

## Eksperymentalna analiza efektywności transmisji danych w sieci LoRaWAN w eksploatacji na terenie miejskim

**Streszczenie.** W artykule zostały omówione wyniki praktycznych eksperymentów mających na celu określenie możliwości wykonania skutecznej transmisji danych z czujnika pomiarowego do aplikacji poprzez sieć LoRaWAN w warunkach zabudowy miejskiej w sytuacjach zróżnicowanych położen węzła końcowego względem bramy sieci LoRaWAN zarówno pod względem odległości jak i charakteru zabudowy na linii węzeł-brama.

**Abstract.** The article discusses the results of practical experiments aimed at determining the possibility of effective data transmission from the measurement sensor to the application through the LoRaWAN network in urban environment in situations of different positions of the end node in relation to the LoRaWAN gateway, both in terms of distance and type of terrain along the node-gate line. (**Experimental analysis of the efficiency of data transmission in the LoRaWAN network in operation in the urban area.**)

**Słowa kluczowe:** LoRa, LoRaWAN, LPWAN, IoT.

**Keywords:** LoRa, LoRaWAN, LPWAN, IoT.

### Wstęp

Bezprzewodowe metody komunikacji, a w szczególności transmisji danych stanowią obecnie jedną z najpopularniejszych metod łączności elektronicznej. Z tego względu często spotykamy się z obecnością na wspólnym obszarze wielu takich systemów, które ze względu na ograniczone zasoby radiowe (chodzi tu zwłaszcza o zakresy częstotliwościowe) muszą być projektowane z uwzględnieniem swojej koegzystencji i optymalnego wykorzystania zasobów. W projektowaniu takim wykorzystuje się szeroki zakres metod analizy obejmujących modele matematyczne, obliczenia i symulacje komputerowe, a także praktyczne pomiary zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i rzeczywistych w obecności innych systemów. W artykule wykorzystano ostatnią z wymienionych metod analizy poprzez wykonanie eksperymentalnych pomiarów efektywności transmisji danych w sieci typu LPWAN zrealizowanej w technologii LoRaWAN i pracującej w terenie miejskim.

LPWAN (Low Power Wide Area Network) jest rodzajem rozległej sieci teleinformatycznej przeznaczonej do komunikacji na dużych dystansach z zachowaniem niskiego poboru energii, co pozwala na wykorzystanie tych sieci do realizacji bezprzewodowej komunikacji z rozproszonymi elementami (np. czujnikami) mogącymi pracować z zasilaniem baterijnym nawet w okresie liczącym w latach. Ze względu na zastosowane technologie transmisyjne oraz wykorzystywane zasoby radiowe szybkość transmisji w sieciach LPWAN jest znacznie mniejsza niż w popularnych sieciach WLAN (np. Wi-Fi) oraz komórkowych (np. 3G HSPA, 4G LTE), z związku z czym sieci takie nie nadają się do realizacji dostępu do Internetu, transmisji wideo oraz innych aplikacji wymagających dużej szybkości i/lub ciągłej transmisji, natomiast doskonale sprawdzają się w sieciach czujnikowych, gdzie mamy do czynienia z niewielkimi porcjami danych przesyłanymi cyklicznie w stosunkowo dużych odstępach czasowych (rzędu minut, godzin, a nawet dni).

Obecnie istnieje wiele technologii pozwalających na budowanie sieci typu LPWAN [1]. Do najpopularniejszych standardów takich sieci należą technologie LoRaWAN, LTE Cat-M1, NB-IoT oraz SigFox. Sieci LPWAN mogą być realizowane jako sieci prywatne, stanowić usługę lub infrastrukturę oferowaną przez operatorów (np. sieci Sigfox, LTE Cat-M1), a także działać w modelu „społecznościowym” (np. sieć LoRaWAN „The Things

Network”). Zakresy częstotliwościowe wykorzystywane w sieciach LPWAN obejmują zarówno pasma licencjonowane, jak i nielicencjonowane. Do typowych aplikacji sieci LPWAN można zaliczyć:

- transmisję danych z pojedynczych czujników pomiarowych zasilanych bateryjnie,
- systemy inteligentnych pomiarów (tzw. smart metering) zużycia wody, ciepła, gazu, energii elektrycznej i innych mediów,
- transmisję z koncentratorów sieci czujnikowych bazujących na technologiach niskiego zasięgu (np. Bluetooth Low Energy, ZigBee, Z-Wave),
- monitoring i sterowanie w ramach koncepcji inteligentnych miast (ang. smart cities): gospodarka odpadami, miejsca parkingowe, natężenie ruchu, transport publiczny, oświetlenie, zanieczyszczenia, infrastruktura dla pojazdów elektrycznych itd.,
- monitoring instalacji OZE,
- monitoring upraw i hodowli rolniczych,
- kontrolowanie jakości powietrza, wody, stanu rzek,
- monitorowanie parametrów zdrowotnych pacjentów,
- wiele innych.

W niniejszym artykule skupiono się na jednej z najpopularniejszych obecnie w Polsce technik realizacji sieci typu LPWAN jaką jest LoRaWAN stanowiąca implementację sieci LPWAN, w której rozproszone zdalne węzły dołączone są poprzez radiowe interfejsy pracujące w standardzie LoRa. Celem wykonywanych eksperymentów było praktyczne określenie możliwości wykonania skutecznej transmisji danych z czujnika pomiarowego do aplikacji poprzez sieć LoRaWAN w warunkach zabudowy miejskiej w sytuacjach zróżnicowanych położen węzła końcowego względem bramy sieci LoRaWAN zarówno pod względem odległości, jak i charakteru zabudowy na linii węzeł-brama.

