



Sieć telefonii komórkowej 5G (1)

Wprowadzenie do technologii

Podstawową różnicę pomiędzy starszymi generacjami łączności komórkowej a nadciągającą technologią 5G, stanowi przede wszystkim przeniesienie koncentracji jej twórców z rozmów głosowych na transmisję danych. W sieciach 5G transmisja mowy odbywa się niejako przy okazji transmisji danych, a poszczególne warstwy sieci są zoptymalizowane w celu zapewnienia jak najszybszej, jak najbardziej niezawodnej transmisji danych. Aby osiągnąć tak rozumiane cele, projektanci sieci opracowali koncepcję, która w terenach silnie zurbanizowanych umożliwi osiągnięcie teoretycznej prędkości transmisji do 20 Gb/s, a sama pojemność sieci wzrosła przy tym tysiąc razy. Jednocześnie na świecie trwa burzliwa dyskusja na temat zagrożeń tworzonych przez nową technologię, jednak my jej nie podejmujemy. Jako inżynierowie konstruktorzy zapoznajmy się z parametrami sieci, jej możliwościami oraz wyzwaniem technicznymi, z którymi zapewne przyjedzie nam się zmierzyć w przyszłości.

Technologii 5G postawiono bardzo ambitne cele. Podstawowym jest prędkość transmisji do 20 Gb/s oraz tysiąckrotny wzrost pojemności sieci. Co więcej, ta technologia musi również zapewnić wsparcie dla nowych usług znanych, w tym tych już znanych pod wspólną nazwą IoT oraz krytycznej czasowo komunikacji maszyna-maszyna (D2D) i człowiek-maszyna (M2M), zapewniając przy tym jak najkrótszy czas latencji i jak najwyższy poziom niezawodności. To wszystko ma być bazą do rozwoju nowych technologii monitorowania urządzeń, ich zdalnej kontroli oraz nowych usług transportowych, a także tzw. Przemysłu 4.0.

Aby osiągnąć wymienione wyżej cele autorzy koncepcji musieli zaprząć do pracy takie technologie, jak MIMO (Multiple Input Multiple Output), opracować nową architekturę sieci, protokół komunikacyjny i techniki umożliwiające efektywną dystrybucję jej zasobów pomiędzy użytkowników.

Geneza

Pierwsza wersja specyfikacji sieci 5G ujrzała światło dzienne 15 grudnia 2017 roku, co w założeniu pozwalało na zastosowanie komercyjnie 5G w 2019 r. Początkowo 5G wdrażano testowo, obok technologii LTE. Pełną specyfikację dla funkcjonujących niezależnie, samodzielnie sieci 5G ukończono w czerwcu 2018 r. Aktualnie prowadzone są prace

testowe, a operatorzy, producenci sprzętu i oprogramowania prowadzą prace mające na celu szybkie wdrożenia komercyjne.

Technologia 5G może w naszym życiu spowodować rewolucję podobną do wprowadzenia maszyny parowej, ponieważ to nie tylko nowy interfejs radiowy, urządzenia i architektura sieci, ale również liczne nowe aplikacje, znacząco poprawiające ogólnie rozumiane bezpieczeństwo, a przy tym efektywność wykorzystania zasobów oraz produktywność.

Sieci 3G/4G zostały zaprojektowane i opracowane ponad 10 lat temu głównie przez operatorów telekomunikacyjnych i dostawców usług do użytku przez smartfony, w których podstawową usługą była transmisja sygnału mowy, a atrakcyjnym dodatkiem była transmisja danych. Dla kontrastu, sieciami 5G są zainteresowane różne branże przemysłowe i miasta, w których ramach sprawne przesyłanie danych zapewni liczne korzyści i ułatwienia. Sieci 5G mając w przyszłości zapewnić połączenie wszystkiego ze wszystkim.

Interfejs radiowy

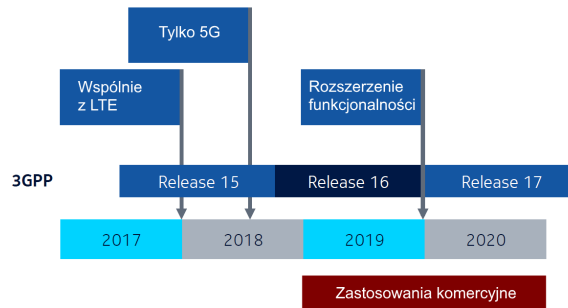
Główne spektrum częstotliwości radiowych wykorzystywanych w sieciach 5G mieści się w zakresie 3,3...4,9 GHz. Mniejsze częstotliwości, leżące poniżej 1 GHz, pozostawiono do wykorzystania urządzeniom mającym zapewnić pokrycie obszaru oraz penetrowanie pomieszczeń. Fale milimetrowe, z zakresu częstotliwości 24...28 GHz oraz 39 GHz są używane przez lokalne hot-spoty oraz aplikacje zapewniające łączność na zewnątrz i wewnątrz pomieszczeń. Interfejs radiowy sieci 5G opracowano w taki sposób, aby zapewniał maksymalną elastyczność pozwalając na łączne użycie fal z różnych zakresów częstotliwości.

Ważną cechą nowego interfejsu jest zastosowanie techniki MIMO oraz anten zbudowanych w postaci obszarów składających się z wielu anten elementarnych. Te anteny MIMO (zwane również Massive MIMO) są stosowane w stacjach bazowych oraz w urządzeniach powszechnego użytku umożliwiając nie tylko odpowiednie kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej, ale również charakterystyki promieniowania i dzięki temu pokrycia obszaru, a także skierowania wiązki radiowej w kierunku przeciwnym do użytkownika. Dzięki antenom MIMO będzie też możliwe współistnienie na tym samym obszarze technologii LTE i 5G w początkowym okresie wdrażania.

