

# Pomiary przepustowości w sieciach 4G/5G

Warszawa, 20 grudnia 2022 r.

## Spis treści

1. Objaśnienie Celu .....	3
2. Definicje .....	3
2.a Siatka referencyjna.....	3
2.b Gospodarstwo domowe.....	3
2.c Punkt pomiarowy .....	3
2.d Stanowisko pomiarowe.....	3
2.e Pomiar pasywny .....	4
2.f Pomiar aktywny .....	4
2.g Przepustowość .....	4
2.h RSRP .....	4
2.i CQI.....	4
3. Parametry Łącza i Warunki Pomiaru .....	5
3.a Wyznaczenie przepustowości na podstawie pomiaru RSRP .....	5
3.b Wyznaczenie przepustowości na podstawie pomiaru CQI .....	8
3.c Warunki pomiaru.....	9
4. Metodyka Pomiarów Punktowych .....	10
4.a Pomiary .....	10
4.a.1 Pomiary pasywne .....	10
4.a.2 Pomiary aktywne .....	10
4.b Zestaw pomiarowy.....	10
5. Interpretacja Wyników Pomiarowych Punktowych.....	11
6. Sposób Prezentacji Wyników Punktowych .....	12
7. Metodyka Pomiarów Przepustowości.....	14
7.a Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia obszarów .....	14
7.b Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia szlaków komunikacyjnych .....	15
8. Interpretacja wyników pomiarowych .....	16
8.a Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia obszarów .....	16
8.b Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia szlaków komunikacyjnych .....	16
9. Sposób prezentacji wyników pomiarów przepustowości .....	16

## 1. Objaśnienie Celu

Celem dokumentu jest określenie parametrów (kryteriów), warunków i metodologii estymacji, które będą stosowane w procesie szacowania przepustowości sieci dostępowej 4G/5G (ang. *fourth/fifth generation*).

## 2. Definicje

W tej sekcji zdefiniowano podstawowe pojęcia, z których korzysta się w pozostałych rozdziałach tego dokumentu.

### 2.a Siatka referencyjna

Podstawę do przeprowadzenia przez UKE pomiarów pokryciowych stanowi siatka referencyjna. Siatkę referencyjną stanowi zbiór pól dzielących powierzchnię Rzeczypospolitej Polskiej na pola o wymiarze 100 metrów na 100 metrów. Powierzchnia każdego kwadratu siatki referencyjnej wynosi zatem 10 tys m<sup>2</sup> (1 ha). Siatka referencyjna zostanie udostępniona przez UKE w postaci wektorowej lub rastrowej w narzędziu teleinformatycznym. Udostępniona przez UKE siatka referencyjna będzie wykorzystywana jako szablon służący do uzupełnienia danych w ramach inwentaryzacji infrastruktury i usług telekomunikacyjnych.

### 2.b Gospodarstwo domowe

Jako gospodarstwo domowe rozumie się samodzielny lokal mieszkalny, definiowany jako wydzielona trwałymi ścianami w obrębie budynku izba lub zespół izb, przeznaczonych na stały pobyt ludzi, które służą zaspokajaniu ich potrzeb mieszkaniowych.

### 2.c Punkt pomiarowy

Pod pojęciem punktu pomiarowego rozumie się lokalizację o określonych współrzędnych geograficznych, w którym wykonuje się pomiar parametrów zdefiniowanych w sekcji 3. Punkt pomiarowy może reprezentować obszar niezabudowany lub określone gospodarstwo domowe. Lokalizacja punktu pomiarowego reprezentującego gospodarstwo domowe powinna znajdować się w sąsiedztwie tego gospodarstwa domowego jednakże na zewnątrz obiektu budowlanego.

Lokalizacja punktu pomiarowego, w którym umieszczona będzie antena stanowiska pomiarowego, powinna znajdować się w odległości minimum 3 m od ścian sąsiadujących obiektów budowlanych. Antenę należy skierować w stronę analizowanej stacji bazowej.

O ile to możliwe, należy zapewnić warunki bezpośredniej widoczności pomiędzy anteną stacji bazowej a anteną stanowiska pomiarowego.

### 2.d Stanowisko pomiarowe

Zestaw urządzeń składający się z anteny oraz urządzenia odbiorczego (w przypadku pomiarów pasywnych) lub nadawczo-odbiorczego (w przypadku pomiarów aktywnych), który umożliwia pomiar parametrów zdefiniowanych w sekcji 3.

Do pomiarów pasywnych wykorzystuje się tzw. skanery pasywne, natomiast do pomiarów aktywnych wykorzystuje się terminal mobilny z dedykowanym oprogramowaniem. Opis zestawu pomiarowego przedstawiono w sekcji 4.

## 2.e Pomiar pasywny

Pomiar pasywny polega na wykonaniu pomiaru mocy sygnału referencyjnego RSRP (ang. *Reference Signal Receive Power*). Pomiar pasywny odbywa się bez wymiany danych ze stacją bazową. W trakcie pomiaru należy dodatkowo odczytać szerokość kanału *BW* (ang. *BandWidth*).

