

Dwupasmowa stacja bazowa oparta na technice SDR przeznaczona do pracy w systemach opomiarowania zużycia mediów

Streszczenie. W artykule zaprezentowano prototyp dwuzakresowej, wieloprotokółowej stacji bazowej do zastosowań w systemach inteligentnego opomiarowania zużycia mediów. Wykorzystując takie techniki jak: automatyczna adaptacja warstwy fizycznej, wielopasmowość (169 MHz i 868 MHz), technikę SDR oraz autorski, wąskopasmowy protokół transmisji danych, uzyskano poprawienie zasięgu łącza radiowego bez zwiększenia kosztów liczników mediów. Dzięki autonomicznemu systemowi odczytu możliwy jest ciągły monitoring zużycia mediów oraz instalacji do ich przesyłu.

Abstract. This paper presents a designed prototype of a two-band multi-protocol base station for smart-metering applications. Using such techniques as the automatic physical layer adaptation, multi band design (169 MHz and 868 MHz), SDR technique and custom radio protocol, we have increased radio coverage without increasing cost of smart meters. Thanks to the autonomous readouts, constant monitoring of smart-metering system is allowed. (**Two-band, SDR-based base station for smart metering applications**).

Słowa kluczowe: stacja bazowa, inteligentny system opomiarowania mediów, SDR radio definiowane programowo, zasięgi radiowe.

Keywords: base station, smart metering, SDR software defined radio, radio propagation.

Wstęp

Nadal duża część odczytów liczników zużycia mediów, w tym wodomierzy, jest wykonywana poprzez bezpośredni odczyt wskazań licznika pomiarowego przez obsługę lub inkasenta. Z uwagi na wady takiego podejścia związane między innymi z dużymi opóźnieniami oraz w wielu wypadkach koniecznością angażowania odbiorcy w proces odczytu, metoda ta jest uciążliwa, coraz bardziej kosztowna i nie daje możliwości rozwoju usług dodatkowych. Z tego powodu istnieje światowy trend do automatyzacji odczytów liczników zużycia mediów (ang. smart-metering). Dominującą techniką w tym zakresie została łączność radiowa [1,2,3]. Obecnie większość liczników wyposażona jest w łączność bezprzewodową, umożliwiającą odczyt półautomatyczny za pomocą specjalizowanych odbiorników. W Europie dominującym standardem w tym obszarze pozostaje WM-Bus [4]. Ze względu na ograniczone zasięgi łączności systemów radiowych pracujących w standardzie WM-Bus nadal niezbędna jest praca inkasenta, który przemieszczając się zbiera pomiary [5,6].

W niniejszym artykule zaprezentowano stację bazową wykorzystującą technikę SDR (ang. Software-Defined Radio) opartą na koncepcji pikokomórek radiowych (ang. picocell) do budowy systemu odczytów liczników zużycia mediów ze szczególnym uwzględnieniem wodomierzy. W ten sposób liczniki mogą mieć bardzo krótkie czasy aktualizacji, co pozwoli na stworzenie inteligentnej sieci do przewidywania i monitorowania zużycia mediów (np. wody). Dodatkowo można z krótkim czasem reakcji zgłaszać alarmy i nietypowe zachowania w instalacji i implementować bardziej rozbudowane usługi w chmurze.

Protokoły warstwy fizycznej

Zaprojektowana stacja bazowa powinna być w stanie współpracować zarówno z obecnie używaną siecią liczników wyposażonych w aktualnie wykorzystywany w urządzeniach pomiarowych protokół WM-Bus, jak i z zaprojektowanym własnym protokołem. Jedną z głównych wad protokołu WM-Bus jest niewielki zasięg radiowy. Wnika to między innymi na przyjętą stosunkowo wysoką przepływność bitową, modulacji FSK (Frequency Shift Keying) i brak kodowania kanałowego. W ostatnich latach

