

**KRAJOWE LABORATORIUM SIECI I USŁUG PL 5G:
KIERUNKI BADAŃ I PERSPEKTYWY ROZWOJU TECHNIKI 5G/6G
5G NATIONAL LABORATORY: PERSPECTIVE AND RESEARCH DIRECTIONS**

Andrzej Bęben¹, Maciej Sosnowski¹, Witold Józwiak¹, Józef Woźniak², Krzysztof Gierłowski², Michał Hoef², Marek Natkaniec³, Piotr Boryło³, Bartosz Belter⁴, Maksymilian Furmann⁴, Patryk Schauer⁵, Łukasz Falas⁵, Arkadiusz Warzyński⁵, Igor Michalski⁶, Dariusz Więcek⁶

¹ Politechnika Warszawska, Warszawa, {andrzej.beben, maciej.sosnowski, witold.jozwiak}@pw.edu.pl

² Politechnika Gdańska, Gdańsk, {jozef.wozniak, krzysztof.gierlowski, michal.hoef}@pg.edu.pl

³ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, {natkanie, piotr.borylo}@agh.edu.pl

⁴ Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, Poznań, {bartosz.belter, mfurmann}@man.poznan.pl

⁵ Politechnika Wrocławska, Wrocław, {patryk.schauer, lukasz.falas, arkadiusz.warzyński}@pwr.edu.pl

⁶ Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Wrocław, {i.michalski, d.wiecek}@il-pib.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia unikatową infrastrukturę badawczą PL 5G opracowaną w ramach projektu „Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem” oraz kierunki badań dotyczących techniki 5G oraz przyszłej sieci 6G. Laboratorium umożliwia prowadzenie praktycznych eksperymentów, w środowisku zbliżonym do warunków sieci operatorskiej, dotyczących rozwoju techniki 5G/6G, a także szerokiego spektrum jej zastosowań w środowiskach terenowych, tj. morskim, lotniczym, przemysłowym czy miejskim. Przedstawiono również przykładowe eksperymenty wykorzystujące rozważaną infrastrukturę.

Abstract: The article presents the unique infrastructure of the National Laboratory for Advanced 5G Research (PL 5G) and the research directions for beyond 5G and future 6G systems. The laboratory enables practical experiments in an environment similar to the operator's network regarding the development of 5G/6G technology and a wide range of its applications in maritime, aviation, industrial, and urban environments. We also present some exemplary experiments to illustrate infrastructure capabilities.

Słowa kluczowe: sieci 5G i 6G, infrastruktura badawcza, eksperymenty.

Keywords: 5G/6G technology, research infrastructure, experiments.

1 WPROWADZENIE

Nie ulega wątpliwości, iż technika piątej generacji (5G) systemów komunikacji mobilnej stanowi istotny krok w ich rozwoju [1]. Główne cechy wyróżniające sieci 5G to nowe techniki radiowe pozwalające na zwiększenie przepływności bitowej oferowanej użytkownikom przy jednoczesnej większej efektywności wykorzystania pasma radiowego oraz nowe usługi bazujące na trzech podstawowych scenariuszach obsługi, tj. eMMB (ang. *Enhanced Mobile Broadband*) przeznaczonych głównie dla aplikacji wymagających dużych przepływności, URLLC (ang. *Ultra Reliable Low Latency Communications*) de-

dykowanych dla aplikacji wrażliwych na opóźnienia i wymagających dużej niezawodności, czy też mMTC (ang. *Massive Machine Type Communications*) zaprojektowanych dla zastosowań Internetu Rzeczy. Zmniejszenie opóźnienia przekazu danych osiągnięto między innymi dzięki wykorzystaniu techniki obliczeń na brzegu sieci (ang. *edge/fog computing*). Istotną cechą systemów 5G jest również ich ewolucja w kierunku rozwiązań programowych, bazujących na koncepcji wirtualizacji funkcji sieciowych NFV (ang. *Network Functions Virtualization*), która pozwala na rozszerzenie funkcjonalności sieci, zmniejszenie kosztów działania dzięki wykorzystaniu rozwiązań chmurowych, a także otwarcie infrastruktury na nowe podmioty, m.in. operatorów sieci prywatnych 5G, dostawców usług czy oprogramowania. Rozwój i badania nowych generacji sieci mobilnych trwają dalej i obecnie są one definiowane jako systemy 6G. Główne wyzwania badawcze [2], [3], [4] dotyczą wykorzystania fal milimetrowych i częstotliwości sub-terahercowych, systemów massive MIMO, zastosowania metod sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego oraz cyfrowego odwzorowania rzeczywistości (ang. *digital twins*), a także wykorzystania zintegrowanej infrastruktury sieciowo-obliczeniowej ECC (ang. *edge cloud continuum*) oraz zapewnienia bezpieczeństwa bazując na metodach kwantowych.

Należy podkreślić, że opracowanie nowych metod, algorytmów dla systemów 5G/6G, czy też nowych usług oferowanych w tych systemach wymaga przeprowadzenia eksperymentów dotyczących oceny efektywności, współdziałania z obecną infrastrukturą czy też oceny podatności i bezpieczeństwa proponowanych rozwiązań. Takich testów nie można przeprowadzić w sieciach operatorskich. Z tego względu na świecie pojawiły się inicjatywy budowy infrastruktur badawczych stymulujących rozwój techniki 5/6G, czego najlepszym europejskim przykładem jest inicjatywa SLICES (ang. *Scientific Large Scale Infrastructure for Computing/Communication*

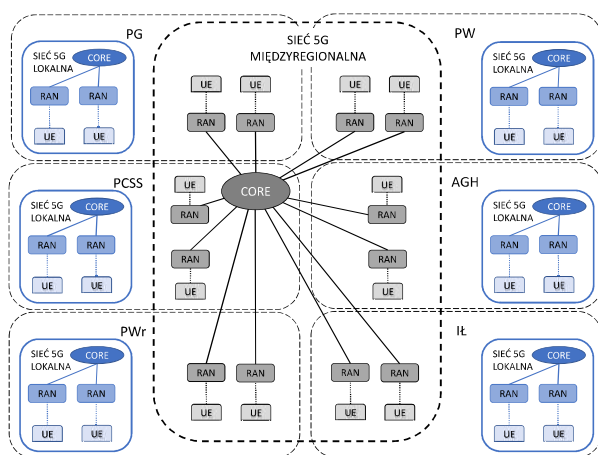
Experimental Studies) [5]. Udostępnienie infrastruktury o podobnej funkcjonalności krajowym ośrodkom badawczym i naukowym oraz przemysłowi, a także połączenie jej z europejskimi inicjatywami stanowiło główną motywację dla zbudowania „Krajowego laboratorium sieci i usług 5G” (PL 5G) [6]. Laboratorium to jest dużą, unikatową w skali kraju infrastrukturą badawczą znajdującą się na Polskiej Mapie Infrastruktur Badawczych, przeznaczoną do realizacji praktycznych eksperymentów dotyczących nowych technik i rozwiązań w obszarze sieci i usług 5G/5G+ oraz przyszłych sieci 6G, a także ich wykorzystania w wielu obszarach zastosowań.

Organizacja artykułu jest następująca: w rozdziale 2 została przedstawiona charakterystyka infrastruktury PL 5G obejmująca jej architekturę, wyposażenie, wykorzystywane częstotliwości oraz przeznaczenie opracowanych laboratoriów. Oferowane usługi i obszary badawcze przedstawiono w rozdziale 3. Rozdział 4 zawiera opis przykładowych eksperymentów, które przeprowadzono z wykorzystaniem infrastruktury PL 5G, zaś w rozdziale 5 podsumowano artykuł.

2 OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA

Infrastruktura PL 5G została opracowana przez konsorcjum jednostek naukowych: (1) Politechnika Warszawska (PW) – lider konsorcjum, (2) Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy (IŁ-PIB), (3) Politechnika Gdańska (PG), (4) Politechnika Wrocławska (PWr), (5) Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie (AGH) oraz (6) Instytut Chemii Bioorganicznej PAN Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS).

