

Politechnika Wrocławska
Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Kierunek: **TIN**

Specjalność: **TIP**

PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA

**Przepustowość sieci 5G dla różnych trybów
transmisyjnych**

Michał Rogaliński

Opiekun pracy

dr inż. Sławomir Kubal

Słowa kluczowe: radio, telekomunikacja, sieci komórkowe, 5G

WROCŁAW 2022

STRESZCZENIE

W porównaniu z dawniejszymi czasami można powiedzieć, że nowe technologie wiązały się z wprowadzeniem nowych rzeczy w życie ludzi takie jak sieć Internet lub komputery osobiste. Obecnie obserwuje się ulepszanie istniejących systemów, aby zwiększyć ich wydajność lub efektywność. Istnieją różne metryki, które określają jakość, niezawodność i inne aspekty systemów lub technologii. Najprostszą i najczęściej spotykaną metryką dla szeroko pojętej telekomunikacji jest przepustowość. W kontekście sieci komórkowych piątej generacji, które są omawiane w tej pracy, wzięto pod uwagę przepustowość kanału PDSCH oraz PUSCH. Teoretyczna przepustowość sieci najnowszej generacji pozwala porównać ją z poprzednimi oraz subiektywnie określić jej wartość. Aby ją wyznaczyć zdecydowano się zaimplementować wzór ze specyfikacji 3GPP, który określa aproksymowaną przepustowość. Wykorzystana metoda obliczeniowa obejmuje kilka technologii charakterystycznych dla sieci komórkowych takich jak wieloantenowość i modulacje cyfrowe, ale również charakterystycznych dla sieci piątej generacji takich jak formowanie wiązki i agregacja nośnych. W tym opracowaniu opisano jak generalnie wyglądają sieci NR, technologie poruszone w metodzie obliczeniowej oraz sam program.

ABSTRACT

In previous years, in comparison to now, it can be said that new technologies used to introduce new things to human society such as the Internet or computers. Nowadays, technologies are rather upgraded in order to increase their effectiveness. There are metrics which define the quality, reliability and other aspects of systems or technologies. The most simple and common metric for general telecommunication is throughput. In the context of fifth generation cellular networks, which are the subject of this thesis, the PDSCH and PUSCH channels were taken into consideration. Theoretical throughput of the newest network lets it to be compared with the previous ones and subjectively assess its worth. In order to calculate it, it was decided that a formula described in 3GPP specifications shall be used which approximates the throughput. The used method includes some technologies such as MIMO and digital modulation but also some characteristic for NR such as beamforming or carrier aggregation. This thesis describes how generally NR networks work, the technologies included in the formula and the implementation.

SPIS TREŚCI

| | |
|--|----|
| Wprowadzenie | 3 |
| Cel pracy | 3 |
| Zakres pracy | 3 |
| 1. Sieci komórkowe 5G | 4 |
| 1.1. Scenariusze działania sieci 5G | 5 |
| 1.1.1. eMBB | 5 |
| 1.1.2. URLLC | 5 |
| 1.1.3. mMTC | 5 |
| 1.2. Architektura | 6 |
| 1.3. NG-RAN | 7 |
| 1.3.1. Protokoły radiowe | 7 |
| 1.3.2. Stacja bazowa | 16 |
| 1.4. 5GC | 18 |
| 1.4.1. Funkcje sieciowe NF | 18 |
| 1.4.2. Edge computing | 21 |
| 1.4.3. Network Slicing | 21 |
| 2. Warstwa fizyczna | 22 |
| 2.1. Ramka OFDM | 23 |
| 2.1.1. Technologia OFDM | 23 |
| 2.1.2. OFDM w 5G | 27 |
| 2.2. System wieloantenowy MIMO | 29 |
| 2.2.1. Technologia MIMO | 30 |
| 2.2.2. MU-MIMO | 32 |
| 2.3. Agregacja nośnych CA | 33 |
| 2.4. Modulacja | 34 |
| 2.4.1. Podstawy modulacji | 34 |
| 2.4.2. Modulacja amplitudy AM oraz ASK | 35 |
| 2.4.3. Modulacja fazy PM oraz PSK | 36 |
| 2.4.4. Cyfrowa kwadraturowa modulacja amplitudowo-fazowa QAM | 37 |
| 3. Kalkulator przepustowości | 39 |
| 3.1. Opis programu | 39 |
| 3.2. Przykłady obliczeń | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3. Implementacja | 45 |
| 3.3.1. Metoda obliczeniowa | 46 |
| 3.3.2. Projekt interfejsu graficznego | 49 |
| Podsumowanie | 53 |
| Bibliografia | 55 |

WPROWADZENIE

CEL PRACY

Celem pracy jest opracowanie programu, działającego na komputerach osobistych, który umożliwi wyznaczenie maksymalnej teoretycznej przepustowości sieci komórkowej 5G o zadanej konfiguracji stacji bazowej. Projekt został wykonany w oparciu o specyfikacje 3GPP, które dokładnie opisują metodę obliczeniową wartości przepustowości. Wykorzystane specyfikacje podają potrzebne tabele z danymi aby program mógł poprawnie funkcjonować. Program posiada przejrzysty interfejs graficzny z odpowiednimi widżetami pełniącymi funkcje danych wejściowych.

ZAKRES PRACY

Praca obejmuje technologie sieci 5G, których aspekty wchodzi w skład metody obliczeniowej zaimplementowanej w programie. Wykorzystane technologie to:

- MIMO (Multiple Input Multiple Output),
- MU-MIMO (Multi User - MIMO, kształtowanie wiązki),
- agregacja łączy,
- modulacje QAM (Quadrature Amplitude Modulation),
- ramka OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

W związku z tym, że praca dotyczy sieci komórkowych 5G to opisane zostało czym one się charakteryzują i jak działają. Przedstawiono architekturę sieci i jej charakterystyczne różnice w porównaniu do poprzednich generacji.

Implementacja projektu została wykonana w języku Python, korzystając z bibliotek umożliwiających wygodne manipulowanie danymi (numpy) oraz tworzenie interfejsów graficznych (PyQt).

1. SIECI KOMÓRKOWE 5G

Na pierwszy rzut oka sieć komórkowa 5G nie różni się tak mocno od poprzedniej generacji LTE (Long Term Evolution). Najczęściej mówi się o wyższych częstotliwościach pracy systemu i osiąganych szybkościach lub nowościach w warstwie fizycznej. Jednakże to jedynie powierzchowna obserwacja, ponieważ najnowsza generacja sieci komórkowych znacząco różni się podejściem do architektury. W tym rozdziale zostaną omówione cechy elementów architektury sieci oraz różnice w stosunku do architektury LTE.

Piąta generacja sieci komórkowych wprowadza nową filozofię co do jej działania. System 5G zaprojektowano z myślą o serwisach o różnym charakterze przepływu danych, które zostaną omówione w następnym podrozdziale. Podział sieci na serwisy osiągnięto poprzez projekt centralnej sieci z wykorzystaniem koncepcji programowalnych sieci komputerowych SDN (Software-Defined Networking) oraz wielu innych podobnych rozwiązań.

System 5G (5GS) stworzono z myślą o dostępności i jakości. Wiele nowych rozwiązań dotyczy tego w jaki sposób nie marnować zasobów sieci lub jak uprościć jej budowę. Zwrócono też uwagę na fakt, że większość świata posiada system poprzedniej generacji LTE i szkoda marnować istniejącą już infrastrukturę. Aby temu zaradzić wprowadzono nowe interfejsy pozwalające na współpracę nowej architektury (5GC) oraz starej architektury (EPC - Evolved Packet Core) [1].

Oczywiście postęp technologiczny prowadzi też do ulepszeń sprzętowych. System wieloantenowy MIMO, który jest generalnie wykorzystywany w sieciach bezprzewodowych, został ulepszony o technologię formowania wiązki (beamforming), dając każdemu urządzeniu końcowemu własny element radiowy do komunikacji (MU-MIMO). Zaczęto używać większej liczby anten zwiększając liczbę strumieni danych z np. 2 lub 4 do 16 lub 64 (warstwy MIMO). Zaczęto również wykorzystywać agregację łączy charakterystyczną dla systemów 5G, gdzie agreguje się kilka komórek sieciowych w ramach zwiększenia ich wypadkowej efektywności.

1.1. SCENARIUSZE DZIAŁANIA SIECI 5G

W tym podrozdziale zostaną przedstawione trzy główne scenariusze działania sieci 5G, które służą do modelowania pewnych jej aspektów. Każdy z tych modeli definiuje różne problemy o różnych zapotrzebowaniach na zasoby sieciowe. Dla sieci komórkowych piątej generacji kluczowe jest rozróżnienie takich scenariuszy, aby móc określić kto jest odbiorcą danego serwisu i jak optymalnie zarządzać zasobami sieciowymi [1].

1.1.1. eMBB

Enhanced Mobile Broadband jest modelem serwisu, który określa nowe zapotrzebowanie na wydajność sieci. Wielkie zgrupowania ludzi, na zewnątrz i wewnątrz budynków, wymagają większych szybkości, nawet do ponad 1 Gbps. Jest to tradycyjne zapotrzebowanie ludzi na lepsze połączenie z Internetem. Ten model może obejmować takie usługi jak streaming video poprzez Internet lub integracje z różnymi serwisami w chmurze.

1.1.2. URLLC

Ultra Reliable and Low Latency Communications określa zapotrzebowanie na niezawodne obsługiwanie maszyn. Ten model serwisu zapewnia niskie opóźnienia, odczuwalne na dużych odległościach od użytkownika. Przykładem takiego serwisu mógłby być robot chirurg, którym operowałby faktyczny chirurg z odległości kilkuset kilometrów bez żadnego problemu. Takie systemy nie potrzebują tak dużych szybkości jak w modelu eMBB.

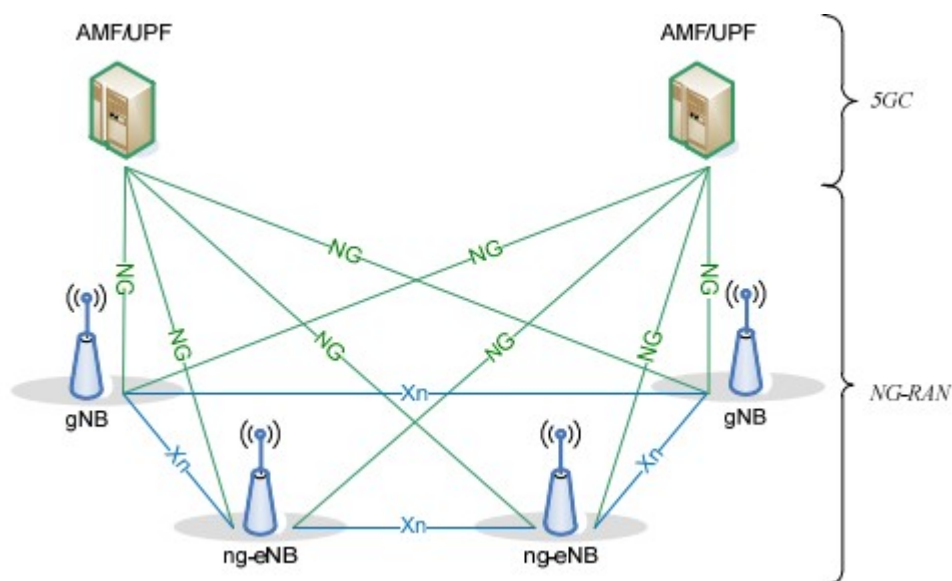
1.1.3. mMTC

Massive Machine Type Communications przedstawia przypadek gdzie komunikuje się wiele urządzeń na raz. Przykładem może być smart city, w którym każda maszyna jest podłączona do sieci i każda z nich może komunikować się ze sobą w jakimś celu (Massive IoT). Taki ruch różni się od typowego, generowanego przez człowieka, więc należy je rozróżniać.

1.2. ARCHITEKTURA

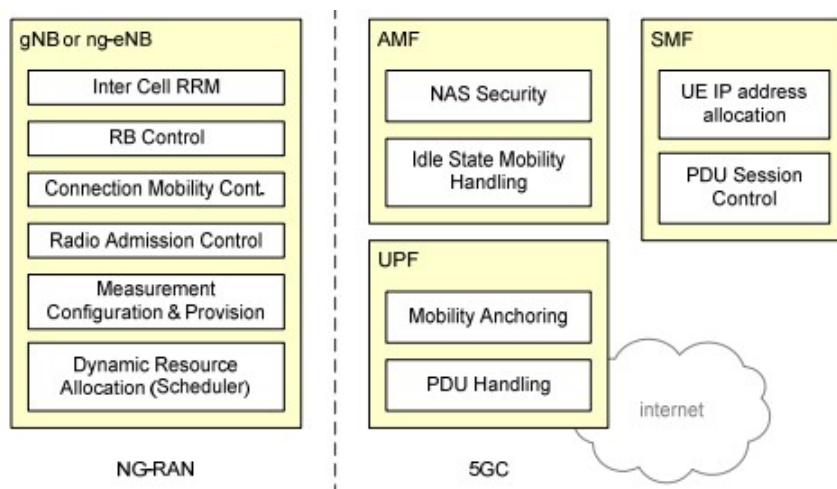
W skład architektury sieci 5G wchodzi dwa główne elementy. Są to **NG-RAN** (Next Generation Radio Access Network) odpowiedzialny za utworzenie kanału telekomunikacyjnego między urządzeniem końcowym a siecią centralną **5GC**, w której ustalana jest sesja oraz przydzielane są odpowiednie zasoby.

Węzły występujące w architekturze 5G (rys. 1.1) komunikują się ze sobą za pomocą odpowiednich logicznych interfejsów. Każda stacja bazowa komunikuje się inną poprzez interfejs Xn, a z elementami sieci centralnej poprzez interfejs NG [6].



Rys. 1.1: Architektura sieci 5G [6]

Obie wcześniej wspomniane warstwy architektury sieci dzielą się funkcjami, które są wstępnie przedstawione na rysunku 1.2 [6].

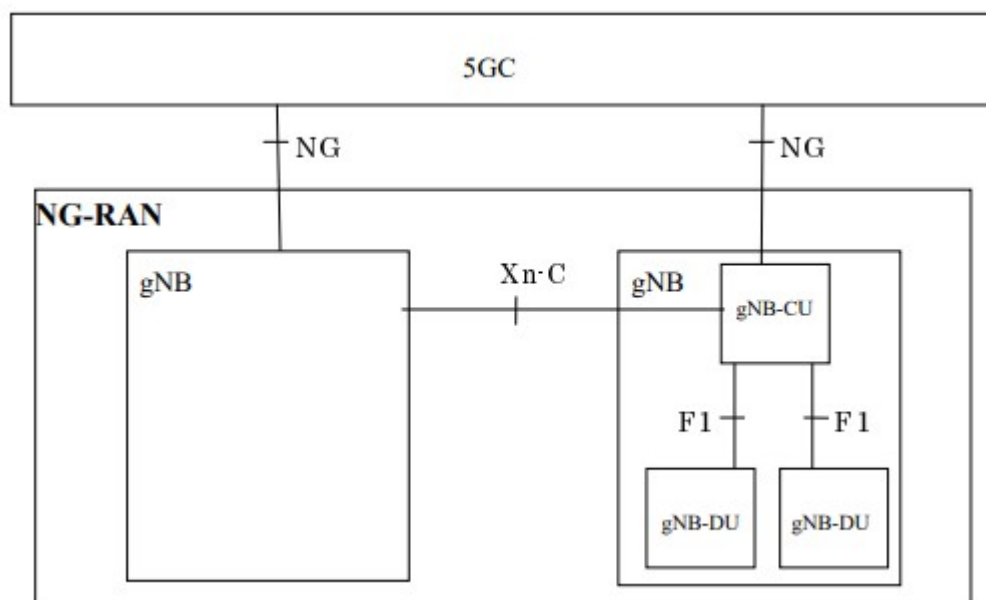


Rys. 1.2: Rozdzielenie architektury wg funkcjonalności [6]

1.3. NG-RAN

Dokładniejsza architektura NG-RAN jest przedstawiona na rysunku 1.3. Każdy węzeł gNB (Next Generation NodeB - stacja bazowa) w sieci NG-RAN jest połączony z siecią centralną 5GC poprzez interfejs NG oraz poprzez interfejs Xn z innymi węzłami.

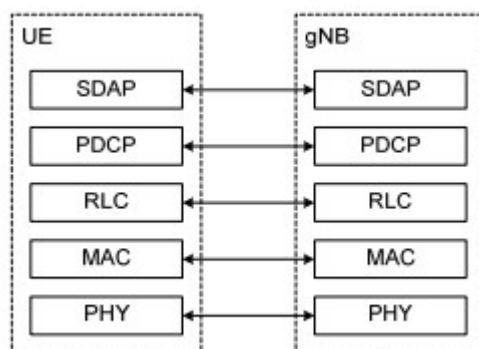
Wyróżnia się również podział interfejsów i protokołów występujących w tej warstwie. Jest to poziom użytkownika (u-plane) oraz poziom sterowania (c-plane) [13]. Każdy interfejs występujący w NG-RAN jest podzielony na te dwa poziomy, aby rozróżnić ruch zawierający dane użytkownika oraz instrukcje kontrolne dla systemu. Podział tych interfejsów oznacza się jako *interfejs-U/C*, gdzie litera U odpowiada poziomowi użytkownika, a litera C - poziomowi sterowania.



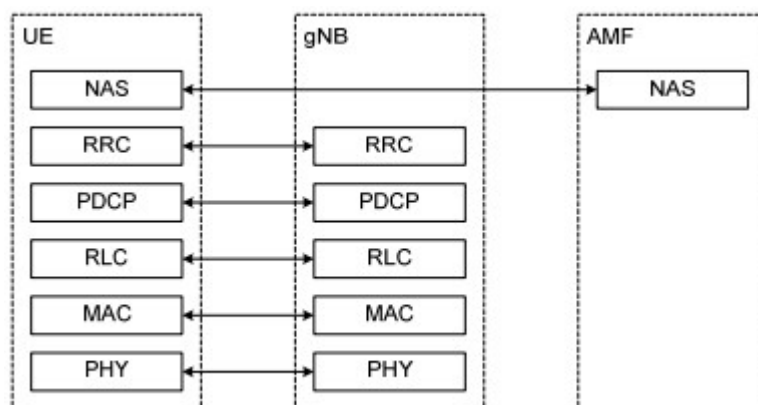
Rys. 1.3: Architektura NG-RAN [13]

1.3.1. Protokoły radiowe

Komunikacja terminala UE (User Equipment) ze stacją bazową gNB wykorzystuje stos protokołów, podobnie jak w tradycyjnych sieciach komputerowych. Wyróżnia się kilka protokołów, które pełnią określone role podczas komunikacji. Na rysunkach 1.4 i 1.5 przedstawiono stosy protokołów podczas transferu danych dla poziomu użytkownika (rys. 1.4) oraz dla poziomu sterowania (rys. 1.5) [1].