pojawiają się protokoły zaprojektowane specjalnie dla podobnych sieci (takich jak LoRaWAN, SigFox, NB-IoT), które wykorzystują techniki poprawy zasięgu radiowego [1,2]. Jednakże, ze względu na licencje i ceny podzespołów elektronicznych, koszty produkcji czujnika w porównaniu do aktualnie stosowanego protokołu WM-Bus są zdecydowanie wyższe. Z tego powodu w projekcie zdecydowano się na zaprojektowanie i wykorzystanie własnego protokołu, silnie optymalizowanego pod wymagania rynku, z adaptacyjną warstwą radiową. Zaprojektowana warstwa fizyczna wykorzystuje modulację GFSK ze zmienną szybkością bitową w granicach od 0,5 kbps do 50 kbps. Dostosowanie szybkości bitowej realizowane jest w ramach sprzężenia zwrotnego uwzględniającego bilans łącza radiowego. Zmiana szybkości bitowej pozwala na poprawę czułości odbiornika nawet o 17 dB. Dzięki automatycznemu zwiększaniu szybkości bitowej, nakładki nadają pakiet w krótszym czasie, co pozwala na zwiększenie pojemności systemu oraz ogranicza zużycie energii przez nakładkę.

Praca w wielu pasmach radiowych

Innym zaimplementowanym sposobem na zwiększenie budżetu łącza radiowego jest wykorzystanie niższej częstotliwości. Należy zaznaczyć, iż większość liczników pracuje w paśmie ISM 868 MHz (Industrial, Scientific and Medical). W prezentowanym projekcie zdecydowano się na wykorzystanie pasma 169 MHz, co pozwoliło dodatkowo zwiększyć budżet łącza radiowego o około 9,5 dB [7].

Stacja bazowa pracuje jednocześnie w obu pasmach radiowych (169 MHz i 868 MHz). Na częstotliwości 169 MHz, ze względu na przepisy radiowe (maksymalna szerokość kanału), zastosowano tylko protokół własny, natomiast w paśmie 868 MHz stacja bazowa jest zgodna zarówno z protokołem WM-Bus, jak i autorskim.

Dodatkowo, w paśmie 868 MHz zastosowano technikę „antenna-diversity” w celu dalszej poprawy jakości łącza radiowego w środowisku miejskim przy propagacji wielodrogowej [8,9].

Architektura oparta o SDR

Jedną z kluczowych cech projektu opartego o technikę SDR jest umożliwienie jego ulepszeń i aktualizacji, zarówno

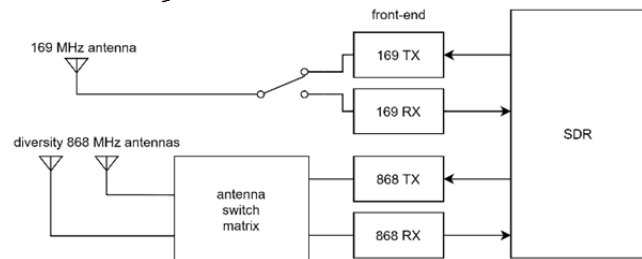
oprogramowania aplikacyjnego jak i części radiowej, bez konieczności dokonywania zmian w warstwie sprzętowej.

Stacja bazowa jest oparta głównie o platformę SoM - ADRV9361-Z7035. Łączy ona w sobie układ SoC (System on Chip) Xilinx Zynq z układem SDR Analog Devices AD9361.

Zastosowanie techniki SDR pozwoliło na obniżenie kosztów związanych z nakładkami pomiarowymi z powodu:

- braku konieczności stosowania wyspecjalizowanego, licencjonowanego układu radiowego,
- poprawki częstotliwości przez jej pomiar przez stację bazową – obniżenie kosztów generatorów zegarów,
- obniżenia wymagań związanych z odbiornikiem w nakładkach - stworzenie niesymetrycznego łącza radiowego,
- redukcji wymiarów i pojemności baterii – zarządzanie przepływnością i częstotliwością przesyłania danych.

Moduł radiowy front-end



Rys. 1 Architektura torów radiowych w stacji bazowej

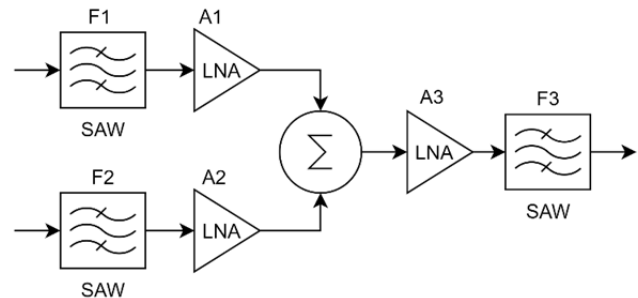
Jedną z kluczowych cech stacji bazowej jest jednoczesna, równoległa praca w obu pasmach (169 MHz i 868 MHz). Zostało to osiągnięte dzięki zastosowaniu układu nadawczo-odbiorczego SDR pracującego w trybie MIMO (ang. Multiple In Multiple Out). Układ AD9361 jest w stanie pracować w tym samym czasie z dwoma torami Rx/Tx. Jego jedynym ograniczeniem jest to, że oba kanały współdzielą tą samą heterodynę. Ze względu na wspólne wykorzystanie częstotliwości środkowej dla obu kanałów odbiornika, jedno z pasm częstotliwości musi być przesunięte do drugiego. W projekcie, ze względu bardziej