Sieć radiowa 5G zawiera otwarty interfejs ORAN (Open Radio Access Network) funkcjonujący pomiędzy torem RF i urządzeniami brzegowymi chmury. Umożliwia on elastyczne wdrożenie usług oraz dostęp do zasobów i usług chmury. Część przetwarzania niezbędna dla prawidłowego funkcjonowania toru radiowego jest wykonywana przez urządzenia krawędziowe chmury, co umożliwia szybkie zastosowanie pojemności sieci do wymagań.

Sieci LTE wspierają schematy modulacji: QPSK, 16QAM, 64QAM oraz 256QAM. Wszystkie wymienione rodzaje modulacji będą również używane przez interfejs radiowy sieci 5G. Ponadto, w specyfikacji 3GPP dołączono również schemat n/2-BPSK, aby umożliwić dalszą redukcję mocy stosunku mocy szczytowej do mocy średniej przy niewielkiej prędkości transmisji, co jest ważne dla niektórych usług. Nowe zastosowanie sieci 5G będzie obejmowało szeroką gamę przypadków użycia, więc jest prawdopodobne, że zestaw obsługiwanych schematów modulacji może ulec rozszerzeniu. Na przykład, częścią specyfikacji interfejsu radiowego może stać się schemat modulacji 1024QAM, ponieważ stałe łącze służące do transmitowania danych z sieci głównej do podsieci już stosuje schemat modulacji wyższy niż 256QAM. W specyfikacji interfejsu radiowego można też uwzględnić schematy modulacji zależne od urządzeń końcowych.

Dla umożliwienia funkcjonowania różnorodnych usług w szerokim zakresie częstotliwości jest wymagana skalowalna technika OFDM. Przypomnijmy, że jest to zwielokrotnianie w dziedzinie częstotliwości polegające na jednoczesnej transmisji wielu strumieni danych z wykorzystaniem ortogonalnych częstotliwości nośnych. Odstęp między poszczególnymi częstotliwościami są wyznaczane zgodnie



Rysunek 1. Etapy wdrożenia sieci 5G (źródło [1])

z 15 kHz×2n, gdzie „n” jest liczbą całkowitą, a 15 kHz to odstęp nośnej używane w LTE. Współczynnik skalowania „2n” zapewnia, że szczeliny czasowe i symbole różnych nośnych będą dopasowywane w dziedzinie czasu, co jest ważne w sieciach wykorzystujących mechanizm TDD. Wybór parametru „n” zależy od różnych czynników, takich jak częstotliwość nośna, wymagania stawiane przez usługę (opóźnienie, niezawodność i prędkość transmisji), zaburzenia (szum fazy oscylatora), mobilność i złożoność implementacji itp. Na przykład, szersze odstępy między nośnymi mogą być dostępne dla usług, w których kluczowe znaczenie ma czas latencji, świadczonych na niewielkim obszarze, przy użyciu dużej częstotliwości nośnej. Jeśli częstotliwości poszczególnych nośnych będą niższe, można zmniejszyć odstępy pomiędzy nimi, co będzie użyteczne dla usług świadczonych na dużym obszarze, urządzeń wąskopasmowych i usług multimedialnych, na przykład eMBMSs. Może być również możliwe jednoczesne wsparcie wielu usług mających różne wymagania, z wykorzystaniem tych samych nośnych przez multipleksowanie dwóch różnych podziałów kanałów.

Spektrum sygnału OFDM raczej wolno zanika poza pasmem transmisyjnym. W celu ograniczenia emisji poza pasmem, technologia LTE wykorzystuje 90 procent pasma. Oznacza to, że ze 111 możliwych do użycia fizycznych bloków PRB (Physical Resource Block), przy szerokości pasma 20 MHz jest używane 100 bloków. Dla sieci interfejsu radiowego sieci 5G ustalono, że wykorzystanie widma będzie większe niż 90 procent. W celu ograniczenia OFDM w dziedzinie częstotliwości będą używane techniki filtrowania/okienkowania. Należy zauważyć, że zależność między efektywnością wykorzystania spektrum częstotliwości a ograniczeniem widma nie jest liniowa, ponieważ 3GPP zgodziła się zaadoptować CP-OFDM ze skalowalnym odstępem między nośnymi w kierunkach UL (up-link) i DL (down-link) do co najmniej 52,6 GHz. Użycie tej samej fali nośnej w obu kierunkach upraszcza budowę interfejsu, zwłaszcza w odniesieniu do komunikacji wewnątrzsieciowej (z sieci wyższej do niższej) oraz pomiędzy urządzeniami (D2D). Dodatkowo, istnieje wsparcie dla DFT-Spread OFDM w kierunku UL dla ograniczonej liczby scenariuszy, z pojedynczym strumieniem transmisji (bez multipleksowania przestrzennego). Każda operacja, która jest przezroczysta dla odbiornika, może być stosowana po stronie nadajnika CP-OFDM.

