

Koncepcja układu pomiarowego do badania parametrów sieci 5G

Concept of a measurement system for testing 5G network parameters

Streszczenie. W artykule przedstawiono najważniejsze informacje o sieci 5G oraz ich podstawowe parametry, istotne z punktu widzenia nowoczesnych systemów pomiarowych. Przedstawiono koncepcję układu pomiarowego do pomiaru tych parametrów oraz do badania łączności 5G i jej wpływu na inne technologie transmisji bezprzewodowej takie jak Wi-Fi czy ZigBee.

Abstract. The article presents the most important information about the 5G network and its basic parameters, important from the point of view of modern measurement systems. It presents the concept of a measurement system for measuring these parameters and for examining 5G communication and its impact on other wireless transmission technologies such as Wi-Fi or ZigBee.

Słowa kluczowe: technologia 5G, Internet Rzeczy, układ pomiarowy, sieci bezprzewodowe

Keywords: 5G networks, Internet of Things, measurement system, wireless networks

Wprowadzenie

Technologie telekomunikacyjne piątej generacji oznaczane w skrócie 5G stają się coraz bardziej powszechne. Szacuje się, że obecnie z sieci 5G korzysta 1,9 miliarda ludzi na całym świecie, co odpowiada około 20% wszystkich abonentów. Technologia ta zwykle kojarzona jest z Internetem Rzeczy, ponieważ często jest używana do poprawy jakości życia obywateli poprzez automatyzację oraz zapamiętywania danych [1].

5G stwarza wiele nowych możliwości biznesowych poprzez uzupełnienie istniejących technologii o Przemysł 4.0, urządzenia IoT i inteligentne miasta. Daje to możliwość budowania nowoczesnych, inteligentnych systemów pomiarowych o znacznej liczbie połączonych ze sobą jednostek, które uczestniczą w przekazywaniu i akwizycji danych [2].

Technologia 5G oferuje znacznie większą złożoność niż poprzednie generacje systemów telekomunikacyjnych, wprowadzając nowy typ sieci zaprojektowany, aby połączyć wiele urządzeń cyfrowych w system pomiarowy, na przykład pojazdy inteligentne, urządzenia oraz infrastrukturę drogową, zapewniając jednocześnie bezpieczeństwo, duży zasięg oraz zwiększoną wydajność. Biorąc pod uwagę wszystkie te aspekty wprowadzone przez technologię 5G, dla optymalnego działania konieczne są różne oceny niezawodności. Pojawia się więc konieczność pomiaru podstawowych parametrów istotnych z punktu widzenia systemów pomiarowych i systemów IoT.

Aby ocenić jakość i wydajność sieci 5G, przeanalizowano kilka wskaźników wydajności związanych z transmisją danych, takich jak zasięg sieci 5G, opóźnienie, siła i jakość sygnału, stosunek sygnału do szumu, przepustowość, jakość kanału komunikacyjnego i moc transmisji. Uzyskane wyniki dotyczą różnych aspektów komunikacji komórkowej i mogą być wykorzystane do analizy wydajności sieci 5G. Aby potwierdzić, że sieć może spełnić niezbędne wymagania danego systemu, należy przeprowadzić pomiary różnych wielkości w czasie rzeczywistym w celu sprawdzenia wartości określonych wskaźników wydajności. W tym celu opracowano różne metody pomiarów w czasie rzeczywistym, które obejmują ocenę wydajności sieci 5G [3, 4].

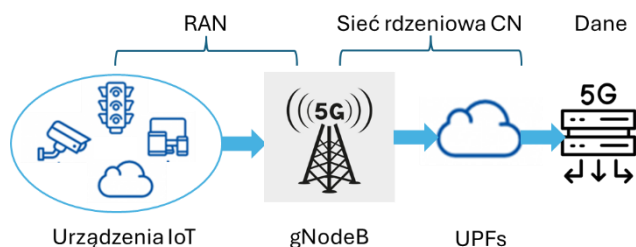
Parametry sieci 5G

Z technicznego punktu widzenia 5G działa w szerszym zakresie widma w porównaniu z tradycyjnymi technologiami bezprzewodowymi. W zakresie od 24 do 100 GHz zapewnia