uniwersalny charakter pasma 868 MHz zaimplementowano przesunięcie częstotliwości z pasma 169 MHz do pasma 868 MHz (

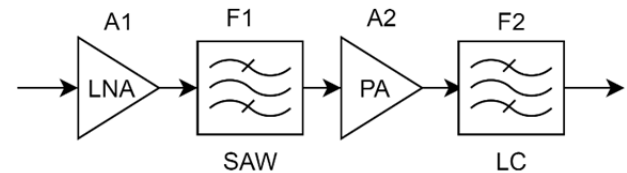
Rys. 1).

Układ front-end pracujący w paśmie 868 MHz

Układ front-end pracujący w paśmie 868 MHz służy do filtracji oraz wzmacniania. Sygnały z tego pasma są kondycjonowane i bezpośrednio przesyłane do układu SDR [10]. Schemat blokowy odbiornika został przedstawiony jest na Rys. 2. W torze uzyskano wzmocnienie na poziomie 20 dB, a tłumienie sygnałów pozapasmowych w odległości 2 MHz wynosi co najmniej 20-30 dB.

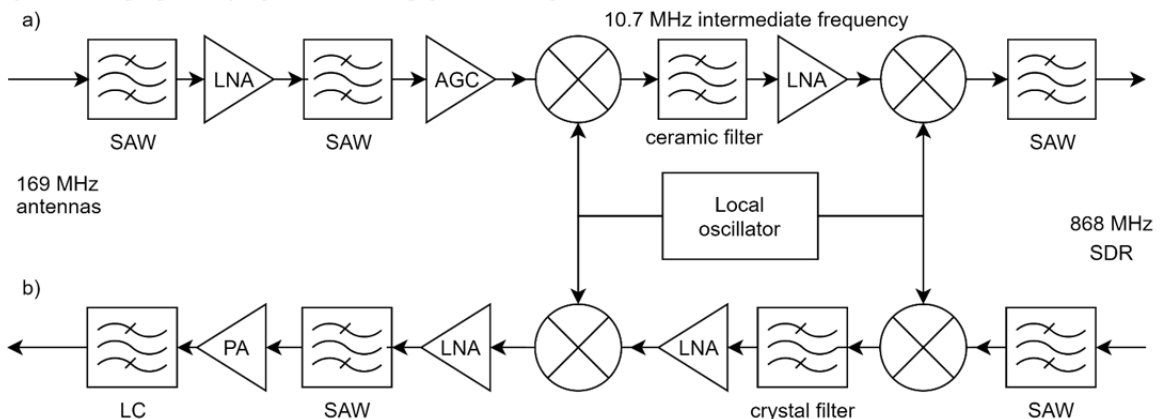


Rys. 2 Schemat blokowy odbiornika 868 MHz



Rys. 3 Schemat blokowy nadajnika 868 MHz

W torze transmisyjnym zastosowano filtrowanie i wzmocnienie sygnału. Schemat blokowy toru nadawczego przedstawiono na Rys. 3. Maksymalna moc wyjściowa na wyjściach antenowych wynosi +21 dBm.



