

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł E L E K T R Y C Z N Y



Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych

Praca dyplomowa magisterska

na kierunku Elektrotechnika

w specjalności Systemy Wbudowane

Prywatna sieć czujnikowa wykorzystująca standard LoRa

inż. Mikołaj Rosiński

numer albumu 290988

promotor

dr inż. Łukasz Makowski

WARSZAWA 2023

Prywatna sieć czujnikowa wykorzystująca standard LoRa

Streszczenie

Standard LoRa, należący do technologii typu LPWA (rozległe sieci niskiej mocy, *Low Power Wide Area*), jest obecnie przedmiotem zainteresowań w przypadku analizy możliwości budowania sieci czujnikowych. Oferowane przez niego możliwości – duże zasięgi oraz niski pobór mocy przez wykorzystywane do implementacji urządzenia to jego główne zalety.

W celu sprawdzenia, czy możliwe jest wykorzystanie standardu LoRa do zbudowania prywatnej sieci czujnikowej, pozwalającej na zbieranie danych o otoczeniu (temperatura, ciśnienie, wilgotność) zostało zaprojektowane oraz zaimplementowane rozwiązanie, które wykorzystane zostało do weryfikacji takiego założenia.

Niniejsza praca przedstawia informacje potrzebne do zapoznania się ze standardem oraz podstawami jego działania. Opisane zostały działanie modulacji oraz parametry wpływające decydujące o działaniu sieci i możliwościach transmisji. Przedstawione zostały także kroki, które wymagane były do implementacji oprogramowania działającego na modułach. Zaimplementowane rozwiązanie wykorzystuje język C++ oraz płytki rozwojowe STM32 Nucleo64 L152. Przedstawione zostały elementy kodu źródłowego odpowiadającego za poszczególne elementy działania oprogramowania – komunikacja między modułami, zbieranie danych z otoczenia oraz wyznaczanie ich średniej kroczącej, a także transmisja ich przez magistralę I2C do modułu serwera sieciowego. Ponadto przedstawiona została metoda dekodowania informacji oraz prezentacjach ich użytkownikowi w formie strony internetowej dostępnej w sieci lokalnej. Pokazane zostały także przeprowadzone testy, które pozwoliły na sprawdzenie poprawności działania zaimplementowanego rozwiązania. Pełny kod źródłowy dostępny jest w przestrzeni publicznej, dzięki temu możliwe jest dalsze rozwijanie go.

Przeprowadzone zostały badania, które miały na celu określenie potencjału zaprojektowanej sieci. Przeanalizowane zostały widmo częstotliwości w trakcie transmisji danych w sieci, co pozwoliło na dokładniejsze zapoznanie się ze standardem. Ponadto zweryfikowane zostały skuteczne zasięgi komunikacji oraz przepustowość sieci, jak i zużycie energii podczas pracy modułów. Zebrane dane pozwoliły na stwierdzenie, że możliwe jest zbudowanie prywatnej sieci czujnikowej, bazując na standardzie LoRa.

Słowa kluczowe: sieci czujnikowe, LoRa, IoT, Internet Rzeczy, C++, STM32, mikrokontrolery

Private sensor network using the LoRa standard

Abstract

The LoRa standard, which belongs to LPWA (*Low Power Wide Area*) technology, is currently of interest when analysing the feasibility of building sensor networks. The capabilities it offers – long ranges and low power consumption of the devices used for implementation devices are its main advantages.

In order to test whether it is possible to use the LoRa standard to build a private sensor network, allowing the collection of ambient data (temperature, pressure, humidity), a solution was designed and implemented, which was used to verify such an assumption.

This work presents the information needed to learn about the standard and the basics of its operation. The operation of the modulation and the influencing parameters determining the network operation and transmission capabilities are described. The steps required to implement the software running on the modules are also presented. The implemented solution uses the C++ language and the STM32 Nucleo64 L152 development boards. The elements of the source code responsible for the various elements of the software operation – communication between the modules, collecting data from the environment and determining its moving average, and transmitting it via the I2C bus to the network server module – are presented. In addition, the method of decoding the information and presenting it to the user in the form of a web page accessible on the local network is presented. Testing done to verify the correct operation of the implemented solution is also shown. The full source code is available in the public domain, so that it can be further developed.

Tests were carried out to determine the potential of the designed network. The frequency spectrum during data transmission over the network was analysed, allowing a more detailed understanding of the standard. In addition, the effective communication ranges and network throughput were verified, as well as the energy consumption during module operation. The data collected made it possible to conclude that it is possible to build a private sensor network based on the LoRa standard.

Keywords: sensor networks, LoRa, IoT, Internet of Things, STM32, microcontrollers

Spis treści

1 Wstęp	9
2 Sieci w standardzie LoRa	11
2.1 Modulacja LoRa Spread Spectrum	13
2.2 Wyższe warstwy – protokół LoRaWAN	15
2.2.1 Architektura sieci LoRaWAN	16
3 Przygotowanie środowiska programistycznego	19
3.1 Rozpoczęcie projektu z PlatformIO Core	19
3.2 Praca z PlatformIO	20
3.2.1 Uruchamianie projektu	21
3.2.2 Zarządzanie bibliotekami	22
4 Implementacja oprogramowania	25
4.1 Framework oraz biblioteki	25
4.1.1 Wykorzystane biblioteki	26
4.1.2 Ograniczenia związane z wykorzystaniem Arduino oraz STM32duino	26
4.2 Implementacja oprogramowania elementów sieci	27
4.2.1 Oprogramowanie modułu MASTER	31
4.2.2 Oprogramowanie modułów SLAVE	38
4.3 Implementacja oprogramowania modułu serwera sieciowego	44
4.3.1 Wyświetlanie strony internetowej z danymi	49
4.3.2 Odbieranie oraz dekodowanie danych z sieci LoRa	52
5 Testy implementacji	55
5.1 Testy komunikacji sieci	55
5.2 Testy transmisji danych do serwera sieciowego	57
5.3 Testy działania serwera sieciowego oraz strony internetowej	58
6 Badania działającej sieci	61
6.1 Badanie komunikacji w sieci	61
6.2 Analiza widmowa transmisji w standardzie LoRa	63
6.2.1 Obserwacje transmisji w oprogramowaniu <i>gqrx</i>	63

6.2.2	Analiza zapisów danych I/Q zebranych <i>gqrx</i>	69
6.3	Badanie parametrów komunikacyjnych sieci	75
6.3.1	Skuteczny zasięg komunikacji	75
6.3.2	Badanie przepustowości sieci	78
6.4	Badanie poboru prądu i zużycia energii	79
6.4.1	Badanie poboru prądu przez moduły sieci	80
6.4.2	Maksymalny teoretyczny czas pracy sieci	82
7	Podsumowanie	85
Bibliografia		87
Spis rysunków		89
Spis tabel		91

Rozdział 1

Wstęp

Technologie typu LP-WAN – rozległe sieci niskiej mocy (ang. *Low Power Wide Area Networks*) obecnie znajdują szereg zastosowań przy budowaniu bezprzewodowych sieci czujnikowych, opierając się o Internet Rzeczy (IoT, ang. *Internet of Things*). Są one bardzo wydajną alternatywą dla sieci komórkowych oraz innych tradycyjnych rozwiązań sieci bezprzewodowych krótkiego zasięgu, które wykorzystywane są w środowisku IoT, takich jak ZigBee, Bluetooth. Sieci LPWA (ang. *Low Power, Wide Area*) oferują unikalny zestaw funkcji – łączność na dużych zasięgach dla urządzeń o niskim poborze mocy i wymaganej niskiej szybkości transmisji danych, których inne rozwiązania nie są w stanie zapewnić.

W ostatnim czasie pojawiają się różne standardy, które cieszą się szczególnym zainteresowaniem w przestrzeni technologii LP-WAN. Najbardziej popularnymi są LoRa (wykorzystując protokół LoRaWAN)[1] oraz Sigfox [2], jednakże są dostępne także rozwiązania alternatywne.

Niniejsza praca ma na celu przedstawienie możliwości zbudowania bezprzewodowej sieci czujnikowej, wykorzystując do tego standard LoRa. Rozdział 2 przedstawia teorię związaną ze standardem. Opisuje on jego teoretyczne możliwości, odniesienie do definicji zawartych w modelach sieci oraz możliwości związane z budowaniem sieci, a także typowe typologie. Ponadto przedstawia działanie modulacji, która jest podstawą standardu LoRa oraz protokołu LoRaWAN – wyznaczanie ramek transmisyjnych, analityczny model przebiegu sygnału, a także ważne dla modulacji parametry, które mają wpływ na możliwości sieci.

Rozdział 3 skupia się na krokach, które należało podjąć w celu implementacji oprogramowania – jakie narzędzia zostały wykorzystane. Opisuje także, jak praca z tymi narzędziami wygląda – podstawowe informacje na ich temat, uruchamianie projektów oraz zarządzanie elementami oprogramowania.

Szczegółły implementacji, podział na poszczególne elementy przedstawia rozdział 4. Opisuje wykorzystaną bazę (stm32duino) oraz potrzebne biblioteki, które umożliwiły napisanie kodu źródłowego. Pokazane zostały także ograniczenia oraz problemy, które zostały napotkane podczas tworzenia oprogramowania. Ponadto przedstawia poszczególne elementy wchodzące w skład oprogramowania, które wykorzystane zostało do badań sieci – elementy składające się na nawiązanie połączenia

Rozdział 1. Wstęp

między modułami, zbieranie danych z podłączonego do modułów sensora temperatury i ciśnienia oraz transmisji danych do modułu serwera sieciowego. Opisane zostały także funkcje pozwalające na wyznaczanie średniej kroczącej oraz implementacja strony internetowej wykorzystywanej do przeglądania danych zbieranych przez sieć. Rozdział 5 przedstawia wykonane testy, które pozwoliły na określenia czy zaimplementowane oprogramowanie działa poprawnie.

Aby określić czy możliwe jest zbudowanie prywatnej sieci czujnikowej bazującej na standardzie LoRa, wykonane zostały jej badania. Przedstawia to rozdział 6. Sprawdzone zostały podstawowe parametry – możliwości komunikacji oraz stopień błędów podczas przesyłania danych. Opisane zostały także przeprowadzona analiza widmowa transmisji między modułami oraz podjęte próby obserwacji poszczególnych elementów składowych ramki wiadomości w modulacji LoRa. Ponadto rozdział przedstawia wykonane badania w celu określenia skutecznego zasięgu komunikacji, przepustowości sieci, aby móc porównać je z wartościami, które podawane są jako możliwości standardu. Dodatkowo opisane zostały wykonane badania zużycia energii przez moduły sieci, które miały na celu określenie maksymalnego czasu pracy zaimplementowanego rozwiązania w przypadku wykorzystania zasilania baterijnego.

Rozdział 2

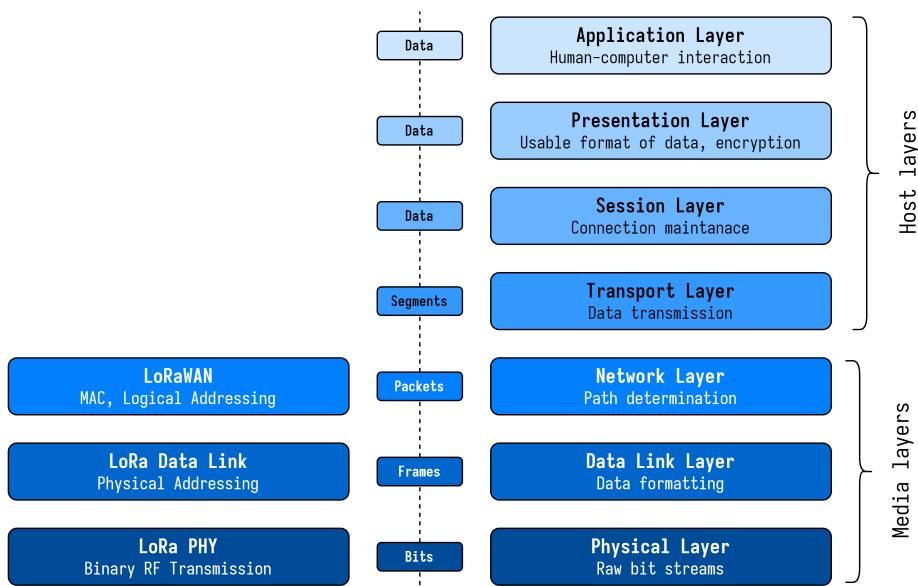
Sieci w standardzie LoRa

Standard LoRa (nazwa pochodzi od angielskich słów *Long Range*) należy do grupy systemów z rozproszonym widmem (ang. *Spread Spectrum*) bazującą na technice *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Wykorzystuje ona szerokopasmowe impulsy typu „chirp” modulowane liniową częstotliwością w celu kodowania przesyłanych informacji. Sygnał jest sinusoidą, której częstotliwość wzrasta („upchirp”) lub maleje („downchirp”) w czasie [3, 4]. LoRa jest technologią modulacji sygnałów przeznaczoną do budowania sieci niskiej mocy o dużym zasięgu (LPWAN, ang. *Low Power, Wide Area Network*).

Wykorzystanie LoRa pozwala na budowanie sieci, które mogą transmitować na bardzo duże odległości – teoretycznie do 5 km w terenach zabudowanych oraz do 15 km na terenach otwartych [3], zużywając przy tym małe ilości energii. Zaprojektowana z myślą o urządzeniach wykorzystujących zasilanie baterijne w celu podłączenia ich bezprzewodowo do lokalnych, regionalnych lub globalnych sieci. Standard wykorzystuje transmisje na bezlicencyjnych częstotliwościach radiowych poniżej 1 GHz – przykładowo w Europie jest to 868 MHz (EU868), natomiast w Ameryce Północnej 915 MHz (US915).

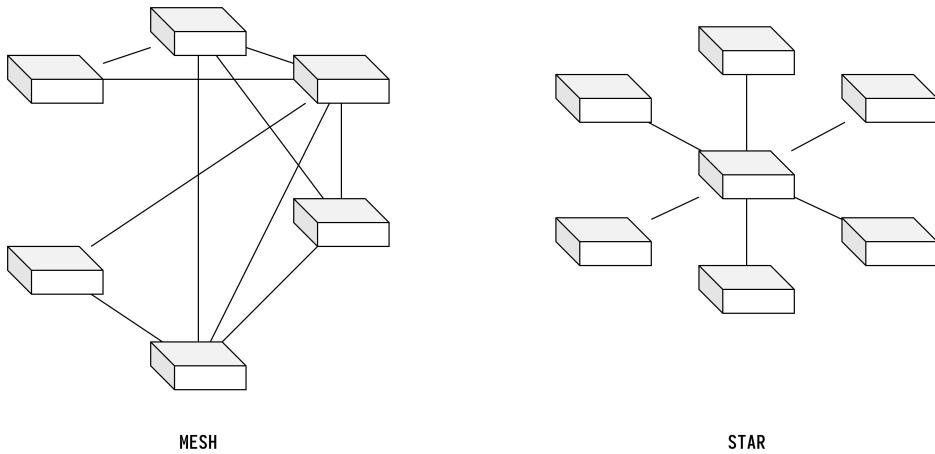
Zgodnie z definicją siedmiowarstwowego Modelu Referencyjnego OSI dla sieci, którego schemat przedstawia rys. 1, standard LoRa jest wyłącznie implementacją warstwy fizycznej (PHY, ang. *physical layer*). W modelu tym wyróżnia się następujące warstwy (w kolejności od najwyższej) [5]:

- warstwa 7, aplikacyjna: odpowiada za interakcję człowiek-komputer, warstwa, gdzie aplikacja ma dostęp do sieci,
- warstwa 6, prezentacyjna: zadbanie o użyteczny format danych, szyfrowanie danych,
- warstwa 5, sesyjna: utrzymanie połączeń, kontrola nad portami oraz sesjami,
- warstwa 4, transportowa: transmisja danych wykorzystując do tego odpowiednie protokoły,
- warstwa 3, sieciowa: zarządzanie trasami przesyłania danych,
- warstwa 2, łączna danych (kanałowa): definiowanie formatu przesyłanych danych,
- warstwa 1, fizyczna: przesyłanie logicznych zer oraz jedynek (pojedynczych bitów).



Rysunek 1. Schemat siedmiowarstwowego modelu OSI

Wykorzystując standard LoRa, możliwe jest zbudowanie prostych sieci, w których komunikacja odbywa się bezpośrednio pomiędzy modułami sieci metodą urządzenie-urządzenie (D2D, ang. *device-to-device*). Sieć taka będzie miała ograniczone możliwości weryfikacji integralności (spójności) danych. Sama warstwa fizyczna nie posiada żadnego mechanizmu rozpoznawania wysyłanych lub odbieranych danych, dostępne są tylko kody CRC (ang. *Cyclic Redundancy Check*), które pozwalają tylko na zero-jedynkowe określenie czy wystąpił błąd, bez możliwości określenia, w którym momencie wystąpił czy podjęcia próby naprawienia go. Topologiami, które można zastosować, są topologia gwiazdowa (ang. *star*) – jeden moduł centralny, z którym bezpośrednio komunikują się pozostałe urządzenia lub topologia siatki (ang. *mesh*) – moduły połączone są ze sobą w grupy (np. na podstawie ich lokalizacji), transmisje odbywają się na zasadzie ogłoszeń i przesyłane dalej do momentu, gdy dotrą do adresata. Schematy takich topologii przedstawione zostały na rys. 2.



Rysunek 2. Schematy sieci w topologiach mesh oraz gwiazdowej

2.1 Modulacja LoRa Spread Spectrum

W modulacji LoRa rozproszenie widma uzyskiwane jest dzięki generowaniu sygnałów typu chirp (tzw. „świergotach”), które posiadają ciągłą zmianę w ich częstotliwości. Przy wykorzystaniu takiej metody przesunięcia w czasie oraz częstotliwości są identyczne dla nadajnika, jak i odbiornika, dzięki czemu złożoność konstrukcji odbiornika może być znacznie zredukowana [6]. Ponadto LoRa wykorzystuje rozproszenie ortogonalne (prostopadłe), co pozwala urządzeniom pracującym w sieci na dodatkowe oszczędzanie energii poprzez dostosowanie swoich parametrów pracy w stosunku do potrzeb.

Jedna ramka transmisji LoRa składa się z ciągu zmodulowanych symboli $s(nT_s)$, zgodnie z zależnością [7, 8]:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N_m} s_n(t - nT_s), \quad (1)$$

gdzie N_m jest całkowitą ilością symboli w przesyłanej ramce.

Modulacja bazuje na cyklicznych (powtarzających się) sygnałach, a przesunięcia w stosunku do częstotliwości nośnej („pozycji startowej”) pozwalają na zakodowanie wartości symbolu. Parametrem pozwalającym na kontrolę częstotliwości chirpów jest *spreading factor* (SF). W przypadku regionu europejskiego wartość ta może zostać wybrana z przedziału {7,8,9,10,11,12}. Im większa jej wartość, tym dłużej trwa przesłanie jednego sygnału, co w efekcie pozwala na przesłanie większej ilości bitów w jednym symbolu. Jeden chirp („świergot”) w standardzie LoRa zaprojektowany został do odzwierciedlenia $M = 2^{\text{SF}}$ wartości symboli, gdzie ich czas trwania (długość) dana jest w postaci $T_s = M/\text{BW}$, a wartość BW przedstawia wykorzystaną szerokość pasma [7]. LoRa wykorzystuje zadane wartości szerokości pasma, z przedziału $\text{BW}=\{125,250,500\}$ kHz, przy czym ich dostępność zależy od tego, gdzie sieć operuje i jest regulowana [9], tak samo, jak inne parametry sieci, przez LoRa Alliance. Zmodulowany przez LoRa przebieg można przedstawić analitycznie [8] w postaci

równania:

$$s(t) = \exp \left(j2\pi \int_0^t \left[(\beta x + \gamma_n) \bmod_{BW} - \frac{BW}{2} \right] dx \right), \quad (2)$$

gdzie γ_n to przesunięcie częstotliwości, które można wyznaczyć, korzystając z zależności:

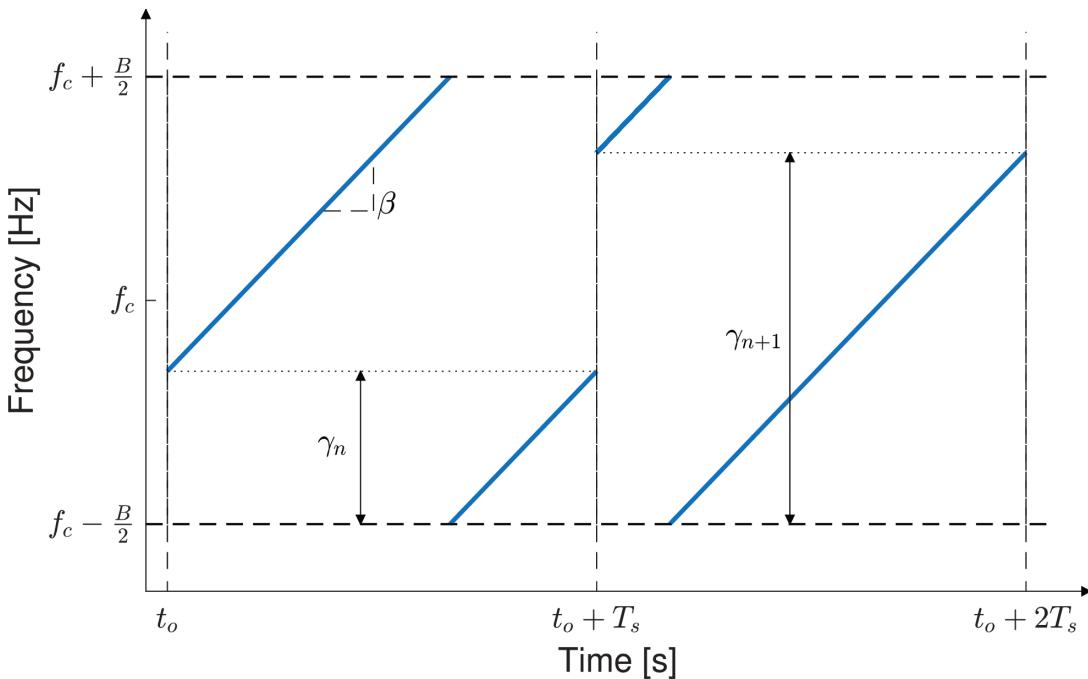
$$\gamma_n = m_n \Delta_f = \frac{m_n}{T_s}, \quad (3)$$

gdzie m_n jest wartością symbolu z przedziału $m_n \in \{0, 1, \dots, M-1\}$, n jest indeksem symbolu, a Δ_f przedstawia krok między zmianami częstotliwości.