Rys. 1.4: Stos protokołów poziomu użytkownika [6]



Rys. 1.5: Stos protokołów poziomu sterowania [6]

1.3.1.1. Warstwa fizyczna PHY

PHY jest warstwą fizyczną, która określa jak wygląda transmisja danych w powietrzu. Obsługiwana jest ramka OFDM, gdzie w systemach 5G wykorzystuje się ją w kanale w dół DL (downlink), jak i w górę UL (uplink), w przeciwieństwie do LTE, gdzie używano jej tylko dla DL. Warstwa fizyczna 5G wprowadza również nowe zakresy częstotliwości FR1 i FR2 (rys. 1.6), które są również określane jako *cmwave* oraz *mmwave*. Wprowadzono te zakresy ponieważ nie są one mocno wykorzystywane przez inne systemy, co umożliwia większe szerokości kanału, dają większe szybkości, a te są dostępne na wyższych częstotliwościach.

| Frequency range | Frequency range | Supported channel bandwidth [MHz] |
|-----------------|-----------------------|--|
| FR1 | 410 MHz – 7125 MHz | 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100 |
| FR2 | 24250 MHz – 52600 MHz | 50, 100, 200, 400 |

Rys. 1.6: Zakresy częstotliwości systemów 5G [1]

Oprócz obsługi ramki OFDM, warstwa fizyczna odpowiedzialna jest również za modulację sygnałów. Wykorzystuje się modulacje cyfrowe QAM. Szczegółowy opis aspektów warstwy fizycznej zostanie omówiony w rozdziale 2.

1.3.1.2. Dostęp do medium MAC

Protokół MAC (Medium Access Control) zapewnia przesył danych za pośrednictwem kanałów logicznych. Każdy kanał logiczny obsługuje specyficzny rodzaj danych (np. dane użytkownika lub dane sterujące w UL lub DL) [8]. Na rysunkach 1.7 i 1.8 przedstawiono kolejno kanały transportowe oraz logiczne.

| Transport channel name | Acronym | Downlink | Uplink |
|-------------------------|---------|----------|--------|
| Broadcast Channel | BCH | X | |
| Downlink Shared Channel | DL-SCH | X | |
| Paging Channel | PCH | X | |
| Uplink Shared Channel | UL-SCH | | X |
| Random Access Channel | RACH | | X |

Rys. 1.7: Kanały transportowe [8]

| Logical channel name | Acronym | Control channel | Traffic channel |
|---------------------------|---------|-----------------|-----------------|
| Broadcast Control Channel | BCCH | X | |
| Paging Control Channel | PCCH | X | |
| Common Control Channel | CCCH | X | |
| Dedicated Control Channel | DCCH | X | |
| Dedicated Traffic Channel | DTCH | | X |

Rys. 1.8: Kanały logiczne [8]

MAC jest odpowiedzialny za przypisywanie kanałów logicznych do odpowiednich kanałów transportowych. To dopasowanie zależy od multipleksacji, zdefiniowanej przez protokół RRC (Radio Resource Control) [8]. Na rysunkach 1.9 i 1.10 przedstawiono kolejno przypisanie odpowiednich kanałów transportowych UL i DL do kanałów logicznych.

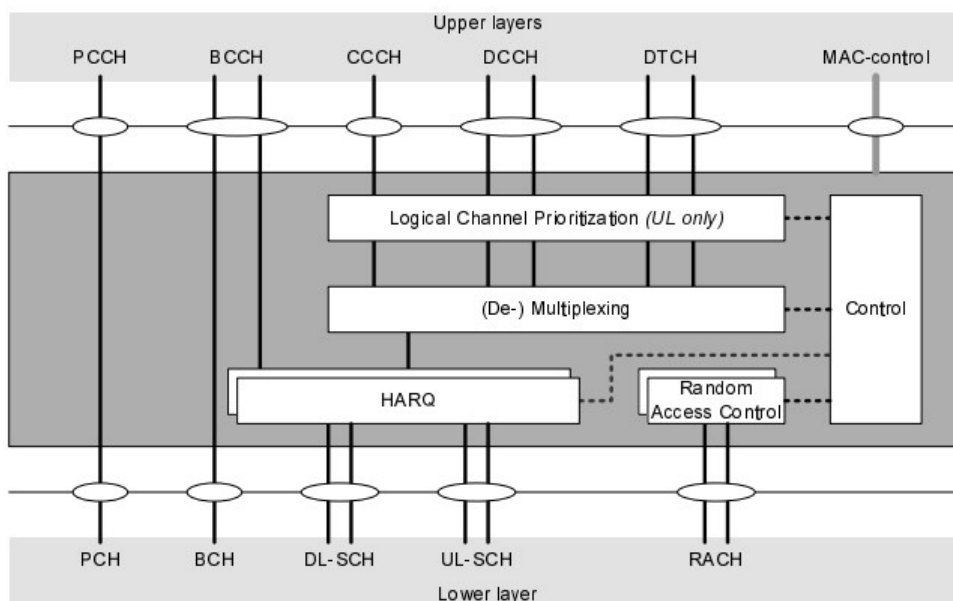
| Transport channel | UL-SCH | RACH |
|-------------------|--------|------|
| Logical channel | | |
| CCCH | X | |
| DCCH | X | |
| DTCH | X | |

Rys. 1.9: Przypisanie kanałów transportowych UL do kanałów logicznych [8]

| Transport channel | BCH | PCH | DL-SCH |
|-------------------|-----|-----|--------|
| Logical channel | | | |
| BCCH | X | | X |
| PCCH | | X | |
| CCCH | | | X |
| DCCH | | | X |
| DTCH | | | X |

Rys. 1.10: Przypisanie kanałów transportowych DL do kanałów logicznych [8]

Po połączeniu terminala UE z komórką lub grupą komórek MCG (Main Cell Group), w przypadku agregacji nośnych CA (Carrier Aggregation), tworzona jest tzw. instancja MAC na każdą grupę komórek (relacja jeden do jeden), która obsługuje ruch z warstwy niższej (PHY). Ta obsługa polega na przypisaniu ruchu z danego kanału transportowego (np. PDSCH) do odpowiedniego kanału logicznego (np. DTCH), na podstawie zdefiniowanych procesów. Rysunek 1.11 przedstawia przykładową instancję MAC, zarządzającą ruchem pomiędzy UE a pojedynczą grupą komórek MCG [8].



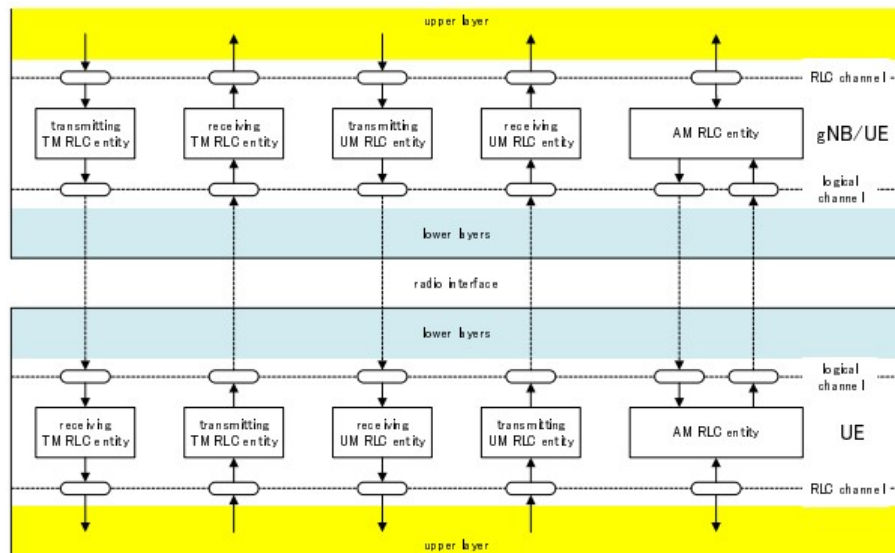
Rys. 1.11: Struktura instancji MAC [8]

Protokół MAC jest również odpowiedzialny za multipleksację i demultipleksację paczek danych sprowadzonych z lub do kanałów transportowych.

Wprowadzenie HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) do tej warstwy umożliwia również niezawodny i gwarantowany przesył danych. W sieciach 5G ten protokół został ulepszony pod względem prostszej parametryzacji, w porównaniu do systemów LTE.

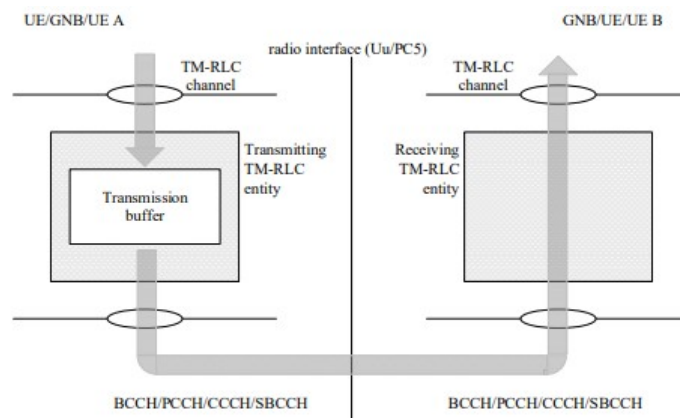
1.3.1.3. Kontrola łącza RLC

Protokół RLC (Radio Link Control) jest wykorzystywany do wymiany danych pomiędzy UE i stacją bazową gNB. Każda instancja RLC, występująca na stacji bazowej, posiada również instancję RLC na UE. Ta para instancji RLC prowadzi komunikację ze sobą w trzech trybach: **TM Transparent mode**, **UM Unacknowledged mode**, **AM Acknowledged mode**. Paczki danych RLC mogą zawierać dane sterujące i dane użytkownika. Instancje RLC przesyłają dane z warstwy wyższej do warstwy niższej rówieśniczej instancji lub odwrotnie [9], co pokazano na rys. 1.12.



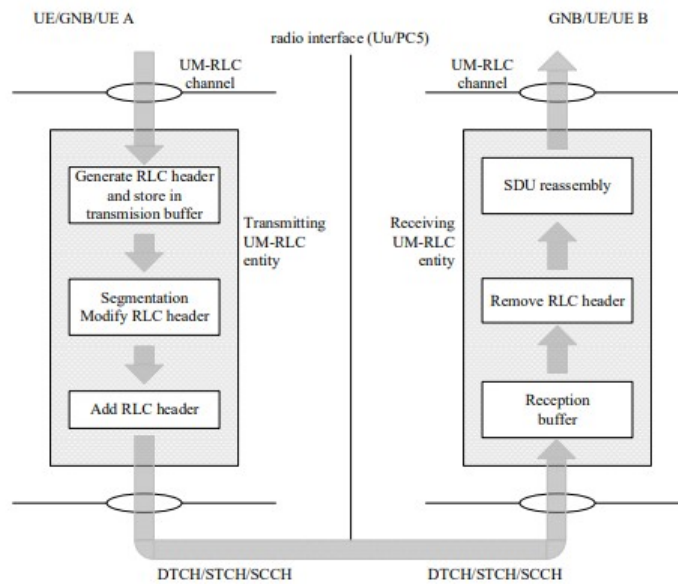
Rys. 1.12: Transmisja danych pomiędzy równieśniczymi instancjami RLC [9]

Instancje TM RLC przesyłają paczki danych bez weryfikacji integralności danych, podobnie do protokołu UDP (User Datagram Protocol) w modelu ISO/OSI. Ten typ transmisji RLC wykorzystuje się w kanałach logicznych BCCH, DL/UL CCCH, PCCH i SBCCH [9]. Proces ten przedstawiono na rys. 1.13.



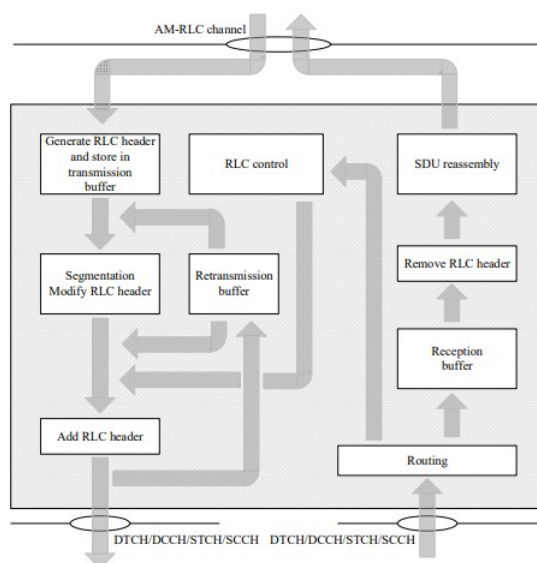
Rys. 1.13: Transmisja TM RLC [9]

Instancje UM RLC przesyłają paczki danych weryfikując integralność danych na instancji odbierającej, ale nie dochodzi do retransmisji. Wysyłająca instancja RLC segmentuje dane i dodaje odpowiedni nagłówek RLC. Ten typ transmisji RLC wykorzystuje się w kanałach logicznych DL/UL DTCH, SCCH i STCH [9]. Proces ten przedstawiono na rys. 1.14.



Rys. 1.14: Transmisja UM RLC [9]

Instancje AM RLC przesyłają paczki danych weryfikując integralność danych na instancji odbierającej i w razie utraty danych dochodzi do retransmisji, podobnie jak w protokole TCP (Transmission Control Protocol) modelu ISO/OSI. Wysyłająca instancja RLC segmentuje dane i dodaje odpowiedni nagłówek RLC. Podczas retransmisji wysyłająca instancja AM RLC może zmienić segmentację paczki danych, jeśli jest taka potrzeba. Ten typ transmisji RLC wykorzystuje się w kanałach logicznych DL/UL DCCH, DL/UL DTCH, SCCH i STCH [9]. Proces ten przedstawiono na rys. 1.15.



Rys. 1.15: Transmisja AM RLC [9]

1.3.1.4. Konwergencja danych PDCP

Protokół PDCP (Packet Data Convergence Protocol) pełni rolę mostu, pomiędzy instancjami RLC i RRC lub protokołów poziomu użytkownika (np. SDAP - Service Data Adaption Protocol). Podczas wymiany danych między dwoma węzłami sieciowymi w NG-RAN, czyli np. pomiędzy UE i gNB lub dwoma stacjami bazowymi, zostają ustalone różne kanały logiczne, które z poziomu PDCP określane są jako RB (Radio bearer).

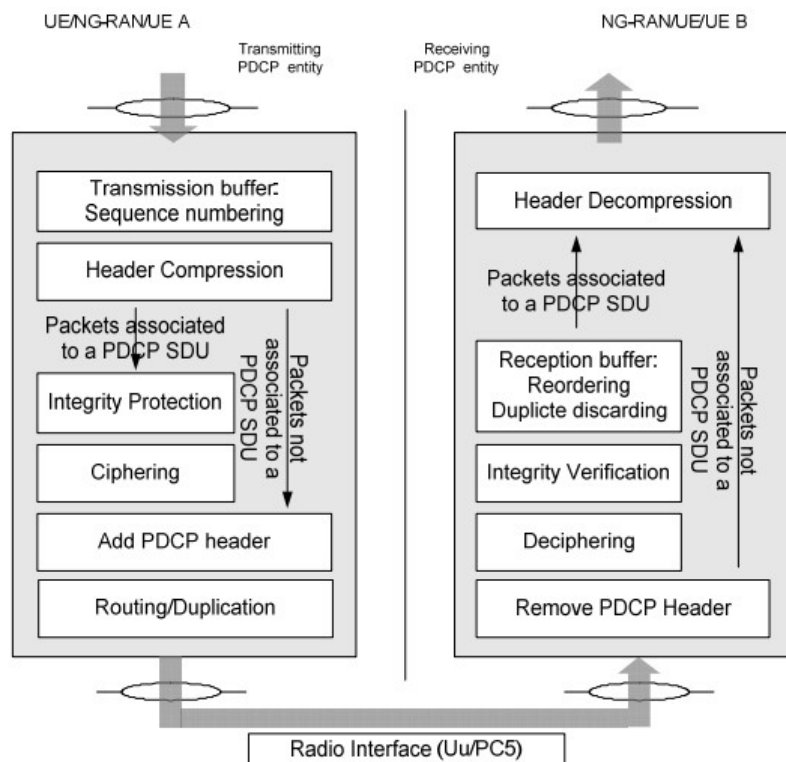
Każdy pojedynczy blok zasobów RB posiada jedną instancję PDCP, a każda z nich obsługuje do 8 instancji RLC. Typ danych (użytkownika lub sterujące) oraz liczba obsługiwanych instancji RLC, zależą od rodzaju bloku RB. Radio bearer przesyłający dane użytkownika jest oznaczany jako DRB (Data Radio bearer), a dane sterujące SRB (Signalling Radio Bearer) [10].

Protokół PDCP oferuje następujące usługi dla protokołów warstwy wyższej:

- przesyłanie danych użytkownika lub sterujących,
- kompresja nagłówka,
- szyfrowanie.

Protokół PDCP oczekuje od protokołów warstwy niższej:

- dostarczenia danych w trybie AM RLC, z jasnym określeniem o pomyślnym dostarczeniu pakietów,
- dostarczenia danych w trybie UM RLC.



Rys. 1.16: Warstwa PDCP [10]

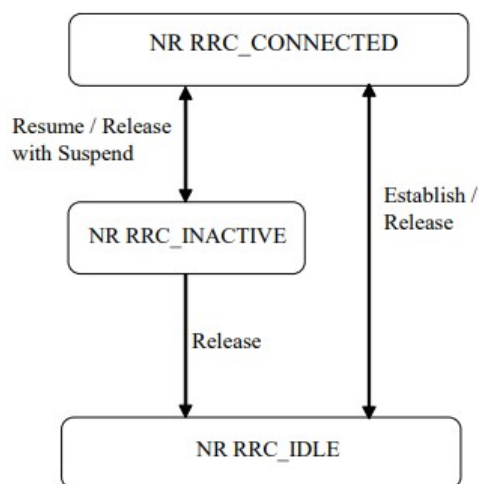
1.3.1.5. Kontrola zasobów radiowych RRC

Protokół RRC (Radio Resource Control) znajduje się na górze stosu protokołów radiowych, ponieważ służy on do zarządzania wszystkimi protokołami pod nim. Z perspektywy RRC protokoły niższych warstw są narzędziami, aby ustalić połączenie pomiędzy UE i stacją bazową. Główną mechaniką RRC jest stan UE. UE może być w stanie [12]:

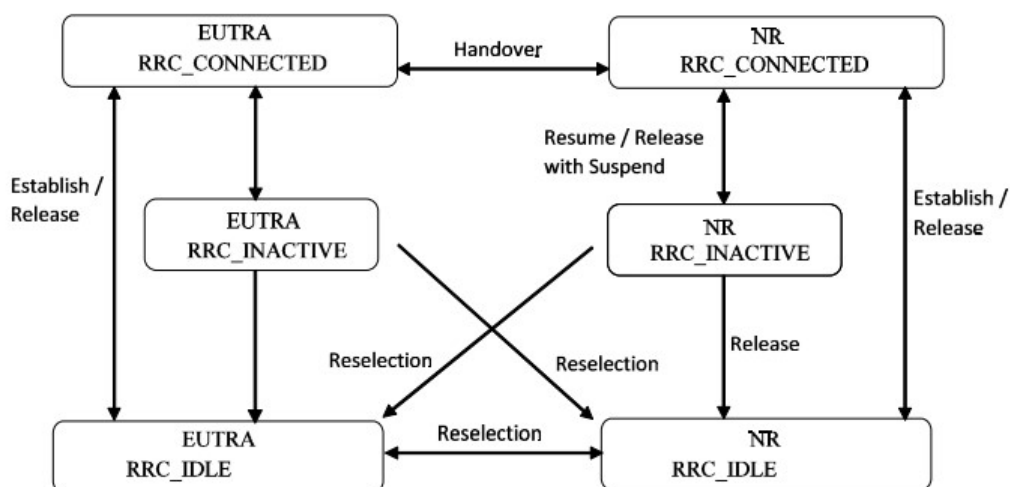
RRC_CONNECTED: UE przesyła dane,

RRC_IDLE: UE nie przesyła danych i nasłuchuje wiadomości sterujących od najbliższej stacji bazowej,

RRC_INACTIVE: UE nie przesyła danych, nasłuchuje wiadomości sterujących ale może w razie czego szybko zmienić swój stan na CONNECTED.