Rys. 4 Układ front-end 169 MHz: a) odbiornik b) nadajnik

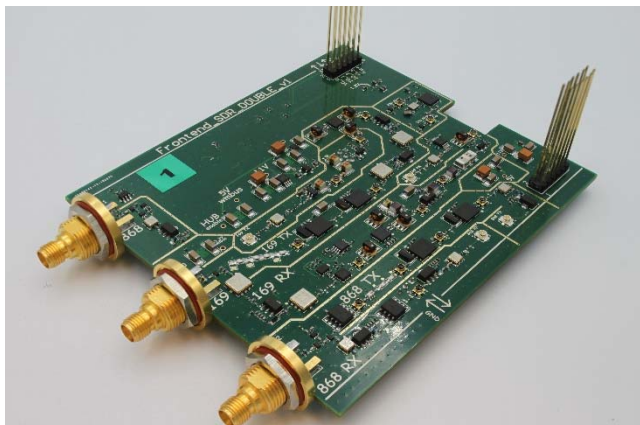
Układ front-end pracujący w paśmie 169 MHz

Aby poprawić filtrowanie sygnałów niepożądanych blisko pasma pracy, przy zastosowaniu konwersji częstotliwości zastosowano dodatkowe filtrowanie za pomocą filtra ceramicznego (w odbiorniku) i kwarcowego (w nadajniku). Zastosowano układ z podwójną przemianą częstotliwości - najpierw na częstotliwość pośrednią (10,7 MHz), a następnie na pasmo docelowe tj. 868MHz.

Częstotliwość pośrednia została wybrana ze względu na dostępność odpowiednich filtrów. Dzięki podwójnemu mieszanemu i zastosowaniu częstotliwości pośredniej możliwe jest użycie filtrów o parametrach stromości i tłumienia niedostępnych na pasmach o wyższej częstotliwości środkowej (Rys. 4.a.).

Nadajnik pracujący w paśmie 169 MHz

Ze względu na wymaganą czystość widmową sygnału w paśmie 169 MHz, zastosowano filtry kwarcowe, które mają za zadanie usunąć niepożądane sygnały pochodzące z nadajnika SDR (przeciek heterodyny, obraz sygnału itp.). Zaprojektowano nadajnik o mocy wyjściowej 500 mW (27 dBm), przy poziomie -52 dBm mocy wyjściowej z układu SDR (80 dB wzmocnienia), o szerokości pasma sygnału 20 kHz. Schemat blokowy toru nadajnika pracującego w paśmie 169 MHz przedstawiono na Rys. 4.b.



Rys. 5. Zdjęcie modułu z układami front-end RF



Rys. 6 Zdjęcie zintegrowanej stacji bazowej

Tor odbiorczy pracujący w paśmie 169 MHz

Tor odbiorczy pracujący w paśmie 169 MHz ma bardzo podobną architekturę jak nadajnik – główna różnica polega na zastosowanie filtra ceramicznego o paśmie przepustowym 110 kHz w miejsce filtra kwarcowego. Dodatkowo, zastosowano układ automatycznej regulacji wzmocnienia (AGC – Automatic Gain Control) we wzmacniaczu – jego celem jest dopasowanie poziomu mocy sygnału odbieranego i dzięki temu uzyskania jak największej dynamiki sygnału (Rys. 4.a.).

System antenowy

Aby stacja bazowa działała poprawnie, system antenowy musi być starannie zaprojektowany. Zastosowano następujące systemy antenowe:

- pojedyncza antena LTE do komunikacji w sieci komórkowej,
- pojedyncza antena na pasmo 169 MHz,
- podwójna antena na pasmo 868 MHz (antenna diversity).

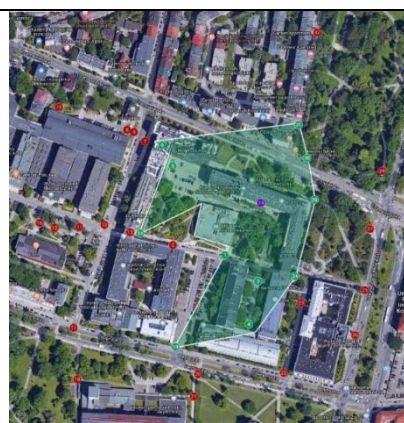
Dodatkowo, całe urządzenie znajduje w metalowej obudowie służącej za przeciwwagę dla anten. Ułożenie anten 868 MHz pod kątem 90 stopni oraz oddalenie ich od siebie wynika ze zwiększenia skuteczności techniki „antenna diversity”. Na pasmo 169 MHz, ze względu na rozmiar, zastosowano wyłącznie pojedynczą antenę, umieszczoną pionowo. Antena do komunikacji LTE umieszczona jest w środku obudowy (Rys. 6).