komunikację o stosunkowo niewielkim opóźnieniu i dużej przepustowości, ale podlega niekorzystnym warunkom wynikającym z działania na wysokiej częstotliwości [5]. Sieć 5G działa w dwóch podstawowych pasmach częstotliwości: Sub 6 GHz i mmWave (fala milimetrowa). Chociaż mmWave oferuje większą szybkość przesyłania danych, ma ograniczony zasięg i łatwo ją zakłócać. Z drugiej strony pasmo Sub 6 GHz, które obejmuje częstotliwości poniżej 6 GHz, zapewnia większy zasięg i może przenikać przez przeszkody, takie jak budynki i ściany [5].

Przeciwdziałając ograniczeniom środowiskowym, 5G zostało uzupełnione o nowe technologie. Najpopularniejsze z nich to kształtowanie wiązek, masowe MIMO, możliwość przesyłania tzw. mini komórek (ang. small cell), fale mmWave i elastyczny podział sieci. Szerszy opis tych zagadnień przedstawiono m.in. w pracy [1].

Ewolucja sieci komórkowych miała na celu poprawę elastyczności i wydajności sieci, ponieważ liczba użytkowników rosła gwałtownie z roku na rok. Ogólna architektura sieci 5G została przedstawiona na rysunku 1. Można w niej wyróżnić dwie podstawowe części: sieci dostępu radiowego RAN (ang. Radio Access Network) i sieć rdzeniową CN (ang. Core Network) [6]. Komponent RAN tworzy łącze pomiędzy sprzętem użytkownika UE (ang. User Equipment), przedstawionym na rysunku 1 jako urządzenia Internetu Rzeczy (IoT), a stacją bazową, która w przypadku sieci 5G jest nazywana bazą węzła nowej generacji (gNodeB lub gNB). Jest ona odpowiedzialna za zarządzanie zasobami radiowymi, mobilnością oraz kontrolę nośnika radiowego [7].



Rys. 1. Architektura sieci 5G

Komponent CN odpowiada za połączenie RAN z siecią danych DN (ang. Data Network) i ogólnie składa się z jednej lub większej liczby płaszczyzn funkcji użytkownika UPF (ang. User Plane Functions) [8]. Natomiast CN składa się ze stosu protokołów, który obejmuje trzy płaszczyzny: użytkownika,

sterowania i zarządzania. Szerzej te kwestie zostały opisane w pracy [9].

Do najistotniejszych parametrów opisujących działanie oraz jakość sieci 5G można zaliczyć m.in.: przepustowość, opóźnienie transmisji, czas podróży pakietu w obie strony (end-to-end delay), ilość przesyłanych danych w jednostce czasu oraz zasięg i efektywność energetyczną. Z punktu widzenia systemów pomiarowych i spokojniejszych nimi systemów IoT, bardzo istotne są parametry czasowe transmisji, czyli głównie opóźnienie.

Założeniem sieci 5G jest zagwarantowanie szybkości transmisji Gbps i zmniejszenie opóźnień poniżej 10 ms (w niektórych przypadkach poniżej 1 ms) dzięki technologii New Radio (NR) i bardziej płaskiej architekturze sieci rdzeniowej [10]. Jednak praktyczna wydajność napotyka wiele czynników ograniczających, np. ograniczoną przepustowość kanałów transmisyjnych, słabą interakcję między warstwami w stosie sieciowym i zakłócenia łącza z powodu częstego przekazywania danych między komórkami (o ograniczonym zasięgu). Aby poznać, jak te czynniki objawiają się w praktyce, dokonuje się pomiaru wydajności głównych protokołów warstwy transportowej, wraz ze zwiększeniem opóźnienia sieci. Taki pomiar powinien pozwolić na identyfikację „wąskich gardeł” i źródeł anomalii, które mogą uniemożliwić 5G uzyskanie oczekiwanej wydajności w systemie pomiarowym IoT.

Koncepcja układu pomiarowego

Poniżej przedstawiono koncepcję układu do badań i pomiaru parametrów sieci 5G umożliwiającego zbadanie wybranych zależności. Do tych parametrów zalicza się wymienione wcześniej przepustowość, opóźnienia transmisyjne, stopę błędów, moc sygnału w obecności różnego rodzaju zakłóceń aktywnych (inne sieci bezprzewodowe) jak i pasywnych (ściany budynków).