W przypadku LoRa krok w zmianie częstotliwości wybrany został jako częstotliwość pojedynczego symbolu B/M . Kolejnym ważnym dla modulacji LoRa parametrem jest tzw. „częstotliwość świergotania” (ang. *Chirp Rate*). Odpowiednio dobrany, pozwala na separację symboli oraz uniknięcie zakłóceń międzysymbolowych (ISI, ang. *Inter-Symbol Interference*). Wyznaczany jest na podstawie czasu trwania jednego symbolu T_s w danym paśmie transmisyjnym BW , tak aby każdy symbol zaczynał się oraz kończył na takiej samej częstotliwości:

$$\beta = \frac{f_{high} - f_{low}}{T_s} = \frac{BW}{T_s}, \quad (4)$$

gdzie f_{high} oraz f_{low} to odpowiednio górną i dolną granicę częstotliwości pojedynczego świergotu. W przypadku, gdy wartość $\beta > 0$, sygnał będzie typu upchirp (o częstotliwości rosnącej), natomiast typu downchirp (o częstotliwości malejącej) dla $\beta < 0$. Reprezentacja dwóch symboli LoRa [8] przedstawiona została na rys. 3. Dzięki zastosowaniu takiej modulacji, energia sygnału rozproszona jest w większym paśmie transmisyjnym, co pozwala na znaczne zredukowanie wąskopasmowych zakłóceń (ang. *narrow-band interferences*). W przypadku, gdy do transmisji wybrana zostanie wyższa wartość SF, zwiększa się czułość odbiornika z uwagi na zwiększoną energię symbolu, jednakże skutkuje to zmniejszeniem przepustowości sieci oraz zwiększoną zużyciem energii przez moduły [10].



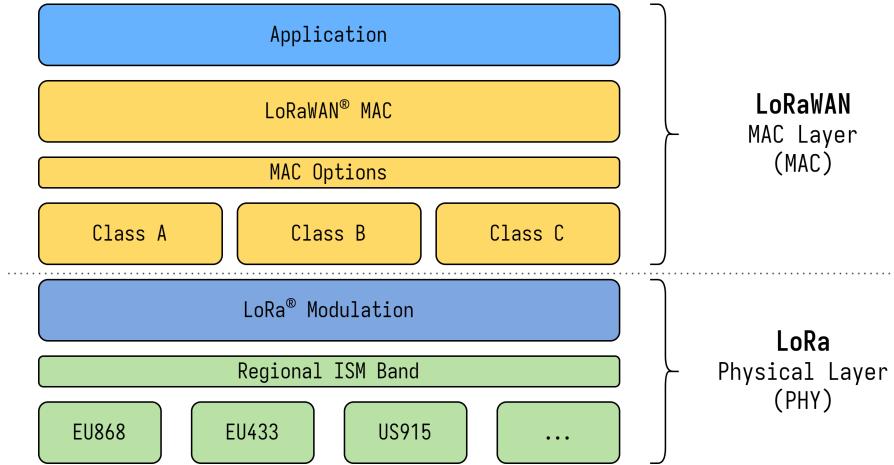
Rysunek 3. Przebieg dwóch symboli typu upchirp w modulacji LoRa, ilustracja wykorzystana zgodnie z licencją publikacji [8]

2.2 Wyższe warstwy – protokół LoRaWAN

LoRaWAN to ustandaryzowany, otwarty protokół sieciowy, za którego utrzymanie odpowiada LoRa Alliance (do którego należą m.in. Semtech oraz ST Microelectronics). Obecnie aktualną wersję jest 1.0.4 (październik 2020). Protokół definiuje górne warstwy sieci wykorzystujących warstwę fizyczną LoRaPHY. Wykorzystując go, możliwe jest budowanie sieci zapewniających komunikację dwukierunkową pomiędzy modułami (urządzeniami końcowymi), bramami oraz serwerami. Na LoRaWAN składa się kilka elementów tworzących jej stos technologiczny (ang. *technology stack*). Jego schemat przedstawiony został na rys. 4.

Widoczne na schemacie klasy (A, B, C) określają tryb pracy urządzeń operujących w sieci LoRaWAN. Wszystkie urządzenia muszą spełniać operację w klasie A, urządzenia klasy B muszą móc operować w klasie B oraz klasie A, natomiast w przypadku urządzeń klasy C – muszą one operować w każdej z klas [11, 12].

Podstawowa klasa – klasa A przewiduje 3 okna transmisyjne, 1 na transmisję do sieci (uplink) oraz 2 na odbieranie danych (downlink). Urządzenia klasy A nie mogą być aktuatorami, ponieważ to one rozpoczynają wymianę danych w sieci. Podczas normalnej pracy urządzenie jest w stanie spoczynku. W momencie, gdy wystąpi zmiana w jego otoczeniu, wysyłane są dane do sieci w oknie Tx. Następnie urządzenie oczekuje na odpowiedź. Jeżeli nie dostanie jej w oknie Rx1 (pierwszym oknie odbierania), to na krótki czas przechodzi w stan spoczynku, po czym wybudza się, oczekując na odpowiedź w oknie Rx2 (drugim oknie odbierania). W przypadku klasy A, urządzenie nie będzie próbowało



Rysunek 4. Schemat stosu technologicznego sieci wykorzystujących LoRaWAN

ponownie nadawać, jeżeli dostanie odpowiedź w pierwszym oknie (Rx1) lub jeżeli drugie okno po ostatniej transmisji (Rx2) zostanie zakończone.

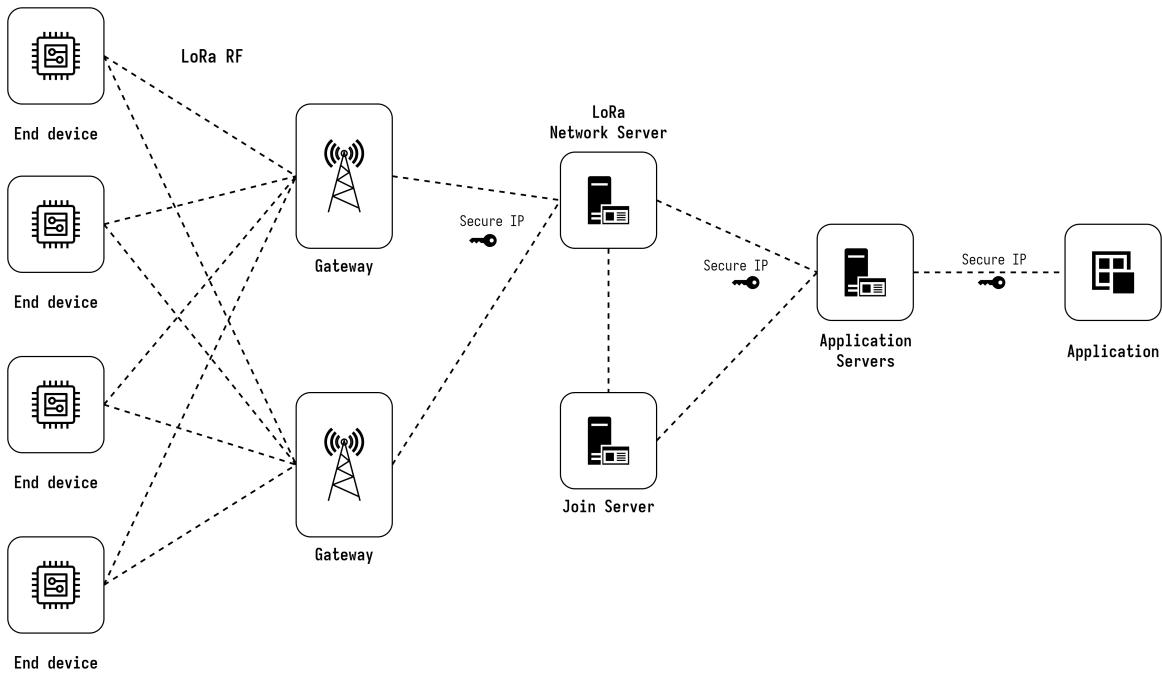
Klasa B urządzeń oferuje możliwość pracy na zaplanowanym harmonogramie z określonymi, stałymi w czasie, oknami na odbieranie danych [12]. W przeciwieństwie do klasy A, urządzenia klasy B nadają się do pracy jako sensory oraz jako aktuatorów. Praca w klasie B jest oparta na procesie nazywanym *beaconing*. Zsynchronizowane czasowo urządzenie (*beacon*) okresowo nadaje w sieci poprzez bramy i dzięki temu urządzenia końcowe synchronizują swój wewnętrzny zegar. Dzięki synchronizacji urządzenia mogą nasłuchiwać tylko w określonych momentach, mając pewność, że w momencie otwarcia swojego okna mogą się spodziewać odbioru danych.

Urządzenia klasy C operując w trybie „zawsze włączone”, więc najczęściej nie są oparte o zasilanie baterijne. W tym przypadku są one w stanie ciągłego nasłuchu, pod warunkiem, że same nie nadają wiadomości do sieci. W klasie C zaimplementowane zostały takie same okna jak w przypadku klasy A, z tą różnicą, że okno Rx2 nie zostaje przerwane aż do momentu, gdy urządzenie końcowe zaczyna samo nadawać i trwa jego okno Tx. Dzięki temu urządzenia mogą otrzymywać wiadomości w prawie każdej chwili.

2.2.1 Architektura sieci LoRaWAN

Na sieci oparte o protokół LoRaWAN składa się więcej elementów niż w przypadku sieci wykorzystujących tylko warstwę fizyczną. Należą do nich: urządzenia końcowe, bramy oraz kilka rodzajów serwerów. Implementacja takie rozwiązania jest przez to bardziej złożona, ale zapewnia dzięki temu większe możliwości przykładowo mniejszy wpływ terenu na komunikację lub szyfrowanie przesyłanych danych. Przykładowy schemat architektury sieci LoRaWAN przedstawiony został na rys. 5.

Urządzeniem końcowym może być np. sensor, który zbiera dane ze swojego otoczenia. Takie urządzenie pracuje najczęściej na zasilaniu baterijnym. Jeżeli jest ono urządzeniem wyposażonym



Rysunek 5. Schemat architektury sieci LoRaWAN

w możliwość komunikacji przez LoRa, to podczas jego produkcji przypisywany jest mu unikalny identyfikator. Pozwala on przykładowo na zarządzenie urządzeniem w sieci oraz bezpieczną transmisję danych do sieci.

Bramą (ang. *Gateway*) jest urządzenie, które odbiera zmodulowany sygnał LoRa od dowolnego urządzenia w jego zasięgu i przekazuje go do dalszych elementów sieci – serwerów sieciowych LoRaWAN. Nie występuje tutaj bezpośrednie przypisanie urządzeń do konkretnych bram, a każde urządzenie końcowe może być obsługiwane przez wiele bram w danym obrębie sieci. Dzięki temu poziom błędu pakietów jest znacznie niższy, ponieważ jest bardzo duża szansa, że przynajmniej jedna brama poprawnie odbierze wiadomość nadawaną przez urządzenie końcowe.

Pierwszym typem serwera jest serwer sieciowy LoRaWAN (LNS, ang. *LoRaWAN network server*). Urządzenie to zarządza całą siecią. Dynamicznie modyfikuje parametry w zależności od zmieniających się warunków oraz zapewnia bezpieczne, szyfrowane 128-bitowym standardem AES (ang. *Advanced Encryption Standard*) połączenie między elementami sieci (urządzeniami końcowymi a serwerem aplikacji). Drugim typem serwera są serwery aplikacyjne (ang. *Application server*), których zadaniem jest bezpiecznie odbieranie, zarządzanie oraz interpretacja danych z sieci. Ponadto odpowiedzialne są za generowanie pakietów, które potem przesyłane są do urządzeń końcowych. Ostatnim typem serwera są serwery *Join* – ich zadaniem jest zarządzanie procesem uruchamiania połączenia do sieci dla urządzeń końcowych, które wysiączą prośbę o dołączenie.

Rozdział 3

Przygotowanie środowiska programistycznego

Oprogramowanie wszystkich elementów zostało napisane z wykorzystaniem PlatformIO. Narzędzie pozwala na budowanie pod systemy wbudowane na wiele platform [13], w tym wykorzystane do zbudowania sieci STMicroelectronics STM32 Nucleo. Do komplikacji kodu źródłowego możliwe jest użycie wtyczki do edytora Visual Studio Code „PlatformIO IDE” lub samodzielne narzędzia CLI (ang. *Command Line Interface*) „PlatformIO Core”.

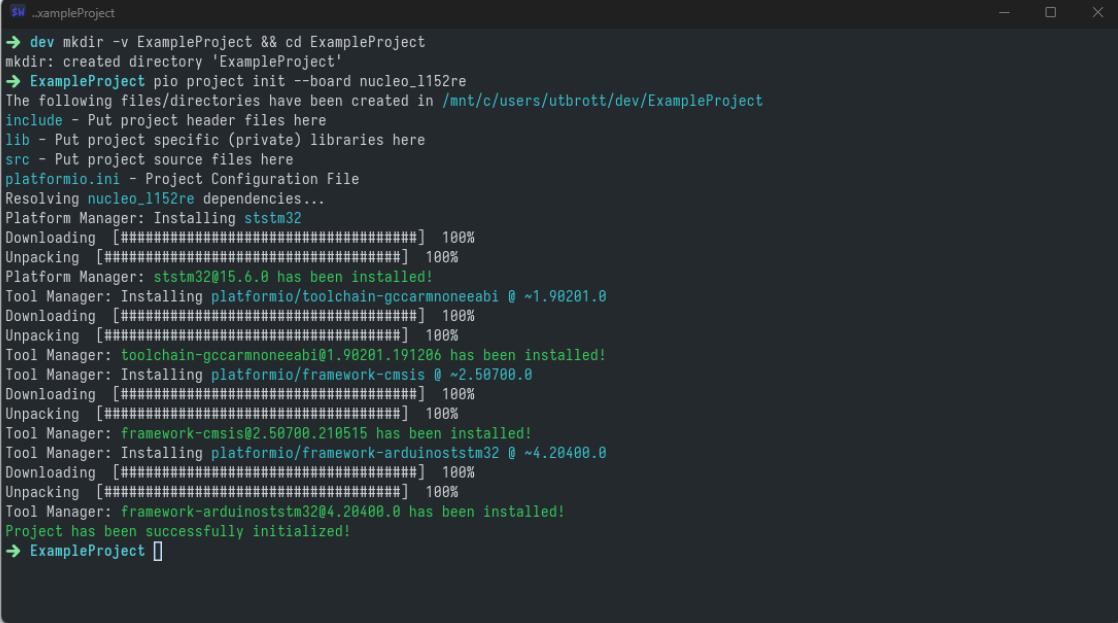
Rozwiązanie to zostało wybrane jako główne narzędzie do komplikacji oraz wgrywania kodu źródłowego, z uwagi na to, że działa na wielu platformach. Dzięki temu nie jest wymagane instalowanie oraz ustawianie osobnych, dedykowanych środowisk dla każdej z wykorzystywanych platform. Jedynym wymogiem, aby móc zacząć pracę jest zainicjowanie projektu oraz ustawienie podstawowej konfiguracji. Zadanie to jest bardzo proste, ponieważ dokumentacja narzędzia jest rozbudowana i bardzo szczegółowa.

3.1 Rozpoczęcie projektu z PlatformIO Core

Całość sieci składa się z dwóch oddzielnego projektów – pierwszy z nich to projekt uniwersalny dla modułów MASTER oraz SLAVE sieci LoRa, drugi natomiast wykorzystywany jest do mikrokontrolera Adafruit Feather M0. Aby rozpocząć nowy projekt, należy wykorzystać komendę, gdzie argumentem jest docelowy mikrokontroler:

```
pio project init --board <board>
```

Zrzut ekranu z procesu tworzenia przykładowego projektu, wykorzystując do tego PlatformIO Core przedstawiony został na rys. 6. Widoczny proces instalacji dodatkowych narzędzi wymagany jest zawsze przy tworzeniu nowego projektu na nowej platformie (w przypadku, gdy platforma była już wykorzystywana PlatformIO weryfikuje tylko czy zainstalowane biblioteki, narzędzia są w najnowszej wersji). Ponieważ komenda została wywołana wewnętrz maszyny wirtualnej, na świeżo zainstalowanym PlatformIO wymagane było pobranie oraz instalacja potrzebnych elementów.



```
$ pi .xampleProject
→ dev mkdir -v ExampleProject && cd ExampleProject
mkdir: created directory 'ExampleProject'
→ ExampleProject pio project init --board nucleo_l152re
The following files/directories have been created in /mnt/c/users/utbrott/dev/ExampleProject
include - Put project header files here
lib - Put project specific (private) libraries here
src - Put project source files here
platformio.ini - Project Configuration File
Resolving nucleo_l152re dependencies...
Platform Manager: Installing ststm32
Downloading [########################################] 100%
Unpacking [########################################] 100%
Platform Manager: ststm32@15.6.0 has been installed!
Tool Manager: Installing platformio/toolchain-gccarmnoneeabi @ ~1.90201.0
Downloading [########################################] 100%
Unpacking [########################################] 100%
Tool Manager: toolchain-gccarmnoneeabi@1.90201.191286 has been installed!
Tool Manager: Installing platformio/framework-cmsis @ ~2.50700.0
Downloading [########################################] 100%
Unpacking [########################################] 100%
Tool Manager: framework-cmsis@2.50700.210515 has been installed!
Tool Manager: Installing platformio/framework-arduinostm32 @ ~4.20400.0
Downloading [########################################] 100%
Unpacking [########################################] 100%
Tool Manager: framework-arduinostm32@4.20400.0 has been installed!
Project has been successfully initialized!
→ ExampleProject []
```

Rysunek 6. Tworzenie nowego projektu wykorzystując do tego PlatformIO Core (CLI)

W przypadku projektu dla sieci LoRa wykorzystane zostały płytki Nucleo L152RE, stąd argumentem było `nucleo_l152`, natomiast dla projektu serwera sieci lokalnej – `adafruit_feather_m0`. Użycie komendy rozpoczyna proces tworzenia nowego projektu. Na podstawie podanego argumentu tworzony jest plik konfiguracyjny. Zdefiniowane zostają platforma projektu oraz wykorzystywany framework. W przypadku obu projektów wybrany został ten wykorzystywany przez Arduino z uwagi na dużą dostępność bibliotek, które działają bez potrzeby modyfikowania ich kodu źródłowego. Dodatkowo zdefiniowana została tutaj prędkość transmisji portu szeregowego.

W projekcie dla modułów sieci wykonana została modyfikacja pliku konfiguracyjnego – elementy wygenerowane przez narzędzie CLI PlatformIO przeniesione zostały do osobnej sekcji `[base_config]`, natomiast konfiguracje dla poszczególnych modułów znajdują się w dedykowanych „środowiskach”. Wprowadzone zmiany zostały dokładniej opisane w sekcjach o implementacji oprogramowania na poszczególne moduły (4.2, 4.3).