Weryfikacja działania stacji bazowej i pomiary zasięgu

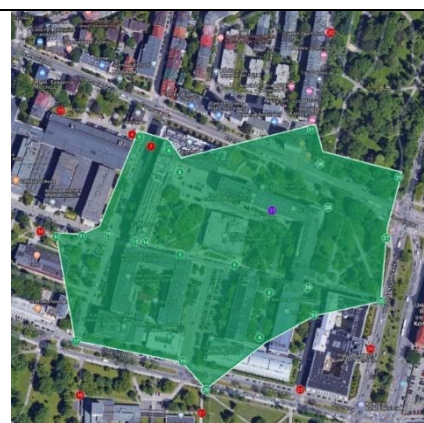
Przeprowadzone zostały pomiary zasięgu w środowisku miejskim w których porównano protokoły: autorski, oraz WM-Bus. Pomiary zasięgu wykonano wokół budynków Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, reprezentujący teren zurbanizowany. Wykonano pomiary zasięgu dla określonej pakietowej stopy błędów (PER – Packet Error Rate) na poziomie 20%. Różnica pomiędzy tymi dwoma konfiguracjami wynosi około 20 dB w budżecie łącza radiowego co przełożyło się zwiększenie zasięgu o około 2,3 razy. Dodatkowo, przeprowadzono pomiary w korytarzu pawilonu C1/C2 – w tym przypadku zasięg zwiększył się 3-krotnie (z 40 m do 120 m). Wykonano również pomiary porównawcze dla sieci z modulacją LoRa, pracującej w następującej konfiguracji: BW = 125 kHz, CR = 4/7, SF = 9, czyli oczekiwanej szybkości bitowej (bitrate) około 1,2 kb/s (Rys. 7). W przypadku modulacji LoRa zostały uzyskane znacząco większe zasięgi niż zarówno w przypadku protokołu WM-Bus (Rys. 8) jak i autorskiego protokołu (Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.Rys. 9).



Rys. 7 Zasięg sieci LoRa, 1,2 kbps



Rys. 8. Zasięg sieci WM-Bus, 50 kbps



Rys. 9 Zasięg zaprojektowanego protokołu, 1,2 kbps

Wynika to ze znacznego zwiększenia zysku kodowania i modulacji sieci LoRa. Jest to jednak okupione koniecznością wykorzystania szerokiego kanału (tutaj 125 kHz), co w porównaniu do 5 kHz przy autorskim protokole jest znaczącą i istotną różnicą, szczególnie w przypadku pracy w paśmie 169 MHz

Dzięki autorskiemu protokołowi, możliwe jest znaczne zwiększenie pojemności systemu poprzez podział w dziedzinie częstotliwości (wiele kanałów w paśmie transmisyjnym). Stacja bazowa oparta o SDR jest w stanie jednocześnie odebrać wszystkie pod-kanały i dekodować wszystkie transmisje jednocześnie, dzięki czemu przepustowość całego pasma znacząco wzrosła.

Podsumowanie

Wykorzystanie dwupasmowej stacji bazowej, opartej o technikę SDR przeznaczoną do pracy w systemach opomiarowania zużycia mediów (smart-metering) umożliwia automatyzację pomiarów oraz poszerzenie oferty zarówno dla dostawców jak i odbiorców o usługi takie jak:

- zwiększenie precyzji prognozowania zużycia mediów,
- kontrolę on-line kosztów (oprogramowanie chmurowe),
- wykrywanie awarii i stanów alarmowych,
- generowanie na bieżąco raportów,
- wyświetlanie wartości chwilowych,
- wizualizację wyników pomiarów na wykresach.

Powyższe korzyści mają szczególnie duże znaczenie w sieci wodociągowej, gdzie straty przesyłowe są szczególnie duże.