## 2.f Pomiar aktywny

Pomiar aktywny polega na wykonaniu odczytu wskaźnika jakości kanału CQI (ang. *Channel Quality Indicator*) w odbieranym sygnale przez układ nadawczo-odbiorczy stanowiska pomiarowego (terminal mobilny z dedykowanym oprogramowaniem). W trakcie pomiaru aktywnego niezbędna jest wymiana danych pomiędzy stanowiskiem pomiarowym i stacją bazową. W trakcie pomiaru aktywnego dokonywany jest odczyt wskaźników potrzebnych do wyliczenia przepustowości takich jak: szerokość kanału, liczba strumieni MIMO (ang. *Multiple-Input-Multiple-Output*), struktura ramki TDD (ang. *Time Division Duplex*). Dodatkowo możliwe jest także wykonanie pomiaru mocy RSRP.

## 2.g Przepustowość

Przepustowość (ang. *bit rate*) jest to potencjalnie możliwa ilość informacji transmitowanej w kanale komunikacyjnym w jednostce czasu wyrażana w bitach na sekundę (b/s). Przepustowość jest określana w łączy w dół (ang. *downlink*), tj. dla transmisji sygnału od stacji bazowej do odbiornika pomiarowego, którym w szczególności może być terminalem mobilnym użytkownika (ang. *downlink transmission speed*).

Przepustowość całkowita jest wyznaczana poprzez sumowanie przepustowości wyznaczonych dla każdego podpasma dostępnego w punkcie pomiarowym. Przepustowość dla wybranego podpasma stacji bazowej jest określana w sposób pośredni mierząc poziom mocy RSRP (tzw. pomiar pasywny) lub odczytując wskaźnik CQI (tzw. pomiar aktywny).

## 2.h RSRP

RSRP jest logarytmiczną miarą poziomu odbieranej mocy sygnału referencyjnego w punkcie pomiarowym. RSRP jest wyznaczana w dBm, tj. w mierze decybelowej w odniesieniu do 1 mW. Pomiar RSRP realizowany jest w ramach pomiaru pasywnego lub aktywnego.

## 2.i CQI

CQI jest wskaźnikiem liczbowym jakości kanału radiowego dla pojedynczego strumienia danych, który odpowiada schematowi modulacji i kodowania MCS (ang. *Modulation and Coding Scheme*) w danej generacji systemu telefonii komórkowej. Ponadto, każdemu CQI można przyporządkować tzw. efektywność widmową (ang. *Spectral Efficiency*) wyrażaną w b/s/Hz. CQI jest reprezentowany przez 0 (poza zakresem MCS i efektywności widmowej) i liczby naturalne w zakresie od 1 do 15. Większa wartość CQI oznacza lepszą jakość kanału. CQI zależy od zakresu częstotliwości, szerokości kanału, liczby elementów antenowych po stronie stacji bazowej i urządzenia odbiorczego oraz warunków

środowiskowych – w szczególności tłumienia łącza radiowego pomiędzy stacją bazową a urządzeniem użytkownika.

Urządzenie końcowe estymuje jakość kanału dla pojedynczego strumienia danych i przypisuje wartość CQI do aktualnych warunków kanału.

Wartość CQI jest przekazana do stacji bazowej. Na podstawie tej wartości, stacja bazowa decyduje o schemacie modulacji i kodowania dla transmisji, tj. wartość MCS.

MCS wraz z innymi parametrami przeznaczonymi dla systemu antenowego stacji bazowej (zależnych od liczby elementów anteny wykonanej w technologii MIMO), po uwzględnieniu narzutu sygnalizacji oraz dyspersji czasowej kanału (poprzez ustalenie parametru prefiksa cyklicznego (ang. *cyclic-prefix*)), określają efektywność widmową dla tej transmisji, w jednostkach bit/s/Hz.

### 3. Parametry łącza i warunki pomiaru

Parametrem, który jest przedmiotem weryfikacji jest przepustowość od stacji bazowej do urządzenia użytkownika (ang. *downlink transmission speed*) wyrażona w Mb/s jaką można osiągnąć w określonych w tym dokumencie warunkach pomiarowych w danym punkcie geograficznym.

Wartości przepustowości będą określone na podstawie pomiaru RSRP lub RSRP i CQI według procedury opisanej w sekcjach 3a i 3b, osobno dla każdego z dostępnych pasm częstotliwościowych. Jako wartość ostateczną przepustowości w danym punkcie o określonych współrzędnych geograficznych uznaje się sumę przepustowości wyznaczonych osobno dla każdego z dostępnych (w tym punkcie) pasm będących w posiadaniu operatora. W sekcji 3c określono warunki pomiarów.

Obie zaproponowane metody do szacowania przepustowości, w oparciu o RSRP oraz CQI, są metodami empiryczno-obliczeniowymi.

#### 3.a Wyznaczenie przepustowości na podstawie pomiaru RSRP

Wartości poziomów mocy RSRP określono dla powszechnie wykorzystywanej technologii LTE oraz 5G NR z podziałem na wykorzystywaną technologię dostępu FDD (ang. *Frequency-Division Duplexing*) lub TDD (ang. *Time Division Duplexing*).

Decydująca jest przepustowość możliwa do osiągnięcia w zdefiniowanym miejscu, przy danej szerokości pasma w wykorzystywanym zakresie częstotliwości.

W Tabeli 1 podano wartości poziomów RSRP i odpowiadające im przepustowości dla bloków częstotliwości o szerokości 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz i 20 MHz dla LTE FDD, LTE TDD i 5G NR FDD. Tabela nie zawiera przepustowości dla bloków częstotliwości o szerokości większej niż 20 MHz ponieważ technologia LTE FDD nie przewiduje wykorzystania takich bloków.

