

## Technologia przed 6G i ewolucja systemu

Poprzednia część omawiała historię komunikacji mobilnej, od systemów przedkomórkowych do najnowszych sieci piątej generacji. Czytelnicy uzyskali więc pełny obraz sił napędowych rozwoju każdej generacji, konkurencji między sprzecznymi technologiami, reprezentatywnych aplikacji i usług na generację, konkurencyjnych standardów i ich odpowiednich ścieżek ewolucji, działań standaryzacyjnych, regulacji widma i wdrażania komercyjnego. Jednak te fragmenty wiedzy nie są wystarczające, aby uzyskać wgląd w przyszły trend technologiczny w kierunku komunikacji mobilnej szóstej generacji. Aby zasypać tę lukę, ta część zapewni dogłębne badanie poprzednich generacji z perspektywy technologicznej. Symboliczny standard, który osiągnął dominującą pozycję komercyjną na rynku światowym i przyjął technologie głównego nurtu w tamtym czasie, jest uważany za reprezentujący każdą generację. W rezultacie zostaną wprowadzone: Advanced Mobile Phone System dla pierwszej generacji, GSM dla drugiej generacji, WCDMA dla trzeciej generacji, LTE dla czwartej generacji i New Radio dla piątej generacji. Ta część zostanie zorganizowana chronologicznie pod względem generacji, a każda sekcja poświęcona jest jednej generacji systemów komórkowych. Po przeczytaniu tego powinieneś być w stanie:

- Zrozumieć ogólną architekturę reprezentatywnego systemu komórkowego dla każdej generacji, w tym główne elementy sieci, podział funkcjonalności, połączenia, interakcje i przepływy operacyjne.
- Zidentyfikować główne technologie dla każdej generacji i poznać podstawowe zasady, korzyści i wyzwania tych technologii.
- Uzyskać wgląd w identyfikację niezbędnych technologii i synergię tych technologii w celu zbudowania systemu komórkowego.

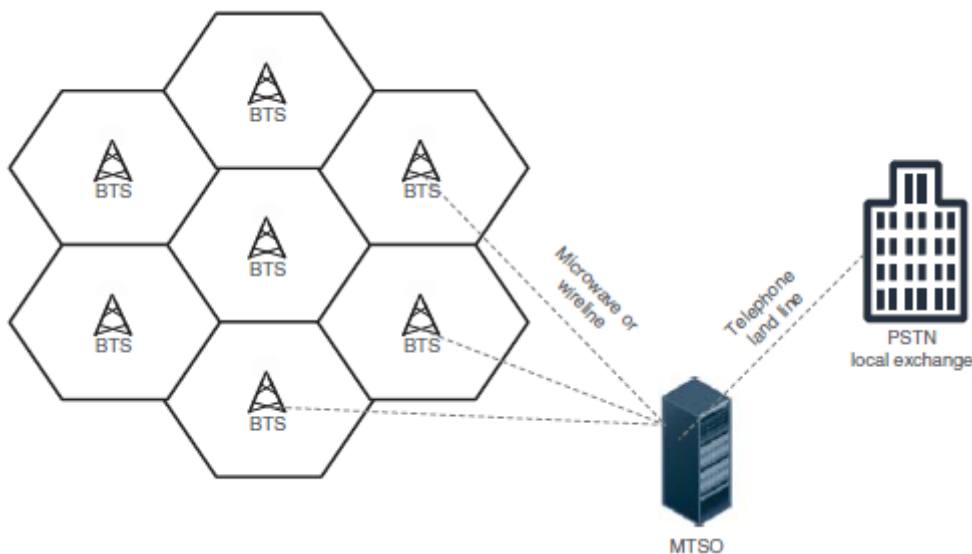
### 1G – AMPS

Jako najbardziej wpływowy standard 1G, Advanced Mobile Phone System (AMPS) został opracowany w USA, głównie przez Bell Labs, zainspirowany mocno przeciążonym systemem IMTS. Powstał na podstawie pierwotnej koncepcji sieci 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 sieci komórkowej. W 1978 r. Bell Labs przeprowadziło szeroko zakrojone i w pełni operacyjne testy, współpracując z Illinois Bell Telephone Co., American Telephone and Telegraph Co. i Western Electric Co. System testowy składał się z 10 komórek obejmujących obszar około 3000 mil kwadratowych w obszarze Chicago, IL, mając na celu zapewnienie pojemności dla ponad 2000 użytkowników. Dopiero w 1983 r. wydano licencje na działalność komercyjną, kiedy Federal Communications Commission (FCC) przydzieliła początkowo pasmo 40 MHz (później zwiększone do 50 MHz) dla analogowych sieci komórkowych. W AMPS zakres częstotliwości 824–849 MHz zastosowano do transmisji wstecznej, a zakres 869–894 MHz do transmisji do przodu. Współdzielenie widma, w szczególności określane jako wielokrotny dostęp w komunikacji bezprzewodowej, jest realizowane poprzez multipleksowanie wymiarów sygnalizacji wzdłuż domeny czasu, częstotliwości, kodu lub przestrzeni. System AMPS przyjął technikę wielokrotnego dostępu z podziałem częstotliwości (FDMA) w celu podzielenia całego widma na zestaw ortogonalnych kanałów częstotliwości o szerokości pasma 30 kHz. Dwóch licencjobiorców znanych jako nośniki A i B z różnymi kanałami zostało wydanych w regionie geograficznym w celu zachęcenia do konkurencji. Innymi słowy, łącznie 416 sparowanych kanałów składających się z 21 kanałów sterujących i 395 kanałów głosowych było dostępnych dla każdego nośnika. Sygnały mowy są modulowane analogicznie poprzez zastosowanie modulacji częstotliwości (FM). Każdy kanał sterujący może być powiązany z grupą kanałów głosowych. W ten sposób każdy zestaw kanałów głosowych może być podzielony na grupy 16

kanałów, kontrolowane przez inny kanał sterujący. Chociaż AMPS jest analogowym systemem komórkowym, kanały sterujące były już zdigitalizowane. Sygnalizacja była przesyłana między stacją bazową a stacjami mobilnymi z szybkością transmisji danych 10 kbps. Dane sygnalizacyjne były modulowane cyfrowo przy użyciu Frequency-Shift Keying (FSK) i kodowania Manchester w celu korekcji błędów.

### Architektura systemu

Oprócz stacji mobilnych, typowa sieć AMPS składa się z dwóch głównych komponentów: stacji bazowej transceivera (BTS) i biura przełączania telefonii komórkowej (MTSO). Jej architekturę zilustrowano na rysunku.



BTS jest zazwyczaj umieszczany w centrum komórki i zawiera transceivery do przesyłania i odbierania sygnałów radiowych oraz sprzęt transmisyjny podłączony do MTSO. Lokalne przetwarzanie, takie jak nawiązywanie połączeń, monitorowanie połączeń, lokalizowanie stacji mobilnej i kończenie połączeń, odbywa się w BTS. Wszystkie stacje bazowe w obszarze geograficznym są połączone z MTSO za pośrednictwem szybkich łączy przewodowych lub mikrofalowych. Główną rolą MTSO jest wykonywanie funkcji przełączania w celu zapewnienia połączenia z publiczną siecią telefoniczną (PSTN). Odpowiada również za obsługę ogólnej kontroli sieci, przydzielanie kanałów w każdej komórce, koordynowanie przekazywania międzykomórkowego, gdy stacja mobilna przekracza granicę komórki, kierowanie połączeń do i od użytkowników mobilnych oraz wykrywanie usterek systemu. MTSO zazwyczaj kontroluje wszystkie stacje mobilne w obszarze usług metropolitalnych. Wdrożenie AMPS tymczasowo złagodziło ograniczenia pojemnościowe usług telefonii komórkowej, ale wykazywało również wiele wad. Na przykład system cierpiał z powodu nieefektywnego wykorzystania widma. Zastosowano współczynnik ponownego wykorzystania częstotliwości wynoszący 7, tj. wszystkie kanały są podzielone na siedem grup, aby uniknąć zakłóceń międzykomórkowych (ICI) między sąsiednimi komórkami. W rezultacie pojemność komórki była zbyt ograniczona, aby pomieścić dużą liczbę aktywnych użytkowników. Ponadto AMPS nie zapewniał wystarczającej ochrony bezpieczeństwa, w której informacje identyfikacyjne telefonu, takie jak ESN (Electronic Serial Number) lub CTN (Cellular Telephone Number), mogą być klonowane za pomocą fałszywej stacji bazowej i nielegalnie ponownie wykorzystywane w innych lokalizacjach. Wywołało to potrzebę bardziej wydajnego, wydajnego i solidnego systemu. Następcą AMPS był system cyfrowy o nazwie Digital Advanced Mobile Phone

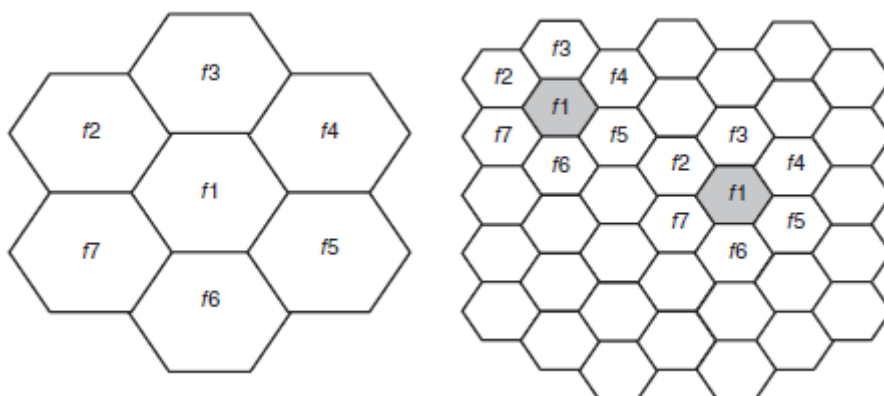
System (D-AMPS). Pojemność została zwiększona poprzez przyjęcie techniki dostępu wielokrotnego z podziałem czasu (TDMA) w celu jednoczesnej obsługi trzech użytkowników na każdym kanale 30 kHz i cyfrowej kompresji danych głosowych. D-AMPS odziedziczył tę samą podstawową architekturę i protokół sygnalizacyjny od swojego poprzednika, ułatwiając płynne przejście z systemów analogowych na cyfrowe. Stacje mobilne D-AMPS mogą początkowo uzyskać dostęp do sieci za pośrednictwem tradycyjnych kanałów sterujących AMPS, a następnie zażądać cyfrowego kanału głosowego, jeśli taki kanał jest dostępny lub pozostać w trybie analogowym. D-AMPS został również nazwany IS-54, a później IS-136 przez Electronics Industries Association and Telecommunication Industries Association (EIA/TIA), jako pierwszy amerykański cyfrowy standard komórkowy 2G.

### **Kluczowe technologie**

We wczesnych systemach telefonii komórkowej stacja bazowa zazwyczaj obejmowała szeroki obszar o średnicy kilkudziesięciu kilometrów, montując antenę na dużej wysokości i przesyłając sygnały radiowe o dużej mocy. Wszyscy użytkownicy telefonii komórkowej w tym zasięgu dzielili przydzielone widmo, co prowadziło do ograniczonej pojemności. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na abonamenty komórkowe, potrzeba wydajnego, ekonomicznego i przenośnego systemu sprzyjała narodzinom koncepcji komórkowej. W 1947 r. William Rae Young, inżynier pracujący w AT&T Bell Labs, przedstawił swój pomysł na heksagonalny układ komórek w każdym mieście, tak aby każdy telefon komórkowy mógł połączyć się z co najmniej jedną komórką. Douglas H. Ring, również w AT&T Bell Labs, rozwinął koncepcję Younga. Naszkicował podstawowy projekt standardowej sieci komórkowej i opublikował intelektualne podstawy jako notatkę techniczną zatytułowaną Mobile Telephony – Wide Area Coverage 11 grudnia 1947 r. [Ring, 1947]. Dwoma podstawowymi cechami systemu komórkowego są ponowne wykorzystanie częstotliwości i podział komórek,

### **Ponowne wykorzystanie częstotliwości**

Ponieważ moc sygnału drastycznie maleje wraz z odległością propagacji, to samo widmo częstotliwości można ponownie wykorzystać w lokalizacjach oddzielonych przestrzennie. Jeśli odległość jest wystarczająco duża, zakłócenia współkanałowe nie są niepożądane. Stacje bazowe o umiarkowanej mocy rozpraszają się po całym obszarze zasięgu, a każda stacja bazowa obejmuje pobliską strefę zwaną komórką. Radio i telewizja nadawały już przez ponowne wykorzystanie częstotliwości przed pojawieniem się sieci komórkowej. Niemniej jednak ta ostatnia wymaga dwukierunkowej komunikacji między stacjami mobilnymi a siecią przekazującą spersonalizowane wiadomości, a nie wspólne informacje, co narzuca zasadniczą różnicę w konstrukcji systemu. Podziel dostępne widmo na  $N$  wąskopasmowych kanałów o szerokości pasma  $W/N$  Hz na kanał. Każda komórka otrzymuje  $n$  kanałów, a kanały przydzielone komórce niekoniecznie są ciągłe. Ten sam kanał nie jest ponownie wykorzystywany w sąsiednich komórkach w celu zmniejszenia zakłóceń współkanałowych. Współczynnik  $N/n$  oznacza, jak często kanał może być ponownie wykorzystywany i jest nazywany współczynnikiem ponownego wykorzystania częstotliwości (w niektórych publikacjach używa się  $n/N$  jako współczynnika ponownego wykorzystania). W typowym układzie heksagonalnym, jak pokazano na rysunku



, współczynnik ponownego wykorzystania wynosi 7, gdzie kanały są podzielone na siedem grup oznaczonych jako {f 1, f 2, f 3, f 4, f 5, f 6, f 7}. Dzięki ponownemu wykorzystaniu częstotliwości, co siedem sąsiadujących komórek, czasami nazywanych klastrem, wykorzystuje całe spektrum do świadczenia usług mobilnych. W zależności od geometrii układu komórkowego i wzorca unikania zakłóceń, współczynnik ponownego wykorzystania może być różny. Sieć AMPS wybrała współczynnik 7, a GSM współczynnik 3, podczas gdy system Code Division Multiple Access (CDMA) wdrożył uniwersalne ponowne wykorzystanie częstotliwości. Dzięki pomocy zaawansowanych technik tłumienia zakłóceń, całe spektrum zostało maksymalnie ponownie wykorzystane w każdej komórce ze współczynnikiem 1.

### Podział komórek

Na początkowym etapie sieć komórkowa preferowała wykorzystanie tylko kilku dużych komórek, aby pokryć całe miasto lub region. Obszar zasięgu tej dużej komórki wynosi co najmniej kilka kilometrów kwadratowych, określany jako makrokomórka. Stacje bazowe były zwykle instalowane na wysokich budynkach lub górach i transmitowały z relatywnie dużą mocą. Taki układ był głównie determinowany przez dwa czynniki: wysoki koszt stacji bazowych i niską gęstość subskrypcji mobilnych. Gdy zapotrzebowanie na ruch w danym obszarze ulega nasyceniu, bezpośrednim rozwiązaniem jest uzyskanie większej przepustowości. Jednak licencjonowane spektrum jest nie tylko drogie, ale również całkowicie niedostępne w niektórych regionach. Alternatywnym rozwiązaniem w celu dalszego zwiększenia przepustowości bez dodatkowego spektrum jest zmiana granic komórek, tak aby obszar wcześniej objęty pojedynczą komórką mógł teraz podzielić się na wiele komórek. Ten proces nazywa się podziałem komórek. Jak pokazano na rysunku, obszar objęty siedmioma komórkami może podzielić się na kilka klastrow. Wdrażając większą liczbę stacji bazowych o mniejszej mocy nadawczej, można ponownie wykorzystać zasoby widmowe {f 1, f 2, f 3, f 4, f 5, f 6, f 7} w każdym klastrze.

### Sektoryzacja

Moc sygnału stacji bazowej wyposażonej w antenę dookólną była emitowana równomiernie pod wszystkimi kątami. Zainspirowana podziałem obszaru na komórki w celu poprawy wydajności widma, komórka jest dalej dzielona na mniejsze obszary zwane sektorami. W 1985 roku Philip T. Porter zaproponował zastosowanie anten kierunkowych w stacjach bazowych. Jego propozycja może zmniejszyć zakłócenia, aby umożliwić wzorzec ponownego wykorzystania siedmiu komórek. Sektoryzacja zapewnia skuteczną metodę dalszego zwiększania pojemności systemu bez budowania nowych lokalizacji lub infrastruktury sieciowej. Używając trzech zestawów anten kierunkowych 120°, pojemność komórki można teoretycznie potroić. Sektoryzacja jest skuteczna, gdy stacja bazowa jest

wysoka i ma niewiele otaczających przeszkód, podczas gdy staje się znacznie mniej skuteczna w warunkach większego rozproszenia i reflektorów z powodu zakłóceń międzysektorowych. Techniki ponownego wykorzystania częstotliwości i podziału komórek umożliwiają sieci komórkowej pokrycie szerokiego obszaru i obsługę dużej liczby użytkowników mobilnych przy użyciu ograniczonego przydziału widma. Podział komórek umożliwia również skalowalną sieć dostosowującą się do wzrostu ruchu mobilnego i różnej gęstości przestrzennej. Obszary o niskim zapotrzebowaniu mogą być obsługiwane przez duże komórki, podczas gdy obszary o wysokim zapotrzebowaniu mogą być obsługiwane przez małe komórki. Jednak sieć komórkowa stwarza nowy problem – gdy użytkownik mobilny przemieszcza się z jednej komórki do drugiej, jakość komunikacji spada. Aby zagwarantować doświadczenie użytkownika, połączenie musi być przekazywane (nazywane również przekazywaniem) między dwiema komórkami bezproblemowo.

