

Pomiary przepustowości w sieciach 4G/5G

# PROJEKT

Warszawa, 6 kwietnia 2023 r.

## Spis treści

1. Objąsnienie 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 łączy 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 .....	15
8.a Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia obszarów.....	15
8.b Pomiary przepustowości wykorzystywane do analizy pokrycia szlaków komunikacyjnych .....	15
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<sup>1</sup>.

## 2. Definicje

W tej sekcji zdefiniowano podstawowe pojęcia, wykorzystywane w pozostałych punktach tego dokumentu.

### 2.a Siatka referencyjna

Siatka referencyjna to podstawa do przeprowadzenia przez UKE pomiarów. To 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> tj. 1 hektar. Siatka będzie wykorzystywana jako szablon do uzupełnienia danych w ramach inwentaryzacji infrastruktury i usług telekomunikacyjnych – UKE udostępni ją w postaci wektorowej lub rastrowej w narzędziu teleinformatycznym.

### 2.b Gospodarstwo domowe

Gospodarstwo domowe to samodzielny lokal mieszkalny, definiowany jako wydzielone trwałymi ścianami w obrębie budynku pomieszczenie lub zespół pomieszczeń, przeznaczonych na stały pobyt ludzi, które służą zaspokajaniu ich potrzeb mieszkaniowych.

### 2.c Punkt pomiarowy

Punkt pomiarowy to lokalizacja o określonych współrzędnych geograficznych, w której wykonuje się pomiar parametrów zdefiniowanych w punkcie 3. Punkt może reprezentować obszar niezabudowany lub określone gospodarstwo domowe. Lokalizacja punktu pomiarowego reprezentującego gospodarstwo domowe, powinna znajdować się w sąsiedztwie tego gospodarstwa domowego, ale na zewnątrz obiektu budowlanego.

Lokalizacja punktu, 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

Na stanowisku pomiarowym niezbędny jest zestaw urządzeń, na który składa się antena oraz urządzenie odbiorcze (w przypadku pomiarów pasywnych) lub nadawczo-odbiorcze (w przypadku pomiarów aktywnych). Zestaw umożliwia pomiar parametrów zdefiniowanych w punkcie 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 punkcie 4.

---

<sup>1</sup> ang. *fourth/fifth generation*

## 2.e Pomiar pasywny

Pomiar pasywny polega na wykonaniu pomiaru mocy sygnału referencyjnego RSRP<sup>2</sup> i odbywa się bez wymiany danych ze stacją bazową. W trakcie pomiaru należy dodatkowo odczytać szerokość kanału BW<sup>3</sup>.

## 2.f Pomiar aktywny

Pomiar aktywny polega na wykonaniu odczytu wskaźnika jakości kanału CQI<sup>4</sup> w sygnale odbieranym przez układ nadawczo-odbiorczy stanowiska pomiarowego (terminal mobilny z dedykowanym oprogramowaniem). W trakcie tego pomiaru niezbędna jest wymiana danych pomiędzy stanowiskiem pomiarowym i stacją bazową. Wówczas dokonywany jest odczyt wskaźników potrzebnych do wyliczenia przepustowości, takich jak: szerokość kanału, liczba strumieni MIMO<sup>5</sup> oraz struktura ramki TDD<sup>6</sup>. Dodatkowo, możliwe jest także wykonanie pomiaru mocy RSRP.

## 2.g Przepustowość

Przepustowość<sup>7</sup> to potencjalnie możliwa ilość informacji transmitowanej w kanale komunikacyjnym w jednostce czasu (wyrażonej w bitach na sekundę). Jest określana w łączy w dół<sup>8</sup>, tj. dla transmisji sygnału od stacji bazowej do odbiornika pomiarowego, którym, w szczególności, może być terminal mobilny użytkownika<sup>9</sup>.

Przepustowość całkowita jest wyznaczana, poprzez sumowanie przepustowości wyznaczonych dla każdego podpasma, które jest dostępne w punkcie pomiarowym. Przepustowość dla wybranego podpasma stacji bazowej jest określana w sposób pośredni poprzez zmierzenie poziomu mocy RSRP (tzw. pomiar pasywny) lub odczytanie wskaźnika CQI (tzw. pomiar aktywny).