Laboratorium PL 5G umożliwia przeprowadzanie eksperymentów w dedykowanych środowiskach testowych sieci 5G, utworzonych w ramach zasobów infrastruktury przedstawionej na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat infrastruktury PL 5G

Eksperymenty mogą być zestawiane: 1) w ogólnopolskiej sieci międzyregionalnej 5G, zlokalizowanej w czterech miastach, tj. w Gdańsku, Krakowie, Poznaniu i Wrocławiu, 2) w postaci wydzielonej sieci 5G, tzw. „network slice”, utworzonej w sieci międzyregionalnej, lub 3) w postaci prywatnych sieci 5G utworzonych w poszczególnych lokalizacjach infrastruktury PL 5G.

Konfiguracja dedykowanej dla danego eksperymentu instancji sieci 5G jest definiowana przez użytkownika „na żądanie” za pomocą Systemu Zarządzania Eksperymentami. W ramach konfiguracji eksperymentu użytkownik specyfikuje wykorzystywane usługi i urządzenia obejmujące m.in. stacje bazowe wraz z terminalami, rdzeń sieci 5G, wymagane urządzenia pomiarowe, a także zasoby obliczeniowe wymagane dla uruchomienia testowanych usług. Istotną cechą laboratorium jest zapewnienie zdalnego dostępu do infrastruktury PL 5G, co oznacza, że cały proces zestawienia eksperymentu, konfiguracji urządzeń, a następnie przeprowadzenia testów i analizy wyników może być realizowany w sposób zdalny.

2.1 Wyposażenie laboratorium

Infrastruktura PL 5G oferuje elementy sieci 5G pochodzące zarówno od producentów rozwiązań klasy operatorskiej, jak również producentów rozwiązań eksperymentalnych, częściowo otwartych, zapewniających dostęp do kodów źródłowych. Z tego względu infrastruktura umożliwia prowadzenie testów rozwiązań komercyjnych oraz badań dotyczących własnych rozszerzeń. Zaprojektowana infrastruktura badawcza PL 5G jest zgodna z architekturą sieci 5G, w większości przypadków w trybie sieci 5G SA (ang. *Standalone*) i składa się z trzech powiązanych laboratoriów:

1. Laboratorium sieci 5G

Obejmuje ono: a) radiowe sieci dostępne RAN (ang. *Radio Access Network*), które zbudowano, wykorzystując: stacje bazowe gNB i głowice radiowe 5G zewnętrzne i wewnętrzne w budynkach takich producentów jak Nokia i Amarisoft, rozwiązania Open RAN firmy Radisys, a także rozwiązania bazujące na urządzeniach radia programowalnego SDR/OAI (ang. *Software Defined Radio/Open Air Interface*), b) różne rdzenie sieci 5GC (ang. *5G core*) działające w trybie SA i NSA (ang. *Non Standalone*), które zostały zbudowane wykorzystując komercyjne rozwiązania firmy Nokia, a także eksperymentalne rdzenie firmy Fraunhofer oraz Amarisoft, c) brzegowe chmury obliczeniowe z urządzeniami zgodnymi ze standardem ETSI MEC (ang. *Multiaccess Edge Computing*), d) ogólnopolską, dedykowaną sieć szkieletową zbudowaną w oparciu o infrastrukturę światłowodową sieci PIONIER, e) prywatną chmurę obliczeniową oferującą zasoby obliczeniowe dla uruchomienia wielu instancji sieci 5G umożliwiających prowadzenie eksperymentów w rozproszonej infrastrukturze. Laboratorium sieci 5G obejmuje również urządzenia programowalne i akceleratorzy sprzętowe GPU/DPU wspierające przetwarzanie danych, w szczególności akceleratorzy wspierające metody bazujące na sztucznej inteligencji. Istotną cechą rozwiązań zastosowanych w infrastrukturze PL 5G jest zachowanie otwartych interfejsów programowych oraz, w przypadku rozwiązań eksperymentalnych, zapewnienie dostępu do kodów źródłowych umożliwiających rozszerzenie funkcjonalności systemu.

2. Laboratorium symulatorów i aparatury pomiarowej 5G

Laboratorium to udostępnia aparaturę i oprogramowanie umożliwiające: a) prowadzenie powtarzalnych eksperymentów w kontrolowanym środowisku radiowym

utworzonym przez komory (ang. *shieldbox*) i namioty izolujące sygnały radiowe, programowalne tłumiki i przełączniki sygnałów radiowych, b) realizację pomiarów dotyczących propagacji sygnałów radiowych, pomiarów anten i kompatybilności elektromagnetycznej, wykorzystując komorę bezodbiciową hybrydową, emulatory kanałów radiowych i analizatory widma, c) badanie wydajności sieci 5G i jej elementów dotyczących płaszczyzny sterowania i przekazu danych wykorzystując analizatory/generatory i emulatory sieci 5G, np. Spirent Landslide, STC, IXIA IxLoad, d) badanie bezpieczeństwa i podatności systemów 5G wykorzystując narzędzia, np. Spirent CyberFlood/Avalanche. Ponadto, laboratorium dysponuje emulatorami użytkowników i elementów sieci 5G oraz symulatorami sieci 5G umożliwiającymi prowadzenie badań wydajności, skalowania oraz bezpieczeństwa w dużych systemach.

3. Laboratorium otoczenia sieci 5G

Zawiera ono urządzenia i oprogramowanie dla tworzenia rozwiązań sieciowych, platform i aplikacji bazujących na technice 5G. W szczególności wyposażenie infrastruktury PL 5G jest dedykowane do prowadzenia badań dotyczących zastosowania sieci 5G w obszarze Internetu Rzeczy, zastosowań multimedialnych, w tym rozszerzonej (AR), mieszanej (MR) czy wirtualnej rzeczywistości (VR), Przemysłu 4.0, a także zastosowań 5G w specyficznych środowiskach takich jak środowisko morskie, lotnisko, czy środowisko miejskie.

Infrastruktura PL 5G jest zbudowana z sześciu węzłów (lokalnych laboratoriów) zlokalizowanych w siedzibach partnerów projektu. Węzły te są połączone dedykowaną siecią światłowodową 10/100 Gbit/s, wykorzystującą zasoby sieci PIONIER. Rozproszony charakter infrastruktury PL 5G umożliwia prowadzenie badań w warunkach zbliżonych do warunków panujących w sieciach operatorskich. Należy podkreślić, że infrastruktura PL 5G zapewnia izolację zasobów; najczęściej dla danego eksperymentu są udostępniane dedykowane instancje sieci 5G, co umożliwia prowadzenie badań w różnych warunkach ruchowych, w tym w sytuacji występowania przeciążenia, niedostępności zasobów lub symulowanych ataków i uszkodzeń jej elementów. Badania tego typu nie mogą być prowadzone w sieciach operatorskich.

2.2 Wykorzystywane częstotliwości

W sieci PL 5G dla emisji testowych wykorzystano częstotliwości radiowe służące do pracy w sieciach 5G NR. Zasadniczo wykorzystywane są dwa podstawowe zakresy częstotliwości pracy sieci 5G NR: FR1 (ang. *Frequency Range 1*) – częstotliwości poniżej 7125 MHz oraz FR2 – częstotliwości powyżej 24,25 GHz. Zakres FR1 jest odpowiedni do pracy na rozległych obszarach (duże zasięgi stacji), podczas gdy częstotliwości zakresu FR2 wykorzystywane są do emisji lokalnych (małe zasięgi), gdy wymagana jest bardzo duża przepustowość (bardzo szerokie kanały radiowe). Ponadto, wykorzystywane są także emisje w pasmach nielicencjonowanych ISM (tj. 2,4 GHz, 5 GHz). W przypadku zakresu FR1 dla każdej lokalizacji emisji dokonano uzgodnienia z UKE odpowiednich kanałów częstotliwości w paśmie C (zakres

3,4 ÷ 4,2 GHz), w którym głównie pracują na świecie stacje 5G NR, a w przypadku zakresu FR2 odpowiednich kanałów pasm milimetrowych (24,25 ÷ 29,5 GHz). Dodatkowo pozyskano lokalnie niewielkie zasoby niskich częstotliwości (< 3 GHz) do celów realizacji emisji w standardach 3GPP (CAT1, NB IoT) dla systemów IoT pracujących na duże odległości.