W celu pomiaru opóźnienia transmisji pomiędzy dwoma potencjalnie bardzo oddalonymi od siebie miejscami, potrzebne są dwa przyrządy pomiarowe z zsynchronizowanymi zegarami czasu. Może to być zrealizowane przewodowo (dodatkowym połączeniem) lub za pomocą globalnego systemu nawigacji satelitarnej (GNSS), takiego jak GPS. Dokładny czas jest rejestrowany w każdym pakiecie danych testowych, gdy opuszcza on nadajnik testowy. Natomiast przyrząd odbiorczy porównuje go z dokładnym czasem przybycia i oblicza, ile czasu zajęło pakietowi dotarcie do miejsca przeznaczenia — jest to opóźnienie sygnału.

Pomiaru opóźnienia można, w najprostszym przypadku, dokonać przy użyciu konwencjonalnego sprzętu użytkownika, jak np. smartfona z systemem Android, podłączonego do publicznej sieci. Opóźnienia są rejestrowane przy użyciu standardowej procedury ICMP (ping warstwy 3). Wykonywanie takich dedykowanych testów ping jest pierwszym wyborem przy pomiarze opóźnienia łącza komunikacyjnego w obecnych systemach.

Obecnie ta technika pomiaru opóźnień jest szeroko stosowana i daje cenne informacje na temat wydajności sieci. Jednak metoda ta daje tylko zgrubne wyniki i może nie odzwierciedlać rzeczywistego opóźnienia łącza komunikacyjnego dla dedykowanej aplikacji podczas komunikacji. W związku z tym należy określić nowe rozwiązania, które umożliwią monitorowanie krytycznych pod względem opóźnienia aplikacji IoT. Ponadto systemy o niskim opóźnieniu jak 5G wymagają nowych metod pomiaru opóźnienia na różnych poziomach wewnątrz rozważanego systemu. Stąd potrzeba budowy dedykowanego układu pomiarowego.

Zgodnie z definicją 3GPP, 5G to mobilna technologia dostępu bezprzewodowego, która powinna obsługiwać

aplikacje krytyczne czasowo. Urządzenia mobilne, czasami nazywane sprzętem użytkownika (UE), nawiązują połączenia bezprzewodowo ze stacjami bazowymi 5G, które z kolei zapewniają połączenia z innymi szerszymi sieciami telekomunikacyjnymi. Jeśli UE przemieszcza się w zasięgu stacji bazowej i poza nim, to połączenie zostanie przekazane do sąsiedniej stacji bazowej. Ponieważ rozmiar każdej komórki 5G może być dość mały, ten proces przekazywania może występować często.

To rodzi pytanie, jak zmierzyć opóźnienie między dwiema lokalizacjami, zwłaszcza gdy co najmniej jedno z urządzeń się porusza. Po pierwsze, należy upewnić się, że zegary referencyjne na obu końcach pomiaru są ze sobą zsynchronizowane. Protokół transmisji musi obsługiwać ramki testowe Ethernet zawierające dokładne znaczniki czasu, które mają być przesyłane w obu kierunkach. Następnie sprzęt testowy musi być w stanie zapisać wynik wraz z jego lokalizacją geograficzną, aby jego operator mógł obliczyć wartość opóźnienia.

W celu dokonania pomiaru podstawowych parametrów transmisyjnych istotne jest zbudowanie odpowiedniego układu pomiarowego, który pozwoliłby na ich wstępny pomiar bez konieczności angażowania operatora mediów.

W najprostszej wersji do budowy układu pomiarowego można wykorzystać dwa telefony komórkowe oraz darmowe oprogramowanie dla komputera wraz z odpowiednią anteną w celu przetestowania działania takiego systemu. Jednak to rozwiązanie nie daje możliwości analizy parametrów przesyłu pojedynczych pakietów, opóźnień komunikacyjnych. Rozwiązanie, w którym używa się różnych systemów operacyjnych najczęściej okazuje się błędnym, ze względu na nieustalony wpływ systemu na wysyłanie i odbieranie danych oraz proces ich kolejowania w buforach.