W przypadku technologii 5G NR FDD gdzie szerokości bloków mogą być większe od 20 MHz, należy przemnożyć przepustowość odczytaną dla szerokości 20 MHz przez współczynnik wielokrotności 20 MHz.

W przypadku pomiaru w danym miejscu technologii TDD całkowita przepustowość danego kanału liczona jest jako iloczyn przepustowości odczytanej z tabeli dla odpowiedniej szerokości kanału i współczynnika szczelin czasowych, który jest ilorazem liczby szczelin transmitowanych od stacji bazowej do terminala i całkowitej liczby szczelin.

W Tabeli 2 podano wartości poziomów RSRP i odpowiadające im przepustowości dla bloków częstotliwości o szerokości 20 MHz, 40 MHz i 80 MHz dla przypadku wykorzystania technologii 5G NR TDD. Dla innych, nie wymienionych w Tabeli 2, szerokości bloków należy przepustowość odczytaną z Tabeli 2 dla szerokości 20 MHz przemnożyć przez współczynnik wielokrotności 20 MHz. W Tabeli przyjęto, że współczynnik szczelin czasowych jest równy 0,8.

Urządzenie dokonujące pomiaru wartości RSRP dodatkowo, na potrzeby obliczenia przepustowości, odczytuje zastosowaną technologię, szerokość kanału oraz format ramki w przypadku pomiaru technologii TDD.

Pomiarów przepustowości dokonuje się z uwzględnieniem wszystkich dostępnych dla danego podmiotu częstotliwości i technologii.

Wówczas stosuje się następujące rozwiązanie: wykorzystując poniższą tabelę jako podstawę, sumuje się przepustowości wynikające z rzeczywistych szerokości kanałów wykorzystywanych w różnych zakresach częstotliwości (uwzględniając odpowiednie wartości poziomu RSRP dla każdego przypadku).

Tabela 1. Poziomy RSRP i odpowiadające im przepustowości dla bloków o różnych szerokościach dla technologii LTE FDD, LTE TDD i 5G NR FDD

Szerokość pasma: 5 MHz		Szerokość pasma: 10 MHz		Szerokość pasma: 15 MHz		Szerokość pasma: 20 MHz	
RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]
-128	4	-128	7	-128	11	-128	15
-127	5	-127	10	-127	15	-127	17
-126	6	-126	12	-126	19	-126	20
-125	8	-125	15	-125	23	-125	26
-124	9	-124	18	-124	27	-124	32
-123	10	-123	20	-123	31	-123	37
-122	11	-122	23	-122	35	-122	43
-121	13	-121	26	-121	39	-121	49
-120	14	-120	28	-120	43	-120	54
-119	15	-119	31	-119	48	-119	60
-118	16	-118	34	-118	52	-118	66
-117	18	-117	36	-117	56	-117	71
-116	19	-116	39	-116	60	-116	77
-115	20	-115	42	-115	64	-115	82
-114	21	-114	44	-114	68	-114	88
-113	23	-113	47	-113	72	-113	94
-112	24	-112	50	-112	76	-112	99
-111	25	-111	52	-111	80	-111	105
-110	26	-110	55	-110	84	-110	111
-109	28	-109	58	-109	88	-109	116
-108	29	-108	60	-108	92	-108	122
-107	30	-107	63	-107	96	-107	128
-106	31	-106	66	-106	100	-106	133
-105	32	-105	68	-105	104	-105	139
-104	34	-104	71	-104	108	-104	144
-103	35	-103	74	-103	113	-103	150

-102	36	-102	76	-102	117	-102	156
-101	38	-101	79	-101	121	-101	161
-100	39	-100	82	-100	125	-100	167
-99	40	-99	84	-99	129	-99	172
-98	41	-98	87	-98	133	-98	178
-97	42	-97	90	-97	137	-97	184
-96	44	-96	92	-96	141	-96	189
-95	45	-95	95	-95	145	-95	195
-94	45	-94	95	-94	145	-94	195
-93	45	-93	95	-93	145	-93	195
-92	45	-92	95	-92	145	-92	195
-91	45	-91	95	-91	145	-91	195
-90	45	-90	95	-90	145	-90	195
-89	45	-89	95	-89	145	-89	195
-88	45	-88	95	-88	145	-88	195
-87	45	-87	95	-87	145	-87	195
-86	45	-86	95	-86	145	-86	195
-85	45	-85	95	-85	145	-85	195
-84	45	-84	95	-84	145	-84	195
-83	45	-83	95	-83	145	-83	195
-82	45	-82	95	-82	145	-82	195
-81	45	-81	95	-81	145	-81	195
-80	45	-80	95	-80	145	-80	195

Tabela 2. Poziomy RSRP i odpowiadające im przepustowości dla bloków o różnych szerokościach pasma dla technologii 5G NR TDD

Szerokość pasma: 20 MHz		Szerokość pasma: 40 MHz		Szerokość pasma: 80 MHz	
RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]
-128	9	-128	18	-128	37
-127	11	-127	23	-127	45
-126	14	-126	28	-126	55
-125	17	-125	33	-125	67
-124	20	-124	40	-124	80
-123	24	-123	48	-123	96
-122	28	-122	57	-122	114
-121	33	-121	67	-121	133
-120	39	-120	78	-120	155
-119	45	-119	90	-119	179
-118	51	-118	103	-118	205
-117	58	-117	117	-117	233
-116	66	-116	131	-116	262
-115	73	-115	146	-115	293
-114	81	-114	162	-114	325
-113	89	-113	179	-113	357
-112	98	-112	196	-112	391