Zagadnienie eksperymentalnej oceny efektywności transmisji radiowej LoRa jest obecnie przedmiotem wielu publikacji naukowych, które obejmują szeroki zakres zastosowań transmisji LoRa. Przykładowo w pracy [2] jedną z badanych aplikacji była implementacja transmisji LoRa do monitorowania parametrów środowiskowych w inteligentnych budynkach położonych w obszarze gęstej zabudowy miejskiej. Badany przypadek dotyczył dość korzystnego usytuowania anteny bramy LoRa na wysokości 71 m nad poziomem gruntu. Publikacja [3] omawia praktyczne rezultaty zastosowania technologii LoRa do

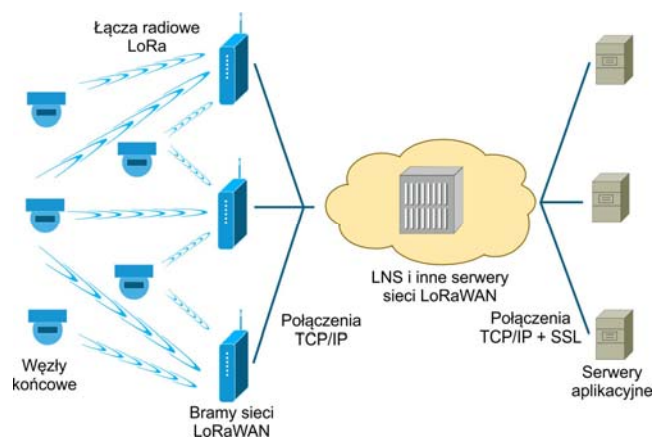
dronowego monitorowania zwierząt gospodarskich na dużą skalę w gospodarstwach wiejskich. W artykule [4] przedstawiono eksperymentalne wyniki oceny jakości systemu LoRa w obszarze farmy drzew. W pracach [5, 6, 7] uwzględniono praktyczne aspekty w ocenie skuteczności transmisji LoRa odpowiednio w warunkach podziemnych, podwodnych oraz w komunikacji podziemno-naziemnej (UG2AG - Underground to Aboveground). Publikacja [8] przedstawia wyniki eksperymentalnych testów wykorzystania transmisji LoRa w komunikacji ruchomej typu V2V (Vehicle-to-Vehicle) oraz V2I (Vehicle-to-Infrastructure). Artykuł [9] przedstawia eksperymentalne porównanie technik transmisyjnych NB-IoT i LoRaWAN w aplikacjach przemysłowych. W wykonanym porównaniu zostały uwzględnione takie czynniki jak czas życia baterii, jakość usługi, koszty modułów końcowych i infrastruktury, dostępność (pokrycie) usługi oraz czas wdrożenia aplikacji. W [10] opublikowane zostały uzyskane praktycznie wyniki oceny jakości transmisji LoRa w warunkach wewnątrzbudynkowych. Jak wynika z powyższego krótkiego przeglądu, technologia LoRa jest obecnie poważnym kandydatem do szerokiego zakresu aplikacji typu IoT m.in. w obszarach inteligentnych miast, budynków, przemysłu, rolnictwa, motoryzacji. Wynika to m.in. z korzystnych cech transmisji LoRa (stosunkowo duży zasięg, energooszczędność), a także z łatwości budowy własnych sieci LoRaWAN pracujących w nielicencjonowanych pasmach częstotliwości. Popularność ta przekłada się na wiele praktycznych analiz pozwalających na realną ocenę efektywności aplikacji LoRa w szerokim zakresie środowisk. Niniejszy artykuł stanowi jeden z elementów takich analiz, dodatkowo oprócz typowych wskaźników takich jak zasięg, SNR i RSSI zawiera on próbę oszacowania granicznej wartości parametru SF, który bezpośrednio przekłada się na uzyskiwaną szybkość transmisji. Przedstawione badania wykonane zostały w obszarze pozwalającym na uwzględnienie różnego rodzaju zabudowy i warunków środowiskowych (np. zalesienie), które mogą wystąpić w rzeczywistych terenach miejskich.

### Struktura i funkcjonowanie sieci LoRaWAN

LoRaWAN stanowi rozległą sieć transmisyjną zapewniającą przede wszystkim dostarczenie do serwerów aplikacyjnych danych wysyłanych przez urządzenia końcowe, które komunikują się z siecią bezprzewodowo z wykorzystaniem standardu LoRa. Urządzenia te stanowią zazwyczaj różnego rodzaju układy czujnikowe, które dokonują pomiarów określonych wielkości fizycznych (np. temperatura, zużycie energii elektrycznej) i wysyłają je poprzez sieć LoRaWAN do aplikacji pozwalających na składowanie tych danych oraz ich udostępnianie użytkownikom (np. poprzez interfejs webowy) lub innym aplikacjom (typowo poprzez interfejs typu API – Application Programming Interface). LoRaWAN zapewnia też możliwość wysyłania danych do urządzeń końcowych (mogą to być np. elementy wykonawcze). Na rysunku 1 przedstawiona została ogólna struktura sieci LoRaWAN.

Znajdujące się po lewej stronie węzły końcowe komunikują się radiowo z bramami sieci LoRaWAN z wykorzystaniem technologii transmisji radiowej LoRa. Transmisja ta możliwa jest w obydwu kierunkach, węzły końcowe mogą zarówno wysyłać dane do sieci (jest to tzw. transmisja „w górę”, ang. uplink), jak i odbierać dane z sieci (tzw. transmisja „w dół”, ang. downlink), jednak organizacja transmisji na warstwach wyższych powoduje, że podstawowym kierunkiem jest transmisja „w górę”. Węzeł końcowy nie jest w żaden sposób powiązany z konkretną bramą danej sieci LoRaWAN i wysyłane przez niego dane są odbierane przez wszystkie bramy znajdujące się w

zasięgu transmisji radiowej tego węzła. Podstawową funkcją bramy jest przekazywanie danych odbieranych z węzłów końcowych do serwera LoRa Network Server (LNS) oraz dostarczanie danych przychodzących z LNS do węzłów. Dane przekazywane przez bramę do serwera LNS uzupełniane są o wyznaczone przez bramę metainformacje takie jak poziom sygnału (RSSI), parametry transmisji radiowej i inne. Komunikacja pomiędzy bramą i LNS odbywa się poprzez sieć TCP/IP, która może być zrealizowana z wykorzystaniem praktycznie dowolnych technik transmisyjnych (np. Ethernet, Wi-Fi, sieci komórkowe 3G/4G/5G). Bardzo często komunikacja ta realizowana jest przez publiczną sieć Internet. Ponieważ wysłany przez dane urządzenie końcowe pakiet może być odebrany przez wiele bram, serwer LNS musi zapewnić deduplikację odbieranych pakietów. Taka organizacja transmisji pozwala także zapewnić redukcję błędnie odebranych lub zgubionych danych.