Do pomiaru podstawowych parametrów transmisji 5G zaprojektowano układ pomiarowy składający się z wyspecjalizowanych modułów nadawczo-odbiorczych SIMCom 5G oraz mikrokomputera Raspberry Pi (rys. 2).



Rys. 2. Moduł bezprzewodowy 5G

Użyte moduły są oparte na układzie Qualcomm Snapdragon X55, który gwarantuje wielozakresową obsługę częstotliwości, dzięki czemu urządzenie może być stosowane w wielu krajach i regionach. Wspiera sieci 5G SA lub NSA i jest wstecznie kompatybilny z siecią 4G oraz 3G. Obsługuje transfer danych do 2,4 Gb/s. SIM8202G-M2 wspiera pozycjonowanie w ramach systemów GPS, GLONASS oraz funkcję Dial-up oraz komunikację z urządzeniami w chmurze. Posiada duże możliwości rozbudowy dzięki bogatym interfejsom, w tym UART, PCIe, USB3.1, GPIO itp. Moduł zapewnia dużą elastyczność i łatwość integracji z aplikacją klienta. Karta SIM8202-M2 wykorzystuje interfejs w standardowym formacie M.2, typ 3052-S3-B. Polecenia AT serii SIM8200-M2 są kompatybilne z modułami serii SIM7912G/SIM8300G-M2. Wybrane parametry układu zebrano w tabeli 1 [11].

Tabela 1. Parametry układu nadawczo-odbiorczego SIM8202

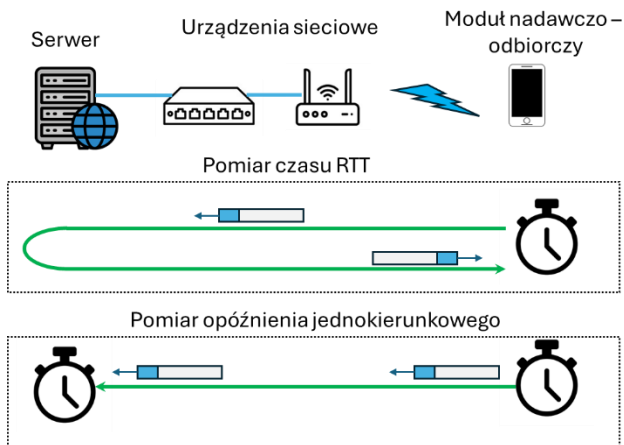
Procesor	Qualcomm Snapdragon X55
Obsługiwane pasma	Sub-6G, LTE, WCDMA, GNSS
Prędkość danych 5G	2.4 Gbps (DL) / 500 Mbps (UL)
Prędkość danych LTE	1 Gbps (DL) / 200 Mbps (UL)
System operacyjny	Windows/Linux/Android
Protokoły komunikacyjne	TCP/IP, IPV4, IPV6, FTP, FTPS, HTTP, HTTPS, MQTTS, DNS, SMS, Dial-Up
Antena	6 × IPEX-4
Zasilanie	3.135~4.4V

Płytkę uruchomieniową modułu 5G wyposażoną została w złącze M2, dzięki czemu umożliwia połączenie z różnymi modułami komunikacyjnymi 4G lub 5G ze złączem M2. Na płytce umieszczono również port USB 3.1, gniazdo audio, dekodery oraz gniazdo karty SIM. Do Raspberry Pi zestaw podłączany jest za pomocą standardowego złącza 40-pinowego.

Szczególnie istotna jest możliwość automatycznego rejestrowania położenia geograficznego modułu w przypadku pomiarów w terenie, które są planowane w drugiej kolejności. Do wstępnego przetestowania transmisji 5G wystarczają dwa takie moduły obsługiwane z poziomu minikomputera Raspberry Pi za pomocą komend AT. Mobilność modułów jest kolejnym planowanym krokiem rozbudowy układu pomiarowego.