-111	106	-111	213	-111	425
-110	115	-110	230	-110	460
-109	124	-109	248	-109	496
-108	133	-108	266	-108	532
-107	142	-107	284	-107	568
-106	151	-106	302	-106	604
-105	160	-105	320	-105	641
-104	169	-104	339	-104	677
-103	179	-103	357	-103	714
-102	188	-102	376	-102	751
-101	197	-101	394	-101	788
-100	206	-100	413	-100	825
-99	216	-99	431	-99	862
-98	225	-98	450	-98	900
-97	234	-97	468	-97	937
-96	244	-96	487	-96	974
-95	253	-95	506	-95	1011
-94	262	-94	524	-94	1049
-93	271	-93	543	-93	1086
-92	282	-92	564	-92	1128
-91	282	-91	564	-91	1128
-90	282	-90	564	-90	1128
-89	282	-89	564	-89	1128
-88	282	-88	564	-88	1128
-87	282	-87	564	-87	1128
-86	282	-86	564	-86	1128
-85	282	-85	564	-85	1128
-84	282	-84	564	-84	1128
-83	282	-83	564	-83	1128
-82	282	-82	564	-82	1128
-81	282	-81	564	-81	1128
-80	282	-80	564	-80	1128

### 3.b Wyznaczenie przepustowości na podstawie pomiaru CQI

Wskaźnik jakości kanału CQI, efektywność widmowa i modulacja są ze sobą powiązane zgodnie z Tabelą 3.

Urządzenie dokonujące pomiaru wartości CQI, na potrzeby obliczenia przepustowości, odczytuje szerokość kanału, liczbę nadawanych strumieni danych MIMO oraz strukturę ramki w przypadku pomiaru technologii TDD.

Wartość przepustowości dla danej wartości wskaźnika CQI wyznacza się jako iloczyn efektywności widmowej podanej w Tabeli 3 dla zmierzonej wartości wskaźnika jakości CQI oraz pasma dostępnego w danym punkcie pomiarowym i liczby strumieni danych MIMO. W przypadku technologii TDD należy również przemnożyć wynik przez współczynnik szczelin czasowych z nadawaniem od stacji bazowej.



Jako przepustowość całkowitą dla danego punktu należy uznać sumę przepustowości oszacowanych na podstawie wskaźników CQI dla wszystkich zmierzonych pasm oraz technologii.

Wskaźnik CQI jest niezależny od technologii. Wybór odpowiednich wartości z norm ETSI zależy od standardu urządzenia jakim dokonywane są pomiary. Poniższa tabela odnosi się do urządzeń zgodnych z wersją co najmniej „Release 15” z obsługą modulacji QAM256 i MIMO w trybie 4T4R.

Współczynnik liczby strumieni danych po stronie urządzenia odbiorczego dla MIMO:

- a) 2T2R wynosi 2,
- b) 4T4R wynosi 4

Współczynnik szczelin czasowych z nadawaniem od stacji bazowej liczymy jako iloraz liczby szczelin w kierunku od stacji bazowej i całkowitej liczby szczelin.

Tabela 3. Zależność efektywności widmowej od Wskaźnika Jakości Kanału CQI

Wskaźnik jakości kanału CQI	Modulacja	Współczynnik kodowania × 1024	Efektywność widmowa
0	poza zakresem		
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	193	0,3770
3	QPSK	449	0,8770
4	16QAM	378	1,4766
5	16QAM	490	1,9141
6	16QAM	616	2,4063
7	64QAM	466	2,7305
8	64QAM	567	3,3223
9	64QAM	666	3,9023
10	64QAM	772	4,5234
11	64QAM	873	5,1152
12	256QAM	711	5,5547
13	256QAM	797	6,2266
14	256QAM	885	6,9141
15	256QAM	948	7,4063

### 3.c Warunki pomiaru

Wartości RSRP, CQI i odpowiadające im przepustowości opierają się na badaniach empirycznych i obliczeniach analitycznych. Przyjmuje się następujące założenia odnośnie warunków pomiaru w punkcie:

- odbiór stacjonarny,
- wysokość anteny urządzenia pomiarowego – od 1,5 do 3 m nad gruntem,
- odległość anteny od ściany budynku – minimum 3 m,
- wartość MIMO zależna od wersji urządzenia pomiarowego,
- pomiar wykonany będzie za pomocą urządzenia wzorcowanego,

- pomiary realizowane będą w dowolnej porze doby dla pomiaru pasywnego oraz w porze najmniejszego ruchu (w porze uzgodnionej z operatorem) dla pomiaru aktywnego,
- w uzasadnionych przypadkach pomiar może być realizowany wspólnie z operatorem bez obciążenia sieci oraz ze względu na umiejscowienie punktu pomiarowego w ramach rastra.

## 4. Metodyka Pomiarów Punktowych

W rozdziale 4 opisana jest metodyka przeprowadzania pomiarów punktowych umożliwiających określenie przepustowości w danym punkcie pomiarowym o określonych współrzędnych geograficznych.

### 4.a Pomiary

Pomiary będą przeprowadzone metodą pasywną i/lub aktywną.

