

Historia standardów systemów komórkowych w kierunku 6G

Latem 1895 roku, kilka dekad po wynalezieniu telefonu przewodowego, Guglielmo Marconi pomyślnie zademonstrował wykonalność transmisji radiowej. Od tego czasu na całym świecie przyjęto szeroką gamę usług komunikacji radiowej i nadawania. Około pół wieku później, światowej sławy instytucja badawcza, Bell Labs, dokonała dwóch historycznych innowacji w tym samym roku 1947 – koncepcji tranzystora i komórki. Na początku lat 80., po dziesiętkach lat rozwoju technicznego, sieci komórkowe pierwszej generacji zostały w końcu wdrożone, aby zaoferować komercyjną usługę telefonii komórkowej dla społeczeństwa. Dzięki łatwości wdrażania, efektywności ekonomicznej, przenośności, elastyczności i skalowalności w porównaniu z sieciami przewodowymi, sieci komórkowe doświadczyły eksplozywnego wzrostu w ostatnich dekadach. Stały się jedną z krytycznych infrastruktur, które wzmocniły nowoczesne społeczeństwo i radykalnie zmieniły ludzkie zachowania w biznesie, edukacji, rozrywce i życiu osobistym. Ostatnio termin 5G pozostał jednym z najgorętszych haseł w mediach, przyciągając bezprecedensową uwagę opinii publicznej. Całe społeczeństwo jest zgodne co do tego, że system komórkowy piątej generacji (5G) jest jedną z największych innowacji w latach 20-tych i przyniesie ogromne korzyści ekonomiczne i społeczne. Liczba abonentów 5G na rynku konsumenckim lub w branżach pionowych osiągnęła już ogromną skalę w wielu regionach. Teraz uwaga środowiska akademickiego i przemysłu coraz bardziej przesuwa się w stronę następnej generacji. Od pierwszych eksperymentów z komunikacją radiową w latach 90. XIX wieku droga do najnowocześniejszej komunikacji mobilnej była dość długa. Aby dobrze zrozumieć złożone dzisiejsze systemy komórkowe, niezbędne jest uzyskanie pełnego obrazu tego, jak ewoluowały systemy komórkowe. W tym celu motywacją tej części w powiązaniu z następną jest zapewnienie czytelnikom krótkiego przeglądu całej historii mobilnych systemów komórkowych, od przedkomórkowego do piątej generacji. Następnie czytelnicy powinni być dobrze przygotowani do uzyskania wglądu w nadchodzący system szóstej generacji (6G). Ta część będzie zorganizowany chronologicznie pod względem generacji. Każda sekcja poświęcona jest jednej generacji systemów komórkowych, gdzie główna treść składa się zazwyczaj z trzech głównych części:

- Podstawowa motywacja ewolucji.
- Kamienie milowe rozwoju, standaryzacji i wdrożenia.
- Przegląd różnych konkurencyjnych standardów z ich głównymi cechami technicznymi.

0G: Systemy przedkomórkowe

Komunikacja bezprzewodowa była wykorzystywana już we wczesnej starożytności, kiedy ludzie próbowali przekazywać krytyczne wiadomości, takie jak inwazja wrogów, za pomocą dymu, pochodni, migających luster, flar sygnałowych lub flag semaforowych. Transmisja na duże odległości była realizowana poprzez przekazywanie sygnału przez sieć stacji obserwacyjnych zbudowanych na wieżach sygnalizacyjnych lub szczytach górskich. Te niemowlęce systemy komunikacyjne zostały zastąpione przez telegraf elektryczny (wynaleziony przez Samuela Morse'a w 1837 r.), który przesyłał wiadomości tekstowe przez linie stacjonarne, a później przez telefon przewodowy (wynaleziony przez Alexandra Grahama Bella w 1876 r.), przenoszący bogate w informacje sygnały głosowe. Latem 1895 r., kilka dekad po wynalezieniu telefonu, Guglielmo Marconi pomyślnie przeprowadził pierwszy eksperyment, aby zilustrować możliwości komunikacji radiowej. Od tego czasu szeroka gama usług radiowych, takich jak telegraf bezprzewodowy, telefonia komórkowa, nadawanie radiowe, nadawanie telewizyjne, komunikacja satelitarna, bezprzewodowe sieci lokalne i Bluetooth zostały przyjęte na całym świecie i radykalnie zmieniły nowoczesne społeczeństwo. Jako najbardziej udana forma technologii radiowych, komunikacja mobilna doświadczyła eksplozywnego wzrostu w ostatnich dekadach. Obecnie sieci komórkowe stanowią krytyczną infrastrukturę i podstawę mobilnego Internetu, który jest branżą

wartą biliony dolarów rocznie. Pierwszy system komórkowy powstał w przenośnym radiotelefonie znanym jako Walkie-Talkie podczas II wojny światowej, symbolizowanym przez SCR-536 opracowanym przez Motorolę dla armii USA. Ten przenośny radiowy transceiver działał w trybie push-to-talk, umożliwiając jednemu radiu nadawanie, podczas gdy inne w jego zasięgu słuchały (tj. działanie półdupleksowe). Był prymitywny, ale zdobył duże doświadczenie w późniejszym rozwoju przedkomórkowych systemów telefonii komórkowej. Jednym z najwcześniejszych systemów telefonii komórkowej był Mobile Telephone Service (MTS), który został podłączony do publicznej sieci telefonicznej jako rozszerzenie usług telefonii stacjonarnej i był komercyjnie obsługiwany w Stanach Zjednoczonych w 1946 roku przez Motorolę we współpracy z Bell System. 17 czerwca 1946 roku Bell System zademonstrował pierwszą na świecie rozmowę telefoniczną w mieście St. Louis za pomocą telefonu samochodowego ważącego około 36 kg. Początkowo tylko 3 kanały były dostępne dla wszystkich abonentów w obszarze metropolitalnym, ale później zwiększono je do 32 kanałów. W ciągu trzech lat usługa ta została rozszerzona na 100 miast w Stanach Zjednoczonych, przyciągając łącznie 5000 użytkowników. W 1964 roku wprowadzono ulepszony system o nazwie Improved Mobile Telephone Service (IMTS), aby zastąpić poprzedni system MTS. Osiągnął on dwa główne postępy: bezpośrednie wybieranie umożliwiające rozmowę telefoniczną bez ręcznego łączenia przez operatora oraz transmisję pełnodupleksową, dzięki której dwie komunikujące się strony mogą rozmawiać jednocześnie. Takie systemy przedkomórkowe były prekursorami pierwszej generacji sieci komórkowych, czasami nazywanej generacją zerową (0G). Te początkowe systemy wykorzystywały centralną stację transmisyjną do obsługi całego obszaru metropolitalnego. Stacja bazowa IMTS zazwyczaj obejmowała szeroki obszar o średnicy 60–100 kilometrów (km) przy użyciu mocy nadawczej 100 watów (100 W), w porównaniu z mocą mniejszą niż 1 W w nowoczesnych stacjach bazowych. Każda rozmowa głosowa zajmowała wyłącznie kanał radiowy, ale nawet duże miasto było licencjonowane tylko z kilkoma kanałami, co prowadziło do bardzo ograniczonej pojemności systemu. W latach 70., przed wdrożeniem sieci komórkowych, klient chcący zasubskrybować usługę telefonii komórkowej musiał czekać do trzech lat, aż obecny abonent zakończy swoją subskrypcję mobilną.

Sieć komórkowa

Ograniczenie pojemności sieci było głównym motorem napędowym bardziej eleganckiej konstrukcji sieci znanej jako system komórkowy.

W 1947 roku William R. Young, inżynier pracujący w AT&T Bell Labs, przedstawił swój pomysł na heksagonalny układ w każdym mieście, tak aby każdy telefon komórkowy mógł połączyć się z co najmniej jedną komórką. Douglas H. Ring, również pracujący w Bell Labs, rozwinął koncepcję Younga. Naszkicował podstawowy projekt standardowej sieci komórkowej i opublikował intelektualne podstawy jako notatkę techniczną zatytułowaną Mobile Telephony – Wide Area Coverage w wewnętrznym czasopiśmie Bell Labs 11 grudnia 1947 roku. W sieci komórkowej duży obszar można podzielić na małe obszary geograficzne zwane komórkami, z których każdy jest objęty stacją radiową. Umożliwiło to efektywne ponowne wykorzystanie cennych zasobów widmowych w przestrzennie oddzielonych miejscach, wykorzystując fakt, że moc przesyłanego sygnału dramatycznie zanika wraz z odległością. Niemniej jednak proces rozwoju systemu komórkowego od początkowej koncepcji do praktycznej sieci był dość długą podróżą ze względu na bariery technologiczne. AT&T zwróciło się do Federalnej Komisji Łączności (FCC) o licencję na spektrum dla usług komórkowych już w 1947 r., a projekt systemu został w większości ukończony w latach 60. XX wieku. Pierwsza sieć testowa składająca się z 10 komórek została ostatecznie zainstalowana do 1977 r., kiedy wiele z oryginalnych technologii było przestarzałych [Goldsmith, 2005]. Na podstawie tej sieci testowej Bell Labs opracowało pierwszy standard sieci komórkowej w Stanach Zjednoczonych zwany Advanced Mobile Phone System (AMPS)

, który został pomyślnie wdrożony w wielu krajach i płynnie ewoluował w standard komórkowy drugiej generacji znany jako IS-54 (gdzie IS oznacza Interim Standard).

1G: Narodziny sieci komórkowej

W grudniu 1979 r. japoński operator sieci Nippon Telegraph and Telephone (NTT) uruchomił pierwszy komercyjny system komórkowy na świecie. Początkowa sieć składała się z 88 komórek obejmujących wszystkie dzielnice metropolitalne w Tokio, a także obsługiwała przekazywanie międzykomórkowe. Działała w paśmie częstotliwości około 900 MHz i oferowała łącznie 600 par kanałów do obsługi duplexu z podziałem częstotliwości (FDD). Sygnał głosowy każdego użytkownika telefonu komórkowego był przesyłany kanałem analogowym o szerokości pasma 25 kHz. W ciągu pięciu lat sieć została rozszerzona, aby objąć całą populację Japonii, dzięki czemu stała się ona pierwszym krajem, który świadczył ogólnokrajową usługę komunikacji komórkowej. Jednak pierwszymi stacjami mobilnymi w sieci NTT były nadal telefony samochodowe, które musiały być montowane w samochodach i zostały po raz pierwszy skomercjalizowane w latach 40. XX wieku. Motorola zademonstrowała pierwszą na świecie rozmowę samochodową w październiku 1946 r., ale telefon był zbyt ciężki (oryginalny sprzęt ważył około 36 kg) i zużywał zbyt dużo energii. W 1985 r. NTT wypuściło telefony naramienne, które były nadal duże, ale przynajmniej mogły być swobodnie noszone przez człowieka. Utalentowany inżynier Martin Cooper poprowadził zespół Motoroli do opracowania pierwszego prototypu telefonu komórkowego i zademonstrował pierwszą rozmowę telefoniczną w New York City Hilton w Midtown Manhattan 3 kwietnia 1973 r. Dziesięć lat później Motorola wprowadziła swój historyczny produkt - DynaTAC 8000X - pierwszy komercyjny telefon komórkowy, który był lekki i wystarczająco mały, aby go nosić. Posiadanie telefonu komórkowego w tamtym czasie było symbolem zamożności i statusu społecznego, ponieważ na przykład Motorola DynaTAC 8000X kosztowała 3 995 USD w 1984 r., a dodatkowo miała wysoki koszt subskrypcji. Motorola odegrała wyjątkowo wpływową rolę we wczesnych dniach rozwoju telefonów komórkowych. Po kultowej serii DynaTAC 8000 firma wypuściła pierwszy na świecie telefon z klapką Motorola MicroTAC, a następnie pierwszy telefon z klapką Motorola StarTAC, który był nie tylko najmniejszym na świecie telefonem w tamtym czasie, ale także najlżejszym, ważącym ekstremalnie 105 g. Te wczesne dni były również świadkiem wzrostu Nokii, która stała się drugim co do wielkości producentem telefonów komórkowych na świecie dzięki wprowadzeniu na rynek serii Cityman, a następnie konstrukcji batonika Nokia 101 w przeciwieństwie do poprzednich „cegielek”. Podczas gdy Motorola rozwijała telefon komórkowy, Bell Labs opracowało system AMPS, który stał się pierwszym standardem sieci komórkowej w Stanach Zjednoczonych. W październiku 1983 r. Stany Zjednoczone ostatecznie uruchomiły swoją pierwszą komercyjną sieć komórkową przez Ameritech w Chicago. Chociaż było to później niż w innych regionach, usługa komórkowa w Stanach Zjednoczonych była oferowana za pośrednictwem telefonów komórkowych, a nie telefonów samochodowych. W Europie kraje skandynawskie były pionierami w opracowywaniu pierwszego europejskiego standardu komórkowego o nazwie Nordic Mobile Telephone (NMT). Pierwsza sieć NMT została wdrożona w krajach nordyckich: Norwegii i Szwecji w 1981 r., a następnie w Danii i Finlandii w kolejnym roku. Była to pierwsza sieć komórkowa, która mogła obsługiwać roaming międzynarodowy. W 1985 r. liczba abonentów wzrosła do 110 000 w Skandynawii i Finlandii, co uczyniło ją wówczas największą siecią komórkową na świecie. Początkowa sieć NMT działała w paśmie 450 MHz (stąd znana również jako NMT-450) i przyjęła szerokość pasma kanału 25 kHz. Dodatkowe pasma częstotliwości, tj. 890–915 MHz dla łącza w górę i 935–960 MHz dla łącza w dół, zostały przydzielone w 1986 r., a system działający w tych pasmach stał się znany jako NMT-900. Według Wikipedii, od 2021 r. ograniczona sieć NMT-450 nadal działa w niektórych odległych regionach Rosji, oferując podstawowe usługi komunikacyjne na słabo zaludnionych obszarach o dużych odległościach. Oprócz NMT kraje europejskie opracowały kilka różnych standardów komórkowych, w tym Total Access Communication System (TACS), po raz pierwszy wdrożony przez Wielką Brytanię w