### **Przekazanie**

Każda stacja bazowa nadaje sygnał radiowy o stałej mocy. Sygnały z różnych stacji bazowych są różnicowane poprzez zastosowanie pseudolosowych sekwencji. Częstotliwość nośna, format sygnału, moc i pseudolosowe sekwencje są określone z góry i znane wszystkim stacjom mobilnym w sieci. Stacja mobilna okresowo mierzy siłę sygnału otaczających stacji bazowych. Jeśli znajduje się w centrum komórki, sygnał radiowy tej komórki jest silny, podczas gdy inne są słabe. Na skraju komórki stacja mobilna może odbierać kilka sygnałów radiowy o podobnej sile. Jednak w obu przypadkach stacja mobilna może wybrać najlepszą komórkę o najsilniejszej sile sygnału, aby uzyskać do niej dostęp, jeśli kontrola dostępu tej komórki pozwala jej na skojarzenie. Gdy stacja mobilna oddala się od tej komórki, zmierzona siła sygnału spada. Gdy jest poniżej wstępnie zdefiniowanego progu wymaganego do minimalnej akceptowalnej wydajności, uruchamiana jest procedura przekazania. Zaangażowane stacje bazowe i kontroler pomagają stacji mobilnej zwolnić zajęty kanał w komórce wychodzącej i dostroić się do nowego kanału w komórce przychodzącej. Oprócz kluczowych technik organizacji sieci komórkowych, inną ważną technologią wspierającą systemy 1G była technologia FDMA.

### **Wielodostęp z podziałem częstotliwości**

W przeciwieństwie do systemów radiowych i telewizyjnych nadających wspólne sygnały w sposób jednokierunkowy, komunikacja mobilna jest dwukierunkowa z dedykowanymi wiadomościami dla różnych użytkowników. Taki system wielodostępny wymaga przydzielenia zasobów konkretnym użytkownikom, co nazywa się wielodostępem. Aplikacje w czasie rzeczywistym, takie jak komunikacja głosowa lub wideo, wymagają dedykowanych kanałów, aby zapewnić, że transmisja sygnału nie zostanie przerwana. Ortogonalne techniki kanałowania, takie jak podział częstotliwości, podział czasu, podział przestrzeni lub kombinacje hybrydowe, są stosowane w celu generowania dedykowanych kanałów. Natomiast usługi odporne na opóźnienia, np. dostarczanie danych w trybie bursty, zazwyczaj przyjmują nieortogonalny wielokrotny dostęp znany jako dostęp losowy. Systemy 1G, takie jak AMPS, Nordic Mobile Telephony (NMT), Total Access Communication System (TACS) i C-450, stosowały FDMA do wielodostępu, w którym przepustowość systemu jest dzielona wzdłuż osi częstotliwości na ortogonalne kanały. Każdy użytkownik otrzymuje dedykowany kanał bez zakłóceń wielu użytkowników, a jeśli indywidualny kanał jest wąskopasmowy, nie występuje selektywne zanikanie częstotliwości. Z powodu upośledzeń, takich jak niedoskonały sprzęt, rozprzestrzenianie się widma z powodu przesunięcia Dopplera i wyciek widma sąsiedniego kanału, kanał FDMA musi używać pasm ochronnych po obu stronach. Prowadzi to do marnowania zasobów widmowych. Na przykład każdemu użytkownikowi AMPS przydzielany jest kanał 30 kHz, co odpowiada 24 kHz dla transmisji sygnału FM i 3 kHz pasmom ochronnym po każdej stronie. Terminal potrzebuje również częstotliwościowo elastycznych komponentów częstotliwości radiowej (RF), które mogą dostroić się do różnych kanałów.

## **2G – GSM**

Niezgodność różnych systemów europejskich utrudniała podróżnym z krajów europejskich korzystanie z ciągłej usługi komunikacyjnej za pomocą jednego telefonu analogowego. Zmotywowało to do 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 Groupe Special Mobile (pierwotne znaczenie GSM) w celu koordynacji prac rozwojowych. Od 1982 do 1985 r. 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 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 roku 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 roku. Oprócz najbardziej 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 roku premier Finlandii 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. Osiągnął niezwykle sukces komercyjny, z globalnym udziałem w rynku przekraczającym 90%. Na początku 2004 roku ponad miliard ludzi w ponad 200 krajach i terytoriach korzystało z usług telefonii komórkowej dzięki GSM.

### **Architektura systemu**

Ogólny system GSM składa się z czterech komponentów: podsystemu stacji mobilnej (MSS), podsystemu stacji bazowej (BSS), podsystemu sieci i przełączania (NSS) oraz podsystemu obsługi i wsparcia (OSS). Każdy podsystem zawiera różne jednostki funkcjonalne, które są wzajemnie połączone za pomocą określonych interfejsów.

#### **Podsystem stacji mobilnej**

Sprzęt MSS to sprzęt mobilny, który obsługuje połączenia głosowe, wiadomości SMS i dostęp do danych o niskiej prędkości dla abonentów. Numer seryjny zwany Międzynarodowym Identyfikatorem Sprzętu Mobilnego (IMEI) jest stosowany w celu jednoznacznej identyfikacji stacji mobilnej. Ponadto karta inteligentna znana jako moduł identyfikacji abonenta (SIM) przechowuje Międzynarodowy Identyfikator Abonenta Mobilnego (IMSI) w celu identyfikacji abonenta, tajny klucz do uwierzytelniania i inne informacje o abonencie. Mobilność użytkowników mobilnych jest obsługiwana, ponieważ IMEI i IMSI są niezależne.

#### **Podsystem stacji bazowych**

BTS i kontroler stacji bazowej (BSC) tworzą BSS. Pierwszy zawiera anteny do promieniowania i odbioru fal elektromagnetycznych, transceivery do generowania i wykrywania sygnałów radiowych oraz sprzęt do szyfrowania i deszyfrowania komunikacji z BSC. BTS jest zwykle instalowany w centrum komórki przy użyciu jednego lub większej liczby transceiverów pod względem gęstości użytkowników. Jest to najbardziej skomplikowana część systemu, wyposażona w drogie i energochłonne komponenty RF, takie jak:

- Łącznik, który łączy wiele kanałów w jedną antenę
- Wzmacniacz mocy, który wzmacnia sygnał transmisyjny
- Duplexer, który umożliwia dwukierunkową (dupleksową) komunikację.

BSC zarządza zasobami radiowymi dla jednego lub większej liczby BTS i kontroluje wstęp użytkownika, konfigurację kanału radiowego, przekazywanie między BTS i przeskakiwanie częstotliwości.

### **Podsystem sieciowy i przełączający**

Główną rolą NSS jest wykonywanie funkcji przełączania w celu zapewnienia połączenia dla obsługujących stacji mobilnych z innymi użytkownikami mobilnymi i użytkownikami telefonii stacjonarnej w kierunku PSTN. Zapewnia również funkcjonalności umożliwiające obsługę potrzeb użytkowników mobilnych, takie jak uwierzytelnianie, rejestracja, aktualizacja lokalizacji, przekazywanie połączeń międzycentralowych (MSC) i kierowanie połączeń. MSC działa jako centralny komponent NSS, z pomocą zestawu baz danych przechowujących informacje o abonentach i mobilności, które są opisane w następujący sposób:

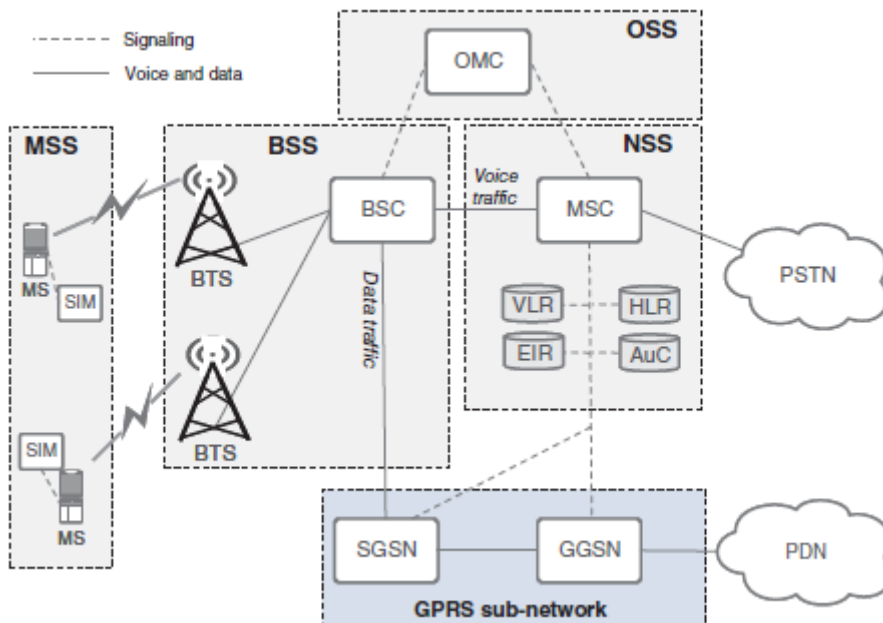
- Rejestr lokalizacji domowej (HLR) to krytyczna baza danych, która zawiera dane administracyjne wszystkich abonentów należących do obszaru usług. Przechowywane informacje dla każdego abonenta obejmują IMSI, numer telefonu, klucz uwierzytelniania, listę subskrybowanych usług i pewne tymczasowe dane, takie jak bieżąca lokalizacja, w której terminal mobilny był ostatnio zarejestrowany. Po włączeniu terminal rejestruje się w sieci i ustala, z którym BTS komunikuje się, aby połączenia przychodzące mogły być odpowiednio kierowane. Nawet gdy terminal jest nieaktywny (ale włączony), okresowo raportuje, aby upewnić się, że sieć jest świadoma jego najnowszej lokalizacji.
- Rejestr lokalizacji odwiedzających (VLR) to baza danych, która przechowuje informacje o odwiedzających abonentach. Gdy MSC wykryje nową stację mobilną w swoim obszarze usług, VLR powiązany z tą MSC żąda niezbędnych informacji od HLR lub stacji mobilnej. Informacje o abonencie, takie jak IMSI, klucz uwierzytelniania, numer telefonu i adres jego HLR, są wyodrębniane w celu zapewnienia subskrybowanych usług i kierowania połączeń.
- Centrum uwierzytelniania (AuC) przechowuje kopię tajnego klucza każdego abonenta potrzebnego do uwierzytelniania i szyfrowania przez kanał radiowy. Gdy stacja mobilna próbuje połączyć się z siecią, AuC musi uwierzytelnić walidację swojej karty SIM. Podczas komunikacji dostarcza również klucz szyfrowania w celu zaszyfrowania danych między telefonem komórkowym a siecią rdzeniową (CN).
- Rejestr tożsamości sprzętu (EIR) jest również używany w celach bezpieczeństwa. Prowadzi katalog wszystkich prawidłowych terminali w sieci zidentyfikowanych przez jego IMEI. EIR może zakazać połączeń z nieprawidłowymi terminalami, które są zarejestrowane jako skradzione lub nieautoryzowane.

### **Podsystem obsługi i wsparcia**

OSS to jednostka funkcjonalna ułatwiająca operatorowi sieci monitorowanie i zarządzanie systemem. Centrum obsługi i konserwacji (OMC) to sprzęt, który łączy się z różnymi komponentami w systemie przełączającym i BSC. OMC odpowiada za funkcje takie jak administracja operacyjna (subskrypcja, zakończenie, naliczanie opłat i statystyki), zarządzanie bezpieczeństwem, konfiguracja sieci, monitorowanie wydajności i konserwacja.

### **Usługa General Packet Radio**

Obsługa General Packet Radio Services (GPRS) została określona w wersji Release'97 standardu GSM [3GPP TS23.060, 1999]. Została ona zaimplementowana poprzez nałożenie podsieci z przełączaniem pakietów na starszą sieć z przełączaniem obwodów, jak pokazano na rysunku.



Sieć GSM może płynnie uaktualnić się, aby obsługiwać usługi danych, takie jak przeglądanie Internetu, dostęp do protokołu Wireless Application Protocol (WAP) i usługę wiadomości multimedialnych (MMS) poprzez dodanie kilku nowych węzłów i oprogramowania. Wprowadzono dwa rodzaje węzłów, tj. węzeł obsługi GPRS (SGSN) i węzeł obsługi GPRS Gateway (GGSN), aby obsługiwać routing i właściwe ulepszanie pakietów danych. SGSN SGSN w podsieci z przełączaniem pakietów pełni taką samą rolę jak MSC dla ruchu głosowego w sieci z przełączaniem obwodów. SGSN obsługuje stacje mobilne za pośrednictwem stacji bazowych i łączy się z GGSN w celu uzyskania dostępu do sieci zewnętrznych. Zapewnia funkcje takie jak:

- Zarządzanie mobilnością: Gdy stacja mobilna podłącza się do sieci z przełączaniem pakietów, SGSN generuje informacje o zarządzaniu mobilnością zgodnie z bieżącą lokalizacją stacji mobilnych. SGSN śledzi ruch zarejestrowanej stacji mobilnej i przekazuje przychodzące pakiety na przybliżony adres.
- Zarządzanie sesją: SGSN zarządza inicjowaniem, utrzymywaniem i kończeniem sesji danych w czasie rzeczywistym lub nie i zapewnia mechanizmy gwarantujące wymaganą jakość usług (QoS) dla różnych usług danych.
- Przełączanie: SGSN przekazuje przychodzące i wychodzące pakiety danych z BSC i GGSN. Komunikuje się również z innymi obszarami sieci, np. MSC i innymi obszarami z przełączaniem obwodów, aby uzyskać niezbędne informacje dotyczące zarządzania.
- Naliczanie opłat: SGSN jest również odpowiedzialny za naliczanie opłat i zbieranie statystyk poprzez monitorowanie przepływu danych użytkownika w sieci GPRS. SGSN generuje rekord szczegółów połączeń dla podmiotów naliczających opłaty.

### Węzeł obsługi bramy GPRS

Obsługuje współpracę z zewnętrznymi sieciami danych pakietowych, takimi jak Internet lub sieci X.25 i jest połączony z sieciami SGSN za pośrednictwem sieci szkieletowej GRPS. Z perspektywy sieci



zewnętrznej jest to router. Ten węzeł obsługuje funkcjonalność bramy, taką jak publikowanie adresów abonentów, mapowanie adresów, routing i tunelowanie pakietów, przesiewanie wiadomości i zliczanie pakietów. Pakiety GPRS z sieci SGSN są konwertowane do odpowiedniego formatu danych (np. IP lub X.25) w sieci GGSN, a następnie są przekazywane do zewnętrznej sieci danych. Format przychodzących pakietów danych jest konwertowany w sieci GGSN i przekazywany do sieci SGSN powiązanej z docelową stacją mobilną.

### **Kluczowe technologie**

W porównaniu z systemem analogowym 1G, system 2G oferował znacznie większą pojemność systemu, ulepszoną jakość usług, zapewnianie bezpieczeństwa i wydajne wykorzystanie widma. Digitalizacja systemu komórkowego ułatwiła przyjęcie zaawansowanych technik, które wcześniej były trudne do zastosowania. Główne technologie 2G są krótko omówione w następujący sposób:

### **Wielodostęp z podziałem czasu**

TDMA dzieli wymiary sygnalizacji wzdłuż osi czasu na kanały ortogonalne. Każdy użytkownik transmituje przez całą szerokość pasma, ale cyklicznie uzyskuje dostęp do przypisanego przedziału czasowego. Oznacza to nieciągłą transmisję, co upraszcza projekt systemu, ponieważ niektóre przetwarzanie, takie jak szacowanie kanału, można wykonać w przedziałach czasowych innych użytkowników. Inną zaletą jest to, że system jest w stanie przypisać wiele przedziałów czasowych dla jednego użytkownika, ułatwiając wdrożenie wysokich szybkości transmisji danych. Jednym z głównych wyzwań w systemie TDMA jest synchronizacja kanału łącza w górę. Sygnały przesyłane od użytkowników rozdzielonych przestrzennie powodują różne opóźnienia propagacji. Ponadto użytkownicy mobilni mogą się poruszać w sposób ciągły, a środowisko propagacji wielościeżkowej również się zmienia, co utrudnia osiągnięcie synchronizacji kanału łącza w górę. Szerokość pasma kanału TDMA jest na ogół większa niż kanału FDMA w poprzednim systemie analogowym. Jeśli szerokość pasma sygnału przekracza spójną szerokość pasma kanału bezprzewodowego, wzrasta interferencja międzysymbolowa (ISI), dlatego w odbiorniku wymagany jest korektor, aby skompensować ISI. System GSM wykorzystywał technikę TDMA połączoną z FDMA jako schemat dostępu wielokrotnego. Oryginalnemu systemowi GSM przydzielono sparowane pasma częstotliwości o szerokości pasma 25 MHz każde: 890–915 MHz dla transmisji w górę i 935–960 MHz dla kierunku w dół. Ustawiając pasma ochronne między GSM a innymi systemami działającymi w sąsiednim paśmie, pozostała szerokość pasma jest dzielona, przy użyciu schematu FDMA, na łącznie 124 kanały o szerokości 200 kHz. Kanał TDMA multipleksuje osiem przedziałów czasowych przy użyciu schematu TDMA. Każdy przedział czasowy ma czas trwania około 0,577 ms, a zawartość przenoszona w przedziale czasowym nazywana jest serią. Aby skompensować błąd synchronizacji i rozproszenie opóźnienia wielościeżkowego, okres ochronny jest wstawiany na końcu każdego przedziału. Zdefiniowano kilka typów burstów dla różnych funkcji, w tym normal burst, frequency correction burst, synchronization burst, access burst i dummy burst. Osiem burstów o łącznej długości 4,615 ms tworzy ramkę TDMA, która powtarza się cyklicznie.