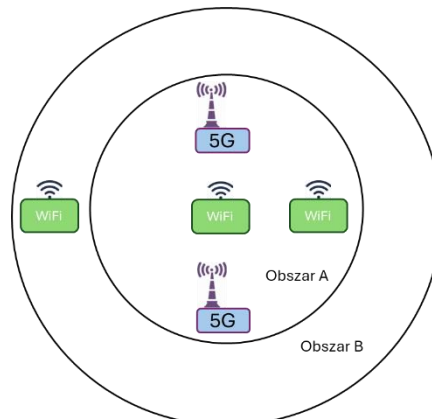
Metodyka wykonania pomiarów

Ogólnie opóźnienie jest określone jako czas od momentu, gdy dane użytkownika przechowywane w jednym pakiecie danych IP opuszczają terminal, aż do momentu, gdy dotrą do partnera komunikacyjnego (innego terminala, serwera itp.). Istnieją dwa typy opóźnień: czas obiegu (ang. round-trip time, RTT) nazywany też czasem podróży w obie strony i opóźnienie jednokierunkowe (ang. one-way latency, end-to-end delay). W trakcie pomiaru mierzone są również inne parametry transmisyjne, zwłaszcza związane z prędkością oraz pasmem (rys.3.).



Rys. 3. Metody pomiaru różnego typu opóźnień

Koncepcję rozmieszczenia modułów przedstawiono na rysunku 4. Założeniem układu jest po pierwsze zbadanie parametrów sieci 5G pracującej w warunkach pomieszczenia, a następnie dodawanie modułów Wi-Fi w różnej konfiguracji do przestrzeni roboczej. Celem implementacji modułów jest przeprowadzenie pomiarów transmisji 5G w warunkach zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez sieć bezprzewodową Wi-Fi pracującą na tej samej częstotliwości i obserwacja jej wpływu na przepustowość i opóźnienie sieci 5G.



Rys. 4. Idea układu pomiarowego

Celem prowadzonych prac jest nie tylko pomiar parametrów poszczególnych sieci, ale przede wszystkim zbadanie ich wzajemnego oddziaływania w celu uzyskania informacji dotyczących najlepszej możliwej konwergencji obu technologii. Efektywna konwergencja 5G oraz Wi-Fi pozwoli na wyeliminowanie wielu problemów wdrożeniowych 5G do których należą zwłaszcza: problemy techniczne związane z interferencjami różnych technologii, potrzeba wielu rozbudowanych i kosztownych architektur zapewniających pełny zasięg oraz kwestie związane z bezpieczeństwem danych i ludzi.

Modelowanie i pomiar opóźnień w sieci 5G

W trakcie wykonywania pomiarów założono, że transmisja danych między modułami pomiarowymi będzie się odbywała w ramach jednego operatora komórkowego MNO (ang. Mobile Network Operator). Natomiast jeden z modułów będzie miał możliwość poruszania się (oddalania lub przybliżania liniowego) w stosunku do modułu stacjonarnego (rejestratora danych). Jako, że parametry czasowe takiego toru transmisyjnego uznano za najistotniejsze z punktu widzenia aplikacji IoT oraz systemów pomiarowych dlatego też ich pomiar i modelowanie przeprowadzono jako pierwsze.

Opóźnienie sieci t_{E2E} można w takiej sytuacji opisać zależnością:

$$(1) \quad t_{E2E} = t_{RAN} + t_{CN} + t_{AS} = t_{radio} + t_{TN} + t_{CN} + t_{AS}$$

gdzie:

t_{RAN} – opóźnienie wprowadzane przez sieć dostępową, będące sumą opóźnień t_{radio} wprowadzanego przez nadajnik radiowy i opóźnień t_{TN} wprowadzanego przez sieć transportową (TN);

t_{CN} – opóźnienie wprowadzane przez sieć rdzeniową CN;

t_{AS} – opóźnienie wprowadzane przez serwer aplikacji AS, które może składać się z wielu komponentów uzależnionych od specyfiki aplikacji użytkownika (UPF).