Rys.1. Typowa struktura sieci LoRaWAN

Serwer LNS komunikuje się z serwerem (serwerami) aplikacyjnymi, które odpowiedzialne są za odbieranie, interpretowanie i wysyłanie danych aplikacyjnych z urządzeń końcowych. Często zapewniają one także interfejs użytkownika (np. w postaci strony WWW) oraz interfejs API do komunikacji z innymi aplikacjami. Komunikacja serwera LNS z serwerem aplikacyjnym, podobnie jak komunikacja LNS z bramą, odbywa się z wykorzystaniem sieci TCP/IP, w tym Internetu.

Architektura sieci LoRaWAN bazuje na otwartej specyfikacji rozwijanej przez technologiczne stowarzyszenie LoRa Alliance [11]. Jedynym elementem własnościowym w tej architekturze (pomijając specyficzne rozwiązania aplikacyjne) jest interfejs radiowy LoRa, którego specyfikacja stanowi własność firmy Semtech [12].

Nazwa LoRa pochodzi od określenia „Long Range” i podkreśla kluczową cechę tej technologii, jaką jest duży zasięg mogący wynosić nawet kilka kilometrów w warunkach miejskich i kilkadziesiąt kilometrów w przestrzeni otwartej. Tak duży zasięg transmisji przy jednocześnie niskim poziomie promieniowanej mocy (standardowo maksymalna wartość EIRP wynosi 16 dBm) uzyskano dzięki realizacji transmisji w technice rozproszenia widma, która umożliwia poprawną detekcję przy niskim poziomie stosunku sygnału do szumu oraz pozwala na uzyskanie dużej wartości tzw. maksymalnego budżetu łącza wyznaczanego jako suma mocy nadajnika oraz czułości odbiornika.

W standardzie LoRa transmisja odbywa się z wykorzystaniem rozproszenia widma metodą Chirp Spread Spectrum (CSS), która wykorzystuje tzw. chirp będący impulsem sinusoidalnym o częstotliwości zmieniającej się w

sposób wielomianowy (w tym przypadku liniowo) [13]. Impuls taki odpowiadający zmianie częstotliwości w pełnym założonym zakresie stanowi pojedynczy symbol modulacji, który jest dzielony w dziedzinie częstotliwości na  $2^{SF}$  przedziałów (ang. chips). Wartość aktualnie przesyłanego symbolu zakodowana jest w numerze przedziału od którego zaczynane jest przemiatanie częstotliwości w sygnale przesyłającym ten symbol.

Transmisja fizyczna może odbywać się z różnymi szybkościami opisanymi zależnością (1) [14].

$$(1) \quad R_b = SF \cdot \frac{CR \cdot BW}{2^{SF}}$$

gdzie:  $R_b$  - szybkość transmisji w [b/s],  $SF$  – Spread Factor – współczynnik rozproszenia widma, w tym przypadku określa także liczbę bitów kodowanych na jednym symbolu (pojedynczym impulsie chirp),  $SF = \{6$  (nie implementowany), 7, 8, 9, 10, 11, 12),  $BW$  – szerokość pasma (związana z zakresem przemiatania częstotliwości w impulsie chirp),  $BW = \{7,8; 10,4; 15,6; 20,8; 31,25; 41,7; 62,5; 125; 250; 500\}$  [kHz]  $CR$  – Coding Rate – stosunek liczby bitów danych do całkowitej liczby bitów przesyłanych w transmisji radiowej (dodatkowe bity stanowią kody korekcyjne FEC),  $CR = \{4/5; 4/6; 4/7; 4/8\}$  (specyfikacja LoRaWAN korzysta tylko z  $CR=4/5$ ).

Sygnal radiowy transmitowany jest w nielicencjonowanych pasmach ISM zależnych od uregulowań w poszczególnych regionach:

- Europa: 433 MHz, 868 MHz,
- USA, Australia, Brazylia: 915 MHz (są różnice w poszczególnych państwach),
- Chiny: 470 MHz, 780 MHz.

Szczegółowe wymagania dotyczące stosowanych kanałów częstotliwościowych określone są w dokumencie „LoRaWAN Regional Parameters” [15]. Przykładowo w pasmie „EU863-870MHz ISM Band” specyfikacja ta pozwala na dowolność wykorzystania poszczególnych kanałów przez operatora danej sieci LoRaWAN, ale definiuje wymóg minimalnego zestawu trzech kanałów, na których powinny nasłuchiwać wszystkie bramy: 868,10 MHz, 868,30 MHz oraz 868,50 MHz.

Równanie (1) umożliwia utworzenie bardzo wielu różnych trybów transmisji fizycznej w zależności od wybranych parametrów  $BW$ ,  $SF$ ,  $CR$ . W praktycznych rozwiązaniach wykorzystuje się znacznie ograniczoną liczbę trybów transmisji. Aktualna specyfikacja „LoRaWAN Regional Parameters” [15] definiuje dla pasma „EU863-870” osiem trybów transmisji (dodatkowo ostatni tryb związany jest z adaptacyjnym wyborem jednego z pierwszych ośmiu) oznaczanych jako DR (Data Rate). Parametry dla poszczególnych trybów zostały zestawione w tabeli 1.

Jak widać z danych w tabeli 1, specyfikacja LoRaWAN dopuszcza oprócz modulacji typu LoRa (impuls CSS) także kluczkowanie częstotliwości (FSK) oraz przeskoki częstotliwości (LR-FHSS - Long Range Frequency Hopping Spread Spectrum), jednak tryby te nie są wspierane przez wszystkie realizacje układowe oraz wszystkie sieci LoRaWAN. Szybkości transmisji możliwe do uzyskania w sieci LoRaWAN są stosunkowo niskie, co determinuje wykorzystanie tej sieci przede wszystkim do transmisji niewielkich porcji danych pochodzących z czujników pomiarowych lub związanych z prostym sterowaniem.