Struktura ramki

Budowa ramki w sieciach 5G wspiera transmisje TDD i FDD w paśmie licencjonowanym i nielicencjonowanym. Umożliwia ona

Spektrum	Szerokość pasma	MIMO	Prędkość transmisji
24-28 GHz	1 GHz	2x2 / 4x4	10 / 20 Gbps
3.3-4.9 GHz	100 MHz	4x4	2 Gbps
<1 GHz	20 MHz	2x2	0.2 Gbps

Rysunek 2. Zależność prędkości transmisji od szerokości pasma (źródło [1])

uzyskanie bardzo krótkiego czasu latencji, szybkiego potwierdzenia HARQ, współistnienia z LTE i transmisję o zmiennym czasie trwania (na przykład krótki czas trwania dla urządzeń IoT lub długi dla transmisji multimedialnych). Struktura ramki jest zgodna z trzema kluczowymi zasadami projektowania wprowadzonymi w celu zwiększenia kompatybilności w przód i zmniejszenia interakcji między różnymi funkcjami:

Transmisje są samowystarczalne. Dane w szczelinie czasowej i w wiązce są dekodowalne samodzielnie, bez zależności od innych szczelin i wiązek. Oznacza to, że sygnały referencyjne wymagane do demodulacji danych są zawarte w danym slocie czasowym i danej wiązce transmisyjnej.

Transmisje są maksymalnie ograniczone w czasie i częstotliwości. Ułatwia to ewentualne wprowadzenie nowych typów transmisji równoległe ze starszymi. Struktura ramki 5G pozwala na uniknięcie mapowania kanałów sterujących i ograniczenie przepustowości systemu.

Brak ścisłych relacji pomiędzy kierunkami UL i DL. Podczas transmisji unika się statycznych i/lub ścisłych relacji czasowych pomiędzy szczelinami w różnych kierunkach transmisji. Na przykład, jest używane asynchroniczne potwierdzenie HARQ zamiast wstępnie zdefiniowanego czasu retransmisji.

Slot może być uzupełniony przez mini-slotty przeznaczone do obsługi transmisji danych z elastyczną pozycją początkową i krótszym czasem trwania, niż czas trwania typowego slotu. Mini-slot może być tak krótki, jak pojedynczy symbol OFDM i rozpocząć się w dowolnym momencie. Mini-slotty mogą być przydatne w różnych scenariuszach, w tym do transmisji w paśmie nielicencjonowanym i w zakresie fal milimetrowych.

Ta sama struktura ramki może być używana do FDD umożliwiając jednoczesny odbiór i wysyłanie danych (dane przesyłane w kierunkach DL i UL mogą być transmitowane w tym samym czasie). Ma ona również zastosowanie do komunikacji pomiędzy urządzeniami (D2D). W takim wypadku, struktura slotu DL może być używana przez urządzenie inicjujące transmisję, a struktura slotu UL może być użyta przez urządzenie na nią odpowiadające. Budowa ramki 5G pozwala również na szybkie potwierdzenie HARQ, w którym dekodowanie jest wykonywane podczas odbioru danych DL, a potwierdzenie HARQ jest przygotowywane przez urządzenie będące adresatem w czasie ochrony transmisji, przy przełączaniu z kierunku transmisji z DL na UL. W celu uzyskania krótkiego czasu opóźnienia, slot (lub ich zestaw w razie agregacji szczeliny) jest wstępnie ładowany za pomocą sygnałów kontrolnych i referencyjnych na początku slotu (lub ich zestawu).

Sygnały odniesienia

W sieciach 5G zminimalizowano liczbę sygnałów, które są zawsze włączone w celu optymalizacji efektywności energetycznej i zapewnienia kompatybilności „w przód”. W odróżnieniu od LTE, sygnały referencyjne w sieci 5G są przesyłane tylko wtedy, gdy jest to konieczne. Cztery główne sygnały referencyjne to sygnał referencyjny demodulacji (DMRS), sygnał referencyjny śledzenia fazy (PTRS), sygnał referencyjny (SRS) oraz sygnał referencyjny informacji o stanie kanału (CSI-RS):

DMRS służy do szacowania kanału radiowego dla demodulacji. Jest on zależny od urządzenia końcowego. Może zawierać formowanie wiązki, być ograniczony w zaplanowanym zasobie i przesyłany tylko wtedy, gdy jest to konieczne. Aby obsługiwać wielowarstwową transmisję MIMO, można zaplanować wiele ortogonalnych portów DMRS, po jednym dla każdej warstwy. Podstawowy wzorzec DMRS jest wstępnie ładowany, a przygotowywany DMRS bierze pod uwagę wcześniejsze wymagania dekodowania, aby wspierać aplikacje o krótkim czasie latencji. Dla scenariuszy o wymaganej małej prędkości transmisji, DMRS używa niskiej gęstości w domenie czasu, jednak dla scenariuszy o dużej prędkości transmisji, gęstość DMRS w domenie czasu zwiększa się, aby śledzić szybkie zmiany w kanale radiowym.