## 2.h RSRP

RSRP jest logarytmiczną miarą poziomu odbieranej mocy sygnału referencyjnego w punkcie pomiarowym i 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 to wskaźnik liczbowy jakości kanału radiowego dla pojedynczego strumienia danych, który odpowiada schematowi modulacji i kodowania MCS<sup>10</sup> w danej generacji systemu telefonii komórkowej. Ponadto, każdemu CQI można przyporządkować tzw. efektywność widmową<sup>11</sup> 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.

---

<sup>2</sup> ang. *Reference Signal Receive Power*

<sup>3</sup> ang. *BandWidth*

<sup>4</sup> ang. *Channel Quality Indicator*

<sup>5</sup> ang. *Multiple-Input-Multiple-Output*

<sup>6</sup> ang. *Time Division Duplex*

<sup>7</sup> ang. *bit rate*

<sup>8</sup> ang. *downlink*

<sup>9</sup> ang. *downlink transmission speed*

<sup>10</sup> ang. *Modulation and Coding Scheme*

<sup>11</sup> ang. *Spectral Efficiency*

CQI zależy od:

- zakresu częstotliwości,
- szerokości kanału,
- liczby elementów antenowych po stronie stacji bazowej i urządzenia odbiorczego,
- 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 i na tej podstawie stacja bazowa decyduje o schemacie modulacji i kodowania dla transmisji, tj. wartości 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 prefiksu cyklicznego<sup>12</sup>), określają efektywność widmową dla tej transmisji, w jednostkach bit/s/Hz.

### 3. Parametry łącza i warunki pomiaru

Parametrem poddanym weryfikacji jest przepustowość od stacji bazowej do urządzenia użytkownika<sup>13</sup> (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 albo RSRP i CQI według procedury opisanej w punkcie 3.a i 3.b, 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 punkcie 3.c 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<sup>14</sup> oraz 5G NR<sup>15</sup> z podziałem na wykorzystywaną technologię dostępu FDD<sup>16</sup> lub TDD.

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.

---

<sup>12</sup> ang. *cyclic-prefix*

<sup>13</sup> ang. *downlink transmission speed*

<sup>14</sup> ang. *Long Term Evolution*

<sup>15</sup> ang. *New Radio*

<sup>16</sup> ang. *Frequency-Division Duplexing*

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 technologii TDD, całkowita przepustowość danego kanału liczona jest jako iloczyn przepustowości odczytanej z tabeli, dla odpowiedniej szerokości kanału i współczynnika szczelin czasowych  $W_{sc}$ , 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, 80 MHz i 100 MHz przy wykorzystaniu technologii 5G NR TDD. Dla innych szerokości bloków, należy przemnożyć przepustowość dla 1 MHz (wyznaczoną na podstawie Tabeli 2 dla szerokości 20 MHz – wartość z Tabeli należy podzielić przez 20) przez rzeczywistą szerokość bloku określoną w MHz. W Tabeli przyjęto, że współczynnik szczelin czasowych  $W_{sc}$  jest równy 1,0.

Dodatkowo, na potrzeby obliczenia przepustowości, urządzenie dokonujące pomiaru wartości RSRP odczytuje zastosowaną technologię, szerokość kanału oraz format ramki, tj. współczynnik szczelin czasowych  $W_{sc}$  (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 oraz  $W_{sc} = 1,0$

Szerokość pasma: 20 MHz		Szerokość pasma: 40 MHz		Szerokość pasma: 80 MHz		Szerokość pasma: 100 MHz	
RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]	RSRP [dBm]	Przepustowość [Mb/s]
-128	14	-128	29	-128	58	-128	70
-127	18	-127	35	-127	70	-127	90
-126	21	-126	43	-126	86	-126	105
-125	26	-125	52	-125	104	-125	130
-124	31	-124	63	-124	125	-124	155
-123	37	-123	75	-123	150	-123	185
-122	44	-122	89	-122	177	-122	220
-121	52	-121	104	-121	209	-121	260
-120	61	-120	121	-120	243	-120	305
-119	70	-119	140	-119	280	-119	350
-118	80	-118	160	-118	321	-118	400
-117	91	-117	182	-117	364	-117	455
-116	102	-116	205	-116	410	-116	510
-115	114	-115	229	-115	458	-115	570