1983 r., C-450 w Niemczech (1985 r.) i Radiocom 2000 we Francji (1986 r.). Jednak europejskie standardy pierwszej generacji były niekompatybilne ze względu na przyjęcie różnych pasm częstotliwości, interfejsów powietrznych i protokołów komunikacyjnych, co podsumowano w tabeli

Feature	AMPS	NMT	NTT	TACS	C-450	RC2000
Launch time	1983	1981	1979	1983	1985	1986
DL band (MHz)	869–894	463–468 ^{a)}	870–885 ^{b)}	935–960	460–465.74	424.8–428 ^{c)}
UL band (MHz)	824–849	453–458	925–940	890–915	450–455.74	414.8–418
Bandwidth (kHz)	30	25	25	25	10	12.5
No. of channel	832	180	600	1 000	573	256
Multiple access	FDMA					
Duplexing	FDD					
Modulation	FM					

Spśród wszystkich analogowych standardów pierwszej generacji NMT i AMPS są uważane za dwóch dobrych przedstawicieli, którzy odnieśli wówczas duży sukces, które pokrótce przedstawiono poniżej

Nordic Mobile Telephone (NMT)

Nordic Telecommunications Administrations opracował standard NMT, aby sprostać dużemu zapotrzebowaniu na usługi głosowe, którego nie mogły zaspokoić przepełnione wówczas sieci telefonii komórkowej: Auto Radio Phone (ARP) w Finlandii, Mobile Telephony System (MTD) w Szwecji i Danii oraz Public Land Mobile Telephony (OLT) Telefony w Norwegii. Główne technologie były gotowe w 1973 r., a specyfikacje stacji bazowych ukończono w 1977 r. W 1981 r. uruchomiono pierwszy system NMT w Norwegii i Szwecji, a w kolejnym roku w Danii i Finlandii. Korzystając z trybu pracy FDD, transmisja w górę została przypisana do pasma częstotliwości 453–458 MHz, a 463–468 MHz do łącza w dół. W 1986 r. przydzielono kolejną parę pasm częstotliwości, tj. 890–915 MHz i 935–960 MHz odpowiednio dla łącza w górę i łącza w dół. System wykorzystywał Frequency-Division Multiple Access (FDMA), aby sprostać potrzebom dużej liczby użytkowników mobilnych. W rezultacie widmo zostało podzielone na szereg kanałów wąskopasmowych o szerokości pasma 25 kHz. Kanały głosowe były analogowe, gdzie sygnały mowy były modulowane przez Frequency Modulation (FM). Niemniej jednak sygnalizacja kontrolna między stacją bazową a stacją mobilną była przesyłana cyfrowo, przy użyciu modulacji Fast Frequency-Shift Keying (FFSK) z szybkością do 1200 bps. Rozmiary komórek w sieci NMT wahały się od 2 do 30 km. Aby obsługiwać telefony samochodowe, system wykorzystywał moc transmisji do 15 W (NMT-450) i 6 W (NMT-900), podczas gdy moc była niższa (do 1 W) dla telefonów komórkowych. NMT był pierwszym systemem komórkowym z całkowicie automatycznym przełączaniem (wybieraniem) i od początku obsługiwał przekazywanie między komórkami. Był również pierwszym systemem komórkowym, który realizował roaming międzynarodowy. Specyfikacje NMT były bezpłatne i otwarte, co pozwoliło wielu firmom, takim jak Nokia i Ericsson, na produkcję sprzętu sieciowego i obniżenie kosztów wdrożenia.

Zaawansowany system telefonii komórkowej (AMPS)

AMPS został opracowany w Stanach Zjednoczonych głównie przez Bell Labs, zainspirowany mocno zatłoczonym systemem telefonii komórkowej. Powstał w koncepcji komórkowej zaproponowanej w 1947 r. i przeszedł długą drogę, aby stać się praktyczną siecią. Projekt systemu został prawie ukończony w latach 60., po czym przeprowadzono szeroko zakrojone testy (techniczne i komercyjne) w celu optymalizacji parametrów systemu i weryfikacji podstawowych zasad planowania układu

komórkowego. W 1978 r. Bell Labs utworzyło dużą i w pełni działającą sieć testową, współpracując z Illinois Bell Telephone Co., American Telephone and Telegraph Co. (AT&T) i Western Electric Co. Sieć testowa składała się z 10 komórek obejmujących obszar około 3 000 mil kwadratowych w obszarze Chicago, IL, mając na celu zapewnienie przepustowości dla ponad 2 000 użytkowników. Dopiero w 1983 roku wydano licencje na działalność komercyjną, kiedy FCC przydzieliła początkowe widmo 40 MHz (później zwiększone do 50 MHz) dla analogowych sieci komórkowych. Transmisja downlink i uplink zostały rozdzielone za pomocą FDD, gdzie przydzielono parę pasm częstotliwości 824–849 i 869–894 MHz. Widmo zostało podzielone na łącznie 416 sparowanych kanałów składających się z 21 kanałów sterujących i 395 kanałów głosowych. Sygnał mowy użytkownika mobilnego został dostrojony do częstotliwości nośnej za pomocą modulacji analogowej FM i przesłany kanałem 30 kHz. Chociaż AMPS był analogowym systemem komórkowym, jego kanały sterujące zostały już zdigitalizowane. Sygnalizacja kontrolna była wymieniana między stacją bazową a stacjami mobilnymi z szybkością transmisji danych 10 kbps. Dane były modulowane za pomocą Frequency-Shift Keying (FSK), a kodowanie Manchester było używane do korekcji błędów.

2G: Od analogowego do cyfrowego

Podobnie jak pierwsza generacja czegokolwiek, system komórkowy pierwszej generacji nie był nazywany 1G, dopóki termin 3G nie został przyjęty do nazwania systemu trzeciej generacji około 20 lat później. Chociaż 1G zapoczątkowało erę mobilnej komunikacji komórkowej, było uważane za prymitywne i wykazywało wiele niedociągnięć, takich jak:

- Gorsza jakość głosu
- Ograniczona pojemność systemu
- Brak ochrony bezpieczeństwa
- Ograniczony roaming międzynarodowy
- Niska niezawodność przekazywania
- Duże i drogie telefony
- Krótki czas pracy baterii

W związku z tym przemysł komórkowy zainicjował rozwój systemów cyfrowych drugiej generacji na początku lat 80. i stopniowo zastąpił systemy analogowe pierwszej generacji w latach 90. Cyfrowe standardy telefonii komórkowej tej generacji obejmowały Global System for Mobile (GSM) w Europie, Digital Advanced Mobile Phone System (D-AMPS) i IS-95 w Stanach Zjednoczonych oraz Personal Digital Cellular (PDC) w Japonii.

Digitalizacja

Przejście z systemu komórkowego pierwszej generacji do drugiej generacji było napędzane przez technologię cyfrową. System cyfrowy może osiągnąć większą przepustowość niż system analogowy, ponieważ komunikacja cyfrowa może stosować bardziej efektywną widmowo modulację cyfrową i bardziej wydajne techniki dostępu wielokrotnego. Digitalizacja ułatwia kompresję sygnałów głosowych, szyfrowanie informacji przed podsłuchem i obsługę usług danych. Ponadto komponenty cyfrowe są wydajniejsze, lżejsze, mniejsze, tańsze i bardziej energooszczędne niż komponenty analogowe.

Globalny System Komunikacji Mobilnej (GSM)

Niezgodność różnych europejskich systemów utrudniała podróżnym z krajów europejskich korzystanie z ciągłej usługi komunikacyjnej za pomocą jednego telefonu analogowego. Zmotywowało to konieczność wprowadzenia jednolitego europejskiego standardu i jednolitego przydziału częstotliwości w całej Europie. Już w 1982 r. Konferencja Europejskiej Poczty i Telekomunikacji (CEPT) powołała grupę roboczą o nazwie Globalny System dla Telefonii Mobilnej (pierwotne znaczenie GSM) w celu koordynacji prac rozwojowych. W latach 1982–1985 w grupie GSM prowadzono dyskusje na temat wyboru między systemem analogowym a cyfrowym. Po licznych próbach terenowych podjęto decyzję o opracowaniu cyfrowego systemu komórkowego opartego na wąskopasmowym dostępie z podziałem czasu (TDMA). Określono wymagania dla tego paneuropejskiego systemu, takie jak dobra subiektywna jakość głosu, niskie koszty terminala i usługi oraz roaming międzynarodowy. W 1988 r. CEPT utworzył Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych (ETSI), a następnie odpowiedzialność za określenie standardu została przeniesiona na ETSI. W 1990 r. opublikowano zalecenia fazy I dla Globalnego Systemu Komunikacji Mobilnej (GSM). W międzyczasie wariant GSM działający w wyższym paśmie częstotliwości, znany jako Digital Cellular System at 1800MHz (DCS-1800), został znormalizowany w ramach ETSI i zatwierdzony w lutym 1991 r. Oprócz podstawowej usługi głosowej terminale GSM mogą łączyć się z Integrated Services Digital Network (ISDN) w celu korzystania z różnych usług danych z szybkością 9,6 kbps. Komercyjna eksploatacja pierwszej sieci GSM rozpoczęła się w Finlandii. 1 lipca 1991 r. fiński premier Harri Holkeri wykonał pierwsze na świecie połączenie GSM w sieci komórkowej Radiolinja zbudowanej przy użyciu sprzętu firm Nokia i Siemens. Od tego czasu GSM szybko zyskał akceptację i stał się dominującym cyfrowym standardem komórkowym 2G [Vriendt i in., 2002]. Osiągnął niezwykły sukces komercyjny, osiągając globalny udział w rynku przekraczający 90%. Na początku 2004 roku ponad 1 miliard ludzi w ponad 200 krajach i terytoriach korzystało z usług telefonii komórkowej dzięki GSM.

Cyfrowy zaawansowany system telefonii komórkowej (D-AMPS)

Ze względu na ekonomię skali, standard AMPS osiągnął stosunkowo lepszą pozycję nad sporadycznymi i konkurencyjnymi standardami europejskimi w erze 1G. Niemniej jednak Stany Zjednoczone nie kontynuowały tego samego sukcesu w drugiej rundzie. Rozwój cyfrowej telefonii komórkowej drugiej generacji wpadł w burzliwą debatę na temat wyboru technik współdzielenia widma między TDMA a Code-Division Multiple Access (CDMA). Rezultatem tej debaty były dwa niekompatybilne systemy: IS-54 (i jego ewolucja znana jako IS-136) kontra IS-95. IS-54 i IS-136 stanowiły D-AMPS, który był cyfrowym postępowaniem istniejących systemów AMPS w Stanach Zjednoczonych. D-AMPS odziedziczył podstawową architekturę i protokoły sygnalizacyjne po swoim poprzedniku, umożliwiając płynne przejście z analogowego na cyfrowy. Sieć D-AMPS została wdrożona w tych samych pasmach częstotliwości co AMPS, tj. 869–894 MHz dla łącza w dół i 824–849 MHz dla łącza w górę. Jednak każdy kanał 30 kHz został dodatkowo podzielony na trzy przedziały czasowe przy użyciu TDMA. Pojemność została potrojona poprzez multipleksowanie skompresowanych sygnałów głosowych od trzech użytkowników przez pojedynczy kanał analogowy. Specyfikacja IS-54 została ukończona w 1992 r. i była wdrożona w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie od czasu jej pierwszego komercyjnego wprowadzenia na rynek w 1993 r. Z czasem została udoskonalona, a te ulepszenia przekształciły się w standard IS-136. IS-136 wprowadził kilka nowych funkcji do oryginalnego standardu IS-54, w tym dane komutowane obwodami, wiadomości tekstowe i obsługę pracy w częstotliwości 1900 MHz. IS-136 otworzył możliwość całkowicie cyfrowego systemu TDMA zamiast pracy w trybie podwójnym przyjętej przez jego poprzednika.