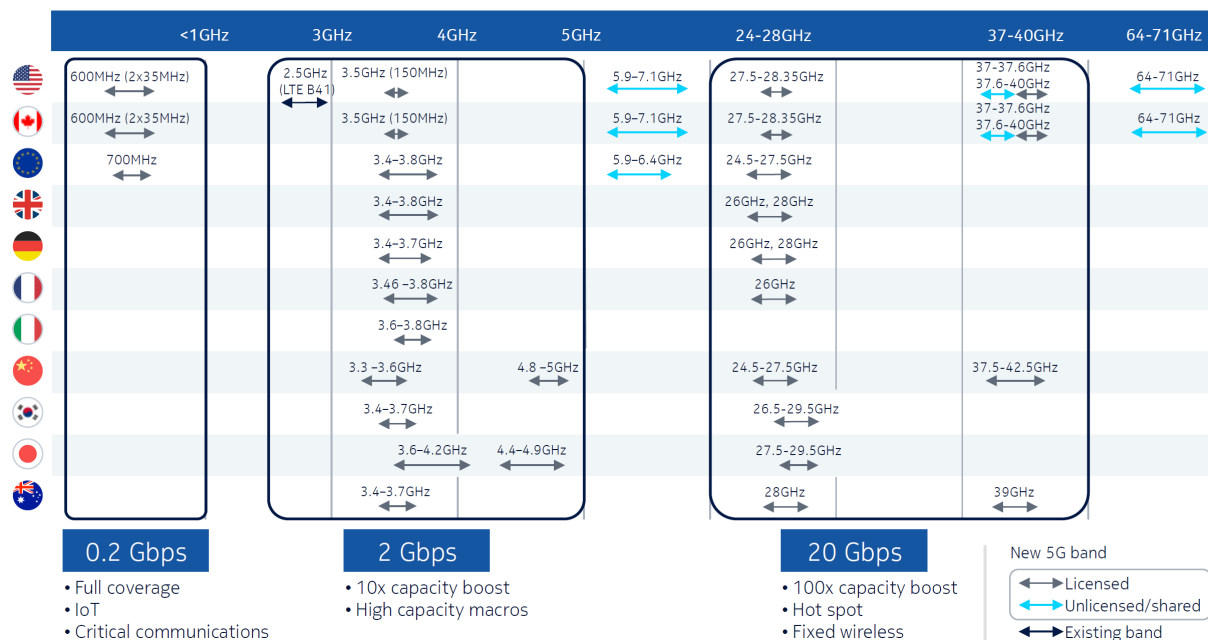
PTRS wprowadzono do pętli 5G po to, aby umożliwić kompensację szumu fazy oscylatora. Zazwyczaj szum fazowy wzrasta w funkcji częstotliwości nośnej. W związku z tym PTRS może być wykorzystywany przy dużej częstotliwości nośnej (na przykład, w zakresie fal milimetrowych) w celu minimalizacji szumu fazowego. PTRS został zaprojektowany w taki sposób, że ma niewielką gęstość w dziedzinie częstotliwości i dużą w dziedzinie czasu. Jest konfigurowalny w zależności od jakości oscylatorów, częstotliwości nośnej, rozstawu podnośnych OFDM oraz schematów modulacji i kodowania wykorzystywanych do transmisji.

SRS jest przekazywany w kierunku UL do wykonywania pomiarów jakości sygnału (CSI), głównie do planowania i adaptacji połączenia dla potencjalnie zmieniających się warunków transmisji. W sieciach 5G sygnał SRS jest również wykorzystywany do zarządzania wiązką MIMO w kierunku UL. Jest prawdopodobne, że SRS będzie miał modułową i elastyczną budowę w celu wsparcia różnych procedur i możliwości urządzenia końcowego.

CSI-SRS funkcjonuje podobnie, jak SRS.

Kodowanie kanałów

W sieci 5G stosuje się kody kontroli parzystości o małej gęstości (LDPC) dla kanału danych i kody biegunowe dla kanału kontrolnego. Kody LDPC są definiowane przez ich macierze kontroli parzystości,



Rysunek 3. Przydział zakresów częstotliwości dla 5G w różnych krajach (źródło [1])

z każdą kolumną reprezentującą zakodowany bit i każdym wierszem reprezentującym wyrażenie sprawdzania parzystości. Kody LDPC są dekodowane przez wymianę komunikatów pomiędzy zmiennymi i iteracyjną kontrolę parzystości. W odróżnieniu od kodów LDPC stosowanych w innych technologiach bezprzewodowych, kody stosowane w 5G mają strukturę zależną od prędkości transmisji.

Czas latencji

Docelowy czas latencji dla sieci 5G ma wynosić około 1 ms. W celu spełnienia tego wymagania niezbędne jest zastosowanie nowej ramki transmisji danych, wymiany stacji bazowych na inne oraz wymiany terminali mobilnych. Oprócz tego niezbędne jest lokalne przechowywanie co najmniej części zasobów i zaprzestanie stosowania technologii MEC (Multi-Access Edge Computing) polegającej na przesunięciu obliczeń wykonywanych z centrum sieci do jej krawędzi, bliżej odbiorcy usług. Korzystając z MEC, zamiast przysyłać wszystkie dane do analizy do punktu centralnego, urządzenia znajdujące się na krawędzi sieci analizują, przetwarzają i zapamiętują dane.

Wymagania odnośnie do bardzo krótkiego czasu latencji są zwykle łączone z wymaganiami odnośnie do niezawodności w wypadku nowych aplikacji, takich jak na przykład sterowanie robotem czy pojazdem autonomicznym.

Technologia 5G stawia również podwyższone wymagania używanemu sprzętowi radiowemu: krótki czas latencji pasma radiowego, szeroki zakres pasma dla interfejsu RF i możliwości implementacji techniki MIMO. Aby to stało się możliwe, niezbędne są nowe chipsety przeznaczone do realizacji interfejsów radiowych. Co ważne, przy wzroście wymagań odnośnie do mocy obliczeniowej muszą one pobierać relatywnie mało energii, zapewniając jak najdłuższe funkcjonowanie urządzeniom IoT oraz mobilnym, noszonym przez użytkowników sieci.