#### 4.a.1 Pomiary pasywne

Pomiary pasywne wartości przepustowości zostaną przeprowadzone w wybranych punktach. Przepustowość zostanie określona na podstawie pomiarów RSRP przy zastosowaniu metody pasywnej (bez zastosowania karty SIM (ang. *Subscriber Identity Module*)). Sposób wyznaczania przepustowości na podstawie RSRP jest opisany w sekcji 3a.

#### 4.a.2 Pomiary aktywne

Pomiary aktywne (*przy wykorzystaniu karty SIM*) wartości przepustowości zostaną przeprowadzone przez UKE we współpracy z operatorem, na reprezentatywnej próbie punktów pomiarowych. Przepustowość zostanie wyznaczona na podstawie pomiaru CQI. Dla każdego punktu pomiarowego należy wykonać pomiary przy wykorzystaniu transmisji pobierania danych. Sugerowaną metodą jest metoda z wykorzystaniem narzędzia iPERF (z użyciem protokołu pakietów użytkownika UDP (ang. *User Datagram Protocol*)). Pomiar taki powinien trwać minimum 3 minuty. Podczas pomiaru odczytana zostanie maksymalna użyta konfiguracja MIMO, wyniki CQI zostaną uśrednione w czasie i zaokrąglone do liczby całkowitej. Dla technologii TDD odczytana zostanie struktura ramki czasowej.

Sposób wyznaczania przepustowości na podstawie CQI jest opisany w sekcji 3b.

### 4.b Zestaw pomiarowy

Zestaw pomiarowy będzie bazował na wzorcowanych urządzeniach, które zapewniają, oddzielnie dla każdego podpasma, możliwość pomiaru/odczyt wszystkich istotnych parametrów niezbędnych do realizacji metodyki pomiarów pasywnych i/lub aktywnych, w szczególności:

- RSRP dla pomiarów pasywnych,
- CQI dla pomiarów aktywnych,
- liczby strumieni MIMO,
- współczynnika szczelin czasowych dla technologii TDD,
- czasu dokonania pomiaru synchronizowanego w oparciu o zegar systemu GPS lub analogiczny,
- współrzędnych geograficznych położenia stanowiska pomiarowego.

Zestaw pomiarowy powinien posiadać możliwość rejestracji danych pomiarowych.

## 5. Interpretacja Wyników Pomiarowych Punktowych

Wyniki pomiarów opisanych w rozdziale 4 potwierdzają, że operator osiągnął przepustowość jeśli przepustowość zmierzona dla danego punktu pomiarowego jest równa lub większa od wymaganej przepustowości, przy czym jeśli pomiar pasywny wskazuje, że przepustowość jest niewystarczająca, a pomiar aktywny pokazuje, że przepustowość spełnia wymagania UKE to jako wynik ostateczny przyjmuje się wynik pomiaru aktywnego. Dwa przykłady podane poniżej ilustrują proces określania przepustowości na podstawie pomiarów opisanych w rozdziale 4.

W przypadku pomiaru parametru RSRP lub odczytu CQI dla wybranego podpasma, w lokalizacji, w której odbierane są sygnały od większej liczby sąsiadujących stacji bazowych, do szacowania przepustowości wykorzystywana jest zawsze największa otrzymana wartość zmierzonego parametru.

### Przykład 1 (pomiar pasywny)

W wybranym miejscu zidentyfikowane są emisje w 4 różnych zakresach częstotliwości (jednego operatora mobilnego). Poziomy sygnałów i odpowiadające im przepustowości są następujące:

1. 800 MHz (szerokość pasma  $BW = 10$  MHz), technologia LTE FDD (Tabela 1), poziom RSRP =  $-100$  dBm, , przepustowość  $C_1 = 82$  Mb/s.
2. 1800 MHz (szerokość pasma  $BW = 15$  MHz), technologia LTE FDD (Tabela 1), poziom RSRP =  $-104$  dBm, przepustowość  $C_2 = 108$  Mb/s.
3. 2100 MHz (szerokość pasma  $BW = 15$  MHz), technologia LTE FDD (Tabela 1), poziom RSRP =  $-111$  dBm, , przepustowość  $C_3 = 80$  Mb/s.
4. 2600 MHz (szerokość pasma  $BW = 40$  MHz), technologia 5G NR TDD (Tabela 2), poziom RSRP =  $-119$  dBm, przepustowość  $C_4 = 90$  Mb/s.

Sumując przepustowości dla poszczególnych zakresów otrzymujemy całkowitą przepustowość  $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 360$  Mb/s dla analizowanego punktu pomiarowego, którą zapewniają stacje bazowe wokół tej lokalizacji należące do określonego operatora.

Podsumowując, całkowita przepustowość w punkcie może być zapewniona przez jeden lub więcej zakresów częstotliwości z jednej lub kilku stacji bazowych.

### Przykład 2 (pomiar aktywny)

W trakcie pomiarów aktywnych zestaw pomiarowy wykorzystał do testów następujące pasma:

1. 800 MHz, szerokość pasma  $BW = 10$  MHz, technologia LTE FDD, CQI = 9
2. 1800 MHz, szerokość pasma  $BW = 15$  MHz, technologia LTE FDD, CQI = 8
3. 2100 MHz, szerokość pasma  $BW = 15$  MHz, technologia LTE FDD, CQI = 7
4. 2600 MHz, szerokość pasma  $BW = 40$  MHz, technologia 5G NR TDD, CQI = 4,  $W_{sc} = 0,8$

Wszystkie pomiary wykonane zostały z wykorzystaniem technologii MIMO 2T2R.