Interim Standard 95 (IS-95)

CDMA ma pewne unikalne zalety techniczne w porównaniu z TDMA dla systemów komórkowych, np. większą przepustowość systemu i proste planowanie częstotliwości dzięki uniwersalnemu ponownemu wykorzystaniu częstotliwości, wysoką jakość usług podczas miękkiego przełączania, brak sztywnego limitu liczby użytkowników (miękką przepustowość), możliwość wykorzystania aktywności głosowej do automatycznej redukcji zagregowanych zakłóceń oraz zwiększoną odporność przy użyciu sygnałów rozproszonego widma przypominających szum. Qualcomm opracował pierwszy system komórkowy oparty na CDMA, a początkowe specyfikacje systemu zostały sfinalizowane w 1993 r. Telecommunications Industry Association (TIA) i Electronic Industries Alliance (EIA) ze Stanów Zjednoczonych zatwierdziły go jako standard cyfrowy w 1995 r., stąd nazwa IS-95 lub IS-95A. W październiku 1995 r. Hutchison Telephone uruchomił pierwszą na świecie komercyjną sieć komórkową CDMA w Hongkongu pod nazwą cdmaOne. W przeciwieństwie do poprzednich wąskopasmowych mobilnych systemów komunikacyjnych, był to szerokopasmowy system, który rozprzestrzeniał bity informacji na szerokości pasma sygnału 1,25 MHz, wykorzystując technikę rozpraszania widma sekwencyjnego bezpośredniego. System CDMA wymagał skomplikowanych interfejsów powietrznych i protokołów komunikacyjnych, np. odbiornik Rake został przyjęty w celu złagodzenia efektu transmisji wielościżkowej. Ze względu na zakłócenia wielu użytkowników i zakłócenia międzykomórkowe, wydajność systemu w dużym stopniu zależała od dokładnej kontroli mocy, szczególnie w łączu w górę, w celu skompensowania efektu blisko-daleko. Bit kontroli mocy był przesyłany 800 razy na sekundę w łączu do przodu, aby poinstruować stację mobilną o konieczności dostosowania mocy nadawania z dokładnością 1 dB. Ulepszoną wersją był IS-95B, zwany także 2.5G technologii CDMA, który łączył standardy IS-95, ANSI-J-STD-008 i TSB-74. Standaryzacja IS-95B została ukończona w 1997 r., a pierwsza na świecie komercyjna sieć IS-95B została uruchomiona przez południowokoreańskiego operatora w 1998 r. Zapewniała ona wyższą szybkość transmisji danych poprzez agregację kodu, gdzie stacja bazowa może przypisać do ośmiu kanałów kodowych do jednej stacji mobilnej, zwiększając osiągalną szybkość z 11,4 kbps w IS-95A do 115 kbps. Na początku lat 90. XX w. toczyły się liczne debaty na temat względnych zalet standardów IS-54 i IS-95, twierdząc, że IS-95 może osiągnąć 20-krotnie większą przepustowość niż AMPS, podczas gdy IS-54 może osiągnąć tylko trzykrotnie większą przepustowość. Ostatecznie okazało się, że oba systemy osiągnęły mniej więcej taki sam wzrost przepustowości w porównaniu z AMPS.

Personal Digital Cellular (PDC)

Japonia niezależnie opracowała swój cyfrowy standard komórkowy znany jako PDC, wdrożony wyłącznie w Japonii. Podobnie jak D-AMPS i GSM, PDC przyjęła TDMA jako technikę wielokrotnego dostępu. Aby być kompatybilnym z japońskimi systemami analogowymi, wybrała szerokość pasma sygnału 25 kHz dla kanałów głosowych. Każdy kanał został podzielony na trzy przedziały czasowe dla kodeków głosowych o pełnej szybkości (11,2 kbps) lub sześć przedziałów czasowych dla kodeków głosowych o połowie szybkości (5,6 kbps). Centrum Badań i Rozwoju Systemów Radiowych (RCR), później przekształcone w Stowarzyszenie Przemysłu Radiowego i Przedsiębiorstw (ARIB), ukończyło specyfikacje w kwietniu 1991 r. Korzystając ze sprzętu sieciowego wyprodukowanego przez NEC, Motorolę i Ericsson, NTT DoCoMo uruchomiło swoją usługę cyfrową w marcu 1993 r. Po osiągnięciu szczytu prawie 80 milionów abonentów, była ona stopniowo wycofywana na rzecz technologii 3G i została zamknięta 1 kwietnia 2012 r. Sieć PDC oferowała usługi telefonii komórkowej (pełna i połowa stawki), usługi uzupełniające (oczekiwanie na połączenie, poczta głosowa, połączenia trójstronne, przekierowywanie połączeń itp.), usługę danych komutowanych obwodowo (do 9,6 kbps) i usługę danych komutowanych pakietowo (do 28,8 kbps). Niezależnie od izolacji od reszty świata, japońska sieć 2G wspierała przyciągającą wzrok innowację znaną jako i-mode, która była uważana za pioniera mobilnego Internetu.

	GSM	D-AMPS	PDC	IS-95
Launch year	1991	1993	1993	1995
DL band (MHz)	935–960	869–894	940–960, 1 477–1 501	869–894
UL band (MHz)	890–915	824–849	810–830, 1 429–1 453	824–849
Bandwidth (kHz)	200	30	25	1 250
User capacity	1 000	2 500	3 000	~2 500 (soft)
Multiple access	TDMA			CDMA
Receiver	Equalizer			RAKE
Duplexing	FDD			
Modulation	GMSK	$\pi/4$ -DPSK	$\pi/4$ -DPSK	BPSK/QPSK
Speech (kbps)	13	7.95	11.2 (full)/5.6 (half)	1.2–9.6 (variable)

Parameter	WCDMA	CDMA2000	TD-SCDMA	WiMAX
Version	Release 99	1x	Release 4	IEEE802.16e
Launch time	2001	2000	2009	2006
Bandwidth (MHz)	5	1.25	1.6	1.25/5/10/20
Multi-access	CDMA			OFDMA
Duplexing	FDD	FDD	TDD	TDD
Chip rate (Mcps)	3.84	1.2288	1.28	N/A
Power control	1500 Hz	800 Hz	200 Hz	N/A
Frame length (ms)	10	20	10	5
Modulation	QPSK (DL)/BPSK (UL)		~8 PSK	~64 QAM
Channel coding	Turbo codes			Turbo/LDPC

Parameter	LTE	LTE-Advanced	WiMAX 1.0	WiMAX 2.0
Standard	3GPP Release 8	3GPP Release 10	IEEE 802.16e-2005	IEEE 802.16m-2011
Launch time	2009	2012	2006	2012
Bandwidth (MHz)	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	(Aggregated) up to 100	1.25, 5, 10, 20	5, 10, 20, 40
Multi-access	DL: OFDMA UL: SC-FDMA	DL: OFDMA UL: SC-FDMA	DL: OFDMA UL: OFDMA	DL: OFDMA UL: OFDMA
OFDM subcarrier	15 kHz	15 kHz	10.94 kHz	10.94 kHz
Duplex mode	FDD/TDD	FDD/TDD	TDD	TDD/FDD
Multi-Antenna	DL: 2x2,4x2,4x4 UL: 1x2,1x4	DL: up to 8x8 UL: up to 4x4	DL: 2x2 UL: 2x1	DL: up to 8x8 UL: up to 4x4
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM	Up to 256QAM ⁽¹⁾	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Channel coding	Turbo codes	Turbo codes	Turbo codes/LDPC	Turbo codes/LDPC
Frame length	10 ms	10 ms	5 ms	5 ms
Mobility (km/h)	350	350	120	350
Data rate	DL: 300 Mbps UL: 75 Mbps	DL: 1 Gbps UL: 500 Mbps	DL: 75 Mbps UL: 20 Mbps	DL: 1 Gbps UL: 200 Mbps
Latency	UP: 5 ms, CP: 50 ms	UP: 5 ms, CP: 50 ms	UP: 20 ms, CP: 50 ms	UP: 10 ms, CP: 30 ms

Ustuga General Packet Radio Service (GPRS)

Oprócz zwiększonego bezpieczeństwa dzięki cyfrowemu szyfrowaniu i znacznie zwiększonej pojemności systemu w porównaniu z poprzednimi wersjami, kamieniem milowym postępu sieci komórkowej 2G było wprowadzenie usługi danych do sieci komórkowej. W 1992 roku po raz pierwszy narodziła się usługa krótkich wiadomości tekstowych (SMS), która obsługuje szybkość transmisji danych 9,6 kbps. Neil Papworth, 22-letni inżynier oprogramowania pracujący w Vodafone, wysłał pierwszą na świecie wiadomość tekstową 3 grudnia 1992 roku, wpisując „Wesołych Świąt” z komputera do Richarda Jarvisa na telefonie Orbitel 901. Wraz z fenomenalnym sukcesem wiadomości SMS i rosnącym zapotrzebowaniem na dostęp do Internetu za pośrednictwem telefonów komórkowych i laptopów, standardy komórkowe 2G ewoluowały w celu zwiększenia możliwości przenoszenia usług High-Rate Packet Data (HRPD). ETSI opracował General Packet Radio Service (GPRS) w odpowiedzi na wcześniejszy Cellular Digital Packet Data (CDPD), nakładając system AMPS w celu zapewnienia szybkości 19,2 kbps i japońskie usługi i-mode. Protokół Cellular Packet Radio (CELLPAC), który wprowadził przełączanie pakietów w GSM, był podstawą specyfikacji GPRS począwszy od 1993 r. [Walke, 2003]. W czerwcu 2000 r. British Telecom Cellnet uruchomił pierwszą na świecie komercyjną sieć GPRS w Wielkiej Brytanii. GPRS to nakładająca się sieć danych z przełączaniem pakietów na sieć GSM z przełączaniem obwodów. Opierając się na starszym interfejsie radiowym, operator musi zainstalować tylko kilka węzłów sieciowych, aby uaktualnić sieć GSM wyłącznie głosową do sieci GPRS z głosem i danymi. Kontrolery stacji bazowych oddzielają ruch danych i głosu i kierują dane do węzłów obsługujących GPRS podłączonych do sieci danych. Działając w trybie best-effort, GPRS zazwyczaj osiągał szybkość transmisji danych 40 kbps w łączu w dół i 14 kbps w łączu w górę poprzez agregację wielu przedziałów czasowych w jednym nośniku. Udoskonalenie w późniejszych specyfikacjach może teoretycznie osiągnąć szczytową szybkość transmisji 171,2 kbps poprzez agregację ośmiu przedziałów czasowych w tym samym czasie dla jednego użytkownika.

Ulepszone prędkości transmisji danych dla ewolucji GSM (EDGE)

Z jednej strony GPRS wykazywał pewne ograniczenia, takie jak niskie praktyczne prędkości transmisji danych, znacznie niższe od wartości teoretycznych. Z drugiej strony operatorzy komórkowi, którym nie udało się uzyskać licencji 3G, potrzebowali jeszcze bardziej ulepszonych standardu GPRS, aby oferować usługi transmisji danych z prędkościami zbliżonymi do tych dostępnych w sieciach 3G. Ulepszone prędkości transmisji danych dla ewolucji GSM (EDGE) zostały po raz pierwszy opracowane przez ETSI jako ewolucja GPRS w 1997 r. Chociaż EDGE ponownie wykorzystywał pasmo przenoszenia GSM i strukturę przedziału czasowego, nie był ograniczony do systemów komórkowych GSM. Zamiast tego miał stać się ogólną technologią ułatwiającą ewolucję istniejących systemów komórkowych w kierunku możliwości trzeciej generacji. Po ocenie kilku różnych propozycji, Universal Wireless Communications Consortium (UWCC) zatwierdziło EDGE w styczniu 1998 r. jako zewnętrzny komponent IS-136HS w celu zapewnienia usług transmisji danych 384 kbps. Pierwsza komercyjna sieć EDGE została uruchomiona w 2003 roku przez AT&T w Stanach Zjednoczonych. Dzięki wprowadzeniu schematu modulacji wyższego rzędu o nazwie eight phase-shift keying (8PSK), w przeciwieństwie do gaussowskiego minimum-shift keying (GMSK) w jego poprzednikach, może obsługiwać maksymalną szybkość transmisji danych do 470 kbps. Kilka nowych technik, w tym adaptacja łącza, Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) z miękkim łączeniem i zaawansowanym harmonogramowaniem, zostało po raz pierwszy zastosowanych w EDGE, a następnie Wideband Code-Division Multiple Access (WCDMA), CDMA2000 i inne standardy. Tymczasem systemy IS-54 i IS-136 zapewniały szybkość transmisji danych do 60 kbps poprzez agregację przedziałów czasowych i stosowanie modulacji wyższego rzędu. Dalsza ewolucja standardu IS-136 została nazwana IS-136HS (high-speed), oparta na EDGE. Zwiększyła ona przepustowość danych systemów IS-136 do ponad 470 kbps na nośnik. Początkowy system IS-95 obsługiwał usługi danych w trybie obwodu i trybie pakietowym z szybkością transmisji danych 14,4 kbps. Bez naruszania starszej konstrukcji interfejsu radiowego w celu zachowania ścisłej zgodności

wstecznej, został on ulepszony do IS-95B, który oferował zwiększoną szybkość transmisji danych 115 kbps. Przejście z analogowego 1G na cyfrowe 2G ułatwiło również innowację terminali mobilnych, gdzie znacznie mniejsze, lżejsze, tańsze i energooszczędne telefony komórkowe zyskały popularność w niezwykłym tempie. Telefony komórkowe przeszły z użytkowników komercyjnych do użytkowników ogólnych jako niezbędny element nowoczesnego życia. Nokia z powodzeniem rozpoznała pragnienie ludzi, aby przekształcić telefony komórkowe w urządzenia spersonalizowane. W 1994 roku Nokia wypuściła pierwszy telefon komórkowy z kultowym dzwonkiem – Nokia 2110, pierwszy telefon komórkowy umożliwiający użytkownikowi zmianę obudowy telefonu, aby odzwierciedlała jego nastrój lub styl – Nokia 5110, i pierwszy, który zawierał grę mobilną Snake – Nokia 6110. W rezultacie Nokia osiągnęła dominujący udział w rynku na światowym rynku telefonów komórkowych. W 2002 roku świat zakończył przejście na cyfrowe sieci komórkowe, a liczba abonentów telefonii komórkowej po raz pierwszy przewyższyła liczbę abonentów telefonii stacjonarnej, co uczyniło sieci komórkowe dominującą techniką świadczenia usług komunikacyjnych.