Poza plikiem konfiguracyjnym, narzędzie generuje też podstawową strukturę plików całego. Powstaje folder `src`, który dedykowany jest dla plików źródłowych, `include` dla plików nagłówkowych, `lib` dla bibliotek lokalnych oraz `tests` do testów jednostkowych, jeżeli planowane jest użycie ich.

3.2 Praca z PlatformIO

Po stworzeniu projektu możliwe jest przystąpienie do pisania kodu źródłowego na wybraną platformę. PlatformIO udostępnia możliwość komplikowania kodu oraz wgrywania go na docelowe urządzenie

poprzez jedną jedną komendę lub jeden przycisk w edytorze tekstu. Jest to bardzo dobre rozwiązanie, ponieważ dzięki temu możliwe jest skupienie się na rozwoju kodu źródłowego, zamiast czekania aż projekt będzie możliwy do uruchomienia i sprawdzenia.

3.2.1 Uruchamianie projektu

Uruchomienie projektu jest w przypadku PlatformIO rozumiane poprzez wykonanie komplikacji (`build`), wgranie skompilowanego kodu na urządzenie docelowe (`upload`) lub wykonanie zdefiniowanego zestawu testów jednostkowych (`test`). Aby uruchomić projekt należy wykorzystać komendę:

```
pio run [OPTIONS]
```

Argumentami dodatkowymi mogą być:

- environment: element konfiguracji projektu, który określa zależności w kwestiach komplikacji (np. flagi budowania projektu), programowania (wgrywania kodu) docelowych urządzeń, testów jednostkowych lub wykorzystanych bibliotek,
- target: cel uruchomienia (np. komplikacja albo kombinacja kilku celów jednocześnie),
- upload-port: port, do którego podłączone jest urządzenie i na które ma zosatać wgrany kod. Szczególnie użyteczne w przypadku, gdy pracuje się na wielu urządzeniach (mikrokontrolerach) jednocześnie,
- monitor-port: port, na którym po zakończeniu procesu ma zostać otwarty monitor portu szeregowego.

W przypadku opcji związanych z portem, jeżeli nie zostaną sprecyzowane (podane jako argument do komendy), PlatformIO będzie próbował wykryć je automatycznie. Dostępne jest jeszcze kilka innych opcji, jednakże są one znacznie rzadziej wykorzystywane, ponieważ ich domyślne opcje są tymi, które są najczęściej ustawiane. Przykładowe wykorzystanie komendy do komplikacji projektu przedstawione zostało na rys. 7.

```
pwsh.exe
~\Dev\lora-psn git:(main) pio run
Processing MASTER (platform: ststm32; board: nucleo_l152re; framework: arduino)
-----
Verbose mode can be enabled via `--v, --verbose` option
CONFIGURATION: https://docs.platformio.org/page/boards/ststm32/nucleo_l152re.html
PLATFORM: ST STM32 (15.6.0) > ST Nucleo L152RE
HARDWARE: STM32L152RE-T6 32MHz, 80KB RAM, 512KB Flash
DEBUG: Current (stlink) On-board (stlink) External (blackmagic, cmsis-dap, jlink)
PACKAGES:
- framework-arduinostm32 @ 4.20400.0 (2.4.0)
- framework-cmsis @ 2.50700.210515 (5.7.0)
- toolchain-gccarmnoneabi @ 1.90201.191206 (9.2.1)
LDF: Library Dependency Finder → https://bit.ly/configure-pio-ldf
LDF Modes: Finder ~ chain, Compatibility ~ soft
Found 16 compatible libraries
Scanning dependencies...
Dependency Graph
|-- Wire @ 1.0.0
|-- SPI @ 1.0.0
|-- STM32duino I-NUCLEO-LRWAN1 @ 1.0.1
|-- Adafruit BME280 Library @ 2.2.2
|-- Adafruit BusIO @ 1.14.1
|-- Adafruit Unified Sensor @ 1.1.9
Building in release mode
Checking size .pio\build\MASTER\firmware.elf
Advanced Memory Usage is available via "PlatformIO Home > Project Inspect"
RAM: [ ] 2.5% (used 2064 bytes from 81920 bytes)
Flash: [= ] 7.2% (used 37756 bytes from 524288 bytes)
===== [SUCCESS] Took 2.18 seconds =====
```

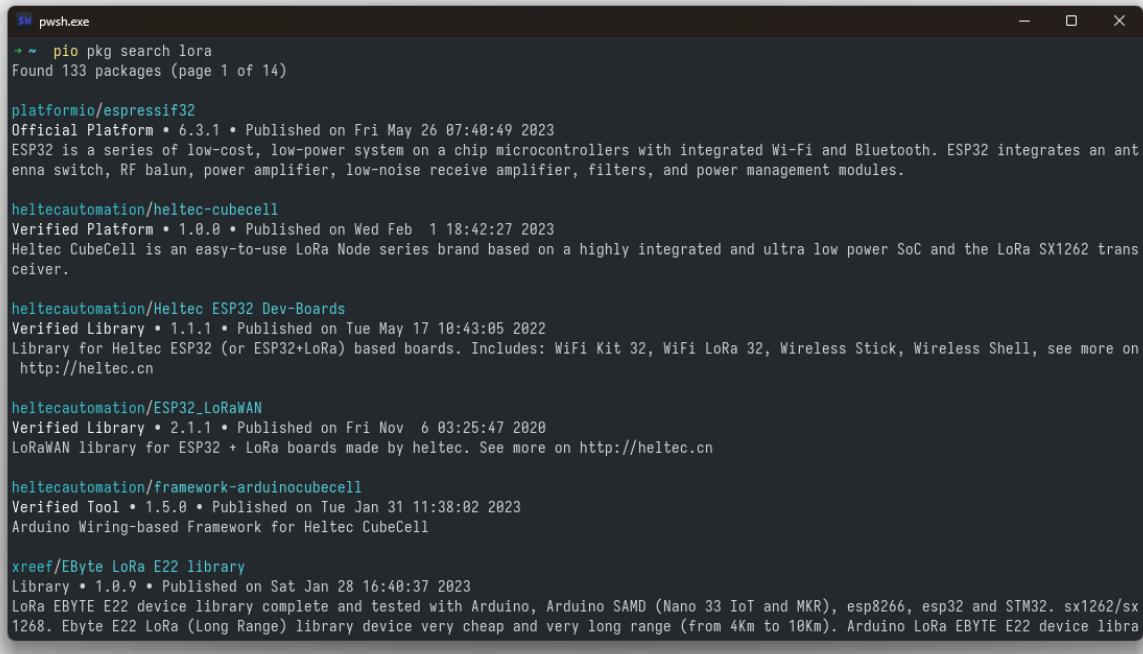
Rysunek 7. Przykładowe wywołanie komendy `pio run`, tutaj do komplikacji projektu

3.2.2 Zarządzanie bibliotekami

PlatformIO posiada wbudowany moduł dedykowany do zarządzania bibliotekami oraz innymi zasobami dołączanymi do projektu. Dzięki wykorzystaniu odpowiedniej podkomendy z zestawu:

```
pio pkg [COMMAND]
```

możliwe jest przeszukiwanie, instalowanie z, aktualizacja lub publikowanie do rejestru dostępnych bibliotek. Podczas wyszukiwania możliwe jest też zastosowanie filtrów, które w znacznym stopniu zmniejszają ilość wyników i przybliżają do znalezienia tego pasującego. Wykorzystując tę operację zainstalowane zostały potrzebne do projektów biblioteki (wbudowane dla frameworku Arduino, tak jak „Wire” czy te, które opublikowane zostały na platformie GitHub i dodane do rejestru PlatformIO). Na rys. 8 przedstawiony zostały przykładowy wynik wyszukiwania dostępnych bibliotek związanych z hasłem „LoRa”. Każdy wynik zawiera informację: nazwę, typ paczki, biblioteki, która została znaleziona, najnowszą wersję, datę publikacji oraz krótki opis tego czym dana paczka, biblioteka są. Komenda pokazuje także informacje o tym ile wyników zostało znalezionych. Instalowanie bibliotek odbywa się poprzez wykorzystanie argumentów `install --library` oraz podanie nazwy oraz wersji wybranego elementu (np. z uprzednio wyszukanej listy). Przykładowe wykorzystanie tej komendy przedstawione zostało na rys. 9. Podczas instalacji (co widoczne jest na zrzucie ekranu) narzędzie weryfikuje – oraz jeżeli jest to potrzebne instaluje – jakie inne biblioteki są wymagane przez tą, która użytkownik dodaje do projektu.



```
$ pwsh.exe
→ ~ pio pkg search lora
Found 133 packages (page 1 of 14)

platformio/espressif32
Official Platform • 6.3.1 • Published on Fri May 26 07:40:49 2023
ESP32 is a series of low-cost, low-power system on a chip microcontrollers with integrated Wi-Fi and Bluetooth. ESP32 integrates an antenna switch, RF balun, power amplifier, low-noise receive amplifier, filters, and power management modules.

heltecautomation/heltec-cubecell
Verified Platform • 1.0.0 • Published on Wed Feb 1 18:42:27 2023
Heltec CubeCell is an easy-to-use LoRa Node series brand based on a highly integrated and ultra low power SoC and the LoRa SX1262 transceiver.

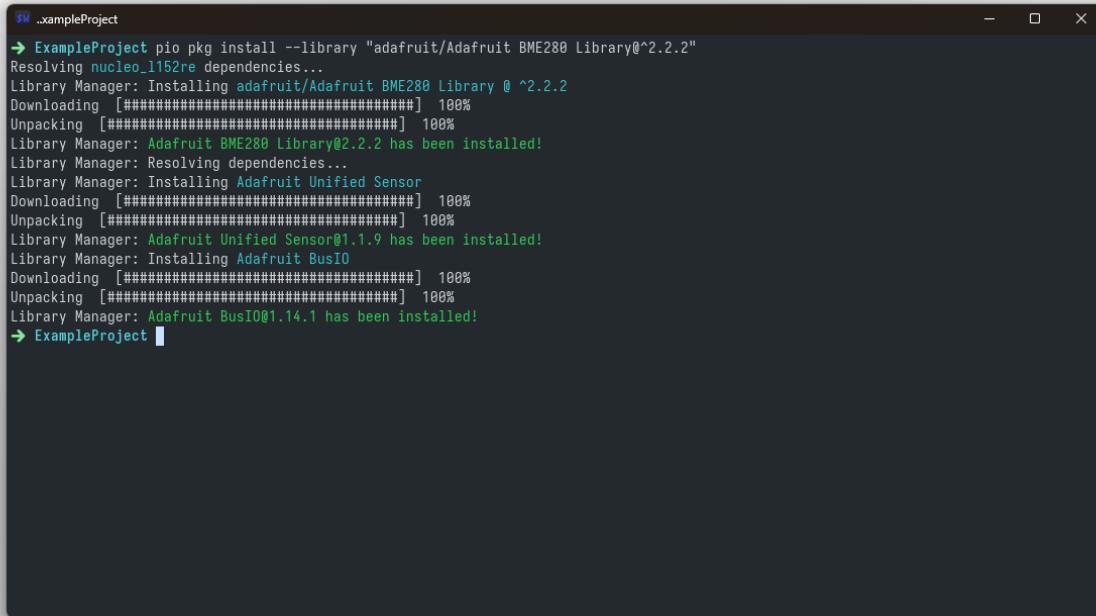
heltecautomation/Heltec ESP32 Dev-Boards
Verified Library • 1.1.1 • Published on Tue May 17 10:43:05 2022
Library for Heltec ESP32 (or ESP32+LoRa) based boards. Includes: WiFi Kit 32, WiFi LoRa 32, Wireless Stick, Wireless Shell, see more on http://heltec.cn

heltecautomation/ESP32_LoRaWAN
Verified Library • 2.1.1 • Published on Fri Nov 6 03:25:47 2020
LoRaWAN library for ESP32 + LoRa boards made by heltec. See more on http://heltec.cn

heltecautomation/framework-arduinoCubeCell
Verified Tool • 1.5.0 • Published on Tue Jan 31 11:38:02 2023
Arduino Wiring-based Framework for Heltec CubeCell

xreerf/EByte LoRa E22 library
Library • 1.0.9 • Published on Sat Jan 28 16:40:37 2023
LoRa EBYTE E22 device library complete and tested with Arduino, Arduino SAMD (Nano 33 IoT and MKR), esp8266, esp32 and STM32. sx1262/sx1268. Ebyte E22 LoRa (Long Range) library device very cheap and very long range (from 4Km to 10Km). Arduino LoRa EBYTE E22 device libra
```

Rysunek 8. Wyniki wyszukiwania bibliotek powiązanych z hasłem „LoRa”



```
$ ..exampleProject
→ ExampleProject pio pkg install --library "adafruit/Adafruit BME280 Library@^2.2.2"
Resolving nucleo_l152re dependencies...
Library Manager: Installing adafruit/Adafruit BME280 Library @ ^2.2.2
Downloading [########################################] 100%
Unpacking [########################################] 100%
Library Manager: Adafruit BME280 Library@2.2.2 has been installed!
Library Manager: Resolving dependencies...
Library Manager: Installing Adafruit Unified Sensor
Downloading [########################################] 100%
Unpacking [########################################] 100%
Library Manager: Adafruit Unified Sensor@1.1.9 has been installed!
Library Manager: Installing Adafruit BusIO
Downloading [########################################] 100%
Unpacking [########################################] 100%
Library Manager: Adafruit BusIO@1.14.1 has been installed!
→ ExampleProject █
```

Rysunek 9. Przykład wykorzystania komendy do instalacji bibliotek w projekcie

Rozdział 4

Implementacja oprogramowania

Całość oprogramowania wykorzystuje język programowania C++. Projektowana oraz implementowana sieć składa się z dwóch typów modułów, stąd też pojawiła się potrzeba zainicjowania dwóch osobnych projektów – jednego pod elementy sieci LoRa oraz drugiego, dedykowanego dla modułu serwera sieciowego (ang. *webserver*), z uwagi na zupełnie inną platformę sprzętową. Firmware napisany został z wykorzystaniem kilku różnych podejść:

- modułowego: każdy plik źródłowy odpowiada za zbiór funkcji wykonujących określone zadania (np. praca z biblioteką do modułów LoRa zaimplementowana jest w pliku `lora.cpp`),
- obiektowego: większość elementów kodu źródłowego jest reprezentowana w postaci osobnego obiektu. Każdy z nich posiada swoje funkcje oraz pełni określone zadania (np. obiekt „`bme`” ma za zadanie umożliwić współpracę z sensorami dostępnymi na płytce czujników BME280, która podłączona jest do każdego modułu `SLAVE`).

Ponadto, wykorzystane zostały elementy języka C++, które dostępne są w nowszych wersjach – funkcje szablonowe (ang. *template functions*) lub pętle typu `for-range`. Są to elementy, które znacznie ułatwiały implementację kodu oraz pozwoliły na minimalizację powtarzalności pewnych elementów.

Z uwagi na zastosowanie podejścia modułowego, całość oprogramowania składa się z wielu mniejszych elementów, podzielonych na odpowiadające im pliki. Aby mieć pewność, że implementowane funkcje nie będą posiadały żadnych kolizji w swoich nazwach, zastosowane zostały przestrzenie nazw (ang. *namespaces*). Co więcej, ponieważ kod źródłowy jest dostępny w domenie publicznej (repozytorium na platformie GitHub z licencją *MIT* [14]), podjęta została decyzja o dodaniu opisów działania do wszystkich elementów. Wykorzystany został do tego *Doxygen* – narzędzie do generowania dokumentacji (np. formie strony internetowej lub dokumentu w \LaTeX) na podstawie specjalnych znaczników w komentarzach [15].

4.1 Framework oraz biblioteki

Bazą do oprogramowania na wszystkich modułach jest framework Arduino oraz jego modyfikacja pod platformę STM32 – `stm32duino`, która pozwala na wykorzystanie pełnej funkcjonalności rdzenia

Arduino [16]. Pomimo tego, że biblioteki HAL (ang. *Hardware Abstraction Layer*) oraz framework STM32 są narzędziami dedykowanymi, w przypadku tego projektu nie można było ich zastosować. Oryginalna biblioteka do obsługi modułów rozszerzeń LoRa została wycofana z użytku na rzecz nowszej implementacji, pod nowszą wersję płytka Nucleo z wbudowanym hardwarem.

4.1.1 Wykorzystane biblioteki

Do implementacji oprogramowania na wszystkie moduły wykorzystanych zostało kilka bibliotek, które pozwalały na dodanie pełnego zakresu funkcjonalności do każdego z projektów.

W przypadku bibliotek zewnętrznych (niebędących częścią rdzenia Arduino) były to:

- STM32duino I-NUCLEO-LRWAN1: biblioteka do uruchomienia oraz pracy z modułem rozszerzeń LoRa. Pozwala ona na pracę w dwóch trybach: LoRaRadio – implementacja wykorzystująca tylko standard dolnej warstwy sprzętowej LoRa oraz LoRaWAN – dodająca możliwość podłączenia modułów do istniejącej sieci LoRa oraz wysyłanie i odbieranie z niej wiadomości,
- Adafruit BME280 Library: biblioteka dedykowana do modułów BME280, pozwalająca na zbieranie danych z sensorów, wykorzystując do tego magistralę SPI albo I2C (w zależności od posiadanego modułu rozszerzeń),
- Adafruit BusIO: uniwersalna biblioteka dodająca pewien poziom abstrakcji do komunikacji po magistralach I2C oraz SPI,
- WiFi101: biblioteka, która daje możliwość wykorzystania modułu WiFi obecnego na płytce Adafruit Feather M0 (wykorzystanej do uruchomienia serwera w sieci lokalnej).

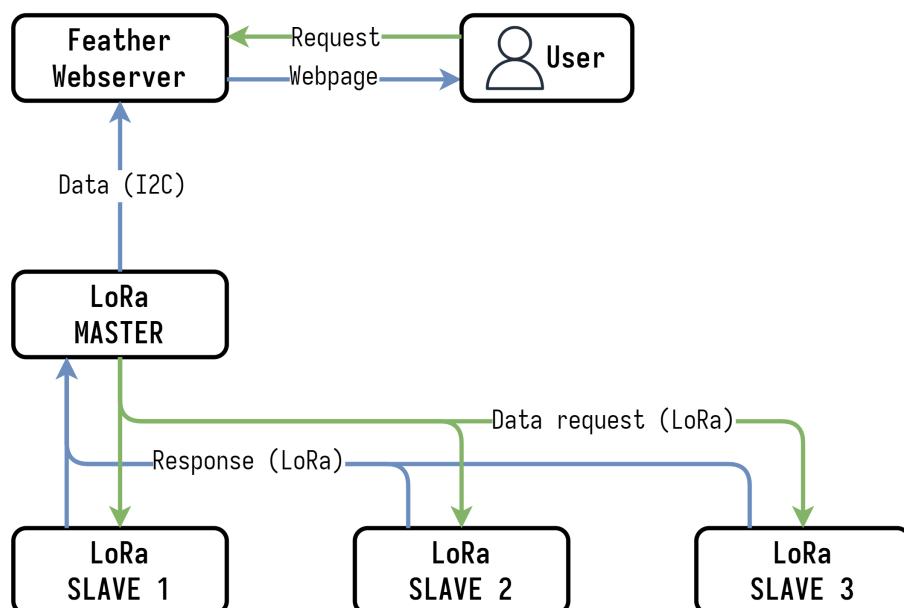
Ponadto, wykorzystane zostały biblioteki I2C oraz SPI, dostępne w rdzeniu Arduino. Potrzebne były one do uzyskania komunikacji pomiędzy mikrokontrolerem Adafruit Feather M0 a modułem WiFi, sensorami BM280 podłączonymi do modułów SLAVE oraz do stworzenia połączenia pomiędzy modułem MASTER a płytka z serwerem sieci lokalnej.

4.1.2 Ograniczenia związane z wykorzystaniem Arduino oraz STM32duino

STM32duino, pomimo tego, że ułatwił, bądź w ogóle pozwolił na pracowanie z wykorzystywany modułami, nie jest platformą idealną, pozbawioną ograniczeń. Jedynym z nich, które w dość znacznym stopniu utrudniło implementację oprogramowania dla modułów sieci, był brak przerwań programowych oraz ograniczone możliwości zastosowania przerwań sprzętowych. Stąd też pojawił się wymóg zastosowania pewnych obejść, jednocześnie tracąc na wydajności implementowanego rozwiązania. Ponadto, występowały też problemy związane z działaniem magistrali I2C, tutaj w przypadku modułów Feather oraz standardowego Arduino – niemożliwe było wykorzystanie wyświetlacza OLED pracującego na magistrali I2C oraz zarejestrowania samego mikrokontrolera jako części, z którą można komunikować się po tej magistrali.