Dla każdej ze składowych wzoru (1) należy wyznaczyć eksperymentalnie wartość opóźnienia przy nadawaniu danych UP (ang. uplink) i przy pobieraniu danych DL (ang. downlink). Następnie należy wyznaczyć opóźnienie całkowite każdej składowej jako:

$$(2) \quad t = t_{UP} + t_{DL}$$

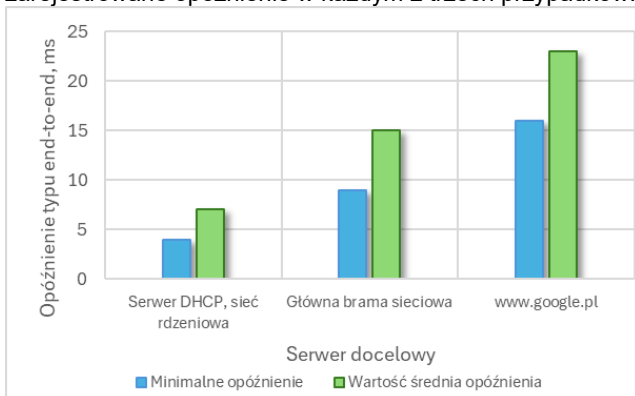
Wartość średnia opóźnienia jest równa:

$$(3) \quad \bar{t} = \bar{t}_{UP} + \bar{t}_{DL}$$

a jej skumulowana funkcja dystrybucji CDF wynosi:

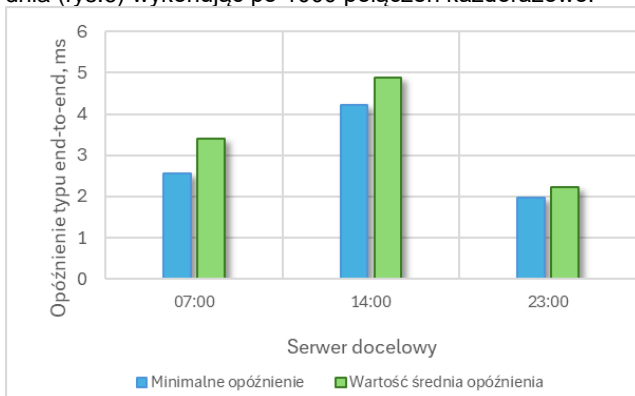
$$(4) \quad \mathcal{L}(t) = \mathcal{L}_{UP}(t) * \mathcal{L}_{DL}(t)$$

Wstępnie przeprowadzone pomiary przy użyciu tylko jednego zaprojektowanego rejestratora danych przedstawiono na rysunku 5. Celem pomiaru było przetestowanie poprawności połączenia i możliwości rejestracji danych. Wykonano po 100 połączeń modułu do trzech różnych serwerów i zapisano czas połączenia. Na wykresie zestawiono jedynie minimalne i średnie zarejestrowane opóźnienie w każdym z trzech przypadków.



Rys. 5. Wyniki wstępnych pomiarów opóźnienia

Następnie wykonano serię wstępnych pomiarów w zaprojektowanym układzie pomiarowym pomiędzy dwoma modułami bezprzewodowymi 5G, co bardziej odzwierciedla przypadek, jaki może wystąpić w sieciach pomiarowych przeznaczonych do pracy w systemach IoT – czyli transport danych z jednego elementu (np. sensora), przez sieć 5G do drugiego elementu (np. lokalnego koncentratora danych lub serwera). Pomiar przeprowadzono w trzech różnych porach dnia (rys.6) wykonując po 1000 połączeń każdorazowo.



Rys. 6. Wyniki pomiaru opóźnienia w różnych porach dnia

Warto zwrócić uwagę, że czas opóźnienia dla komunikacji w samym układzie pomiarowym jest mniejszy niż przy próbach połączenia do popularnych serwerów usług.

Podsumowanie

Wstępne pomiary pokazały jak bardzo mogą różnić się od siebie czasy opóźnień transmisji pomiędzy różnymi serwerami docelowymi, ale także w przypadku transmisji pomiędzy różnymi modułami bezprzewodowymi oraz jak duży wpływ na badany parametr ma pora dnia. Potwierdza to sensowność prowadzenia dalszych badań mających na celu poznanie rzeczywistych parametrów technologii komunikacyjnej piątej generacji, zwłaszcza w kontekście jej zastosowania w systemach pomiarowych.