### **Przeskakiwanie częstotliwości**

Aby złagodzić wpływ zakłóceń wąskopasmowych i ISI spowodowanych kanałami wielodrogowymi, skutecznym narzędziem jest technika rozproszonego widma. Można zastosować dwie metody, tj. sekwencję bezpośrednią i przeskakiwanie częstotliwości, aby rozproszyć sygnał na szerokości pasma znacznie większej niż szerokość oryginalnego sygnału. Technologia przeskakowania częstotliwości została wynaleziona przez gwiazdę filmową Hedy Lamarr i kompozytora George'a Antheila podczas II wojny światowej i opublikowana w ich patencie Secret communication system. Przesyłany sygnał przeskakuje na szeroką szerokość pasma poprzez ciągłą zmianę częstotliwości nośnej. Syntezator

częstotliwości w nadajniku generuje przeskakujące nośne częstotliwości zgodnie z pseudoprzypadkową sekwencją zwaną kodem rozpraszającym. W odbiorniku ten sam kod rozpraszający jest wprowadzany do syntezy częstotliwości w celu wygenerowania nośnych częstotliwości w celu konwersji w dół odebranych sygnałów. Jeśli czas przeskoku przekracza okres symbolu, nazywa się to wolnym przeskakiwaniem częstotliwości. W przeciwnym razie jest to szybki przeskok częstotliwości, gdy czas przeskoku jest krótszy niż okres symbolu. GSM przyjął powolne przeskakiwanie częstotliwości, wykorzystując wrodzoną zwinność częstotliwości transceiverów, które mogą nadawać i odbierać na różnych kanałach. Częstotliwość nośna zmienia się co ramkę TDMA z określoną szybkością 217 razy na sekundę.

### **Kompresja mowy**

Podstawową usługą świadczoną we wczesnych systemach mobilnych była transmisja głosu. W systemie 1G sygnał mowy był modulowany analogowo. Digitalizacja 2G wymagała również digitalizacji analogowych sygnałów mowy przed transmisją. W przewodowym systemie telefonicznym do kodowania sygnałów mowy w celu multipleksowania przez szybkie linie szkieletowe lub światłowodowe zastosowano modulację impulsową (PCM). PCM ma szybkość kodowania 64 kbps, która jest zbyt wysoka dla transmisji przez interfejs radiowy ze względu na ograniczenia zasobów radiowych. W związku z tym grupa robocza GSM zbadała szereg algorytmów kodowania i syntezy mowy w celu zmniejszenia redundancji dźwięków głosu. Na podstawie subiektywnej jakości mowy, opóźnienia przetwarzania, zużycia energii i złożoności ostatecznym wyborem kodeka mowy GSM jest RPE-LTP (Regular Pulse Excitation Long-Term Prediction). Wykorzystuje on szereg poprzednich próbek do przewidywania bieżącej próbki. Sygnał mowy jest próbkowany co 20 ms, aby uzyskać 260-bitowe bloki danych, co odpowiada szybkości kodowania 13 kbps.

### **Kodowanie kanału**

System 1G cierpiał na gorszą jakość głosu, ponieważ indukowany szum i zakłócenia w analogowym sygnale transmitowanym nie mogą zostać odfiltrowane. Cyfrowy system 2G umożliwił przyjęcie kodowania kanału w celu poprawy wydajności (system AMPS zastosował kodowanie kanału, ale tylko dla kanału sterującego). W przeciwieństwie do kodowania mowy, które próbuje skompresować ilość danych tak nisko, jak to możliwe, kodowanie kanału celowo dodaje bity redundancji do oryginalnych informacji w celu wykrycia lub skorygowania błędów powstałych podczas transmisji. Na przykład w GSM bity mowy są chronione na różnych poziomach, w zależności od ich ważności. Kodek mowy terminala GSM generuje blok 260 bitów co 20 ms. Z perspektywy użytkowników postrzegana jakość mowy zależy bardziej od pewnej części tego bloku niż od każdego bitu w równym stopniu. W konsekwencji blok jest dzielony na trzy części: Klasa Ia: 50 bitów – najważniejsze, Klasa Ib: 132 bity – umiarkowanie ważne i Klasa II: 78 bitów – najmniej ważne. Najpierw, Cyclic Redundancy Code (CRC) jest dodawany na końcu Klasy Ia w celu wykrywania błędów. Te 53 bity, wraz z Klasą Ib i 4-bitową sekwencją ogonową, co daje łącznie 189 bitów, są wprowadzane do kodera splotowego z szybkością  $1/2$  i długością ograniczenia 4. Pozostałe bity w Klasie II są dodawane do zakodowanej sekwencji bez żadnej ochrony. Na koniec, każdy 20-milisekundowy sygnał mowy jest przekształcany w blok transmisyjny o długości 456 bitów, co daje szybkość kodowania 22,8 kbps. Ponadto, aby dodatkowo zabezpieczyć się przed błędami serii, typowymi dla interfejsu radiowego, blok transmisyjny jest przeplatany.

### **Modulacja cyfrowa**

Modulacja cyfrowa ma wiele zalet w porównaniu z modulacją analogową, w tym wysoką wydajność widmową, wysoką wydajność energetyczną, odporność na uszkodzenia kanału, zwiększone bezpieczeństwo i prywatność oraz tańszą implementację sprzętową. Mówiąc konkretnie, modulacja

cyfrowa wysokiego poziomu, taka jak M-ary Quadrature Amplitude Modulation (MQAM), oferuje znacznie wyższe szybkości transmisji przy tej samej szerokości pasma sygnału niż modulacja analogowa. Cyfrowy transceiver może stosować zaawansowane techniki, takie jak kodowanie kanału, korekcja i rozproszone widmo, aby oprzeć się uszkodzeniom sprzętu, zanikaniu kanału, szumom i zakłóceniom. Bity informacji przenoszone w konstelacjach modulacji są znacznie łatwiejsze do zaszyfrowania niż sygnały analogowe, co zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa i prywatności. System GSM przyjął Gaussian Modulation Shift Keying (GMSK) w celu modulacji bitów informacji. Został on wybrany spośród innych schematów modulacji jako kompromis między wydajnością widmową, złożonością nadajnika i ograniczoną emisją niepożądaną. GMSK to sygnał o stałym module (stały sygnał obwiedni), który redukuje problemy spowodowane nieliniowym zniekształceniem wzmacniacza mocy. Jako ulepszenie GSM, Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) zastosowało kluczkowanie przesunięcia fazowego wyższego rzędu (8PSK) w celu zwiększenia szybkości transmisji danych.

### **Transmisja nieciągła (DXT)**

Zasada DXT polega na zawieszeniu transmisji sygnału w czasie zwanym okresem ciszy, biorąc pod uwagę fakt, że osoba mówi zazwyczaj mniej niż 50% podczas rozmowy. Istotne korzyści obejmują redukcję zakłóceń współkanałowych między komórkami ponownie wykorzystującymi ten sam kanał, niskie zużycie energii, zwiększoną pojemność systemu i wydłużoną żywotność baterii. Do wdrożenia tej funkcji wymagane były dwa główne komponenty, tj. wykrywanie aktywności głosowej (VAD) i generator szumu komfortu. VAD został zastosowany w celu odróżnienia szumu od głosu, nawet gdy jest on trywialny. Jeśli sygnał głosu zostanie zidentyfikowany jako szum, nadajnik jest wyłączany, co powoduje nieprzyjemny efekt zwany przycinaniem. W okresie wyłączania nadajnika panuje absolutna cisza z powodu cyfrowej sygnalizacji. Subiektywne postrzeganie użytkowników może być bardzo irytujące po stronie odbioru, ponieważ wydaje się, że połączenie się rozłącza. Aby przezwyciężyć ten problem, odbiornik musi wygenerować mały sygnał komfortu, aby naśladować szum tła.

### **3G – WCDMA**

Pod koniec lat 90. NTT DoCoMo opracowało technologię Wideband CDMA dla swojego systemu 3G znaną jako Freedom of Mobile Multimedia Access (FOMA). Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) zdefiniował tylko część interfejsu powietrznego, dlatego też nazywany jest Universal Terrestrial Radio Access (UTRA). WCDMA został wybrany jako interfejs powietrzny UMTS, jako następcza 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 Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny Radiokomunikacji Sector (ITU-R) zatwierdził go jako część rodziny standardów IMT-2000. Zastosowano w nim bezpośrednią sekwencję kodu z wielokrotnym dostępem z podziałem kodowym o szybkości układu scalonego 3,84 Mcps. Specyfikacje dostępu radiowego przewidywały zarówno warianty Frequency Division Duplex (FDD), jak i Time Division Duplex (TDD), wykorzystując kanał 5 MHz w celu osiągnięcia szczytowych prędkości 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 widmo 3G i musieli płacić ogromne opłaty na aukcjach. Na przykład operatorzy komórkowi w Wielkiej Brytanii wydali 33 miliardy dolarów na aukcję w kwietniu 2000 r., a 47,5 miliarda dolarów 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,

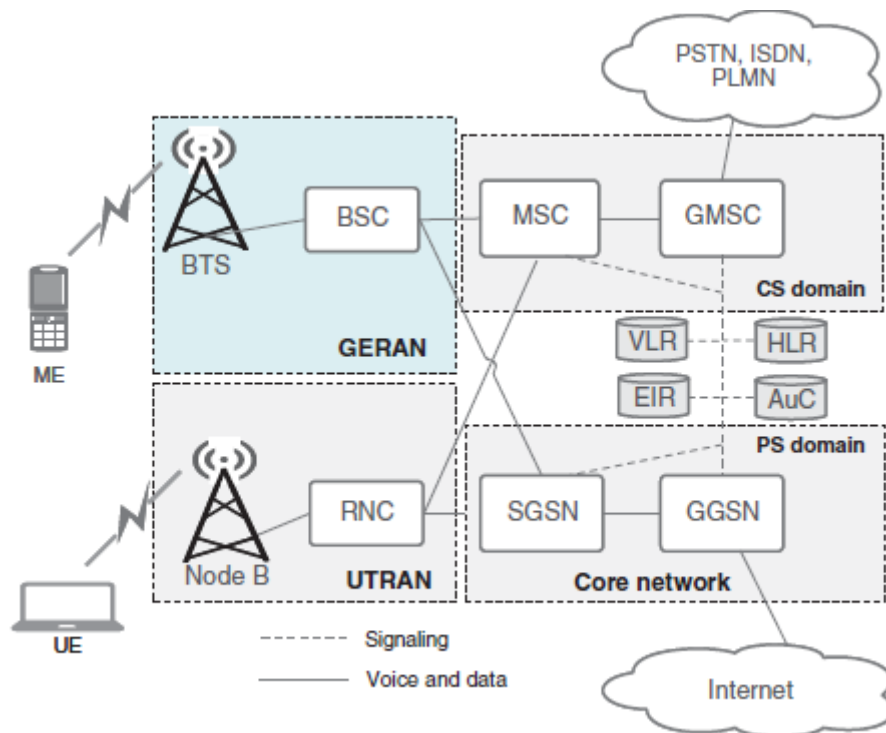
aby spełnić wymagania IMT-2000, ale dalsze udoskonalanie nigdy się nie skończyło. High Speed Packet Access (HSPA) pojawił się w 2002 r. jako pierwsza znacząca ewolucja interfejsu radiowego WCDMA.

### Architektura systemu

Elementy sieciowe WCDMA są podzielone na trzy główne grupy: Urządzenia użytkownika (UE), Sieć dostępu radiowego UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN), która zajmuje się interfejsami radiowymi, oraz CN, która jest głównie odpowiedzialna za przełączanie połączeń głosowych i kierowanie pakietów danych do i z sieci zewnętrznych. Podczas początkowego wdrożenia WCDMA niektóre jednostki CN entity zostały bezpośrednio odziedziczone z GSM, co miało na celu płynne przejście. Natomiast część radiowa starszej sieci GSM została nazwana GSM EDGE Radio Access Network (GERAN).

### Sprzęt użytkownika

Ze względu na znacznie większą liczbę obsługiwanych aplikacji i funkcjonalności, stworzono nowy termin UE zamiast tego, co wcześniej nazywano telefonem komórkowym lub telefonem komórkowym.



Może to być dowolne urządzenie pomiędzy telefonem komórkowym do rozmów głosowych a komputerem bez możliwości komunikacji głosowej. UE składa się z dwóch części: terminala mobilnego używanego do komunikacji radiowej oraz modułu UMTS Subscriber Identity Module (USIM), który przechowuje identyfikator abonenta, klucze uwierzytelniania i szyfrowania oraz informacje o subskrypcji.

### UMTS Terrestrial Radio Access Network

UTRAN składa się z jednego lub więcej podsystemów sieci radiowej (RNS). RNS składa się z szeregu stacji bazowych zwanych Węzłem B i odpowiadającego im kontrolera, tj. Kontrolera sieci radiowej (RNC). Węzeł B jest wyposażony w transceivery radiowe do przetwarzania interfejsu powietrznego i bierze również udział w zarządzaniu niektórymi zasobami radiowymi. Jego główne funkcje obejmują:

- Transmisję i odbiór sygnału radiowego

- Modulację i demodulację
- Rozprzestrzenianie i derozprzestrzenianie
- Kodowanie i dekodowanie kanału
- Synchronizację częstotliwości i czasu
- Sterowanie mocą w pętli zamkniętej

WCDMA to szerokopasmowy system CDMA o sekwencji bezpośredniej, w którym bity informacji użytkownika są rozpraszane na szerokości pasma 5 MHz poprzez mnożenie quasi-losowych chipów rozpraszających kodów. WCDMA może działać w trybie FDD lub TDD. Obsługuje zmienne szybkości transmisji danych, wykorzystując różne kody rozpraszania, a szybkość użytkownika może elastycznie zmieniać się na ramkę z czasem trwania 10 ms. Główne parametry interfejsu radiowego WCDMA są wymienione w tabeli, w porównaniu z parametrami GSM i IS-95.

Parameter	WCDMA	IS-95	GSM
Signal bandwidth	5 MHz	1.25 MHz	200 kHz
Multiple access	DS-CDMA	DS-CDMA	TDMA
Duplex mode	FDD/TDD	FDD	FDD
Chip rate	3.84 Mcps	1.2288 Mcps	N/A
Frame length	10 ms	20 ms	4.615 38 ms
Frequency reuse factor	1	1	3
Power control	Downlink: 1500 Hz Uplink: 1500 Hz	Downlink: 800 Hz Uplink: Slow	Optional, 2 Hz
Peak rate <sup>a)</sup>	2 Mbps	14.4 kbps	9.6 kbps

RNC wykonuje kontrolę zasobów radiowych i pewne zarządzanie mobilnością UTRAN. RNC łączy się z MSC w celu komunikacji głosowej i SGSN w celu dostarczania danych pakietowych. Główne funkcje RNC to:

- Kontrola zasobów radiowych
- Kontrola dostępu
- Przydział kanałów
- Kontrola mocy w pętli otwartej
- Zarządzanie mobilnością
- Szyfrowanie
- Różnorodność makr

### Sieć rdzeniowa

CN sieci UMTS dzieli się na domeny komutowane obwodowo (CS) i komutowane pakietowo (PS). Jest to odpowiednik NSS sieci GSM, zapewniający przełączanie, routing i wszystkie funkcje centralnego przetwarzania i zarządzania. Jest to interfejs do sieci zewnętrznych, w tym PSTN, ISDN, Public Land

Mobile Network (PLMN) i Internetu. Bazy danych, tj. HLR, VLR, AuC i EIR, są współdzielone przez obie domeny i płynnie dziedziczone z sieci GSM.

Domena CS: Opiera się przede wszystkim na elementach sieci GSM zoptymalizowanych do transmisji głosu w sposób komutowany obwodowo, tj. kanał o długim czasie trwania do prowadzenia rozmowy telefonicznej. Funkcje te są realizowane przez MSC (tak samo jak MSC w GSM) i Gateway Mobile Switching Center (GMSC), który jest interfejsem do sieci zewnętrznych.

Domena PS: Jednostki sieciowe w tej domenie są zoptymalizowane do dostarczania danych pakietowych. Obejmuje SGSN i GGSN odziedziczone z sieci GPRS i działające podobnie.