4.2 Implementacja oprogramowania elementów sieci

Zaprojektowana sieć składała się w sumie z pięciu modułów – 4 z nich stanowiły elementy sieci LoRa, natomiast ostatni był wykorzystywany jako serwer w sieci lokalnej. W projekcie nie została wykorzystana pełna funkcjonalność LoRaWAN oraz typowa dla niej architektura (przedstawiona w podroziale 2.2, rys. 5), ponieważ implementacja takiego rozwiązania jest bardzo kosztowna i wymaga znacznie większej ilości elementów. Aby móc skorzystać ze specyfikacji wymagane jest posiadanie bramy (ang. gateway) oraz serwerów odpowiedzialnych za przyłączanie urządzeń, zarządzanie siecią oraz serwera aplikacyjnego. Z uwagi na to zastosowana została dużo prostsza i mniej wymagająca metoda budowania sieci, opierająca się na wykorzystaniu modułów w formie nadajników radiowych, pracujących w standardzie LoRa. Schemat ideowy budowanej sieci przedstawiony został na rys. 10.



Rysunek 10. Schemat zbudowanej sieci, z oznaczonymi elementami komunikacji

Oprogramowanie dla modułów pracujących w sieci LoRa zostało zaimplementowane w formie uniwersalnej – jeden projekt zawiera elementy dla modułu MASTER oraz modułów SLAVE. Plik konfiguracyjny projektu zawiera flagę, która definiuje, na jaki typ modułu kod zostanie skompilowany. Co więcej, w przypadku modułów SLAVE dodana została też flaga informująca o tym, jakie ID przypisane zostaje danej płytce. Rozwiążanie to odgrywa znaczącą rolę w tym, jak wiadomości są przesyłane w sieci. Fragment pliku konfiguracyjnego, który odpowiedzialny jest za definiowanie tych elementów przedstawiony został na listingu 1.

Wykorzystanie frameworku Arduino wymagało zastosowania pewnych schematów podczas implementacji. Dlatego też całość kodu podzielona jest na dwie sekcje `setup()` oraz `loop()`, wykonywane

```
1 [env:SLAVE1]
2 extends = base_config
3 build_flags =
4   -DBOARD_TYPE=lora::SLAVE
5   -DBOARD_ID=0x01
```

Listing 1. Fragment pliku konfiguracyjnego (tutaj dla SLAVE1) odpowiedzialny za definicję typu oraz ID modułu

odpowiednio raz, podczas startu modułu oraz w nieskończonej pętli, dopóki płytka ma zasilanie. Na rys. 11 przedstawiony został schemat blokowy zaimplementowanego oprogramowania – części zawartej w sekcji `setup()`.

Oba typy oprogramowania zaczynają od ustawienia portu szeregowego na 115200 baud (szybkość transmisji), następnie inicjowane jest rozszerzenie LoRa. Logowana jest informacja o typie płytki, a następnie kod oczekuje na informacje o starcie modułu rozszerzenia. W przypadku błędu oraz poprawnego startu na port szeregowy wystawiana jest odpowiednia informacja.

Następnie, w zależności od typu płytki, wykonywane jest kilka operacji. W przypadku modułów SLAVE są to:

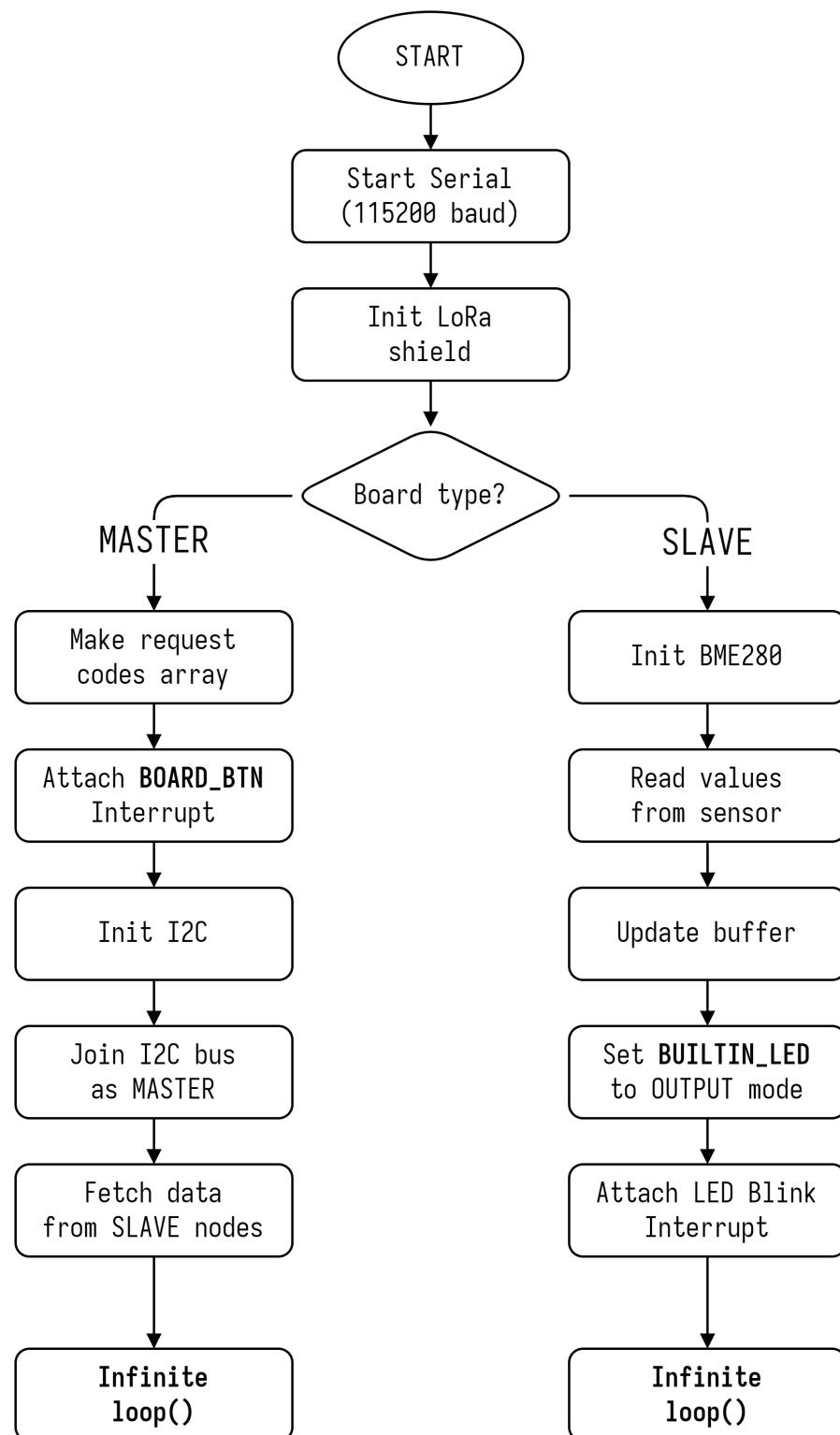
1. przygotowanie sensora BME280 oraz pobranie z niego danych,
2. aktualizacja zawartości bufora (wykorzystywanego do przechowywania odczytanych wartości),
3. przygotowanie diody LED, która informuje o trwającej komunikacji w sieci,
4. przygotowanie przerwania, wykorzystywanego do obsługi nowych zapytań.

Natomiast dla modułów MASTER wykonywany jest inny zestaw operacji, z uwagi na to, że taki moduł pełni zupełnie inną funkcję w sieci:

1. przygotowanie tablicy z „kodami” zapytań (jedno bajtowe wartości do określenia czego żąda MASTER),
2. inicjacja magistrali I2C i podłączenie modułu jako MASTER,
3. wykonanie podprogramu wysyłającego zapytania oraz odbierającego odpowiedzi od SLAVE-ów, tak aby tuż po starcie można było odczytać dane z sieci.

Ostatnim krokiem w obu przypadkach jest przejście do nieskończonej pętli i wykonywanie instrukcji w niej zawartych, wykorzystując do tego określony okres zegara.

Ponadto, oprogramowanie posiada zestaw definicji oraz funkcji wykorzystywanych do debugowania, które ułatwiały implementację oprogramowania – `globals.h` oraz `debug.h`. Najważniejszymi elementami pliku globalnych definicji są funkcje preprocesora – zwracających tylko ID modułu lub ID danej na podstawie kodu zapytania oraz struktury szablonowe (ang. *template structures*), które



Rysunek 11. Schemat blokowy części `setup()` oprogramowania modułów sieci LoRa, z podziałem na typ płytka

zawierają informację o tym jaki kształt powinny mieć dane zbierane z sensorów oraz przekazywane przez sieć. Definicję przedstawiono na listingu 2, natomiast dla funkcji wysyłającej sformatowane wiadomości przez port szeregowy na listingu 3. Implementacja oparta została o funkcję z rdzenia Arduino – `Serial.println()`.

```
1 #define DATAID_MASK(req) (req & 0xf0)
2 #define BOARDID_MASK(req) (req & 0x0f)
3 #define ARRSIZE(x) (sizeof(x) / sizeof(x[0]))
4
5 /**
6  * @brief Template struct for single value sensor data.
7  * @param T Field variable type
8  */
9 template <typename T>
10 struct SensorValues
11 {
12     T temperature;
13     T pressure;
14     T humidity;
15 };
16
17 /**
18  * @brief Template struct for sensor data that needs an array.
19  * @param T Field variable type
20  * @param N Array size
21  */
22 template <typename T, size_t size>
23 struct SensorData
24 {
25     T temperature[size];
26     T pressure[size];
27     T humidity[size];
28 };
```

Listing 2. Definicje funkcji dla preprocesora oraz struktury szablonowe (z polami o jednej wartości oraz z tablicami)

```

1  /**
2   * @brief Prints out a debug message line over Serial
3   *
4   * @param type: Debug message type @ref MsgType_t
5   * @param msg: Message string
6   */
7  void println(MsgType_t type, String msg);

```

Listing 3. Funkcji wykorzystywana do wysyłania sformatowanych wiadomości przez port szeregowy

4.2.1 Oprogramowanie modułu MASTER

Po wykonaniu instrukcji, które opisane zostały w poprzedniej sekcji, moduł MASTER przechodzi do pracy w nieskończonej pętli – `loop()`. Wszystko oparte jest na zegarze o zdefiniowanym okresie – wybrana została wartość 1 minuty (60000 milisekund). Implementacja oparta została o zegar nieblokujący (ang. *non-blocking timer*) z wykorzystaniem funkcji `millis()` – funkcji zwracającej ilość milisekund od momentu startu programu. Okres został zdefiniowany w definicjach preprocesora, w celu uniknięcia tzw. magicznych liczb (ang. *magic numbers*).

W momencie, gdy mija wymagany czas, program przechodzi do wykonania podprogramu odpowiadającego za wysyłanie zapytań oraz zbieranie odpowiedzi z sieci. Na rys. 12 przedstawiony został diagram blokowy instrukcji wykonywanych przez moduł MASTER w nieskończonej pętli oraz tego, co wykonywane jest w podprogramie komunikacji. Natomiast pełna implementacja obu tych elementów przedstawiona została na listingach 4 oraz 5.

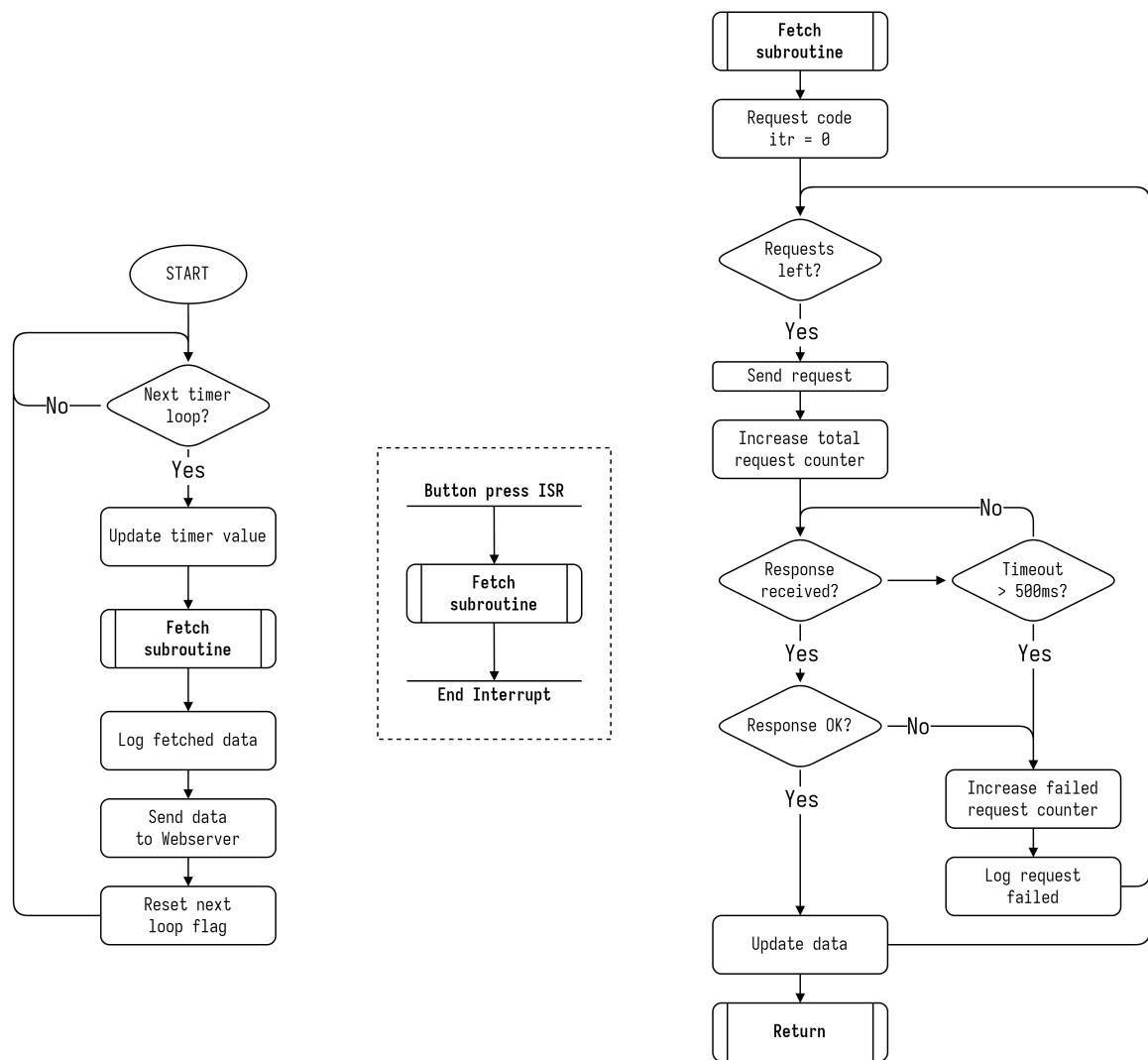
```

1  case lora::MASTER:
2      if (next)
3      {
4          timer = millis();
5          fetchSubroutineHandler();
6          INVERT(next);
7      }
8      break;
9
10     if ((millis() - timer) >= PERIOD_MS)
11     {
12         INVERT(next);
13     }

```

Listing 4. Implementacja nieskończonej pętli dla modułu MASTER

Pierwszym elementem podprogramu jest wysłanie nowego zapytania do sieci – zaimplementowana została do tego funkcja `sendRequest()` zawarta w przestrzeni nazw `lora`. Jej implementacja przedstawiona została na listingu 6. Pobierany jest kod, który ma zostać wysłany do sieci, następnie, wykorzystując funkcję `debug::println()` logowana jest przesyłana wartość. Korzystając z funkcji,



Rysunek 12. Schemat blokowy nieskończonej pętli oraz podprogramu zbierania danych zaimplementowanych dla modułu MASTER

```

1 void fetchSubroutineHandler(void)
2 {
3     for (u8 code : requestCode)
4     {
5         fetchData(code);
6     }
7
8     logReceivedData(&receivedData);
9     webserverTransmit(&receivedData);
10 }
11
12 void fetchData(u8 requestCode)
13 {
14     lora::sendRequest(requestCode);
15     totalRequests[(BOARDID_MASK(requestCode)) - 1] += 1;
16
17     // If MASTER waits 500ms for response, treat fetch as failed
18     u32 timeout = millis();
19     while (!(loraRadio.read(receivedMsg) > 0))
20     {
21         if ((millis() - timeout) >= TIMEOUT_MS)
22         {
23             timeout = millis();
24             debug::println(debug::ERR, "Request 0x" + String(requestCode,
25                                         HEX) +
26                                         " failed: TIME OUT.");
27             failedRequests[(BOARDID_MASK(requestCode)) - 1] += 1;
28             return;
29         }
30
31     // No timeout, check response code matches request code
32     if (receivedMsg[0] != requestCode)
33     {
34         debug::println(debug::ERR, "Request 0x" + String(requestCode, HEX)
35                                         +
36                                         " failed: BAD RESPONSE");
37         failedRequests[(BOARDID_MASK(requestCode)) - 1] += 1;
38         return;
39     }
40
41     lora::readResponse(&receivedData, receivedMsg);
42     delay(100); // 100ms blocking delay between requests
}

```

Listing 5. Funkcja podprogramu odpowiedzialnego za zbieranie danych w sieci

która dostępna jest w bibliotece do obsługi modułu rozszerzeń LoRa, wysyłana jest wiadomość do sieci.

```
1 void sendRequest(u8 message)
2 {
3     u8 msg[] = {message};
4     debug::println(debug::INFO, "Sending new request with value 0x" +
5                     String(message, HEX));
6
7     loraRadio.write(msg, sizeof(msg));
}
```

Listing 6. Implementacja funkcji lora::sendRequest()

Następnie moduł MASTER oczekuje na odpowiedź od modułu SLAVE, który powinien wysłać odpowiedź. Jeżeli odpowiedź zostana otrzymana w ciągu 500ms, następuje przejście do sprawdzenia, czy pierwsze pole odpowiedzi – identyfikator – jest poprawne. Identyfikator zawiera informację o ID odpowiadającego SLAVE-a oraz ID danej, której wartość jest przesyłana. W przeciwnym razie, na port szeregowy przesyłana jest stosowna informacja, a licznik zapytań z błędem odpowiedzi jest zwiększany. Ostatecznie, jeżeli nie wystąpił żaden z błędów, wykorzystując funkcję lora::readResponse(), odczytana zostaje wartość przesłana w odpowiedzi. Implementacja funkcji odczytującej przedstawiona została na listingu 7.

```
1 void readResponse(ReceivedData *data, u8 message[])
2 {
3     u8 boardId = BOARDID_MASK(message[0]) - 1;
4     // Merge each 2x 8-bit fields into 1x 16-bit one, fix magnitudes
5     switch (DATAID_MASK(message[0]))
6     {
7         case TEMPERATURE:
8             data->temperature[boardId] = (f32)((message[1] << 8) + message
9                 [2]) / 100;
10            break;
11
12         case PRESSURE:
13             data->pressure[boardId] = (f32)((message[1] << 8) + message[2])
14                 ;
15             break;
16
17         case HUMIDITY:
18             data->humidity[boardId] = (f32)((message[1] << 8) + message[2])
19                 / 100;
20             break;
21     }
22 }
```

Listing 7. Implementacja funkcji odczytującej wartość odpowiedzi modułu SLAVE

W funkcji sprawdzane są ID modułu, który odpowiedź wysłał oraz ID danej. Na podstawie tej wartości, aktualizowana jest odpowiednia indeks w tablicy, która odpowiada polu struktury do przechowywania danych odbieranych z sieci. Struktura ta przekazywana jest jako referencja do miejsca w pamięci poprzez wskaźnik do jej adresu.