Mobilna sieć szerokopasmowa

Pierwszym przypadkiem użycia technologii 5G jest zwielokrotnienie szybkości transmisji danych i dzięki temu zwiększenie możliwości oferowanych przez mobilne aplikacje szerokopasmowe. Technologia 5G umożliwia uzyskanie bardzo dużej prędkości transmisji dzięki wykorzystaniu transmisji szerokopasmowej, przebiegającej z wykorzystaniem techniki MIMO. Typowa, maksymalna szerokość pasma dla częstotliwości nośnej poniżej 1 GHz wynosi 20 MHz, co umożliwia uzyskanie prędkości 200 Mb/s TDD przy 2x2MIMO. Pasma 100 MHz TDD i zastosowanie 4x4MIMO pozwala na uzyskanie prędkości transmisji do 2 Gb/s. Fale milimetrowe o częstotliwości z zakresu 24...28 GHz umożliwiają uzyskanie 10...20 Gb/s przy szerokości pasma 1 GHz oraz 2x2 i 4x4 MIMO.

Zastosowanie technologii 5G w istniejących sieciach LTE pozwoliło na uzyskanie znacznie większej pojemności sieci oraz większej prędkości transmisji danych. Stało się tak przede wszystkim dzięki matrycom anten i technologii MIMO. Komórka LTE mająca szerokość pasma 20 MHz umożliwia w rzeczywistej sieci uzyskanie przepustowości 40 Mb/s przy średnim natężeniu ruchu. Komórka sieci 5G mająca pasmo 100 MHz daje możliwość uzyskania 20-krotnie większej pojemności dzięki użyciu 5-krotnie szerszego pasma częstotliwości oraz uzyskanie 4-krotnie większej sprawności dzięki obszarom MIMO. Technologia 5G w swoim zakresie częstotliwości średnich zapewnia jak dotychczas największy wzrost pojemności sieci w historii.

Komponenty sieci 5G

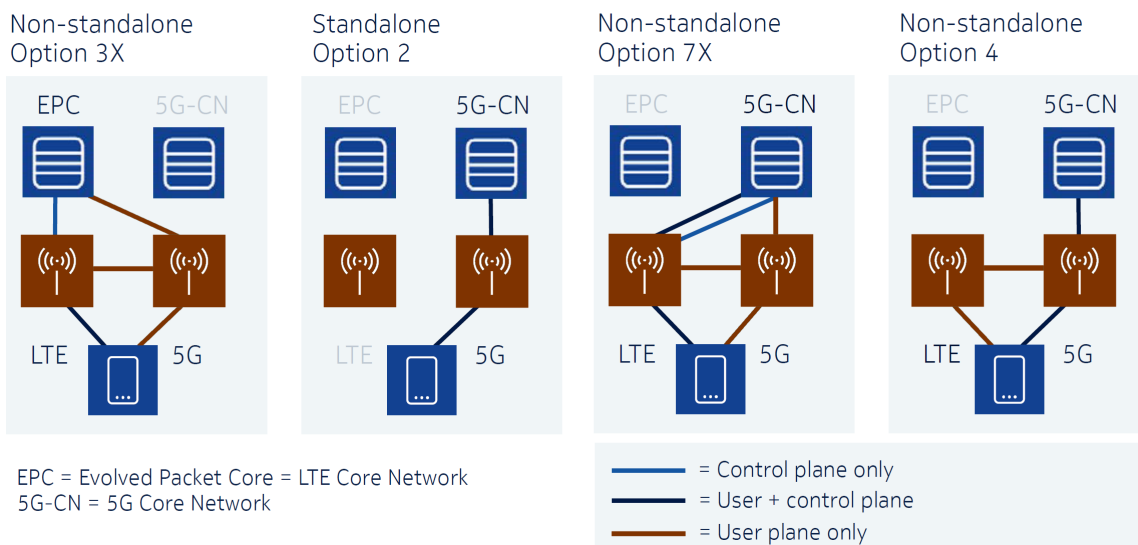
Ambitne cele stawiane przed sieciami 5G wymagają zastosowania nowych technologii. Wśród podstawowych składowych nowej technologii wymieniane są następujące rozwiązania:

Nowy zakres częstotliwości. Duża prędkość transmisji danych wynosząca do 20 Gb/s wymaga pasma o szerokości 1...2 GHz dostępnego – jak można się spodziewać – w zakresie częstotliwości nośnej o dużej częstotliwości. Z tego powodu technologia 5G wymaga użycia milimetrowych fal radiowych, o częstotliwości powyżej 20 GHz. Pasma o mniejszej częstotliwości są wymagane do zapewnienia pokrycia sieci, natomiast o większej do uzyskania dużej prędkości transmisji oraz zwiększenia pojemności sieci.

Formowanie wiązki za pomocą anten MIMO. Wykorzystanie technologii anten MIMO złożonych z wielu anten elementarnych oraz formowania pasma przenoszenia i kształtu wiązki za ich pomocą pozwala na poprawę efektywności wykorzystania spektrum częstotliwości i pokrycia sieci. Formowanie wiązki jest bardziej efektywne w zakresie sygnałów o dużej częstotliwości, ponieważ fizyczna wielkość anteny jest związana z długością fali. W praktyce, ta technologia może być z powodzeniem stosowana dla sygnałów o częstotliwości powyżej 2 GHz w stacji bazowej, natomiast w zakresie fal milimetrowych również w urządzeniach mobilnych.

Fragmentacja sieci. Technika fragmentowania sieci tworzy segmenty sieci wirtualnej dla różnych przypadków użycia tej samej sieci 5G. Rdzeń sieci 5G jest przewidziany do wspierania pracy wielu fragmentów dla każdego urządzenia, dlatego też warstwy fizyczna i protokołu muszą wspierać różne segmenty pionowe, zróżnicowane zakresy częstotliwości oraz maksymalizować energię i sprawność spektralną.