Należy również podkreślić, że laboratorium PL 5G oferuje też kontrolowane środowiska radiowe (komora bezodbiciowa, *shieldbox*'y i namioty izolujące sygnały radiowe), umożliwiające wykorzystanie dowolnych częstotliwości radiowych z zakresów FR1 i FR2 bez konieczności uzyskiwania pozwoleń UKE.

2.3 Laboratoria i ich przeznaczenie

W tym rozdziale przedstawiono charakterystykę laboratoriów tworzących infrastrukturę PL 5G.

2.3.1 Laboratorium międzyregionalne

Laboratorium międzyregionalne zostało zaprojektowane głównie dla prowadzenia eksperymentów dotyczących nowych usług i zastosowań świadczonych dzięki wykorzystaniu techniki 5G. Wyróżniającą cechą tego laboratorium jest zapewnienie warunków zbliżonych do sieci operatorskich działających w trybie 24h/365. Z tego względu laboratorium zostało zbudowane w oparciu o komercyjne rozwiązanie firmy Nokia CMU (ang. *Compact Mobility Unit*) w postaci rozproszonej sieci ze stacjami bazowymi zlokalizowanymi w Krakowie, Gdańsku, Wrocławiu, Poznaniu i na lotnisku w Kąkolewie oraz rdzeniem sieci 5GC zlokalizowanym w Poznaniu. Ponadto zastosowano również wyniesione serwery UPF (ang. *User Plane Function*) we Wrocławiu i Krakowie, aby umożliwić w tych lokalizacjach świadczenie usług na brzegu sieci. Sieć międzyregionalna jest jedną z pierwszych w Polsce prywatnych sieci 5G wykorzystujących emisje radiowe w pasmach testowych FR1 zgodnych z planem zagospodarowania częstotliwości 3.8-4.2 GHz oraz, co niewątpliwie wyróżnia infrastrukturę PL 5G, w paśmie FR2. Częstotliwości te zapewniają pokrycie sygnałem radiowym wybranych terenów ww. lokalizacji, a wspólny rdzeń sieci 5GC umożliwia realizację połączeń pomiędzy nimi.

2.3.2 Laboratorium PCSS

Laboratorium 5G w Poznańskim Centrum Superkomputerowo Sieciowym (PCSS) zostało zaprojektowane dla realizacji badań funkcjonalności oraz wydajności sieci 5G, symulacji, pomiarów oraz walidacji rdzenia 5G, testowania bezpieczeństwa rdzenia 5G, udostępniania zasobów obliczeniowych i przechowywania danych, a także rozwoju aplikacji i zastosowań techniki 5G w różnych obszarach, w tym w rozwoju autonomicznych statków UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*) oraz pojazdów UGV (ang. *Unmanned Ground Vehicle*). Infrastruktura laboratorium PCSS oferuje zasoby obliczeniowe i przechowywania danych niezbędne dla realizacji eksperymentów, udostępniane przez rozproszone centrum danych. Laboratorium PCSS zostało wyposażone w system synchronizacji czasu składający się z urządzeń Oscilloquartz OSA 5412 oraz OSA 5201 zapewniających podtrzymanie synchronizacji czasu w laboratorium PL 5G na wy-



padek zaników sygnału GNSS lub jego zakłóceń w wyniku zagłuszania (ang. *jamming*) lub fałszowania (ang. *spoofing*). Istotnym elementem laboratorium PCSS jest AerospaceLab zlokalizowany na lotnisku w Kąkolewie. Teren lotniska jest objęty zasięgiem międzyregionalnej sieci PL 5G z 3-sektorową stacją bazową pracującą w paśmie 3,9-4,0 GHz (100 MHz), która umożliwia prowadzenie eksperymentów dotyczących rozwiązań pół-automatycznego czy autonomicznego sterowania pojazdami UAV i UGV. Ponadto AerospaceLab obejmuje również hangar zapewniający przestrzeń do lotów w warunkach kontrolowanych o wymiarach 30 m x 30 m x 10 m. Hangar ten jest objęty zasięgiem wewnątrzbudynkowej sieci 5G z dodatkową głowicą pracującą w ww. paśmie oraz z głowicą pracującą w zakresie fal milimetrowych 26 GHz (AWEUC AirScale mmWave n258 z kanałem o szerokości 100 MHz).

2.3.3 Laboratorium PG

Laboratorium 5G Politechniki Gdańskiej umożliwia zarówno prowadzenie badań w środowisku ściśle kontrolowanym (przy użyciu komór i namiotów izolujących sygnały radiowe oraz unikatowego w skali projektu wielokanałowego emulatora toru radiowego MIMO 4x4), jak i realizację eksperymentów, testów i kampanii pomiarowych w terenie – włączając w to obszary miejskie o różnym przeznaczeniu, tereny niezurbanizowane, a także środowisko wód śródlądowych i akwenów morskich. Z myślą o tych ostatnich na wyposażeniu laboratorium dostępna jest flota dronów pływających oraz duża platforma pływająca, służąca jako baza do pomiarów na jeziorze Jelenie (w sercu Kaszub).

Poza dostępem do już wdrożonych instalacji 5G, laboratorium pozwala na tworzenie, dedykowanych do konkretnych, specyficznych badań bądź eksperymentów, heterogenicznych środowisk systemów dostępowych (zarówno 5G NR jak i non-3GPP) podłączonych do zróżnicowanego zbioru sieci rdzeniowych 5G/LTE i oferujących usługi komunikacji głosowej/wideo dla użytkowników końcowych.

Na potrzeby badań terenowych zostały przygotowane punkty instalacyjne wyposażone w zewnętrzne szafy teletechniczne, zasilanie oraz połączenia światłowodowe pozwalające na łatwe tworzenie topologii danego eksperymentu. Przygotowana infrastruktura cechuje się elastycznością i z powodzeniem może zostać wykorzystana w różnych scenariuszach przyszłych prac badawczych. Specyfika laboratorium umożliwia prowadzenie kompleksowych badań dotyczących orkiestracji zarówno elementów rdzenia sieci 5G, jak i elementów sieci dostępowych (włączając w to rozwiązania Open RAN). Badania i eksperymenty dotyczące orkiestracji elementów aplikacyjnych oraz różnorodnych aspektów przetwarzania na i poza brzegiem sieci możliwe są np. w kontekście systemów Przemysłu 4.0 (ang. *Industry 4.0*), takich jak systemy sterowania i robotyki przemysłowej oraz systemy komunikacji i automatyki morskiej.

Ważnym elementem laboratorium są też lądowe i morskie pojazdy autonomiczne i sterowane, pozwalające między innymi, na realizację badań dotyczących zastosowania tego rodzaju rozwiązań w wielu dziedzinach przemysłu oraz tworzenia i integracji systemów komuni-

kacji o mobilnej infrastrukturze – w tym sieci pokładowych zarówno dla jednostek pływających jak i pojazdów lądowych.

Powyższą tematykę uzupełniają możliwości realizacji prac badawczych dotyczących pracy sieci w środowiskach o wysokim poziomie zakłóceń, rozwoju systemów MCPTX (ang. *Mission-critical Push-to-everything*), opracowania i weryfikacji rozwiązań nowych zaawansowanych mechanizmów lokalizacji 3D realizowanej w ramach koncepcji ISAC (ang. *Integrated Sensing & Communications*) oraz zastosowania sztucznej inteligencji w zarządzaniu i utrzymaniu systemów komunikacyjnych oraz w aspekcie usługowym (np. elementy koncepcji Przemysłu 5.0).