Dla technologii FDD oraz zmierzonych wartości CQI odczytujemy wartości efektywności widmowej z Tabeli nr 3. Przepustowość dla poszczególnych pasm jest określona iloczynem efektywności widmowej, współczynnika MIMO oraz szerokości pasma.

1. 800 MHz (szerokość pasma  $BW = 10$  MHz), technologia LTE FDD  
wartość CQI = 9, Efektywność widmowa  $Eff = 3,9023$  b/s/Hz, MIMO = 2 ,  
przepustowość  $C_1 = 3,9023 * 2 * 10 * 10^6 = 78$  Mb/s.
2. 1800 MHz (szerokość pasma  $BW = 15$  MHz), technologia LTE FDD ,  
wartość CQI = 8, Efektywność widmowa  $Eff = 3,3223$  b/s/Hz, MIMO = 2 ,  
przepustowość  $C_2 = 3,3223 * 2 * 15 * 10^6 = 100$  Mb/s.
3. 2100 MHz (szerokość pasma  $BW = 15$  MHz), technologia LTE FDD,  
wartość CQI = 7, Efektywność widmowa  $Eff = 2,7305$  b/s/Hz, MIMO = 2 ,  
przepustowość  $C_3 = 2,7305 * 2 * 15 * 10^6 = 82$  Mb/s.

Dla technologii TDD oraz zmierzonych wartości CQI odczytujemy wartości efektywności widmowej z Tabeli nr 3. Przepustowość dla tego pasma jest określona iloczynem efektywności widmowej, współczynnika MIMO, szerokości pasma oraz współczynnika szczelin czasowych.

4. 2600 MHz (szerokość pasma  $BW = 40$  MHz), technologia 5G NR TDD,  
współczynnik szczelin czasowych  $W_{sc} = 0,8$ ; wartość CQI = 7,  
Efektywność widmowa  $Eff = 1,4766$  b/s/Hz, MIMO = 2 ,  
przepustowość  $C_4 = 1,4766 * 2 * 40 * 10^6 * 0,8 = 94,5$  Mb/s.

Sumując przepustowości dla poszczególnych zakresów oraz technologii otrzymujemy całkowitą przepustowość  $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 354,5$  Mb/s dla analizowanego punktu pomiarowego.

## 6. Sposób Prezentacji Wyników Punktowych

Przy prezentacji wyników pomiarów będą wyszczególnione następujące informacje:

- typ i numer seryjny urządzeń pomiarowych stanowiska (wraz z aktualizacją wzorcowania),
- numer ewidencyjny pomiaru,
- data i godzina pomiaru,
- lokalizacja punktu pomiarowego, tj. jego współrzędne geograficzne oraz odpowiadający mu numer rastra w siatce referencyjnej,
- numer identyfikacyjny i nazwa operatora analizowanej stacji bazowej,
- wyniki pomiaru pasywnego będą przedstawione w postaci Tabeli 4 i 5 natomiast pomiaru aktywnego - Tabeli 6 i 7, odpowiednio dla technologii FDD i TDD,
- opis urządzenia pomiarowego (rodzaj, klasa dokładności),
- metryka przyrządu pomiarowego/dane aplikacji.

Estymowana wartość przepustowości w danym punkcie pomiarowym wyznaczana jest jako suma wynikowej przepustowości dla technologii FDD i TDD.

Na potrzeby przetwarzania wyników oraz raportowania seryjnego przygotowane zostaną arkusze kalkulacyjny do gromadzenia wyników z pomiarów.

Tabela 4. Wyniki estymacji przepustowości na podstawie pomiaru pasywnego (RSRP) dla technologii

FDD

Badane podpasmo częstotliwości	Średnia wartość RSRP	Szerokość pasma	Przepustowość
[MHz]	[dBm]	[MHz]	[Mb/s]
700			
800			
900			
1 800			
2 100			
2 600			
suma			

Tabela 5. Wyniki estymacji przepustowości na podstawie pomiaru pasywnego (RSRP) dla technologii

TDD

Badane podpasmo częstotliwości	Średnia wartość RSRP	Technologia LTE/5G NR*	Szerokość pasma	Współczynnik szczelin czasowych	Przepustowość
[MHz]	[dBm]	[–]	[MHz]	[–]	[Mb/s]
700					
2 600					
3 600					
26 000					
suma					

Tabela 6. Wyniki estymacji przepustowości na podstawie pomiaru aktywnego (CQI) dla technologii

FDD

Badane podpasmo częstotliwości	Średnia wartość CQI	Efektywność widmowa dla średniego CQI*	Szerokość pasma	Liczba strumieni MIMO	Przepustowość
[MHz]	[–]	[b/s/Hz]	[MHz]	[–]	[Mb/s]
700					
800					
900					
1 800					
2 100					
2 600					
suma					

\* Efektywność widmowa wyznaczana jest na podstawie Tabeli 3 dla wyznaczonej średniej wartości CQI.