Ostatnimi elementami każdej iteracji pętli jest przesłanie zebranych danych przez port szeregowy oraz transmisja danych do modułu pełniącego funkcję serwera sieciowego. Funkcja logowania danych przez port szeregowy została dodana, po to, aby było możliwe debugowanie działania oprogramowania oraz naprawa ewentualnie występujących błędów. Do implementacji wykorzystana została wykorzystana funkcja szablonowa, która pozwoliła na wykorzystanie tego samego fragmentu kodu do przesyłania wartości z tablic o różnym typie zmiennej (float – zmiennoprzecinkowa – dla wartości pochodzących z sieci oraz int – liczby całkowite – dla wartości związanych ze statystykami zapytań). Na funkcje wykorzystywane do transmisji danych przez magistralę I2C do modułu serwera sieciowego składa się kod zaimplementowany, korzystając z tego samego schematu. Przesyłanie wartości z pojedynczego pola struktury wykorzystuje także funkcję szablonową, która wywoływana jest kilkukrotnie wewnątrz `webserverTransmit` w celu przesłania wszystkich wymaganych danych. Kod funkcji szablonowych przedstawiony został na listingach 8 oraz 9, natomiast implementacja pełnych funkcji do przesyłania danych na listingach 10 oraz 11. Dodatkowo zaimplementowana została także funkcja pomocnicza do wyznaczania wartości procentowej zapytań, które zakończyły się błędem. Opiera się ona o wykonanie dzielenia wartości z licznika zapytań z błędem (`failedRequests`) przez wartość licznika całkowitej ilości zapytań wysłanych do każdego z modułów SLAVE (`totalRequests`). Kod tej funkcji przedstawiony został na listingu 12.

```

1 template <typename T, size_t size>
2 extern void logValues(const T (&array)[size])
3 {
4     for (T item : array)
5     {
6         Serial.print(item);
7         Serial.print("\t");
8     }
9     Serial.println();
10 }
```

Listing 8. Implementacja funkcji szablonowej `logValues()`

```
1 template <typename T, size_t size>
2 void transmitPacket(const T (&array)[size], u8 typeKey, f32 modifier)
3 {
4     char packet[50];
5     for (T item : array)
6     {
7         sprintf(packet, "%i:%i&", typeKey, (u16)(item * modifier));
8         Wire.write(packet);
9     }
10 }
```

Listing 9. Implementacja funkcji szablonowej transmitPacket()

```
1 void logReceivedData(lora::ReceivedData *data)
2 {
3     Serial.println();
4     debug::println(debug::INFO, "Fetched data:");
5
6     Serial.print("Temperature:\t");
7     logValues(data->temperature);
8     Serial.print("Pressure:\t");
9     logValues(data->pressure);
10    Serial.print("Humidity:\t");
11    logValues(data->humidity);
12    Serial.println();
13
14    debug::println(debug::INFO, "Requests statistics:");
15
16    Serial.print("Total:\t\t");
17    logValues(totalRequests);
18    Serial.print("Failed:\t\t");
19    logValues(failedRequests);
20    getFailedPercent(totalRequests, failedRequests, failedPercent);
21    Serial.print("Failed%:\t");
22    logValues(failedPercent);
23
24    Serial.println();
25 }
```

Listing 10. Funkcja wykorzystywana do logowania wartości przez port szeregowy

```
1 void webserverTransmit(lora::ReceivedData *data)
2 {
3     debug::println(debug::INFO, "Sending to webserver");
4     Wire.beginTransmission(I2C_ADDR);
5
6     transmitPacket(data->temperature, TEMPERATURE, 100.0f);
7     Serial.println("Temperature");
8     transmitPacket(data->pressure, PRESSURE);
9     Serial.println("Pressure");
10    transmitPacket(data->humidity, HUMIDITY, 100.0f);
11    Serial.println("Humidity");
12    getFailedPercent(totalRequests, failedRequests, failedPercent);
13    transmitPacket(failedPercent, FAILPERCENT, 100.0f);
14    Serial.println("Failed%");
15
16    Wire.endTransmission();
17 }
```

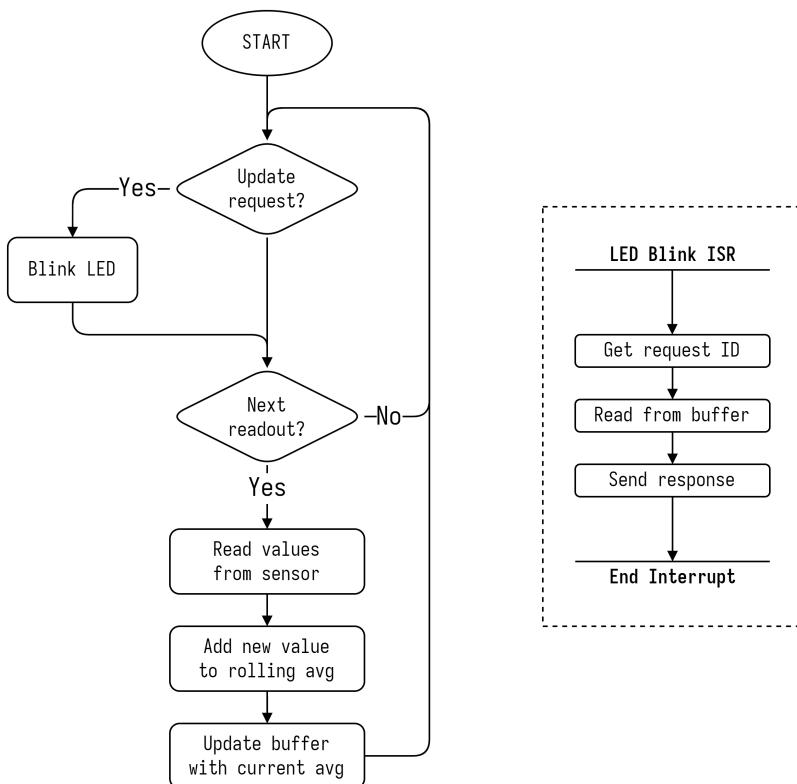
Listing 11. Funkcja do transmisji danych do modułu serwera przez magistralę I2C

```
1 void getFailedPercent(u8 (&totalReq)[3], u8 (&failReq)[3],
2                         f32 (&failPercent)[3])
3 {
4     for (u8 i = 0; i < sizeof(totalReq); ++i)
5     {
6         failedPercent[i] = ((f32)failReq[i] / (f32)totalReq[i]) * 100.0f;
7     }
8 }
```

Listing 12. Implementacja funkcji pomocniczej do wyznaczania wartości procentowej zapytań z błędem

4.2.2 Oprogramowanie modułów SLAVE

W przypadku modułów SLAVE działanie kodu w nieskończonej pętli zostało zaimplementowane inaczej. Poza wykonywaniem zadań bazując na zegarze, w tym przypadku z okresem 5 sekund, zaimplementowane zostały także przerwania. Wykorzystywane są one do obsługi przychodzących nowych zapytań od modułu MASTER. Tak jak zostało to opisane w sekcji 4.1.2, we frameworku Arduino nie ma możliwości wykorzystania przerwań programowych, dlatego też zostało zastosowane obejście bazujące na przerwaniu sprzętowym. Na rys. 13 przedstawiony został diagram nieskończonej pętli zaimplementowanej dla modułów SLAVE.



Rysunek 13. Diagram blokowy pętli `loop()` zaimplementowanej dla modułów SLAVE

Zadania wykonywane przez moduły, wykorzystując do tego zegar (zaimplementowany w sposób identyczny do modułu MASTER – na bazie funkcji `millis()`), to głównie zbieranie danych z sensorów płytka BME280 oraz aktualizacja bufora z danymi. Implementacja tego fragmentu kodu została przedstawiona na listingu 13.

Odczytywanie danych z sensora odbywa się wykorzystując funkcję `sensor::readRaw()`, która przedstawiona jest na listingu 14. Jedynym jej zadaniem jest odczytanie wszystkich potrzebnych danych oraz dodanie tych wartości do tablicy dla średniej kroczącej.

Obliczanie średniej kroczącej rozwiązane zostało poprzez zainicjowanie zaimplementowanej do tego klasy – `RollingAvg`. Jej definicja przedstawiona została na listingu 15. W celu uzyskania

```
1 case lora::SLAVE:
2     if (loraRadio.read(updateRequestMsg))
3     {
4         // This will trigger an interrupt
5         digitalWrite(LED_BUILTIN, 1);
6     }
7
8     if (next)
9     {
10        sensor::readRaw();
11        sensor::updateBuffer(&sensorBuffer);
12        timer = millis();
13        INVERT(next);
14    }
15    break;
16
17    if ((millis() - timer) >= PERIOD_MS)
18    {
19        INVERT(next);
20    }
```

Listing 13. Implementacja nieskończonej pętli dla modułów SLAVE

```
1 void readRaw(void)
2 {
3     temperatureAvg.addValue(bme.readTemperature());
4     pressureAvg.addValue(bme.readPressure());
5     humidityAvg.addValue(bme.readHumidity());
6 }
```

Listing 14. Implementacja funkcji sensor::readRaw() do odczytywania wartości z sensora BME280

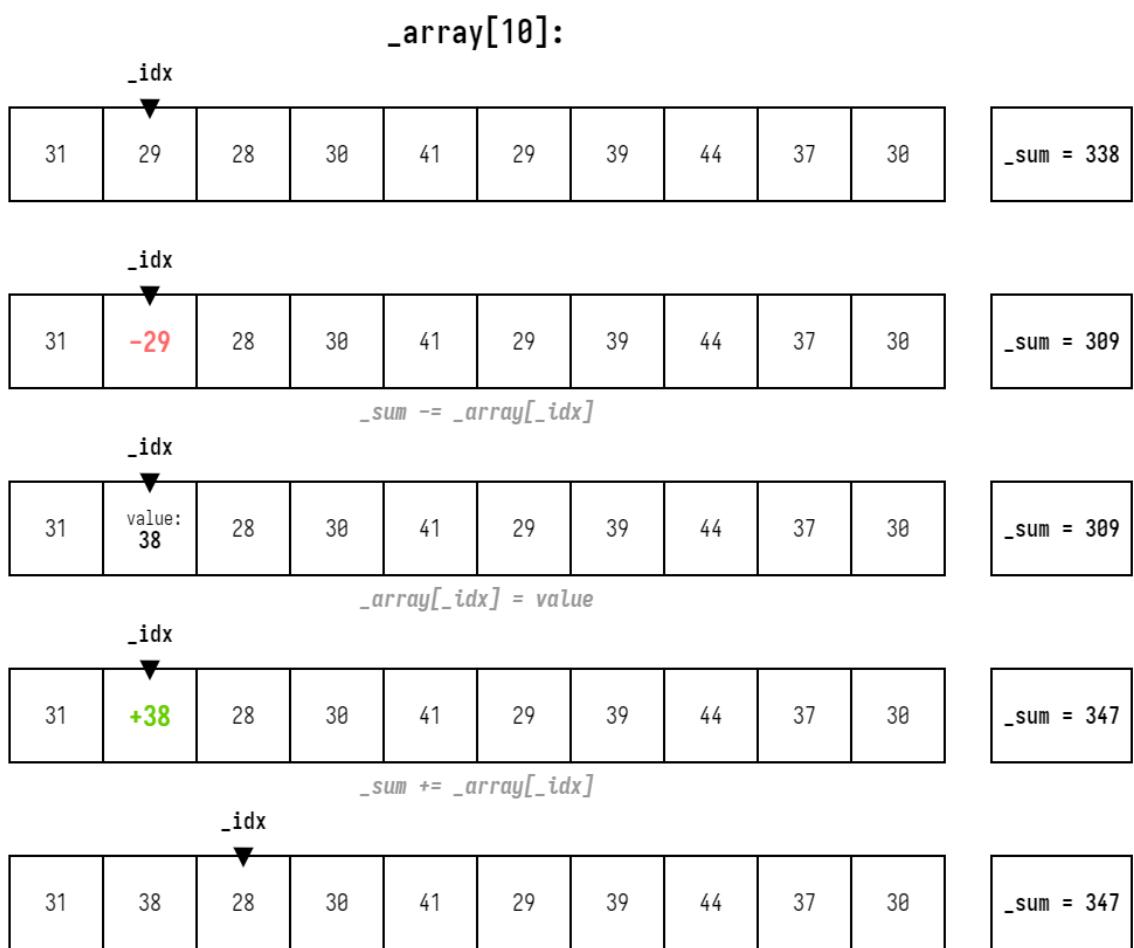
optymalnego działania kodu – średnia krocząca jest zadaniem dość intensywnym obliczeniowo – zastosowane zostało przydzielanie pamięci (ang. *memory allocation*) poprzez `malloc()` oraz wypełnianie tablicy samymi zerami przy początkowej deklaracji obiektu, dzięki czemu dodawanie wartości jest znacznie szybsze, ponieważ algorytm nie musi każdorazowo powiększać rozmiaru tablicy. Podczas dodawania wartości do średniej wykonywane jest kilka kroków: sprawdzenie, czy tablica na pewno istnieje, odjęcie od sumy wartości z obecnego indeksu oraz zastępowanie jej nową, zwiększanie indeksu lub zerowanie go, jeżeli wskaźnik dotarł do maksymalnej wartości. Działanie algorytmu przedstawione zostało na rys. 14, natomiast na listingu 16 jego implementacja.

```
1 class RollingAvg
2 {
3     public:
4         RollingAvg(u8 nSample);
5         ~RollingAvg();
6
7         void clear(void);
8         void addValue(f32 value);
9         f32 getAverage(void);
10
11    private:
12        u8 _size;
13        u8 _count;
14        u8 _idx;
15        float _sum;
16        float *_array;
17 }
```

Listing 15. Definicja klasy RollingAvg

```
1 void RollingAvg::addValue(f32 value)
2 {
3     if (_array == NULL)
4         return;
5
6     _sum -= _array[_idx];
7     _array[_idx] = value;
8     _sum += _array[_idx];
9     ++_idx;
10
11    if (_idx == _size) // Set _idx to 0 if max reached
12        _idx = 0;
13
14    if (_count < _size)
15        ++_count;
16 }
```

Listing 16. Implementacja algorytmu dodającego nową wartość do średniej kroczącej



Rysunek 14. Schemat działania algorytmu dodawania nowej wartości do średniej kroczącej dla przykładowej tablicy 10 elementów, indeksu 2 oraz nowej wartości 38

Bufor na dane został dodany w celu przyspieszenia działania oprogramowania. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania, w momencie pojawienia się nowego zapytania w sieci, SLAVE, do którego jest ono skierowane, może prawie natychmiast wysłać odpowiedź. Aktualizacja bufora z zebranymi danymi (wartością średniej kroczącej) odbywa się poprzez zmianę ich wartości pól, wykorzystując do tego wskaźniki do obecnych wartości oraz zaimplementowaną funkcję `getAverage()` z klasy `RollingAvg`. Podczas pobierania wartości średniej pierwszym krokiem jest sprawdzenie, czy tablica wartości nie jest pusta, następnie zwracana jest wartość – dzielenie aktualnej sumy przez ilość elementów w tablicy. Implementacja tych funkcji przedstawiona została na listingach 17 oraz 18.

```
1 void updateBuffer(BufferData *buffer)
2 {
3     buffer->temperature = (u16)(temperatureAvg.getAverage() * 100.0f);
4     buffer->pressure = (u16)(pressureAvg.getAverage() / 100.0f);
5     buffer->humidity = (u16)(humidityAvg.getAverage() * 100.0f);
6 }
7 }
```

Listing 17. Implementacja funkcji aktualizującej zawartość bufora na dane

```
1 float RollingAvg::getAverage()
2 {
3     if (_count == 0)
4         return NAN;
5
6     return (_sum / _count);
7 }
```

Listing 18. Implementacja funkcji do wyznaczania średniej na podstawie obecnej zawartości tablicy średniej kroczącej

Obejściem limitów stawianych przez framework Arduino było dodanie przerwania sprzętowego. Pin wbudowanej diody mikrokontrolerów (LED_BUILTIN, pin PA5) połączony został z dowolnym pinem, który nie pełnił żadnej innej funkcji (tutaj wybrany został pin PB3, zdefiniowany w kodzie jako `SLAVE_INTERRUPT_PIN`). W momencie, gdy moduł rozszerzeń LoRa wykryje nadawaną w sieci dowolną wiadomość, włączona zostaje dioda, co powoduje wejście w przerwanie.

Aktywacja przerwania powoduje wywołanie funkcji `newRequestHandler()`, w której pierwszym elementem jest sprawdzenie, czy zaobserwowane w sieci zapytanie dotyczy danego modułu. Zrealizowane zostało to za pomocą maski, która pozwala na wydobycie tylko ID modułu z całego kodu zapytania. Jeżeli kod jest zgodny, to moduł wysyła odpowiedź, wykorzystując do tego funkcję `lora::sendResponse()`, a następnie wyłączana jest dioda. W przeciwnym przypadku wyłączona zostanie tylko dioda, a moduł wyjdzie z przerwania i powróci do wykonywania instrukcji z nieskończonej pętli. Implementacja funkcji obsługi przerwania przedstawiona została na listingu 19, natomiast na listingu 20 przedstawiona została funkcja zajmująca się wysyłaniem odpowiedzi.

```

1 void newRequestHandler(void)
2 {
3     if (BOARDID_MASK(updateRequestMsg[0]) != BOARD_ID)
4     {
5         digitalWrite(LED_BUILTIN, 0);
6         return;
7     }
8
9     lora::sendResponse(&sensorBuffer, updateRequestMsg[0]);
10    digitalWrite(LED_BUILTIN, 0); // Turn off the LED when done, visual
11    indicator
12 }
```

Listing 19. Implementacja funkcji obsługującej przerwania w modułach SLAVE

```

1 void sendResponse(sensor::BufferData *buffer, u8 reqMsg)
2 {
3     /**
4      * @brief Payload of the response. First byte is request code echo,
5      * then 2 bytes of response, MSB-order.
6      */
7     u8 message[3];
8     u16 bufferValue;
9
10    switch (DATAID_MASK(reqMsg))
11    {
12        case TEMPERATURE:
13            bufferValue = (u16)buffer->temperature;
14            break;
15
16        case PRESSURE:
17            bufferValue = (u16)buffer->pressure;
18            break;
19
20        case HUMIDITY:
21            bufferValue = (u16)buffer->humidity;
22            break;
23    }
24
25    message[0] = reqMsg;
26    message[1] = (bufferValue & UPPER_BITMASK) >> 8;
27    message[2] = (bufferValue & LOWER_BITMASK);
28    debug::println(debug::INFO, "Sending response: 0x" + String(message
29                  [0], HEX) + "\t" + String(message[1]) + "\t" + String(message
30                  [2]));
31
32    loraRadio.write(message, sizeof(message));
33 }
```

Listing 20. Implementacja funkcji do wysyłania odpowiedzi przez moduły SLAVE

Funkcja lora::sendResponse() także bazuje na wykorzystaniu maski, tym razem do sprawdzania ID danej jakiej wartość powinna znajdować się w odpowiedzi. Każdorazowo wysyłane zostają 3 bajty: echo kodu zapytania – w celu identyfikacji przez moduł MASTER skąd nadeszła odpowiedź oraz 2 bajty zawierających przesyłaną wartość. Dane zbierane przez sensor są typu float (wartości zmiennoprzecinkowe, 32-bitowe), a biblioteka może obsługiwać tylko tablice, gdzie każde pole należy do typu liczb całkowitych o stałej szerokości 8 bitów (uint8_t, reprezentuje wartości tylko dodatnie o wartości nie większej niż 255 [17]). Aby móc swobodnie przesyłać wartości zastosowany został rzut (ang. *type casting*) do oryginalnej wielkości do typu uint16_t oraz podział jej na dwie części, wykorzystując do tego maski oraz operacje bitowe. Tak przygotowana tablica wysłana jest jako odpowiedź do modułu MASTER.

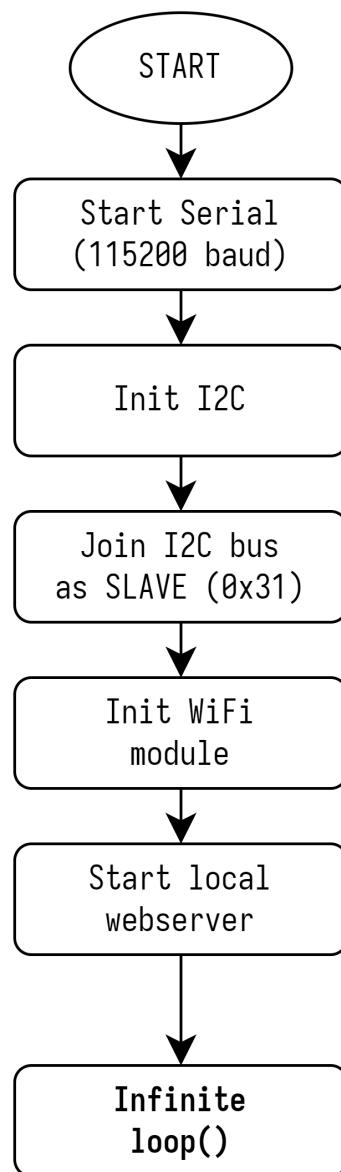
4.3 Implementacja oprogramowania modułu serwera sieciowego

Oprogramowanie modułu serwera sieciowego dzieli się na dwie części: implementację działania serwera sieciowego (ang. *webserver*) oraz odbierania i dekodowania informacji z modułu MASTER sieci LoRa. Tak jak w przypadku oprogramowania dla modułów sieci LoRa, w przypadku modułu serwera sieciowego na początku jednorazowo wykonywana jest seria instrukcji zawartych w sekcji loop(), a następnie przechodzi do wykonywania instrukcji w nieskończonej pętli. Schemat działania tej części kodu przedstawia diagram blokowy na rys. 15, natomiast na [listingu 21](#) przedstawiona została implementacja tej części oprogramowania.

```
1 void setup()
2 {
3     Wire.begin(I2C_ADDR);
4     Wire.onReceive(i2cReceive);
5     Serial.begin(115200);
6
7     wifi::init();
8     webserver::init();
9 }
```

Listing 21. Implementacja funkcji setup() modułu serwera sieciowego

Pierwszym elementem jest ustawienie port szeregowy na 115200 baud (szybkość transmisji), a następnie inicjalizacja magistrali I2C oraz dołączenie modułu w roli SLAVE (odbiorca). Ostatnimi krokami wykonywanymi przed przejściem do nieskończonej pętli jest, wykorzystując zaimplementowane funkcje wifi::init() oraz webserver::init(), inicjalizacja modułu WiFi oraz samego serwera sieci lokalnej. Na [listingach 22](#) oraz [23](#) przedstawione zostały kody źródłowe tych funkcji.



