkowego massive MIMO, takie jak alokacja zasobów, kontrola mocy, przydział pilota, efektywność energetyczna, ograniczenie backhaul i skalowalność. Bezkomórkowe massive MIMO zapewnia obiecujące rozwiązanie do wdrażania prywatnych sieci dla przemysłowych aplikacji. Oczekuje się, że synergia między sieciami bezkomórkowymi i komórkowymi będzie siłą napędową dla sieci mobilnych nowej generacji.

Inteligentne powierzchnie odbijające

Choć uwalniają znaczną przepustowość w celu obsługi wysokiej przepustowości, wykorzystanie pasm wysokiej częstotliwości powyżej 6 GHz wprowadza również nowe wyzwania, takie jak większa strata propagacji, niższa dyfrakcja i poważne blokowanie. W zakresie częstotliwości mmWave, masywne MIMO okazało się skuteczne w realizacji aktywnego kształtowania wiązki w celu zapewnienia wysokiego wzmocnienia anteny w celu kompensacji utraty propagacji. Niemniej jednak, jego możliwości mogą być niewystarczające dla przyszłego nowego widma 6G. Spośród wszystkich potencjalnych rozwiązań w celu ulepszenia obecnych podejść do kształtowania wiązki, technologia inteligentnych powierzchni odbijających (IRS) jest powszechnie uważana za obiecującą dla sieci komórkowych 6G. Tak zwane IRS, znane również jako rekonfigurowalne inteligentne powierzchnie (RIS), są montowane przez kategorię programowalnych i rekonfigurowalnych arkuszy materiałów, które są zdolne do adaptacyjnej modyfikacji swoich właściwości odbijania fal radiowych. Po przymocowaniu do powierzchni środowiskowych, takich jak ściany, szkło i sufity, IRS umożliwia przekształcenie środowiska bezprzewodowego w inteligentne, rekonfigurowalne reflektory, znane jako Smart Radio Environment (SRE). W rezultacie tworzy rodzaj pasywnego kształtowania wiązki, który może znacznie poprawić wzmocnienie kanału przy niskich kosztach wdrożenia i niskim zużyciu energii w porównaniu z aktywnymi masywnymi układami anten MIMO. Co więcej, w przeciwieństwie do układów antenowych, które muszą być wystarczająco kompaktowe do integracji, SRE są wdrażane na powierzchniach o dużych rozmiarach, co ułatwia realizację dokładnego kształtowania wiązki za pomocą ultrawąskich wiązek. Ponadto, w przeciwieństwie do aktywnych układów antenowych mMIMO, które są wdrażane specjalnie dla każdej indywidualnej technologii dostępu radiowego (RAT), pasywny mechanizm odbicia, na którym polega IRS, działa niemal uniwersalnie dla wszystkich częstotliwości RF i optycznych, co jest szczególnie korzystne pod względem kosztów dla systemów 6G, które działają w ultraszerokim spektrum. Chociaż IRS wykazuje dużą konkurencyjność techniczną w kontekście nowego spektrum 6G, nadal brakuje mu dojrzałych technik dokładnego modelowania i szacowania kanałów i samej powierzchni, szczególnie w zakresie bliskiego pola. Co więcej, wdrożenie komercyjne jest możliwe dopiero po rozpatrzeniu obaw biznesowych, że IRS polega na zewnętrznych ocenach, takich jak budynki, które nie należą do operatorów komórkowych. Dlatego wymaga to przemyślanego projektu i standaryzacji ram zapewniających wirtualne interfejsy, umowy i protokoły sygnalizacyjne, tak aby operatorzy 6G mogli szeroko uzyskiwać dostęp i wykorzystywać obiekty wyposażone w IRS w domenach publicznych i prywatnych.