3G: Od głosu do technologii zorientowanej na dane

Druga generacja systemów cyfrowych została zaprojektowana w celu rozwiązania słabości, takich jak ograniczona pojemność systemu, łatwe podsłuchiwanie i gorsza jakość głosu, w systemach pierwszej generacji. Jednak standardy takie jak GSM, IS-95 i IS-136 były nadal projektowane do komunikacji głosowej, ale nie sprawdzały się dobrze w przypadku usług transmisji danych.

Sieć komórkowa zorientowana na dane

Rozprzestrzenianie się usług opartych na Internecie, takich jak przeglądanie stron internetowych, wiadomości multimedialne, poczta e-mail, gry interaktywne oraz strumieniowe przesyłanie dźwięku i obrazu o wysokiej wierności, a także ekspansja tych usług z sieci przewodowych na sieci komórkowe, wymusiły potrzebę systemów komórkowych zoptymalizowanych pod kątem danych, które miałyby zastąpić wcześniejsze systemy komórkowe zorientowane na głos. Niezgodne środowisko mobilne i fragmentaryczne wykorzystanie widma, które irytowały poprzednie pokolenia, zmotywowały Międzynarodową Unię Telekomunikacyjną (ITU) do rozpoczęcia wysiłków na rzecz globalnego standardu z pełną interoperacyjnością i współdziałaniem w latach 80. W 1990 r. ITU wydało pierwsze zalecenie dotyczące przyszłego publicznego systemu telefonii komórkowej (FPLMTS). FPLMTS przemianowano na International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) [ITU-R M.1225, 1997] pod koniec lat 90., ponieważ stary akronim był trudny do wymówienia. Tymczasem Światowa Konferencja Radiowa, która odbyła się w lutym 1992 r., zidentyfikowała widmo 230 MHz w pasmach 1885–2025 MHz i 2110–2200 MHz dla IMT-2000 na całym świecie. Zalecenia IMT-2000 określiły minimalne wymagania techniczne systemu 3G, w tym wysoką szybkość transmisji danych, asymetryczną transmisję danych, globalny roaming, wiele jednoczesnych usług, lepszą jakość głosu, bezpieczeństwo i większą przepustowość. Kryteria oceny określone w Międzynarodowym Związku Telekomunikacyjnym (ITU-R) M.1225 [ITU-R M.1225, 1997] ustaliły docelowe szybkości transmisji danych dla usług transmisji danych 3G z przełączaniem obwodów i przełączaniem pakietów:

- Do 2 Mb/s w środowisku wewnętrznym.
- Do 144 kb/s w środowisku zewnętrznym do wewnętrznego i dla pieszych.
- Do 64 kb/s w środowisku pojazdów.

Niemniej jednak ITU nie określił rozwiązań technologicznych spełniających te wymagania, a jedynie zwrócił się o propozycje do zainteresowanych organizacji. Na podstawie udanej standaryzacji GSM, ETSI zainicjowało nową organizację o nazwie Third Generation Partnership Project (3GPP) wraz z

innymi organizacjami zajmującymi się rozwojem standardów na całym świecie, w tym ARIB (Japonia), ATIS (USA), CCSA (Chiny), TTA (Korea Południowa) i TTC (Japonia). W tym samym czasie inna grupa w Stanach Zjednoczonych utworzyła Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2), mający na celu dostosowanie specyfikacji systemu 3G opartego na ewolucji IS-95. Chociaż pozostały pewne różnice, zarówno 3GPP, jak i 3GPP2 wybrały CDMA jako podstawową technologię bazową. Standardem opracowanym przez 3GPP był WCDMA lub Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). 3GPP2 skupiło się na rozwoju CDMA2000, który ponownie wykorzystał pasma widma IS-95 i odziedziczył zestaw szerokości pasma 1,25 MHz. W 1998 roku ITU otrzymało liczne propozycje techniczne, wśród których pięć standardów zostało zatwierdzonych dla usług naziemnych, tj. UTRA FDD, UTRA Time-Division Duplex (TDD), CDMA2000, TDMA Single-Carrier i FDMA/TDMA. W 2007 roku Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) określony przez specyfikacje IEEE 802.16 został zatwierdzony przez ITU jako szósty standard IMT-2000, znany również jako IMT2000 OFDMA TDD WMAN. W przeciwieństwie do innych standardów 3G opartych na CDMA, WiMax przyjął więcej technologii sprzed 4G, takich jak multipleksowanie z ortogonalnym podziałem częstotliwości (OFDM), MIMO (multi-input multiple-output multi-input multi-output) i kodowanie LDPC (low-density parity-check). IMT-2000 TDMA Single-Carrier, zwany także Universal Wireless Communications 136 (UWC-136), opracowany przez konsorcjum składające się z ponad 85 operatorów i dostawców sieci bezprzewodowych, opiera się na TDMA w celu zapewnienia wstecznej kompatybilności ze standardem IS-136. Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) nazywano również IMT-2000 FDMA/TDMA, który został opracowany w ramach DECT Forum i ETSI. Chociaż UWC-136 i DECT były również zatwierdzonymi standardami 3G przez ITU, otrzymały one mniejsze wsparcie ze strony przemysłu i nie zostały szeroko wdrożone.

Szerokopasmowy dostęp z podziałem kodowym (WCDMA)

Pod koniec lat 90. NTT DoCoMo opracowało technologię szerokopasmowego CDMA dla swojego systemu 3G znaną jako Freedom of Mobile Multimedia Access (FOMA). WCDMA zdefiniowało tylko część interfejsu powietrznego, dlatego też nazywano ją Universal Terrestrial Radio Access (UTRA). WCDMA zostało wybrane jako interfejs powietrzny UMTS, jako następcy GSM w 3G. Różne systemy, w tym FOMA, UMTS i J-Phone, współdzieliły interfejs powietrzny WCDMA, ale mają różne protokoły dla kompletnego stosu standardów komunikacyjnych. 3GPP złożyło go jako propozycję IMT-2000, a ITU-R zatwierdziło go jako część standardów rodziny IMT-2000. Zastosowano w nim bezpośredni sekwencyjny dostęp z podziałem kodowym o szybkości układu scalonego 3,84 Mcps. Specyfikacje dostępu radiowego przewidywały zarówno warianty FDD, jak i TDD, wykorzystując kanał 5 MHz w celu osiągnięcia szczytowych szybkości do 5 Mb/s. W październiku 2001 r. NTT DoCoMo uruchomiło pierwszą komercyjną sieć FOMA w Japonii jako następcę i-mode. W wielu krajach europejskich operatorzy komórkowi uzyskali licencję na spektrum 3G i musieli płacić ogromne opłaty w aukcjach. Na przykład operatorzy komórkowi w Wielkiej Brytanii wydali 33 mld USD na aukcji w kwietniu 2000 r., a 47,5 mld USD odnotowano na aukcji niemieckiej pod koniec tego samego roku. Tak wysoka presja finansowa operatorów komórkowych wywołana wysokimi kosztami licencjonowania spowodowała opóźnienie komercyjnego wdrożenia europejskich sieci 3G. Na przykład pierwsza komercyjna sieć 3G w Wielkiej Brytanii została wdrożona przez Hutchison Telecom dopiero w marcu 2003 r. WCDMA określona w wydaniu 99 i wydaniu 4 specyfikacji zawiera wszystkie funkcje techniczne spełniające wymagania IMT-2000, ale dalsze udoskonalenia nigdy nie ustały. Szybki dostęp pakietowy (HSPA) pojawił się w 2002 r. jako pierwsza znacząca ewolucja interfejsu radiowego WCDMA.

- Wersja 5 zwiększyła możliwości łącza w dół do szybkości 14 MHz, znanej jako High Speed Downlink Packet Access (HSDPA). Aby to osiągnąć, wprowadzono zestaw funkcji technicznych, w tym transmisję

współdzielonego kanału, harmonogramowanie zależne od kanału, modulację wyższego rzędu (tj. 16QAM), H-Automatic Repeat Request (ARQ) z miękkim łączeniem i adaptacją łącza.

- Wersja 6 została sfinalizowana w marcu 2005 r. i dodała ulepszenie znane jako High Speed Uplink Packet Access (HSUPA), oferując szybkość 5,74 MHz w łączu w górę.
- Wersja 7 opublikowana we wrześniu 2007 r. jako dalsza ewolucja HSPA zwana HSPA Evolution lub HSPA+. Wykorzystano technikę wielu anten (2x2 MIMO) i modulację wyższego poziomu (tj. 16QAM w łączu w górę i 64QAM w łączu w dół), aby osiągnąć 28 Mb/s w łączu w dół i 11 Mb/s w łączu w górę przy szerokości pasma 5 MHz.
- Wersja 8 umożliwiła jednoczesne wykorzystanie dwuwarstwowego multipleksowania przestrzennego i modulacji 64QAM w łączu w dół. Zastosowano agregację nośnych w podobny sposób, jak później zrobiono to w przypadku ewolucji długoterminowej (LTE), zwiększając w ten sposób maksymalną szerokość pasma o 10 MHz. Dwunośna HSDPA może podwoić szybkość transmisji danych do 56 Mb/s w łączu w dół poprzez agregację dwóch kanałów nośnych.
- Wersja 9 ulepszyła łącze w górę, wprowadzając dwie agregowane nośne, co doprowadziło do szybkości 22 Mb/s w łączu w górę.
- Wersja 10 może osiągnąć szczytową przepustowość danych łącza wstecznego wynoszącą 168 Mb/s, dodając obsługę agregacji czterech nośnych składowych dla maksymalnej przepustowości 20 MHz

Code-Division Multiple Access 2000 (CDMA2000)

IS-95 był pierwszym systemem komórkowym, który wykorzystywał technologię CDMA, dlatego łatwiej było ewoluować w standard 3G oparty na CDMA. Kiedy stał się globalnym standardem IMT-2000, nazwa została zmieniona na CDMA2000, a prace standaryzacyjne zostały przeniesione z US TIA do 3GPP2. Będąc organizacją siostrzaną 3GPP, 3GPP2 popchnęło technologię CDMA2000 ścieżką ewolucji podobną do ścieżki WCDMA. Skupiono się na przeniesieniu z komunikacji głosowej z komutacją obwodów na usługi danych z komutacją pakietów. Zainicjowano dwie równoległe ścieżki ewolucyjne, jak pokazano na rysunku 1.3, aby jeszcze bardziej ulepszyć obsługę transmisji danych. Podstawową ścieżką była Evolution-Data Only (EV-DO), lub też interpretowana jako Evolution – Data Optimized. Z kolei inna ścieżka jest dedykowana do jednoczesnej obsługi usług komutowanych obwodowo i pakietowo na tym samym nośniku, stąd nazywana Ewolucją dla zintegrowanych danych i głosu (EV-DV)

- CDMA2000 1x: Początkowa wersja IMT-2000 CDMA Multi-Carrier zatwierdzona przez ITU-R obsługiwała dwa tryby działania: pojedynczą nośną (CDMA2000 1x) i wiele nośnych (CDMA2000 3x). Chociaż tryb 3x był istotnym elementem przedłożenia CDMA2000 do ITU-R, nigdy nie został komercyjnie wdrożony w sieci na dużą skalę. CDMA2000 1x był w pełni kompatybilnym wstecznie rozwinięciem IS-95, dziedziczącym podstawową konstrukcję widma rozproszonego sekwencyjnie o bezpośredniej szerokości pasma i szerokość pasma kanału 1,25 MHz. Dodał kilka ulepszeń w stosunku do wcześniejszych wersji IS-95 w celu poprawy wydajności widmowej i oferowania wyższych szybkości transmisji danych. Co najważniejsze, zapewnił strukturę otwierającą możliwość dalszej ewolucji usług danych z przełączaniem pakietów. CDMA2000 1x można wdrożyć na pasmach częstotliwości IS-95, dzięki czemu operator sieci IS-95 może płynnie przejść z 2G do 3G bez konieczności uzyskania licencji na spektrum 3G. W październiku 2000 r. firma SK Telecom uruchomiła pierwszą na świecie komercyjną sieć CDMA2000 1X w Korei Południowej.

W 2014 r. CDMA Development Group stwierdziła, że 314 operatorów w 118 krajach oferowało usługi CDMA2000 1X lub 1xEV-DO.