2.3.4 Laboratorium AGH

Laboratorium 5G w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie składa się z elementów laboratorium międzyregionalnego 5G pracującego w trybie SA w oparciu o trzy sektory w paśmie 3,9 GHz oraz jeden sektor w paśmie 26 GHz na zewnątrz budynku oraz osiem sektorów w paśmie 3,9 GHz wewnątrz budynku. Lokalizacja uczelni w samym centrum miasta sprawia, że sieć AGH pokrywa swoim zasięgiem duży obszar Krakowa, w szczególności teren samej uczelni, obszar Parku Jordana, Błonia krakowskich oraz miasteczka studenckiego AGH. W celu redukcji opóźnień przekazu danych, co ma kluczowe znaczenie dla świadczenia usług czasu rzeczywistego, wykorzystano wyniesiony serwer UPF. W AGH uruchomiono również środowisko sieci 5G oparte na rozwiązaniach Open RAN, zapewniając w ten sposób większą elastyczność, interoperacyjność i innowacyjność w porównaniu do tradycyjnych, zamkniętych rozwiązań 5G. Dzięki uruchomieniu rozbudowanego środowiska radia programowalnego SDR, opartego na rozwiązaniach firmy Ettus, możliwe jest szybkie prototypowanie rozwiązań 5G przy dużej elastyczności, niskich kosztach oraz wysokiej interoperacyjności. Rozwiązania SDR stanowią fundament dla przyszłych innowacji w komunikacji bezprzewodowej, takich jak sieci 5G i 6G, umożliwiając łatwiejsze wdrażanie nowych technologii i standardów w miarę ich rozwoju. Laboratoria sieci 5G to nie tylko rozwiązania oparte na technikach 3GPP. Wdrożone rozwiązania non-3GPP oparte na standardach IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6E) i IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) umożliwią wykonywanie rozmaitych testów z przepływnościami sięgającymi ponad 20 Gbit/s w zakresie pasm nielicencjonowanych: 2,4 GHz, 5 GHz i 6 GHz.

Laboratorium AGH oferuje również duży klaster obliczeniowy złożony z wydajnych serwerów umożliwiających przeprowadzanie zaawansowanych badań symulacyjnych związanych z sieciami i usługami 5G. Wspomniane laboratorium jest również przystosowane do prowadzenia zaawansowanych badań w ściśle kontrolowanym środowisku radiowym. Jest ono wyposażone w programowalne tłumiki sygnału radiowego oraz matrycę przełączającą sygnały radiowe, która umożliwia podłączenie kilku niezależnych systemów 5G do komór tłumiących fale radiowe o różnych rozmiarach. Dzięki temu w

komorach można w sposób zdalny badać rozmaite terminale klienckie 5G (uzyskiwane przepływności i opóźnienia transmisji, wariację tego opóźnienia, procedury przełączania międzykomórkowego, wpływ interferencji, straty pakietów, a także zgodność z procedurami zawartymi w standardach 3GPP jak i non-3GPP). Na wyposażeniu laboratorium znajduje się również unikalny w skali projektu system monitorowania wskaźników jakości i wydajności sieci radiowych 5G o nazwie TEMS (ang. *Telecom Engineering Mobile Solutions*). To zaawansowane narzędzie do monitorowania, optymalizacji i analizy sieci komórkowych umożliwia zbieranie danych w czasie rzeczywistym oraz analizę jakości usług w sieci 5G, co obejmuje pomiar parametrów takich jak RTT (ang. *Round-Trip Time*), jitter, utracone pakiety oraz uzyskiwaną przepływność. Pozwala to na ocenę jakości usług dla różnych aplikacji i użytkowników. Dzięki analizie danych z sieci, TEMS pomaga w identyfikacji i usuwaniu problemów, takich jak zasięg, interferencje czy błędy w konfiguracji, co prowadzi do poprawy jakości świadczonych usług. TEMS umożliwia również tworzenie szczegółowych map zasięgu sieci 5G, pokazujących obszary o różnej jakości sygnału i pokrycia. Jest to szczególnie przydatne do planowania rozbudowy sieci oraz optymalizacji zasięgu. Urządzenia należące do sieci dostępowej mogą wygenerować ruch pochodzący jednocześnie od ok. 200 użytkowników końcowych.

Laboratorium AGH zostało wyposażone zarówno w autonomiczne pojazdy UAV (latające) jak i UGV (jeżdżące) mogące przenosić stosunkowo ciężki sprzęt kontrolno-pomiarowy. Dane pomiarowe w laboratorium IoT są generowane m.in. przez różnorodne czujniki środowiskowe rozlokowane na terenie uczelni. Kolejno, są one przetwarzane na brzegu sieci przez odpowiednie serwery obliczeniowe i składowane w centrum przechowywania danych. Wyposażenie laboratorium IoT zamyka platforma prototypowania rozwiązań IoT, która umożliwia budowę dowolnych urządzeń IoT z rozmaitych komponentów elektronicznych (czujniki, elementy wykonawcze, mikrokomputery i interfejsy bezprzewodowe).

Laboratorium multimedialne zostało wyposażone w przeróżne rozwiązania VR i AR umożliwiające prowadzenie wszechstronnych badań naukowych w takich dziedzinach jak: telekomunikacja, psychologia, neuronauka, edukacja, medycyna, inżynieria, sport i rehabilitacja. Zakupiony sprzęt pozwala również na prowadzenie badań społecznych i behawioralnych. Do unikalnych urządzeń znajdujących się w laboratorium multimedialnym należy system monitorowania i mapowania aktywności mózgu fNIRS (ang. *functional Near-Infrared Spectroscopy*). Główne zastosowania i funkcje fNIRS obejmują badania nad interakcją człowiek-komputer. Laboratorium wyposażono również w system skanowania przestrzeni 3D, wyświetlania treści na urządzeniach 3D, kamery nagrywające 360°, urządzenia telekonferencji 3D, system przetwarzania obrazu z wielu kamer (8MP HDR), a także urządzenia umożliwiające realizację obiektywnej usługi po-

miarowej. Całość wyposażenia laboratorium multimedialnego uzupełniają urządzenia odtwarzania dźwięku stereo oraz wielokanałowego wysokiej jakości Hi-Fi (ang. *High Fidelity*).

2.3.5 Laboratorium PWr

Podstawowym celem budowy laboratoriów na Politechnice Wrocławskiej, było umożliwienie realizacji eksperymentów i prowadzenia badań na każdym z etapów projektowania, implementacji, wdrażania oraz funkcjonowania usług związanych z nowoczesnymi technikami obliczeniowymi i komunikacyjnymi.

W laboratorium są dostępne zarówno elementy laboratorium międzyregionalnego 5G, w szczególności dwie komórki pracujące w paśmie fal milimetrowych n258, jak również sieci lokalne w pasmach 2,3 GHz oraz 3,9 GHz. Wszystkie elementy sieci radiowych są zlokalizowane na budynkach uczelni. Infrastruktura pozwala na prowadzenie testów w warunkach rzeczywistych na obszarze między kampusem głównym a akademikami PWr. Natomiast w przypadku sieci międzyregionalnej możliwości testów terenowych rozciągają się aż do wrocławskiej siedziby IŁ-PIB. Zróżnicowana zabudowa wokół wspomnianego terenu, obejmująca zarówno obszary gęstej zabudowy, parku, domów jednorodzinnych oraz węzła wodnego rzek Odry i Oławy, pozwala na opracowanie wielu scenariuszy testów i pomiarów. Ponadto laboratorium PWr umożliwia testy technik *non-3GPP* oparte o punkty dostępne oraz kontroler sieci 802.11 firmy Aruba.