Kompatybilność wsteczna. Sieć 5G może być wdrożona jako samodzielny system, ale w fazie początkowej zostanie wdrożona razem z LTE. Urządzenia 5G są kompatybilne wstecznie i mogą jednocześnie łączyć z sieciami 5G oraz LTE. Ten dualizm interfejsu radiowego może zwiększyć szybkość transmisji danych i umożliwić korzystanie z protokołów LTE w celu szybkiego wprowadzenia 5G.



Rysunek 4. Architektura sieci zgodnie ze specyfikacją 3GPP Release 15 (źródło [1])

Otwarty interfejs radiowy i technologia chmury. Sieć 5G zawiera obsługę chmury z otwartym interfejsem radiowym ORAN i przetwarzaniem wykonywanym przez urządzenia brzegowe chmury. Wymagania odnośnie do krótkiego czasu latencji wymagają „zbliżenia” zawartości chmury do interfejsu radiowego, co prowadzi do zerwania z technologią MEC, podczas gdy wymagania odnośnie do skalowalności wymagają wprowadzenia zalet chmury do sieci radiowych. Radio i rdzeń 5G są również przeznaczone do implementacji natywnej chmury, w tym dla nowych interfejsów wewnątrz sieci radiowej.

Spektrum częstotliwości

Technologia 5G jest pierwszą, którą opracowano w sposób umożliwiający wykorzystanie dowolnej częstotliwości radiowej z zakresu od 400 MHz do 90 GHz. Ten bardzo szeroki zakres częstotliwości nośnych jest wymagany do zapewnienia kombinacji dużej pojemności sieci, dużej prędkości transmisji, bardzo dobrego pokrycia obszaru oraz podwyższonej niezawodności. Sygnały o częstotliwości poniżej 6 GHz są używane dla uzyskania dobrego pokrycia obszaru oraz dla transmisji danych o prędkości rzędu kilku Gb/s. Dobre pokrycie obszaru jest niezbędne dla zapewnienia możliwości łączności urządzeniom IoT oraz poprawnego funkcjonowania takich aplikacji, jak na przykład zdalne sterowanie lub komunikacja z pojazdami autonomicznymi.

Podstawowy zakres częstotliwości w pierwszej fazie wdrożenia technologii 5G obejmuje 3,3...4,9 GHz oraz fale milimetrowe z zakresu 24...28 GHz i 39 GHz. Jest przy tym wykorzystywana technologia zwielokrotniania czasowego TDD. Sieci 5G mogą używać również częstotliwości poniżej 1 GHz przy zastosowaniu techniki zwielokrotniania częstotliwościowego FDD. Sygnały z tego zakresu są dobrze propagowane wewnątrz pomieszczeń. Fale z „niskiego” zakresu mogą mieć częstotliwość 600, 700, 850 lub 900 MHz minimalizując zużycie typowego zakresu częstotliwości 5G. Połączenie sygnałów z zastosowaniem różnych zakresów częstotliwości daje możliwość optymalnego połączenia pokrycia, pojemności oraz prędkości transmisji.

W sieciach 5G można również używać współdzielonych zakresów częstotliwości, takich jak 3,5 GHz w USA oraz nielicencjonowanego pasma ISM, na przykład 5 GHz. Takie podejście otwiera nowe możliwości dla przedsiębiorstw i branż, aby korzystać z technologii 5G bez konieczności korzystania z pasma licencjonowanego.

Formowanie wiązki

Technika formowania wiązki MIMO jest atrakcyjnym rozwiązaniem umożliwiającym zwiększenie pokrycia oraz pojemności sieci. MIMO jest bardzo ważne dla sieci 5G, ponieważ wymaga ona uzyskanie większej wydajności spektralnej. W związku z nią opracowano i wykonano aktywne anteny składające się z wielu anten elementarnych połączonych z układami transceiverów. Najnowsze specyfikacje 3GPP wspierają formowanie wiązki oraz wyższe częstotliwości nośne pozwalające na miniaturyzację anten MIMO.

Technika MIMO została wdrożony komercyjnie już w sieciach LTE, głównie w TD-LTE, choć liczba tych instalacji jest raczej niewielka. MIMO będzie używana w sieciach LTE głównie w zatłoczonych miejscach dla zwiększenia pojemności sieci. Z drugiej strony, MIMO będzie podstawowym rozwiązaniem w sieci 5G pracującej

w zakresie 3,3...4,9 GHz mającym na celu zwiększenia pokrycia obszaru z uwzględnieniem budżetu łącza [dB], wydajności w rozumieniu efektywności spektralnej (bps/Hz/komórkę). Kanały transmisyjne leżące w okolicy pasma 3,5 GHz są doskonałe dla wdrożenia MIMO, ponieważ antena o zysku energetycznym 24 dBi ma zbliżoną wielkość do pracującej przy niższej częstotliwości, mającej mniejszy zysk energetyczny, wynoszący około 15...18 dBi.

Technika MIMO może zwiększyć pokrycie obszaru dzięki większemu zyskowi energetycznemu anteny. Może przy tym 4-krotnie zwiększyć efektywność spektralną do wartości ponad 10 bps/Hz/komórkę przy maksymalnej przepustowości komórki wynoszącej nawet powyżej 80 bps/Hz. Całkowite wzmocnienie zależy od konfiguracji anteny: liczby jej elementów, liczby transceiverów oraz mocy wyjściowej.