- CDMA2000 1x EV-DO Rewizja 0: Wersja 1x CDMA2000 ewoluowała różnymi ścieżkami, co zaowocowało dwiema opcjami: CDMA2000 1xEV-DV i CDMA2000 1xEV-DO. Pierwsza z nich skupiała się na poprawie przepustowości głosu i otrzymała ograniczony rozwój w ramach 3GPP2. Natomiast EV-DO odgrywało rolę głównego toru ewolucji i przeszło przez kilka kroków ewolucyjnych w Rewizji 0, Rewizji A, Rewizji B i Rewizji C. CDMA2000 1x EV-DO później nazwano także HRPD. EV-DO Rewizja 0 przeprojektowała strukturę łącza w górę i w dół CDMA2000 1x, zoptymalizowaną pod kątem transmisji danych z przełączaniem pakietów, jednocześnie usuwając ograniczenie obsługi komunikacji głosowej z przełączaniem obwodów. Operator wdrażał dodatkową nośną dla EV-DO, oddzielając połączenia głosowe i pakietowe na różnych nośnych. 3GPP2 dodał zestaw technologii zoptymalizowanych pod kątem danych do Rewizji 0 CDMA2000 EV-DO, w tym transmisję współdzielonego kanału, harmonogramowanie zależne od kanału, krótki interwał czasu transmisji (TTI), adaptację łącza, modulację wyższego rzędu (tj. 16QAM w łączu w dół), HARQ, wirtualne miękkie przekazywanie i różnorodność odbioru. Te techniki zostały również przyjęte przez 3GPP w celu ewolucji HSPA. Dzięki nowemu interfejsowi radiowemu i oddzielnemu kanałowi używanemu wyłącznie do transmisji danych, osiągnięto szybkość transmisji danych 2,4 Mb/s w łączu dosyłowym, podczas gdy 153 kb/s w łączu zwrotnym przy nośnej 1,25 MHz.
- CDMA2000 1x EV-DO Wersja A: Następną ewolucją po wersji 0 została nazwana wersją A, a nie wersją 1, która skupiała się na ulepszeniu łącza w górę, podobnie jak HSUPA w 3GPP. Łącze dosyłowe wersji A jest podobne do wersji 0, ale zawierało również pewne aktualizacje, zwiększając szybkość transmisji danych z 2,4 do 3,1 Mb/s. W łączu dosyłowym wprowadzono modulację wyższego rzędu (tj. QPSK i opcjonalne wsparcie 8PSK), w przeciwieństwie do BPSK używanego w wersji 0, a także HARQ, osiągając szybkość łącza w górę do 1,8 Mb/s. Poza tym wykorzystanie mniejszych rozmiarów pakietów i krótszego TTI umożliwiło niższe opóźnienie do 50% w porównaniu z poprzednikiem, co pozwala na dobre wsparcie dla usług VoIP (Voice over IP) i wrażliwych na opóźnienia danych.
- CDMA2000 1x EV-DO Rewizja B: Ulepszoną wersją była Rewizja B, która obsługuje wyższe szybkości transmisji danych dzięki wykorzystaniu wielu nośników. Można agregować do 16 nośników, aby utworzyć pasmo 20 MHz, osiągając teoretyczną szybkość do 46,5 Mb/s. Ze względu na ograniczenia kosztów, rozmiaru sprzętu i żywotności baterii, terminal mobilny w sieci Rewizji B obsługuje do trzech nośników, co daje szczytową szybkość 9,3 Mb/s. Interfejs radiowy Rewizji B był wstecznie kompatybilny z Rewizją 0 i Rewizją A, co umożliwiało sieci wielonośnej dalszą obsługę starszych terminali jedno-nośnych. Obsługiwał on asymetryczną operację, w której nośniki nie muszą być symetrycznie przydzielane między łączem w dół i łączem w górę. W przypadku asymetrycznych aplikacji, takich jak pobieranie plików i strumieniowanie wideo, można użyć większej liczby nośników dla łącza do przodu. Jedno łącze do tyłu może przenosić sygnalizację kontrolną i informacje zwrotne dla wielu łączy do przodu, zmniejszając ilość narzutu sygnalizacji łącza w górę.
- CDMA2000 1x EV-DO Rewizja C: Następnym krokiem był 1x EV-DO Rewizja C, znany również jako Ultra Mobile Broadband (UMB). Przyjmując opcję Loosely Backward Compatible (LBC), Rewizja C nie jest zgodna z poprzednimi rewizjami specyfikacji CDMA2000. Celem zaprojektowania przełomowego interfejsu radiowego było osiągnięcie wyższych szczytowych szybkości transmisji, ulepszonej wydajności widmowej, niższego opóźnienia i ulepszonych wrażeń użytkownika dla aplikacji danych wrażliwych na opóźnienia, takich jak rozwój LTE w 3GPP. Istotnymi nowymi funkcjami w Rewizji C są wprowadzenie typowych technologii 4G, a mianowicie OFDM i MIMO. Transmisja wielonośnikowa OFDM wybrała odstęp między podnośnymi wynoszący 9,6 kHz z różnymi rozmiarami szybkiej transformaty Fouriera (FFT) (128, 256, 512, 1024 i 2048), aby elastycznie obsługiwać różne szerokości

pasma transmisji. Multipleksowanie przestrzenne obsługiwało do czterech warstw transmisyjnych w łączy dosyłowym, ale było obsługiwane tylko w połączeniu z OFDM. W łączy odwrotnym określono do dwóch warstw przestrzennych z prekodowaniem opartym na książce kodowej pod kontrolą stacji bazowej. Przy użyciu szerokości pasma 20 MHz maksymalne szybkości wynoszą 260 Mb/s w łączy dosyłowym i 70 Mb/s w łączy odwrotnym. CDMA2000 i WCDMA rywalizowały o rynek 3G na całym świecie w pierwszych kilku latach wdrażania 3G. Niezależnie od niezgodności ze starszymi standardami GSM, późnego wprowadzenia i wysokich kosztów aktualizacji wdrażania całkowicie nowej technologii interfejsu powietrznego, WCDMA wygrało tę konkurencję i ostatecznie stało się dominującym standardem 3G. W konsekwencji wsparcie dla ewolucji CDMA2000 stopniowo stawało się słabe. W obozie 3GPP2 UMB było celem planowanego następcy 4G CDMA2000, konkurującego z LTE w 3GPP. Jednakże Qualcomm, główny udziałowiec UMB, ogłosił w listopadzie 2008 r. zaprzestanie dalszego rozwijania technologii CDMA2000. Ostatnią aktywność 3GPP2 odnotowano w 2013 r. i od tego czasu grupa pozostaje w uśpieniu.

Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA)

Równoległe z rozwojem UTRA FDD/WCDMA i jego ewolucją do HSPA, 3GPP pracowało również nad wersją TDD UTRA. Niezależnie od podobnych protokołów warstwy wysokiej między FDD i TDD, projekty warstwy fizycznej były zupełnie inne. Ze względów historycznych istniały trzy warianty o różnych szybkościach chipów. Początkowa wersja UTRA TDD przyjęła szybkość chipów 3,84Mcps, a 7,68 i 1,28Mcps dodano później. UTRA low chip rate (1,28Mcps) TDD, nazywany również Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA), znacznie różni się od pozostałych dwóch. TD-SCDMA został opracowany jako standard branżowy pod przewodnictwem Chińskiej Akademii Technologii Telekomunikacyjnych (CATT). W marcu 2001 r. zatwierdzono jego połączenie z wersją 4 specyfikacji 3GPP jako alternatywną wersję UTRA TDD. Istotną różnicą między TD-SCDMA a dwoma innymi standardami 3G (WCDMA i CDMA2000) jest wykorzystanie operacji TDD zamiast FDD do sygnalizacji duplexowej. Przyjęto szerokość pasma sygnału 1,6 MHz, modulację 8PSK i krótszy TTI 5 ms. Niektóre funkcje techniczne, takie jak praca wieloczęstotliwościowa i obsługa inteligentnej anteny/kształtowania wiązki z ośmioma antenami, zostały wprowadzone przez ten system. Spośród trzech wersji TD-SCDMA był jedynym standardem UTRA TDD wdrożonym na dużą skalę, podczas gdy pozostałe dwie były ograniczone do wdrożeń niszowych. China Mobile, największy operator komórkowy na świecie pod względem liczby abonentów, otrzymał licencję 3G na początku 2009 r. na obsługę sieci TD-SCDMA. Unikalne wdrożenie TD-SCDMA na całym świecie ostatecznie stało się siecią składającą się z około 500 000 stacji bazowych, a szczytowa liczba abonentów osiągnęła około 250 milionów. Chociaż ta technologia była stosowana wyłącznie w Chinach, promowała zalety systemów TDD i przyspieszyła rozwój wersji TDD 4G znanej jako TD-LTE lub LTE TDD. Ulepszenia HSPA TD-SCDMA były podobne do tych zastosowanych w UTRA FDD, takich jak zastosowanie modulacji wyższego rzędu (16QAM) i hybrydowego ARQ.

Światowa interoperacyjność dostępu mikrofalowego (WiMAX)

Specyfikacje IEEE 802.16 zostały opracowane przez Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) pod parasolem Wireless Metropolitan Area Network (WMAN). Początkowa wersja z 2001 r. została zaprojektowana do komunikacji w linii wzroku w zakresie częstotliwości fal milimetrowych 10–60 GHz, ukierunkowana na stały dostęp do bezprzewodowego szerokopasmowego (WiBro). W 2003 r. ulepszona wersja o nazwie IEEE 802.16a wprowadziła obsługę działania bez linii wzroku w pasmach niskiej częstotliwości 2–11 GHz, ale nadal ograniczoną do aplikacji stałego dostępu bezprzewodowego. Monumentalnym kamieniem milowym była specyfikacja IEEE 802.16e-2005 wydana w 2005 r. jako pierwszy mobilny system WiMAX. Dzięki najnowocześniejszym technologiom w tamtym czasie oferował szczytowe szybkości transmisji danych 128 Mb/s w łączy w dół i 56 Mb/s w łączy w górę na

kanale 20 MHz. Pierwsza komercyjna sieć została wdrożona w Korei Południowej w 2006 r. (pod marką WiBro), a następnie wdrożona w wielu częściach świata. Specyfikacje IEEE 802.16 zwykle zawierają specyfikacje warstwy fizycznej i warstwy kontroli dostępu do medium (MAC) zamiast ogólnego stosu protokołów komunikacyjnych. Ponadto specyfikacje IEEE 802.16 zawierają wiele alternatyw dla podstawowego schematu transmisji warstwy fizycznej. Implementacja wszystkich tych opcji i alternatywnych funkcji w systemie mobilnym nie była konieczna. WiMAX Forum to kierowany przez branżę sojusz non-profit utworzony w celu promowania i certyfikowania zgodności i interoperacyjności produktów opartych na IEEE 802.16. Jego odpowiedzialnością było wybranie funkcji technicznych z pełnego zestawu funkcji zdefiniowanych w specyfikacjach IEEE 802.16 w celu utworzenia kompletnego i możliwego do wdrożenia standardu o nazwie WiMAX SystemProfile. Pierwszy taki profil, WiMAXRelease 1.0, został opublikowany w 2007 r., a drugi profil, Release 1.5, został sfinalizowany w 2009 r. IEEE 802.16e, nazywany również Mobile WiMAX, został złożony do ITU-R jako propozycja dla IMT-2000. Został zatwierdzony w 2007 r. przez ITU jako IMT-2000 OFDMA TDD WMAN, równoległe z WCDMA, CDMA2000 i TD-SCDMA. Chociaż IEEE 802.16 zapewniał kilka alternatyw dla podstawowego schematu transmisji warstwy fizycznej, w tym zarówno OFDM, jak i transmisję pojedynczej nośnej, Mobile WiMAX opiera się na transmisji OFDM. Podobnie jak LTE, IEEE 802.16e poprawia elastyczność widma poprzez przyjęcie zmiennych szerokości pasma, tj. 1,25, 5, 10 i 20 MHz. Przy wspólnym odstępnie między podnośnymi wynoszącym 10,94 kHz, skalowanie dotyczy tylko liczby podnośnych (128, 512, 1024 i 2048) w paśmie transmisji. IEEE 802.16e określił zarówno TDD, jak i FDD, w tym możliwość półdupleksowego FDD, podczas gdy pierwsza wersja Mobile WiMAX obsługuje jedynie działanie TDD, gdzie ramka 5 ms jest dzielona na część downlink i uplink, łącznie składając się z 48 symboli OFDM. Podobnie jak LTE, Mobile WiMAX obsługuje modulację QPSK, 16QAM i 64QAM oraz adaptację łącza (modulację adaptacyjną i kodowanie) pod względem natychmiastowych warunków kanału. Specyfikacje 802.16e obsługują różne schematy kodowania kanału, w tym kody Turbo, podobne do HSPA i LTE, oraz kody LDPC. Jednak Mobile WiMAX obsługuje tylko kody Turbo. Zawartość wideo i przeglądanie stron internetowych wywołały potrzebę większych i lepszych wyświetlaczy ekranowych, co sprzyjało rewolucji w terminalach mobilnych. Pierwszym smartfonem był IBM Simon wydany w 1994 r., a następnie Nokia 9000 wydana w 1996 r., łącząca pocztę e-mail, edytor tekstu, kalendarz i klawiaturę QWERTY. 7 stycznia 2007 r. Steve Jobs ogłosił, że Apple wchodzi na rynek telefonów komórkowych i, traktując telefon komórkowy najpierw jako komputer, a dopiero potem jako telefon, wniósł zupełnie nowe spojrzenie na projektowanie telefonów komórkowych. Apple iPhone okazał się przełomowym elementem technologii, który zdefiniował na nowo projektowanie telefonów komórkowych i wprowadził świat do APPLICATION (APP) – mimo że pierwszy model był tylko urządzeniem 2G.