Rys. 1.17: Stany RRC UE [12]



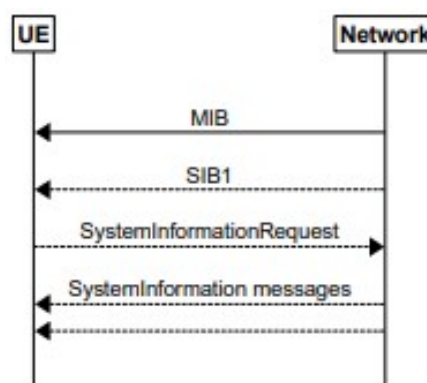
Rys. 1.18: Stany RRC UE pomiędzy 5GC i E-UTRA [12]

RRC przypisuje UE do danej komórki stacji bazowej, poprzez dostarczanie wiadomości do UE i odpowiadanie na jego odpowiedzi. Ten pierwszy kontakt odbywa się w SRB (Signalling Radio Bearer), które dzieli się na następujące typy[12]:

- SRB0 służy do przesyłania wiadomości RRC poprzez kanał CCCH,
- SRB1 służy do przesyłania wiadomości RRC, NAS (Non-access stratum), przed ustaleniem komunikacji w SRB2, poprzez kanał DCCH,
- SRB2 służy do przesyłania wiadomości RRC, NAS, które zawierają pomiary parametrów danej komórki, poprzez kanał DCCH,
- SRB3 służy do przesyłania wiadomości RRC, kiedy UE korzysta z EN-DC, poprzez kanał DCCH.

Stacja bazowa, kiedy nie uczestniczy w przesyłaniu danych użytkownika, nieustannie emituje wiadomości z pewnym interwałem które UE odbiera i je interpretuje. Te wiadomości posiadają kilka typów, rozgłaszając różne informacje. Za nadawanie, odbieranie i interpretowanie tych wiadomości odpowiada protokół RRC, na UE i stacji bazowej. Wyróżnia się następujące wiadomości z informacjami systemowymi[12]:

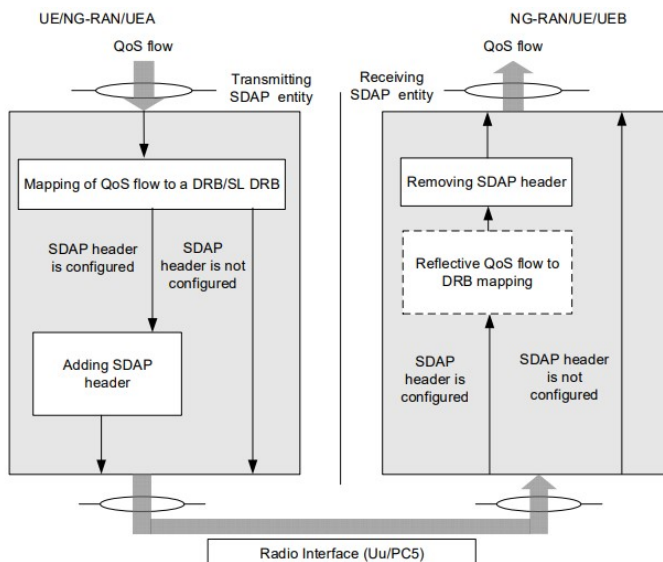
- **MIB Master Information Block** jest wysyłany pierwszy, w kanale BCH, co każde 80 ms i zawiera informacje potrzebne, aby odebrać odpowiedni SIB1 (od odpowiedniej komórki).
- **SIB1 System Information Block 1** jest wysyłany drugi (po MIB), w kanale DL-SCH, co każde 160 ms i zawiera informacje o kolejnych SIBn.
- **SIBn System Information Block n** są kolejnymi wiadomościami od komórki (po SIB1 i odpowiedzi UE), zawierające informacje o niej, aby UE mógł z niej korzystać.



Rys. 1.19: Ustalanie komunikacji UE z komórką [12]

1.3.1.6. Adaptacja usług SDAP

Protokół SDAP (Service Data Adaptation Protocol) służy do zarządzania usługą QoS strumieni danych DRB podczas przesyłu danych [11]. Działanie protokołu przedstawiono na rys. 1.20.



Rys. 1.20: Nakładanie QoS na strumień danych przez SDAP [11]

1.3.2. Stacja bazowa

Na rysunku 1.3 przedstawiono prostą architekturę sieci dostępowej NG-RAN, na której znajduje się prosty schemat stacji bazowej gNB. Stacja bazowa posiada własne elementy, które połączone są odpowiednim interfejsem. Są to elementy CU (control unit) oraz DU (distribution unit), połączone poprzez interfejs F1. Każda stacja bazowa posiada tylko jeden CU, do którego podłączone jest wiele (nawet ponad 100) DU, gdzie każdy z nich może obsługiwać wiele logicznych komórek sieciowych [6].

CU odpowiada za obsługę protokołów warstw wyższych, takich jak PDCP oraz RRC.

DU odpowiada za obsługę warstwy fizycznej oraz protokołów warstw niższych, takich jak MAC, RLC.

Stacja bazowa realizuje następujące zadania [6]:

- zarządzanie zasobami radiowymi w kanale DL i UL,
- kompresja nagłówka IP,
- szyfrowanie danych,
- kierowanie danych użytkownika do UPF,
- kierowanie danych sterujących do AMF,
- zarządzanie sesją,
- współpraca z siecią E-UTRA sieci LTE.

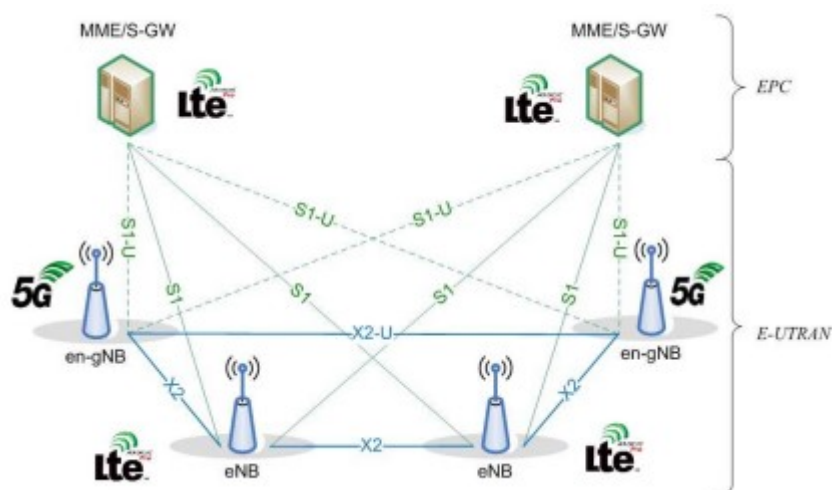
1.3.2.1. Integracja z E-UTRA

W poprzedniej generacji sieci komórkowych LTE występował jedynie jeden typ stacji bazowej eNB. W 5G zdecydowano się na stworzenie nowej stacji gNB, wykorzystującej rozwiązanie NR oraz ng-eNB, obsługującej rozwiązania E-UTRA (Evolved Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Terrestrial Radio Access) [6].

Istnienie takiego fundamentalnego podziału typów stacji bazowych spowodowało również podział samego NG-RAN na dwa typy, czyli SA (standalone), gdzie jest całkowite podporządkowanie pod sieci 5G oraz NSA (non-standalone), gdzie oprócz technologii i rozwiązań NR obsługuje się również LTE [1].

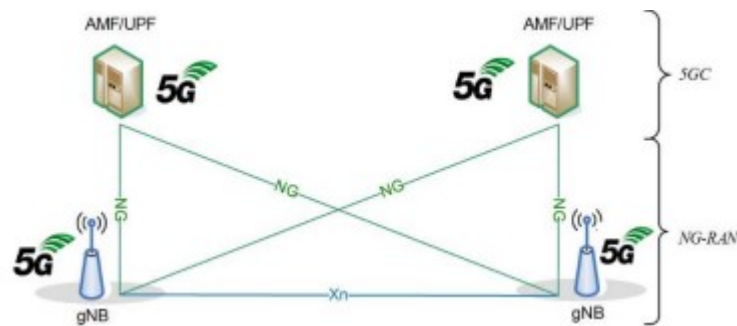
Typ NSA (non - Standalone) (rys. 1.21), to model architektury sieci dostępowej 5G AN (5G Access network), która za pomocą interfejsów NR łączy się i pracuje z architekturą sieci LTE E-UTRA oraz jej centralną siecią EPC (Evolved Packet Core). W tym modelu wykorzystuje się ng-eNB jako stację bazową. W ten sposób umożliwia się starszym, istniejącym już, sieciom korzystanie z funkcjonalności 5G. NSA znane jest również jako technologia EN-DC lub "opcja nr 3" architektury sieci. Ten model najczęściej wykorzystuje się, aby umożliwić istniejącym sieciom funkcjonalności 5G, więc wykorzystując technologie EN-DC eNB jest uznawany jako "master node" (MN), a en-gNB jako "secondary node" (SN) [1].

En-gNB łączy się ze stacją bazową sieci LTE za pomocą interfejsu logicznego X2 oraz z elementami sieci centralnej LTE za pomocą interfejsu logicznego S1, aby umożliwić działanie modelu [1].



Rys. 1.21: Architektura NSA [1]

Typ **SA** (Standalone) (rys. 1.22), to tzw. pełny model architektury sieci dostępowej 5G AN (5G Access network), który korzystając z interfejsów NR łączy się z centralną siecią 5GC. Typ stacji wykorzystany w tym modelu to gNB. Ten model określa się jako pełny, ponieważ nie wykorzystuje on zupełnie żadnych aspektów architektury E-UTRA aby funkcjonował. Ten model wykorzystuje się budując nowe sieci komórkowe piątej generacji, tam gdzie sieci komórkowej nie ma lub się ją całkowicie wymienia [1].



Rys. 1.22: Architektura SA [1]

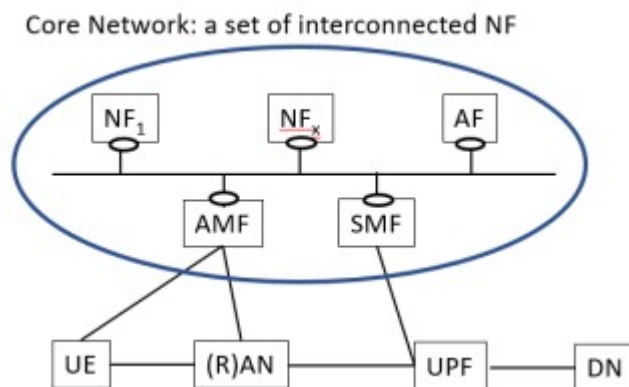
1.4. 5GC

Projekt centralnej sieci 5GC bazuje na koncepcji systemu bazującego na serwisach SBA (Service-Based Architecture), gdzie elementy wchodzące w skład tej sieci, określane są jako funkcje sieciowe NF (Network Functions), zamiast typowo elementy czy węzły sieciowe NE (Network Entities). Wszystkie funkcje sieciowe realizowane są za pomocą jednego lub niewielkiej grupy faktycznych urządzeń, ale za pomocą metod programowych dzieli się zasoby tych urządzeń, w ramach realizowania serwisów dla określonych grup konsumentów (najczęściej dla określonych scenariuszy) [1].

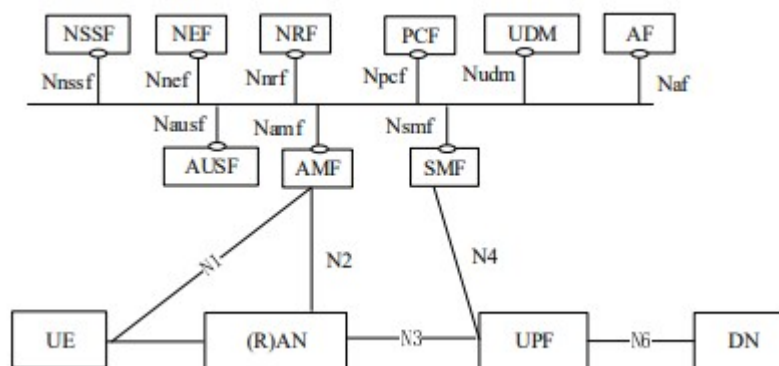
Ten model sieci centralnej znacząco różni się od EPC w sieciach LTE lub poprzednich generacjach, gdzie każda funkcja sieci była realizowana za pomocą oddzielnego fizycznego elementu. Takie podejście redukuje potencjalne koszty sieci samej w sobie oraz oferuje większą kontrolę nad infrastrukturą.

1.4.1. Funkcje sieciowe NF

Na rysunkach 1.23 i 1.24 przedstawiono konfiguracje sieci 5GC. Należy pamiętać, że pokazane węzły są jedynie elementami logicznymi/programowymi, a nie indywidualnym urządzeniem, realizującym daną funkcję sieciową [1].



Rys. 1.23: Prosta sieć centralna 5GC [1]



Rys. 1.24: Szczegółowa sieć centralna 5GC [1]

Z rysunków 1.23 i 1.24 można wyróżnić następujące funkcje sieciowe [1]:

AMF **Access and Mobility management Function** [1]:

Funkcjonalność odpowiedzialna za dostęp 5GC do urządzenia końcowego UE oraz sieci dostępowej RAN. Obsługuje ona wszystkie wiadomości od UE, nie dotyczące samych danych użytkownika, czyli wiadomości sterujące lub dotyczące bezpieczeństwa.

- obsługa wiadomości sterujących,
- obsługa bezpieczeństwa,
- obsługa autentykacji UE,
- obsługa mobilności UE między różnymi sieciami dostępowymi RAN,
- obsługa Network Slicing'u.

UPF User Plane Function [1]:

funkcjonalność odpowiadająca za ruch danych urządzenia końcowego UE do sieci 5GC lub do zewnętrznej sieci DN:

- sterowanie pakietami,
- weryfikacja pakietów i narzucanie ustalonych polityk poziomu użytkownika,
- zarządzanie jakością (QoS).

AF Application Function [1]:

funkcjonalność odpowiadająca za działanie aplikacji.

SMF Session Management Function [1]:

funkcjonalność odpowiadająca za ustalanie sesji z UPF, działając równolegle z AMF w ramach obsługi mobilności UE:

- zarządzanie sesją,
- przypisanie adresu IP do UE,
- selekcja i sterowanie UPF.

NSSF Network Slice Selection Function [1]:

odpowiada za przypisanie odpowiednich funkcji sieciowych oraz zasobów, aby zrealizować obsługę określonego serwisu dla UE.

NRF Network Repository Function [1]:

obejmuje zarządzanie funkcjami sieciowymi, takimi jak rejestracja, autoryzacja i wyszukiwanie.

NEF Network Exposure Function [1]:

odpowiada za wyświetlanie możliwości danej sieci na zewnątrz.

UDM Unified Data Management [1]:

obsługa magazynowania danych. UDR (Unified Data Repository) jest główną bazą danych, a UDSF (Unstructured Data Storage Function) zarządza magazynowaniem danych dynamicznych.

NF_n N-ta funkcjonalność sieciowa [1]

Takie podejście serwisowe pozwala na zwirtualizowaną infrastrukturę. Taki model jest redundantny i łatwo skalowalny, ponieważ operuje się na zasobach programowych zamiast na fizycznych urządzeniach. Można zaobserwować duże korzyści z takiego podejścia. Redundancja pozwala na łatwe przeniesienie ruchu UE z jednego NF, który np. ma awarię lub musi zostać wyłączony na jakiś czas, w ramach zmian programowych na inną instancję NF, która jest w stanie realizować serwis tego UE [1]. Bardzo mocno zwiększa to niezawodność sieci, czyniąc ją bardziej wartościową od poprzednich generacji.

1.4.2. Edge computing

Sieć 5G oferuje również lokalne rozwiązanie sieciowe w ramach zwiększenia wydajności sieci. DN (Data Network) (rys. 1.24) może zostać wykorzystane do realizacji Edge computing. Ta technologia pozwala na znaczne zredukowanie opóźnienia i objętości ruchu w sieci, poprzez umieszczenie konkretnych serwisów lub usług sieciowych, charakterystycznych dla danego operatora/klienta blisko jego sieci dostępowej RAN. Zmniejszenie dystansu ważnych aspektów sieci operatora pozytywnie wpłynie na jej wydajność [1].

Aby zrealizować to rozwiązanie, 5GC wybiera odpowiedni UPF, bliski do operatora lub UE i przekierowuje ruch bezpośrednio do DN, poprzez interfejs logiczny N6 [1].

1.4.3. Network Slicing

Ta technologia jest charakterystyczna dla sieci centralnej 5GC. Poprzez network slicing, każdy operator lub UE ma dostęp do części zasobów sieciowych, których potrzebuje w ramach korzystania z pewnego serwisu. Można dostosować dany wycinek sieci na potrzeby użytkownika, czyli ustalić przepustowość, opóźnienie, polityki bezpieczeństwa i inne charakterystyczne parametry sterowane charakterystyką danego serwisu [1].

Przykładowo system IoT (Internet of Things) wymaga innych zasobów niż system V2X (Vehicle to Everything), więc nie opłaca się współdzielić tych samych zasobów i nimi zarządzać, a lepiej jest, aby ustalić co dany serwis potrzebuje i programowo je podzielić [1].

Wycinki sieci, czyli programowo oddzielone zasoby sieciowe, są bardzo modularnym elementem sieci 5G. Ta technologia jest wspierana w każdej sieci i jest wysoko modularna. Każdy slice jednej sieci jest w stanie współpracować ze slice'ami innych sieci. Można powiedzieć, że taki zdefiniowany wycinek sieci jest traktowany jako sieć z danej perspektywy (np. sieć IoT), zależnie od obserwatora (użytkownika). Zdefiniowane scenariusze 5G są dobrym i wykorzystywanym modelem serwisów do definiowania wycinków sieci. Zależnie od tego co oferuje operator lub czym jest urządzenie końcowe, to sieć 5G jest w stanie przydzielić odpowiednie zasoby, aby dany serwis zrealizować [1].

2. WARSTWA FIZYCZNA

W tym rozdziale zostanie opisana warstwa fizyczna sieci dostępowej 5G NG-RAN. Technologie sieci komórkowych powszechnie wykorzystują wyrafinowane rozwiązania, takie jak OFDM lub modulacje cyfrowe, aby optymalnie przeprowadzać transmisje danych bezprzewodowo.