Rysunek 15. Diagram blokowy sekcji `setup()` oprogramowania modułu serwera sieciowego

```
1 void init(void)
2 {
3     debug::println(debug::INFO, "Trying to init WiFi module...");
4     WiFi.setPins(WIFISHIELD_PINS);
5
6     // Check if WiFi module is present
7     if (WiFi.status() == WL_NO_SHIELD)
8     {
9         debug::println(debug::ERR, "WiFi module init fail (disconnected
10            ?)");
11        while (true)
12        {
13            // Pause forever
14        }
15    }
16
17    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
18    debug::println(debug::INFO, "Attempting connection to: " + String(
19        WIFI_SSID));
20
21    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
22    {
23        WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
24
25        digitalWrite(LED_BUILTIN, 1);
26        delay(250);
27        digitalWrite(LED_BUILTIN, 0);
28        delay(250);
29    }
30
31    digitalWrite(LED_BUILTIN, 1);
32    printStatus();
33}
```

Listing 22. Implementacja funkcji wifi::init()

```
1 WiFiServer server(SERVER_PORT);
2 void init(void)
3 {
4     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
5     {
6         // Wait for WiFi to connect before starting server
7     }
8
9     debug::println(debug::INFO, "Webserver started on port " + String(
10        SERVER_PORT, DEC));
11     server.begin();
12 }
```

Listing 23. Implementacja funkcji webserver::init()

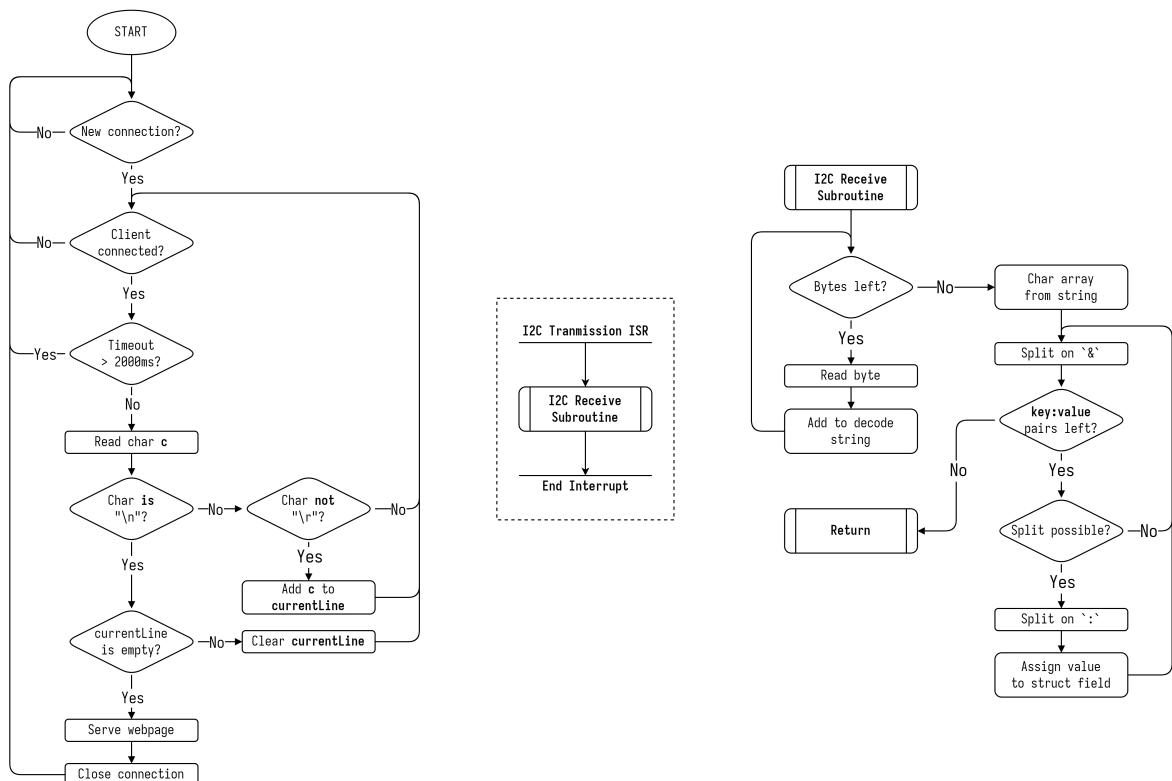
4.3. Implementacja oprogramowania modułu serwera sieciowego

Inicjalizacja WiFi wykorzystuje zdefiniowane w osobnym pliku konfiguracyjnym SSID (nazwę) oraz hasło do sieci WiFi, gdzie moduł ma wykonać próbę podłączenia. Do implementacji funkcji została dodana także funkcja sprawdzenia czy rozszerzenie WiFi na płytce Feather jest poprawnie podłączone. Gdy moduł serwera próbuje zalogować się do sieci, wbudowana dioda migą, natomiast, gdy połączenie zostanie uzyskane świeci światłem stałym. Ponieważ do poprawnego działania wymagane jest połączenie z siecią WiFi, weryfikacja tego kroku została zaimplementowana w postaci nieskończonej pętli while, która blokuje dalsze działanie oprogramowania, jeżeli modułowi nie został przydzielony adres IP w sieci lokalnej. Implementacja oraz działanie funkcji inicjalizacji serwera sieciowego jest znacznie mniej skomplikowane – tworzony jest nowy obiekt serwera `server`, następnie kod oczekuje na połączenie z siecią WiFi, po czym serwer zostaje uruchomiony i można się do niego podłączyć korzystając z logowanego przez port szeregowy adresu IP. Na rys. 16 przedstawiony został zrzut ekranu ze strony internetowej dostępnej w sieci lokalnej, gdzie podłączony został moduł serwera sieciowego.

LoRa Private sensor network			
MEASUREMENT	NODE 1	NODE 2	NODE 3
Temperature [°C]	24.4	25.5	25.0
Pressure [hPa]	1001.0	1002.0	1001.0
Humidity [%]	55.8	52.5	54.8
Failed req. [%]	4.2	8.3	66.7

Rysunek 16. Wygląd strony internetowej zaimplementowanej do wizualizacji danych zbieranych z sieci

Po zakończonej inicjalizacji magistrali I2C, skonfigurowaniu oraz podłączeniu się do WiFi oraz uruchomieniu serwera oprogramowanie przechodzi do nieskończonej pętli. Zaimplementowane zostały tutaj funkcje odpowiedzialne za serwowanie strony internetowej dla użytkownika oraz odbieranie danych przez magistralę I2C od modułu MASTER sieci LoRa oraz dekodowanie ich. Na rys. 17 przedstawiony został schemat blokowy działania obu tych funkcji.



Rysunek 17. Schemat bloków działania funkcji w nieskończonej pętli serwera sieciowego

4.3.1 Wyświetlanie strony internetowej z danymi

Implementacja serwera sieciowego oraz strony, do której użytkownik może uzyskać dostęp w sieci lokalnej bazuje na bibliotece WiFi101. W każdej iteracji pętli sprawdzane jest czy do serwera próbuje połączyć się nowy klient. Jeżeli otrzymane zostanie nowe żądanie (ang. *request*), to inicjalizowany jest timer sprawdzający czy nie nastąpiło przekroczenie na wysłanie odpowiedzi lub klient nie stracił połączenia. Wartość ta została przyjęta jako 2 sekundy – wartość wystarczająco duża, aby połączenie nie było zamknięte zbyt wcześnie oraz wystarczająco niska, aby inne żądania mogły zostać obsłużone bez nadmiernego oczekiwania. Kod źródłowy tej części przedstawiony został na listingu 24.

```
1  wifi::client = webserver::server.available();
2  if (wifi::client)
3  {
4      timeoutTimer = millis();
5      String currentLine = "";
6
7      while (wifi::client.connected() &&
8             (millis() - timeoutTimer) <= CLIENT_TIMEOUT)
9      {
10         /**
11          * Process request from the connecting client
12          */
13     }
14     webserver::header = "";
15     wifi::client.stop();
16 }
```

Listing 24. Implementacja obsługi nowego żądania w oprogramowaniu serwera sieciowego

W momencie otrzymania nowego żądania serwer odbiera pojedynczo wszystkie przesypane do niego znaki. Przy każdym znaku sprawdzane jest czy nie nastąpiło rozłączenie z klientem. Odbierane znaki są sprawdzane czy jest to znak nowej linii (\n) oraz czy obecnie następna linia jest pusta – jest to sygnał, że całe zapytanie zostało odebrane, a serwer powinien wysłać odpowiedź. W przypadku, gdy znakiem nie jest \n, ani \r zostaje on dodany do obecnej linii, tak aby zebrać pełny nagłówek żądania, zawierający wszystkie informacje. Implementacja tego elementu przedstawiona została na listingu 25.

```
1     char c = wifi::client.read();
2     webserver::header += c;
3
4     if (c == '\n')
5     {
6         if (currentLine.length() == 0)
7         {
8             webserver::serve(&storedData);
9             break;
10        }
11        currentLine = "";
12    }
13    else if (c != '\r')
14    {
15        currentLine += c;
16    }
```

Listing 25. Implementacja odbierania przychodzącego żądania

Przesyłanie odpowiedzi przez serwer wykonywane wykorzystując do tego zaimplementowaną funkcję `webserver::serve()`. Jej implementacja przedstawiona została na [listingu 26](#). W celu przesłania odpowiedzi na żądanie oprócz zawartości samej strony wymagane jest przesłanie także nagłówka strony. Aby zmniejszyć ilość wymaganej pamięci SRAM wymaganej na oprogramowanie znaczna część kodu strony (nagłówek HTTP, nagłówek strony `<head>` oraz część wyświetlonej użytkownikowi strony) przechowywana jest w pamięci programowej PROGMEM (pamięci flash) mikrokontrolera. Elementy zostają pobrane ze zdefiniowanych zmiennych oraz przesłane do żądającego klienta wykorzystując do tego pętle typu `for-range`. Do przesłania elementów, gdzie wymagane są dane, które moduł odebrał z sieci LoRa, wykorzystana została zaimplementowana funkcja szablonowa `printRow` (przesyłanie jednego wiersza tabeli z danymi). Kod źródłowy tej funkcji przedstawiony został na [listingu 27](#).

```

1 void serve(StoredData_t *data)
2 {
3     for (String line : httpHeader)
4     {
5         wifi::client.println(line);
6     }
7     wifi::client.println();
8
9     for (String line : webpageHead)
10    {
11        wifi::client.println(line);
12    }
13
14     for (u8 i = 0; i < ARRSIZE(webpageBody); ++i)
15    {
16        if (i == BODY_TAB_IDX)
17        {
18            printRow(data->temperature, "Temperature [°C]");
19            printRow(data->pressure, "Pressure [hPa]");
20            printRow(data->humidity, "Humidity [%]");
21            printRow(data->failedPercent, "Failed req. [%]");
22            continue; // Skip printing from array
23        }
24        wifi::client.println(webpageBody[i]);
25    }
26 }
```

Listing 26. Implementacja funkcji do przesyłania zawartości strony internetowej webserver::serve()

```

1 template <typename T, size_t size, size_t length>
2 void printRow(const T (&array)[size], const char (&rowTitleStr)[length])
3 {
4     static u8 fmtCharCount = 15;
5     char line[length + fmtCharCount];
6
7     sprintf(line, "<tr><td>%s</td>", rowTitleStr);
8     wifi::client.println(line);
9
10    // Template type does not matter, values cast to f32 for display
11    for (T value : array)
12    {
13        char cell[25];
14        sprintf(cell, "<td>%.1f</td>", (f32)value);
15        wifi::client.println(cell);
16    }
17
18    wifi::client.println("</tr>");
19 }
```

Listing 27. Implementacja funkcji szablonowej printRow()

Funkcja opiera się na modyfikacji ciągu znaków zawierającego format pojedynczej komórki tabeli oraz pętli typu `for-range`. Wykorzystuje do tego funkcję `sprintf`, przyjmując jako argument ciąg, który ma zostać w to miejsce wstawiony – nagłówek wiersza (ciąg znaków, tablicę `const char`), który zawiera informację o typie danych w danym wierszu lub bezpośrednią wartość otrzymaną z sieci LoRa (wartość zmiennoprzecinkowa, `float`).

4.3.2 Odbieranie oraz dekodowanie danych z sieci LoRa

W celu uzyskania jak najlepszej wydajności odbierania oraz dekodowania otrzymywanych danych zaimplementowane rozwiązanie w znacznym stopniu ogranicza wykorzystanie funkcji, która powoduje dynamiczny przydział pamięci (ang. *dynamic memory allocation*). Pierwszym elementem jest odebranie pełnej wiadomości. Aby przetwarzanie danych było łatwiejsze każdy, pojedynczy znak jest dodawany do ciągu znaków (`string`) – jest to jedyny element implementacji wykorzystujący dynamiczną alokację. Odpowiedzialny za to fragment kodu przedstawiony został na listingu 28.

```
1 void i2cReceive(int byteCount)
2 {
3     // Build a string from I2C transmission
4     String recv;
5     while (Wire.available() > 0)
6     {
7         char recvChar = Wire.read();
8         recv += recvChar;
9     }
10
11    // Decode into values
12    decodeStr(&recv, &storedData);
13 }
```

Listing 28. Implementacja funkcji odbierającej dane przez magistralę I2C

Następnie wywoływana jest funkcja `decodeStr()`, której kod przedstawiony został na listingu 29. Pierwszym elementem jest przetworzenie wejściowego ciągu znaków na tablicę pojedynczych znaków o długości większej o jeden znak. Dodatkowy element potrzebny jest dla algorytmu w celu oznaczenia zakończenia tablicy. Dodatkowo definiowana jest tablica czteroelementowa do przechowywania indeksu obecnie uzupełnianej danej `dataCounter`. Wykorzystując funkcję z języka C `strtok()` tablica dzielona jest na znaku „&” – wykorzystanego jako łączenie pomiędzy parami klucz-wartość. Drugim elementem jest podział każdej pary na znaku „:” – łącznika pomiędzy kluczem (od 0 do 4) oraz wartością. Każdorazowo algorytm sprawdza klucz i na jego podstawie otrzymana dana jest przypisywana do odpowiedniego pola struktury na indeksie, którego wartość śledzi licznik (`dataCounter`). Wszystkie operacje są następnie powtarzane do momentu, gdy algorytm dotrze do końca tablicy.

```

1 void decodeStr(String *recv, StoredData_t *data)
2 {
3     char recvArray[recv->length() + 1];
4     recv->toCharArray(recvArray, recv->length());
5     recvArray[recv->length()] = 0;
6
7     // Keeps count for each struct member
8     u8 dataCounter[4] = {0, 0, 0, 0};
9
10    /**
11     * Read key-value pairs
12     * Split string on `&` -> each key-value pair
13     * Split pairs on `:` -> key : value
14     */
15    char *keyToken = strtok(recvArray, "&");
16    while (keyToken != NULL)
17    {
18        char *valueToken = strchr(keyToken, ':');
19        if (valueToken != 0)
20        {
21            *valueToken = 0;
22            int key = atoi(keyToken);
23            ++valueToken;
24
25            // Assign value from valueToken to correct struct member
26            switch (key)
27            {
28                case TEMPERATURE:
29                    data->temperature[dataCounter[TEMPERATURE]++] =
30                        (f32)atoi(valueToken) / 100.0f;
31                    break;
32                case PRESSURE:
33                    data->pressure[dataCounter[PRESSURE]++] = (f32)atoi(
34                        valueToken);
35                    break;
36                case HUMIDITY:
37                    data->humidity[dataCounter[HUMIDITY]++] =
38                        (f32)atoi(valueToken) / 100.0f;
39                    break;
40                case FAILPERCENT:
41                    data->failedPercent[dataCounter[FAILPERCENT]++] =
42                        (f32)atoi(valueToken) / 100.0f;
43                    break;
44            }
45            keyToken = strtok(NULL, "&");
46        }
    }
}

```

Listing 29. Implementacja funkcji do dekodowania danych przesyłanych przez moduł MASTER

Rozdział 5

Testy implementacji

W celu zweryfikowania czy zaimplementowane oprogramowanie działa poprawnie, wykonano zestaw testów. Sprawdzone zostało, czy moduły komunikują się poprawnie między sobą (między modułami sieci oraz modułem MASTER a modułem serwera sieciowego) oraz czy dane, które moduł serwera sieciowego odebrał, wyświetlane są poprawnie na zaimplementowanej stronie internetowej.

5.1 Testy komunikacji sieci

Do sprawdzenia poprawności komunikacji wewnętrz sieci wykorzystana została implementacja funkcji, która zlicza ilość wysłanych zapytań przez moduł MASTER oraz ilość otrzymanych odpowiedzi, oraz funkcja, która na podstawie otrzymanych wartości oblicza wartość procentową zapytań z błędem (niezależnie od tego, czy był to timeout – przekroczenie czasu oczekiwania na odpowiedź, czy otrzymana odpowiedź nie zgadzała się z tą, na jaką moduł MASTER oczekiwał). Kod źródłowy odpowiedzialnych za to elementów przedstawiony został na listingach 30 oraz 31.

Sieć została uruchomiona na pewien czas i podczas jej pracy monitorowane było czy komunikacja działa poprawnie. Podczas testu wykorzystano jedynie podgląd sieci poprzez monitor portu szeregowego na moduł MASTER. Na rys. 18 przedstawiony został zrzut ekranu pokazujący, że sieć komunikuje się poprawnie oraz to, że oprogramowanie zlicza całkowitą ilość zapytań oraz ilość błędów w komunikacji wraz z procentowym błędem.

```
[INFO] Requests statistics:  
Total:      102    102    102  
Failed:      3      0      1  
Failed%:   2.94   0.00   0.98
```

Rysunek 18. Zrzut ekranu z monitora portu szeregowego podczas testowania komunikacji w sieci.

```
1 totalRequests[(BOARDID_MASK(requestCode)) - 1] += 1;
2
3 // If MASTER waits 500ms for response, treat fetch as failed
4 if ((millis() - timeout) >= TIMEOUT_MS)
5 {
6     timeout = millis();
7     debug::println(debug::ERR, "Request 0x" + String(requestCode,
8         HEX) +
9             " failed: TIME OUT.");
10    failedRequests[(BOARDID_MASK(requestCode)) - 1] += 1;
11    return;
12 }
13
14 // No timeout, check response code matches request code
15 if (receivedMsg[0] != requestCode)
16 {
17     debug::println(debug::ERR, "Request 0x" + String(requestCode, HEX)
18         +
19             " failed: BAD RESPONSE");
20     failedRequests[(BOARDID_MASK(requestCode)) - 1] += 1;
21     return;
22 }
```

Listing 30. Zliczanie całkowitej ilość zapytań oraz odpowiedzi zakończonych błędem (timeout, zły nagłówek odpowiedzi)

```
1 void getFailedPercent(u8 (&totalReq)[3], u8 (&failReq)[3],
2                         f32 (&failPercent)[3])
3 {
4     for (u8 i = 0; i < sizeof(totalReq); ++i)
5     {
6         failedPercent[i] = ((f32)failReq[i] / (f32)totalReq[i]) * 100.0f;
7     }
8 }
```

Listing 31. Implementacja funkcji pomocniczej do wyznaczania wartości procentowej zapytań z błędem

5.2 Testy transmisji danych do serwera sieciowego

Wykonane zostały także testy komunikacji modułu MASTER z modułem serwera sieciowego. Sprawdzone zostało, czy dane zbierane przez sieć LoRa poprawnie przesyłane przez magistralę I2C oraz dekodowane po stronie modułu serwera sieciowego.