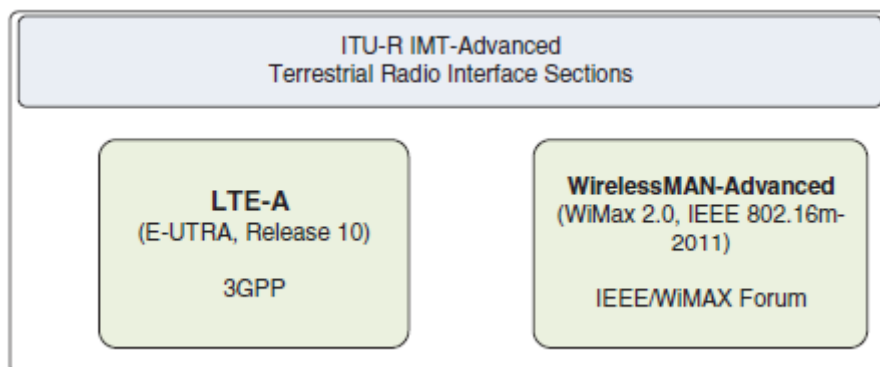
4G: Internet mobilny

Liczba abonentów telefonii komórkowej wzrosła ogromnie w pierwszej dekadzie XXI wieku. Kamień milowy dla pierwszego miliarda został osiągnięty w 2002 r., ale liczba ta szybko wzrosła do ponad 5 miliardów w 2010 r. Inną siłą napędową systemu komórkowego czwartej generacji był eksplozywny wzrost ruchu generowanego przez mobilny szerokopasmowy internet. W sieciach komórkowych po raz pierwszy ruch danych przewyższył ruch głosowy i oczekiwano, że wkrótce nasyci sieci 3G. Ponadto proliferacja usług opartych na Internecie na urządzeniach mobilnych stanowiła poważne wyzwanie dla sieci komórkowych zoptymalizowanych pod kątem komunikacji głosowej. Od czasu systemu 2.5G sieci komórkowe musiały jednocześnie obsługiwać dwie równoległe infrastruktury: sieć z przełączaniem pakietów dla usług danych i sieć z przełączaniem obwodów dla połączeń głosowych.

Sieć komórkowa All-IP

System komórkowy 4G został ukierunkowany na kompleksową architekturę All-IP, tak aby usługi oparte na Internecie mogły być dobrze obsługiwane. Po raz pierwszy w historii sieci komórkowych sieć komutowana obwodowo została całkowicie porzucona, a jedynie sieć komutowana pakietowo została udostępniona w celu zapewnienia bardziej elastycznej i wydajnej pracy.

Organy standaryzacyjne 3G, takie jak 3GPP, 3GPP2, WiMAX i IEEE, pracowały nad udoskonaleniem standardów 3G w kierunku 4G, wykorzystując zaawansowane technologie interfejsu powietrznego i infrastrukturę sieciową all-IP. Aby zapewnić konkurencyjność UMTS, 3GPP zainicjowało przedmiot badań interfejsu lotniczego LTE, znanego również jako Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), w 2004 r. W grudniu 2008 r. ukończono pierwszą wersję (Release 8) interfejsu lotniczego LTE i jego sieci rdzeniowej zwanej Evolved Packet Core (EPC), po której nastąpiła ulepszona wersja (Release 9), zamrożona w grudniu 2009 r. Podobnie jak w przypadku rozwoju IMT-2000, ITU-R WP5D zdefiniował minimalne wymagania techniczne dla systemu 4G, nazwanego International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced) w 2008 r. Jednak ponieważ LTE nie może w pełni spełniać wymagań IMT-Advanced, np. szczytowa szybkość transmisji danych 1 Gb/s dla niskiej mobilności i 100 Mb/s dla wysokiej mobilności, 3GPP kontynuowało prace nad ulepszoną wersją znaną jako długoterminowa ewolucja-zaawansowana (LTE-Advanced) od 2009 r. W międzyczasie standard WiMAX stale ewoluował w ramach rozwoju IEEE i WiMAX Forum. Specyfikacje WirelessMAN-Advanced (znane również jako Mobile WiMAX Release 2.0) zostały ukończone w 2011 r., aby były zgodne z IMT-Advanced. Istotne ulepszenia zostały wprowadzone do IEEE 802.16e-2005, aby utworzyć nowy standard o nazwie IEEE 802.16m-2011. IEEE i WiMAX Forum przesłały IEEE 802.16m-2011 do ITU jako jedną z propozycji IMT-Advanced, konkurując z LTE-Advanced. Ponadto 3GPP2 pracowało nad rozwojem UMB jako następcy czwartej generacji CDMA2000. Jednak Qualcomm, główny sponsor UMB, ogłosił zakończenie rozwoju tej technologii w listopadzie 2008 r., faworyzując zamiast tego LTE. W rezultacie 3GPP2 miało swoją ostatnią aktywność w 2013 r., a grupa od tego czasu pozostaje uśpiona. W październiku 2010 r. ITU-R zakończyło ocenę sześciu zgłoszeń kandydatów i zatwierdziło dwie technologie opracowane przez przemysł jako globalne standardy.

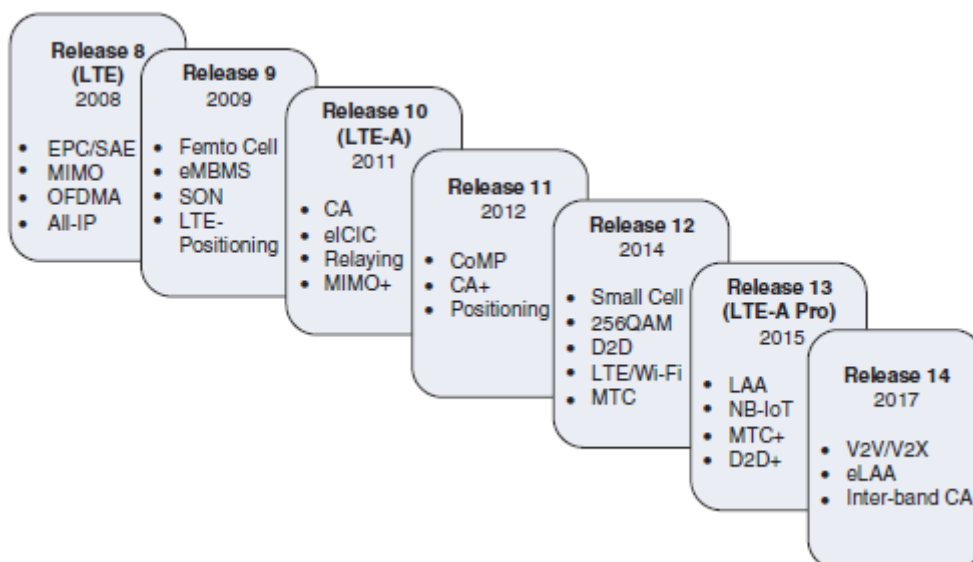


Zalecenie M.2012 [ITU-R M.2012, 2012] identyfikuje technologie naziemnego interfejsu radiowego IMT-Advanced i zawiera szczegółową specyfikację interfejsu radiowego

Long-Term Evolution-Advanced (LTE-Advanced)

3GPP zainicjowało pozycję badawczą dotyczącą LTE pod koniec 2004 r., mając na celu przełomową technologię dostępu radiowego przeznaczoną do transmisji danych z przełączaniem pakietów. Badanie koncentrowało się na wymaganiach technicznych dla LTE. Istotne wyniki zatwierdzone w czerwcu 2005 r. obejmują niskie opóźnienia, wysokie szybkości transmisji danych na skraju komórki i elastyczność widma. Plenarne spotkanie 3GPP Radio Access Network (RAN) w grudniu 2005 r. podjęło decyzję, że łącze w dół LTE powinno opierać się na ortogonalnym dostępie z podziałem częstotliwości (OFDMA) i

wielokrotnym dostępie z podziałem częstotliwości (SC-FDMA) w łączy w górę. W grudniu 2008 r. ukończono pierwszą wersję (Release 8) interfejsu LTE i jego sieci rdzeniowej zwanej EPC, po której nastąpiła ulepszona wersja (Release 9), zamrożona w grudniu 2009 r. LTE to przełomowy standard, który został zaprojektowany bez ograniczeń wstecznej kompatybilności, dzięki czemu jest elastyczny w przyjmowaniu nowych funkcji technicznych. Może być obsługiwany w trybie FDD lub TDD, określanym odpowiednio jako LTE FDD i TD-LTE, z niskim opóźnieniem i płaską architekturą systemu. Maksymalne szybkości transmisji danych osiągnęły 300 Mb/s w łączy w dół i 75 Mb/s w łączy w górę przy szerokości pasma sygnału 20 MHz. W grudniu 2009 r. TeliaSonera uruchomiła pierwsze na świecie komercyjne usługi mobilne LTE w stolicach skandynawskich Sztokholmie i Oslo, przy użyciu sprzętu sieciowego dostarczonego przez Ericsson i Huawei. W tamtym czasie nie było w sprzedaży żadnego telefonu komórkowego zgodnego ze standardem LTE, a abonenci korzystali z komputerów z bezprzewodowym adapterem sieciowym USB, aby uzyskać dostęp do usługi TE. Do września 2010 r. wydano Samsung SCH-r900, pierwszy na świecie telefon komórkowy zgodny ze standardem LTE. Ponieważ LTE nie może w pełni spełniać wymagań IMT-Advanced, np. szczytowej szybkości transmisji danych 1 Gb/s dla niskiej mobilności i 100 Mb/s dla wysokiej mobilności, 3GPP kontynuowało prace nad ulepszoną wersją znaną jako LTE-Advanced od 2009 r. Propozycja oparta na LTE-Advanced została złożona w październiku 2009 r. do ITU, a bardziej szczegółowe specyfikacje zostały ukończone później, aby utworzyć pierwszą wersję LTE-Advanced w wydaniu 10. LTE-Advanced przyjęło istotne cechy techniczne, takie jak ulepszony MIMO i szerszą przepustowość do 100 MHz, aby osiągnąć szybką transmisję 1 Gb/s w łączy w dół i 500 Mb/s w łączy w górę. W 2012 r. rosyjski operator YOTA Networks ogłosił uruchomienie pierwszej na świecie sieci LTE-Advanced w Moskwie przy użyciu sprzętu firmy Huawei. Wersja 13 specyfikacji 3GPP ukończona na początku 2016 r. była pierwszą wersją LTE-Advanced Pro. Ilość nowych funkcji technicznych uznano za wystarczającą, aby zasłużyć na nowy znacznik LTE, ale ani LTE-Advanced, ani LTE-Advanced Pro nie oznaczają zerwania wstecznej kompatybilności. W chwili pisania tego tekstu 3GPP ukończyło wersję 16 i pracuje nad wersją 17, która obejmuje również dalsze ulepszenia LTE oprócz specyfikacji piątej generacji (5G). Wersje specyfikacji 3GPP skupiające się na LTE zostały krótko podsumowane w poniższych akapitach, jak pokazano również na rysunku



- Wersja 8 to pierwsza definicja technologii dostępu radiowego LTE i sieci all-IP EPC, stanowiącej podstawę dla kolejnej ewolucji. Elastyczność widma została podkreślona poprzez obsługę widma sparowanego i niesparowanego przy użyciu FDD i TDD. Obsługuje również elastyczne szerokości pasma

(1,4, 3, 5, 10, 15 i 20 MHz) poprzez skalowanie liczby podnośnych OFDM. Przy szerokości pasma 20 MHz szczytowa szybkość transmisji danych może osiągnąć 150 Mb/s w łączu w górę z 2 ×2 MIMO i 300 Mb/s w łączu w dół z 4 ×4 MIMO.

- Wersja 9 to pierwsza ewolucja LTE. Zapewnia pewne ulepszenia pozostawione w wersji 8 i kilka drobnych udoskonaleń, z funkcjami technicznymi obejmującymi femtokomórkę, formowanie wiązki MIMO, samoorganizujące się sieci (SON), ulepszone usługi transmisji multicast multimedialnych (eMBMS), pozycjonowanie LTE i publiczny system ostrzegawczy. • Wersja 10 określiła standard LTE-Advanced, aby zapewnić, że technologia dostępu radiowego LTE może być w pełni zgodna z wymaganiami IMT-advanced. Została zamrożona w marcu 2011 r. i wprowadziła funkcje techniczne, w tym agregację nośnych, ulepszony wielokrotny dostęp do łącza w górę, ulepszenie MIMO, przekazywanie, ulepszoną koordynację zakłóceń międzykomórkowych (eICIC), heterogeniczne wdrażanie sieci i ulepszenie SON.

- Wersja 11 została sfinalizowana we wrześniu 2012 r., co dodatkowo zwiększyło wydajność i możliwości LTE-Advanced. Jedną z najważniejszych cech LTE Release 11 było wprowadzenie skoordynowanej transmisji i odbioru wielopunktowego (CoMP). Inne ulepszenia to ulepszenie agregacji nośnych, nowa struktura kanału sterującego, pozycjonowanie oparte na sieci, kontrola przeciążenia RAN dla komunikacji typu maszynowego i technika oszczędzania baterii smartfona.

- Wersja 12 została ukończona w czerwcu 2014 r. i skupiała się na optymalizacji i ulepszeniach dla małych komórek, w tym podwójnej łączności, gęstej instalacji małych komórek, włączaniu/wyłączaniu małych komórek i półdynamicznym TDD. Wprowadzono modulację wyższego rzędu (256QAM), aby wykorzystać wysoką siłę sygnału w środowisku małych komórek. Innym priorytetem tej wersji było zastosowanie technologii LTE w przypadku zdarzeń awaryjnych i bezpieczeństwa publicznego, ze specyfikacjami technicznymi dla elementów funkcjonalnych warstwy aplikacji o znaczeniu krytycznym dla misji. Inne funkcje obejmowały komunikację urządzenie-urządzenie (D2D), wspólną pracę LTE TDD-FDD, w tym agregację nośników, metodologię zapewnienia bezpieczeństwa i integrację LTE/WiFi.