System	1G	2G	3G	4G	5G
Deployment	1979	1991	2000	2009	2019
Data rate	N/A	9.6–384 kbps	2–56 Mbps	1 Gbps	20 Gbps
Frequency band	400 MHz/800 MHz	900 MHz/1800 MHz	Up to 2.1 GHz	Sub-6 GHz	Sub-6 GHz/mmWave
Bandwidth	20 kHz, 30 kHz	200 kHz	5 MHz	20 MHz/100 MHz	400 MHz/1 GHz
Multi-access	FDMA	TDMA	CDMA	OFDMA	OFDMA/NOMA
Duplexing	FDD	FDD	FDD/TDD	FDD/TDD	FDD/TDD
Modulation	FM	GMSK	8PSK	64QAM/256QAM	1024QAM
Channel coding	N/A	Convolutional code	Turbo codes	Turbo/LDPC	LDPC/polar codes
Multi-antenna	N/A	Receive diversity	Beamforming	MIMO 8x8	MIMO 256x32
Networking	Circuit-switched	Circuit-/ packet-switched	Circuit-/ packet-switched	All-IP	All-IP
Service	Analog voice	Digital voice, SMS, low-rate data	VoIP, high-rate data, video	Mobile Internet	eMBB, URLLC, mMTC
Standards	AMPS, NMT, NTT, TACS, C-450, Radiocom2000	GSM, D-AMPS, IS-95	WCDMA, CDMA2000, TD-SCDMA, WiMAX	LTE, LTE-Advanced, WiMAX2.0	NR-NSA, NR-SA, 5G-Advanced
Technologies	Cellular, FDMA, FDD, FM	TDMA, FHSS, GMSK	CDMA, Rake receiver, Turbo Codes	MIMO, OFDM, carrier aggregation, CoMP, relaying, HetNet, D2D, LAA	Massive MIMO, mmWave, SDN/NFV, network slicing, LDPC, polar codes

## Kluczowe technologie

Przejście z komunikacji wyłącznie głosowej do hybrydy usług głosowych i danych narzuciło wiele wyzwań na projekt interfejsu powietrznego i CN. W związku z tym przyjęto nowe technologie, które mogą obsługiwać zaawansowany dostęp wielokrotny, elastyczne współdzielenie zasobów, wysokie i zmienne szybkości transmisji danych oraz ulepszoną wydajność widmową. Spośród kilkunastu technik 3G, CDMA, odbiornik Rake i Turbo Coding zostały uznane za podstawowe czynniki umożliwiające, które przedstawiono w następujący sposób:

### Wielodostęp z podziałem kodu

W systemach wąskopasmowych użytkownicy w komórce przesyłają swoje sygnały przez ortogonalne jednostki zasobów czasowo-częstotliwościowych (poprzez FDMA lub TDMA), a użytkownikom w sąsiednich komórkach przypisuje się różne bloki częstotliwości zgodne z układem komórkowym. W systemie CDMA każdy użytkownik stosuje technikę rozproszenia widma sekwencji bezpośredniej, aby rozproszyć swój sygnał na całą szerokość pasma transmisji poprzez multipleksowanie pseudolosowej sekwencji zwanej kodem rozproszenia. Szerokość pasma transmisji jest znacznie wyższa niż oryginalna szerokość pasma sygnału. Ich stosunek nazywa się wzmocnieniem przetwarzania. Rozproszone sygnały od różnych użytkowników współdzielą jednocześnie tę samą szerokość pasma. Po prostu traktując sygnały innych użytkowników jako losowy szum, pożądany sygnał można wykryć, stosując ten sam kod rozproszenia w odbiorniku. Dzięki ortogonalnym kodom rozproszenia, takim jak kody Walsh-

Hadamarda, sygnały informacyjne różnych użytkowników mogą być dobrze rozdzielone. Nieortogonalne kody rozproszenia są również skuteczne w rozróżnianiu sygnałów wielu użytkowników, ale wzrasta wzajemne zakłócanie. Taka jest zasada wielodostępu z podziałem kodu, umożliwionego przez rozproszone widmo sekwencji bezpośrednio. Oprócz umożliwienia wielokrotnego dostępu, technika rozproszonego widma zapewnia różnorodność częstotliwości, aby przeciwdziałać zanikaniu sygnału wielościeżkowego i zakłóceniom wąskopasmowym. W porównaniu z transmisją sygnału wąskopasmowego, technologia CDMA ma następujące zalety:

- **Uniwersalne ponowne wykorzystanie częstotliwości:** Oznacza maksymalne ponowne wykorzystanie częstotliwości, a mianowicie współczynnik ponownego wykorzystania częstotliwości wynoszący 1. W systemach FDMA lub TDMA interferencji wielu użytkowników unika się poprzez przypisanie ortogonalnych slotów czasowo-częstotliwościowych wszystkim użytkownikom w tej samej komórce i rozłącznych pasm częstotliwości sąsiednim komórkom. Liczba stopni swobody na użytkownika jest znacznie zmniejszona pod względem liczby użytkowników i współczynnika ponownego wykorzystania częstotliwości. W systemie CDMA nie tylko użytkownicy w tej samej komórce, ale także użytkownicy w różnych komórkach, w tym sąsiednich, dzielą te same zasoby czasowo-częstotliwościowe. Oprócz zwiększenia liczby stopni swobody na użytkownika, uniwersalne ponowne wykorzystanie częstotliwości upraszcza również planowanie sieci. Te korzyści wiążą się z niższym stosunkiem sygnału do zakłóceń plus szum (SINR) poszczególnych łączy.

- **Miękkie przekazywanie:** Sąsiednie komórki w systemach wąskopasmowych przypisane do różnych bloków częstotliwości i terminale mobilne mogą dostroić się tylko do jednej częstotliwości nośnej na raz. W konsekwencji terminal musi rozłączyć komórkę wychodzącą przed połączeniem się z nową komórką. Takie twarde przekazanie powoduje przerwanie połączeń głosowych, co było jednym z głównych problemów pogarszających doświadczenia użytkownika w systemach pierwszej i drugiej generacji. Ponieważ sąsiednie komórki używają tej samej częstotliwości w systemie CDMA, użytkownik na skraju komórki może komunikować się z więcej niż jedną stacją bazową jednocześnie. W łączu w górę sygnał użytkownika jest modulowany przez wiele kodów rozpraszających powiązanych z różnymi komórkami, a następnie jest odbierany przez więcej niż jedną stację bazową. Odebrane sygnały są łączone i wykrywane w jednostce centralnej, takiej jak RNC. W łączu w dół ten sam sygnał może być przesyłany do użytkownika przez więcej niż jedną stację bazową jednocześnie. Miękkie przekazanie jest również techniką różnorodności, czasami nazywaną makro różnorodnością.

- **Miękka pojemność:** W systemie wąskopasmowym zasoby czasowo-częstotliwościowe są dzielone na ustaloną liczbę kanałów ortogonalnych. Istnieje ograniczenie twardej pojemności, ponieważ nowi użytkownicy nie mogą zostać dopuszczeni do sieci, gdy wszystkie kanały są zajęte. Używając nieortogonalnych kodów rozpraszania, system CDMA nie ma sztywnego limitu na liczbę użytkowników obsługujących. Im więcej użytkowników dzieli stopnie swobody przy użyciu nieortogonalnych kodów, tym wyższy poziom zakłóceń wielu użytkowników.

- **Współdzielenie zakłóceń:** Przydzielony kanał jest bezczynny w okresie ciszy rozmowy głosowej, gdy on lub ona słucha. Jednak ten kanał nie może być współdzielony z innymi użytkownikami w systemach FDMA lub TDMA. Pojemność systemu CDMA jest ograniczona przez zakłócenia, a liczba kanałów nie ma sztywnego limitu. System CDMA może automatycznie korzystać ze zmienności źródła użytkowników. Gdy użytkownik nie ma sygnału do przesłania, poziom zagregowanych zakłóceń spada, a wydajność innych użytkowników ulega poprawie.

Wydajność systemu CDMA w dużym stopniu zależy od dokładnej kontroli mocy, zwłaszcza w łączu w górę, aby zrekompensować efekt blisko-daleko. Jeśli dwóch użytkowników nadaje z tą samą mocą, siła sygnału pobliskiego użytkownika jest prawdopodobnie o dziesiątki decybeli silniejsza niż użytkownika

na skraju komórki. Dalekiego użytkownika trudno wykryć pożądany sygnał z przytłaczającego wniosku wielu użytkowników. W konsekwencji wymagana jest kontrola mocy, tak aby siła sygnału odbieranego przez wszystkich użytkowników była mniej więcej taka sama. Jednak częste przesyłanie sygnalizacji kontroli mocy wiąże się ze znacznym narzutem. Natomiast kontrola mocy jest opcjonalna w systemach wąskopasmowych i służy do obniżania zużycia energii, a nie zakłóceń.

### **Odbiornik Rake**

Zanikanie wielościeżkowe jest głównym ograniczeniem ograniczającym wydajność transmisji bezprzewodowej, w której kilka opóźnionych kopii przesyłanego sygnału łączy się w odbiorniku. Połączenie jest czasami konstruktywne, ale zwykle destrukcyjne. Ponieważ każdy komponent zawiera oryginalne informacje, idealnym przypadkiem jest dodanie wszystkich komponentów spójnie, aby poprawić moc pożądanego sygnału i zmniejszyć prawdopodobieństwo głębokich zaników. W tym celu można zastosować zaawansowaną strukturę odbiornika zwaną odbiornikiem Rake. Ma ona kilka gałęzi, zwanych palcami, do obsługi różnych ścieżek sygnału. Każdy palec jest zsynchronizowany ze ścieżką sygnału i wyposażony w indywidualny korelator do rozpraszania odebranego sygnału. Wyjścia palców Rake są łączone w celu wykrywania przesyłanych symboli, gdzie można zastosować różne metody, takie jak selektywna kombinacja i kombinacja maksymalnego współczynnika. Bezpośrednia sekwencja CDMA dobrze nadaje się do zastosowania odbioru Rake, ponieważ duża szerokość pasma sygnału umożliwia wysoką rozdzielczość rozróżniania wielu ścieżek. Jest ona szczególnie odpowiednia dla transceivera WCDMA o szerokości pasma sygnału 5 MHz. Odbiór Rake'a jest w istocie techniką różnorodności, którą zaproponowali Price i Green [1958]. Została opisana jako historycznie najważniejszy adaptacyjny odbiornik dla kanałów o zanikaniu wielodrożnym.

### **Kody Turbo**

Zgodnie z teorią informacji losowo wybrany kod o wystarczająco dużej długości bloku może zbliżyć się do pojemności Shannona. Złożoność dekodowania maksymalnego prawdopodobieństwa takiego kodu wzrasta wykładniczo wraz z długością bloku, aż dekodowanie staje się fizycznie nierealne. W połowie lat 90. Berrou, Glavieux i Thitimajshima wynaleźli potężny schemat kodowania, który może przesyłać dane ze współczynnikiem kodowania w ułamku decybeli pojemności Shannona na kanale Gaussa. Ten schemat kodowania łączy równoległe łączenie kodów spłotowych, dużą długość bloku, przeplot i iteracyjne podejścia dekodowania, polegając na wymianie informacji o miękkich decyzjach. Typowy enkoder składa się z dwóch równoległych enkoderów spłotowych i przeplotu. Bity informacji  $m$  łączą się z dwiema sekwencjami bitów parzystości  $X_1$  i  $X_2$ . Jeden koder spłotowy generuje  $X_1$  w kategoriach  $m$ , podczas gdy inny koder spłotowy tworzy  $X_2$  przy użyciu przeplatanych bitów informacji. Połączone dane  $(m, X_1, X_2)$  są przesyłane do odbiornika. Iteracyjne dekodowanie kodów Turbo jest implementowane przez dwa równoległe dekodery, przeplot i deprzeplot. Berrou i Glavieux użyli algorytmu maksymalnego prawdopodobieństwa a posteriori (MAP) do wykonania oszacowania maksymalnego prawdopodobieństwa (ML), uzyskując informacje o niezawodności (miękką decyzją). Mówiąc konkretnie, pierwszy dekodek generuje miarę prawdopodobieństwa  $p(m_1)$  na każdym bicie informacji w oparciu o słowo kodowe  $(m, X_1)$ . Ta miara prawdopodobieństwa jest przekazywana do drugiego dekodera. Następnie inna miara prawdopodobieństwa  $p(m_2)$  jest generowana przez drugi dekodek w kategoriach  $(m, X_2)$  i przekazywana do pierwszego kodera. Ten proces jest iterowany, aż warunek zbieżności osiągnie moment, w którym dekodery w idealnym przypadku ostatecznie zgodzą się na miarę prawdopodobieństwa. Berrou i Glavieux wykazali, że współczynnik błędów bitowych (BER) wynoszący  $10^{-5}$  można osiągnąć dla  $E_b/N_0$  przy 0,5 dB powyżej pojemności Shannona dla 1/2-rate kwadraturowego kluczenia fazowego (QPSK) na kanale Gaussa, a ta luka została później zawężona do 0,35 dB. Kody turbo szybko zyskały szerokie uznanie i wywołały falę badań i rozwoju dotyczących ich projektowania, wdrażania, oceny wydajności i zastosowania w systemach komunikacji cyfrowej.



System CDMA2000 wykorzystywał kodowanie Turbo o szybkości 1/5, które składa się z dwóch identycznych, ośmiostanowych, równoległych, 1/3-rate rekurencyjnych enkoderów splotowych (RSC). Kod ten jest dziurawiony w częstotliwościach od 1/2 do 1/4, a długość przeplotu waha się od 378 do 12 282. Kodowanie Turbo w WCDMA jest podobne do kodowania CDMA2000, z tą różnicą, że dwa kodery Turbo używają różnych pseudolosowych przeplotów.

#### **4G – LTE**

W przeciwieństwie do technologii CDMA stosowanej w systemie 3G, Long-Term Evolution (LTE) przyjął bardziej wydajną technikę wielokrotnego dostępu zwaną Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), która wpłynęła nie tylko na projekt interfejsu radiowego, ale także na strukturę sieciową. W szczególności łącze w dół interfejsu radiowego LTE wykorzystywało OFDMA, a łącze w górę wykorzystywało jego wariant zwany Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA), aby umożliwić niedrogi wzmacniacz mocy po stronie terminala. Po raz pierwszy w systemie mobilnym obsługiwane są wielokrotne pasma sygnału, od 1,4 do 20 MHz, dzięki elastyczności zapewnianej przez modulację OFDM. Przy szerokości pasma 20 MHz szczytowa szybkość transmisji danych może osiągnąć 150 Mb/s przy  $2 \times 2$  multiple-input multiple-output (MIMO) i 300 Mb/s przy  $4 \times 4$  MIMO. Stopnie swobody są podzielone na małe bloki zasobów o częstotliwości 180 kHz w celu elastycznego przydzielania zasobów i planowania pakietów. Różnica między trybami pracy TDD i FDD została zminimalizowana w celu uzyskania dużej wspólnoty. CN przyjęła architekturę IP typu end-to-end zoptymalizowaną pod kątem usług danych z przełączaniem pakietów, podczas gdy tradycyjna usługa głosowa została zastąpiona przez Voice over IP (VoIP).

#### **Architektura systemu**

Oprócz zaawansowanych technik interfejsu powietrznego, duża przepustowość sieci wymaga wydajnej architektury sieciowej. Dlatego zastosowano płaską strukturę poprzez zmniejszenie liczby elementów sieciowych w celu zminimalizowania opóźnień typu end-to-end i poprawy skalowalności sieci. System LTE składa się z trzech podsystemów: UE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) i Evolved Packet Core. Poniżej znajduje się krótkie wprowadzenie do E-UTRAN i Evolved Packet Core (EPC). Rozwinięta uniwersalna sieć dostępu radiowego naziemnego. Sieć dostępu radiowego LTE jest uproszczona, ponieważ zawiera tylko jeden rodzaj elementu sieciowego o nazwie E-UTRAN Node B lub Evolved Node B (eNodeB), w porównaniu z dwoma elementami – Node B i RNC – w UTRAN. Całe przetwarzanie sygnału radiowego, zarządzanie zasobami radiowymi i obsługa pakietów znajdują się w eNodeB. eNodeB działa jako przełącznik, komunikując się z UE, innymi eNodeB i EPC za pośrednictwem różnych interfejsów. Oprócz przetwarzania i przekazywania pakietów danych, odpowiada również za wiele funkcji kontrolnych, które obejmują:

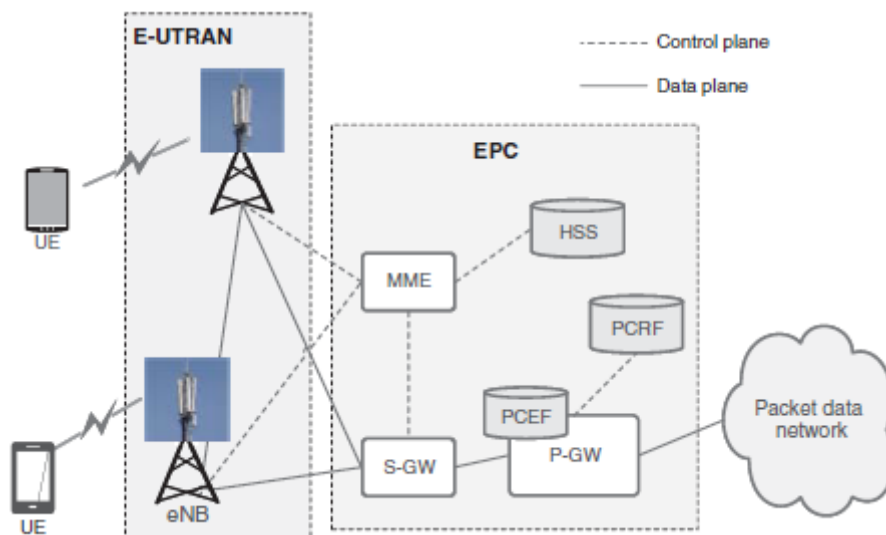
1. Zarządzanie zasobami radiowymi: konfiguracja, konserwacja i zwalnianie nośników radiowych, przydział zasobów radiowych, planowanie i ustalanie priorytetów ruchu oraz monitorowanie wykorzystania zasobów.
2. Zarządzanie mobilnością: przekazywanie międzykomórkowe i pomiar sygnału radiowego
3. Kontrola dostępu: akceptacja lub odmowa żądania dostępu
4. Wybór jednostki zarządzania mobilnością (MME): wybór dostępnej jednostki MME do obsługi UE, umożliwienie UE przesunięcia do innej jednostki MME, ustanowienie trasy do MME
5. Kompresja pakietów: kompresja nagłówka IP dla pakietów łącza w dół w celu wydajnej transmisji radiowej przez interfejs radiowy oraz dekompresja nagłówka IP dla pakietów łącza w górę

6. Szyfrowanie: szyfrowanie i deszyfrowanie pakietów za pomocą algorytmów szyfrujących

7. Przesyłanie wiadomości: transmisja komunikatów stronicowania, komunikatów operacyjnych i administracyjnych lub informacji rozgłoszeniowych, odbiór informacji rozgłoszeniowych i komunikatów stronicowania z jednostki MME.