Segmentacja

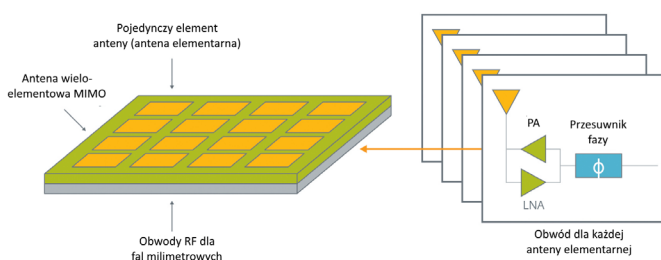
Sieć 5G jest zaprojektowana do obsługi zróżnicowanych, wręcz ekstremalnych wymagań, jeśli odnieść je do funkcjonalności starszych sieci. Są to głównie oczekiwania dotyczące jak najkrótszego czasu latencji, dużej przepustowości, pojemności i dostępności. Segmentacja sieci oferuje rozwiązanie spełniające wymagania wszystkich przypadków użycia we wspólnej infrastrukturze sieciowej. Dzięki niemu ta sama infrastruktura sieciowa może obsługiwać: smartfony, tablety, połączenia rzeczywistości wirtualnej, urządzenia służące do monitorowania stanu zdrowia, aplikacje zdalnego sterowania lub łączność zapewniającą kontakt z pojazdem autonomicznym.

Segmentacja sieci 5G może być używana w celu zapewnienia, że wydajność sieci spełnia oczekiwania klientów, a także wymagania usług i aplikacji. Aby korzystać z sieci w sposób prawidłowy, poszczególne segmenty, w tym interfejs radiowy, transport, metro, rdzeń, urządzenia brzegowe i centralne ułożone w chmurze obliczeniowej, które wcześniej były traktowane oddzielnie, muszą być traktowane jako całość. Przy takim ujęciu optymalizacja wydajności musi być również koordynowana i adoptowana z uwzględnieniem całej sieci, a nie tylko poszczególnych jej funkcjonalności.

Sieć 5G wymaga odpowiednich narzędzi dla mechanizmu segmentacji. W sieciach LTE jest wspierany mechanizm QoS (Quality of Service), ale sieci 5G wymagają więcej. Dlatego opracowano i wdrożono mechanizm QoE – Quality of Experience. Stosowany w sieciach LTE mechanizm QoS jest dobry dla operatorów, ponieważ filtry pakietów są łatwe do zdefiniowania, a sesje aplikacji trwają wystarczająco długo, aby łatwo można je było zidentyfikować i przydzielać odpowiedni poziom QoS. Architektura QoE w sieciach 5G musi wykrywać i różnicować krótkotrwałe przepływy usług podrzędnych. Sygnalizowanie atrybutów filtrów pakietów i powiązanych polityk na płaszczyźnie kontrolnej nie jest konieczne, gdyż zarówno interfejs radiowy, jak i rdzeń są „świadome” aplikacji i oba mogą podejmować szybkie decyzje dotyczące działań w celu osiągnięcia celów QoE.

Opcje dostępne w ramach architektury

Technologię 5G można wdrożyć jako samodzielne rozwiązanie bez LTE. Takie podejście w 3GPP nazywa się „Opcją 2”. Sieć 5G może również korzystać z niestandardowych rozwiązań zapewniających łączność z LTE, co zostało zdefiniowane jako „Opcja 3”. Pierwsze sieci 5G będą musiały korzystać z „Opcji 3”, ponieważ zgodnie z 3GPP musi ona być dostępna przez pełne 6 miesięcy zanim zostanie użyta „Opcja 2”. Łączność z użyciem dwóch standardów ma również inne zalety – umożliwia połączenie szybkości transmisji danych LTE i 5G oraz wykorzystanie istniejącego Evolved Packet Core (EPC) będącego platformą zapewniającą konwergentne połączenia głosowe i dane w sieciach 4G Long-Term Evolution (LTE). Architektura sieci 2G i 3G przetwarza i przełącza głos oraz dane za pośrednictwem dwóch oddzielnych subdomen: CS (Circuit-Switched) dla połączeń głosowych i PS (Packet-Switched) dla pakietowych połączeń danych. „Opcja 2” z siecią bazową 5G umożliwia korzystanie z nowych usług, w tym



Rysunek 5. Schemat budowy anteny MIMO

z krótkiego czasu latencji i szybszego zestawienia łącza, niż w LTE. Późniejsze wydania specyfikacji 3GPP prawdopodobnie również przyniesie możliwość podłączenia LTE eNodeB do sieci bazowej 5G z opcjami „7” i „4”.

Architektura Open Radio Access Network (ORAN)

Sieć radiowa 5G zawiera nowe interfejsy między jednostką radiową i jednostką pasma podstawowego lub jednostką brzegową chmury w celu wprowadzenia większej elastyczności w zakresie wdrażania sieci radiowej. Najbardziej typowym rozwiązaniem stosowanym w LTE jest podejście rozproszone, w którym całość przetwarzania związanego z siecią radiową odbywa się w pobliżu anteny i toru RF. Kolejną alternatywą w LTE jest pasmo w paśmie, gdzie wszystkie operacje związane z przetwarzaniem pasma są wykonywane w lokalizacji centralnej wyposażonej w interfejs CPRI (Common Public Radio Interface) przyłączony do toru RF.

Podejście rozproszone może być również wykorzystywane w sieciach 5G. Pasma w paśmie jest wyzwaniem w 5G, ponieważ wymagana szybkość transmisji danych CPRI jest bardzo wysoka – nawet do 1 Tb/s-z szerokopasmowym torem RF i anteną MIMO. W związku z tym 5G zawiera inne opcje dzielenia funkcjonalności.