Najbardziej powszechnie znanym aspektem sieci komórkowej 5G są nowe zakresy częstotliwości FR1 i FR2, które przedstawiono na rysunku 2.1. Wprowadzono je w ramach łatwiejszego rozwoju technologicznego (mało innych technologii korzysta z tych zakresów) oraz z powodu większych możliwości technologicznych, wynikających z wyższych częstotliwości.

| Frequency range | Frequency range | Supported channel bandwidth [MHz] |
|-----------------|-----------------------|--|
| FR1 | 410 MHz – 7125 MHz | 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100 |
| FR2 | 24250 MHz – 52600 MHz | 50, 100, 200, 400 |

Rys. 2.1: Zakresy częstotliwości systemów 5G [1]

Transmisja w warstwie fizycznej odbywa się za pośrednictwem kanałów transportowych i sygnałów [1], które kolejno przedstawiono na rysunkach 2.2 oraz 2.3.

| DL/UL | Physical channel | Physical channel name | Modulation | Channel coding |
|-------|------------------|-----------------------------------|--|---|
| DL | PDSCH | Physical Downlink Shared Channel | QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM | LDPC (Low Density Parity Check) coding |
| DL | PBCH | Physical Broadcast Channel | QPSK | Polar coding |
| DL | PDCCH | Physical Downlink Control Channel | QPSK | Polar coding |
| UL | PUSCH | Physical Uplink Shared Channel | QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, $\pi/2$ BPSK when DFT-s-OFDM is selected** | LDPC coding for data, see Table 5.5.4.6-1 for UCI |
| UL | PUCCH | Physical Uplink Control Channel | $\pi/2$ -BPSK, BPSK, QPSK depending on PUCCH format and information bit size | see Table 5.5.4.6-1 for UCI |
| UL | PRACH | Physical Random Access Channel | N/A* | N/A* |

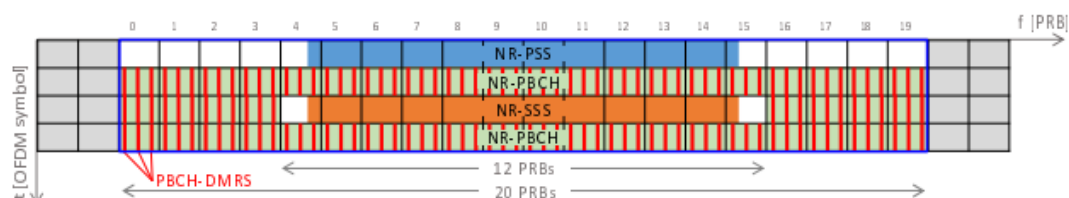
Rys. 2.2: Kanały fizyczne 5G [1]

| DL/UL | Physical signal | Physical signal name |
|-------|-----------------|--|
| DL/UL | DM-RS | Demodulation reference signals |
| DL/UL | PT-RS | Phase-tracking reference signals |
| DL | CSI-RS | Channel-state information reference signal |
| DL | PSS | Primary synchronization signal |
| DL | SSS | Secondary synchronization signal |
| UL | SRS | Sounding reference signal |

Rys. 2.3: Sygnały fizyczne [1]

UE, aby zainicjować połączenie ze stacją bazową gNB sieci dostępowej NG-RAN, nasłuchuje sygnałów PSS i SSS, rozgłaszanych w kanale rozgłoszeniowym PBCH. Zestaw zasobów radiowych, zawierający te dwa elementy, składa się z 4 symboli OFDM, 20 bloków RB i nazywa się SS/PBCH (Synchronization Signals/ Physical Broadcast Channel).

Na rysunku 2.4 sygnał PSS zaznaczony jest na niebiesko, sygnał SSS na pomarańczowo, poziomo podzielono bloki RB, a pionowo (20 RB) symbole OFDM (4 symbole) [1].



Rys. 2.4: Sygnały synchronizujące / Kanał rozgłoszeniowy SS/PBCH [1]

Sygnały zawarte w tym bloku przesyłane są przez 127 podnośnych (około 10.5 RB). Kiedy UE zsynchronizuje się z PSS i SSS oraz odbierze cały blok SS/PBCH, to może od tego momentu nasłuchiwać kanału PBCH i jego sygnału DM-RS, którego użyje do zdekodowania kanału. PBCH służy jedynie do inicjalizowania połączenia UE z siecią i udostępnia tylko podstawowe informacje. Stacja bazowa gNB może rozgłaszać określone liczby bloków SS/PBCH, które przedstawiono na rysunku 2.5 z interwałem od 5 do 160 ms [1].

| Frequency Range | Applicable SCS [kHz] | Maximum number of SS/PBCH blocks |
|--|----------------------|----------------------------------|
| FR1 (below 3 GHz for FDD, below 2.4 GHz for TDD) | 15 or 30 | 4 |
| FR1 (above 3 GHz for FDD, above 2.4 GHz for TDD) | 15 or 30 | 8 |
| FR2 | 120 or 240 | 64 |

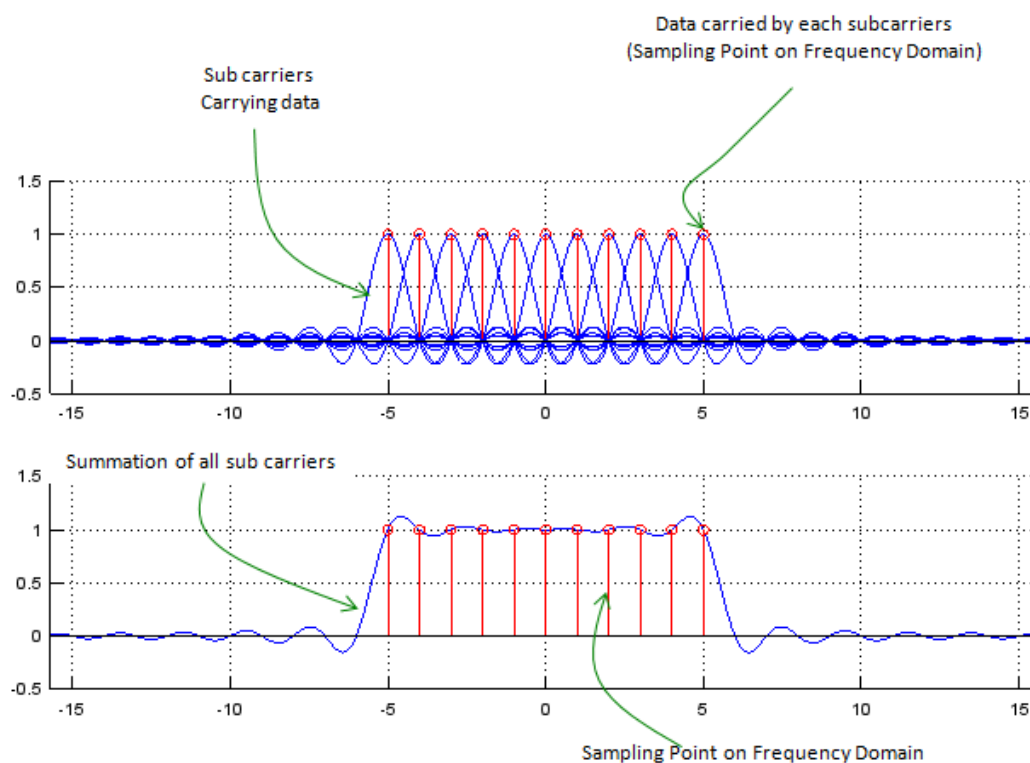
Rys. 2.5: Maksymalna liczba bloków SS/PBCH [1]

2.1. RAMKA OFDM

2.1.1. Technologia OFDM

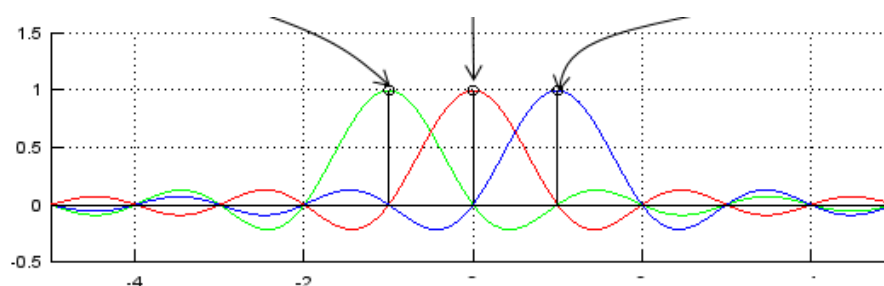
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) jest metodą przesyłania danych cyfrowych na zmultipleksowanej nośnej, wykorzystując wiele ortogonalnych podnośnych. Dzieląc jedną nośną na mniejsze części można przysyłać zmodulowane informacje równolegle na każdej z nich oraz prowadzić równoległy przesył danych, osiągając znacznie większe szybkości w porównaniu z systemem bez takiej multipleksacji, a wykorzystanie cyklicznego prefiksu CP zmniejsza zakłócenia międzysymbolowe, obecne w propagacji wielodrogowej.

Ortogonalność podnośnych oznacza brak oddziaływania jednej podnośnej na inną. W przeciwieństwie do FDM, gdzie występowało dużo zakłóceń międzysymbolowych i, aby im zapobiec, stosowano specjalne filtry, które spowalniały prace systemów [23]. Przykład ramki OFDM z wieloma podnośnymi w dziedzinie częstotliwości przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.6: Wizualizacja podnośnych [23]

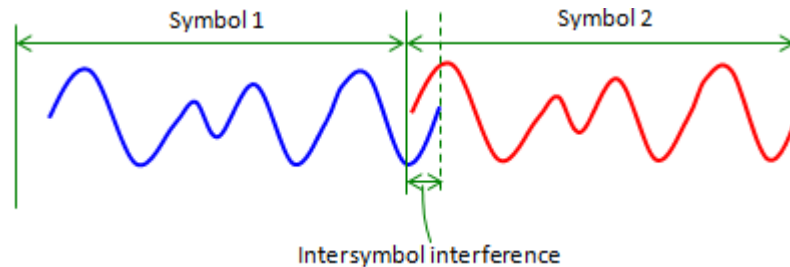
Liczba podnośnych niestety nie jest dowolna. Jeśli występuje ich za dużo, to dojdzie do zakłóceń między nimi, a jeśli jest ich za mało, to negatywnie wpływa to na efektywność systemu. Należy optymalnie przydzielić liczbę podnośnych, w taki sposób, aby spróbkowane, efektywne wartości danych podnośnych nigdy nie nachodziły na siebie (czyli trzeba zachować ortogonalność) [23].



Rys. 2.7: Ortogonalność podnośnych [23]

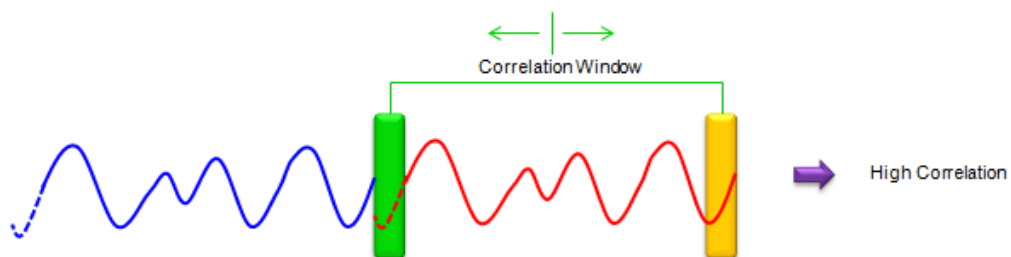
Dużym problemem w systemach bezprzewodowych są różne zakłócenia. W kontekście OFDM rozpatruje się zakłócenia międzysymbolowe ISI (InterSymbol Interference).

Do takich zakłóceń dochodzi, kiedy jeden symbol radiowy, wskutek różnych zjawisk środowiskowych nachodzi, na inny symbol. Można zaradzić temu problemowi poprzez wypełnienie przestrzeni pomiędzy tymi symbolami, aby system posiadał jakąś tolerancję na występowanie takich zakłóceń [23].



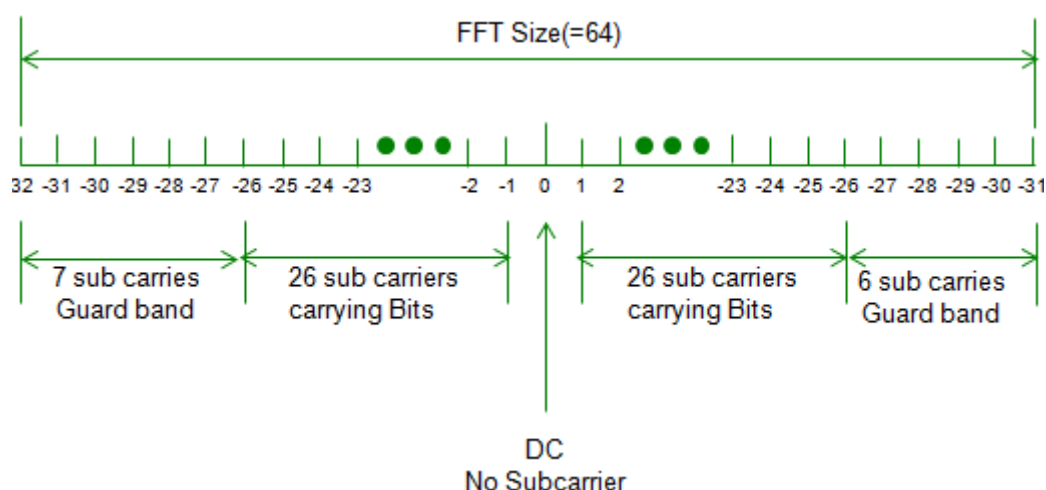
Rys. 2.8: Zakłócenie międzysymbolowe [23]

W technologii OFDM przestrzeń między symbolami wypełnia się końcówką następnego symbolu. W ten sposób zwiększa się tolerancja systemu na zakłócenia ISI oraz umożliwia się określenie początku i końca symbolu. Sprawdzając korelację między CP (cykliczny prefiks) a daną częścią symbolu, można określić granice tego symbolu. Jeśli korelacja jest duża, to oznacza to, że jest to koniec symbolu, a jeśli korelacja jest niska to nie jest [23].



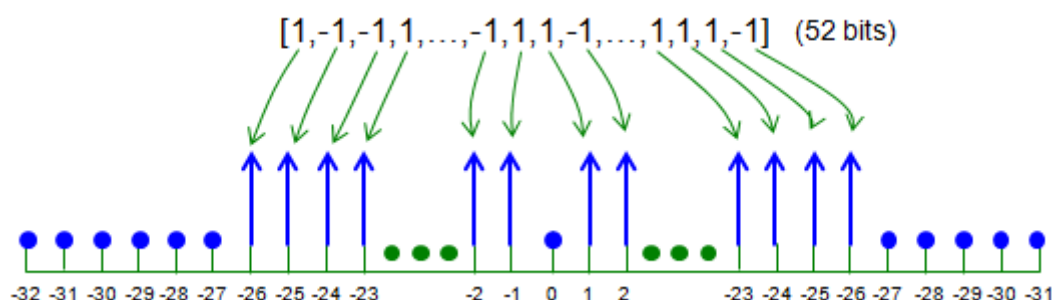
Rys. 2.9: Prefiks cykliczny CP [23]

Skład symbolu OFDM zależy od implementacji dla danej technologii. W następującym przykładzie dla technologii WLAN (IEEE 802.11), który przedstawiono na rysunku 2.10, symbol OFDM składa się z 64 podnośnych, gdzie 52 z nich używane są do transmisji danych. Pozostałych 12 podnośnych jest umieszczane na granicach symbolu (po 6 z każdej strony), w ramach zredukowania zakłóceń z innymi zakresami (guard band). Środkowa podnośna również nie jest używana do transmisji danych [23].

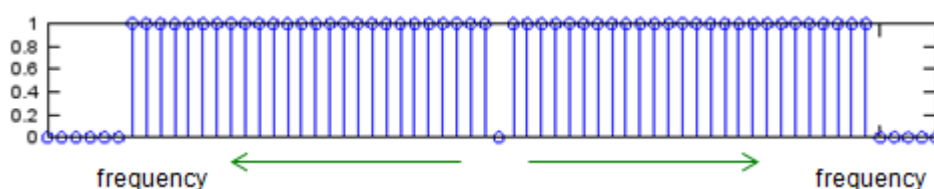


Rys. 2.10: Przykład symbolu OFDM dla technologii WLAN [23]

Każda z podnośnych przesyła część danych po modulacji. Przykładowo, gdy podnośne są zmodulowane BPSK to każda podnośna niesie 1 bit (dwa stany), co przedstawiono na rysunku 2.11 [23].

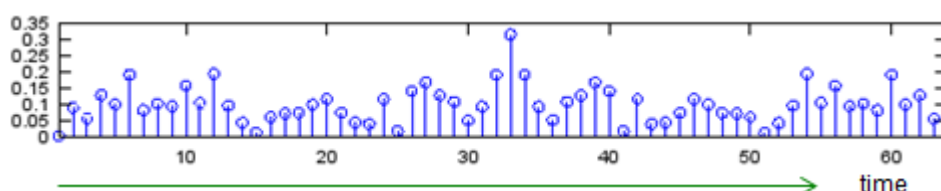


Rys. 2.11: Przypisanie informacji do symbolu OFDM [23]



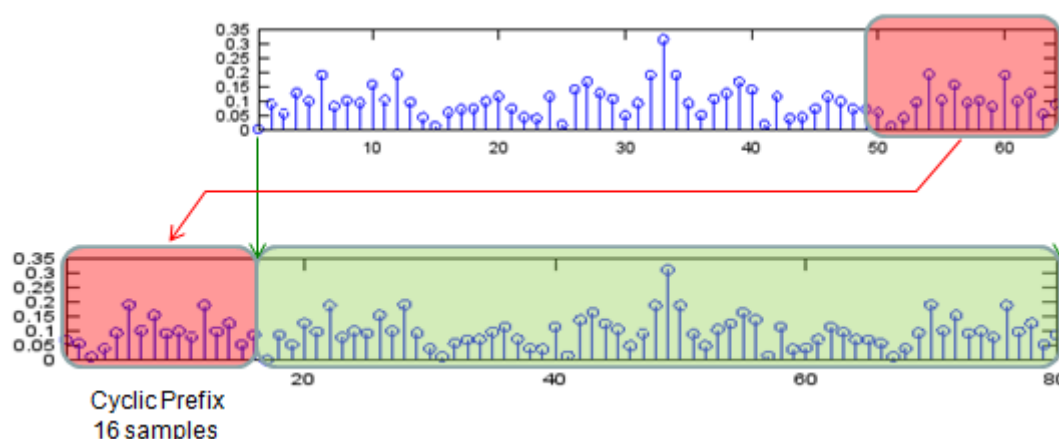
Rys. 2.12: Symbol OFDM w dziedzinie częstotliwości

Posiadając informację zawartą w symbolu OFDM, w formie przedstawionej na rysunku 2.12, dokonuje się transformacji tego symbolu do dziedziny czasu, za pomocą odwrotnej szybkiej transformaty Fouriera (IFFT) [23].



Rys. 2.13: Symbol OFDM w dziedzinie czasu [23]

Po wyznaczeniu symbolu OFDM w dziedzinie czasu, należy na końcu dodać cykliczny prefiks CP. Sprowadza się to do skopiowania określonej części symbolu (w tym przykładzie ostatnie 16 próbek), na początek symbolu [23].