### Evolved Packet Core

CN LTE przyjęło płaską architekturę z zaledwie kilkoma elementami sieciowymi, umożliwiając niskie opóźnienia od początku do końca i opłacalną transmisję danych pakietowych. Płaszczyzna użytkownika (UP) i płaszczyna sterowania są oddzielone, aby umożliwić skalowanie i niezależne uaktualnianie. Dzięki temu podziałowi funkcjonalnemu operatorzy mogą łatwo wymiarować i dostosowywać swoją sieć. Środkowa część rysunku przedstawia podstawową architekturę Evolved Packet System (EPS), która składa się z następujących elementów sieciowych: Serving Gateway (S-GW), Packet Data Network Gateway (P-GW), MME, Home Subscriber Server (HSS), Policy and Charging Rules Function (PCRF) oraz Policy and Charging Enforcement Function (PCEF).



- S-GW to jednostka UP używana głównie do przekazywania pakietów IP i tunelowania, z minimalnymi funkcjami kontrolnymi. Przekazuje wszystkie przychodzące i wychodzące pakiety IP należące do UE w trybie połączonym między eNodeB i P-GW. Po otrzymaniu pakietów dla UE w trybie bezczynności, S-GW buforuje dane i żąda od MME skonfigurowania stronicowania UE. S-GW może replikować dane monitorowanego użytkownika do władz w przypadku legalnego przechwycenia. Aby obsługiwać zarządzanie mobilnością, S-GW działa jak lokalny punkt zaczepienia mobilności do przekazywania między sąsiadującymi eNodeB. S-GW obsługuje również mobilność między LTE a innymi sieciami przetaczanymi obwodowo.

- P-GW to router brzegowy do łączenia EPC i zewnętrznych sieci danych pakietowych. Kieruje przychodzące i wychodzące pakiety danych i zapewnia łączność z sieciami zewnętrznymi. UE może łączyć się z więcej niż jednym P-GW w celu uzyskania dostępu do sieci danych wielopakietowych (PDN). Gdy UE komunikuje się z innymi hostami IP w sieciach zewnętrznych, P-GW przydziela adres IP UE, wykonując protokół Dynamic Host Configuration Protocol lub wysyłając zapytania do zewnętrznego serwera Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP). Ponadto P-GW obsługuje egzekwowanie zasad, takich jak filtrowanie pakietów i przesiewanie w celu legalnego przechwytywania, oraz zbiera powiązane informacje o opłatach, we współpracy z PCRF i PCEF.

- MME jest głównym elementem płaszczyny sterowania EPC, który ma następujące funkcje:

– Uwierzytelnianie i bezpieczeństwo: Gdy UE rejestruje się w sieci, MME żąda klucza uwierzytelniania od HSS w sieci domowej tego UE i wykonuje uwierzytelnianie typu wyzwanie-odpowiedź, aby upewnić się, że UE jest tym, za kogo się podaje. MME generuje klucz do szyfrowania i ochrony integralności z klucza uwierzytelniania, aby zapobiec podsłuchiowaniu i nieautoryzowanej zmianie. Aby chronić prywatność użytkowników, MME zapewnia każdemu UE tymczasowy identyfikator o nazwie Global Unique Temporary Identity (GUTI), aby ukryć stały identyfikator. – Zarządzanie mobilnością: Kiedy UE rejestruje się w sieci po raz pierwszy, MME tworzy wpis lokalizacji i powiadamia HSS w sieci domowej UE. MME stale śledzi lokalizację UE. Informacje o lokalizacji aktywnego UE znajdują się na poziomie eNodeB, podczas gdy na poziomie obszaru śledzenia (tj. grupy eNodeB) dla UE w trybie bezczynności. MME kontroluje przydział i zwalnianie zasobów dla UE oraz kontroluje procedurę przekazywania.

– Zarządzanie profilem użytkownika: MME odpowiada za pobieranie profilu użytkownika, takiego jak informacje o subskrypcji z sieci domowej. Informacje te decydują, które połączenia PDN powinny zostać przypisane do UE po podłączeniu do sieci.

- HSS to baza danych zawierająca informacje o profilu użytkownika i subskrypcji. Rola HSS jest podobna do kombinacji HLR i Centrum uwierzytelniania w poprzednich sieciach komórkowych. Przechowuje informacje o subskrybowanych usługach, informacje o dozwolonych połączeniach PDN i informacje o zezwoleniu na roaming w określonej sieci. Przechowuje również klucz stały dla lokalnych UE. Klucz jest stosowany do generowania klucza uwierzytelniającego żądanego przez MME sieci odwiedzającej. Ponadto HSS rejestruje lokalizacje użytkowników przy użyciu adresu MME w sieci odwiedzającej.

- PCRF to element sieci CP łączący funkcję reguł rozliczeniowych i funkcję decyzji politycznych. Odpowiada za podejmowanie decyzji dotyczących kontroli polityki i kontrolowanie funkcji rozliczeniowych opartych na przepływie w PCEF. PCRF zapewnia autoryzację QoS, która decyduje o tym, w jaki sposób przepływ danych będzie obsługiwany w PCEF i zapewnia, że jest to zgodne z profilem subskrypcji użytkownika.

- PCEF to element sieci UP zlokalizowany w P-GW. PCEF egzekwuje zasady, które zostały statycznie ustawione lub dynamicznie skonfigurowane przez PCRF. Zapewnia, że przepływy danych są przetwarzane zgodnie z polityką sieciową, a usługi są odpowiednio rozliczane.

### **Kluczowe technologie**

Podstawowymi wymaganiami dla rozwoju LTE były wysoka wydajność widmowa i elastyczność widma. Jako fundament LTE, MIMO i OFDM, zwane także wspólnie MIMO-OFDM, zostały przyjęte jako podstawowy schemat transmisji. Aby sprostać nowym oczekiwaniom, 3GPP stale dodawał ulepszenia do początkowego standardu LTE, z ograniczeniem wstecznej kompatybilności. Aby zapewnić pełną zgodność systemu LTE z wymaganiami IMT-Advanced, LTE-Advanced poprawił elastyczność widma poprzez agregację nośnych (CA), ulepszoną transmisję wieloantenową, dodał obsługę przekazywania i wdrażania sieci heterogenicznej (HetNet). Wersja 11, sfinalizowana pod koniec 2012 r., dodatkowo zwiększyła możliwości LTE. Najbardziej zauważalną cechą wersji 11 były ulepszenia funkcjonalności interfejsu radiowego dla transmisji i odbioru Coordinated Multi-Point (CoMP). W 2014 r. skupiono się na nowych scenariuszach związanych z wprowadzeniem bezpośredniej komunikacji Device-to-Device (D2D) i urządzeń o niskiej złożoności do komunikacji typu maszynowego. W Release 13, który zapoczątkował znaczącą ewolucję zwaną LTE-Advanced Pro, przyjęto License-Assisted Access (LAA) w celu obsługi nielicencjonowanych widm jako uzupełnienia licencjonowanych widm. Poniżej krótko omówiono kluczowe czynniki technologiczne:

- Multi-InputMulti-Output: Ogromny potencjał zademonstrowany przez pionowe wieloantenowe systemy bezprzewodowe Bell Laboratory Layered Space-Time Architecture (V-BLAST) pod koniec lat

90. XX wieku przyciągnął ogromne zainteresowanie technologiami MIMO. Zastosowanie wielu anten umożliwia wykorzystanie domeny przestrzennej jako kolejnego stopnia swobody w celu uzyskania wyższej wydajności widmowej. W środowiskach propagacji o bogatym rozpraszaniu teoretyczna wydajność widmowa skaluje się liniowo przy minimalnej liczbie anten nadawczych i odbiorczych. MIMO może przynieść trzy korzyści:

- **Multipleksowanie przestrzenne:** Jednoczesna transmisja wielu strumieni danych na tej samej częstotliwości za pomocą wielu warstw przestrzennych tworzonych przez wiele anten. W rezultacie uzyskuje się wyższą wydajność widmową.
- **Różnorodność przestrzenna:** Wykorzystanie niezależnych ścieżek propagacji umożliwianych przez wiele anten w celu poprawy niezawodności transmisji sygnału w obliczu efektu wielokrotnego zaniku.
- **Wzmocnienie anteny:** Koncentracja energii nadawczej anteny w określonych kierunkach w celu zwiększenia mocy odbieranych sygnałów i wyeliminowania zakłóceń międzykanałowych.

Technologie MIMO były jednym z filarów transmisji radiowej LTE. Ze względu na ograniczenia sprzętowe, kosztowe i zużycia energii, rozmieszczenie wielu anten na stacji bazowej jest bardziej atrakcyjne i praktyczne. Istnieje wiele schematów transmisji ulti-anten wdrożonych w LTE, tj.

- **Różnorodność transmisji:** Ten schemat MIMO transmituje strumień pojedynczej warstwy przez wiele ścieżek sygnału o niskiej korelacji. Różnorodność przestrzenna jest uzyskiwana za pomocą wystarczająco dużego odstępów między antenami lub różnej polaryzacji anteny. Jest to cenne w przypadku scenariuszy o wysokiej niezawodności, takich jak kanały sterujące i transmisyjne. Różnorodność transmisji w LTE została określona tylko dla dwóch lub czterech anten transmisyjnych. Symbole transmisji można kodować elastycznie za pomocą kodowania bloków przestrzenno-czasowych (STBC), kodowania bloków przestrzenno-częstotliwościowych (SFBC), różnorodności transmisji przełączanej częstotliwościowo (FSTD) lub różnorodności opóźnień cyklicznych (CDD).

- **Kształtowanie wiązki:** Jeśli dostępna jest wiedza o kanałach łącza wstecznego, nadajnik może zapewnić, oprócz różnorodności transmisji, kształtowanie wiązki w celu skoncentrowania energii transmisji w określonych kierunkach. Może zwiększyć siłę odbieranego sygnału o współczynnik proporcjonalny do liczby anten transmisyjnych i odpowiednio tłumić zakłócenia w innych kierunkach. Ten schemat można wdrożyć na antenach o wysokiej korelacji w formie klasycznego kształtowania wiązki lub na antenach o niskiej korelacji, stosując wstępne kodowanie transmisji.

- **Multipleksowanie przestrzenne w pętli otwartej:** Ten schemat MIMO używany w systemie LTE przesyła dwa strumienie danych przez dwie lub więcej anten. Nie ma żadnych informacji o kanale z UE, z wyjątkiem wskaźnika rangi transmisji (TRI) używanego do określania liczby warstw przestrzennych.

- **Multipleksowanie przestrzenne w pętli zamkniętej:** Ukryte informacje o stanie kanału (CSI), takie jak wskaźnik macierzy wstępnego kodowania (PMI), są przekazywane z UE do eNodeB w celu wybrania najbardziej pożądanej macierzy wstępnego kodowania. Książka kodowa składa się z zestawu wstępnie zdefiniowanych macierzy wstępnego kodowania, znanych zarówno nadajnikowi, jak i odbiornikowi. Maksymalizuje przepustowość transmisji, dostosowując wstępnie zakodowane symbole do stanu kanału i umożliwia odbiornikowi wydajne różnicowanie strumieni danych.

- **MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output):** Ten schemat może poprawić przepustowość sieci i elastyczność systemu, obsługując wielu użytkowników jednocześnie na tej samej częstotliwości, kosztem bardziej złożonego przetwarzania sygnału. Wczesne wydanie LTE skupiało się na różnorodności transmisji i SU-MIMO (Single-User Multiple-Input Multiple-Output). Podstawowe wsparcie dla MU-MIMO zostało również zapewnione w wydaniu 8, ale przyjęło ten sam schemat oparty

na książce kodowej dla SU-MIMO przy użyciu niejawnego CSI. Ulepszone wsparcie dla MU-MIMO zostało dodane w późniejszych wydaniach poprzez wprowadzenie sygnałów referencyjnych specyficznych dla UE. Jawne sprzężenie zwrotne CSI usuwa ograniczenie książki kodowej i zapewnia elastyczność w stosowaniu zaawansowanych schematów transmisji, takich jak wstępne kodowanie z wymuszaniem zera i sprzężone formowanie wiązki.

### **Ortogonalne multipleksowanie z podziałem częstotliwości**

ISI podniesione przez dyspersję czasową kanałów wielościeżkowych jest najbardziej krytycznym ograniczeniem ograniczającym szybkość transmisję. Złożoność tradycyjnej techniki wyrównywania w wąskopasmowej transmisji sygnału staje się niedopuszczalna, ponieważ liczba odczepów kanałów zanikających selektywnie pod względem częstotliwości może wynosić kilkaset. Inną podstawową cechą LTE jest przyjęcie transmisji wielonośnej jako podstawowej techniki modulacji. Dzielenie strumień danych o dużej szybkości na dużą liczbę równoległych strumieni o małej szybkości, czas trwania symbolu na każdej podnośnej znacznie wzrasta, znacznie przekraczając rozproszenie opóźnienia kanału. Główne zalety OFDM obejmują:

- Wysoka szybkość transmisji poprzez podzielenie szerokiego pasma na wiele wąskopasmowych podnośnych i dodanie odstępu ochronnego zwanego prefiksem cyklicznym (CP) na początku każdego symbolu, efekt ISI jest skutecznie tłumiony.
- Odbiornik o niskiej złożoności poprzez zastosowanie wyrównywania w dziedzinie częstotliwości w celu skompensowania osłabień kanału indywidualnie na każdej podnośnej.
- Elastyczność w prostym łączeniu z przetwarzaniem sygnału przestrzennego, co skutkuje łatwością transmisji MIMO-OFDM. Jednak sygnał OFDM cierpi z powodu wysokiego współczynnika mocy szczytowej do średniej (PAPR), co prowadzi do potrzeby wysoce liniowego wzmacniacza mocy. Transmisja łącza w górę jest trudna do tolerowania z wysokim współczynnikiem PAPR OFDM, ponieważ terminal mobilny musi znaleźć kompromis między mocą wyjściową wymaganą do dobrego zasięgu na zewnątrz, zużyciem energii i kosztem wzmacniacza mocy. Dlatego też przyjęto wariant OFDM, zwany rozproszeniem ortogonalnego podziału częstotliwości z dyskretną transformacją Fouriera (DFT) (DFT-s-OFDM), aby zapewnić opcję niskiego współczynnika PAPR dla transmisji łącza w górę, ponieważ jest to w istocie sygnał pojedynczej nośnej. Mnogość ortogonalnych podnośnych, które przenoszą niezależne strumienie danych indywidualnie lub w grupach, umożliwia bardzo wydajny schemat wielokrotnego dostępu. OFDMA rozszerza technologię wielonośnikową OFDM, aby zapewnić ortogonalne zasoby czasowo-częstotliwościowe dla wielu użytkowników. Ten schemat wykorzystuje domenę częstotliwości jako kolejny stopień swobody, co poprawia elastyczność systemu na różne sposoby:
- Skalowalne szerokości pasma systemu mogą być obsługiwane bez zmiany podstawowych parametrów systemu lub projektu sprzętu. Znacznie poprawia elastyczność wdrażania w mniejszych lub rozdrobionych pasmach i płynną rozbudowę pojemności systemu.
- Elastyczna alokacja zasobów czasowo-częstotliwościowych dla różnych użytkowników i harmonogramowanie domen częstotliwości w celu wykorzystania zysku z różnorodności częstotliwości.
- Ułatwienie ułamkowego lub miękkiego ponownego wykorzystania częstotliwości i koordynacji zakłóceń międzykomórkowych (ICIC).