Rozwiązaniem jest uwzględnienie opóźnienia krytycznych funkcjonalności niskiej warstwy w układzie RF, a mniej krytycznych funkcjonalności w urządzeniach brzegowych chmury. Takie rozwiązanie może zminimalizować wymagania odnośnie do warstwy transportowej. Podzielona niższa warstwa ma swoją część w układzie RF, podczas gdy podzielona warstwa wyższa ma całość warstwy 1 i część warstwy 2 w układzie RF. Podzielona warstwa niższa ma mniejsze wymagania odnośnie do transportu w porównaniu z pasmem ulokowanym w paśmie podstawowym, a podział wyższej warstwy jest jeszcze mniej rygorystyczny.

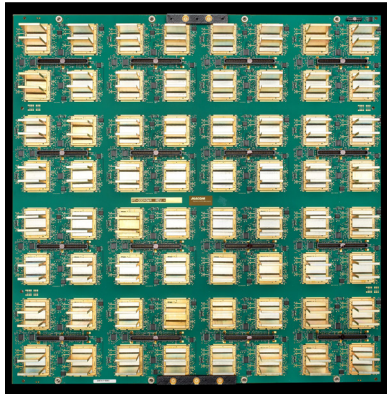
Otwarte interfejsy w sieci radiowej są obsługiwane przez ORAN Alliance, który obejmuje wielu ważniejszych producentów i operatorów sieci komórkowych. Duża część definicji interfejsu została wykonana przez firmę Nokia. ORAN Alliance to połączenie wcześniejszego forum xRAN i C-RAN Alliance. Celem jest doprowadzenie branży do otwartych, interoperacyjnych interfejsów, wirtualizacji RAN i inteligentnej wymiany dużej ilości danych w ramach RAN.

Uruchomienie sieci 5G

Sieć 5G może wyglądać skomplikowane, aby jej uruchomienie jest szybkie i łatwe. Można je też uprościć koncentrując się na mobilnej sieci szerokopasmowej, wykorzystując przy tym istniejącą architekturę, siatkę sieciową i infrastrukturę, istniejący rdzeń transmisji pakietowej oraz istniejące stacje bazowe AirScale. Pierwsza faza 5G wdrożenia przynosi wyższe szybkości transmisji danych i zwiększenie pojemności sieci. W kolejnym etapie rozbudowy sieci 5G można stopniowo zwiększać jej możliwości, wprowadzając krótki czas latencji oraz możliwość korzystania z Internetu rzeczy, dzięki nowej architekturze chmurowej, z małymi komórkami, pracującymi w zakresie fal milimetrowych oraz z nową siecią stacji bazowych 5G.

Na koniec

Technologia używana do transmisji danych sieciach 5G jest niby dobrze znana, ale złożoność mechanizmów kontroli danych oraz ich złożoność w celu uzyskania zamierzonej funkcjonalności chyba



Fotografia 6. Wielelementowa antena MIMO firmy Maxcom (źródło [6])

przerasta możliwości pojmowania pojedynczego człowieka. Na szczęście, mając do czynienia z siecią zwykle nie musimy przejmować się obowiązującymi w niej zasadami transmisji. Jako inżynierowie po prostu zastosujemy moduł dostępny u danego producenta i... już. Warto jednak znać choćby podstawy funkcjonowania sieci, aby móc w pełni korzystać z oferowanych przez nią możliwości.

W kolejnym artykule z tego cyklu zbliżymy się już do sprzętu i do praktycznych aplikacji. Omówimy ich podstawy, mimo iż na to może jeszcze jest troszeczkę zbyt wcześnie, ponieważ na wdrożenie 5G w naszym kraju trzeba będzie jeszcze troszkę poczekać. Z drugiej strony, gdy już ruszy pierwszy kamyk, to z całą pewnością pociągnie za sobą lawinę i ani obejrzymy się, gdy znajdziemy się na obszarze pokrywanym zasięgiem 5G i będziemy korzystali z rozszerzonego zakresu usług. Tylko w świetle tego wszystkiego zastanawia mnie jedno – czy zapowiedź „inwazji mocy” oznacza rychły koniec standardów IoT, takich jak LoRA, Sigfox i inne? Wszak specyfikacja 5G obejmuje również transmisją okazjonalną, małej mocy, na rozległym obszarze. A dodatkowo, stoją za nią ogromne środki finansowe, które z pewnością zostaną zainwestowane w rozwój tej technologii przez operatorów sieci telefonii komórkowej i stojące za nimi konsorcja.

Jacek Bogusz, EP

Bibliografia:

1. „5G new radio network. Uses cases, spectrum, technologies and architecture”, 2016, Nokia white paper
2. „Opportunities in 5G: the view from eight industries”, Ericsson Survey Report, 2016
3. „5G empowering vertical industries”. the 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G-PPP) Technical Report, 2016
4. „Study on scenarios and requirements for next generation access technologies”, 3GPP Technical Report TR38.913, ver. 14.2.0, Release 14, 2017
5. A. A. Zaidi, R. Baldemair, H. Tullberg, H. Bjarkegren, L. Sundstrom, J. Medbo, C. Kilinc, and I. D. Silva „Waveform and numerology to support 5G services and requirements”, IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 11, 2016
6. „Phased Array Antennas & The Roadmap to 5G Wireless”, <http://bit.ly/2XFHcJj>, lipiec 2017
7. „Designing for the future: the 5G NR physical layer”, <http://bit.ly/2TlCgG>
8. Sampson Hu, David Tanner Building „Smartphone Antennas That Play Nice Together. 3D manufacturing can defeat the interference problem inside smart devices”, <http://bit.ly/2HiqxWr>



Rysunek 7. Smartfon firmy Samsung projektowany pod kątem użycia w sieci 5G (źródło [8])