Jednym z głównych celów technologii 5G jest umożliwienie obsługi aplikacji IoT, w których wartość opóźnień jest wielkością krytyczną. Możliwość obsługi zaawansowanych usług (np. pomiarów i sterowania samochodów autonomicznych lub rozbudowanych mobilnych systemów pomiarowych) przez 5G przy użyciu komunikacji V2N zależy od jej zdolności do spełnienia wymagań dotyczących opóźnień.

Prowadzone obecnie badania skupiają się głównie na ocenie przydatności części RAN i są ograniczone przez wdrożenia w kontrolowanych środowiskach. Nie obejmują one wszystkich aspektów wpływających na opóźnienie typu E2E (ang. end to end). Dlatego też podjęto próbę wykonania odpowiedniego układu pomiarowego, który umożliwiłby pomiar nie tylko samych opóźnień transmisji, ale także innych parametrów systemu 5G przydatnych dla dedykowanych systemów IoT.

Układ ma możliwość wprowadzenia zakłócającej transmisji w standardzie WiFi. Wstępnie przeprowadzone pomiary pokazują przydatność takiego rozwiązania do oceny parametrów zaprojektowanej sieci. Autorzy planują także wykonanie pomiarów opóźnień, przepustowości i stopy błędów w sytuacji zaburzeń elektromagnetycznych oraz pasywnych, a następnie wprowadzenie mobilności jednego z układów i wyznaczenie dystrybucji uzyskanych rozkładów opóźnień. Komplet uzyskanych wyników pozwoli na zweryfikowanie przedstawionego modelu opóźnień.

Autorzy: dr. inż. Beata Krupanek, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: beata.krupanek@polsl.pl; dr. inż. Ryszard Bogacz, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: ryszard.bogacz@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Krupanek B.; Bogacz R.; Zastosowanie technologii 5G w IoT, *Przegląd Elektrotechniczny*, 06 (2024), 188-191
- [2] Krupanek B., Bogacz R.: Wymagania Internetu Rzeczy a możliwości systemu 6G, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11 (2022), 165-168
- [3] Rischke J., Sossalla P., Itting S., Fitzek F. H. P., Reisslein M., 5G campus networks: A first measurement study, *IEEE Access*, vol. 9 (2021), 121786–121803
- [4] Xu D., Zhou A., Zhang X., Wang G., Liu X, An C., Shi Y., Liu L., Ma H., Understanding operational 5G: A first measurement study on its coverage, performance and energy consumption, *Proc. Annu. Conf. ACM Special Interest Group Data Commun Appl. Technol. Architectures, Protocols Comput. Commun.*, 07 (2020), 479–494
- [5] Gupta, N.; Sharma, S.; Juneja, P.K.; Garg, U. Sdnfv 5g-iot: A framework for the next generation 5g enabled iot., *Proceedings of the 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)*, Dehradun, India, 21–22 August 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, (2020), 289–294
- [6] Lazar R. G., Caruntu C. F., Patachia-Sultanoiu C., Simulated and practical approach to assess the reliability of the 5G communications for the Uu interface, *Proc. 14th Int. Conf. Commun. (COMM)*, 06 (2022), 1-6
- [7] Launay F., NG-RAN network—Functional architecture. *NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface*, NJ, USA: Wiley, (2021), 1-29
- [8] Saha R. K., Nanba S., Nishimura K., Kim Y.-B., Yamazaki K., RAN architectural evolution framework toward 5G and beyond cellular—An overview. *Proc. IEEE 29th Annu. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, 09 (2018), 592-593
- [9] Pateromichelakis E., Moggio F., Mannweiler C., Arnold P., Shariat M., Einhaus M., et al., End-to-end data analytics framework for 5G architecture, *IEEE Access*, vol. 7 (2019), 40295-40312
- [10] Dongzhu Xu, Anfu Zhou, Xinyu Zhang, Guixian Wang, Xi Liu Congkai An, Yiming Shi, Liang Liu, Huadong Ma.; Understanding Operational 5G: A First Measurement Study on Its Coverage, *Performance and Energy Consumption*. SIGCOMM '20, Virtual Event, NY, USA, August 10–14, (2020)
- [11] Dokumentacja układu SIM8202G-M2 na stronie internetowej www.waveshare.com