Po wstępnej ocenie propozycji, kandydackimi schematami dla łącza w dół interfejsu powietrznego LTE były OFDMA i Multi-Carrier CDMA (MC-CDMA), podczas gdy kandydackimi schematami dla łącza w

górną były SC-FDMA, OFDMA i MC-CDMA. W grudniu 2005 r. plenarne spotkanie 3GPP RAN dokonało ostatecznego wyboru schematów wielodostępu, z OFDMA dla łącza w dół i SC-FDMA dla łącza w górę.

### **Agregacja nośników**

Rozwój LTE-Advanced miał na celu spełnienie wymagań IMT-Advanced w zakresie obsługi maksymalnej przepustowości co najmniej 40 MHz i szczytowej szybkości transmisji danych 1 Gb/s. Jednak tak duże części ciągłego widma nie są dostępne w większości przypadków ze względu na dużą konkurencję w zakresie wykorzystania widma i fragmentację istniejącego przydziału widma. Dlatego LTE-Advanced wykorzystuje CA do implementacji tak dużych przepustowości. Można agregować do pięciu składowych nośników, prawdopodobnie każdy o innej przepustowości, aby obsługiwać maksymalną przepustowość transmisji 100 MHz dla pojedynczego terminala. Każdy agregowany nośnik został zaprojektowany w oparciu o strukturę LTE Release 8, tak aby LTE-Advanced można było skonfigurować w sposób zapewniający wsteczną kompatybilność w celu obsługi starszych UE. Terminal LTE-Advanced może jednocześnie wykorzystywać wiele składowych nośników w celu osiągnięcia wyższych szybkości transmisji danych, podczas gdy terminal LTE może być obsługiwany transparentnie na pojedynczym składowym nośniku. Podejścia agregacyjne można podzielić na trzy kategorie:

- **Wewnątrzpasmostwo ciągłe:** Najprostszym podejściem do agregacji jest użycie ciągłych nośnych składowych w tym samym paśmie częstotliwości. Ciągłe widmo może zaoszczędzić zasoby widmowe używane jako pasma ochronne i może zastosować pojedynczy łańcuch przetwarzania pasma podstawowego, jeśli szerokość pasma transceivera RF jest wystarczająco szeroka. Jednak ten przypadek zwykle nie jest możliwy ze względu na fragmentację przydziału częstotliwości.
- **Wewnątrzpasmostwo nieciągłe:** Jeśli ciągłe nośne składowe nie są obowiązkowe, można wykorzystać pofragmentowane pasma częstotliwości. LTE-Advanced obsługuje wewnątrzpasmostwo nieciągłe CA, w którym nośne składowe należą do tego samego pasma częstotliwości, ale mają przerwę lub przerwę pomiędzy nimi.
- **Międzypasmostwo nieciągłe:** Nośniki składowe są nie tylko pofragmentowane, ale również należą do różnych pasm częstotliwości roboczych. Nieciągła agregacja ma tę zaletę, że ma różnorodność częstotliwości, ponieważ różne pasma częstotliwości odpowiadają różnym zanikom kanału. Wymaga to jednak kilku niezależnych łańcuchów przetwarzania RF i pasma podstawowego

### **Przekazywanie**

Duże prawdopodobieństwo, że terminal będzie transmitował z większą szybkością transmisji danych, wymaga stosunkowo wysokiego stosunku sygnału do szumu. Najważniejszym czynnikiem wpływającym na wydajność łącza jest utrata ścieżki, która w dużym stopniu zależy od odległości propagacji. O ile nie można zwiększyć budżetu łącza, na przykład stosując większą moc transmisji lub wdrażając układy anten do kształtowania wiązki, wymagana jest gęstsza infrastruktura w celu zmniejszenia odległości propagacji. Jednym ze skutecznych podejść jest przekazywanie, które może zmniejszyć odległość między terminalem a infrastrukturą, a tym samym poprawić budżet łącza. Podstawowym wymogiem wdrażania przekazywania jest to, aby węzły przekaźnikowe były przezroczyste dla terminali. Oznacza to, że węzeł przekaźnikowy działa jak zwykła stacja bazowa o niskiej mocy z perspektywy terminala. Ważną cechą jest uproszczenie implementacji terminala i zapewnienie wstecznej kompatybilności węzła przekaźnikowego. Z drugiej strony węzeł przekaźnikowy może uzyskać dostęp do infrastruktury w celu uzyskania bezprzewodowego łącza zwrotnego opartego na LTE, podobnie jak zwykły terminal LTE. W związku z tym połączenie między eNodeB-relay i relay-UE nazywane jest odpowiednio łączem zwrotnym i łączem dostępowym. Przekazywanie można podzielić na wewnątrzpasmostwo i pozapasmowe pod względem pasm częstotliwości używanych do łącza

backhaul i dostępowych. Wersja 10 dodała obsługę przekazywania dekodowania i przekazywania w sieciach LTE-Advanced, podczas gdy inny prosty schemat zwany przekazywaniem wzmacniania i przekazywania nie wymaga dodatkowej standaryzacji.

- Przekazniki wzmacniania i przekazywania, powszechnie nazywane przekaźnikami, wzmacniają i przekazują odebrane sygnały analogowe i są, na niektórych rynkach, stosunkowo powszechne jako narzędzie do obsługi luk w zasięgu. Przekazniki są przezroczyste zarówno dla terminala, jak i stacji bazowej, dlatego można je wprowadzić do istniejących sieci. Podstawową zasadą działania przekaźnika jest wzmacnianie wszystkiego, co odbiera, w tym szumu i zakłóceń oraz użytecznego sygnału, co oznacza, że przekaźniki są przydatne głównie w środowiskach o wysokim współczynniku SNR.
- Przekazniki dekodowania i przekazywania dekodują i ponownie kodują odebrany sygnał przed przekazaniem go do obsługiwanych użytkowników. Proces dekodowania i ponownego kodowania powoduje, że ta klasa przekaźników nie wzmacnia szumów i zakłóceń. Są one zatem przydatne również w środowiskach o niskim współczynniku SNR. Jednak operacja dekodowania i przekazywania powoduje znaczne opóźnienie w porównaniu z repeaterem wzmacniania i przekazywania.

### **Sieć heterogeniczna**

Potrzeba zapewnienia dużej szybkości transmisji danych dużej liczbie użytkowników mobilnych zmieniła architekturę sieci. W sieciach komórkowych dużą przepustowość systemu można osiągnąć, stosując zaawansowane techniki transmisji radiowej w celu poprawy wydajności widmowej, pozyskując więcej zasobów widmowych lub wdrażając gęstsze węzły sieciowe. W tradycyjnej sieci jednorodnej stosuje się podział komórek w celu zmniejszenia rozmiaru komórki w celu uzyskania większej przepustowości, ale wymagane jest ponowne planowanie sieci i ponowna konfiguracja systemu. Tymczasem zapotrzebowanie na ruch nie powinno być jednolite. Dlatego LTE-Advanced wprowadził HetNet, mieszaną komórek o różnych rozmiarach, mocach transmisji, zasięgu i możliwościach sprzętowych, tj. makro-, mikro- i mikro-, piko- i femto-komórek. Stacje bazowe o niskiej mocy i niskich kosztach są dodawane do sieci makrokomórkowych jako podstawowe węzły w celu zapewnienia dużej przepustowości w punktach zapalnych lub wypełnienia luk w zasięgu — zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz. Jeśli system ma wystarczająco dużo zasobów radiowych, aby przydzielić różne pasma częstotliwości dla różnych typów komórek, nie ma wzajemnych zakłóceń. Jednak wraz ze wzrostem zapotrzebowania na ruch nie ma miejsca na przydzielenie dedykowanego nośnika dla małych komórek. Heterogeniczne komórki muszą się wzajemnie nakładać na obszarze geograficznym, działając na tym samym zestawie częstotliwości. Najtrudniejszym aspektem w takim heterogenicznym wdrożeniu jest radzenie sobie z ICI. W konsekwencji 3GPP utworzyło pozycję roboczą w ICIC, a później ulepszyło koordynację interferencji międzykomórkowej (eICIC), aby rozwiązać ten problem. LTE-Advance wykorzystuje również CA do obsługi wdrożenia HetNet, gdzie stosuje się harmonogramowanie międzykanałowe, aby umożliwić transmisję sygnalizacji sterującej na jednej wspólnej nośnej składowej, tak aby uniknąć interferencji na kanałach sterujących między warstwą makrokomórek a warstwą małych komórek.

### **Skoordynowana transmisja i odbiór wielopunktowy**

Użytkownicy mobilni oczekują wysokiej jakości usług w dowolnym miejscu i czasie. Jednak użytkownicy na skraju komórki cierpią nie tylko z powodu wysokiego tłumienia sygnału z powodu dłuższych odległości propagacji, ale także silnego ICI. Na przestrzeni lat zaproponowano kilka różnych technik, takich jak uśrednianie zakłóceń, przeskakiwanie częstotliwości i koordynacja zakłóceń, aby złagodzić ICI. Przykładem jest ICIC lub jego ulepszona wersja eICIC, która została wprowadzona przez LTE-Advanced jako cecha techniczna. Ścisłejsza koordynacja zakłóceń, określana jako CoMPtransmisja i odbiór, była również rozważana przez 3GPP jako narzędzie do poprawy wydajności widmowej krawędzi

komórki. Koordynacja między wieloma geograficznie oddzielnymi miejscami może być wykonywana albo w łączu w dół, albo w łączu w górę, co skutkuje różnymi poziomami koordynacji:

- Wspólne przetwarzanie: wiele miejsc jednocześnie przesyła lub odbiera sygnały do i z jednego UE znajdującego się w obszarze koordynacji. Poprawia to jakość odbieranego sygnału, tłumi lub unika ICI i uzyskuje zysk makroróżnorodności. Jednakże ta metoda nakłada wysokie wymagania na sieć backhaul, ponieważ przesyłane lub odbierane dane, wiedza o kanale i obliczone wagi transmisji muszą być wymieniane między skoordynowanymi miejscami.
- Skoordynowane planowanie lub formowanie wiązki: Wybierana jest tylko jedna lokalizacja do komunikacji z typowym użytkownikiem. Dane użytkownika nie muszą być udostępniane w wielu skoordynowanych miejscach, podczas gdy potrzebna jest tylko sygnalizacja kontrolna dotycząca decyzji dotyczących planowania lub generowanych wiązek. Upraszcza to implementację, ponieważ wymagania dotyczące sieci backhaul są znacznie obniżone.

### **Komunikacja urządzenie-urządzenie**

W tradycyjnej sieci komórkowej informacje są najpierw wysyłane do stacji bazowej w łączu w górę, a następnie przekazywane do terminala docelowego w łączu w dół, nawet jeśli dwie komunikujące się strony znajdują się blisko siebie. Jak wiemy, wydajność łączu transmisyjnego w dużym stopniu zależy od odległości propagacji; mianowicie krótsza odległość zapewnia wysoki stosunek sygnału do szumu. Pojawienie się nowych scenariuszy zastosowań, takich jak dystrybucja treści i usługa oparta na bliskości (ProSe) zdefiniowane w wydaniu 3GPP Release 12, sprzyjało stosowaniu komunikacji D2D w sieciach komórkowych. Bezpośrednia komunikacja w takim scenariuszu ma duży potencjał, taki jak wysoka wydajność widmowa, wysoka pojemność systemu, wysoka wydajność energetyczna, niskie opóźnienie i uczciwość. Komunikacja D2D zwykle nie jest transparentna dla sieci komórkowej i może działać w licencjonowanym spektrum (tj. w paśmie) lub w spektrum zwolnionym z licencji (tj. poza pasmem).

- W paśmie: Odnosi się do łączu D2D i komórkowych wykorzystujących widmo komórkowe. Komunikacja D2D w paśmie jest dalej klasyfikowana na dwa typy – podkład i nakładka – pod względem częstotliwości używanych w łączach D2D i komórkowych. Typ podkład może poprawić wydajność widmową sieci komórkowej poprzez ponowne wykorzystanie tego samego widma w obu łączach. Typ nakładki wymaga dedykowanych zasobów widmowych dla łączu D2D, które bezpośrednio łączą nadajnik i odbiornik. Główną wadą komunikacji D2D w paśmie są zakłócenia powodowane przez użytkowników D2D w komunikacji komórkowej i odwrotnie.
- Poza pasmem: Motywacją jest wykorzystanie nielicencjonowanego widma i wyeliminowanie zakłóceń między łączami D2D i komórkowymi. Korzystanie z nielicencjonowanego widma wymaga innego interfejsu i zwykle przyjmuje inne technologie bezprzewodowe, takie jak Wi-Fi i Bluetooth. Chociaż korzystanie z nielicencjonowanego widma unika zakłóceń w paśmie, może ono cierpieć z powodu niekontrolowanych zakłóceń w nielicencjonowanych widmach.

### **Dostęp wspomagany licencją**

LAA to techniczna funkcja LTE, wprowadzona w wersji 13 jako część LTE Advanced Pro. Podstawowym pomysłem jest wykorzystanie nielicencjonowanych widm w połączeniu z licencjonowanymi widmami w celu zapewnienia wyższych szybkości transmisji danych dla UE i lepszych wrażeń użytkownika. W przypadku CA, drugorzędny nośnik w nielicencjonowanym paśmie 5 GHz jest stosowany w celu odciążenia ruchu głównego nośnika w paśmie licencjonowanym. Konsumenci mogą wykorzystać kombinację pasm licencjonowanych i nielicencjonowanych w celu osiągnięcia wyższych szczytowych szybkości wewnątrz i na zewnątrz. Głównym wyzwaniem LAA jest interoperacyjność między



technologiami 3GPP i nie-3GPP współdzielącymi to samo nielicencjonowane widmo. LAA zawiera pewne mechanizmy, takie jak wykrywanie kanału i protokół Listen-before-talk (LBT), w celu zarządzania zakłóceniami współkanałowymi i sąsiednich kanałów. Ponieważ Wi-Fi jest popularnym systemem działającym w nielicencjonowanym paśmie 5 GHz, LAA musi wybierać wolne kanały, których Wi-Fi nie zajmuje dynamicznie. Jeśli na danym obszarze geograficznym nie ma wolnej przestrzeni, LTE LAA może nadal rywalizować z innymi nielicencjonowanymi użytkownikami o współdzielenie kanału.

## **5G – Nowe Radio**

Już w 2015 r. grupa 3GPP RAN zdecydowała się na utworzenie pozycji badawczej dla Nowego Radia (NR) w Wydaniu 14 i zainicjowała zadanie modelowania kanałów dla pasm częstotliwości powyżej 6 GHz. Początkowa specyfikacja została przeprowadzona za pośrednictwem pozycji roboczej 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 NR. Pierwsze na świecie połączenie NSA NR zostało wspólnie wykonane w Hiszpanii przez Vodafone i Huawei, tuż przed Mobile World Congress, który rozpoczął się 26 lutego 2018 r. Po początkowej dostawie NSA, wiele wysiłków 3GPP zostało przeniesionych na terminowe ukończenie Release 15, aby utworzyć pierwszy kompletny zestaw standardów NR. Dlatego 3GPP opracowało również nową sieć CN, 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) NR. Release 15 skupiał się przede wszystkim na eMBB (enhanced Mobile Broadband) i (w pewnym stopniu) URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications), podczas gdy mMTC (massive Machine Type Communications) był nadal obsługiwany przy użyciu technologii komunikacji typu maszynowego 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 NR była kontynuowana w wersji 16, która została ukończona w czerwcu 2020 r. Do NR dodano funkcje techniczne 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 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 ogłosił, że 3GPP 5G-SRIT i 3GPP 5G-RIT są zgodne z wizją IMT-2020 i rygorystycznymi wymaganiami dotyczącymi wydajności. W porównaniu z LTE, NR oferuje wiele zalet:

- Wykorzystanie pasm częstotliwości fal milimetrowych w celu uzyskania wystarczających zasobów widmowych i szerokiego pasma transmisji dla ekstremalnie wysokich szybkości transmisji danych. NR może działać w zakresie częstotliwości do 100 GHz przy heterogenicznym wdrożeniu: stacje bazowe makro przy niższych częstotliwościach nośnych i małe stacje bazowe przy wyższych częstotliwościach nośnych.
- Ultra-szczupła konstrukcja w celu znacznej poprawy efektywności energetycznej sieci i zmniejszenia zakłóceń w warunkach dużego obciążenia ruchem. Sygnały synchronizacji, informacje o transmisji systemowej i sygnały odniesienia są przesyłane tylko wtedy, gdy jest to konieczne, zamiast zawsze włączonych transmisji w poprzednich generacjach.
- Kompatybilność w przód w celu przygotowania się na dalsze ulepszenia w celu obsługi przyszłych, ale nieznanych przypadków użycia i aplikacji. Osiąga się to za pomocą samowystarczalności i dobrze ograniczonej transmisji. Samowystarczalność odnosi się do danych w słocie i wiązce, które są

wykrywalne bez zależności od innych slotów i wiązek. Dobrze ograniczona transmisja oznacza utrzymywanie transmisji ograniczonych w domenach częstotliwości i czasu, aby umożliwić przyszłe włączenie nowych typów transmisji równoległe z transmisją starszej generacji

- Elastyczność systemu dostosowująca się do szerokiego zakresu częstotliwości nośnych, heterogeniczne wdrożenie (makro, mikro i pikokomórki) oraz różnorodne scenariusze użytkowania (eMBB, URLLC i mMTC) ze ścisłymi i czasami sprzecznymi wymaganiami. Projekt warstwy fizycznej NR jest elastyczny i skalowalny, w tym wysoce adaptacyjne schematy modulacji (od Binary Phase-Shift Keying [BPSK] w UL mMTC do 1024QAM w łączu w dół eMBB), skalowalna numerologia OFDM, kody Low-Density Parity-Check (LDPC) ze strukturą zgodną ze stawką i elastyczną strukturą ramki.
- Projekt skoncentrowany na wiązce, aby umożliwić szerokie wykorzystanie Massive Multiple-Input Multiple-output (massive MIMO) nie tylko do transmisji danych, ale także sygnalizacji sterującej. Sygnały referencyjne mogą być kształtowane wiązką z konfigurowalną szczegółowością w dziedzinie czasu i częstotliwości.