Wielodostęp nowej generacji

Zarówno LTE, jak i NR przyjęły OFDMA jako ortogonalną technikę wielodostępu, co jest typowym przykładem technologii OMA, które zabraniają temu samemu zasobowi fizycznemu obsługi wielu użytkowników jednocześnie. W porównaniu z CDMA wdrożonym w systemach 3G, OFDMA wykazuje wyraźną wyższość w zwalczaniu zaniku sygnału wielościeżkowego poprzez proste wyrównanie kanału. Ponadto, w połączeniu z MIMO, OFDMA jest w stanie przewyższyć CDMA pod względem wydajności widmowej w przytłaczający sposób. Niemniej jednak pełna wydajność MIMO-OFDM w dużym stopniu opiera się na wstępnym kodowaniu MIMO i mapowaniu zasobów, które muszą być precyzyjnie dostosowane do warunków kanału, aby osiągnąć optimum. Wraz ze wzrostem wymiaru MIMO, od maksymalnie 8×4 w LTE-A stopniowo do ponad 256×32 masywnego MIMO, ostatecznie do przyszłego

ultramasywnego MIMO (np. 1024×64), złożoność adaptacji MIMO-OFDM dramatycznie wzrasta. Tymczasem w odpowiedzi na zapotrzebowanie na większą mobilność, co oznacza wyższą dynamikę zanikania, ograniczenie opóźnienia obliczeniowego dla tej procedury adaptacji online staje się również bardziej rygorystyczne. Aby poradzić sobie z tymi pojawiającymi się wyzwaniami, zaproponowano nową architekturę transceiverów MIMO-OFDM sterowanych przez AI w kierunku przyszłych systemów 6G, która opiera się na technikach AI w celu wydajnego rozwiązania problemów wstępnego kodowania MIMO online i mapowania zasobów. W porównaniu z ortogonalnym dostępem wielokrotnym w większości tradycyjnych sieci komórkowych, nieortogonalny dostęp wielokrotny (NOMA) może oferować wyższą przepustowość systemu i gęstość połączeń, umożliwiając wielu użytkownikom współdzielenie tej samej jednostki zasobów radiowych. Jako szczególny przypadek techniki NOMA, Multi-User Superposed Transmission (MUST) została zbadana w LTE Release 13, skupiając się głównie na transmisji downlink. Grant-based NOMA, która zazwyczaj działa w stanie połączonym Radio Resource Control (RRC), została określona w Release 14 LTE w celu obsługi downlink eMBB. Przedmiotem badania NOMA w Release 16 była transmisja uplink bez grantu, która może zmniejszyć narzut sygnalizacji sterującej, opóźnienie transmisji i zużycie energii przez urządzenia. Ponieważ oczekuje się, że sieci beyond 5G i 6G będą obsługiwać masową łączność, NOMA odegra ważną rolę w sieciach nowej generacji. Ostatnie badania wykazały również, że NOMA można skutecznie wykorzystać w nowym spektrum, w tym w częstotliwościach mmWave, THz i optycznych. Ponadto, wdrożona razem z CoMP, NOMA okazała się przewyższać CoMP-OMA zarówno pod względem efektywności energetycznej, jak i wydajności widmowej. Ponieważ NOMA opiera się całkowicie na sukcesywnym usuwaniu zakłóceń, ma znacznie większą złożoność w konstrukcji odbiornika niż OMA, która zwiększa się wielomianowo lub nawet wykładniczo wraz z liczbą użytkowników. Zwłaszcza w niektórych scenariuszach wymagających kooperatywnego dekodowania w różnych UE, określone interfejsy D2D muszą być zarezerwowane dla tej funkcjonalności, a kwestie bezpieczeństwa/zaufania muszą być brane pod uwagę, aby umożliwić wdrożenie NOMA w 6G.