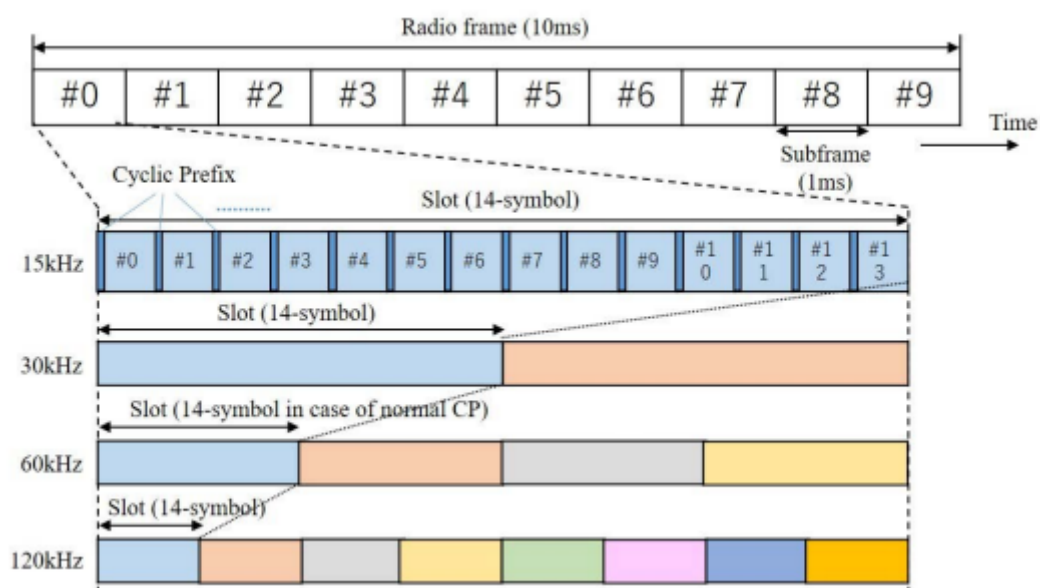
Rys. 2.14: Symbol OFDM z CP [23]

2.1.2. OFDM w 5G

System 5G wprowadza parametr, który manipuluje liczbą podnośnych w symbolu OFDM. SCS (SubCarrier Spacing) jest dystansem pomiędzy środkami sąsiednich podnośnych. Obecnie wykorzystuje się następujące wartości SCS z odpowiadającymi im indeksami SCS (ang. numerology): [1]:

- 15 KHz, $\mu = 0$,
- 30 KHz, $\mu = 1$,
- 60 KHz, $\mu = 2$,
- 120 KHz, $\mu = 3$,
- 240 KHz, $\mu = 4$.

Każde kolejne 12 podnośnych to blok zasobów RB (Resource Block). Określona liczba RB definiuje kanał transportowy 5G w dziedzinie częstotliwości. W dziedzinie czasu jedna ramka radiowa (10 ms) składa się z 10 podramek, a każda z nich składa się z 14 symboli OFDM. Rysunek 2.15 przedstawia skład ramki radiowej w dziedzinie czasu dla kolejnych SCS. Każda kolejna numerologia sprawia, że każda pojedyncza podramka zawiera dwa razy więcej symboli OFDM [1].



Rys. 2.15: Ramka radiowa 5G [1]

Na rysunku 2.16 przedstawione są numerologie i ich wpływ na ramkę radiową 5G. Dla $\mu = 2$ wykorzystuje się rozszerzony cykliczny prefiks ECP, który zwiększa odstęp ochronny symboli. Efektem jest zmniejszenie pojemności całej ramki i zredukowanie liczby symboli OFDM z 14 do 12 [1].

| Cyclic Prefix | subcarrier spacing (SCS) [kHz] | Number of subframes per radio frame | Number of slots per subframe | Number of OFDM symbols per slot | Applicable frequency range |
|---------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| normal | 15 | 10 | 1 | 14 | FR1 |
| normal | 30 | 10 | 2 | 14 | FR1 |
| normal | 60 | 10 | 4 | 14 | FR1 and FR2 |
| extended | 60 | 10 | 4 | 12 | FR1 and FR2 |
| normal | 120 | 10 | 8 | 14 | FR2 |
| normal | 240 | 10 | 16 | 14 | FR2 |

Rys. 2.16: Numerologie 5G [1]

Systemy 5G wspierają również technikę duplex w dziedzinie częstotliwości (FDD), gdzie do transmisji w górę i w dół wykorzystuje się różne częstotliwości oraz duplex w dziedzinie czasu (TDD), gdzie transmisja w daną stronę odbywa się na tej samej częstotliwości, ale w różnych interwałach czasowych. Dla systemu TDD każdy slot w podramce jest określony jako UL (uplink), DL (downlink) lub FL (flexible). Slot FL może zostać wykorzystany do transmisji w obie strony. Wyróżnia się wiele formatów slotu, które zostały przedstawione na rysunku 2.17 [4].

| Format | Symbol number in a slot | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 0 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D |
| 1 | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 2 | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F |
| 3 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F |
| 4 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F |
| 5 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F |
| 6 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F | F |
| 7 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F | F | F | F |
| 8 | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U |
| 9 | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U | U |
| 10 | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 11 | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 12 | F | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 13 | F | F | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 14 | F | F | F | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 15 | F | F | F | F | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 16 | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F |
| 17 | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F |
| 18 | D | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F |
| 19 | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U |
| 20 | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U |
| 21 | D | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U |
| 22 | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U | U |
| 23 | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U | U |
| 24 | D | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U | U |
| 25 | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U | U | U |
| 26 | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | F | U | U | U |
| 27 | D | D | D | F | F | F | F | F | F | F | F | U | U | U |
| 28 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | U |
| 29 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F | U |
| 30 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F | F | U |
| 31 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | U | U |
| 32 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F | U | U |
| 33 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F | F | U | U |
| 34 | D | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 35 | D | D | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 36 | D | D | D | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 37 | D | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 38 | D | D | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 39 | D | D | D | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 40 | D | F | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 41 | D | D | F | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 42 | D | D | D | F | F | F | U | U | U | U | U | U | U | U |
| 43 | D | D | D | D | D | D | D | D | D | F | F | F | F | U |
| 44 | D | D | D | D | D | D | F | F | F | F | F | F | U | U |
| 45 | D | D | D | D | D | D | F | F | U | U | U | U | U | U |
| 46 | D | D | D | D | D | F | U | D | D | D | D | D | F | U |
| 47 | D | D | F | U | U | U | U | D | D | F | U | U | U | U |
| 48 | D | F | U | U | U | U | U | D | F | U | U | U | U | U |
| 49 | D | D | D | D | F | F | U | D | D | D | D | F | F | U |
| 50 | D | D | F | F | U | U | U | D | D | F | F | U | U | U |
| 51 | D | F | F | U | U | U | U | D | F | F | U | U | U | U |
| 52 | D | F | F | F | F | F | U | D | F | F | F | F | F | U |
| 53 | D | D | F | F | F | F | U | D | D | F | F | F | F | U |
| 54 | F | F | F | F | F | F | F | D | D | D | D | D | D | D |
| 55 | D | D | F | F | F | U | U | U | D | D | D | D | D | D |

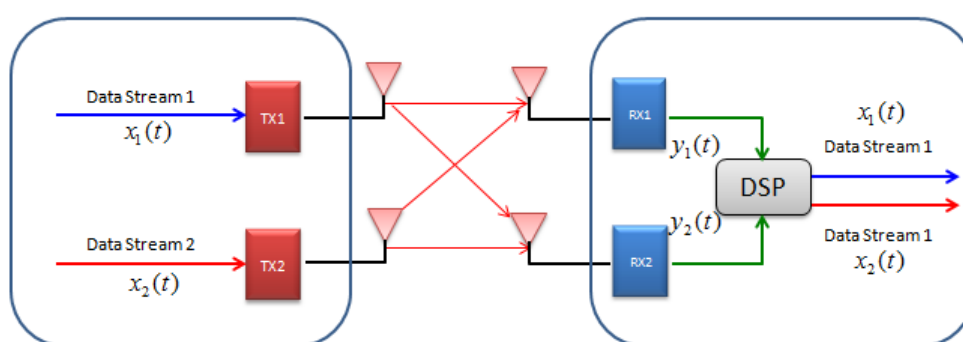
Rys. 2.17: Formaty slotu 5G dla TDD [4]

2.2. SYSTEM WIELOANTENOWY MIMO

MIMO jest kluczową technologią w systemach 5G stosowaną w celu zwiększenia przepustowości. Sprowadza się ona do wykorzystania wielu anten po stronie nadawcy i odbiorcy. Systemy 5G obecnie wspierają transmisje do pojedynczego UE (SU - MIMO, Single User - MIMO), z maksymalnie 8 warstwami transmisyjnymi (strumieniami danych) w DL i 4 warstwami w UL. Wspierany jest też system obsługujący wiele UE jednocześnie (MU - MIMO, Multi User MIMO), z maksymalnie 12 warstwami w UL i DL [1].

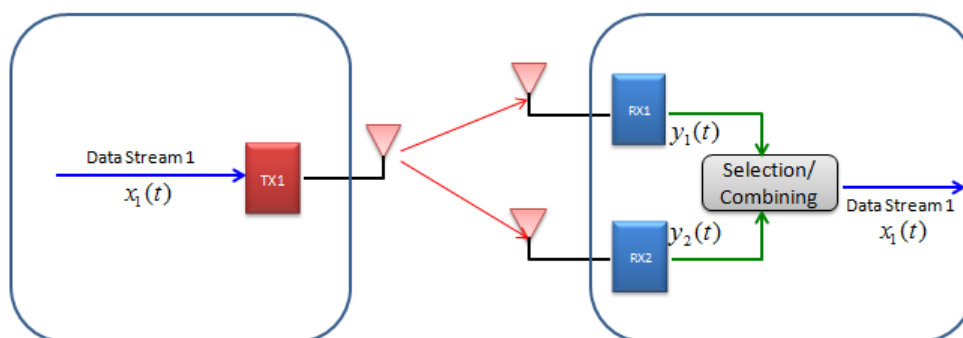
2.2.1. Technologia MIMO

MIMO (Multiple Input Multiple Output) to system w sieciach bezprzewodowych, który rozdziela strumień danych na wiele strumieni i przesyła je poprzez wiele anten. Zarówno nadawca jak i odbiorca posiada wiele anten w różnej konfiguracji. Takie rozdzielanie przynosi różne korzyści, zależnie od układu anten i ich aspektów. Najczęstszym wykorzystaniem tych systemów jest zwiększenie przepustowości, ale można również je wykorzystać do zwiększenia niezawodności. W tym rozdziale, przykładem jest system 2x2, przedstawiony na rysunku 2.18 [20].

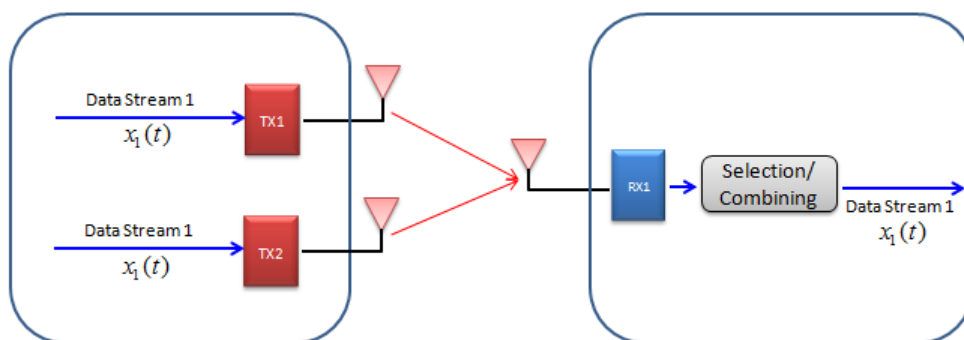


Rys. 2.18: Symtem MIMO 2x2 [20]

Równa liczba anten po obu stronach transmisji zwiększy przepustowość, a różna liczba zwiększy niezawodność. Wynika to z faktu, że większa liczba anten zwiększy liczba strumieni danych, co wpłynie na szybkość transmisji, ale nie wprowadza redundantnych strumieni, co zupełnie nie wpływa na niezawodność. Nierówna liczba anten wprowadza redundancję strumieni, co umożliwia stronie odbierającej wybranie lepszego strumienia lub rekonstrukcję danych, co przedstawiono na rysunkach 2.19 oraz 2.20.



Rys. 2.19: Selekcja sygnału [20]

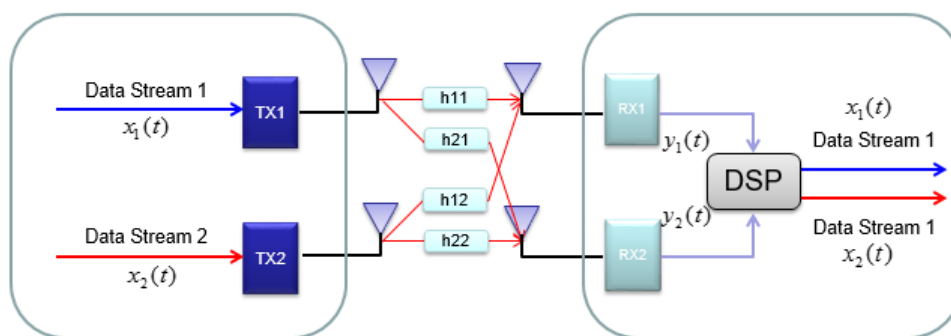


Rys. 2.20: Rekonstrukcja sygnału [20]

Implementacja systemu MIMO polega na algebrze liniowej. Model takiej transmisji składa się z trzech macierzy. Są to dane nadane x , macierz informacji o kanale H i dane odebrane y . Wartości h_{nm} to liczby, które określają jaką część danych przechodzi przez odpowiedni strumień.

$$y = Hx \quad x = H^{-1}y$$

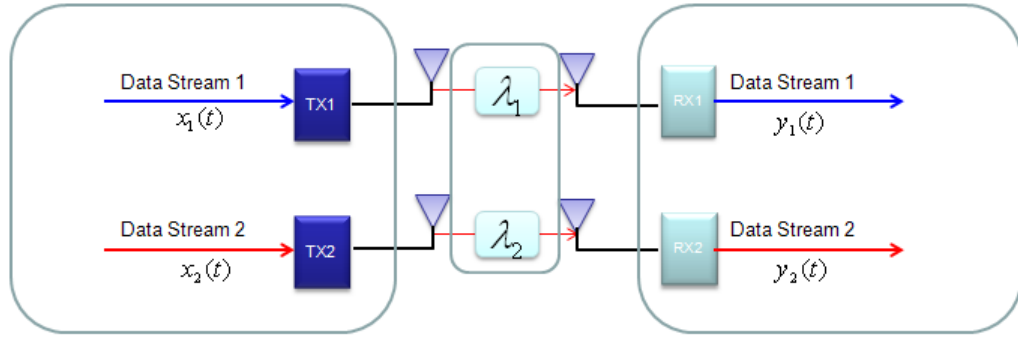
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$



Rys. 2.21: MIMO 2x2 [20]

Transmisja polega na nadaniu danych x poprzez kanał H , wyznaczeniu danych odebranych y i odtworzeniu x po stronie odbiorcy. Aby tego dokonać należy odwrócić macierz H , co nie jest wydajne i nie zawsze możliwe. Ten problem rozwiązuje zaimplementowanie SVD (Singular value decomposition) i modyfikacja modelu transmisji. Końcowym efektem implementacji SVD jest wyznaczenie nowej diagonalnej macierzy Σ [20].

$$y = \Sigma x \quad y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} x$$



Rys. 2.22: Rezultat SVD [20]

Na podstawie nowej macierzy można określić czy dany system jest optymalny. Istnieją dwie metryki aby tego dokonać. Pierwsza z nich to rząd macierzy Σ . Jeśli ta liczba odpowiada wykorzystanemu systemowi (2 dla 2x2), to jest to dobra konfiguracja. Jednakże jest to naiwna metryka, ponieważ nie bierze pod uwagę różnych wag strumieni danych w kanale. Dokładniejszy sposób sprawdzenia systemu to tzw. Condition Number $K(H)$, który wykorzystuje wartości na diagonalu macierzy Σ . System uznaje się za optymalny, jeśli wynik tej metryki jest bliski 1 dla systemów przestrzennych [20].

$$K(H) = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}$$

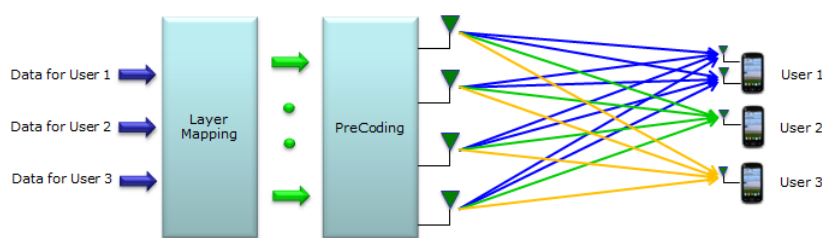
Przykładowo dla $H = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$, czyli w systemie MIMO 2x2, gdzie połowa strumienia danych jednej anteny nadawczej skierowana jest do jednej anteny odbiorczej $K(H) = \frac{\sqrt{2}}{0} = \infty$ (liczby pochodzą z macierzy Σ). Nieskończoność w tym przypadku to bardzo duża liczba i z niej wynika, że taki system nie jest optymalny. Powodem jest całkowicie przestrzenny charakter tego systemu, dla którego strumień jest dzielony jedynie na mniejsze części, ale te podzielone strumienie mogą się wzajemnie zakłócać. Lepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie systemu, który wprowadza przesunięcie w fazie dla niektórych strumieni danych i wtedy będą one niezależne względem siebie.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & j\frac{1}{\sqrt{2}} \\ j\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad K(H) = \frac{1}{1} = 1$$

2.2.2. MU-MIMO

MU - MIMO wykorzystuje technikę formowania wiązki (beamforming), aby każdy zestaw anten mógł obsługiwać wielu użytkowników na raz. W SU - MIMO każdy zestaw anten może obsługiwać tylko jednego użytkownika w danym czasie, co może skutkować dużym zagęszczeniem ruchu, co prowadzi do obniżenia wydajności systemu. W MU - MIMO każdy użytkownik (UE) nie musi czekać na swoją kolej by przeprowadzić transmisję, ponieważ wszyscy są obsługiwani równolegle.

Aby osiągnąć efekt wielu wiązek (tzw. beam'ów) wykorzystuje się technikę zmieniania fazy każdej anteny w zestawie w taki sposób, aby doszło do konstruktywnej interferencji w pożądanym kierunku. Fazą można manipulować w taki sposób, że pojedynczy zestaw anten (antenna array) może emitować wiele wiązek w zadanych kierunkach [21]. Każda wiązka może realizować swoją transmisję MIMO dla konkretnego użytkownika, co przedstawiono na rysunku 2.23.

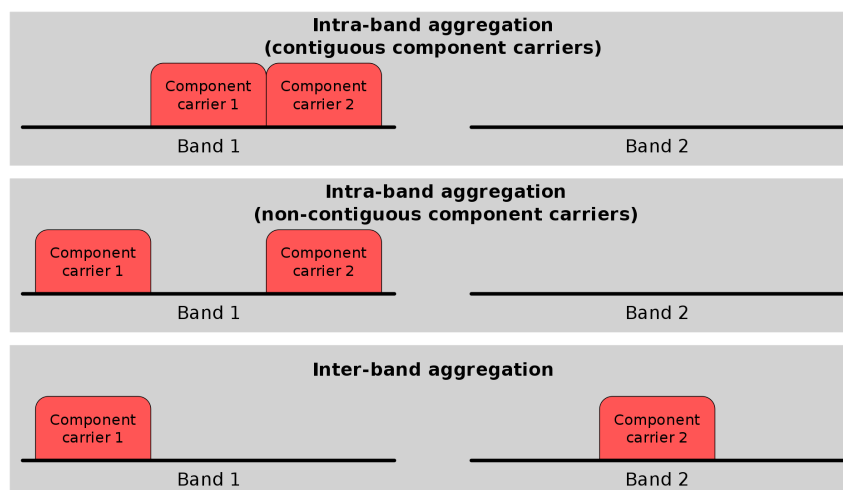


Rys. 2.23: MU - MIMO [22]

2.3. AGREGACJA NOŚNYCH CA

Agregacja nośnych jest techniką w sieciach bezprzewodowych, gdzie pojedynczy użytkownik (UE) może wykorzystać wiele nośnych (częstotliwości), w ramach przeprowadzenia transmisji danych. Każdą taką nośną określa się mianem komponentu nośnej (Carrier Component CC) [14]. CA wykorzystuje się, aby zwiększyć przepustowość systemu. Wypadkowa szybkość transmisji z wykorzystaniem tej techniki jest sumą przepustowości każdego CC [16]. Dla systemów 5G stacja bazowa może obsługiwać maksymalnie 16 CC w ramach transmisji danych dla pojedynczego UE [2]. Wyróżnia się 3 typy agregacji nośnych [14]:

- agregacja wewnętrzna (przyległe komponenty nośnych),
- agregacja wewnętrzna (nieprzyległe komponenty nośnych),
- agregacja zewnętrzna.