### **Architektura systemu**

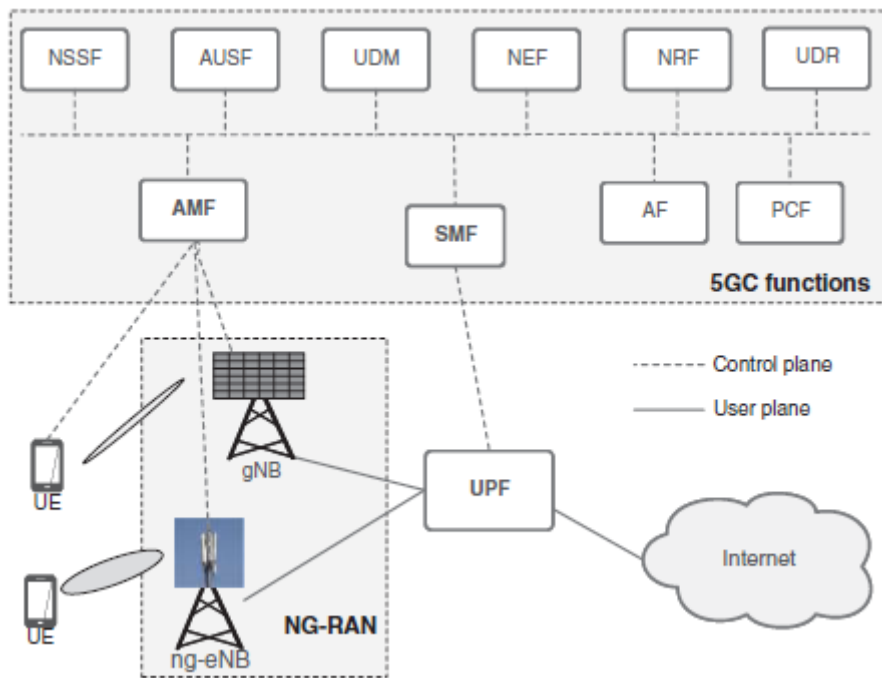
W przeciwieństwie do poprzednich generacji, system 3GPP 5G przyjął architekturę opartą na usługach (SBA), która organizuje elementy architektoniczne w zestaw zorientowanych na usługi funkcji sieciowych (NF). Interakcja między NF jest reprezentowana na dwa sposoby:

- Reprezentacja oparta na usługach, w której NF umożliwia innym autoryzowanym NF dostęp do ich usług za pośrednictwem interfejsów wspólnej struktury.
- Reprezentacja punktu odniesienia, w której interakcja między dowolnymi dwoma NF jest opisywana przez punkt odniesienia. Architektura systemu 5G została zaprojektowana tak, aby obsługiwać szeroką gamę przypadków użycia z rygorystycznymi, ale czasami sprzecznymi wymaganiami dotyczącymi wydajności. Umożliwia ona wdrożeniom korzystanie z technik takich jak wirtualizacja funkcji sieciowych (NFV), sieci definiowane programowo (SDN) i segmentacja sieci. Niektóre kluczowe zasady i koncepcje [3GPP TS23.501, 2021] to:
  - Oddzielenie funkcji UP od funkcji płaszczyzny sterowania, co umożliwia niezależną skalowalność, ewolucję i elastyczne wdrożenia.
  - Modularyzacja projektu funkcji w celu umożliwienia elastycznego i wydajnego podziału sieci. Gdziekolwiek jest to możliwe, definiowanie procedur (tj. zestawu interakcji między NF) jako usług w celu maksymalizacji możliwości ponownego użycia.
  - Umożliwienie każdej NF i jej usługom NF bezpośredniej lub pośredniej interakcji z innymi NF za pośrednictwem serwera proxy komunikacji usług, jeśli jest to wymagane.
  - Minimalizacja zależności między siecią dostępową (AN) a CN. Architektura jest zdefiniowana za pomocą zbieżnej CN ze wspólnym interfejsem AN–CN integrującym technologie dostępu 3GPP i nie-3GPP.
  - Obsługa ujednoczonej struktury uwierzytelniania.
  - Obsługa bezstanowych NF, w których zasób obliczeniowy jest odseparowany od zasobu pamięci masowej.
  - Obsługa ekspozycji możliwości.

- Obsługa równoczesnego dostępu do usług lokalnych i scentralizowanych. Aby obsługiwać usługi o niskim opóźnieniu i dostęp do lokalnych sieci danych, funkcje UP można wdrażać blisko sieci dostępowej.
- Obsługa roamingu zarówno w przypadku ruchu kierowanego do kraju, jak i ruchu lokalnego w odwiedzanej sieci PLMN.

### Sieć rdzeniowa 5G

Niektóre funkcjonalności sieci 5G CN wyglądają podobnie do tych z poprzednich generacji. Nie jest to zaskakujące, ponieważ sieć zawsze musi wykonywać pewne podstawowe funkcje, takie jak uwierzytelnianie, naliczanie opłat, alokacja zasobów i zarządzanie mobilnością. Jednak rozpoznajemy również pewne istotne funkcje, których wcześniej nie było, a które są potrzebne do umożliwienia nowych paradygmatów sieciowych, takich jak segmentacja sieci, sieciowanie oparte na usługach i podział płaszczyzny użytkownika/kontroli. Aby ułatwić włączanie różnych usług i wymagań danych, sieci NF zostały dodatkowo uproszczone, przy czym większość z nich jest oparta na oprogramowaniu, dzięki czemu mogą działać na ogólnym sprzęcie komputerowym. Reprezentacja oparta na usługach architektury systemu 5G jest pokazana na rysunku



i składa się głównie z następujących funkcji NF:

- Funkcja aplikacji (AF): wpływ aplikacji na routing ruchu i interakcja z ramą polityki w celu kontroli polityki.
- Funkcja zarządzania dostępem i mobilnością (AMF): zakończenie sygnalizacji Non-Access Stratum (NAS), szyfrowanie NAS i ochrona integralności, zarządzanie rejestracją, zarządzanie połączeniami, zarządzanie mobilnością, uwierzytelnianie dostępu i autoryzacja oraz zarządzanie kontekstem bezpieczeństwa.
- Funkcja serwera uwierzytelniania (AUSF) działa jako serwer uwierzytelniania.
- Funkcja ekspozycji sieci (NEF): ujawnianie możliwości i zdarzeń, bezpieczne dostarczanie informacji z aplikacji zewnętrznej do sieci 3GPP, tłumaczenie informacji wewnętrznych lub zewnętrznych.

- Funkcja repozytorium NF (NRF): funkcja wykrywania usług, utrzymuje profil NF i dostępne wystąpienia NF.
- Funkcja kontroli dostępu do wycinka sieci (NSACF).
- Funkcja uwierzytelniania i autoryzacji specyficznej dla wycinka sieci (NSSAAF).
- Funkcja wyboru wycinka sieci (NSSF): wybieranie wystąpień wycinka sieci do obsługi UE, określanie dozwolonych informacji pomocy w wyborze wycinka sieci (NSSAI), określanie zestawu AMF, który ma być używany do obsługi UE.
- Funkcja analizy danych sieciowych (NWDAF).
- Funkcja kontroli zasad (PCF): ujednoczona struktura zasad, zapewniająca reguły zasad funkcjom CP, dostęp do informacji o subskrypcji w celu podejmowania decyzji dotyczących zasad.
- Funkcja zarządzania sesjami (SMF): zarządzanie sesjami (ustanowienie, modyfikacja i zwolnienie sesji), przydział i zarządzanie adresami IP, funkcje DHCP, zakończenie sygnalizacji NAS związanej z zarządzaniem sesjami, powiadomienie o danych łącza w dół, konfiguracja sterowania ruchem dla funkcji płaszczyzny użytkownika (UPF) w celu prawidłowego kierowania ruchem.
- Ujednoczone zarządzanie danymi (UDM): generowanie poświadczeń uwierzytelniania i uzgadniania kluczy (AKA), obsługa identyfikacji użytkownika, autoryzacja dostępu i zarządzanie subskrypcjami.
- Ujednoczone repozytorium danych (UDR)
- UPF: routing i przekazywanie pakietów, inspekcja pakietów, obsługa QoS, działa jako zewnętrzny punkt sesji jednostki danych protokołu (PDU) połączenia z siecią danych i jest punktem kotwiczenia dla mobilności wewnątrz- i między-RadioAccess Technology (RAT).
- Funkcja zarządzania możliwościami radia UE (UCMF)
- Funkcja niestrukturalnego przechowywania danych (UDSF)

### **Sieć dostępu radiowego nowej generacji**

Sieć dostępu radiowego nowej generacji (NG-RAN) to część systemu 5G zapewniająca dostęp radiowy. NG-RAN składa się z zestawu węzłów NG-RAN podłączonych do 5GC. Węzłem może być albo gNodeB (gNB), albo eNodeB nowej generacji (ng-eNB):

– gNB zapewniający protokoły płaszczyzny użytkownika i płaszczyzny sterowania NR

– ng-eNB zapewniający protokoły płaszczyzny użytkownika i płaszczyzny sterowania E-UTRA

GNB (lub ng-eNB) odpowiada za przetwarzanie całego sygnału radiowego i pewne sterowanie radiowe w jednej lub kilku komórkach. GNB i ng-eNB są podłączone do 5GC, a dokładniej do AMF w celu realizacji funkcji sterowania i do UPF w celu realizacji transmisji danych użytkownika. Zgodnie ze specyfikacją 3GPP TS 23.501 [3GPP TS23.501, 2021], funkcjonalności węzłów lub NF związane z NG-RAN podsumowano następująco. gNB i ng-eNB obsługują następujące funkcje:

- Funkcje zarządzania zasobami radiowymi: kontrola nośnika radiowego, kontrola dostępu radiowego, kontrola mobilności połączenia, dynamiczna alokacja zasobów do UE zarówno w łączy w górę, jak i w dół (planowanie);
- Kompresja nagłówka IP i Ethernet, szyfrowanie i ochrona integralności danych;

- Wybór przyłącza UE AMF, gdy nie można określić routingu do nAMF na podstawie informacji dostarczonych przez UE;
- Kierowanie danych UP w kierunku UPF(s);
- Kierowanie informacji płaszczyzny sterowania w kierunku AMF;
- Nawiazywanie i zwalnianie połączenia;
- Harmonogramowanie i przesyłanie komunikatów wywoławczych;
- Planowanie i transmisja informacji o transmisji systemowej (pochodzących z AMF lub OAM);
- Pomiar i konfiguracja raportowania pomiarów dla mobilności i planowania;
- Oznaczanie pakietów na poziomie transportu w łączy w górę;
- Zarządzanie sesjami;
- Obsługa segmentacji sieci;
- Zarządzanie przepływem QoS i mapowanie na nośniki radiowe danych;
- Obsługa UE w stanie RRC\_INACTIVE;
- Funkcja dystrybucji dla komunikatów NAS;
- Współdzielenie sieci dostępu radiowego;
- Podwójna łączność;
- Ścisła współpraca między NR i E-UTRA;
- Utrzymywanie bezpieczeństwa i konfiguracji radiowej dla optymalizacji UP Clot 5GS.

AMF obsługuje następujące główne funkcje:

- Zakończenie sygnalizacji NAS;
- Bezpieczeństwo sygnalizacji NAS;
- Kontrola bezpieczeństwa AS;
- Sygnalizacja między węzłami CN dla mobilności między sieciami dostępowymi 3GPP;
- Dostępność UE w trybie bezczynności (w tym kontrola i wykonywanie retransmisji stronicowania);
- Zarządzanie obszarem rejestracji;
- Obsługa mobilności wewnątrzsystemowej i międzysystemowej;
- Uwierzytelnianie dostępu;
- Autoryzacja dostępu, w tym sprawdzanie praw roamingowych;
- Kontrola zarządzania mobilnością (subskrypcja i zasady);
- Obsługa podziału sieci;
- Wybór SMF.

- Wybór optymalizacji Clot 5GS;

UPF obsługuje następujące główne funkcje:

- Punkt zakotwiczenia dla mobilności wewnątrz/między RAT (jeśli ma zastosowanie);
- Zewnętrzny punkt sesji PDU połączenia z siecią danych;
- Trasowanie i przekazywanie pakietów;
- Inspekcja pakietów i część płaszczyzny użytkownika egzekwowania zasad polityki;
- Raportowanie wykorzystania ruchu;
- Klasyfikator łącza w górę do obsługi przepływów ruchu routingu do sieci danych;
- Punkt rozgałęzienia do obsługi sesji PDU z wieloma adresami;
- Obsługa QoS dla płaszczyzny użytkownika, np. filtrowanie pakietów, bramkowanie, wymuszanie szybkości UL/DL;
- Weryfikacja ruchu łącza w górę (mapowanie przepływu SDF do QoS);
- Buforowanie pakietów łącza w dół i wyzwalamie powiadomień o danych łącza w dół.

SMF obsługuje następujące główne funkcje:

- Zarządzanie sesją;
- Przydzielanie i zarządzanie adresami IP UE;
- Wybór i kontrola funkcji UP;
- Konfiguruje sterowanie ruchem w UPF w celu kierowania ruchu do właściwego miejsca docelowego;
- Kontrola części egzekwowania zasad i QoS;
- Powiadomienie o danych łącza w dół

### **Kluczowe technologie**

Aby spełnić rygorystyczne wymagania dotyczące wydajności określone w IMT-2020, w systemie 5G zastosowano rewolucyjne technologie zarówno w zakresie dostępu radiowego, jak i sieci. Główne przełomy technologiczne obejmują masywne MIMO, komunikację fal milimetrowych (mmWave), nieortogonalny dostęp wielokrotny, kody biegunowe, wirtualizację NF, sieciowanie definiowane programowo i segmentację sieci.

### **Massive MIMO**

Massive MIMO, znane również jako wielkoskalowa matryca antenowa, very large MIMO, hyper MIMO, pełnowymiarowe MIMO, jest kluczowym elementem NR. Przy dużej liczbie anten energia transmisji może być kierowana z ekstremalną ostrością na bardzo mały obszar. Kierunkowość może przynieść ogromne ulepszenia w zakresie wydajności widmowej i efektywności energetycznej. Massive MIMO jest opłacalne dzięki wykorzystaniu niedrogich, niskoprecyzyjnych komponentów RF, gdzie drogie, wysoce liniowe wzmacniacze mocy stosowane w konwencjonalnych systemach można zastąpić setkami tanich wzmacniaczy mocy o mocy wyjściowej rzędu miliwatów. Inne zalety massive MIMO obejmują zmniejszone opóźnienie na interfejsie powietrznym, uproszczenie warstwy wielodostępu i zwiększoną odporność na zarówno niezamierzone zakłócenia, jak i celowe zagłuszanie. W przypadku

niższych częstotliwości NR wykorzystuje małą do umiarkowanej liczbę anten (do 64 anten nadawczych i odbiorczych po stronie stacji bazowej około 700 MHz) [3GPP TR38.913, 2020]. W tym przypadku można obsługiwać działanie FDD, gdzie pozyskiwanie CSI wymaga transmisji sygnału referencyjnego informacji o stanie kanału (CSI-RS) w łączu w dół i raportowania CSI w łączu w górę. Ograniczone szerokości pasma dostępne w tym obszarze częstotliwości wymagają wysokiej wydajności widmowej, którą umożliwiają MU-MIMO i multipleksowanie przestrzenne wyższego rzędu, co jest osiągnięte za pomocą raportowania CSI o wyższej rozdzielczości w porównaniu z LTE. 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 referencyjnych jest proporcjonalna do liczby anten nadawczych, masowy MIMO musi działać w trybie TDD, wykorzystując wzajemność kanałów. W tym przypadku stacja bazowa uzyskuje CSI łącza w dół, szacując sygnały odniesienia sondowania kanału w łączu w górę. W transmisji danych łącza w dół nie ma sygnałów odniesienia i stosuje się pewne formy schematów prekodowania, takie jak sprzężone formowanie wiązki i prekodowanie z wymuszeniem zera, aby uprościć odbiór sygnału po stronie UE. W przypadku jeszcze wyższych częstotliwości (w zakresie fal milimetrowych) obecnie zwykle wymagana jest implementacja analogowego formowania wiązki, która ogranicza transmisję do jednego kierunku wiązki na jednostkę czasu i łańcuch radiowy. Ponieważ element anteny izotropowej jest bardzo mały w tym obszarze częstotliwości ze względu na krótką długość fali nośnej, do utrzymania zasięgu wymagana jest duża liczba elementów antenowych. Formowanie wiązki musi być stosowane zarówno po stronie nadajnika, jak i odbiornika, aby przeciwdziałać zwiększonej utracie ścieżki, nawet w przypadku transmisji kanału sterującego. Wymagany jest nowy typ procesu zarządzania wiązką do pozyskiwania CSI, w którym BS musi sekwencyjnie przeszukiwać kandydatów na wiązkę nadajnika radiowego w czasie, a UE musi utrzymywać właściwą wiązkę odbiornika radiowego, aby umożliwić odbiór wybranej wiązki nadajnika. W pasmach częstotliwości około 30 GHz i 70 GHz NR obsługuje do 256 elementów antenowych po stronie stacji bazowej i do 32 elementów antenowych po stronie UE.