Laboratorium PWr zostało zaprojektowane dla eksperymentów dotyczących rozproszonych systemów usługowych. Wybudowana infrastruktura pozwala na badanie rozwiązań end-to-end, uwzględniając zarówno zagadnienia komunikacyjne, jak również obliczeniowe, od poziomu warstwy fizycznej sieci dostępowej, po usługi przetwarzające dane w chmurze. Infrastruktura obliczeniowa PWr to węzeł międzyregionalnej chmury obliczeniowej. Ponadto infrastrukturę lokalną wyróżniają specjalistyczne serwery do prowadzenia obliczeń w dziedzinie uczenia maszynowego w postaci Nvidia DGX oraz do prowadzenia symulacji w środowiskach wirtualnej rzeczywistości Nvidia OVX. Wspomniany sprzęt wzbogacony został o rozwiązania programowe VMware Horizon oraz Comtegra CGC umożliwiające wykorzystanie zasobów wielu użytkowników jednocześnie. W szczególności możliwe jest świadczenie usług badawczych dla podmiotów, które nie posiadają wyspecjalizowanej infrastruktury, a chcą przygotować swoje rozwiązania do integracji i wdrożeń.

Wychodząc naprzeciw potrzebom badawczym w obszarze projektowania, budowania, integracji i wdrażania rozproszonych systemów usługowych, na PWr dostępne są stanowiska badawcze oraz aparatura pozwalająca na prowadzenie badań oraz prac rozwojowych m.in. w obszarze Internetu Rzeczy oraz wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości.

Jedno z laboratoriów badawczych to swego rodzaju Living Lab, przestrzeń, w której na co dzień pracują badacze, sama w sobie jest obiektem badań i testów w zakresie rozwiązań z obszaru inteligentnych budynków. Laboratorium jest wyposażone w stanowiska do prototypowania urządzeń IoT, drukarki i skanery 3D, osprzęt AR i VR. Ponadto dostępne są drony latające i jeżdżące, które mogą być stosowane zarówno jako źródła danych (kamery termowizyjne i multispektralne), nośniki sprzętu pomiarowego oraz baza do prototypowania złożonych rozwiązań. Część dronów komunikuje się przez wybudowane prywatne sieci 5G zarówno w zakresie przekazywania danych wizyjnych i pomiarowych, jak i sterowania. Tym samym możliwe jest budowanie kompleksowych scenariuszy obejmujących zarówno problematykę komunikacji w sieciach 5G, zdalne pilotowanie oraz systemy autonomiczne, wirtualizację i przetwarzanie dużych ilości danych, kończąc na problemach dziedzinowych systemów IoT związanych z urbanistyką, nowoczesnym rolnictwem i wielu innych obszarach. Ponadto wykorzystanie dronów pozwala na przygotowywanie bardzo dokładnych map i modeli 3D terenu, które mogą służyć zarówno celom szeroko pojętych budownictwa, architektury i urbanistyki, ale również jako baza dla problemów planowania radiowego, symulacji propagacji, czy innym scenariuszom symulacyjnym.

2.3.6 Laboratorium IŁ-PIB

Laboratorium Instytutu Łączności - Państwowego Instytutu Badawczego jest ukierunkowane głównie na badania i pomiary w najniższych warstwach sieci 5G (fizycznej PHY, łącza danych MAC) oraz na aplikacjach wykorzystywanych w sieci 5G. Realizowane w nim są również badania zgodności z odpowiednimi normami dotyczącymi kompatybilności elektromagnetycznej a także zgodności parametrów radiowych. W IŁ-PIB we Wrocławiu wybudowano w tym celu w ramach projektu budynek laboratoryjny, w którym umieszczono zaprojektowaną specjalnie do celów projektu komorę bezodbiciową hybrydową składającą się z komory SAC 10M (ang. *semi-anechoic chamber*) o odległości pomiarowej 10 m oraz FAR 3M (ang. *full anechoic room*) o odległości pomiarowej 3 m, a także zintegrowanego systemu do pomiarów anten w strefie bliskiej realizowanych w komorze. Laboratorium jest wyposażone również w szereg przyrządów pomiarowych wspierających badania w najniższych warstwach, tj. analizator widma, oscyloskop, odbiornik pomiarowy do pomiarów kompatybilności elektromagnetycznej EMC a także urządzenia i oprogramowanie do badań zasięgów sieci 5G i pomiarów w ruchu (drive-testy) i badań propagacji fal radiowych. Laboratorium IŁ-PIB umożliwia również prace z wykorzystaniem nowych technik radiowych (np. emisje nieortogonalne) a także projektowanie sieci radiowych 5G z wykorzystaniem profesjonalnego oprogramowania planistycznego.

2.3.7 Laboratorium PW

Laboratorium Politechniki Warszawskiej jest ukierunkowane na prowadzenie eksperymentów w czterech

głównych obszarach obejmujących: 1) badania sieci dostępu radiowego 5G NR, Open RAN, zbudowanych na urządzeniach pochodzących od różnych producentów w ściśle kontrolowanym środowisku radiowym oraz ich współpracy z rdzeniem sieci 5G oraz technikami obliczeń na brzegu sieci (ang. *edge computing*), 2) rozwój funkcjonalności rdzenia sieci 5G oraz metod orkiestracji i zarządzania konteneryzowanymi funkcjami rdzenia CNF (ang. *Cloud Native Functions*) wdrożonych w zintegrowanej infrastrukturze sieciowo-obliczeniowej ECC (ang. *Edge-Cloud Continuum*) utworzonej z heterogenicznych, rozproszonych klastrów obliczeniowych pochodzących od różnych dostawców, 3) badania technik wirtualizacji i sieci programowalnych, w tym wykorzystujących język P4, 4) zastosowania techniki 5G dla tworzenia i wykorzystania cyfrowych modeli rzeczywistości, obejmujące odwzorowanie obiektów rzeczywistych do postaci cyfrowej, prezentacje obrazów wirtualnej, rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości (VR/AR/MR) oraz przetwarzanie i strumieniowanie immersyjnych obrazów wideo o wysokiej jakości.

Szczególnie istotnym elementem wyposażenia laboratorium PW jest kontrolowane środowisko radiowe zbudowane na bazie 256-kanalowej, programowalnej matrycy przełączającej sygnały radiowe, wyposażonej w programowalne tłumiki sygnału radiowego. Matryca ta umożliwia dołączenie sygnału radiowego generowanego z głowic stacji bazowych 5G i emulatorów użytkowników do zestawu 6 komór izolujących sygnały radiowe, które są wyposażone w systemy antenowe, w tym systemy MIMO 4x4. W komorach umieszczono terminale sieci 5G (smartfony 5G, modemy 5G) oraz terminale IoT, do których dostęp uzyskano za pomocą zdalnego pulpitu. Matryca umożliwia zdalną rekonfigurację torów radiowych oraz programowanie zmieniającego się w czasie tłumienia w poszczególnych torach radiowych. Utworzone kontrolowane środowisko radiowe umożliwia realizację powtarzalnych eksperymentów dla dowolnego zakresu częstotliwości, konfiguracji kanałów radiowych i systemów antenowych, trybów transmisji wspieranych przez stacje bazowe i terminale. Badania dotyczą m.in. wydajności transmisji radiowej systemów 5G (przepływności bitowej, zasięgu, poziomu sygnału), badanie procedur przełączania (ang. *handover*), transmisji MIMO, wpływu interferencji, współpracy elementów sieci RAN pochodzących od różnych producentów, w tym kompatybilności terminali oraz współpracy z systemami non 3GPP.

W obszarze badań otoczenia sieci 5G istotnym wyposażeniem laboratorium jest stanowisko cyfrowego modelowania rzeczywistości, które umożliwia skanowanie obiektów 3D, tworzenie ich modeli i odwzorowania w cyfrowym świecie, a następnie ich przetwarzania i strumieniowania w postaci obrazów immersyjnych o wysokiej jakości, z wykorzystaniem techniki 5G i obliczeń na brzegu sieci i prezentacji na okularach rozszerzonej lub mieszanej rzeczywistości.