Otwarta sieć dostępu radiowego

Aby obsługiwać przypadki użycia zakłócającego, infrastruktura sieciowa ma być elastyczna, inteligentna i otwarta na sprzęt wielu dostawców i wielodostępność. W tym celu oprogramowanie, chmura obliczeniowa, wirtualizacja i segmentacja sieci zostaną dodatkowo dostosowane do sieci 6G. Ponadto nowy paradygmat sieciowy określany jako Otwarta sieć dostępu radiowego (O-RAN) niedawno wzbudził duże zainteresowanie zarówno w środowisku akademickim, jak i w przemyśle. Krytyczne koncepcje O-RAN, w tym jego wizja, architektura, interfejsy, technologie, cele i inne istotne aspekty, zostały wprowadzone przez sojusz O-RAN w białej księdze. Następnie sojusz O-RAN zbadał dalej przypadki użycia wykorzystujące architekturę O-RAN, aby zademonstrować jej możliwości w zachowaniu w czasie rzeczywistym. Głównym celem otwartości i inteligencji w architekturze RAN jest zbudowanie sieci radiowej, która jest zasobooszczędna, opłacalna, oparta na oprogramowaniu, wirtualizowana, świadoma podziału, scentralizowana, open source, open hardware, inteligentna, a zatem bardziej elastyczna i dynamiczna niż jakakolwiek poprzednia generacja sieci mobilnych. Aby to zrobić, społeczność badawcza wprowadziła wykorzystanie technik AI i ML na każdej pojedynczej warstwie architektury RAN, aby spełnić wymagania gęstej krawędzi sieci w systemach komunikacji mobilnej wykraczających poza 5G i 6G. Otwarcie RAN ze środowiska jednego dostawcy na znormalizowaną, otwartą, wielodostawczą i opartą na AI hierarchiczną strukturę umożliwia stronom trzecim i operatorom komórkowym wdrażanie innowacyjnych aplikacji i powstających usług, których nie można wdrożyć ani obsługiwać w starszych architekturach RAN. Ponadto O-RAN jest zbudowany na referencyjnej architekturze NFV Management and Orchestration (NFV-MANO) zaproponowanej przez ETSI, która wdraża komercyjne gotowe komponenty sprzętowe, techniki wirtualizacji i elementy oprogramowania. Maszyny wirtualne wyodrębnione (lub zwirtualizowane) z podstawowych zasobów

fizycznych są łatwo tworzone, wdrażane, konfigurowane i wycofywane z eksploatacji. Dlatego takie zwirtualizowane środowisko zapewnia elastyczność architekturze O-RAN i obniża CAPEX, OPEX i zużycie energii. Pomimo elastyczności i interoperacyjności, jakie oferuje O-RAN, ma również kilka kluczowych problemów, które wymagają dalszych wysiłków badawczych w celu jego pełnej realizacji w przyszłych sieciach mobilnych, w tym konwergencji technologii wielu dostawców na tej samej platformie, harmonizacji różnych ram zarządzania i orkiestracji oraz walidacji i rozwiązywania problemów z wydajnością związanych z siecią. Oczekuje się również, że badacze z przemysłu i środowiska akademickiego wezmą udział w analizie teoretycznej i praktycznych wdrożeniach tej technologii w kierunku otwartej i inteligentnej sieci RAN dla sieci mobilnych 6G, aby przewyższyć te wyzwania.

Sieci pozaziemskie

Starsze systemy komórkowe skupiały się na infrastrukturze naziemnej, co prowadziło do problemu zasięgu rozległego obszaru. Na obszarach morskich, oceanicznych i dzikich lądowych, których pokrycie przez sieci komórkowe naziemne jest niemożliwe lub ekonomicznie trudne, satelity są od dawna najpopularniejszym rozwiązaniem komunikacyjnym. Mając na celu lepszy współczynnik zasięgu, wdrażanie infrastruktury pozaziemskiej jako części sieci 6G jest traktowane jako nowy temat, znany jako Zintegrowana Sieć Kosmiczna i Naziemna (ISTN). Oczekuje się, że ISTN będzie składać się z trzech warstw:

- Warstwy naziemnej zbudowanej przez stacje bazowe naziemne
- Warstwy powietrznej obsługiwanej przez platformę High Altitude Platform (HAP) i UAV
- Warstwy kosmicznej wdrażanej przez konstelację satelitów