Korzystając z zaimplementowanego logowania przez port szeregowy modułu MASTER informacji o transmisji przez magistralę I2C (listing 11) oraz dodatkowej funkcjonalności w module serwera sieciowego, której implementacja przedstawiona została na listingu 32, logującej przez port szeregowy ilość odebranych transmisji, sprawdzona została poprawność komunikacji.

```

1 debug::println(debug::INFO, "Transmission counts");
2 for (u8 count : dataCounter)
3 {
4     Serial.print(count);
5     Serial.print(" ");
6 }
7 Serial.println();

```

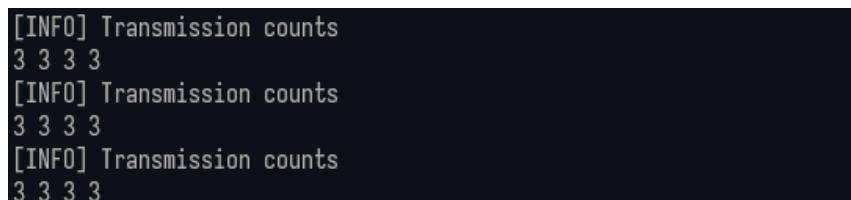
Listing 32. Implementacja funkcjonalności zliczania transmisji z modułu MASTER na module serwera sieciowego.

Moduły zostały uruchomione oraz włączone zostały monitor portu szeregowego modułu MASTER i modułu serwera sieciowego. Przez pewien czas prowadzona była obserwacja logowanych wartości. Podczas trwania testu stwierdzone zostało, że moduły działają i komunikują się poprawnie. Przykładowe logi, pokazujące poprawną komunikację przedstawione zostały na rys. 19 oraz 20.



```
[INFO] Sending to webserver
Temperature
Pressure
Humidity
Failed%
```

Rysunek 19. Logi o transmisji przez magistralę I2C z modułu MASTER.



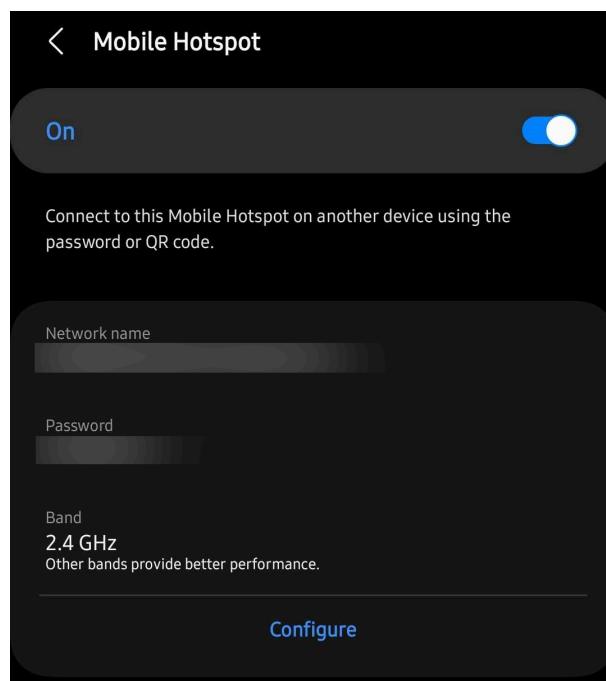
```
[INFO] Transmission counts
3 3 3 3
[INFO] Transmission counts
3 3 3 3
[INFO] Transmission counts
3 3 3 3
```

Rysunek 20. Logi pokazujące poprawne odbieranie wartości z magistrali I2C przez moduł serwera sieciowego.

5.3 Testy działania serwera sieciowego oraz strony internetowej

Ostatnim wykonanym testem, który pozwolił na stwierdzenie, że zaimplementowane oprogramowanie działa poprawnie, było sprawdzenie samego serwera sieciowego. Zweryfikowane zostało czy uruchamia się on poprawnie, gdy pojawi się możliwość zalogowania do sieci lokalnej sieci Wi-Fi (której dane zostały podane w pliku konfiguracyjnym) oraz czy poprawnie działa strona internetowa, którą moduł serwuje użytkownikowi, chcącemu zobaczyć zebrane przez sieć LoRa dane.

Do testu wykorzystany został mobilny hotspot (lokalna sieć Wi-Fi utworzona przez smartphone) oraz zaimplementowana rejestracja informacji o logowaniu się modułu do sieci WiFi i uruchamiania serwera sieciowego. Na rys. 21 oraz 22 pokazane zostały włączony mobilny hotspot oraz logi z modułu serwera sieciowego. Na ich podstawie stwierdzone zostało, że serwer sieciowy działa poprawnie, ponieważ jednym z logów jest informacja o starcie serwera z jego lokalnym IP (umożliwiającym wyświetlenie strony internetowej) na porcie 80.



Rysunek 21. Zrzut ekranu pokazujący włączony mobilny hotspot.

```
[INFO] Connected to: [REDACTED] (-38dBm)
[INFO] Local IP: 192.168.137.101
[INFO] Webserver started on port 80
```

Rysunek 22. Logi pokazujące poprawne połączenie z siecią Wi-Fi oraz uruchomienie serwera sieciowego.

Działanie zaimplementowanej strony internetowej sprawdzone zostało poprzez wykonanie próby załadowania jej w dwóch przypadkach: przed pierwszym przesłaniem danych z sieci LoRa (lub tuż po restarcie modułu serwera sieciowego) oraz po tym, jak dane zostały przesłane. Miało to

na celu sprawdzenie, poza samym ładowaniem strony, także czy jej zawartość zostanie poprawnie zaktualizowana, gdy z modułu MASTER przesłane zostaną dane. Rys. 23 pokazuje poprawnie załadowaną stronę przed przesłaniem danych z sieci LoRa, natomiast rys. 24 to zrzut ekranu z widoczną poprawną aktualizacją danych po odebraniu ich przez moduł serwera sieciowego.

LoRa Private sensor network

MEASUREMENT	NODE 1	NODE 2	NODE 3
Temperature [°C]	0.0	0.0	0.0
Pressure [hPa]	0.0	0.0	0.0
Humidity [%]	0.0	0.0	0.0
Failed req. [%]	0.0	0.0	0.0

Rysunek 23. Zrzut ekranu ze strony bez danych z sieci.

LoRa Private sensor network

MEASUREMENT	NODE 1	NODE 2	NODE 3
Temperature [°C]	27.1	27.2	26.9
Pressure [hPa]	999.0	1000.0	999.0
Humidity [%]	36.1	35.4	36.2
Failed req. [%]	0.0	0.0	0.0

Rysunek 24. Zrzut ekranu ze strony po otrzymaniu danych przez moduł serwera sieciowego.

Rozdział 6

Badania działającej sieci

W celu określenia czy możliwe jest zbudowanie funkcjonalnej, prywatnej sieci czujnikowej opierając się o standard LoRa, przeprowadzony został zestaw badań. Pozwoliły one na dokładniejsze zapoznanie się ze standardem oraz jego możliwościami. Zbadane zostały elementy podstawowe – jakość komunikacji pomiędzy modułami, w celu określenia czy wykorzystanie takiej sieci nie wiąże się z większymi problemami niż typowe standardy jak np. ZigBee. Zbadane zostały też parametry sieci podczas jej pracy – zasięg komunikacji, zużycie energii. Przeprowadzona została także analiza widmowa, w celu zaobserwowania jak wygląda komunikacja w standardzie LoRa – celem tego badania była próba zaobserwowania oraz analizy techniki, jaką standard wykorzystuje do transmisji danych – tzw. Chirp.

6.1 Badanie komunikacji w sieci

Podstawowym badaniem było sprawdzenie poprawności komunikacji w dłuższym okresie niż kilka minut. Miało ono na celu określenie czy wybór standardu LoRa jest wyborem dobrym do prób implementacji sieci czujnikowej. Badanie to było rozszerzeniem testu implementacji, które pozwoliło na sprawdzenie jakości komunikacji. W przypadku, gdyby wynik badania pokazał, że sieć ma problemy z komunikacją, który nie było widać w krótkich testach, należałyby przemyśleć czy standard LoRa jest poprawnym wyborem.

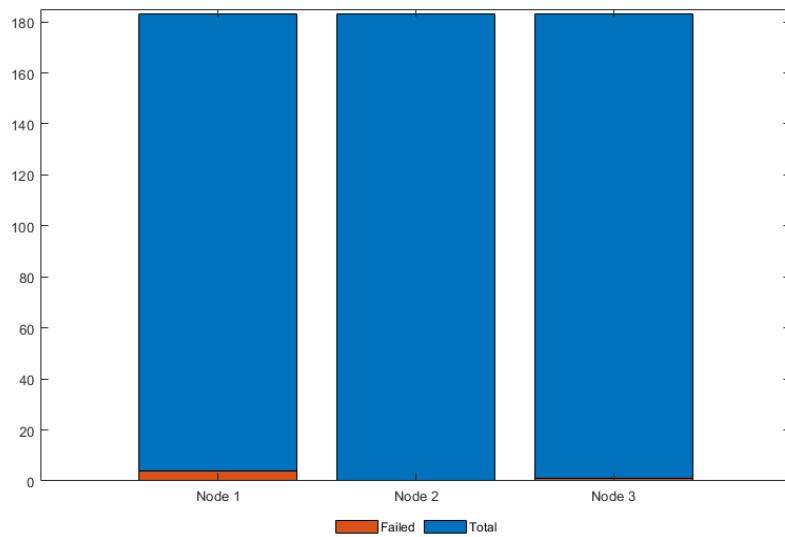
Aby otrzymać zestaw danych testowych, moduły pozostały włączone, bez restartowania ich, przez 1 godzinę. Przy ustawieniu okresu pomiędzy wysyłaniem żądań przez moduł MASTER na 1 minutę dało to 61 pełnych wymian danych w sieci – 1 żądanie przy pierwszym uruchomieniu modułu MASTER oraz 60 podczas pracy modułu na zaimplementowanym zegarze (w sumie 183 żądania do każdego modułu SLAVE). Średnia odległość pomiędzy modułami podczas badania wynosiła 0.45 m (45 cm). Otrzymane wyniki po przeprowadzeniu badania przedstawione zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki przeprowadzonego badania komunikacji w czasie 1 godziny.

Zapytania	SLAVE 1	SLAVE 2	SLAVE 3
W sumie [-]	183	183	183
Nieudane [-]	4	0	1
Nieudane [%]	2.19	0	0.55

Na podstawie zebranych danych sporządzony został wykres, przedstawiający otrzymane wyniki – sumę wysłanych zapytań oraz ilość, która zakończyła się błędem. Przedstawiony on został na rysunku 25. Kolorem niebieskim oznaczono sumę wysłanych zapytań, natomiast kolorem pomarańczowym ilość z brakiem odpowiedzi lub odrzucone z powodu błędu. Korzystając z zebranych danych, możliwe jest zaobserwowanie, że podczas dłuższej komunikacji jedynie niewielki procent zapytań kończy się błędem, a wykorzystanie standardu LoRa jest wyborem, pozwalającym na budowanie sieci czujnikowych.

Podczas badania, wykorzystując logowanie informacji o pracy modułów przez port szeregowy, udało się zaobserwować główną przyczyną występowania błędów podczas testów komunikacji na krótkim dystansie. Jeżeli w momencie, gdy moduł MASTER wysyłał zapytanie do dowolnego modułu SLAVE, a ten w tym samym czasie był w trakcie wykonywania pomiarów otoczenia, czas oczekiwania na odpowiedź po stronie modułu MASTER przekraczała dozwoloną wartość (1500ms). Czas potrzebny modułowi SLAVE na wykonanie fragmentu algorytmu związanego z pomiarem i wyznaczaniem średniej kroczącej oraz reakcję na zapytanie w tych przypadkach był większy, niż moduł MASTER czekał na odpowiedź. Problem ten jest związany z ograniczeniem frameworku Arduino (opisane zostały one w rozdziale 4.1.2) – dostępnością tylko przerwań sprzętowych oraz braku możliwości przypisania większej ilości funkcji do jednego wyjścia mikrokontrolera. Możliwym rozwiązaniem tego byłoby dostosowanie wartości przypisanej jako limit na timeout lub modyfikacja okresu zegara kontrolującego wykonywanie pomiarów po stronie, jednakże rozwiązanie to mogłoby wiązać się z występowaniem większej ilości błędów w przypadku komunikacji na większych odległościach.



Rysunek 25. Wykres słupkowy przedstawiający wyniki 1-godzinnego testu komunikacji sieci

6.2 Analiza widmowa transmisji w standardzie LoRa

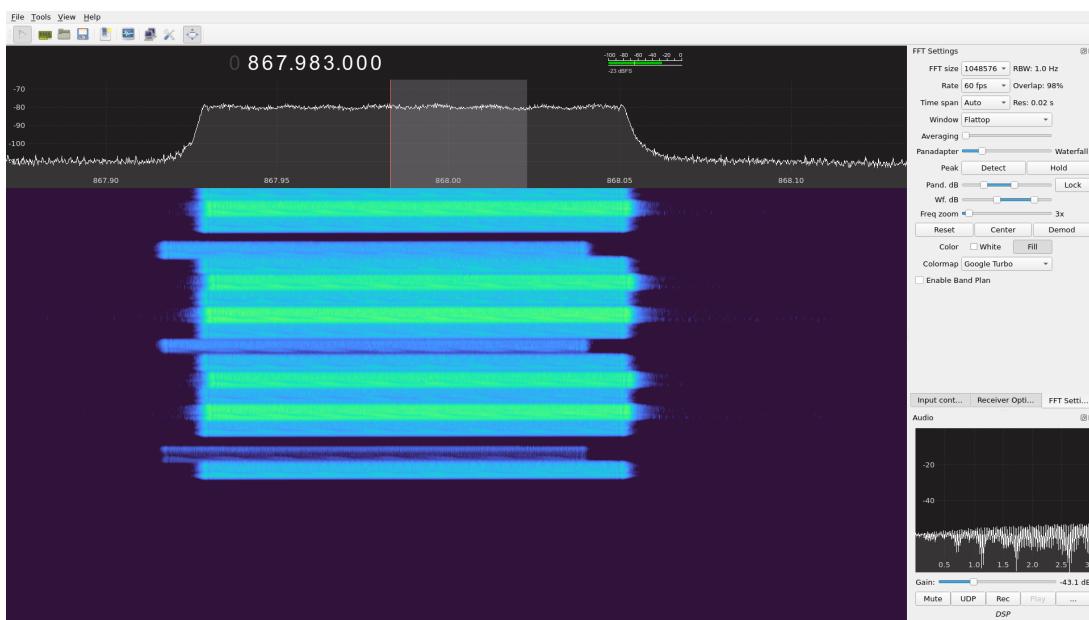
Aby dokładniej zapoznać się z tym, jak działa komunikacja w standardzie LoRa, wykonana została analiza widmowa transmisji pomiędzy modułami sieci. Wykorzystane tutaj zostało narzędzie pozwalające na badanie fal radiowych bazujące na SDR (ang. *Software Defined Radio*) – Hack RF One oraz darmowe, udostępnione w domenie publicznej, oprogramowanie *gqrx* na platformę Linux. Celem tego badania była obserwacja spektrum sygnałów radiowych w okolicach częstotliwości, na jakich operuje LoRa, oraz próba zaobserwowania czy możliwe jest metodą tą zobaczenie pojedynczych chirpów podczas transmisji. Stanowisko testowe zostało wykorzystane także do zebrania zestawu próbek I/Q, które, w późniejszym czasie, zostały poddane analizie wykorzystując do tego środowisko MATLAB.

6.2.1 Obserwacje transmisji w oprogramowaniu *gqrx*

Moduły zostały ustawione na stanowisku testowym, odległość pomiędzy nimi podczas badania wynosiła, podobnie jak w przypadku badania komunikacji, około 0.45 m. W odległości około 1 m od ustawionej sieci znajdowała się antena podłączona do Hack RF One. Oprogramowanie *gqrx* ustawione zostało w taki sposób, aby móc odczytywać w nim dane zbierane przez urządzenie – rozmiar okna FFT na 1048576 próbek (maksymalna wartość dostępna w programie), co dawało rozdzielcość pasma przenoszenia 1 Hz oraz częstotliwość odświeżania na 60fps (ang. *frames per second* – klatek na sekundę, maksymalna dostępna). Na tak przygotowanym stanowisku testowym uruchomione zostały moduły. Aby uzyskać lepszą dokładność obserwacji, na modułach wyłączona została funkcjonalność

pracy na zegarze, a transmisja uruchamiana była każdorazowo ręcznie (wykorzystując przycisk na module MASTER).

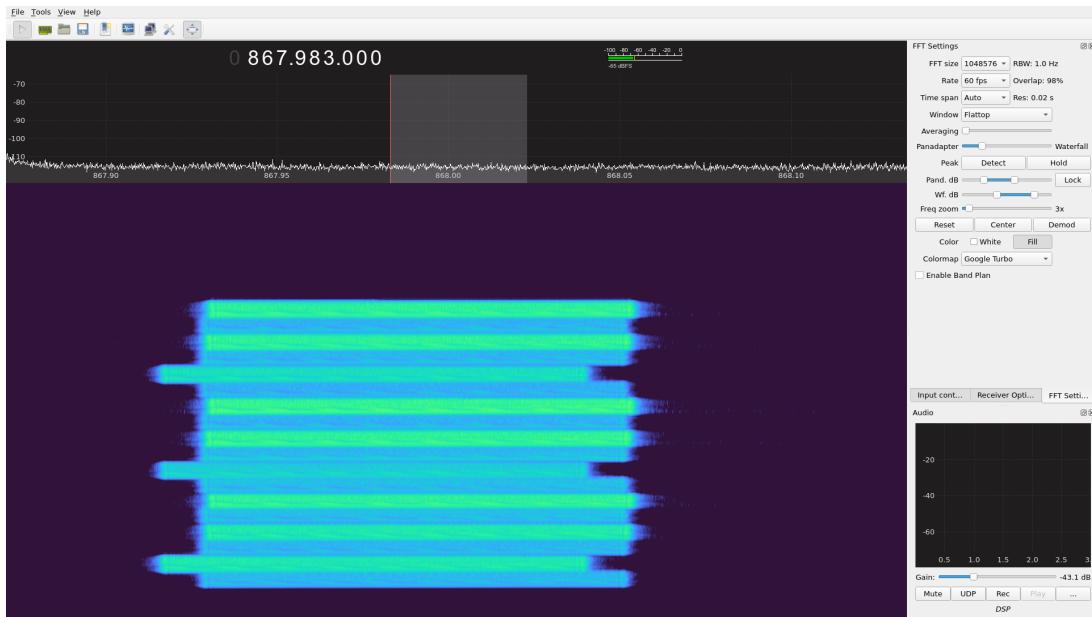
Pierwsze próby obserwacji komunikacji przeprowadzone zostały na podstawowych ustawieniach modułów – najwyższa wartość *Spreading Factor*, SF7 (7 bitów na symbol), pasmo 125kHz, radio coding rate, CR, 4/5. Takie parametry pozwalają sieci na szybką komunikację, jednakże w przypadku analizy widmowej nie pozwoliły one na dobrą obserwację transmisji. W tym celu parametr *Spreading Factor* przedstawiony został na wartość maksymalną, SF12 (12 bitów na symbol). Spowodowało to wydłużenie czasu każdej transmisji i jednocześnie pozwoliło na lepszą obserwację. Korzystając ze zmodyfikowanych parametrów, wykonane zostało kilkanaście transmisji i w tym czasie obserwowane było, jak wygląda ich widmo. Rys. 26 przedstawione zostało, jak wyglądała obserwowana transmisja (tutaj: pełna sieć, w trakcie transmisji przez jeden z modułów).