3 OBSZARY BADAŃ 5G/6G

Infrastruktura PL 5G oferuje szeroki zakres usług badawczych dotyczących zarówno rozwoju techniki



5G/6G, jak również rozwoju potencjalnych jej zastosowań, a także testowania wdrażanych rozwiązań. Istotną cechą infrastruktury PL 5G jest oferowanie najnowszych rozwiązań 5G pochodzących od wiodących producentów, zapewnienie dostępu do specjalizowanych urządzeń pomiarowych przeznaczonych do badania transmisji radiowej, walidacji i badania wydajności elementów sieci 5G oraz analizy podatności i bezpieczeństwa sieci 5G, oraz wsparcie wysoko wykwalifikowanej kadry z wiodących krajowych ośrodków badawczych. Poniżej scharakteryzowano wybrane obszary badań dotyczących systemów 5G, które są przewidziane w infrastrukturze PL 5G:

- Badania w obszarze radiowych sieci dostępowych, dotyczą

m.in. 1) możliwości współpracy sprzętu 5G pochodzącego od różnych producentów, 2) efektywności przekazu danych w systemach 5G wykorzystujących systemy wieloantenowe (ang. *massive MIMO*), metod formowania wiązki i transmisji w zakresie fal milimetrowych, 3) protokołów dostępowych i metod sterowania wykorzystujących skorelowaną, jednoczesną transmisję, 4) metod sterowania i zarządzania zasobami radiowymi, w tym wykorzystujące metody uczenia maszynowego, 5) bezpieczeństwa radiowej sieci dostępowej i identyfikacji podatności dostępnych rozwiązań, 6) współpracy pomiędzy wydzielonymi sieciami RAN, a także 7) współpracy i współistnienia komercyjnych, prywatnych oraz militarnych systemów 5G, i 8) nowych technik radiowych w przyszłych systemach radiowych (np. techniki nieortogonalne).

- Rozwój rozwiązań typu Open RAN [7], ich potencjału oraz zagrożeń. W szczególności laboratorium PL 5G oferuje platformę Open RAN firmy Radisys, która umożliwia tworzenie aplikacji sterujących siecią RAN w ramach tzw. inteligentnych sterowników RIC (ang. *RAN Intelligent Controller*). Platforma ta jest zgodna z zaleceniami stowarzyszenia O-RAN Alliance i zapewnia otwarte interfejsy programistyczne, co umożliwia opracowanie własnych aplikacji xApps / rApps, sterujących działaniem sieci RAN. Platforma ta może zostać również wykorzystana do badań dotyczących bezpieczeństwa systemów O-RAN. W szczególności, zgodnie z zaleceniami grupy WG11, badania dotyczące bezpieczeństwa O-RAN obejmują bezpieczeństwo O-Cloud, bezpieczeństwo zarządzania usługami i orkiestracji, bezpieczeństwo współdzielonego O-RU oraz bezpieczeństwo Near Real-Time RIC i xApps.

- Badania w obszarze rdzenia sieci 5G dotyczą m.in. 1) współpracy autonomicznych sieci 5G, 2) metod orkiestracji i zarządzania usługami 5G w modelu CNF, w tym skalowania wydajności, zapewnienia niezawodności w warunkach dynamicznych zmian topologii i niedostępności zasobów infrastruktury, 3) identyfikacji podatności i zapewnienia bezpieczeństwa rdzenia sieci 5G, 4) interoperacyjności i współpracy z systemami łączności niezgodnymi ze standardem 5G, np. WiFi, sieci radiowe, 5) wsparcia mobilności użytkowników, infrastruktury systemu 5G (sieci RAN, elementów rdzenia 5G) a także oferowanych usług.

- Badanie możliwości utworzenia i współpracy wydzielonych sieci do zastosowań specjalnych, np. wojskowych (ang. *military slice*) w ramach infrastruktury komercyjnych i prywatnych sieci 5G. Laboratorium PL 5G

umożliwia utworzenie i udostępnienie wydzielonych sieci (ang. *network slices*) w ramach infrastruktury sieci międzyregionalnej bazującej na rozwiązaniu komercyjnym firmy NOKIA oraz na podstawie rozwiązania Open5GCore firmy Fraunhofer.

- Badania narzędzi wirtualizacyjnych bazujących na maszynach wirtualnych i kontenerach, a także środowisk wirtualizacyjnych stanowiących podstawę dla wdrożenia systemów 5G w postaci wirtualnych funkcji sieciowych. W szczególności badania te dotyczą wykorzystania akceleratorów sprzętowych i metod uczenia maszynowego.

- Badania dotyczące techniki przetwarzania na brzegu sieci MEC (ang. *Multiaccess Edge Computing*) i przyszłych rozwiązań zintegrowanej infrastruktury sieciowo-obliczeniowej ECC (ang. *Edge-Cloud Continuum*) [8] bazujących na zasobach obliczeniowych pochodzących do wielu dostawców. W rozwiązaniach militarnych szczególnie istotnym elementem jest wykorzystanie zasobów różnych rodzajów wojsk, oddziałów dostępnych w danym scenariuszu operacyjnym.

- Badania metod samoorganizacji sieci 5G i metod zarządzania siecią i usługami bazujących na paradygmacie ZSM (ang. *Zero touch network & Service Management*), które umożliwiają autokonfigurację systemu i automatyczną rekonfigurację i adaptację systemu 5G w zależności od aktualnie dostępnych zasobów i środków łączności. Zarządzanie ZSM to ewoluująca koncepcja prowadzona z inicjatywy ETSI [9], której celem jest zapewnienie środowiska w pełni zautomatyzowanej oraz samoorganizującej sieci 5G. Ideą ZSM jest wprowadzenie w sieciach technik umożliwiających dokonywanie samodzielnej konfiguracji bez konieczności bezpośredniej interwencji człowieka. Celami ZSM są: autonomiczna zmiana konfiguracji umożliwiająca samodzielną optymalizację w celu lepszego dostosowania do panującej sytuacji, samodzielna naprawa w celu zapewnienia prawidłowego funkcjonowania, samodzielne monitorowanie w celu śledzenia jego funkcjonowania i samodzielne skalowanie w celu dynamicznego angażowania lub odłączania zasobów w zależności od bieżących potrzeb.

- Badania kompatybilności elektromagnetycznej i badań systemów antenowych (SAC i FAR) w komorze hybrydowej SAC 10M i FAR 3M zlokalizowanej w Instytucie Łączności - PIB we Wrocławiu. W komorze będą mogły być wykonywane pomiary kompatybilności elektromagnetycznej, zakłóceń międzysystemowych, odporności i emisyjności urządzeń, a także badań charakterystyk systemów antenowych 5G czy parametrów urządzeń 5G (np. TRP, EIRP czy pomiary czułości urządzeń, badania współczynników ochronnych czy selektywności) oraz badania zgodności urządzeń z odpowiednimi normami (m.in. ETSI, 3GPP).

- Badania możliwości wykorzystania sieci 5G w środowisku morskim oraz badań dotyczących nowych rozwiązań i aplikacji dla bezzałogowych pojazdów powietrznych oraz naziemnych (lotnisko w Kąkolewie) oraz zastosowania w środowisku miejskim (Gdańsk/Kraków/Wrocław).

- Badanie systemów kwantowej dystrybucji kluczy QKD (ang. *Quantum Key Distribution*) w systemach 5G. W trwającej obecnie rozbudowie laboratorium PL 5G

utworzone zostaną nowe stanowiska badawcze dotyczące kwantowej dystrybucji kluczy QKD na duże odległości (łącze QKD Poznań-Warszawa) i ich integracja z systemami 5G.