W rzeczywistości średnia szybkość transmisji jest jeszcze dodatkowo ograniczona wymaganiami związanymi z koniecznością zachowania tzw. współczynnika wykorzystania zasobów radiowych (ang. Duty Cycle), który określa wypełnienie czasu transmisją radiową. Przykładowo

jeżeli transmitujemy dane przez 1 sekundę co 10 sekund, współczynnik Duty Cycle wynosi 10%. W Europie dopuszczalna wartość współczynnika Duty Cycle (DC) jest określona w Decyzji wykonawczej Komisji (UE) 2017/1483 [16]. W tabeli 2 przedstawiono ograniczenia mocy oraz współczynnika Duty Cycle obowiązujące w pasmie EU863-870 [16,17].

Tabela 1. Tryby transmisji w sieci LoRaWAN w pasmie EU863-870

Tryb transmisji	Konfiguracja parametrów	Fizyczna szybkość transmisji [b/s]
DR0	LoRa: SF12 / BW 125 kHz	250
DR1	LoRa: SF11 / BW 125 kHz	440
DR2	LoRa: SF10 / BW 125 kHz	980
DR3	LoRa: SF9 / BW125 kHz	1760
DR4	LoRa: SF8 / BW 125 kHz	3125
DR5	LoRa: SF7 / BW 125 kHz	5470
DR6	LoRa: SF7 / BW 250 kHz	11000
DR7	FSK: 50 kb/s	50000
DR8	LR-FHSS CR1/3 / BW 137 kHz	162
DR9	LR-FHSS CR2/3 / BW 137 kHz	325
DR10	LR-FHSS CR1/3 / BW 336 kHz	162
DR11	LR-FHSS CR2/3 / BW 336 kHz	325
DR12 – DR14	Zarezerwowane	-
DR15	Wybierana adaptacyjnie	

Tabela 2. Ograniczenia obowiązujące w pasmie EU863-870

Numer zakresu częstotliwości	Zakres częstotliwości	Ograniczenia
46a	863.0 – 865.0 MHz	EIRP < 25 mW, DC < 0,1%
47	865.0 – 868.0 MHz	EIRP < 25 mW, DC < 1%
47b	865.0 – 868.0 MHz	EIRP < 500 mW, DC < 2,5% Tylko kanały 865,6- 865,8 MHz, 866,2-866,4 MHz, 866,8-867,0 MHz, 867,4- 867,6 MHz
48	868.0 – 868.6 MHz	EIRP < 25 mW, DC < 1%
50	868.7 – 869.2 MHz	EIRP < 25 mW, DC < 0,1%
54	869.4 – 869.65 MHz	EIRP < 500 mW, DC < 10%
56b	869.7 – 870.0 MHz	EIRP < 25 mW, DC < 1%

Poszczególne sieci korzystające ze specyfikacji LoRaWAN mogą wprowadzać dodatkowo swoje własne ograniczenia. Przykładowo w sieci *The Things Network* obowiązuje *Fair Access Policy*, która ogranicza czas transmisji „w górę” do 30 sekund na węzeł dziennie oraz do 10 komunikatów transmitowanych „w dół” na węzeł dziennie [18].

W systemach komunikacji bezprzewodowej istnieje podwyższone ryzyko naruszenia bezpieczeństwa przesyłanych informacji danych ze względu na możliwość nieautoryzowanego odbioru i wysyłania sygnału bez konieczności fizycznego dołączenia się do urządzeń danej sieci. Dlatego specyfikacje standardów transmisji bezprzewodowej praktycznie zawsze uwzględniają różne mechanizmy zabezpieczenia transmisji oraz dostępu do sieci. W przypadku sieci LoRaWAN jej specyfikacja obejmuje następujące elementy zabezpieczające [19]:

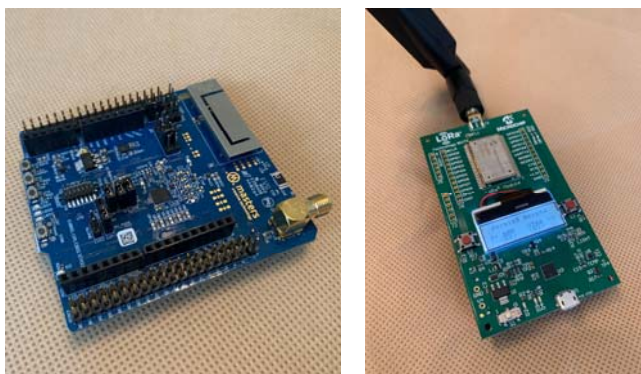
- procedury aktywacji (uwierzytelniania) węzłów końcowych,
- zabezpieczenie integralności komunikacji pomiędzy urządzeniem końcowym i serwerem LNS,
- szyfrowanie komunikacji pomiędzy urządzeniem końcowym i serwerem aplikacyjnym.

#### Metodyka badań - badanie zasięgowe sieci LoRaWAN

Celem badania zasięgowego jest wyznaczenie granicznego zasięgu transmisji w sieci LoRaWAN w zadanym obszarze. Badana sieć obejmuje bramę LoRaWAN zarejestrowaną w sieci *TheThingsNetwork*. Zastosowana brama stanowi urządzenie typu *Wimnet iFemtoCell* firmy *Kerlink* [20]. Brama ta zapewnia jednoczesny odbiór w 9 kanałach częstotliwościowych w paśmie 868 MHz, co

zapewnia pełną obsługę wszystkich kanałów wykorzystywanych przez sieć TheThingsNetwork w regionie europejskim. Brama została zainstalowana w budynku Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej z anteną zewnętrzną typu TOF-0809-7V-S1 firmy MikroTik o charakterystyce dookólnej i zysku energetycznym 6,5 dBi [21]. Antena ta zainstalowana została na dachu budynku i znajduje się na wysokości około 15 m względem poziomu gruntu.

Do celów wykonywanych pomiarów w sieci TheThingsNetwork utworzona została aplikacja o nazwie „stm32wl\_test\_az”, która przyjmuje dane z zarejestrowanego w niej węzła końcowego „stm32wl\_masters\_module”. Węzeł ten został utworzony na bazie modułu STM32WL firmy MASTERS [22], przedstawionego na rysunku 2 (po lewej stronie).