-114	127	-114	254	-114	507	-114	635
-113	140	-113	279	-113	559	-113	700
-112	153	-112	306	-112	611	-112	765
-111	166	-111	332	-111	665	-111	830
-110	180	-110	360	-110	719	-110	900
-109	194	-109	387	-109	775	-109	970
-108	208	-108	415	-108	830	-108	1040
-107	222	-107	443	-107	887	-107	1110
-106	236	-106	472	-106	944	-106	1180
-105	250	-105	500	-105	1 001	-105	1250
-104	265	-104	529	-104	1 058	-104	1325
-103	279	-103	558	-103	1 116	-103	1395
-102	293	-102	587	-102	1 173	-102	1465
-101	308	-101	616	-101	1 231	-101	1540
-100	322	-100	645	-100	1 289	-100	1610
-99	337	-99	674	-99	1 347	-99	1685
-98	351	-98	703	-98	1 406	-98	1755
-97	366	-97	732	-97	1 464	-97	1830
-96	380	-96	761	-96	1 522	-96	1900
-95	395	-95	790	-95	1 580	-95	1975
-94	410	-94	819	-94	1 638	-94	2050
-93	424	-93	848	-93	1 697	-93	2120
-92	434	-92	868	-92	1 735	-92	2170
-91	434	-91	868	-91	1 735	-91	2170
-90	434	-90	868	-90	1 735	-90	2170
-89	434	-89	868	-89	1 735	-89	2170
-88	434	-88	868	-88	1 735	-88	2170
-87	434	-87	868	-87	1 735	-87	2170
-86	434	-86	868	-86	1 735	-86	2170
-85	434	-85	868	-85	1 735	-85	2170
-84	434	-84	868	-84	1 735	-84	2170
-83	434	-83	868	-83	1 735	-83	2170
-82	434	-82	868	-82	1 735	-82	2170
-81	434	-81	868	-81	1 735	-81	2170
-80	434	-80	868	-80	1 735	-80	2170

### 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, to 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  $W_{sc}$  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 jest od standardu urządzenia, którym 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 to 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 do warunków pomiaru w punkcie:

- odbiór stacjonarny,
- czas trwania pomiaru – 3 minuty,
- wysokość anteny urządzenia pomiarowego – 3 m ( $\pm$  0,4 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 zapewniającego niepewność pomiaru nie gorszą niż 3 dB,
- 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 tej sekcji opisana jest metodyka przeprowadzania pomiarów punktowych, które umożliwiają 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<sup>17</sup>). Za wartość RSRP do analizy zgodnej z punktem 3.a przyjmuje się średnią wartość RSRP uzyskaną ze wszystkich pomiarów, zwiększoną o wartość niepewności pomiaru oraz zaokrągloną do liczby całkowitej. Sposób wyznaczania przepustowości na podstawie RSRP jest opisany w punkcie 3.a.

#### 4.a.2 Pomiary aktywne

Pomiary aktywne (przy wykorzystaniu karty SIM) wartości przepustowości zostaną przeprowadzone przez UAE 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<sup>18</sup>). 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 punkcie 3.b.

### 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,

---

<sup>17</sup> ang. *subscriber Identity Module*

<sup>18</sup> ang. *User Datagram Protocol*

- identyfikatora 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 punkcie 4 potwierdzają, że operator osiągnął wymaganą przepustowość, jeśli przepustowość zmierzona dla danego punktu pomiarowego jest równa lub większa od wymaganej.

Jeśli pomiar pasywny wskazuje, że przepustowość jest wystarczająca, można przeprowadzić pomiar aktywny w celu szerszej analizy. Pozytywny wynik pomiaru pasywnego oznacza spełnienie wymagania UKE i stanowi wynik wiążący dla pomiaru.

Jeśli pomiar pasywny wskazuje, że przepustowość jest niewystarczająca, należy przeprowadzić pomiar aktywny. Pozytywny wynik pomiaru aktywnego oznacza spełnienie wymagania UKE i stanowi wynik wiążący dla pomiaru.

Dwa przykłady podane poniżej ilustrują proces określania przepustowości na podstawie pomiarów opisanych w punkcie 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),  $W_{sc} = 0,8$ , poziom RSRP =  $-119$  dBm, przepustowość  $C_4 = 0,8 \cdot 140 = 112$  Mb/s.

Sumując przepustowości dla poszczególnych zakresów otrzymujemy całkowitą przepustowość  $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 382$  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  $C_1 = 3,9023 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^6 = 78$  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  $C_2 = 3,3223 \cdot 2 \cdot 15 \cdot 10^6 = 100$  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  $C_3 = 2,7305 \cdot 2 \cdot 15 \cdot 10^6 = 82$  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  $C_4 = 1,4766 \cdot 2 \cdot 40 \cdot 10^6 \cdot 0,8 = 94,5$  Mb/s.