Rys. 2.24: Typy agregacji nośnych [24]

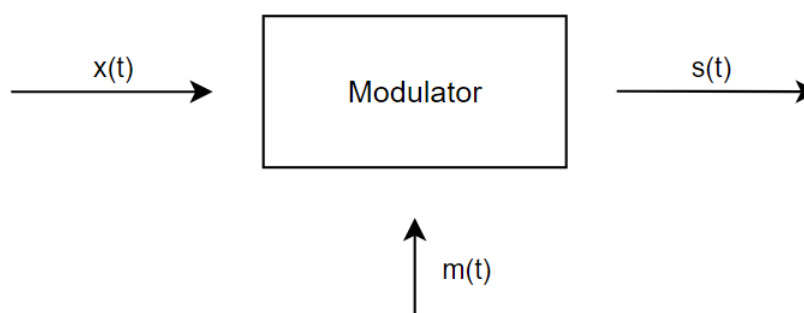
2.4. MODULACJA

W systemach 5G wykorzystuje się kwadraturową modulację amplitudowo-fazową QAM, która jest techniką przetwarzania danych cyfrowych, korzystającą z aspektów modulacji amplitudy i fazy. W celu omówienia QAM, opisano co to znaczy zmodulować sygnał amplitudowo oraz fazowo.

2.4.1. Podstawy modulacji

Modulacja to proces, gdzie sygnał, który zamierza się przesłać poprzez medium elektromagnetyczne (bezprzewodowo), modyfikuje się w taki sposób, żeby przystosować go do tego medium. Sygnały audio lub ogólnie sygnały przechowujące jakąś informację, nie są przystosowane do transmisji przez środowisko z wieloma zakłóceniami, takie jak inne pola elektromagnetyczne lub aspekty atmosferyczne. Można temu zaradzić zmieniając ten sygnał w różne sposoby. [15].

Nośna $x(t)$ zawierająca informację podlega modyfikacji poprzez sygnał modulujący $m(t)$ i efektem jest sygnał wysyłany w kanał $s(t)$ [15].



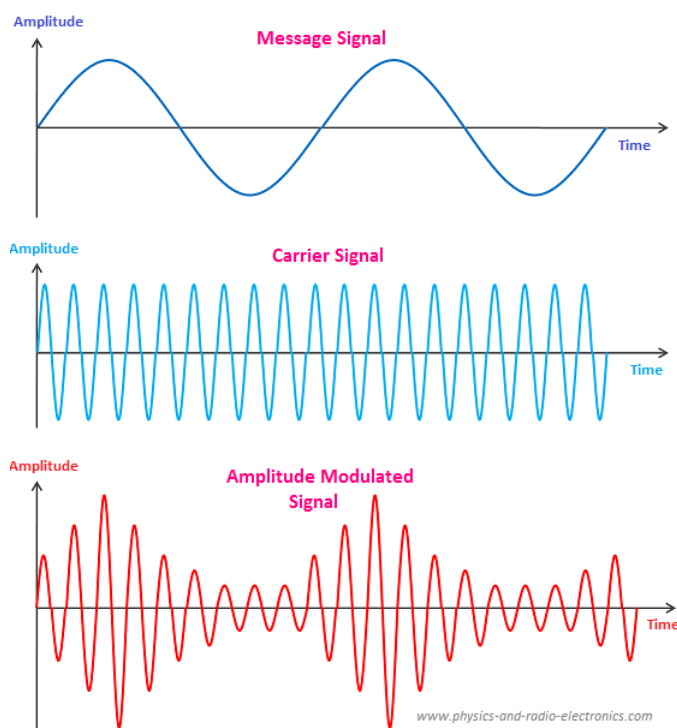
Rys. 2.25: Diagram modulatora

Można sprowadzić podział technik modulacji do modyfikacji amplitudy, fazy lub częstotliwości danych analogowych lub cyfrowych. Techniki modulacji można skategoryzować w następujący sposób:

- dane analogowe,
 - modyfikacja amplitudy AM (Amplitude Modulation),
 - modyfikacja fazy PM (Phase Modulation),
 - modyfikacja częstotliwości FM (Frequency Modulation),
- dane cyfrowe,
 - modyfikacja amplitudy ASK (Amplitude Shift keying),
 - modyfikacja fazy FSK (Frequency Shift keying),
 - modyfikacja częstotliwości PSK (Phase Shift keying),
 - modyfikacja fazy i częstotliwości QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

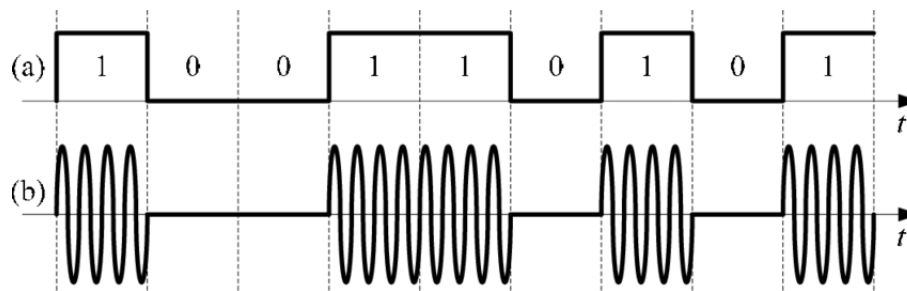
2.4.2. Modulacja amplitudy AM oraz ASK

Podczas tej modulacji sygnał zmodulowany przyjmuje częstotliwość sygnału modulującego, a jego amplituda zmienia się w czasie, zgodnie z amplitudą sygnału zawierającego informacje [18]. Przykład tej modulacji przedstawiono na rysunku 2.26



Rys. 2.26: Modulacja amplitudy danych analogowych [18]

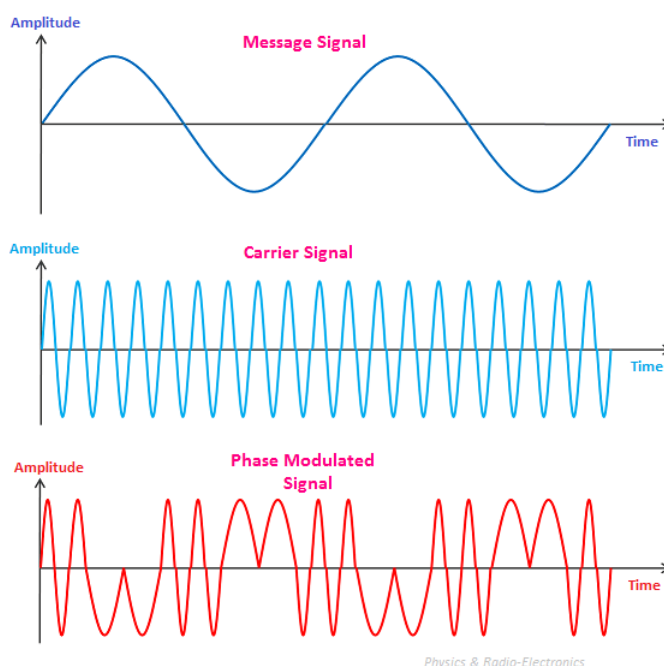
Dla danych cyfrowych pewny ciąg bitów posiada własny poziom amplitudy. W ten sposób można przypisać każdy ciąg bitów do odpowiedniej amplitudy, co przedstawiono na rysunku 2.27.



Rys. 2.27: Modulacja amplitudy danych cyfrowych [17]

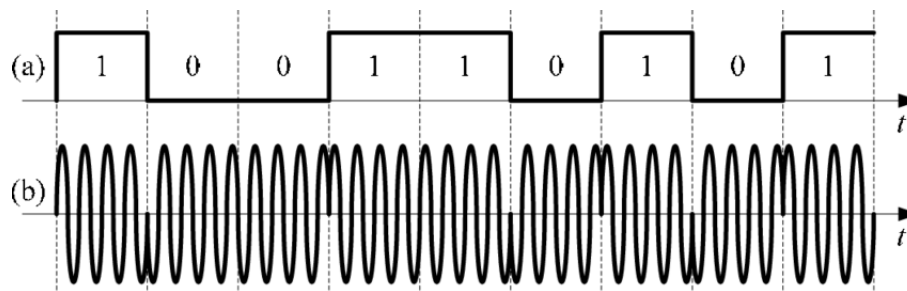
2.4.3. Modulacja fazy PM oraz PSK

W tej technice modulacji sygnał modulujący steruje fazą sygnału zawierającego informację. Przykład tej modulacji przedstawiono na rysunku 2.28. W wyniku tej operacji przesyłana sygnał zmodulowany posiada zmienną fazę zależną od amplitudy sygnału modulowanego oraz zmienną częstotliwość (efekt uboczny) [19]. Modulacja fazy charakteryzuje się mniejszą generacją szumu (większy stosunek sygnał-szum SNR), co czyni ją lepszą techniką do wykorzystania w technologiach mobilnych [19].



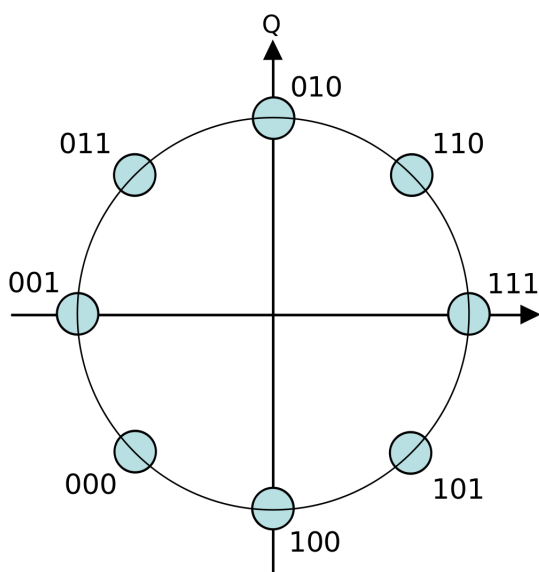
Rys. 2.28: Modulacja fazy danych analogowych [19]

Dla danych cyfrowych ciągi bitów (symbole) przypisane mają różne zmiany w fazie nośnej. Sygnał modulujący jest złożony z dobranej sinusoidy Q i cosinusoidy I różniące się fazą. Różne zmiany fazy w nośnej odpowiadają różnym symbolom.



Rys. 2.29: Modulacja amplitudy danych cyfrowych [17]

Modele technik modulacji cyfrowych manipulujących fazą można przedstawić za pomocą tzw. diagramów konstelacji, które przejrzysto wizualizują ich działanie. Nośne o danej fazie odpowiadające symbolom znajdują się na diagramie konstelacji (niebieskie kółka), tworząc okrąg, podobnie do zmiany kąta w liczbie zespolonej. Dla techniki 8-PSK (8 - Phase Shift Keying) symbol składa się z trzech bitów, czyli na diagramie przedstawionym na rysunku 2.30 znajduje się osiem punktów. Przykładowo, jeśli różnica w fazie między I oraz Q wynosi 45° , to wysłanym symbolem jest [1,1,0].



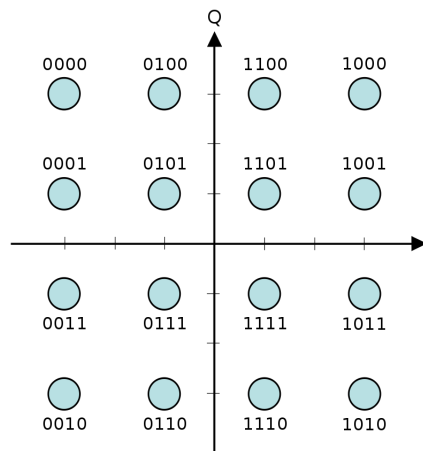
Rys. 2.30: Diagram konstelacji 8-PSK [25]

2.4.4. Cyfrowa kwadraturowa modulacja amplitudowo-fazowa QAM

Ta technika modulacji służy do przesyłania danych cyfrowych. Jest ona bardzo podobna do techniki PSK, z taką różnicą, że zawiera również aspekty ASK uwzględniając dwie zmienne: amplitudę oraz fazę wysłanej nośnej. Sygnał zmodulowany, podobnie jak w PSK, składa się z sygnałów I oraz Q, które różnią się fazą. W tej technice konkretne symbole posiadają swoje sygnały o charakterystycznej amplitudzie i fazie.

Dla tej techniki również dobrą reprezentacją jest diagram konstelacji. Te diagramy nie tworzą jednak okręgów, a zgrupowania symboli, gdzie odległością od środka diagramu

manipuluje amplituda, a kątem faza. Rysunek 2.31 przedstawia diagram dla 16-QAM. Każdy symbol składa się z 4 bitów.



Rys. 2.31: Diagram konstelacji 16-QAM [25]

Techniki modulacji QAM wykorzystują specjalną notację, która określa ile bitów przypada na każdy symbol. Jest to pierwiastek liczby poprzedzającej "QAM" (np. 16-QAM: $\sqrt{16} = 4$ bity).

Obecnie w systemach 5G wykorzystuje się następujące modulacje w konkretnych kanałach transportowych [1]:

| Kanał | Modulacja |
|-------|-----------|
| PDSCH | QPSK |
| | 16-QAM |
| | 64-QAM |
| | 256-QAM |
| PBCH | QPSK |
| PDCCH | QPSK |
| PUSCH | QPSK |
| | 16-QAM |
| | 64-QAM |
| | 256-QAM |

Rys. 2.32: Obecnie wykorzystywane modulacje QAM w systemach 5G

3. KALKULATOR PRZEPUSTOWOŚCI

3.1. OPIS PROGRAMU

Program jest plikiem wykonywalnym, który uruchamia okno (interfejs graficzny) z widżetami, którymi użytkownik może manipulować w celu wprowadzenia danych. Zaprojektowany kalkulator ma za zadanie obliczyć maksymalną teoretyczną przepustowość, dla określonej przez użytkownika konfiguracji systemu sieci komórkowej 5G. Wybór wariantu systemu opiera się na wykorzystanych technologiach takich jak MIMO lub ramka OFDM. Obliczona przepustowość dotyczy kanału PDSCH, w którym odbywa się transmisja danych użytkownika. Można wyznaczyć szybkość dla transmisji UL i DL.

Informacje o wykorzystanych technologiach znajdują się w specyfikacjach 3GPP. Z tych dokumentów pozyskano potrzebne dane i metodę obliczeniową, aby zrealizować program.

Zaimplementowana metoda obliczeniowa znajduje się w specyfikacji 3GPP TS 38.306 [7]:

$$DataRate[Mbps] = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^j (v \cdot Q \cdot f \cdot R \cdot \frac{N_{RB} * 12}{T} \cdot (1 - OH)) \quad (3.1)$$

j - liczba komponentów nośnych CC

v - konfiguracja systemu MIMO (liczba warstw z uwzględnieniem liczby wiązek dla MU - MIMO)

Q - rząd modulacji QAM

R - sprawność kodowania dla określonego wpisu w tabeli MCS

N_{RB} - liczba bloków zasobów dla określonej ramki OFDM

T - średni czas symbolu OFDM, $T = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu} [s]$

μ - indeks SCS wykorzystany do wyznaczenia T

OH - skalar wyniku wynikający z niewydajności systemu

f - skalar wyniku wprowadzony przez użytkownika

Wartości zmiennych Q oraz R zawarte są w tabelach przedstawionych na rysunkach 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, które znajdują się w specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5]. Wybór odpowiedniej tabeli MCS zależy od konfiguracji pewnych parametrów na UE i jest to opisane w specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5], w podrozdziale 5.1.3.1. W programie użytkownik może wybrać dowolną tabelę. Główną różnicą między nimi jest różna sprawność kodowania R dla poszczególnych indeksów MCS oraz maksymalny rząd modulacji.

| MCS Index I_{MCS} | Modulation Order Q_m | Target code Rate $R \times [1024]$ | Spectral efficiency |
|------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 0 | 2 | 120 | 0.2344 |
| 1 | 2 | 157 | 0.3066 |
| 2 | 2 | 193 | 0.3770 |
| 3 | 2 | 251 | 0.4902 |
| 4 | 2 | 308 | 0.6016 |
| 5 | 2 | 379 | 0.7402 |
| 6 | 2 | 449 | 0.8770 |
| 7 | 2 | 526 | 1.0273 |
| 8 | 2 | 602 | 1.1758 |
| 9 | 2 | 679 | 1.3262 |
| 10 | 4 | 340 | 1.3281 |
| 11 | 4 | 378 | 1.4766 |
| 12 | 4 | 434 | 1.6953 |
| 13 | 4 | 490 | 1.9141 |
| 14 | 4 | 553 | 2.1602 |
| 15 | 4 | 616 | 2.4063 |
| 16 | 4 | 658 | 2.5703 |
| 17 | 6 | 438 | 2.5664 |
| 18 | 6 | 466 | 2.7305 |
| 19 | 6 | 517 | 3.0293 |
| 20 | 6 | 567 | 3.3223 |
| 21 | 6 | 616 | 3.6094 |
| 22 | 6 | 666 | 3.9023 |
| 23 | 6 | 719 | 4.2129 |
| 24 | 6 | 772 | 4.5234 |
| 25 | 6 | 822 | 4.8164 |
| 26 | 6 | 873 | 5.1152 |
| 27 | 6 | 910 | 5.3320 |
| 28 | 6 | 948 | 5.5547 |
| 29 | 2 | reserved | |
| 30 | 4 | reserved | |
| 31 | 6 | reserved | |

Rys. 3.1: Tablica MCS 5.1.3.1-1 ze specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5]

| MCS Index I_{MCS} | Modulation Order Q_m | Target code Rate $R \times [1024]$ | Spectral efficiency |
|------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 0 | 2 | 120 | 0.2344 |
| 1 | 2 | 193 | 0.3770 |
| 2 | 2 | 308 | 0.6016 |
| 3 | 2 | 449 | 0.8770 |
| 4 | 2 | 602 | 1.1758 |
| 5 | 4 | 378 | 1.4766 |
| 6 | 4 | 434 | 1.6953 |
| 7 | 4 | 490 | 1.9141 |
| 8 | 4 | 553 | 2.1602 |
| 9 | 4 | 616 | 2.4063 |
| 10 | 4 | 658 | 2.5703 |
| 11 | 6 | 466 | 2.7305 |
| 12 | 6 | 517 | 3.0293 |
| 13 | 6 | 567 | 3.3223 |
| 14 | 6 | 616 | 3.6094 |
| 15 | 6 | 666 | 3.9023 |
| 16 | 6 | 719 | 4.2129 |
| 17 | 6 | 772 | 4.5234 |
| 18 | 6 | 822 | 4.8164 |
| 19 | 6 | 873 | 5.1152 |
| 20 | 8 | 682.5 | 5.3320 |
| 21 | 8 | 711 | 5.5547 |
| 22 | 8 | 754 | 5.8906 |
| 23 | 8 | 797 | 6.2266 |
| 24 | 8 | 841 | 6.5703 |
| 25 | 8 | 885 | 6.9141 |
| 26 | 8 | 916.5 | 7.1602 |
| 27 | 8 | 948 | 7.4063 |
| 28 | 2 | reserved | |
| 29 | 4 | reserved | |
| 30 | 6 | reserved | |
| 31 | 8 | reserved | |