Sieci naziemne obejmują tylko niewielką część całej powierzchni Ziemi. Po pierwsze, technicznie niemożliwe jest zainstalowanie stacji bazowych naziemnych w celu zapewnienia zasięgu na dużą skalę w oceanie i na pustyni. Po drugie, trudno jest pokryć ekstremalne topografie, np. obszary wysokogórskie, doliny i klify, podczas gdy korzystanie z sieci naziemnej w celu świadczenia usług na obszarach słabo zaludnionych nie jest opłacalne. Po trzecie, sieci naziemne są narażone na klęski żywiołowe, takie jak trzęsienia ziemi, powodzie, huragany i tsunami, gdzie istnieje żywotne zapotrzebowanie na komunikację, ale infrastruktura jest zniszczona lub nie działa. Wraz z rozwojem działalności człowieka, np. pasażerów samolotów komercyjnych i statków wycieczkowych, zapotrzebowanie na usługi MBB na obszarach nieobjętych zasięgiem rośnie coraz bardziej. Ponadto zapotrzebowanie na łączność scenariuszy wdrażania IoT, takich jak monitorowanie dzikiego środowiska, morskie farmy wiatrowe i inteligentne sieci, wymaga powszechnego zasięgu na szerokim obszarze. Komunikacja satelitarna była najczęstszym rozwiązaniem zapewniającym szeroki zasięg, ale obecnie usługa komunikacji mobilnej oferowana przez satelity GEO jest kosztowna, ma niską przepustowość danych i duże opóźnienie ze względu na wysoki koszt wystrzelenia i szeroki zasięg (1/3 powierzchni Ziemi na satelitę GEO). Satelity na LEO mają pewne zalety w porównaniu z satelitami GEO w zakresie świadczenia usług komunikacyjnych. Satelita LEO działa na orbicie na ogół niższej niż 1000 km, co może znacznie obniżyć opóźnienie spowodowane propagacją sygnału w porównaniu z satelitą GEO na orbicie 36 000 km. Tymczasem strata propagacji LEO jest znacznie mniejsza, co ułatwia bezpośrednią łączność z urządzeniami mobilnymi i IoT, które są ściśle ograniczone przez zasilanie bateryjne. Ponadto stacjonarny terminal naziemny, taki jak urządzenie IoT zamontowane w pozycji monitorującej, może uciec z powodu przeszkody na linii wzroku z GEO. Wczesna próba wdrożenia globalnego satelitarnego systemu komunikacji mobilnej, tj. konstelacji Iridium, stała się komercyjnie dostępna w listopadzie 1998 r. Składa się ona z 66 satelitów LEO na wysokości około 781 km i zapewnia usługi telefonii komórkowej i transmisji danych na całej powierzchni Ziemi. Mimo że zawodzi z powodu

wysokich kosztów i braku zapotrzebowania, jest znaczącym przełomem technologicznym. Działa do dziś, a system Iridium drugiej generacji został pomyślnie wdrożony w 2019 r. W ostatnich latach firma high-tech SpaceX zyskuje wiele uwagi ze względu na rewolucyjny rozwój technologii startów kosmicznych. Jej rakiety wielokrotnego użytku, mianowicie Falcon 9, radykalnie obniżają koszty startów kosmicznych, otwierając możliwość wdrażania dużych infrastruktur kosmicznych. Patrząc w przyszłość globalnej wszechobecnej konwergencji dostępnej w dowolnym miejscu i czasie, zdecydowanie zaleca się integrację sieci satelitarnych z siecią 6G jako jej częścią.