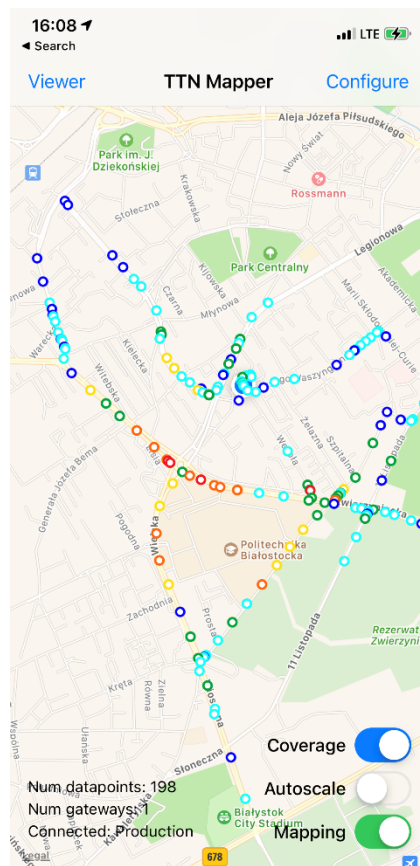


rys.2. Moduły MASTERS STM32WL i Microchip DM164138

Głównym elementem tego węzła jest mikrokontroler STM32WLE5 zawierający w pojedynczej strukturze mikroprocesor z rdzeniem ARM Cortex-M4, pamięć RAM 64 KB, pamięć Flash 256 KB oraz układ interfejsu radiowego sub-GHz bazujący na rdzeniu Semtech SX126x i obsługujący modulacje typu LoRa, (G)FSK, (G)MSK i BPSK. W module istnieje możliwość wykorzystania jednej z trzech rodzajów anten: PIFA (planar inverted-F antenna), antena typu chip oraz antena dołączona złączem SMA. W wykonanych pomiarach wykorzystana została antena typu PIFA. Przyłączony do sieci węzeł został zaprogramowany do wysyłania w odstępach czasowych 5 s wartości temperatury odczytywanej z zawartego w nim czujnika. Przyłączenie urządzenia do sieci odbywa się z wykorzystaniem aktywacji typu OTAA (Over the Air Activation), natomiast tryb transmisji LoRa wybierany jest z wykorzystaniem mechanizmu ADR (Adaptive Data Rate) [19].

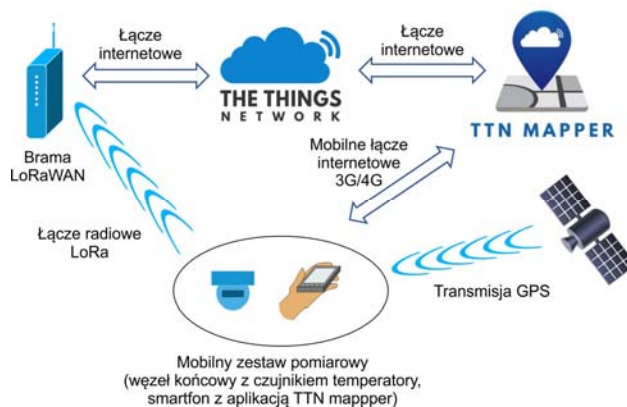
Wykonywanie pomiarów polegało na przemieszczaniu się z działającym modułem węzła końcowego i rejestrowaniu poziomu sygnału radiowego w badanym obszarze stanowiącym teren wokół Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej. Do rejestracji wyników pomiarów oraz odpowiadających im pozycji geograficznych została wykorzystana usługa TTN Mapper [23]. Podstawowym narzędziem w tej usłudze jest aplikacja mobilna przeznaczona dla smartfonów z systemami Android i iOS, która po powiązaniu jej z określoną aplikacją w sieci TheThingsNetwork, w czasie rzeczywistym odbiera kolejne rekordy danych rejestrowane przez tę aplikację (oprócz właściwych danych zawierają one także metadane o trybie transmisji i poziomie sygnału radiowego LoRa), dodaje do nich aktualną pozycję geograficzną określaną przez usługę lokalizacji dostępną w smartfonie (najczęściej na bazie systemu GPS) i tak przygotowane dane wysyła przez połączenie internetowe do aplikacji webowej systemu TTN Mapper, która prezentuje je w formie graficznej nałożonej

na wybrany rodzaj mapy (dostępne są m.in. mapy z planem ulic, mapy terenowe oraz mapy ze zdjęciami satelitarnymi). Na rysunku 3 widoczny jest ekran aplikacji mobilnej usługi TTN Mapper w trakcie pomiarów. Miejsca, w których wykonany został pomiar oznaczane są kółkami, których kolor związany jest z poziomem sygnału zarejestrowanego w danym punkcie.



Rys.3. Ekran aplikacji mobilnej TTN Mapper w trakcie pomiarów

Na rysunku 4 przedstawiony został schemat struktury wykorzystywanego w badaniach systemu pomiarowego.



Rys.4. Schemat struktury systemu pomiarowego do badań zasięgowych sieci LoRaWAN

### Metodyka badań - badanie efektywności transmisji danych w sieci LoRaWAN w wybranych punktach

Celem badania punktowego jest uzupełnienie danych wyznaczonych w badaniu zasięgowym o wyniki pomiarów skuteczności transmisji radiowej LoRa w wybranych punktach przebadanego zasięgowo obszaru dla różnych parametrów transmisji radiowej LoRa. Punkty do pomiarów



wybrane zostały w sposób pozwalający na uzyskanie wniosków dotyczących efektywności transmisji przy szerokim zakresie poziomu sygnału i w różnych odległościach od bramy. Uzasadnienie wyboru poszczególnych punktów zostało przedstawione w opisie wyników wykonanych badań.