Rys. 3.2: Tablica MCS 5.1.3.1-2 ze specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5]

| MCS Index I_{MCS} | Modulation Order Q_m | Target code Rate $R \times [1024]$ | Spectral efficiency |
|------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 0 | 2 | 30 | 0.0586 |
| 1 | 2 | 40 | 0.0781 |
| 2 | 2 | 50 | 0.0977 |
| 3 | 2 | 64 | 0.1250 |
| 4 | 2 | 78 | 0.1523 |
| 5 | 2 | 99 | 0.1934 |
| 6 | 2 | 120 | 0.2344 |
| 7 | 2 | 157 | 0.3066 |
| 8 | 2 | 193 | 0.3770 |
| 9 | 2 | 251 | 0.4902 |
| 10 | 2 | 308 | 0.6016 |
| 11 | 2 | 379 | 0.7402 |
| 12 | 2 | 449 | 0.8770 |
| 13 | 2 | 526 | 1.0273 |
| 14 | 2 | 602 | 1.1758 |
| 15 | 4 | 340 | 1.3281 |
| 16 | 4 | 378 | 1.4766 |
| 17 | 4 | 434 | 1.6953 |
| 18 | 4 | 490 | 1.9141 |
| 19 | 4 | 553 | 2.1602 |
| 20 | 4 | 616 | 2.4063 |
| 21 | 6 | 438 | 2.5664 |
| 22 | 6 | 466 | 2.7305 |
| 23 | 6 | 517 | 3.0293 |
| 24 | 6 | 567 | 3.3223 |
| 25 | 6 | 616 | 3.6094 |
| 26 | 6 | 666 | 3.9023 |
| 27 | 6 | 719 | 4.2129 |
| 28 | 6 | 772 | 4.5234 |
| 29 | 2 | reserved | |
| 30 | 4 | reserved | |
| 31 | 6 | reserved | |

Rys. 3.3: Tablica MCS 5.1.3.1-3 ze specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5]

| MCS Index I_{MCS} | Modulation Order Q_m | Target code Rate $R \times [1024]$ | Spectral efficiency |
|------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 0 | 2 | 120 | 0.2344 |
| 1 | 2 | 193 | 0.3770 |
| 2 | 2 | 449 | 0.8770 |
| 3 | 4 | 378 | 1.4766 |
| 4 | 4 | 490 | 1.9141 |
| 5 | 4 | 616 | 2.4063 |
| 6 | 6 | 466 | 2.7305 |
| 7 | 6 | 517 | 3.0293 |
| 8 | 6 | 567 | 3.3223 |
| 9 | 6 | 616 | 3.6094 |
| 10 | 6 | 666 | 3.9023 |
| 11 | 6 | 719 | 4.2129 |
| 12 | 6 | 772 | 4.5234 |
| 13 | 6 | 822 | 4.8164 |
| 14 | 6 | 873 | 5.1152 |
| 15 | 8 | 682.5 | 5.3320 |
| 16 | 8 | 711 | 5.5547 |
| 17 | 8 | 754 | 5.8906 |
| 18 | 8 | 797 | 6.2266 |
| 19 | 8 | 841 | 6.5703 |
| 20 | 8 | 885 | 6.9141 |
| 21 | 8 | 916.5 | 7.1602 |
| 22 | 8 | 948 | 7.4063 |
| 23 | 10 | 805.5 | 7.8662 |
| 24 | 10 | 853 | 8.3301 |
| 25 | 10 | 900.5 | 8.7939 |
| 26 | 10 | 948 | 9.2578 |
| 27 | 2 | reserved | |
| 28 | 4 | reserved | |
| 29 | 6 | reserved | |
| 30 | 8 | reserved | |
| 31 | 10 | reserved | |

Rys. 3.4: Tablica MCS 5.1.3.1-4 ze specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5]

Liczbę bloków N_{RB} zasobów określa para SCS oraz BW dla wybranej częstotliwości FR1 lub FR2. Na rysunkach 3.5 oraz 3.6, znajdujących się w specyfikacji 3GPP TS 38.104 [3], przedstawiono z jakich tabel korzysta program i jakie pary SCS i BW wskazują na jaką liczbę bloków zasobów N_{RB}

| SCS (kHz) | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz | 25 MHz | 30 MHz | 35 MHz | 40 MHz | 45 MHz | 50 MHz | 60 MHz | 70 MHz | 80 MHz | 90 MHz | 100 MHz |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} |
| 15 | 25 | 52 | 79 | 106 | 133 | 160 | 188 | 216 | 242 | 270 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 30 | 11 | 24 | 38 | 51 | 65 | 78 | 92 | 106 | 119 | 133 | 162 | 189 | 217 | 245 | 273 |
| 60 | N/A | 11 | 18 | 24 | 31 | 38 | 44 | 51 | 58 | 65 | 79 | 93 | 107 | 121 | 135 |

Rys. 3.5: Liczba bloków zasobów RB dla FR1 ze specyfikacji 3GPP TS 38.104 [3]

| SCS (kHz) | 50 MHz | 100 MHz | 200 MHz | 400 MHz |
|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} | N_{RB} |
| 60 | 66 | 132 | 264 | N/A |
| 120 | 32 | 66 | 132 | 264 |

Rys. 3.6: Liczba bloków zasobów RB dla FR2 ze specyfikacji 3GPP TS 38.104 [3]

Wartość OH określa niewydajność systemu zależnie od jego parametrów. Według specyfikacji 3GPP TS 38.306 [7] tą wartością manipuluje zakres częstotliwości oraz kierunek transmisji i ma 4 wartości.

FR1 / DL, OH = 0.14,

FR2 / DL, OH = 0.18,

FR1 / UL, OH = 0.08,

FR2 / UL, OH = 0.10.

3.2. PRZYKŁADY OBLICZEŃ

W analizowanym przypadku wyliczana jest przepustowość dla kierunku w dół, dla systemu 5G pracującego w paśmie FR1 z kanałem o szerokości 40MHz oraz SCS = 15kHz ($\mu = 0$) z modulacją 64-QAM ($Q = 6$), sprawnością kodowania 948/1024 (MCS = 28, rysunek 3.1), SU-MIMO 2x2 ($v = 2$) i z jednym komponentem nośnej CC ($j = 1$).

$$DataRate[Mbps] = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^1 (2 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 0.926 \cdot \frac{216 \cdot 12}{0.0000714} \cdot (1 - 0.14)) \approx 347[Mbps] \quad (3.2)$$

$$j = 1$$

$$v = 2$$

$$Q = 6$$

$$R = 948/1024 \approx 0.926$$

$$\mu = 0$$

$$N_{RB} = 216$$

$$T = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^0} \approx 0.0000714[s]$$

$$OH = 0.14$$

$$f = 1$$

W kolejnej analizie zmieniono liczbę komponentów nośnej CC z jednej na trzy ($j = 3$). Reszta parametrów pozostała bez zmian.

$$DataRate[Mbps] = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^3 (2 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 0.926 \cdot \frac{216 \cdot 12}{0.0000714} \cdot (1 - 0.14)) \approx 1040[Mbps] \quad (3.3)$$

$$j = 3$$

$$v = 2$$

$$Q = 6$$

$$R = 948/1024 \approx 0.926$$

$$\mu = 0$$

$$N_{RB} = 216$$

$$T = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^0} \approx 0.0000714[s]$$

$$OH = 0.14$$

$$f = 1$$

Wynik w porównaniu z przykładem pierwszym 3.2 jest trzy razy większy. Wynika to z wykorzystania 3 CC, które sumują wynik dla pojedynczej nośnej trzy razy.

W kolejnej analizie w porównaniu z przykładem pierwszym 3.2 zmieniono liczbę warstw MIMO z dwóch na osiem ($v = 8$). Reszta parametrów pozostała bez zmian.

$$DataRate[Mbps] = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^1 (8 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 0.926 \cdot \frac{216 * 12}{0.0000714} \cdot (1 - 0.14)) \approx 1387[Mbps] \quad (3.4)$$

$$j = 1$$

$$v = 8$$

$$Q = 6$$

$$R = 948/1024 \approx 0.926$$

$$\mu = 0$$

$$N_{RB} = 216$$

$$T = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^0} \approx 0.0000714[s]$$

$$OH = 0.14$$

$$f = 1$$

Wynik w porównaniu z przykładem pierwszym 3.2 jest cztery razy większy. Wynika to z wykorzystania 8 warstw MIMO, których jest 4 razy więcej.

W kolejnej analizie w porównaniu z przykładem pierwszym 3.2 zmieniono modulację z 64-QAM na 256-QAM ($Q = 8$) oraz sprawność kodową na 916.5/1024 (MCS = 26, rysunek 3.2). Zmieniono również SCS na 60 KHz ($\mu = 2$), co przy tej samej szerokości kanału i przedziale częstotliwości definiuje 51 bloków zasobów. Reszta parametrów pozostała bez zmian.

$$DataRate[Mbps] = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^1 (2 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 0.895 \cdot \frac{51 * 12}{0.0000178} \cdot (1 - 0.14)) \approx 422[Mbps] \quad (3.5)$$

$$j = 1$$

$$v = 2$$

$$Q = 8$$

$$R = 916.5/1024 \approx 0.895$$

$$\mu = 2$$

$$N_{RB} = 51$$

$$T = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^2} \approx 0.0000178[s]$$

$$OH = 0.14$$

$$f = 1$$

W tym przykładzie, w porównaniu z przykładem pierwszym 3.2, wybrano większy SCS przy tym samym BW czego efektem jest mniejsza liczba bloków zasobów, ale czterokrotnie zmniejsza się średni czas symbolu OFDM. Wybrano również większy rząd modulacji z

inną sprawnością kodową niż w przykładach 3.2, 3.3 oraz 3.4. Wypadkowo wynik jest większy niż w przykładzie 3.2, ale nie znacząco.

W ostatnim analizowanym przypadku wyliczana jest przepustowość dla kierunku w górę, dla systemu 5G pracującego w paśmie FR2 z kanałem o szerokości 200MHz oraz SCS = 120kHz ($\mu = 3$), modulacją 1024-QAM (która nie jest wykorzystywana w obecnych, realnych systemach) ($Q = 10$), sprawnością kodowania 948/1024 (MCS = 26, rysunek 3.4), SU-MIMO 8x8 ($v = 8$) i z trzema komponentami nośnej CC ($j = 3$).

$$DataRate[Mbps] = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^3 (8 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 0.926 \cdot \frac{132 \cdot 12}{0.0000089} \cdot (1 - 0.10)) \approx 35476[Mbps] \quad (3.6)$$

$$j = 3$$

$$v = 8$$

$$Q = 10$$

$$R = 948/1024 \approx 0.926$$

$$\mu = 3$$

$$N_{RB} = 132$$

$$T = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^3} \approx 0.0000089[s]$$

$$OH = 0.10$$

$$f = 1$$

Ten przykład pokazuje możliwości systemu 5G. Wynik znacząco się różni od poprzednich przykładów, ponieważ zastosowano wysokie wartości poszczególnych elementów. Zastosowanie 3 CC sumuje 3 razy wynik pojedynczej nośnej, 8 strumieni zwiększa wynik 8 razy w porównaniu z pojedynczym strumieniem, rząd modulacji równy 10 pozwala na przesłanie 10 bitów pojedynczym symbolem OFDM złożonym z 132 bloków zasobów ze średnim czasem jego trwania równym $8,9 \mu s$ dla zakresu częstotliwości FR2, w kanale w górę z mniejszym współczynnikiem niewydajności systemu OH w porównaniu z poprzednimi przykładami.

3.3. IMPLEMENTACJA

Program został zaimplementowany w języku Python 3.0, za pomocą edytora tekstu VsCode. Na potrzeby pracy opracowano skrypt, który implementuje metodę obliczeniową określoną w specyfikacji 3GPP TS 38.306 [7] "main.py" oraz skrypt, który generuje interfejs graficzny "gui.py". Oba skrypty zostały połączone w jeden plik wykonywalny "5G_throughput.exe" za pomocą narzędzia "pyinstaller".

3.3.1. Metoda obliczeniowa

W opracowanym skrypcie napisane zostało 5 funkcji które implementują metodę obliczeniową:

```
1 def Data_Rate_Mbps(MIMO, n_carriers, MCS_Index, scs, bw, FR_band,
2   ↪ channel_direction, scaling_factor, Table_number):
3     mod_order = mod_order_table(Table_number)
4     config = choose_Nrb_table(FR_band)
5     overhead = {
6         "DL":
7             {
8                 "FR1": 0.14,
9                 "FR2": 0.18
10            },
11     "UL":
12         {
13             "FR1": 0.08,
14             "FR2": 0.10
15         }
16     }
17     numerology = 0
18     match scs:
19         case '15.0':
20             numerology = 0
21         case '30.0':
22             numerology = 1
23         case '60.0':
24             numerology = 2
25         case '120.0':
26             numerology = 3
27     Tofdm = (pow(10, -3))/(14*pow(2, numerology))
28     R = 0
29     for j in np.arange(start = 1, stop = n_carriers+1, step = 1):
30         R += ((MIMO * (mod_order[MCS_Index][1]) * (scaling_factor)) *
31             ↪ (mod_order[MCS_Index][2]/1024) *
32             ↪ (((config[int(float(scs))][int(float(bw))]) * 12)/(Tofdm)) * (1
33             ↪ - overhead[channel_direction][FR_band]))
34     R *= pow(10, -6)
35
36     return np.round(R, 0)
```

Listing 3.1: Data_Rate_Mbps()

Funkcja przedstawiona na listingu 3.1 oblicza przepustowość określonego przez użytkownika systemu 5G. Argumentami tej funkcji to kolejne aspekty systemu 5G:

- **MIMO**: odpowiednik v metody obliczeniowej 3.1, która składa się z liczby warstw oraz wiązek
- **n_carriers**: odpowiednik j metody obliczeniowej 3.1, która określa liczby CC
- **Table_number**: wybiera tabele mcs ze specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5]
- **MCS_Index**: indeks w określonej przez **Table_number** tabeli MCS, który pozwala wybrać użytkownikowi rząd modulacji QAM Q określając jednocześnie R w metodzie obliczeniowej 3.1
- **FR_band**: określa wykorzystany zakres częstotliwości, który określa możliwe do wyboru dla użytkownika **bw** oraz **scs**
- **scs**: bierze udział w ustaleniu N_{RB} oraz μ (który wyznacza T) metody obliczeniowej 3.1
- **bw**: bierze udział w ustaleniu N_{RB} metody obliczeniowej 3.1
- **channel_direction**: określa kierunek transmisji, który razem z **FR_band** ma wpływ na OH w metodzie obliczeniowej 3.1
- **scaling_factor**: definiuje skalar wyniku w metodzie 3.1

```

1 def mod_order_table(table_number):
2     mod_order = np.loadtxt(f'mod_order_{table_number}.csv',
3                             delimiter=';', skiprows=1)
4
5     return mod_order

```

Listing 3.2: mod_order_table()

Jedynym argumentem funkcji przedstawionej na listingu 3.2 jest **table_number**, który określa, której tabeli MCS użyć w metodzie obliczeniowej 3.1. Funkcja zwraca 4 możliwe tabele MCS jako macierz, które przedstawiono na rysunkach 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 w podrozdziale 3.1, które są wstępnie przechowywane w postaci plików csv w tym samym folderze co program.

```

1 def choose_Nrb_table(FR_band):
2
3     Nrb_fr1 = np.loadtxt('Nrb_FR1.csv', delimiter=';',
4                             skiprows=1,
5                             usecols=(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15)
6                             )
7
8     Nrb_fr2 = np.loadtxt('Nrb_FR2.csv', delimiter=';',
9                             skiprows=1, usecols=(1,2,3,4))
10
11     if FR_band == "FR1":

```

```

12
13     nrb = {}
14     BW = np.loadtxt('Nrb_FR1.csv', delimiter=';',
15     max_rows = 1,
16     usecols=(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15)
17     )
18
19     SCS = np.loadtxt('Nrb_FR1.csv', delimiter=';',
20     skiprows=1, usecols=0)
21
22     for scs in range(Nrb_fr1.shape[0]):
23         nrb[SCS[scs]] = {}
24         for bw in range(Nrb_fr1.shape[1]):
25             nrb[SCS[scs]][BW[bw]] = Nrb_fr1[scs][bw]
26
27     return nrb
28 else:
29
30     nrb = {}
31     BW = np.loadtxt('Nrb_FR2.csv', delimiter=';',
32     max_rows = 1, usecols=(1,2,3,4))
33
34     SCS = np.loadtxt('Nrb_FR2.csv', delimiter=';',
35     skiprows=1, usecols=0)
36
37     for scs in range(Nrb_fr2.shape[0]):
38         nrb[SCS[scs]] = {}
39         for bw in range(Nrb_fr2.shape[1]):
40             nrb[SCS[scs]][BW[bw]] = Nrb_fr2[scs][bw]
41
42     return nrb

```

Listing 3.3: choose_Nrb_table()

Funkcja przedstawiona na listingu 3.3 jako argument przyjmuje zakres częstotliwości podany przez użytkownika (FR1 lub FR2) i zwraca strukturę JSON (JavaScript Object Notation), która mapuje możliwe wartości SCS i BW na odpowiednią liczbę bloków zasobów RB, zgodnie ze specyfikacją 3GPP TS 38.104 [3]. Te wartości przedstawiono na rysunkach 3.5 oraz 3.6 w podrozdziale 3.1 i wstępnie przechowywane są jako pliki csv w tym samym folderze co program.

```

1 def set_MIMO(MIMO_layers, MU_MIMO, MU_MIMO_beams):
2     mimo = int(MIMO_layers)
3     if MU_MIMO:
4         mimo *= int(MU_MIMO_beams)
5
6     return mimo

```

Listing 3.4: set_MIMO()

Funkcja przedstawiona na listingu 3.4 określa system MIMO dla konfiguracji systemu 5G. Użytkownik może wybrać ile warstw (strumieni) obsługuje dany system oraz czy wykorzystuje technologię MU-MIMO i jeśli tak to ile wiązek posiada ten system.

```

1 def set_scaling_factor(scaling_factor, custom_scaling_factor):
2     f = 1
3     if scaling_factor == "Custom":
4         f = custom_scaling_factor
5     else:
6         f = scaling_factor
7
8     return f

```

Listing 3.5: set_scaling_factor()

Funkcja przedstawiona na listingu 3.5 określa jak przeskalować wyznaczoną przepustowość systemu. Użytkownik może wybrać wartości 1, 0.8, 0.75, 0.4 oraz dowolną wartość.

3.3.2. Projekt interfejsu graficznego

Interfejs graficzny, który przedstawiono na rysunku 3.7, wykonano za pomocą biblioteki PyQt6. Ta biblioteka umożliwia tworzenie okien z widżetami, którymi użytkownik może manipulować.

Każdy aspekt metody obliczeniowej posiada swoją sekcję w oknie oraz w kodzie. Cały interfejs składa się z obiektu *QMainWindow*, który posiada odpowiednie widżety. Sekcja CA oraz MIMO są typowymi polami, gdzie można wpisać dowolną wartość. MU-MIMO można włączyć zaznaczając odpowiedni checkbox. Wybór kierunku transmisji, tabeli MCS, zakresu częstotliwości, SCS, BW oraz skalar wyniku są rozwijanymi listami, które zmieniają swoją zawartość zależnie od tego co wybrał użytkownik. Indeks tabeli MCS wybiera rząd modulacji, którą widać we wyłączonych polach.