Sztuczna inteligencja

Na liście technologii umożliwiających 6G, AI jest uznawana za najbardziej potencjalną. Ponieważ sieci komórkowe są coraz bardziej złożone i heterogeniczne, wiele zadań optymalizacyjnych staje się niewykonalnych, oferując okazję do zaawansowanych technik uczenia maszynowego. ML, zazwyczaj klasyfikowane jako uczenie nadzorowane, nienadzorowane i wzmacniające, jest uważane za obiecujące narzędzie oparte na danych, które zapewnia obliczeniową inteligencję radiową i sieciową od warstwy fizycznej do zarządzania siecią. Jako podgałąź uczenia maszynowego, głębokie uczenie może naśladować biologiczne układy nerwowe i automatycznie wyodrębniać cechy, rozszerzając się na wszystkie trzy wymienione paradygmaty uczenia. Posiada szeroką gamę aplikacji w komunikacji bezprzewodowej, gdzie można ją stosować do tworzenia bardziej adaptacyjnej transmisji (moc, prekoder, szybkość kodowania i konstelacja modulacji) w maszynym MIMO, umożliwia dokładniejsze szacowanie i przewidywanie zanikających kanałów, zapewnia bardziej wydajny projekt RF (wstępne zniekształcenie dla kompensacji wzmacniacza mocy, formowanie wiązki i redukcja współczynnika szczytu), dostarcza lepsze rozwiązanie do inteligentnego zarządzania siecią i oferuje bardziej wydajną orkiestrację dla MEC, podziału sieci i zarządzania zasobami wirtualnymi. Oprócz głębokiego uczenia się, kilka najnowocześniejszych technik ML reprezentowanych przez uczenie federacyjne i uczenie transferowe zaczyna wykazywać duży potencjał w komunikacji bezprzewodowej. Metody oparte na danych zawsze muszą uwzględniać kwestię prywatności danych, która ogranicza sposób przetwarzania zebranych danych. W niektórych scenariuszach dystrybucja danych jest surowo zabroniona i dozwolone jest tylko lokalne przetwarzanie na urządzeniu, na którym dane zostały zebrane. Uczenie federacyjne to metoda spełnienia tego wymogu poprzez lokalne przetwarzanie surowych danych i dystrybucję przetworzonych danych w formie zamaskowanej. Maskowanie jest zaprojektowane tak, że każde z indywidualnych przetwarzania danych nie ujawnia żadnych informacji, podczas gdy ich współpraca umożliwia foreigningowe dostosowania parametrów w kierunku uniwersalnego modelu. Podczas gdy uczenie federacyjne daje metodę szkolenia modeli ML z wielu źródeł danych bez ujawniania poufnych danych, tworzy tylko jeden współdzielony model do uniwersalnego zastosowania. Gdy indywidualne dostosowania modeli są wymagane do ich pomyślnego wdrożenia, transfer learning może być użyty do umożliwienia tych dostosowań i zrobienia tego w sposób wymagający znacznie mniejszej ilości danych. Poprzez ponowne wykorzystanie większej części wstępnie wyszkolonych modeli w innym środowisku i dostosowanie tylko niektórych parametrów, transfer learning jest w stanie zapewnić szybkie adaptacje przy użyciu tylko niewielkiej ilości danych lokalnych. Oprócz wykorzystania AI do pomocy w obsłudze sieci (tj. AI do tworzenia sieci), niezbędne jest również wykorzystanie wszechobecnego zasobów obliczeniowych, łączności i pamięci masowej w celu zapewnienia mobilnych usług AI użytkownikom końcowym w paradygmacie AI-as-a-Service (tj. Networking dla AI). Zasadniczo zapewnia to głębokie zasoby krawędziowe, aby umożliwić obliczenia oparte na AI dla terminali nowego typu, takich jak roboty, inteligentne samochody, drony i okulary VR, które wymagają dużej liczby zasobów obliczeniowych, ale są ograniczone przez wbudowane komponenty obliczeniowe i zasilanie. Takie zadania AI oznaczają głównie tradycyjne zadania AI intensywnie obliczeniowe, np. widzenie komputerowe, SLAM, rozpoznawanie mowy i twarzy, przetwarzanie języka naturalnego i sterowanie ruchem.