Po zsumowaniu 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

Przy prezentacji wyników pomiarów będą wyszczególnione następujące informacje:

- typ i numer seryjny urządzeń pomiarowych stanowiska oraz numerem świadectwa kalibracji/wzorcowania,
- numer ewidencyjny pomiaru,
- data i godzina pomiaru,
- lokalizacja punktu pomiarowego, tj. jego współrzędne geograficzne oraz odpowiadający mu numer rastra w siatce referencyjnej,
- nazwa operatora oraz opcjonalnie numer identyfikacyjny 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 to suma wynikowej przepustowości dla technologii FDD i TDD.

Na potrzeby przetwarzania wyników oraz raportowania seryjnego, UKE/operator przygotuje arkusze kalkulacyjne 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 punkcie 4 opisana jest metodyka przeprowadzania pomiarów punktowych przepustowości, które pozwalają na oszacowanie stopnia pokrycia określonego obszaru administracyjnego oraz na oszacowanie stopnia pokrycia gospodarstw domowych na zdefiniowanym obszarze. Metoda 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:

$$n = \left( \frac{u_{1-\frac{\alpha}{2}}}{l_n} \right)^2$$

Przy czym,  $1-\alpha$  - poziom ufności ( $\alpha$  - poziom istotności),  $u_{1-\alpha/2}$  - kwantyl rzędu  $1-\alpha/2$  rozkładu  $N(0,1)$ ,  $l_n = 2 \Delta$ , 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 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. Licznosc próbki statystycznej, podobnie jak w przypadku analizy pokrycia powierzchniowego, wyznaczamy z nierówności. 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 itp.) i linii kolejowych. Pomiary te będą realizowane jedną z dwóch wybranych przez UKE metod – mobilnej lub pośredniej (rastrowej).

Metoda mobilna będzie opisana w oddzielnym dokumencie.

W przypadku metody pośredniej, drogi i linie kolejowe zostaną opisane zbiorem pól siatki referencyjnej. Z tego zbioru wybiera się losowo podzbiór, który stanowi reprezentatywną próbkę statystyczną, zgodnie z metodą opisaną w punkcie 7.a. Reprezentatywna próbka statystyczna poddawana jest weryfikacji metodą opisaną w punkcie 4.a, a interpretacja wyników jest opisana w punkcie 5.

Do prezentacji wyników z pomiarów metodą rastrową wykorzystuje się sposób opisany w punkcie 6.

## 8. Interpretacja Wyników Pomiarowych

W tej sekcji omówiono sposób interpretacji wyników pomiarów przepustowości.

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

Wyniki pomiarów opisanych w punkcie 7.a potwierdzają, że operator osiągnął przepustowość określoną w zobowiązaniu, jeśli w wystarczającej liczbie punktów operator osiągnął wymaganą przepustowość. 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. Zasada ta dotyczy także określania pokrycia szlaków komunikacyjnych, a mianowicie za ostateczny uznaje się wynik metody rastrowej. Jeśli w zobowiązaniu procentowe pokrycie wynosi 95%, to w co najmniej 95 % losowo wybranych punktach pomiarowych operator powinien osiągnąć wymaganą przepustowość, przy czym dopuszcza się błąd bezwzględny procentowego pokrycia 5 % z poziomem ufności 95 %. Przy tak ustalonym poziomie ufności i wartości błędu bezwzględnego otrzymuje się z wzoru minimalną liczbę próbek, równą 385.

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

Wyniki pomiarów opisanych w punkcie 7.b potwierdzają, że operator osiągnął przepustowość określoną w zobowiązaniu, jeśli w wystarczającej liczbie punktów operator osiągnął wymaganą przepustowość. 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 wskazane jest procentowe pokrycie dla danego typu szlaku komunikacyjnego to oznacza, że w określonym procencie losowo wybranych punktów pomiarowych operator powinien osiągnąć wymaganą przepustowość.

## 9. Sposób Prezentacji Wyników Pomiarów Przepustowości

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

Dodatkowo, w raporcie końcowym zostaną zawarte tabele podsumowujące pomiary 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	Wynik pomiaru pokrycia	Wymaganie UAE	Spełnienie zobowiązań UAE
$N_p$	$N_{PS}$	$P_{PS} = 100\% \cdot N_{PS} / N_p$	$\Delta P_{PS}$	$P_{FIN} = P_{PS} + \Delta P_{PS}$	$P_{UKE}$	[TAK/NIE] TAK jeśli $P_{FIN} \geq P_{UKE}$