Pomiary wykonane zostały z wykorzystaniem sieci LoRaWAN przedstawionej w poprzednim punkcie, a jako węzeł końcowy użyty został moduł DM164138 firmy Microchip [24], przedstawiony na rysunku 2 (po prawej stronie). Moduł DM164138 zawiera układ interfejsu radiowego LoRa oraz oprogramowanie pozwalające na aktywację modułu jako węzła w sieci LoRaWAN metodami OTAA i ABP, a także prosty interfejs użytkownika (wyświetlacz LCD, przyciski) umożliwiający wybór

parametrów transmisji LoRa (m.in. SF i BW), inicjację transmisji oraz odczyt danych zwrotnych odebranych z sieci LoRaWAN i parametrów ostatnio wykonanej transmisji. Moduł pozwala na cykliczne lub inicjowane manualnie wysyłanie danych zawierających odczyty z zawartych w nim czujników temperatury i natężenia światła.

Na rysunku 5 przedstawiony został ekran konsoli sieci TheThingsNetwork z tabelą zawierającą kolejne dane odbierane z modułu DM164138 dla różnych ustawień współczynnika SF. Dwa najniższe rekordy stanowią komunikaty Join Request i Join Accept związane z aktywacją modułu jako urządzenia końcowego w sieci LoRaWAN.

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt
▲ 17:15:53	867.9	loro	4/5	SF 7 BW 125	56.6	6 dev addr: 26 01 28 80 payload size: 21 bytes
▲ 17:15:05	867.9	loro	4/5	SF 7 BW 125	56.6	5 dev addr: 26 01 28 80 payload size: 21 bytes
▲ 17:14:50	867.3	loro	4/5	SF 8 BW 125	102.9	4 dev addr: 26 01 28 80 payload size: 21 bytes
▲ 17:14:38	867.5	loro	4/5	SF 9 BW 125	185.3	3 dev addr: 26 01 28 80 payload size: 21 bytes
▲ 17:14:19	868.3	loro	4/5	SF 10 BW 125	370.7	2 dev addr: 26 01 28 80 payload size: 21 bytes
▲ 17:14:02	867.1	loro	4/5	SF 11 BW 125	741.4	1 dev addr: 26 01 28 80 payload size: 21 bytes
▲ 17:13:41	868.5	loro	4/5	SF 12 BW 125	1482.8	0 dev addr: 26 01 28 80 payload size: 21 bytes
▲ 17:13:00	868.1		4/5	SF 9 BW 125	246.8	
▲ 17:12:56	868.1		4/5	SF 9 BW 125	205.8	app eui: 70 B3D5 7ED002 41 E3 dev eui: 17 38 15 01 30 00 00 00

Rys.5. Dane odbierane z modułu DM164138 przez aplikację w sieci TheThingsNetwork

Wykonywanie pomiarów polegało na umieszczeniu zasilanego bateryjnie modułu DM164138 wybranym punkcie pomiarowym, wykonaniu kolejnych prób transmisji dla różnych ustawień parametrów radiowych interfejsu LoRa i określeniu skuteczności dostarczenia danych do aplikacji w sieci TheThingsNetwork.

#### Badanie zasięgowe sieci LoRaWAN w terenie miejskim

Badanie przeprowadzone zostało na terenie wokół miejsca zainstalowania bramy LoRaWAN według powyżej opisanej metodyki. Teren na którym odbywało się badanie obejmuje głównie zabudowę o wysokości do 4 pięter oraz obszar zalesiony w kierunku południowo-wschodnim od bramy LoRaWAN. Zebrane z pomiarów dane zostały zobrazowane na mapie w usłudze TTN Mapper. Na rysunku 6 przedstawiono uzyskane graniczne zasięgi badanej sieci LoRaWAN nałożone na mapę ze zdjęciami satelitarnymi.

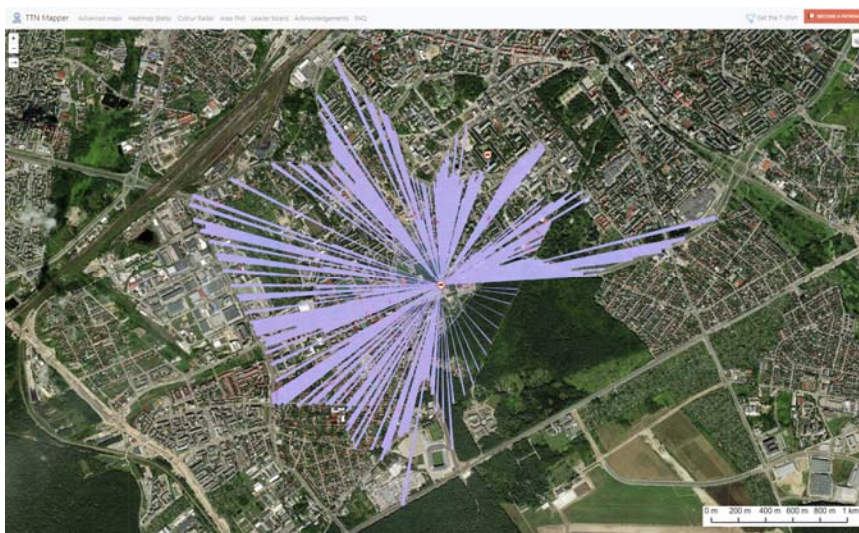
Jak można wywnioskować z rysunku 6, w badanych warunkach maksymalny zasięg testowanej bramy LoRa WAN wyniósł około 1,5 km z wyjątkiem obszaru zalesionego położonego w kierunku południowo-wschodnim od badanej bramy. W tym przypadku sygnał został praktycznie całkowicie sflumiony przez obszar zalesiony i zasięg sieci został ograniczony do brzegu tego obszaru.

Na rysunku 7 zobrazowane zostały minimalne wartości poziomu sygnału zarejestrowane na granicach zasięgu

badanej sieci LoraWAN w poszczególnych kierunkach. Jak można zauważyć, w większości przypadków minimalna wartość poziomu sygnału wynosi poniżej -120 dBm, co jest zgodne z deklarowanymi parametrami technologii LoRa. W niektórych kierunkach minimalny poziom sygnału wzrósł do około -110 dBm lub nawet -105 dBm przy zachowaniu zbliżonego zasięgu jak dla poziomu granicznego wnoszącego -120 dBm. Analiza tych kierunków wykazała, że spowodowane było to znajdującymi się w nich prześwitami w zabudowie. W pojedynczych przypadkach (kierunek północno-zachodni) minimalny poziom sygnału wyniósł nawet powyżej -100 dBm przy skróceniu zasięgu sieci do około 400 m. Spowodowane zostało to wysoką lub bardzo zwartą zabudową położoną w linii tego kierunku.