Konwergencja komunikacji, obliczeń i wykrywania

Sieci mobilne brzegowe zapewniają możliwości obliczeniowe i buforowania na brzegu sieci, dzięki czemu powszechne usługi obliczeniowe o niskim opóźnieniu, dużej przepustowości i świadomości lokalizacji stają się rzeczywistością. Wraz z rozprzestrzenianiem się Internetu rzeczy i Internetu dotykowego ogromna liczba czujników i siłowników jest podłączona do sieci mobilnych. Przewiduje się, że system nowej generacji stanie się gigantycznym komputerem, który połączy wszechobecną komunikację, obliczenia, przechowywanie, wykrywanie i kontrolę jako całość, aby zapewnić przełomowe aplikacje. Ze względu na ich wyższość w integracji i mobilności nad połączeniami przewodowymi, łączność bezprzewodowa jest stopniowo stosowana w nowoczesnych i przyszłych systemach sterowania w celu zamknięcia pętli sygnału, dając początek scenariuszowi użytkownika URLLC. Duch projektowania systemu, który stoi za tą koncepcją, podąża za tradycyjną metodologią niezależnego projektowania sterowania i komunikacji. Zaczyna się od zaprojektowania komponentu sterującego bez uwzględniania cech systemu komunikacyjnego, gdzie zostanie podniesiony zestaw wymagań komunikacyjnych dotyczących oczekiwanej wydajności sterowania. Następnie zaprojektowano system bezprzewodowy, którego celem jest osiągnięcie docelowej wydajności zaproponowanej na ostatnim etapie. Wymagania KPI URLLC, takie jak niezawodność 99,999% i 10 ms, zostały sformułowane dla ogólnego scenariusza sterowania w ten sposób. Niemniej jednak ostatnie badania ujawniły konieczność współprojektowania w pętli systemów komunikacji i sterowania ściśle powiązanych. Na przykład niezawodność pętli zamkniętej systemu sterowania została udowodniona jako wykładniczo malejąca wraz z erą informacji (Aol) w kanale sprzężenia zwrotnego. Tymczasem Aol w kanałach sterowania/sprzężenia zwrotnego, jako metryka komunikacji, jest wypukła w stosunku do szybkości przybycia poleceń sterujących i informacji zwrotnych, które odpowiadają szybkości próbkowania czujników i szybkości podejmowania decyzji w systemie sterowania. Wydajność systemów komunikacyjnych jest zatem ograniczona przez konstrukcję systemów wykrywania i sterowania. Podobne problemy należy również rozwiązać w chmurze obliczeniowej. Podczas gdy czasami zdarza się, że pewne zadanie obliczeniowe zajmuje serwer w chmurze przez długi czas, blokując wszystkie inne oczekujące zadania w kolejce oczekujących i powodując poważne przeciążenie, jego źródło mogło ponownie wydać to samo zadanie z bardziej aktualnym statusem, przez co poprzednie zadanie stało się nieaktualne i pozbawione użyteczności. Wyprzedzenie serwera, tj. zakończenie trwającego zadania przed jego zakończeniem, pomoże zmniejszyć starzenie się zadania i poprawić jakość usługi chmury obliczeniowej. Ponadto, dla zmniejszenia Aol kluczowe jest również zaplanowanie kolejności zadań obliczeniowych z wielu aplikacji, które mają zostać odciążone w chmurze. Jednak optymalnych decyzji o takim wyprzedzeniu i harmonogramowaniu nie można rozwiązać wyłącznie za pomocą serwera obliczeniowego ani systemu komunikacyjnego, ale można je osiągnąć tylko we współpracy między urządzeniami końcowymi, kontrolerem sieciowym i serwerem chmury obliczeniowej.

Wnioski

Ta część przedstawia kompleksową wizję sił napędowych, przypadków użycia, scenariuszy użycia, wymagań technicznych dotyczących wydajności, inicjatyw badawczych i technologicznych czynników umożliwiających rozwój mobilnego systemu szóstej generacji. Tradycyjna ewolucja nowej generacji co dekadę nie zakończy się na 5G, a pierwsza sieć 6G ma zostać wdrożona w 2030 r. lub nawet wcześniej. 6G umożliwi niespotykane dotąd przypadki użycia i aplikacje, których 5G nie jest w stanie obsłużyć, np. komunikację typu holograficznego, wszechobecną inteligencję i wszechobecny zasięg globalny, a także inne, których jeszcze nie jesteśmy w stanie sobie wyobrazić. System 6G musi spełniać niezwykle rygorystyczne wymagania dotyczące przepustowości, opóźnień, niezawodności, zasięgu, mobilności i bezpieczeństwa, które zostaną wdrożone poprzez przyjęcie wielu przełomowych technologii.

Potencjalne kluczowe technologie 6G prawdopodobnie obejmują fale milimetrowe, teraherce, bezprzewodową komunikację optyczną, masywne MIMO, inteligentne powierzchnie odbijające, wielodostęp nowej generacji, O-RAN, sieci pozaziemskie, sztuczną inteligencję i konwergencję komunikacji-komputerów-czujników. Reszta tej książki przedstawi szczegółowo niektóre z tych technologii. Skupimy się głównie na transmisji radiowej i przetwarzaniu sygnału w komunikacji bezprzewodowej nowej generacji.