- Wersja 13 oznaczała początek LTE-Advanced Pro, który czasami w marketingu nazywano 4.5G i postrzegano jako krok pośredni między pierwszym wydaniem LTE a nadejściem 5G. Wersja 13 była znaczącym krokiem naprzód, z wieloma ekscytującymi funkcjami, takimi jak dostęp wspomagany licencją (LAA) w celu obsługi nielicencjonowanych widm, ulepszona obsługa komunikacji typu maszynowego oraz dalsze ulepszenia w MIMO, komunikacji D2D i agregacji nośnych. Inne wysiłki na rzecz rozszerzenia go o zestaw nowych usług i nowych pionów obejmowały wprowadzenie wąskopasmowego Internetu rzeczy (NB-IoT) i wstępne badania nad komunikacją pojazd-pojazd (V2V).

- Wersja 14 została zamrożona w 2017 r. Oprócz ulepszeń niektórych funkcji wprowadzonych we wcześniejszych wersjach, takich jak ulepszony dostęp wspomagany licencją (eLAA) i agregacja nośnych między pasmami, wprowadziła ona obsługę komunikacji V2V i pojazd-wszystko (V2X), a także transmisję szerokopasmową ze zmniejszonym odstępem między podnośnymi.

WirelessMAN-Advanced

Jak już wspomniano, WiMAX Release 1.0 oparty na IEEE 802.16e-2005 802.16m został zatwierdzony przez ITU w 2007 r. jako szósty globalny standard 3G pod nazwą IMT-2000 OFDMA TDD WMAN. Następnym krokiem podjętym w społeczności IEEE WMAN było opracowanie IEEE 802.16m, którego celem było rozszerzenie wydajności i możliwości technologii dostępu radiowego 802.16 w celu zapewnienia zgodności z wymaganiami IMT-Advanced. W przeciwieństwie do LTE-Advanced będącego w pełni wstecznie kompatybilną ewolucją LTE, IEEE 802.16m nie było płynną ewolucją IEEE 802.16e z pewnymi zakłócającymi cechami. Zamiast tego IEEE 802.16m został uznany za nowy standard, mimo

że posiadał pewne istotne cechy IEEE 802.16e, w tym podstawową numerologię OFDM. Dzięki multipleksowaniu czasowemu te dwie technologie dostępu radiowego mogą współistnieć na tej samej nośnej w strukturze ramki IEEE 802.16e 5 ms. IEEE 802.16m przyjął wiele cech podobnych do LTE-Advanced, takich jak wykorzystanie agregacji nośnych dla szerokości pasma powyżej 20 MHz i obsługa funkcjonalności przekazywania. Wprowadził również znacznie krótsze podramki o długości około 0,6 ms, aby zmniejszyć czas obiegu hybrydowego ARQ i ogólnie umożliwić zmniejszenie opóźnienia w interfejsie radiowym. Zamiast dziedziczyć schematy mapowania zasobów zdefiniowane dla IEEE 802.16e, IEEE 802.16m wprowadził fizyczne jednostki zasobów składające się z wielkości częstotliwościowo ciągłych podnośnych podczas jednej podramki, podobnie jak bloki zasobów w LTE. Każda jednostka zasobów składa się z 18 podnośnych z odstępem między podnośnymi wynoszącym 10,94 kHz, co daje szerokość pasma zbliżoną do szerokości pasma bloku zasobów LTE wynoszącej 180 kHz. Ze względu na wiele podobieństw między LTE-Advanced i IEEE 802.16m, nie jest zaskakujące, że oceny wydajności wskazują na porównywalną wydajność obu technologii interfejsu radiowego. Tak więc, podobnie jak LTE-Advanced, IEEE 802.16m może również spełniać wszystkie wymagania dla IMT-Advanced zdefiniowane przez ITU. W październiku 2010 r. WiMAX Release 2.0 oparty na IEEE 802.16m, wraz z LTE-Advanced, został zatwierdzony przez ITU-R jako jeden z dwóch standardów IMT-Advanced pod nazwą WirelessMAN-Advanced. WiMAX został wprowadzony na rynek znacznie wcześniej niż LTE i był lepszą technologią pod względem przepustowości danych przez kilka lat (2005–2009). Poza tym, była pionierem we wdrażaniu technologii sprzed ery 4G, takich jak MIMO i OFDM, oraz obsługiwała nowe funkcje, takie jak zmienne pasma transmisji. Już w 2006 roku dwóch południowokoreańskich operatorów telekomunikacyjnych uruchomiło pierwszą na świecie usługę mobilnego WiMAX opartą na standardzie IEEE 802.16e pod marką WiBro. W październiku 2010 roku WiMAX Forum twierdziło, że wdrożono ponad 592 sieci WiMAX (stacjonarne i mobilne) w ponad 148 krajach, obejmujących ponad 621 milionów ludzi. Jednak LTE było ewolucją dominujących standardów (tj. GSM i WCDMA), podczas gdy WiMAX było stosunkowo przełomową technologią bez dużej bazy użytkowników. W rezultacie główni operatorzy komórkowi, tacy jak Verizon, Vodafone, China Mobile, NTT i Deutsche Telekom, zdecydowali się na płynną modernizację swojej starszej infrastruktury z 3G do LTE, zamiast przyjmować nowy standard technologiczny. Ostatecznie LTE/LTE-Advanced pokonało konkurencję i stało się dominującym standardem 4G. Dzięki LTE/LTE-Advanced świat osiągnął uniwersalny globalny standard komunikacji mobilnej, wdrożony przez praktycznie wszystkich operatorów sieci komórkowych na całym świecie i mający zastosowanie zarówno w pasmach sparowanych, jak i niesparowanych.

5G: Od człowieka do maszyny

Technologia 5G została zbudowana na sukcesie 4G LTE, a eksploracja 5G rozpoczęła się przed pełnym wdrożeniem 4G. Niektóre z najwcześniejszych wysiłków w kierunku technologii 5G rozpoczęły się na początku lat 2010., co wykazało wykonalność technik, które można by przyjąć. W sierpniu 2012 r. Uniwersytet Nowojorski założył wielodyscyplinarne akademickie centrum badawcze znane jako NYU Wireless, aby rozwijać podstawowe teorie i pionierskie prace nad bezprzewodową komunikacją 5G. Kluczowym celem była komunikacja w milimetrowych falach (mmWave) działająca w pasmach wysokich częstotliwości powyżej 10 GHz. Uzyskał wiele osiągnięć badawczych, takich jak pierwsze na świecie pomiary kanałów radiowych, które udowodniły potencjał widma mmWave i wykazały bezpieczeństwo promieniowania mmWave dla ludzkiego ciała. Zaledwie dwa miesiące po założeniu NYU Wireless, University of Surrey w Wielkiej Brytanii ogłosił utworzenie nowego centrum badawczego 5G, finansowanego wspólnie przez rząd brytyjski i konsorcjum kluczowych operatorów komórkowych i dostawców, takich jak Huawei, Samsung, Telefonica, Fujitsu i Rohde&Schwarz. W listopadzie 2012 r. rozpoczęto projekt badawczy zatytułowany Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS) finansowany przez Komisję Europejską [Osseiran i in.,

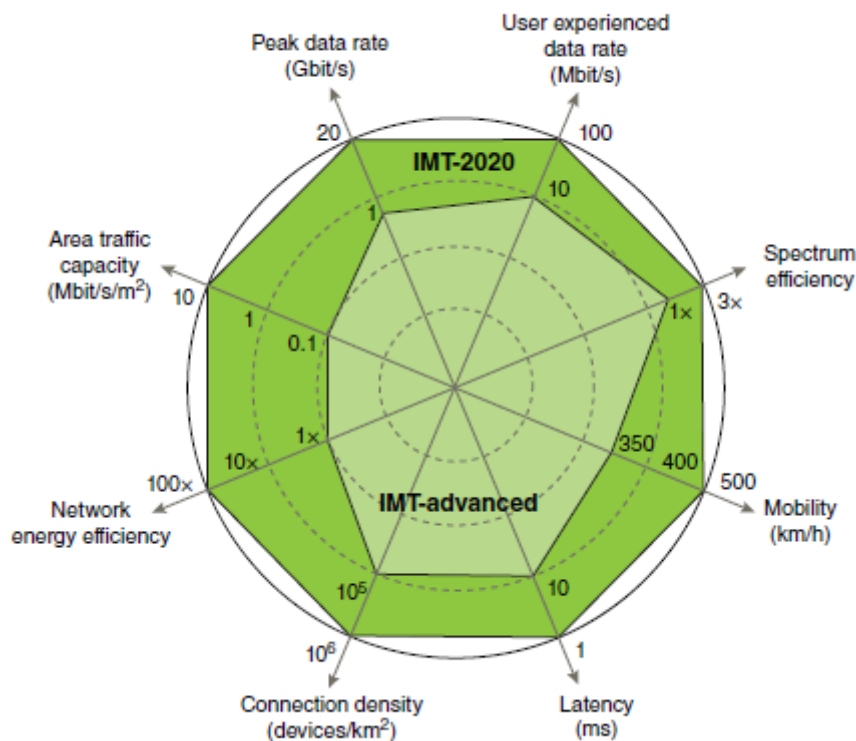
2014]. METIS osiągnął wczesny globalny konsensus co do obrazu tego, czym będzie 5G, przed globalnymi działaniami standaryzacyjnymi, takimi jak ITU-R i 3GPP.

Sieć komórkowa dla człowieka i maszyny

W przeciwieństwie do poprzedniej generacji systemów komórkowych, które koncentrowały się wyłącznie na usługach komunikacyjnych zorientowanych na człowieka, 5G musi rozszerzyć sferę komunikacji mobilnej z człowieka na rzeczy, z konsumentów na branżę pionowe i z sieci publicznych na prywatne. Potencjalna skala subskrypcji mobilnej znacznie się powiększyła z zaledwie miliardów światowej populacji do niemal niezliczonej łączności między ludźmi, maszynami i rzeczami. Umożliwia ona szeroką gamę przypadków użycia, takich jak Przemysł 4.0, rzeczywistość wirtualna, Internet rzeczy i jazda automatyczna. 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 obsługiwać różne scenariusze użytkowania i aplikacje wykraczające poza poprzednie systemy IMT. Ponadto szeroka gama możliwości byłaby ściśle powiązana z tymi zamierzonymi różnymi scenariuszami użytkowania i aplikacjami, jak pokazano na rysunku 1.6. 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 adresuje przypadki użycia zorientowane na człowieka w celu dostępu do treści multimedialnych, usług, chmury i danych. Wraz z rozprzestrzenieniem się inteligentnych urządzeń (smartfonów, tabletów i elektroniki noszonej) oraz rosnącym zapotrzebowaniem na strumieniowe przesyłanie wideo, zapotrzebowanie na mobilny szerokopasmowy nadal rośnie, wyznaczając nowe wymagania dla tego, co ITU-R nazywa eMBB. Ten scenariusz użycia wiąże się z nowymi przypadkami użycia i wymaganiami dotyczącymi ulepszonych możliwości i coraz bardziej płynnego doświadczenia użytkownika. eMBB obejmuje różne przypadki, w tym zasięg rozległy i punkty aktywne, które mają różne wymagania. W przypadku punktu aktywnego, 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 mobilności są pożądane w przypadku zasięgu rozległego, ze znacznie poprawioną szybkością transmisji danych niż istniejące szybkości transmisji danych. Jednak wymagania dotyczące szybkości transmisji danych mogą być złagodzone w porównaniu z punktami aktywnymi.
- Ultra-niezawodna komunikacja o niskim opóźnieniu (URLLC): Ten scenariusz ma na celu wsparcie 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 aplikacji bezprzewodowych o znaczeniu krytycznym dla misji, 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 rozproszone 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 Internetu rzeczy (IoT).

Oczekiwano, że IMT-2020 zapewni znacznie bardziej rozbudowane możliwości niż IMT-Advanced. Ponadto IMT-2000 można rozpatrywać z wielu perspektyw, w tym użytkowników, producentów, deweloperów aplikacji, operatorów sieci oraz dostawców usług i treści. Dlatego też uznaje się, że technologie dla IMT-2020 można stosować w różnych scenariuszach wdrażania i mogą one obsługiwać szereg środowisk, możliwości usług i opcji technologicznych. Na podstawie scenariuszy użytkowania i aplikacji opisanych jako Rekomendacja M.2083, ITU-R zdefiniował zestaw wymagań dotyczących wydajności technicznej. W listopadzie 2017 r. ITU wydał Rekomendację M.2410 Minimalne wymagania dotyczące wydajności technicznej interfejsu radiowego IMT-2020 [ITU-R M.2410, 2017] jako punkt wyjścia do oceny technologii kandydatów IMT-2020. Oprócz szczytowych szybkości transmisji danych 20 Gb/s w łączy w dół i 10 Gb/s w łączy w górę, zgodnie z tradycją oferowania wyższych szybkości transmisji, ustanowiono szereg nowych kluczowych wskaźników wydajności (KPI), takich jak niezawodność, efektywność energetyczna i gęstość połączeń. Kluczowe możliwości IMT-2020 przedstawiono na rysunku,



w porównaniu z możliwościami IMT Advanced. Tabela zawiera podsumowanie tych wymagań dotyczących wydajności.