Tabela 7. Wyniki estymacji przepustowości na podstawie pomiaru aktywnego (CQI) dla technologii TDD

Badane podpasmo częstotliwości	Średnia wartość CQI	Efektywność widmowa dla średniego CQI*	Szerokość pasma	Liczba strumieni MIMO	Współczynnik szczelin czasowych	Przepustowość
[MHz]	[-]	[b/s/Hz]	[MHz]	[-]	[-]	[Mb/s]
700						
2 600						
3 600						
26 000						
suma						

\* Efektywność widmowa wyznaczana jest na podstawie Tabeli 3 dla wyznaczonej średniej wartości CQI.

## 7. Metodyka pomiarów przepustowości

W rozdziale 4 opisana jest metodyka przeprowadzania pomiarów punktowych przepustowości pozwalających na oszacowanie stopnia pokrycia określonego obszaru administracyjnego a także na oszacowanie stopnia pokrycia gospodarstw domowych na zdefiniowanym obszarze. Metoda ta pozwala również na analizę pokrycia obszarów infrastrukturalnych, np. tras komunikacyjnych (drogi, linie kolejowe). W ocenie pokrycia obszaru z siatki referencyjnej zostaną wykluczone obszary, do których nie ma dostępu (jednostki wojskowe, itp.) lub mają ograniczenia formalne (regiony przygraniczne, parki narodowe, itp.).

### 7.a Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia obszarów

Rozważane będą dwa rodzaje pomiarów pokrycia obszarowego: populacyjne i powierzchniowe.

W przypadku pomiarów pokrycia powierzchniowego zakłada się, że dany element (pole o wymiarze 100 m na 100 m) należy do danej jednostki administracyjnej jeśli jego środek znajduje się w obrębie granic tej jednostki. Stosując to kryterium otrzymuje się zbiór elementów (pól) siatki referencyjnej dla danego obszaru administracyjnego. Następnie z tego zbioru wybiera się losowo podzbiór o znacznie zmniejszonej liczbie elementów w porównaniu ze zbiorem oryginalnym, który stanowi reprezentatywną próbkę statystyczną. Dla tej reprezentatywnej próbki statystycznej będą przeprowadzane pomiary RSRP i CQI.

Minimalną licznosc próbki reprezentatywnej  $n$  wyznacza się z nierówności:

$$n \leq \left( \frac{u_{1-\frac{\alpha}{2}}}{I_n} \right)^2 \quad (1)$$

Przy czym,  $1-\alpha$  - poziom ufności ( $\alpha$  - poziom istotności),  $u_{1-\alpha/2}$  - kwantyl rzędu  $1-\alpha/2$  rozkładu  $N(0,1)$ ,  $I_n = 2 \Delta$ , długość przedziału ufności, zaś  $\Delta$  oznacza błąd bezwzględny. W celu wyznaczenia elementów próbki statystycznej wszystkie kwadraty w obrębie obszaru administracyjnego numerujemy i dla listy ponumerowanych kwadratów zakładamy jednowymiarowy rozkład jednostajny. Przy tych założeniach losujemy bez zwracania iteracyjnie elementy próbki aż uzyskamy wymaganą licznosc próbki, która składa się z odrębnych kwadratów (tzn. w wylosowanym ciągu kwadratów nie ma powtórzeń).

Aby spełnić wymagania UKE test (dla RSRP/CQI) musi być spełniony w co najmniej podanym przez UKE procencie punktów pomiarowych (lub większym). W celu wyznaczenia procentu punktów pomiarowych przyporządkowujemy wszystkim elementom siatki referencyjnej z próbki statystycznej, dla których spełniony jest warunek przepustowości wartość 1. Dla pozostałych elementów przyporządkowujemy wartość 0. Następnie sumujemy wszystkie wartości, dzielimy przez liczbę elementów próbki statystycznej i mnożymy przez 100%. Tak uzyskany wynik daje procent pokrycia i jest zarazem wynikiem pomiaru pokryciowego powierzchniowego.

W przypadku pomiarów pokrycia populacyjnego tworzy się najpierw zbiór gospodarstw domowych znajdujących się w granicach obszaru administracyjnego. Liczność próbki statystycznej podobnie jak w przypadku analizy pokrycia powierzchniowego wyznaczamy z nierówności (1). W celu wyznaczenia elementów próbki wszystkie gospodarstwa domowe w obrębie obszaru administracyjnego numerujemy i dla listy ponumerowanych gospodarstw zakładamy jednowymiarowy rozkład jednostajny. Przy tych założeniach losujemy bez zwracania iteracyjnie elementy próbki aż uzyskamy wymaganą licznosc próbki, która składa się z odrębnych gospodarstw domowych (tzn. w wylosowanym ciągu gospodarstw domowych nie ma powtórzeń). W celu wyznaczenia procentu punktów pomiarowych przyporządkowujemy wszystkim gospodarstwom domowym, dla których spełniony jest warunek przepustowości wartość 1. Dla pozostałych gospodarstw domowych przyporządkowujemy wartość 0. Następnie sumujemy wszystkie wartości, dzielimy przez liczbę elementów próbki statystycznej i mnożymy przez 100%. Tak uzyskany wynik daje procent pokrycia i jest zarazem wynikiem pomiaru pokryciowego populacyjnego.

Zbiór gospodarstw domowych, które znajdują się na terenie danego obszaru pomiarowego wyznacza się korzystając z bazy danych administracji państwowej. Uznaje się, że ta baza danych jest zbiorem wszystkich gospodarstw domowych w danym obszarze pomiarowym.