Dzięki zastosowaniu technologii SDR i zaprojektowanemu protokołowi udało się zautomatyzować pomiary i znacząco zredukować koszt produkcji pojedynczej nakładki poprzez zmniejszenie wymagań sprzętowych. Ponadto zwiększono pojemność systemu oraz maksymalny zasięg odczytów w porównaniu do rozwiązań opartych o protokoły WM-Bus. System ma możliwość ciągłej aktualizacji systemu o nowe typy modulacji i nakładek bez konieczności wymiany sprzętu. Przedstawiona koncepcja układów radiowych front-end jest uniwersalna dla różnych rodzajów transmisji radiowej w pasmach 169 MHz i 868 MHz. Zaprojektowany protokoł oparty o modulację GFSK pozwolił na zredukowanie wymagań związanych z układem nadawczo-odbiorczym (brak specjalistycznych chipów z modulacją LoRa, bram dostępowych, opłat licencyjnych) – dzięki czemu koszt produkcji nakładek może być zredukowany, co ma istotne znaczenie, gdyż w skali kraju mówimy o dziesiątkach milionów punktów pomiarowych. Dodatkowo, dzięki autorskiemu protokołowi przepustowość sieci została znacząco zwiększona do kilkunastu-kilkudziesięciu tysięcy punktów pomiarowych ze względu na możliwość wykorzystania wąskiego kanału radiowego. Prezentowany prototyp stacji bazowej może zostać zamontowany zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz budynku i nie wymaga żadnego dodatkowego medium poza dostępem do energii elektrycznej. W porównaniu do aktualnie stosowanych sieci WM-Bus, zasięg autorskiego protokołu jest około 2,3 razy większy w testowanych warunkach miejskiej zabudowy. System jest obecnie wdrażany w instalacji pilotażowej.



Artykuł prezentuje wyniki prac B+R przeprowadzonych w ramach projektu pt. „Opracowanie dwuzakresowej sieci typu LPWAN dedykowanej do pracy w systemach opomiarowania zużycia mediów”, współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach poddziałania 1.2.1 „Projekty badawczo-rozwojowe przedsiębiorstw”, RPO WM na lata 2014-2020.

Autorzy: dr hab. inż. Cezary Worek, dr inż. Łukasz Krzak, mgr inż. Grzegorz Gajoch, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Elektroniki, al. Mickiewicza 30, 30-054 Kraków, E-mail: worek@agh.edu.pl, lkrzak@agh.edu.pl, ggajoch@agh.edu.pl; mgr inż. Janusz Witkowski, Actislink Sp. z o.o., Lubostroń 1, 31-383 Kraków, E-mail: janusz.witkowski@actislink.pl.

LITERATURA

- [1] Hlima F.B., Strakosch F., Ketata I., Sahnoun F.S., Derbel F. Evaluation of a Low Power Wide Area Network for Metering Communication, *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, 17th, (2020)
- [2] Muteba F., Djouani K., Olwal T, A comparative Survey Study on LPWA IoT Technologies: Design, considerations, challenges and solutions, *Procedia Computer Science*, Volume 155, (2019), 636-641
- [3] Rauh S., Lauterbach T., Lieske H., Kilian G., Robert J., Heuberger A., Temporal evolution analysis of indoor-to-outdoor radio channels in the 868-MHz ISM/SRD frequency band, 47th *European Microwave Conference (EuMC)*, (2017), 384-387
- [4] Hynek T., Halls D., Sykora J., Hardware implementation of Distributed Learning Algorithm for mapping selection for Wireless Physical Layer Network Coding, *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, (2015) 2127-2132
- [5] Mourtziou C., Galanis K., Papadimitriou N., An Experimental Study of a Multi-Protocol IoT Gateway, *Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)* (2020), 763-769
- [6] Facchini F., Vitetta G. M., Losi A., Ruscilli F., On the performance of 169 MHz WM-Bus and 868 MHz LoRa technologies in smart metering applications, *IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, (2017), 1-6
- [7] Barbiroli, M., Fuschini, F., Tartarini, G., & Corazza, G. E. *Smart Metering Wireless Networks at 169 MHz*. *IEEE Access*, 5, 8357–8368 (2017)
- [8] Hoeller A., Souza R. D., Alcaraz López O. L., Alves H., de Noronha Neto M., Brante G., Analysis and Performance Optimization of LoRa Networks With Time and Antenna Diversity, *IEEE Access*, vol. 6, (2018), 32820-32829
- [9] Kubaszek M., Macheta J., Zapart M., Krzak Ł., Worek C., Evaluation of Antenna Diversity Scheme for 868 MHz Narrowband Communication Systems, *International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES)*, (2018) 196-200, DOI: 10.1109/ICSES.2018.8507311.
- [10] Krzak Ł., Worek C., Increasing performance of integrated sub-GHz IEEE 802.15.4 compatible radio transceivers, *Elektronika : konstrukcje, technologie, zastosowania*, 55 (2014) nr 9, 61-63