KPI	Minimum performance requirement
Peak data rate	Downlink: 20 Gbps Uplink: 10 Gbps
Peak spectral efficiency	Downlink: 30 bps/Hz Uplink: 15 bps/Hz
User-experienced rate	Downlink: 100 Mbps Uplink: 50 Mbps
5th-percentile user Spectral efficiency	Downlink: 0.12–0.3 bps/Hz Uplink: 0.045–0.21 bps/Hz
Average spectral efficiency	Downlink: 3.3–9 bps/Hz Uplink: 1.6–6.75 bps/Hz
Area traffic capacity	10 Mbps/m ² (indoor hot spot)
User plane latency	4 ms – eMBB 1 ms – URLLC
Control plane latency	20 ms
Connection density	1 000 000 devices per km ²
Energy efficiency	The support for two aspects: (1) Efficient data transmission in a loaded case (2) Low energy consumption when there is no data
Reliability	1–10 ⁻⁵ (99.999%)
Mobility	up to 500 km/h
Mobility interruption time	0 ms
Maximal bandwidth	100 MHz for sub-6 GHz 1 GHz for mmWave

Kolejnym kamieniem milowym dla rozwoju 5G była identyfikacja widma omawianego na Światowej Konferencji Radiowej. Na WRC-15 zidentyfikowano nowy zestaw pasm częstotliwości poniżej 6 GHz (np. 470–694, 694–790 i 3300–3400 MHz) dla IMT na skalę globalną. Konferencja ta wyznaczyła również punkt programu na następną WRC-19 w celu identyfikacji wyższego widma powyżej 24 GHz dla usług mobilnych IMT-2020. Na podstawie badań przeprowadzonych przez ITU-R po WRC-15, WRC-19 zauważył, że aplikacje o bardzo niskim opóźnieniu i bardzo wysokiej przepustowości danych wymagają większych, ciągłych bloków widma. W rezultacie, w sumie 13,5 GHz widma składającego się z zestawu pasm wysokiej częstotliwości zostało przydzielonych do wdrożenia komunikacji 5G mmWave:

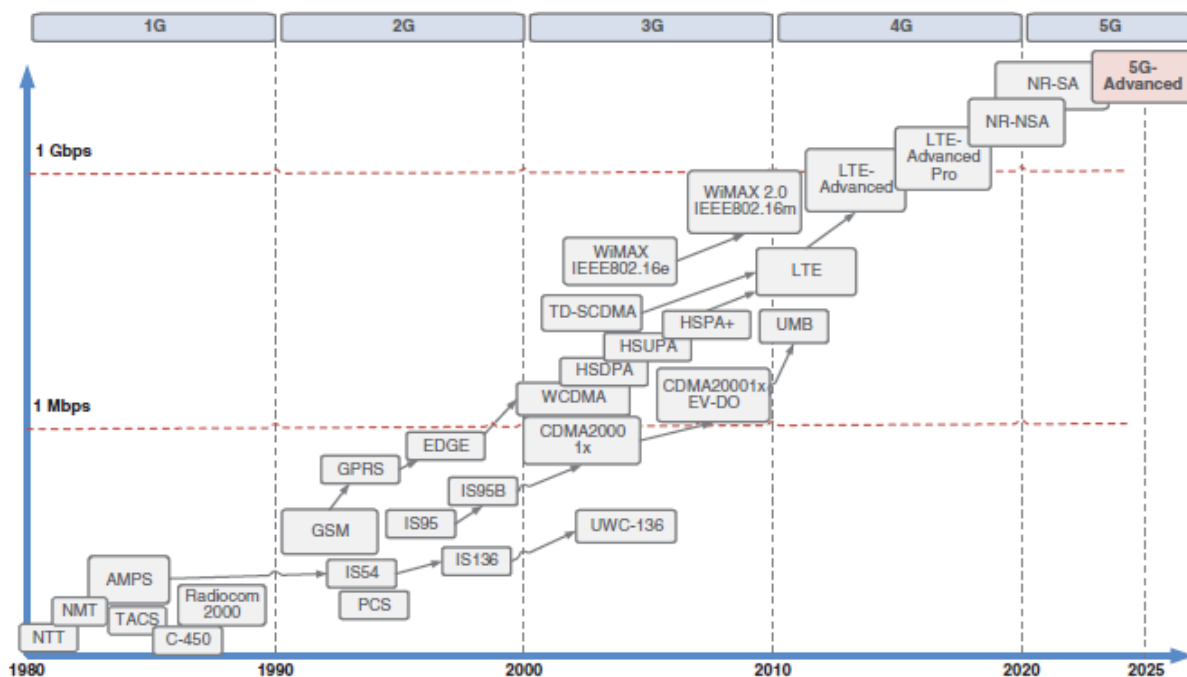
- 24,25–27,5 GHz
- 37–43,5 GHz
- 45,5–47 GHz
- 47,2–48,2 GHz
- 66–71 GHz

Po zdefiniowaniu ram IMT-2020 przez ITU-R i pasm częstotliwości zidentyfikowanych przez WRC, zadanie określenia szczegółowych technologii spadło na organy normalizacyjne. W przeciwieństwie do sprzecznych ścieżek technicznych i wielu organów normalizacyjnych w poprzednich generacjach, 3GPP odegrało dominującą rolę podczas rozwoju technologii 5G. Jego specyfikacje techniczne, które zostały zorganizowane jako wydania, działały faktycznie jako standardy de facto. Już w 2015 r. grupa 3GPP RAN zdecydowała się utworzyć element badania w wydaniu 14 dla 5G New Radio (NR) i zainicjowała zadanie modelowania kanałów dla pasm częstotliwości powyżej 6 GHz. Specyfikacja początkowego 5G NR została przeprowadzona za pośrednictwem elementu roboczego w wydaniu 15. Aby spełnić wymagania komercyjne dotyczące wczesnych prób na dużą skalę i wdrożeń w 2018 r., wcześniej niż pierwotnie przewidywany harmonogram około 2020 r., 3GPP zobowiązało się do przyspieszenia procesu, zgadzając się, że wariant Non-Standalone (NSA) zostanie sfinalizowany wcześniej. Pod koniec 2017 r. dostępna była pierwsza wersja specyfikacji 5G. W takim wdrożeniu NSA interfejs radiowy NR jest podłączony do istniejącej sieci rdzeniowej EPC, dzięki czemu pojemności oferowane przez NR (mniejsze opóźnienie itp.) są dostępne bez wymiany sieci. Pierwsze na świecie połączenie 5G NSA zostało wspólnie wykonane w Hiszpanii przez Vodafone i Huawei, tuż przed Mobile World Congress, który rozpoczął się 26 lutego 2018 r. Po początkowym dostarczeniu NSA, większość wysiłków 3GPP została przeniesiona na terminowe ukończenie Release 15, aby utworzyć pierwszy kompletny zestaw standardów 5G. Dlatego też 3GPP opracowało również nową sieć rdzeniową zwaną siecią 5G Core (5GC) równoległe z technologią dostępu radiowego NR. W czerwcu 2018 r. dostępna była ostateczna wersja Release 15, która może obsługiwać działanie Standalone (SA) 5G NR, co oznaczało zakończenie fazy 1 5G. Release 15 koncentrował się głównie na eMBB i (w pewnym stopniu) URLLC, podczas gdy mMTC był nadal obsługiwany przy użyciu technologii komunikacji maszynowej opartych na LTE, takich jak eMTC i NB-IoT. Wersja 15 stanowiła podstawę, na której 3GPP kontynuuje prace nad rozwijaniem możliwości i funkcjonalności 5G, aby obsługiwać nowe spektrum i nowe aplikacje oraz dalej ulepszać istniejące podstawowe funkcje. Ewolucja 5G NR była kontynuowana w wersji 16, często nieformalnie nazywanej „5G Phase 2”, która została ukończona w czerwcu 2020 r. Funkcje techniczne zostały dodane do 5G NR w celu obsługi Przemysłowego Internetu Rzeczy (IIoT) i ulepszenia aplikacji URLLC. Ta wersja miała na celu spełnienie wymagań IMT-2020 i wraz z wersją 15 działała jako początkowe kompletne specyfikacje 3GPP 5G przesłane do ITU-R. Ostateczna propozycja 3GPP obejmowała dwa oddzielne i niezależne zgłoszenia, zdefiniowane jako pojedyncza technologia interfejsu radiowego (RIT) i połączone zestawy technologii interfejsu radiowego (SRIT). W listopadzie 2020 r. ITU-R ogłosiło, że 3GPP 5G-SRIT i 3GPP 5G-RIT są zgodne z wizją IMT-2020 i rygorystycznymi wymaganiami dotyczącymi wydajności. W chwili pisania tego tekstu 3GPP pracuje nad wydaniem 17, trzecią wersją 5G, z toczącym się harmonogramem ukończenia etapu 2 w 2021 r. i etapu 3 w 2022 r. Wydanie 17 jest prawdopodobnie najbardziej wszechstronnym wydaniem w historii 3GPP pod względem liczby funkcji technicznych, jak pokazano na rysunku 1.8. 3GPP ogłosiło również ewolucję 5G w kierunku 5.5G z oficjalną nową nazwą 5G-Advanced, która zostanie ujednolicona w wydaniu 18 i kolejnych. W kwietniu 2019 r., gdy trzech południowokoreańscy operatorzy komórkowi – SK Telecom, LG U+ i KT – oraz amerykański Verizon spierali się o to, kto jest pierwszym na świecie dostawcą usług komunikacyjnych 5G, wkroczyliśmy w erę 5G. W ciągu ostatnich dwóch lat byliśmy świadkami silnej ekspansji sieci 5G na całym świecie i dużego 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. Tymczasem termin 5G pozostaje jednym z najgorętszych haseł w mediach, przyciągając bezprecedensową uwagę całego społeczeństwa. Wykroczył nawet poza sferę technologii i gospodarki, stając się punktem centralnym napięć eopolitycznych. Kiedy zaczynamy pisać tę książkę, ponad 400 operatorów komórkowych w około 130 krajach inwestuje w sieci 5G, a liczba abonentów 5G osiąga już bardzo dużą skalę w wielu regionach. W 2020 r. wybuch pandemii COVID-19 prowadzi do dramatycznej utraty życia

ludzkiego na całym świecie i nakłada bezprecedensowe wyzwania na działalność społeczną i gospodarczą. Jednak ten kryzys zdrowia publicznego podkreśla wyjątkową rolę sieci i infrastruktury cyfrowej w utrzymaniu funkcjonowania społeczeństwa i łączności rodzin, zwłaszcza wartości usług i aplikacji 5G, takich jak zdalny chirurg, edukacja online, praca zdalna, pojazdy bez kierowców, dostawy bezałogowe, roboty, inteligentna opieka zdrowotna i autonomiczna produkcja.

Poza 5G

Obecnie 5G jest nadal w trakcie wdrażania na całym świecie, ale nadszedł już czas, aby środowisko akademickie i przemysł przeniosły swoją uwagę poza 5G lub systemy szóstej generacji (6G), aby zaspokoić przyszłe zapotrzebowanie na technologie informacyjno-komunikacyjne (ICT) w 2030 r.



Chociaż 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, zainicjowano kilka pionierskich prac nad sieciami bezprzewodowymi nowej generacji. W lipcu 2018 r. w ramach sektora normalizacji Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (ITU-T) powołano grupę fokusową o nazwie Technologies for Network 2030. Grupa zamierza zbadać możliwości sieci na rok 2030 i kolejne lata [ITU-T NET-2030, 2019], kiedy to spodziewane jest wsparcie nowych, przyszłościowych scenariuszy, takich jak komunikacja holograficzna, wszechobecna inteligencja, Internet dotykowy, doświadczenie wielozmysłowe i cyfrowy bliźniak. Komisja Europejska zainicjowała sponsorowanie działań badawczych wykraczających poza 5G, zgodnie z jej ostatnimi zaproszeniami 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 dla kluczowych technologii 6G. Komisja Europejska ogłosiła również swoją strategię przyspieszenia inwestycji w europejską „Gigabit Connectivity”, w tym 5G i 6G, aby kształtować cyfrową przyszłość Europy [EU Gigabit Connectivity, 2020]. W październiku 2020 r. Next Generation Mobile Networks (NGMN) uruchomiło 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. sektor ITU-R postanowił rozpocząć badanie przyszłych trendów technologicznych dla przyszłej ewolucji International Mobile Telecommunications (IMT) [ITU-R WP5D, 2020]. W Finlandii Uniwersytet w Oulu

rozpoczął przełomowe badania nad 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. Poza tym inni tradycyjni główni gracze w dziedzinie komunikacji mobilnej, tacy jak Stany Zjednoczone, Chiny, Niemcy, Japonia i Korea Południowa, już oficjalnie rozpoczęli badania nad 6G lub przynajmniej ogłosili swoje ambicje i wstępną mapę drogową.

Wnioski

Jako punkt wyjścia ta część to przegląda ewolucji systemów mobilnych od systemów przedkomórkowych do najnowszych sieci komórkowych 5G. Treść została zorganizowana pod kątem generacji systemów mobilnych. Każda sekcja poświęcona jest jednej generacji systemów komórkowych, gdzie główna treść składa się zazwyczaj z trzech głównych części: (i) Podstawowa motywacja ewolucji; (ii) Kamienie milowe rozwoju i wdrożenia; oraz (iii) Porównawczy przegląd różnych standardów technicznych. Celem jest zapewnienie czytelnikowi ogólnego poglądu na wszystkie poprzednie generacje i ścieżkę ewolucji, aby mógł on dobrze zrozumieć najnowocześniejsze postępy w nadchodzącym systemie 6G.