#### Badanie efektywności transmisji danych w sieci LoRaWAN w wybranych punktach na terenie miejskim

Badanie przeprowadzone zostało zgodnie z przedstawioną powyżej metodyką. Pierwszym etapem był wybór punktów pomiarowych. W tym celu posłużono się wizualizacją typu *heatmap* wyznaczoną podczas badania zasięgowego. Wizualizacja ta przedstawia poszczególne punkty, w których dokonywany był pomiar oraz obrazuje (kolorem) poziom sygnału (RSSI) w danym punkcie (rys. 8).



Rys.6. Maksymalny zasięg badanej bramy LoRaWAN zobrazony na tle zdjęć satelitarnych



Rys.7. Wizualizacja minimalnych wartości poziomu sygnału badanej bramy LoRaWAN



Rys.8. Wizualizacja poziomu sygnału w poszczególnych punktach pomiarowych

Do dalszych pomiarów wybranych zostało dziewięć punktów oznaczonych na rysunku 8 czerwonymi kółkami:

- punkt 1: odległość od badanej bramy około 30 m, zmierzony poziom sygnału: -105 dBm, punkt wybrany jako jeden z najbliższych do mierzonej bramy LoRaWAN,
- punkt 2: odległość od badanej bramy około 300 m, zmierzony poziom sygnału: -93 dBm, punkt wybrany jako położony w miejscu z bezpośrednią widocznością bramy i będący w grupie o najwyższym poziomie zarejestrowanego sygnału,
- punkt 3: odległość od badanej bramy około 800 m, zmierzony poziom sygnału: -112 dBm, punkt wybrany jako jeden z punktów reprezentujących wysoki poziom sygnału przy odległości charakteryzującej się w większości innych punktów znacznie słabszym sygnałem,
- punkt 4: odległość od badanej bramy około 1100 m, zmierzony poziom sygnału: -120 dBm, punkt wybrany jako leżący na granicy zasięgu w strefie północno-wschodniej,
- punkt 5: odległość od badanej bramy około 850 m, zmierzony poziom sygnału: -116 dBm, punkt wybrany ze względu na większy niż w innych punktach poziom sygnału przy stosunkowo dużej odległości,
- punkt 6: odległość od badanej bramy około 400 m, zmierzony poziom sygnału: -119 dBm, punkt wybrany ze względu na obecność obszaru zalesionego w linii węzeł-brama.
- punkt 7: odległość od badanej bramy około 1000 m, zmierzony poziom sygnału: -118 dBm, punkt wybrany ze względu na większy niż w innych punktach poziom sygnału przy stosunkowo dużej odległości;
- punkt 8: odległość od badanej bramy około 1200 m, zmierzony poziom sygnału: -121 dBm, punkt wybrany jako leżący na granicy zasięgu w strefie południowo-zachodniej,
- punkt 9: odległość od badanej bramy około 1400 m, zmierzony poziom sygnału: -121 dBm, punkt wybrany jako leżący na granicy zasięgu w strefie zachodniej.

W każdym z wymienionych powyżej punktów dokonano sprawdzenia granicznej wartości parametru SF przy którym uzyskano transmisję z utratą pakietów nie gorszą niż 10%. Otrzymane wyniki zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Graniczne wartości parametru SF w poszczególnych punktach pomiarowych

Numer punktu pomiarowego	Graniczna wartość SF	Zmierzony SNR
1	7	6,3 dB
2	7	11,8 dB
3	9	3,2 dB
4	9	-3,5 dB
5	8	2,2 dB
6	11	-6,8 dB
7	8	1,2 dB
8	9	-1,5 dB
9	8	-0,8 dB

Z zebranych danych wynika, że w przypadku obszaru miejskiego typowa zabudowa pozwala na uzyskanie poprawnej transmisji z wartościami współczynnika SF rzędu 8-9 nawet w odległości wynoszącej ponad 1000 m od bramy sieci LoRaWAN. Najbardziej niekorzystny przypadek stanowi obszar zalesiony. Wówczas przy już przy odległości około 400 m (z szerokością pasa leśnego równą około 200 m) poprawna transmisji może być zapewniona tylko z najwyższymi wartościami SF (11-12). Zmierzone graniczne wartości współczynnika rozproszenia SF mają też ścisły związek z przedstawionymi w tabeli 3 zmierzonymi w poszczególnych punktach wartościami stosunku mocy sygnału do mocy szumu (SNR).

## Podsumowanie

W artykule zostały przedstawione i omówione wyniki eksperymentalnych badań efektywności transmisji danych w sieci LoRaWAN w terenie miejskim. Celem wykonywanych eksperymentów było praktyczne określenie możliwości wykonania skutecznej transmisji danych z czujnika pomiarowego do aplikacji poprzez sieć LoRaWAN w warunkach zabudowy miejskiej w sytuacjach zróżnicowanych położenia węzła końcowego względem bramy sieci LoRaWAN zarówno pod względem odległości jak i charakteru zabudowy na linii węzeł-brama. Wykonywane eksperymenty obejmowały w pierwszej kolejności ogólne badanie zasięgowo sieci LoRaWAN w założonym terenie miejskim, a następnie wykonane zostały badania punktowe mające na celu uzupełnienie danych wyznaczonych w badaniu zasięgowym o wyniki pomiarów skuteczności transmisji radiowej LoRa w wybranych punktach przebadanego zasięgowo obszaru dla różnych parametrów transmisji radiowej LoRa. Punkty do pomiarów wybierane były w sposób pozwalający na uzyskanie wniosków dotyczących efektywności transmisji przy szerokim zakresie poziomu sygnału i w różnych odległościach od bramy.