Program pozwala na wpisanie dowolnych danych w polach, gdzie można bezpośrednio wpisać wartość. Należy jednak pamiętać, że mimo że program wyznaczy wynik to jeśli

dane wejściowe są nierealistyczne lub niezgodne ze specyfikacjami to sam wynik nie może być potraktowany jako rzetelny.

Liczbę CC można wpisać dowolną, ale według specyfikacji 3GPP TS 38.802 [2] maksymalna liczba CC wynosi 16.

Liczba warstw MIMO zwykle jest liczbą parzystą lub kolejnymi potęgami liczby 2. Realny system 5G wykorzystujący SU-MIMO może mieć maksymalnie 8 warstw dla transmisji w dół oraz 4 warstwy dla transmisji w górę. Natomiast dla systemów z MU-MIMO można definiować teoretycznie dowolną liczbę strumieni danych [2].

Reszta widżetów, służących do wprowadzania danych wejściowych, ma zdefiniowane wartości i wpływa na inne, poszczególne widżety.

W sekcji modulacji, numer tabeli określa maksymalny indeks MCS, a para tych wartości określa rząd modulacji i sprawność kodowania. Użytkownik ma do wyboru 4 tabele MCS oraz zależnie od wybranej tabeli kilkadziesiąt indeksów MCS.

W sekcji bloku zasobów, widżet określający zakres częstotliwości definiuje wartości SCS i BW, a kombinacja tych trzech wartości określa liczbę bloków zasobów oraz średni czas symbolu OFDM. Użytkownik ma do wyboru dwa zakresy częstotliwości FR1 i FR2. Po wyborze zakresu FR program pozwala na wybór wartości SCS i BW określonych na rysunkach 3.5 i 3.6.

Widżet dotyczący kierunku transmisji, razem z wybranym zakresem częstotliwości definiuje współczynnik OH. Skalar wartości f skaluje ostateczny wynik. Użytkownik może wybrać ostatnią opcję "Custom" włączając pole tekstowe obok, które służy do wpisania dowolnej wartości.

Wynik wyświetlany jest pod przyciskiem "Calculate".

Data rate [Mbps]

CA carriers

Carrier components: 2

MIMO

MIMO layers: 2

MU-MIMO: ☒

MU-MIMO beams: 2

Modulation

Table: 4

MCS Index: 12

Modulation: QAM-64

Modulation order: 6.0

Resource block

FR band: FR1

Subcarrier spacing [MHz]: 30.0

Channel bandwidth [MHz]: 30.0

Channel direction and scaling factor

Channel: DL

Scaling factor: 1

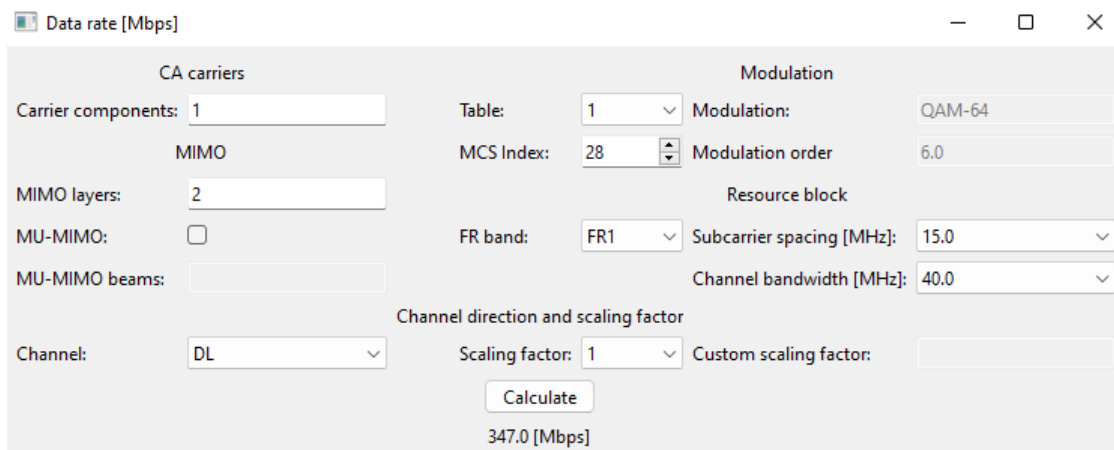
Custom scaling factor:

Calculate

816.0 [Mbps]

Rys. 3.7: Graficzny interfejs programu

Poniżej przedstawiono wyniki przykładów z podrozdziału 3.2 w graficznym interfejsie.



Data rate [Mbps]

CA carriers

Carrier components: 1

MIMO

MIMO layers: 2

MU-MIMO: ☐

MU-MIMO beams:

Modulation

Table: 1

MCS Index: 28

Modulation: QAM-64

Modulation order: 6.0

Resource block

FR band: FR1

Subcarrier spacing [MHz]: 15.0

Channel bandwidth [MHz]: 40.0

Channel direction and scaling factor

Channel: DL

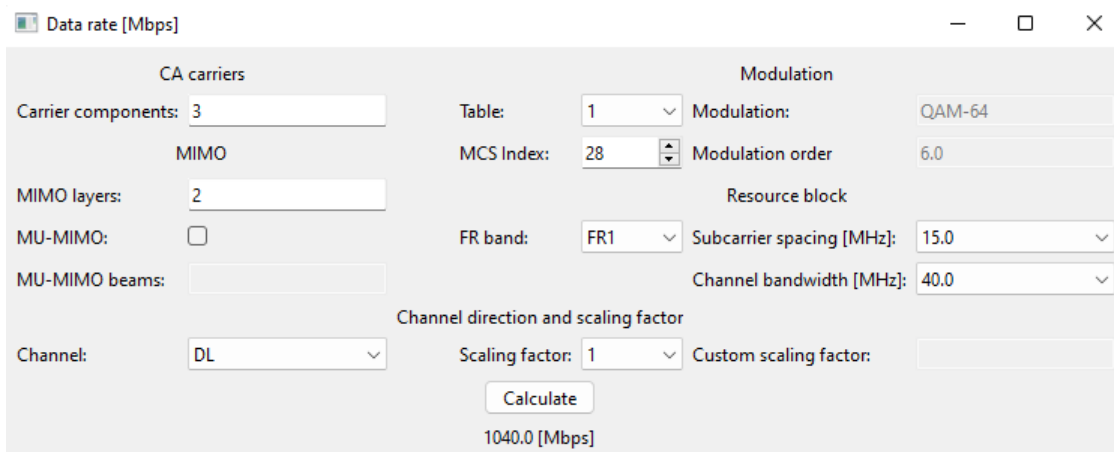
Scaling factor: 1

Custom scaling factor:

Calculate

347.0 [Mbps]

Rys. 3.8: Wynik przykładu 3.2



Data rate [Mbps]

CA carriers

Carrier components: 3

MIMO

MIMO layers: 2

MU-MIMO: ☐

MU-MIMO beams:

Modulation

Table: 1

MCS Index: 28

Modulation: QAM-64

Modulation order: 6.0

Resource block

FR band: FR1

Subcarrier spacing [MHz]: 15.0

Channel bandwidth [MHz]: 40.0

Channel direction and scaling factor

Channel: DL

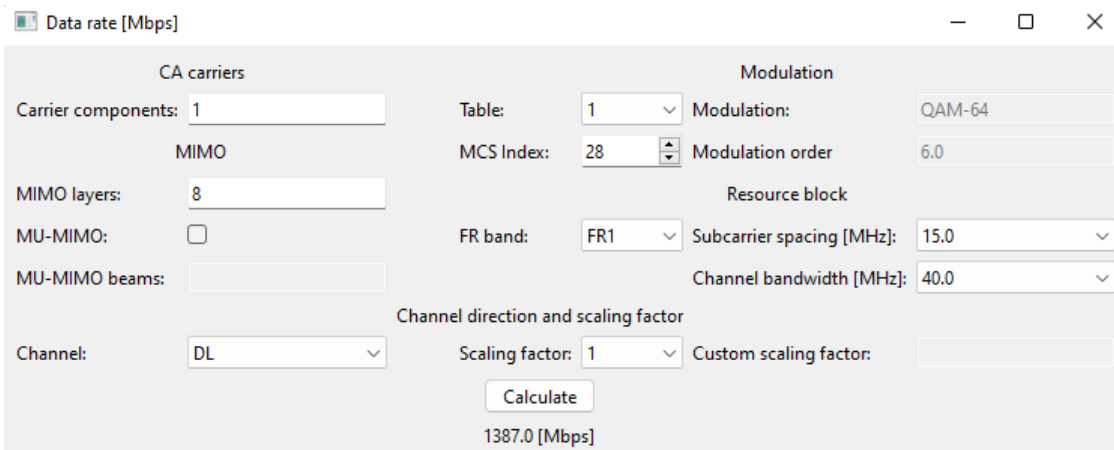
Scaling factor: 1

Custom scaling factor:

Calculate

1040.0 [Mbps]

Rys. 3.9: Wynik przykładu 3.3



Data rate [Mbps]

CA carriers

Carrier components: 1

MIMO

MIMO layers: 8

MU-MIMO: ☐

MU-MIMO beams:

Modulation

Table: 1

MCS Index: 28

Modulation: QAM-64

Modulation order: 6.0

Resource block

FR band: FR1

Subcarrier spacing [MHz]: 15.0

Channel bandwidth [MHz]: 40.0

Channel direction and scaling factor

Channel: DL

Scaling factor: 1

Custom scaling factor:

Calculate

1387.0 [Mbps]

Rys. 3.10: Wynik przykładu 3.4

Data rate [Mbps]

| | | | |
|---|--------------------------|---------------------------|---------|
| CA carriers | | Modulation | |
| Carrier components: | 1 | Table: | 2 |
| MIMO | | MCS Index: | 26 |
| MIMO layers: | 2 | Modulation: | QAM-256 |
| MU-MIMO: | <input type="checkbox"/> | Modulation order: | 8.0 |
| MU-MIMO beams: | | Resource block | |
| | | FR band: | FR1 |
| | | Subcarrier spacing [MHz]: | 60.0 |
| | | Channel bandwidth [MHz]: | 40.0 |
| Channel direction and scaling factor | | | |
| Channel: | DL | Scaling factor: | 1 |
| | | Custom scaling factor: | |
| <input type="button" value="Calculate"/> | | | |
| 422.0 [Mbps] | | | |

Rys. 3.11: Wynik przykładu 3.5

Data rate [Mbps]

| | | | |
|---|--------------------------|---------------------------|----------|
| CA carriers | | Modulation | |
| Carrier components: | 3 | Table: | 4 |
| MIMO | | MCS Index: | 26 |
| MIMO layers: | 8 | Modulation: | QAM-1024 |
| MU-MIMO: | <input type="checkbox"/> | Modulation order: | 10.0 |
| MU-MIMO beams: | | Resource block | |
| | | FR band: | FR2 |
| | | Subcarrier spacing [MHz]: | 120.0 |
| | | Channel bandwidth [MHz]: | 200.0 |
| Channel direction and scaling factor | | | |
| Channel: | UL | Scaling factor: | 1 |
| | | Custom scaling factor: | |
| <input type="button" value="Calculate"/> | | | |
| 35476.0 [Mbps] | | | |

Rys. 3.12: Wynik przykładu 3.6

PODSUMOWANIE

System sieci 5G jest znaczną ewolucją poprzedniego systemu LTE. Większość zmian wprowadzonych w najnowszej generacji sieci komórkowych dotyczy sfery programowej i logicznej, ale aspekt technologiczny i radiowy też został wyraźnie ulepszony.

Omówione technologie nie są nowością, ale wykorzystuje się je znacznie intensywniej w porównaniu z innymi systemami. Więcej anten dla systemów MIMO oraz komponentów nośnych wyraźnie wpływa na możliwości tego systemu. Mocno rozwinięto technologię OFDM, która jest bardzo charakterystyczna dla warstwy fizycznej tego systemu. Obecnie największym rzędem modulacji wykorzystywanym w realnych sieciach, jest 256-QAM, ale w specyfikacjach pojawia się nawet 1024-QAM, co stwarza ogromne możliwości.

Istotnym aspektem sieci 5G jest sfera programowa. Znacznie ulepszono sieć centralną 5GC, poprzez zredukowanie liczby wymaganego sprzętu, na rzecz używania bardziej wyrafinowanego, z wykorzystaniem technik wirtualizacji i podziału sieci na usługi zależnie od potrzeb użytkownika. System 5G jest wysoko modułarny w porównaniu z LTE.

Pojawienie się innowacji występujących w systemach 5G pokazuje, że rozwój nie musi wiązać się ze zwiększaniem efektywności lub wydajności systemu. Istotna dla użytkowników jest modularność i dopasowanie systemu do ich potrzeb, co pokazuje że rozwój technologiczny musi być kreatywny i brać pod uwagę faktyczne potrzeby i funkcjonalność rozwiązań.

W celu określenia możliwości sieci 5G opracowano program, który wyznacza maksymalną, teoretycznie możliwą przepustowość różnych konfiguracji transmisji zgodnie ze specyfikacją 3GPP TS 38.306 [7]. Wyznaczanie wartości szybkości transmisji uwzględnia kilka aspektów technicznych systemów komórkowych, które zostały znacząco rozwinięte w systemach 5G.

Istotnym elementem jest ulepszenie ramek OFDM. Dla sieci 5G dodano większe odległości pomiędzy podnośnymi SCS zmniejszając średni czas trwania symbolu. Program umożliwia wybranie odpowiedniego SCS razem z szerokością kanału BW dla wybranego zakresu częstotliwości, określając liczbę bloków zasobów i średni czas trwania ramki. Mapowanie pary SCS i BW jest określone w specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5].

Ważnym aspektem sieci komórkowych jest również system MIMO, który dla 5G został rozwinięty pod względem liczby obsługiwanych strumieni danych. Systemy 5G umożliwiają wykorzystanie znacznie większej liczby warstw MIMO niż w poprzedniej generacji, mocno wpływając na przepustowość. W programie można manipulować wartościami warstw MIMO, które są strumieniami danych. Można również zaznaczyć wykorzystanie systemu

MU-MIMO i zwiększyć liczbę warstw o liczbę wiązek wykorzystanych w transmisji. Dla systemów SU-MIMO, maksymalna liczba warstw dla transmisji w dół wynosi 8, a dla transmisji w górę 4. Wykorzystanie MU-MIMO pozwala na zdefiniowanie teoretycznie dowolnej liczby strumieni danych.

W sieciach bezprzewodowych istotne są również techniki modulacji, które modyfikują sygnał zawierający informację, w taki sposób, aby doszło do transmisji bez utraty informacji. W systemach 5G wykorzystuje się technikę kwadraturowej modulacji amplitudowo-fazowej QAM o różnych rzędach modulacji, która określa ile bitów informacji można przesłać jedną nośną. Program wykorzystuje pary rzędu modulacji i odpowiedniej sprawności kodowania, które znajdują się w tabelach MCS określonych w specyfikacji 3GPP TS 38.214 [5].

Wyróżniającym dla sieci 5G jest technologia agregacji nośnych. Pozwala ona na transmisję za pomocą wielu nośnych, czyli wielu komórek. Wykorzystanie agregacji nośnych prowadzi do sumowania przepustowości każdej z nośnych zwanymi komponentami nośnych CC. Program pozwala wpisać dowolną liczbę CC, ale według specyfikacji 3GPP TR 38.802 [2] maksymalna liczba CC wynosi 16.

Program pozwala również określić czy transmisja odbywa się przez kanał w górę czy w dół oraz przeskalować wynik przez dowolną liczbę. Para kierunku transmisji i zakresu częstotliwości definiuje współczynnik niewydajności systemu OH.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 3GPP, *3gpp tr 21.915; 5g; release description; release 15*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121915/15.00.00_60/tr_121915v150000p.pdf.
- [2] 3GPP, *3gpp tr 38.802; study on new radio access technology - physical layer aspects*, <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3066>.
- [3] 3GPP, *3gpp ts 38.104; 5g; nr; base station (bs) radio transmission and reception*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/17.07.00_60/ts_138104v170700p.pdf.
- [4] 3GPP, *3gpp ts 38.213; 5g; nr; physical layer procedures for control*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138213/16.02.00_60/ts_138213v160200p.pdf.
- [5] 3GPP, *3gpp ts 38.214; 5g; nr; physical layer procedures for data*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138214/17.03.00_60/ts_138214v170300p.pdf.
- [6] 3GPP, *3gpp ts 38.300; nr and ng-ran overall description; stage-2*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/17.02.00_60/ts_138300v170200p.pdf.
- [7] 3GPP, *3gpp ts 38.306; nr; user equipment (ue) radio access capabilities*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138306/17.02.00_60/ts_138306v170200p.pdf.
- [8] 3GPP, *3gpp ts 38.321; 5g; nr; medium access control (mac) protocol specification*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138321/15.03.00_60/ts_138321v150300p.pdf.
- [9] 3GPP, *3gpp ts 38.322; 5g; nr; radio link control (rlc) protocol specification*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138322/16.01.00_60/ts_138322v160100p.pdf.
- [10] 3GPP, *3gpp ts 38.323; 5g; nr; packet data convergence protocol (pdcp) specification*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138323/16.02.00_60/ts_138323v160200p.pdf.
- [11] 3GPP, *3gpp ts 38.323; service data adaptation protocol (sdap) specification*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/137300_137399/137324/16.02.00_60/ts_137324v160200p.pdf.
- [12] 3GPP, *3gpp ts 38.331; 5g; nr; radio resource control (rrc); protocol specification*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138331/16.01.00_60/ts_138331v160100p.pdf.
- [13] 3GPP, *3gpp ts 38.401; ng-ran; architecture description*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138400_138499/138401/16.03.00_60/ts_138401v160300p.pdf.

- [14] Dahlman, Erik; Parkvall, Stefan; Sköld, Johann (2014), *4g lte / lte-advanced for mobile broadband*.
- [15] doc dr inż. Sławomir Kula, Politechnika Warszawska, *Wprowadzenie telekomunikacja w czasach konwergencji*, https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_aggregation.
- [16] Holma, Harri; Toskala, Antti; Tapia, Pablo (2012), *Lte-advanced: 3gpp solution for imt-advanced*.
- [17] Mahdiraji, G. A. , Abas, A. F, *Advanced modulation formats and multiplexing techniques for optical telecommunication systems*, https://www.researchgate.net/publication/221907745_Advanced_Modulation_Formats_and_Multiplexing_Techniques_for_Optical_Telecommunication_Systems.
- [18] Physics and Radio-Electronics.com, *Amplitude modulation*, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/amplitude-modulation/>.
- [19] Physics and Radio-Electronics.com, *Phase modulation*, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/phase-modulation/>.
- [20] Sharetechnote, *4g/lte - basic procedures - mimo*, https://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure_LTE_MIMO.html.
- [21] Sharetechnote, *4g/lte - beam forming*, https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_BeamForming.html.
- [22] Sharetechnote, *5g/nr - mu mimo*, https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_MassiveMIMO_MU_MIMO.html.
- [23] Sharetechnote, *Communication technology - ofdm overview*, https://www.sharetechnote.com/html/Communication_OFDM.html.
- [24] Wikipedia, *Carrier aggregation*, https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_aggregation.
- [25] Wikipedia, *Constellation diagram*, https://en.wikipedia.org/wiki/Constellation_diagram.