- Badania wykorzystania możliwości i potencjału zastosowań technologii wirtualnej, rozszerzonej oraz mieszanej rzeczywistości w kontekście tworzenia innowacyjnych aplikacji, które mogą zostać dostosowane do potrzeb poszczególnych gałęzi zastosowań, takich jak przemysł, wojsko, służby mundurowe czy edukacja. Należy podkreślić, że technologie VR/AR/MR umożliwiają użytkownikom wejście w wirtualny świat, zapewniając interakcję zarówno z wirtualnymi, jak i realnymi elementami otaczającego świata.

- Badania w obszarze bezpieczeństwa dotyczą wymienionych powyżej obszarów. W szczególności: 1) analizy bezpieczeństwa zwirtualizowanej infrastruktury sieci 5G i identyfikacji potencjalnych podatności, 2) bezpieczeństwa sieci Open RAN, 3) bezpieczeństwa przetwarzania danych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego, 4) bezpieczeństwa wykorzystania technologii network slicing w zastosowaniach specjalnych, 5) bezpieczeństwa w sieciach ZSM.

- Badania w obszarze dziedzinowych systemów usługowych, które z jednej strony korzystają z nowoczesnych technik komunikacyjnych takich jak 5G/6G, a jednocześnie wymagają infrastruktury obliczeniowej. Naturalnym krokiem w rozwoju systemów usługowych w wielu dziedzinach jest wykorzystanie metod uczenia maszynowego i szeroko rozumianej sztucznej inteligencji. Tego typu systemy wymagają niezawodnych, szeroko dostępnych technik komunikacji o niskich opóźnieniach oraz coraz większej przepustowości między urządzeniami końcowymi z zasobami obliczeniowymi w chmurze lub na brzegu sieci.

- Badania w obszarze sterowania dronami, wodnymi, lądowymi i powietrznymi. Nieodłącznymi scenariuszami wskazywanymi przy omawianiu technik komunikacji takich jak 5G jest problematyka sterowania statkami bezzałogowymi, zarówno w kontekście wykonywania misji ręcznie jak i wsparcia misji autonomicznych. Tematyka tych badań obejmuje zarówno kwestie komunikacji, takie jak planowanie radiowe na wysokościach lotu dronów oraz zapewnienie pewnej komunikacji przy utracie łączności podstawowej, jak również kwestie związane z przetwarzaniem pozyskiwanych w ramach misji danych.

4 PRZYKŁADOWE EKSPERYMENTY

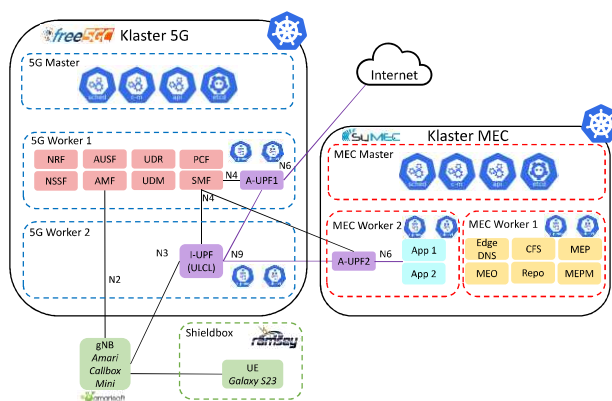
Poniżej przedstawiono przykładowe eksperymenty przeprowadzone z wykorzystaniem infrastruktury PL 5G.

4.1 Eksperyment dot. orkiestracji w środowisku ECC

Jednym z wyzwań dotyczących rozwoju techniki 6G jest opracowanie efektywnych algorytmów orkiestracji w zintegrowanej infrastrukturze sieciowo-obliczeniowej ECC. Celem tych algorytmów jest zarządzanie rozmieszczeniem i liczbą uruchamianych instancji elementów danego systemu, np. funkcji sieciowych w przypadku rdzenia sieci 5/6G lub aplikacji w przypadku Systemu MEC (System MEC służy do uruchamiania aplikacji w bliskiej

odległości do użytkowników końcowych, np. przy stacjach bazowych, co pozwala na lokalne przetwarzanie danych i obsługę żądań, tym samym zmniejszając opóźnienie w relacji koniec-koniec oraz obciążenie sieci [10]). W szczególności jest niezbędne opracowanie orkiestratora, który zarządza jednocześnie wieloma tego typu systemami, umożliwiając optymalne rozmieszczenie ich poszczególnych elementów.

W rozważanym eksperymencie analizowane są algorytmy orkiestrujące instancjami funkcji UPF oraz aplikacji MEC na wspólnych zasobach, uwzględniając możliwości obsługowe / chwilowe zapotrzebowanie obydwu z nich: więcej aplikacji MEC uruchomionych w danym miejscu skutkuje większą ilością ruchu do niego przesyłanego, co może doprowadzić do przeciążenia funkcji UPF i degradacji usługi; natomiast znaczne przewymiarowanie UPF zabiera zasoby, które mogłyby być użyte przez aplikacje MEC. Przykładowe środowisko do tego typu badań przedstawia Rys. 2.



Rys. 2. Przykład wdrożenia sieci 5G w dwuklastrowym środowisku ECC

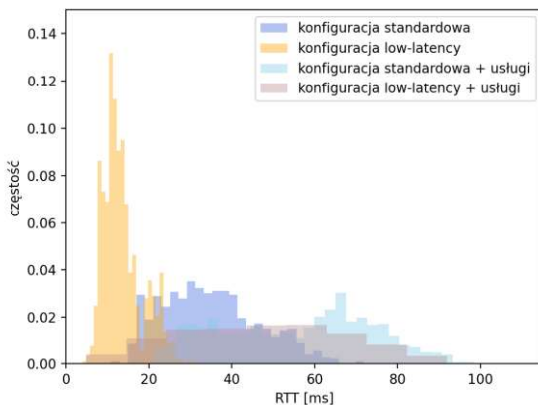
Jest ono zbudowane z dwóch klastrów Kubernetes („Klaster 5G” oraz „Klaster MEC”), stacji bazowej oraz telefonu umieszczonego w komorze izolującej sygnały radiowe. W Klasterze 5G znajduje się funkcja I-UPF (ULCL), tj. *Uplink Classifier*, która decyduje, do której instancji UPF powinien zostać przekierowany dany ruch (bazując np. na docelowym adresie IP, nazwie domowej, itp.). Domyślnym wyjściem z sieci rdzeniowej jest UPF oznaczony jako A-UPF1 znajdujący się w Klasterze 5G, natomiast ruch przeznaczony dla aplikacji MEC będzie kierowany do obsługi w UPF uruchomionym w Klasterze MEC (A-UPF2). Tym samym A-UPF2 obsługuje wyłącznie ruch przeznaczony dla aplikacji MEC znajdujących się w tym samym klastrze, w którym sam jest uruchomiony. Trasę pakietów do poszczególnych aplikacji (znajdujących się w Internecie / w Systemie MEC) można śledzić bezpośrednio z poziomu telefonu, do którego zapewniony jest zdalny pulpit.

4.2 Analiza opóźnień na potrzeby rozwiązań Przemysłu 4.0

Jedną z istotnych i oczekiwanych usług oferowanych w systemach 5G jest usługa URLLC zapewniająca możliwości niezawodnej komunikacji z niewielkim opóźnieniem. Niestety pomimo dużego zapotrzebowania na

tego typu łączność, w chwili obecnej, na rynku komercyjnym nie są dostępne terminale końcowe pozwalające na realizację takich scenariuszy. Nie wstrzymuje to jednak intensywnie prowadzonych obecnie prac badawczych ukierunkowanych na wykorzystanie rozwiązań 5G NR na potrzeby instalacji systemów Przemysłu 4.0.