Uzyskane rezultaty potwierdziły możliwość wykonania skutecznej transmisji w sieci LoRaWAN do odległości około 1 km pomiędzy węzłem końcowym i bramą w przypadku typowej zabudowy miejskiej. W sytuacji braku zwartej zabudowy pomiędzy węzłem i bramą możliwe są do osiągnięcia odległości ponad 1 km, natomiast obecność obszaru zalesionego w bardzo istotny sposób skraca odległość pozwalającą na przeprowadzenie efektywnej transmisji. Otrzymane wyniki są zbliżone z rezultatami podawanymi w innych publikacjach (np. [2]). Uzyskane odległości są znacząco mniejsze od podawanych w wielu materiałach katalogowych wartości rzędu kilku km. Należy jednak zwrócić uwagę, że pomiary dokonywane były w warunkach w dużym stopniu odpowiadających realnym w praktycznych aplikacjach położeniem węzła i bramy, bez celowego pozycjonowania wiązki anteny węzła względem anteny bramy. Można więc stwierdzić, że odwzorowują one w dużym stopniu realne sytuacje eksploatacji sieci LoRaWAN na terenie miejskim.

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WZ/WE-IA/1/2020 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez Ministra Edukacji i Nauki.*

*Na rysunkach 1 oraz 4 wykorzystano grafiki (ikony) dostępne w ramach Cisco Free Icons Library.*

**Autor:** dr inż. Andrzej Zankiewicz, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: [a.zankiewicz@pb.edu.pl](mailto:a.zankiewicz@pb.edu.pl)

## LITERATURA

- [1] Frangoudis P. A., Tsigkanos C., Dustdar S., Connectivity Technology Selection and Deployment Strategies for IoT Service Provision Over LPWAN, *IEEE Internet Computing*, 25 (2021), No. 1, 61-70
- [2] Pasolini G, Buratti C, Feltrin L, Zabini F, De Castro C, Verdore R, Andrisano O., Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies, *Sensors*, 18 (2018), No. 4, 1118
- [3] Behjati M, Mohd Noh AB, Alobaidy HAH, Zulkifley MA, Nordin R, Abdullah NF., LoRa Communications as an Enabler for Internet of Drones towards Large-Scale Livestock Monitoring in Rural Farms, *Sensors*, 21 (2021), No. 15, 5044
- [4] Yim D. et al., An experimental LoRa performance evaluation in tree farm, *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2018, 1-6
- [5] Lin K., Hao T., Experimental Link Quality Analysis for LoRa-Based Wireless Underground Sensor Networks, *IEEE Internet of Things Journal*, 8 (2021), No. 8, 6565-6577

- [6] Lin K., Hao T., Zheng W., He W., Analysis of LoRa Link Quality for Underwater Wireless Sensor Networks: A Semi-empirical Study, *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2019, 120-122
- [7] Renzone G. Di, Parrino S., Peruzzi G., Pozzebon A., Bertoni D., LoRaWAN Underground to Aboveground Data Transmission Performances for Different Soil Compositions, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70 (2021), 1-13
- [8] Torres A. P. A., Silva C. B. D., Filho H. T., An Experimental Study on the Use of LoRa Technology in Vehicle Communication, *IEEE Access*, 9 (2021), 26633-26640
- [9] Ballerini M., Polonelli T., Brunelli D., Magno M., Benini L., NB-IoT Versus LoRaWAN: An Experimental Evaluation for Industrial Applications, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16 (2020), No. 12, 7802-7811
- [10] Hosseinzadeh S., Larijani H., Curtis K., Wixted A., Amini A., Empirical propagation performance evaluation of LoRa for indoor environment, *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2017, 26-31
- [11] Witryna internetowa stowarzyszenia Lora Alliance, <http://loralliance.org>
- [12] Witryna internetowa firmy Semtech, <http://www.semtech.com>
- [13] Berni A., Gregg W., On the Utility of Chirp Modulation for Digital Signaling, *IEEE Transactions on Communications*, 21 (1973), No. 6, 748-751
- [14] Semtech, LoRa Modulation basics, Application Note AN1200.22, rev. 2, May 2015, dokument dostępny na stronie <https://loradevelopers.semtech.com/library/product-documents/>, dostęp 09.07.2022
- [15] RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters, LoRa Alliance, Inc., 2021, dokument dostępny na stronie [https://loralliance.org/resource\\_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/](https://loralliance.org/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/), dostęp 09.07.2022
- [16] Decyzja wykonawcza Komisji (UE) 2017/1483 z dnia 8 sierpnia 2017 r. zmieniająca decyzję 2006/771/WE w sprawie harmonizacji widma radiowego na potrzeby urządzeń bliskiego zasięgu i uchylająca decyzję 2006/804/WE (notyfikowana jako dokument nr C(2017) 5464) (Tekst mający znaczenie dla EOG.). Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 214 z 18.8.2017, str. 3—27
- [17] Semtech, „How to Qualify a LoRaWAN™ Device in Europe”, Technical Note TN1300.01, Rev 1.0, February 2018, dokument dostępny na stronie <https://loradevelopers.semtech.com/documentation/product-documents/>, dostęp 09.07.2022
- [18] The Things Network, Duty Cycle, dokument dostępny na stronie <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>, dostęp 09.07.2022
- [19] TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification, LoRa Alliance, Inc., 2020, dokument dostępny na stronie [https://loralliance.org/resource\\_hub/lorawan-104-specification-package/](https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/), dostęp 09.07.2022
- [20] Strona produktu Kerlink Wirnet iFemtoCell, <https://www.kerlink.com/product/wirnet-ifemtocell/>, dostęp 09.07.2022
- [21] Strona produktu Mikrotik Antenna kit for LoRa®, [https://mikrotik.com/product/lor\\_antenna\\_kit](https://mikrotik.com/product/lor_antenna_kit), dostęp 09.07.2022
- [22] Strona produktu Masters moduł z układem STM32WL. <https://masters.com.pl/pl/lorawan-jako-uzupelnienie-infrastruktury-smart-city-iot-poznaj-modul-masters-z-ukladem-stm32wl/>, dostęp 09.07.2022
- [23] Witryna usługi TTN Mapper, <https://ttnmapper.org/>, dostęp 09.07.2022
- [24] Witryna produktu RN2483 LoRa® Mote, <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/dm164138/>, dostęp 11.07.2022