### **Fala milimetrowa**

Poprzednie generacje systemów komórkowych zwykle działały w pasmach niskiej częstotliwości, od kilkuset megaherców do kilku gigaherców. Z jednej strony zasoby widmowe w tych pasmach są dość ograniczone w porównaniu z zapotrzebowaniem na mobilny szerokopasmowy dostęp do Internetu. Z drugiej strony istnieje szeroka gama aplikacji działających w tych pasmach, takich jak nadawanie telewizyjne, komunikacja satelitarna, radar, radioastronomia i nawigacja morska, co prowadzi do globalnego niedoboru przepustowości. Zmotywowało to operatorów sieci komórkowych do zbadania niewykorzystanego widma mmWave w celu oferowania mobilnych usług szerokopasmowych. Fala milimetrowa, znana również jako pasmo milimetrowe, odnosi się do widma elektromagnetycznego o długościach fal od 10 mm (odpowiednik 30 GHz) do 1 mm (300 GHz). Przewidywano, że komunikacja mobilna może skorzystać z mmWave poprzez zestaw przypadków użycia, np. niedroga wymiana światłowodów na potrzeby mobilnego backhaułu, gęste małe komórki mmWave, bezprzewodowy dostęp szerokopasmowy i nieskompresowane transfery multimediów wysokiej rozdzielczości o niskim opóźnieniu. 3GPP zdefiniowało odpowiednie widmo dla NR, które zostało podzielone na dwa zakresy częstotliwości: Pierwszy zakres częstotliwości (FR1), który obejmuje pasma częstotliwości sub-6 GHz rozciągające się od 450 MHz do 6 GHz, oraz Drugi zakres częstotliwości (FR2) obejmujący 24,25–52,6 GHz. Początkowe wdrożenia mmWave są spodziewane w 28 GHz (pasmo 3GPP NR n257 i n261) i 39 GHz (3GPP n260), a następnie w 26 GHz (3GPP n258). Oczekuje się, że więcej pasm mmWave zostanie otwartych wraz ze wzrostem popytu na usługi NR. Jednak jego praktyczne wdrożenie w sieciach komórkowych nakłada znaczne wyzwania techniczne na projektowanie i rozwój komponentów RF i anten. Sygnał mmWave cierpi z powodu strat atmosferycznych spowodowanych parą wodną i

absorbpcją tlenu, które mogą łatwo przekroczyć zwykłe straty w wolnej przestrzeni. Ponadto sygnały mmWave nie mogą na ogół przenikać przez materiały stałe, takie jak ściany z żelbetu. Aby zrekomensować tak znacząco duże straty propagacyjne, wymagane są wieloelementowe układy antenowe zarówno po stronie stacji bazowej, jak i UE, aby skupić energię transmisji w małym regionie. Ponadto niezwykle wysoka przepustowość danych powoduje konieczność stosowania szerszych pasm transmisji. Wymagania obsługi do 400 MHz w pojedynczej nośnej i ponad 1 GHz w CA sprawiają, że implementacja elementów RF i anten jest znacznie trudniejsza.

### **Nieortogonalny wielokrotny dostęp**

Wielokrotny dostęp odnosi się do techniki, która pozwala wielu użytkownikom na współdzielenie zasobów radiowych jako podstawowego składnika systemu komunikacji komórkowej. W ciągu ostatnich kilku dekad systemy komórkowe doświadczyły radykalnej ewolucji w swoich schematach wielokrotnego dostępu. W szczególności FDMA, TDMA, wielokrotny dostęp z podziałem kodu i OFDMA zostały przyjęte dla sieci komórkowych 1G–4G. Schematy te należą do kategorii ortogonalnego wielokrotnego dostępu (OMA), w którym każdy użytkownik przesyła lub odbiera sygnał specyficzny dla użytkownika przez ortogonalną jednostkę zasobów radiowych w domenie częstotliwości, czasu, kodu lub ich kombinacji. OMA był podstawowym wyborem dla poprzednich generacji komunikacji komórkowej, ponieważ upraszcza konstrukcję transceivera i łagodzi zakłócenia wielu użytkowników. Jednak pula zasobów radiowych ogranicza pojemność systemu pod względem maksymalnej liczby aktywnych użytkowników. W przeciwieństwie do OMA, Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) pozwala wielu użytkownikom na współdzielenie tej samej jednostki zasobów radiowych, co poprawia przepustowość systemu i gęstość połączeń. Można to wdrożyć za pomocą wielodostępnej eliminacji zakłóceń kosztem wyższej złożoności obliczeniowej w odbiorniku. Jako szczególny przypadek techniki NOMA, Multi-User Superposed Transmission (MUST) został zbadany w LTE Release 13, skupiając się głównie na transmisji łącza w dół. Zgodnie z adaptacyjną kontrolą mocy i etykietowaniem bitów po stronie nadajnika, schematy MUST są podzielone na trzy kategorie. W szczególności, Kategoria 1 niezależnie mapuje zakodowane bity dwóch lub więcej współplanowanych użytkowników na symbole konstelacji składowych bez mapowania Graya, Kategoria 2 wspólnie mapuje zakodowane bity dwóch lub więcej współplanowanych użytkowników na konstelacje składowe z mapowaniem Graya, a Kategoria 3 bezpośrednio mapuje zakodowane bity na symbole konstelacji złożonej. Podczas badania w wydaniu 14 zaproponowano różne schematy NOMA, takie jak Sparse Code Multiple Access (SCMA), Multi-User Shared Access (MUSA), Pattern Division Multiple Access (PDMA) i Resource Spread Multiple Access (RSMA). NOMA oparta na przyznawaniu, która zazwyczaj działa w stanie połączonym Radio Resource Control (RRC), została określona w wydaniu 14 LTE w celu obsługi downlink eMBB. W wydaniu 15 3GPP ustanowiono badanie w celu kontynuowania badania przetwarzania sygnału po stronie nadajnika, projektowania odbiornika wielodostępnego, analizy złożoności i procedur związanych z NOMA, takich jak hybrydowe Automatic Repeat Request (ARQ), adaptacja łącza i przydział mocy. Ponieważ ogromny wzrost wydajności wniesiony przez massive MIMO w NR, zastosowanie NOMA w downlink NR może przynieść jedynie marginalny zysk. Dlatego też nacisk badania NOMA w wydaniu 16 został przeniesiony na transmisję bez przyznawania w uplink, co ma zmniejszyć narzut sygnalizacji sterującej, opóźnienie transmisji i zużycie energii przez urządzenia.

### **SDN/NFV**

SDN to paradygmat sieciowy, który oddziela płaszczyznę sterowania od funkcji przekazywania danych, w ramach rozwoju konsorcjum non-profit kierowanego przez operatora o nazwie Open Networking Foundation (ONF). Kontrola sieci może być następnie scentralizowana w kontrolerze SDN, a podstawowa infrastruktura jest abstrakcyjna, aby stać się pulą elementów przekazywania. Kontroler SDN zawiera globalny widok całej sieci i sprawia, że kontrola sieci, taka jak routing, kontrola



przebieg, inżynieria ruchu i kontrola bezpieczeństwa, jest bezpośrednio programowalna. SDN nie rozwiązuje bezpośrednio żadnych problemów technicznych związanych z kontrolą sieci, ale otwiera nowe możliwości tworzenia i wdrażania innowacyjnych rozwiązań tych problemów, udostępniając sieć jako usługę aplikacjom SDN przez interfejs północny. Kontroler SDN interpretuje instrukcje z aplikacji SDN na określone polecenia konfiguracji dla podstawowej infrastruktury przez interfejs południowy przy użyciu protokołu OpenFlow. SDN przynosi kilka korzyści technicznych, w tym:

- Centralna kontrola elementów sieciowych wielu dostawców;
- Automatyzacja sieci i programowalność poprzez abstrakcję podstawowej infrastruktury i udostępnianie jej za pomocą standardowego interfejsu;
- Szybka innowacja poprzez wdrażanie nowych aplikacji i usług sieciowych bez konieczności konfigurowania określonych elementów lub czekania na wydania dostawców;
- Zwiększona niezawodność i bezpieczeństwo sieci dzięki scentralizowanemu i zautomatyzowanemu zarządzaniu elementami sieci, jednolitemu egzekwowaniu zasad i mniejszej liczbie błędów konfiguracji.

NFV to kolejny paradygmat sieciowy, który oddziela oprogramowanie od sprzętu, mając na celu przekształcenie sposobu wdrażania sieci. NFV umożliwia operatorom sieci wdrażanie NF jako wirtualizowanych instancji oprogramowania w celu zastąpienia dedykowanych urządzeń sprzętowych. Wirtualizowane NF mogą działać na standardowych serwerach ogólnego przeznaczenia o dużej objętości i migrować między różnymi lokalizacjami na żądanie bez konieczności instalowania nowego sprzętu. NFV oferuje wiele korzyści, w tym:

- Niskie koszty sprzętu i niskie zużycie energii dzięki wykorzystaniu ekonomii skali branży IT;
- Szybsze wprowadzanie nowych usług na rynek;
- Elastyczność dzięki elastycznemu skalowaniu w górę i w dół przepustowości sieci;
- Multi-tenancy, co pozwala na współdzielenie jednej platformy dla różnych aplikacji, użytkowników i dzierżawców;
- Umożliwia niezależne ekosystemy oprogramowania i zachęca do otwartości.

Niezależnie od ich niezależnego rozwoju w ramach różnych organizacji (ETSI i ONF), SDN i NFV uzupełniają się wzajemnie. Z jednej strony kontroler SDN i aplikacje SDN mogą być implementowane jako typowe wirtualne funkcje sieciowe (VNF) i wdrażane na standardowych platformach IT. Pod ujednoczoną kontrolą NFV Management and orchestration (MANO) wystąpienia oprogramowania powiązane z SDN mogą elastycznie tworzyć, skalować, migrować, aktualizować i wdrażać w zvirtualizowanej infrastrukturze. Z drugiej strony NFV może wykorzystać programowalność sieciową włączoną przez SDN do implementacji różnych NF.

### **Podział sieci**

Podział sieci odnosi się do zestawu technologii służących do tworzenia wyspecjalizowanych, dedykowanych sieci logicznych w ramach współdzielonej sieci fizycznej. Dzięki dostosowanemu projektowi funkcji, mechanizmom izolacji i narzędziom do zarządzania podział sieci jest w stanie zapewnić usługę Network-as-a-Service (NaaS) w celu spełnienia zróżnicowanych wymagań branż pionowych. Zgodnie z umową o poziomie usług (SLA) między operatorem sieci komórkowej a klientem tworzona jest samodzielna sieć wirtualna, zwana podziałem sieci. Podział sieci to niezależna sieć logiczna typu end-to-end z zasobami wirtualnymi, topologią, przepływem ruchu i regułami provisioningu, ale działająca na współdzielonej infrastrukturze fizycznej. Dzięki skalowalnej alokacji

zasobów i elastycznej konfiguracji podział sieci może oferować dostosowane możliwości sieciowe, takie jak przepustowość danych, zasięg, QoS, opóźnienie, niezawodność, bezpieczeństwo i dostępność. Istnieją różne typy podziałów sieci, które spełniają specyficzne potrzeby komunikacyjne różnych użytkowników. Główne koncepcje podziału sieci są następujące:

- Instancja wycinka sieci: Instancja wycinka sieci to zestaw współdzielonych lub dedykowanych NF oraz zasobów fizycznych lub wirtualnych do uruchamiania tych NF. Tworzy kompletną instancjonowaną sieć logiczną, aby spełnić określone cechy sieci, takie jak ultraniezawodność i ultraniskie opóźnienie. Instancja zazwyczaj obejmuje wiele domen technicznych, w tym terminal, sieć dostępową, sieć transportową, CN i centrum danych, które hostuje aplikacje innych firm z branż pionowych.
- Typ wycinka sieci: Typy wycinków sieci to kategorie wysokiego poziomu dla instancji wycinków sieci, odzwierciedlające wyróżniające się wymagania dotyczące rozwiązań sieciowych. Dla 5G zidentyfikowano trzy podstawowe typy, a mianowicie eMBB, URLLC i mMTC. Tę krótką listę można dalej rozszerzyć w zależności od zapotrzebowania lub ewolucji 5G.
- Najemca: Najemcy to klienci wycinków sieci (np. branże pionowe) lub sami operatorzy sieci. Wykorzystują instancje wycinków sieci do świadczenia usług swoim użytkownikom. W rezultacie najemcy zazwyczaj mają niezależne zasady działania i zarządzania, które są wyjątkowo stosowane do ich instancji wycinków sieci.

### **Kody polarne**

Zbliżanie się do granicy pojemności Shannona przy praktycznej złożoności jest głównym wyzwaniem w teorii kodowania komunikacji cyfrowej w ciągu ostatnich kilku dekad. Dzięki wprowadzeniu losowości kodowania poprzez przeplatanie bitów informacji w koderze, kody Turbo mogą osiągnąć niemal optymalną wydajność przy rozsądnej złożoności. Zostały szeroko zastosowane w systemach komórkowych 3G i 4G, takich jak WCDMA, CDMA2000 i LTE. Podobnie, kody LDPC zrealizowały losowość kodowania, wykorzystując pseudolosowe połączenia między węzłami zmiennymi i kontrolnymi. Biorąc pod uwagę doskonałą wydajność, LDPC został również pomyślnie przyjęty przez WiMAX w specyfikacjach IEEE 802.16e i IEEE 802.16m. W 2009 roku Arikan wynalazł nowy schemat kodowania zwany kodami polarnymi, który otworzył nową granicę konstruowania kodów korygujących błędy w celu osiągnięcia pojemności Shannona. Opiera się na eleganckim zjawisku zwanym polaryzacją kanału, które można uznać za efekt Mateusza w świecie cyfrowym (bogaci stają się bogatsi, a biedni biedniejsi). Polaryzację kanału można rekurencyjnie zaimplementować, przekształcając wiele niezależnych zastosowań danego kanału binarnego wejścia dyskretnego (B-DMC) w zestaw kolejnych zastosowań syntetyzowanych kanałów binarnych. Najpierw niezależne kanały są przekształcane w dwa rodzaje syntetyzowanych kanałów: dobre i złe kanały. Kanały te są spolaryzowane, co oznacza, że przesyłają pojedynczy bit z nieco inną niezawodnością. Poprzez rekurencyjne zastosowanie takiej transformacji polaryzacji w powstałych kanałach, wzajemna informacja kanałów syntetycznych zmierza do dwóch skrajności: albo blisko 0 (kanały zaszumione), albo blisko 1 (kanały bez szumu). Następnie przesyłając bity informacji przez kanały bez szumu, przypisując zamrożone bity do kanałów z szumem, uzyskuje się ekstremalne przepustowości kanałów. W październiku 2016 r. Huawei ogłosił, że udało mu się osiągnąć szybkość łącza w dół wynoszącą 27 Gb/s przy użyciu kodów polarnych. Wykazano, że kody polarne mogą jednocześnie spełniać wszystkie trzy scenariusze użytkownika eMBB (do 20 Gb/s), URLLC (opóźnienie 1 ms) i mMTC (połączenia masowe) zgodnie z definicją ITU IMT-2020. Kody polarne mogą zapewnić wydajną technikę kodowania kanału dla 5G, umożliwiając znacznie wyższą wydajność widma i praktyczną zdolność dekodowania liniowej złożoności w celu zminimalizowania kosztów wdrożenia. W listopadzie 2016 r. 3GPP zatwierdziło stosowanie kodów polarnych dla kanału sterującego, podczas gdy kody LDPC dla kanału danych w 5G NR.

## **Wnioski**

Ta część zawiera dogłębne wprowadzenie do kluczowych technologii stosowanych w poprzednich generacjach. Każda sekcja składała się z dwóch głównych części: (i) architektury systemowej reprezentatywnego standardu dla każdej generacji, w tym jej głównych elementów sieciowych, podziału funkcjonalności, połączeń, interakcji i przepływów operacyjnych; i (ii) podstawowe zasady, korzyści i wyzwania technologii niezbędnych dla każdego pokolenia oraz synergia tych technologii w celu zbudowania systemu komórkowego. Celem jest przedstawienie przeglądu ewolucji technologicznej w komunikacji mobilnej, aby czytelnicy mogli dobrze zrozumieć najnowocześniejsze postępy w kierunku nadchodzącego systemu 6G.