Zbiór wszystkich gospodarstw domowych wraz z adresem oraz zbiorem współrzędnych jest dostępny w UKE.

## 7.b Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia szlaków komunikacyjnych

Pomiary związane są z oceną przepustowości wzdłuż krajowych szlaków komunikacyjnych, w szczególności dróg (ekspresowych, krajowych, etc.) i linii kolejowych. Pomiary te będą bazowały na pomiarach dynamicznych, tzw. drive-testach, które będą wykonywane w trakcie przejazdu samochodem lub pociągiem wzdłuż analizowanego szlaku komunikacyjnego. Podejście to wynika ze specyfiki szlaków komunikacyjnych oraz znacznych ograniczeń w wykorzystaniu metodyki pomiarów punktowych, które są podstawą pomiarów pokryciowych, np. ograniczenia w zatrzymaniu pojazdu w dowolnym miejscu na czas realizacji pomiaru.

W trakcie drive-testów wykorzystane zostaną wzorcowane skanery, tj. dedykowany sprzęt i/lub oprogramowanie, które planuje się wykorzystać w trakcie pomiarów punktowych. W trakcie realizacji pomiarów anteny skanera muszą znajdować się na zewnątrz pojazdu, w miarę możliwości na dachu pojazdu (samochodu lub pociągu). Szacowanie przepustowości może być realizowane na podstawie metody pasywnej (pomiar RSRP) lub aktywnej (odczyt CQI) zgodnie z metodyką opisaną dla pomiarów punktowych.

Podstawowym pomiarem pokrycia tras komunikacyjnych powinien być pomiar pasywny ze stałym monitorowaniem CQI w trybie aktywnym.

Jako próba weryfikacyjna pomiarów tras komunikacyjnych będzie dwukrotny przejazd odcinkiem drogi lub linii kolejowej w dwóch przeciwnych kierunkach wykonany jeden po drugim.

## 8. Interpretacja wyników pomiarowych

W tym rozdziale omówiono sposób interpretacji wyników pomiarów przepustowości.

### 8.a Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia obszarów

Wyniki pomiarów opisanych w podrozdziale 7a potwierdzają, że operator osiągnął przepustowość określoną w zobowiązaniu jeśli w wystarczającej liczbie punktów operator osiągnął wymaganą przepustowość, przy czym jeśli pomiar pasywny wskazuje, że przepustowość jest niewystarczająca, a pomiar aktywny pokazuje, że przepustowość spełnia wymagania UKE to jako wynik ostateczny przyjmuje się wynik pomiaru aktywnego. Jeśli w zobowiązaniu procentowe pokrycie wynosi 95% to w co najmniej 95 % losowo wybranych punktach pomiarowych operator powinien osiągnąć wymaganą przepustowość.

### 8.b Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia szlaków komunikacyjnych

Pomiary, które mają być podstawą wypełnienia zobowiązań, będą wykonywane wzdłuż całych szlaków komunikacyjnych, np. wzdłuż wszystkich autostrad i dróg ekspresowych. Dla wybranego szlaku komunikacyjnego (np. autostrady A1), pomiar zostanie zrealizowany wzdłuż całego jej przebiegu. Dla każdego szlaku komunikacyjnego muszą zostać spełnione zobowiązania, tj. określona wartość przepustowości na wymaganym procencie punktów (próbek) pomiarowych na szlaku. Liczba próbek pomiarowych na określonej trasie (np. od punktu A do B) związana jest z długością trasy, prędkością przejazdu i czasem realizacji pojedynczego pomiaru. W pomiarach dynamicznych (tj. drive-testach) próbkę pomiarową należy zatem odnieść do odcinka pomiarowego na trasie przejazdu a nie punktu na płaszczyźnie (tj. punktu siatki). Przy braku spełnienia zobowiązań na wybranym szlaku komunikacyjnym, operator zostanie dodatkowo poinformowany o odcinku trasy pomiarowej, na którym nie zostały spełnione zobowiązania poprzez wskazanie odcinka pomiarowego od punktu P1 do P2, np. na 27-28 km trasy A1 licząc od granicy z Czechami.

## 9. Sposób prezentacji wyników pomiarów przepustowości

Przy prezentacji wyników pomiarów będą wykorzystywane Tabele 4-7 z rozdziału 6 w odniesieniu do pojedynczego pomiaru. Dodatkowo przy pomiarze pokrycia szlaków komunikacyjnych każdy pomiar będzie odniesiony do odcinka pomiarowego określonego przez współrzędne geograficzne oraz odległość w km od punktu początku pomiaru.

Dodatkowo w raporcie końcowym zostaną zawarte tabele podsumowujące osobno dla pomiarów pokrycia obszarowego (w odniesieniu do analizowanego obszaru administracyjnego kraju) i pokrycia szlaków komunikacyjnych (w odniesieniu do analizowanego szlaku komunikacyjnego) zgodnie z wzorem przedstawionym w Tabeli 8.



Tabela 8. Podsumowanie wyników pomiarów pokrycia

Liczba punktów pomiarowych	Liczba punktów pomiarowych, w których spełnione zostały zobowiązania	Procent punktów pomiarowych, w których spełnione zostały zobowiązania	Błąd statystyczny	Spełnienie zobowiązań UKE
$N_P$	$N_{PS}$	$P_{PS} = 100\% \cdot N_{PS} / N_P$	$\Delta P_{PS}$	[TAK/NIE]