W związku z wspomnianymi ograniczeniami istotną staje się ocena wartości parametrów komunikacji (głównie opóźnienia) możliwych do uzyskania przy wykorzystaniu dostępnych obecnie systemów 5G oraz działania mające na celu ich poprawę, dzięki odpowiedniej konfiguracji parametrów stacji gNB i rdzenia sieci. Na potrzeby realizacji tego typu prac, w ramach Laboratorium 5G Politechniki Gdańskiej, wykorzystywana jest stacja bazowa Amarisoft Callbox Classic pracująca w paśmie 3,95 GHz w konfiguracji MIMO 2x2 i szerokości kanału 40 MHz. Elementem systemu Przemysłu 4.0 podłączonym do, tak utworzonej, prywatnej sieci 5G jest mobilna platforma kołowa Husarion Panther wyposażona w czujniki wizyjne w postaci kamery przemysłowej Milesight MS-C2971-X23RPE, LIDARu Outer OS0-128U i modułu komunikacyjnego Siemens SCALANCE MUM853-1. Na platformie mobilnej uruchomione zostały usługi przesyłania obrazu z kamery oraz danych z czujnika LIDAR do serwera brzegowego, na którym realizowane są wizualizacja oraz analiza danych. Na Rys. 3. przedstawiono przykładowe zestawienie wartości opóźnienia RTT (ang. *Round Trip Time*) prezentujących wyniki uzyskane dla domyślnej konfiguracji stacji bazowej zaproponowanej przez producenta oraz po zastosowaniu konfiguracji pozwalającej na zmniejszenie opóźnienia.



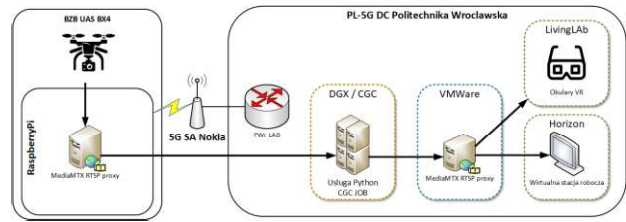
Rys. 3. Histogram wartości opóźnienia RTT dla analizowanych scenariuszy w przykładowym eksperymencie oceny stosowalności rozwiązań 5G NR na potrzeby komunikacji w systemach Przemysłu 4.0

Otrzymane wyniki wskazują, że odpowiednie przygotowanie konfiguracji systemu 5G pozwala znacząco zredukować czas wymiany wiadomości sterowania platformą mobilną. Zaprojektowane i zbudowane stanowisko wykorzystywane jest do dalszych prac w tym zakresie.

4.3 Eksperyment z wykorzystaniem drona i zasobów GPU

Jak wcześniej wspomniano infrastruktura PL 5G obejmuje nie tylko obszar sieci 5G, ale również szeroko rozumianego otoczenia. Jednym z przykładowych scenariuszy wiążących wiele elementów wyposażenia, w tym

przypadku PWR jest scenariusz przetwarzania obrazu pozyskiwanego w czasie zbliżonym do rzeczywistego z bezzałogowego statku powietrznego.



Rys. 4. Scenariusz usługi analizy obrazów wideo

Drony firmy BZB UAS wyposażone w komputery jednopłytkowe oraz modemy 5G umożliwiają bezpośrednią transmisję z kamer (wideo, IR oraz multispektralnej) z wykorzystaniem protokołu RTSP. Do komunikacji wykorzystywana jest sieć międzyregionalna 5G. Na tym etapie możliwe jest monitorowanie parametrów połączenia m.in. na stacji bazowej poprzez analizę liczników jak również poprzez pozyskanie zrzutów ruchu pomiędzy elementami rdzenia, dla lepszego zrozumienia problemów np. podczas przełączeń między stacjami.

Strumień multimedialny jest przekazywany dalej do środowiska obliczeniowego, gdzie mogą być uruchamiane usługi takie jak wykrywanie obiektów w obrazie. Kolejnym etapem jest wykorzystanie międzyregionalnego zasobu obliczeniowego w postaci maszyny wirtualnej, gdzie uruchomiony jest multimedialny serwer proxy. Takie podejście umożliwia rozdzielenie strumienia i jego wykorzystanie w innych eksperymentach.

5 PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono infrastrukturę Krajowego laboratorium sieci i usług 5G (PL 5G), które zostało utworzone dla realizacji praktycznych badań dotyczących rozwoju techniki 5G oraz przyszłych generacji systemów komunikacji mobilnej tj. 6G. W szczególności omówiono architekturę laboratorium obejmującą ogólnopolską sieć międzyregionalną oraz lokalne sieci prywatne, wyposażenie laboratorium a także przykładowe eksperymenty przeprowadzone w jego wykorzystaniem. Ponadto w artykule przedstawiono zarys tematyki badań dotyczących rozwoju systemów 5G i 6G, które mogą być prowadzone z wykorzystaniem infrastruktury PL 5G. Przedstawiony zarys eksperymentów nie wyczerpuje pełnego spektrum możliwości zastosowania infrastruktury PL 5G. Należy podkreślić, iż laboratorium jest otwarte dla realizacji eksperymentów zarówno przez jednostki badawcze jak i podmioty komercyjne a także jednostki potencjalnie zainteresowane wdrożeniem techniki 5G w różnych obszarach działalności. Dostęp do laboratorium i realizacja eksperymentów może być prowadzona w sposób zdalny z wykorzystaniem strony internetowej portal.pl5g.pl. Zasady dostępu, regulaminy korzystania i cenniki są również dostępne na wspomnianym portalu.

Prace, których wyniki są przedstawione w tym artykule, były prowadzone w ramach projektu POIR.04.02.00-00-D008/20, pt. „Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem”, współfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020.

LITERATURA

- [1] J. Woźniak (ed), „Tendencje w rozwoju polskiej i światowej telekomunikacji i teleinformatyki”, Wojskowa Akademia Techniczna, 2020, isbn: 978-83-7938-292-7
- [2] T. Taleb et al, „White Paper on 6G Networking. 6G Research Visions”, No. 6, University of Oulu, 2020 <http://urn.fi/urn:isbn:9789526226842>
- [3] Ö. Bulakçı et al, "Towards Sustainable and Trustworthy 6G: Challenges, Enablers, and Architectural Design", Boston-Delft, 2023, <http://dx.doi.org/10.1561/9781638282396> (dostęp 1.07.2024)
- [4] SK Telecom, “6G White Paper: 5G Lessons Learned, 6G Key Requirements, 6G Network Evolution, and 6G Spectrum”, SK Telecom, 2023 <https://bit.ly/4a27B9I>, dostęp 1.07.2024,
- [5] Inicjatywa SLICES, <https://www.slices-ri.eu/> (dostęp 1.07.2024)
- [6] W. Burakowski et al, “Planowane krajowe laboratorium badawcze sieci i usług 5G wraz z otoczeniem”, Przegląd telekomunikacyjny - wiadomości telekomunikacyjne, nr 9, 2022, strony 110-115, DOI:10.15199/59.2022.4.3.
- [7] M. Poles, L. Bonati, S. B. Salvatore D'Oro, T. Melodia, „Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges” CoRR, 2022, <https://arxiv.org/abs/2202.01032>
- [8] B.M. Khorsandi, M. Hoffmann, M. Uusitalo, M-H. Hamon, B. Richerzhagen, G. D’Aria, A. Gati, D. Lopez (ed), “Deliverable D1.3: Targets and requirements for 6G - initial E2E architecture”, Hexa-X project, 2022, https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2022/03/Hexa-X_D1.3.pdf (dostęp 1.07.2024)
- [9] “Zero-touch network and service management (ZSM); terminology for concepts in ZSM,” Sierpień 2023, https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ZSM/001_099/007/02.01.01_60/gs_ZSM007v020101p.pdf (dostęp 1.07.2024)
- [10] A. Bęben, et al, “Implementacja architektury systemu SyMEC”, Przegląd Telekomunikacyjny - wiadomości telekomunikacyjne, no 4, 2022, strony 315-320.