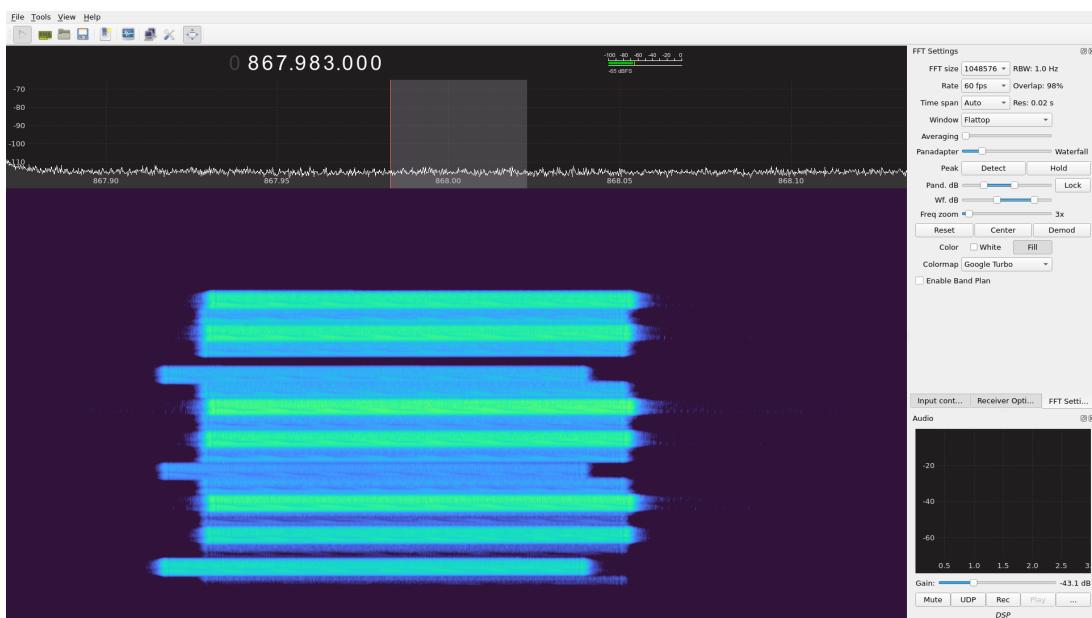
Rysunek 26. Zrzut ekranu z programu pokazujący obserwowane transmisje

Podczas badania wykonane zostały transmisje w kilku konfiguracjach – pełna sieć, 2 moduły SLAVE oraz 1 moduł SLAVE. W tym czasie wykonywane zostały zrzuty ekranów widoku z programu gqrx. Na rys. 27, 28, 29 oraz 30 przedstawione zostały wyniki obserwacji.

6.2. Analiza widmowa transmisji w standardzie LoRa

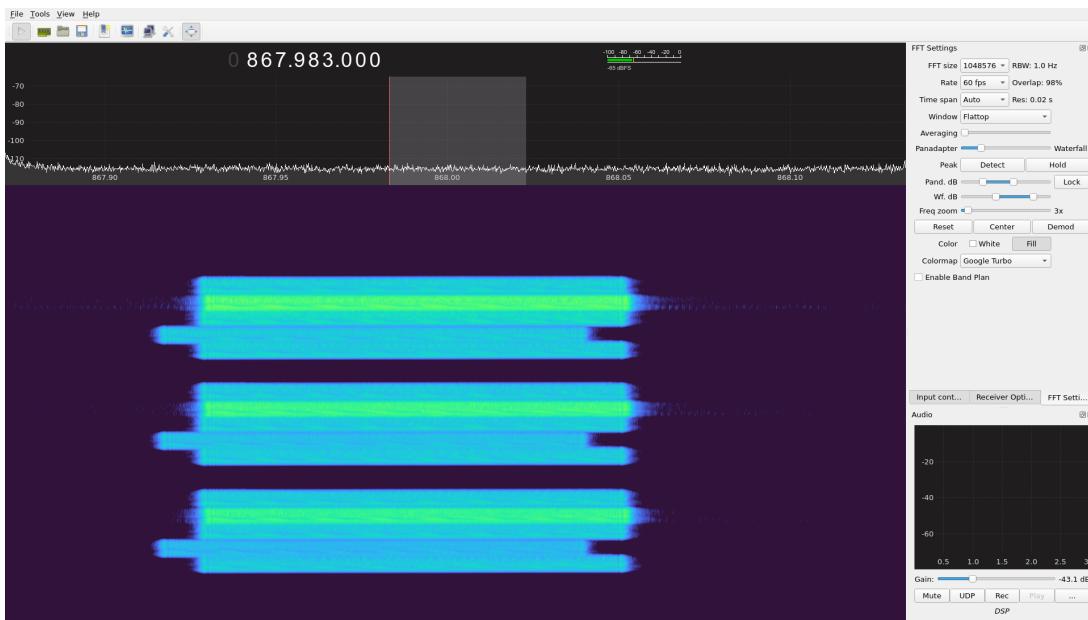


Rysunek 27. Widok na komunikację pełnej sieci, bez wystąpienia problemów z komunikacją



Rysunek 28. Widok na komunikację pełnej sieci, z widocznymi przerwami, gdy jeden z modułów nie odpowiedział na zapytanie

Rozdział 6. Badania działającej sieci



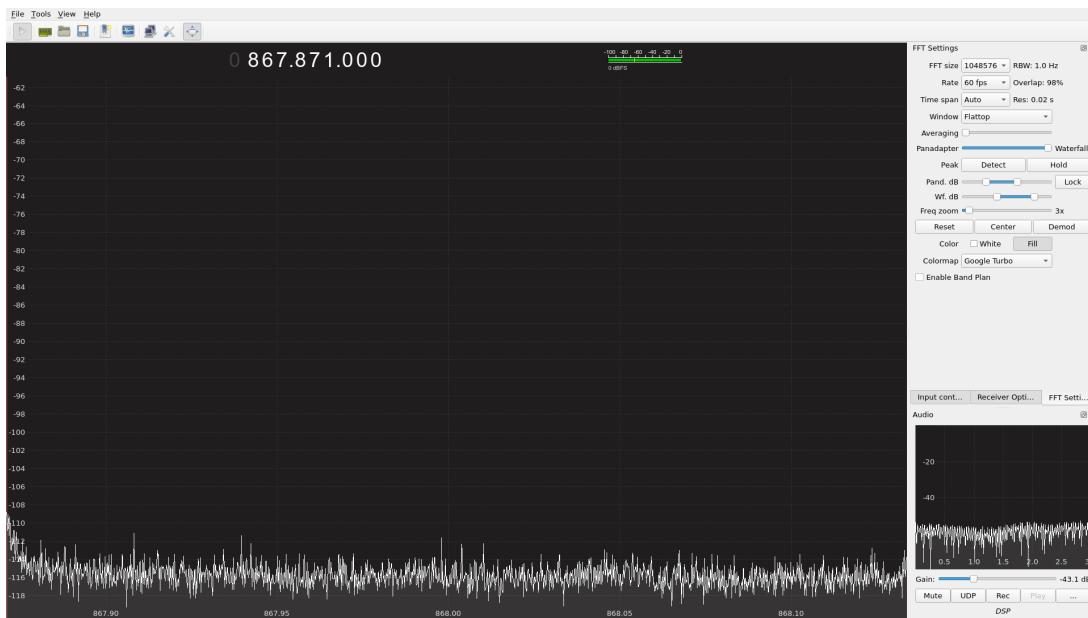
Rysunek 29. Widok na komunikację w sieci dwoma modułami SLAVE włączonymi, a jednym wyłączonym



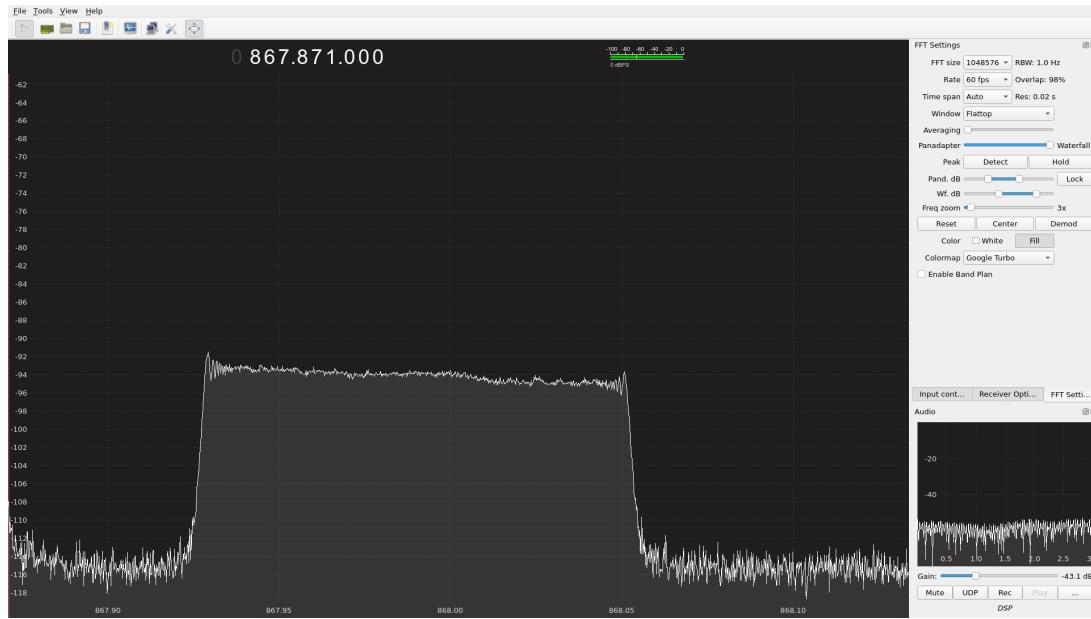
Rysunek 30. Widok na komunikację w sieci z tylko jednym modułem SLAVE włączonymi

W przypadku, gdzie udało się zaobserwować pełną komunikację, gdzie nie wystąpiły żadne problemy, wyraźnie widać 9 wymian pomiędzy modułami (18 transmisji). Natomiast w przypadkach, gdy pojawił się błąd, bądź dany moduł był wyłączony wyraźnie widać to w zaobserwowanym zapisie. Niestety w przypadku obserwacji wykorzystując do tego program *gqrx* nie udało zaobserwować się pojedynczych elementów każdej transmisji (pojedynczych chirpów, preambuły czy wysyłanych symboli). Jest to związane z ograniczeniami oprogramowania co do maksymalnej szybkości odświeżania widoku na ekranie.

Poza obserwacją tzw. wykresów wodospadowych (pokazujących zmiany w widmie w czasie) udało się także zebrać zapisy rozkładu częstotliwości sygnałów podczas transmisji wykonywanych przez moduły. Przedstawione zostało to na rys. 31, 32 oraz 33. Ciekawym faktem jest tutaj widoczna w przypadku transmisji z modułów SLAVE wyższa moc sygnałów. Spowodowane to było najprawdopodobniej faktem, że były umieszczone bliżej anteny podłączonej do urządzenia zbierającego dane.



Rysunek 31. Widok spektrum częstotliwości, gdy żaden z modułów nie transmituje



Rysunek 32. Widok spektrum częstotliwości podczas transmisji modułu MASTER



Rysunek 33. Widok spektrum częstotliwości podczas transmisji modułów SLAVE

6.2.2 Analiza zapisów danych I/Q zebranych gqrx

Ponieważ wykresy obserwowane bezpośrednio w oprogramowaniu *gqrx* nie pozwalały na analizę przesyłanych transmisji z modułów, wykorzystana została funkcja zapisu rejestrowanych danych do postaci I/Q (ang. *In-phase and quadrature components*) do plików RAW. W celu późniejszej analizy danych wykonane zostały 3 zapisy pełnych wymian danych w sieci w różnych konfiguracjach, z parametrami modułów ustawionych na podstawowych wartościach z wyjątkiem *Spreading Factor*. Parametr ten ustawiony został na wartość maksymalną (SF12, 12 bitów na symbol), tak aby uzyskać najlepsze szanse na analizę transmisji.

Dane I/Q to metoda opisu wielkości i danych fazowych rejestrowanego sygnału, gdzie falę sinusoidalną można przedstawić w formie współrzędnych biegunkowych [18] korzystając z równania:

$$f(t) = A \cos 2\pi ft + \varphi \quad (5)$$

Zarejestrowane w ten sposób dane (sinusoidę z modulacją) można rozłożyć na dwie sinusoidy z modulacją amplitudy, które przesunięte są względem siebie w fazie o $\pi/2$ radianów (90 stopni). Zarejestrowaną falę można wówczas przedstawić w złożonym układzie współrzędnych kartezjańskich, w postaci składowych rzeczywistej i urojonej, korzystając z równań:

$$I(t) = A \cos \varphi \cos 2\pi ft \quad (\text{Składowa rzeczywista}) \quad (6)$$

$$Q(t) = A \sin \varphi \sin 2\pi ft \quad (\text{Składowa urojona}) \quad (7)$$

Korzystając z zarejestrowanych zapisów, gdzie każdy miał długość około 25 sekund i składał się z około 25 milionów próbek (związane z ustawionym oknem FFT, milion próbek na sekundę) wykonana została ich analiza w środowisku MATLAB. Napisana została funkcja pozwalająca na generowanie spektrogramów pełnego zarejestrowanego sygnału oraz spektrogramów zbliżenia na konkretne, wyznaczone, elementy. Kod źródłowy przedstawiony został na listingach 33, 34 oraz 35 (przedstawiają kolejno: argumenty wejściowe funkcji, właściwe generowanie spektrogramów oraz funkcje pomocnicze do ładowania danych z plików RAW i eksportu wygenerowanych wykresów).

```

1 % Function args
2 arguments
3     input_file (1,1) string
4     output_file (1,1) string
5     opts.zoom_range (2,1) double
6     opts.window_size (1,1) double = 1024
7     opts.sample_rate (1,1) double = 1e6
8     opts.n_overlap (1,1) double = 512
9     opts.n_fft (1,1) double = 1024
10    end

```

Listing 33. Funkcja do analizy danych I/Q w MATLAB – argumenty wejściowe

```
1 % Main function
2 data = loadfile(input_file);
3 window = hamming(opts.window_size);
4 figure, colormap('winter');
5
6 subplot(2,1,1); % Full
7 spectrogram(data,window,opts.n_overlap,opts.n_fft, ...
8     opts.sample_rate,'yaxis');
9 ylim([-inf 220]);
10 title('Full capture');
11 xline([opts.zoom_range(1) opts.zoom_range(2)],'r--','LineWidth',1.2);
12 xticks(0:1:(length(data)/opts.sample_rate));
13 set(gca,'XMinorTick','on');
14 hold on;
15
16 subplot(2,1,2); % Zoomed in
17 zoom_range = [opts.zoom_range(1)*opts.sample_rate, ...
18     opts.zoom_range(2)*opts.sample_rate];
19 data = data(zoom_range(1):zoom_range(2),:);
20 spectrogram(data,window,opts.n_overlap,opts.n_fft, ...
21     opts.sample_rate,'yaxis');
22 ylim([-inf 220]);
23 title('Zoomed in');
24 hold off;
25
26 % Export result
27 exportfigure(gcf,output_file);
```

Listing 34. Funkcja do analizy danych I/Q w MATLAB – generowanie pełnego spektrogramu oraz zbliżenia na wycinek

```
1 %% Local functions
2 function data = loadfile(filename) % Loads data
3 f_id = fopen(filename,'rb');
4 raw_data = fread(f_id,'float32');
5 data = raw_data(1:2:end) + 1j*raw_data(2:2:end);
6 end
7
8 function exportfigure(fig,output_file) % Scale, export figure
9 target_width = 1920;
10 target_height = target_width/2;
11 set(fig,'Position',[200 200 target_width target_height]);
12 movegui(fig,'center');
13 saveas(fig,output_file,'png');
14 close;
15 end
```

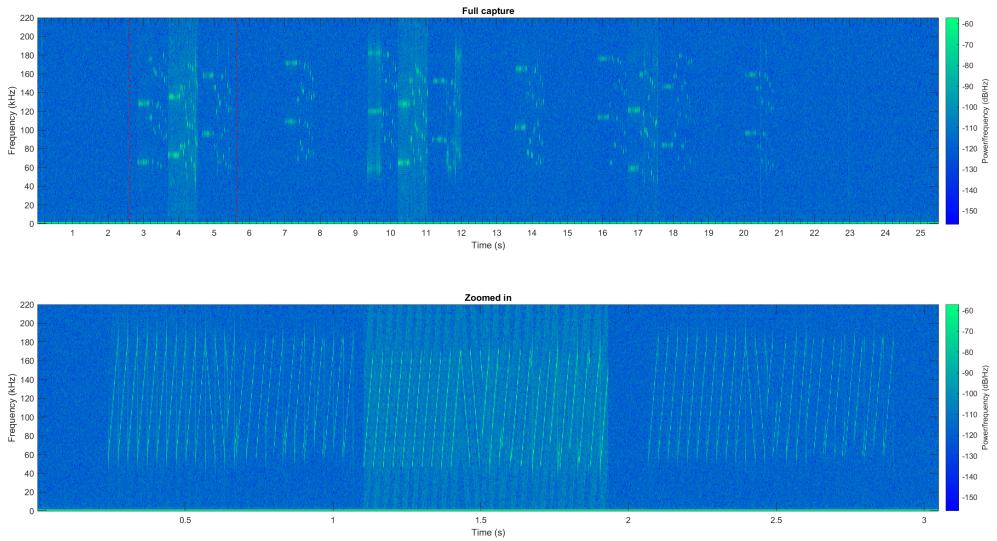
Listing 35. Funkcja do analizy danych I/Q w MATLAB – funkcje pomocnicze

Argumentami wejściowymi funkcji są: plik wejściowy (zawierający dane I/Q), ścieżka oraz nazwa pliku, gdzie wygenerowany wykres ma zostać zapisany, zasięg próbek, na jakim ma zostać wykonane zbliżenie oraz dodatkowe parametry do funkcji `spectrogram` – wielkość okna, częstotliwość próbkowania, liczba nakładających się próbek, liczba punktów do dyskretnej transformaty Fouriera.

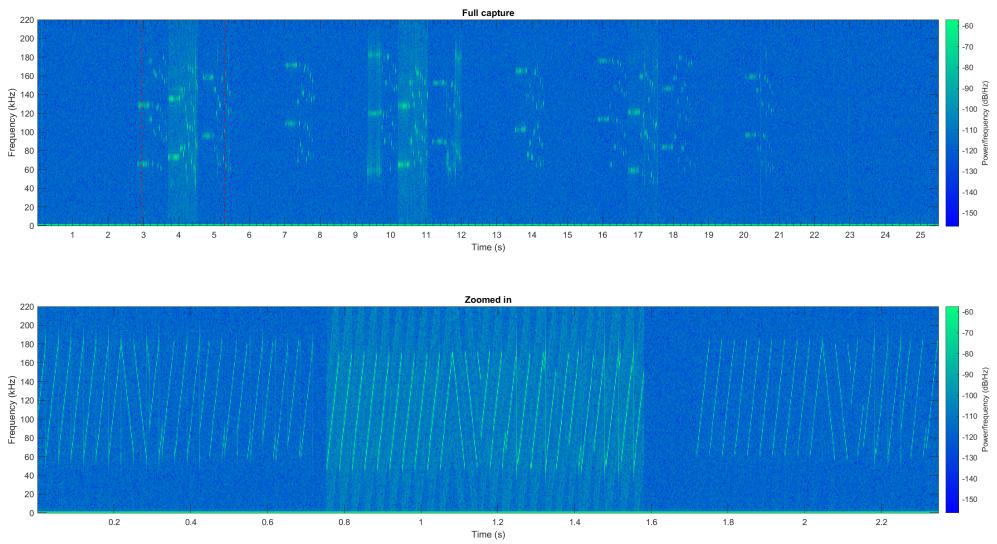
Funkcja pomocnicza, wykorzystywana do ładowania plików RAW, bazuje na równianach opisujących składowe rzeczywistą i urojoną. Plik zostaje otwarty w momencie wywołania funkcji, a jego zawartość odczytana w postaci 32-bitowych wartości zmiennoprzecinkowych (`float32`) z najbardziej znaczącym bajtem jako pierwszym (ang. *Big endian*). Następnie zawartość pliku ładowana jest do pamięci programu, modyfikując je do postaci złożonej (ang. *Complex*).

Generowanie spektrogramów wykorzystuje wbudowaną funkcję `spectrogram`. W przypadku generowania wykresu dla całego sygnału wykorzystywane są tylko argumenty wejściowe. Dodatkowo na podstawie wprowadzonych wartości, gdzie ma zostać wykonane zbliżenie, na wykresie rysowane są linie pionowe na osi X. Korzystając z długości (wielkości) tablicy danych wejściowych, ustalane są ilość oraz rozstawienie podziałki. Natomiast w przypadku wykresu zbliżenia, pierwszym elementem jest wyznaczenie zakresu próbek, na podstawie których wygenerowany ma zostać spektrogram. Korzystając z tych dodatkowych zmiennych oraz pozostałych argumentów wejściowych generowany jest spektrogram zbliżenia. Ostatnim krokiem w funkcji jest eksport wykresu do pliku. Wykorzystywana jest do tego zaimplementowana funkcja pomocnicza `exportfigure`. Zdefiniowane w niej zmienne wykorzystywane są do zachowania poprawnych proporcji, tak aby wykres miał największą możliwą czytelność.

Korzystając z zaimplementowanej funkcji, wygenerowane zostały spektrogramy jednego z zarejestrowanych sygnałów, stosując zwiększające przybliżenie, w celu uzyskania jak najlepszego widoku na pojedynczą transmisję. Wygenerowane wykresy przedstawione zostały przedstawione na rys. 34, 35, 36 oraz 37 (zbliżenia w czasie 2.5 s a 6 s, pokazujące 3 transmisje, do 3.6 s a 4.6 s, pokazując dokładniej 1 transmisję).

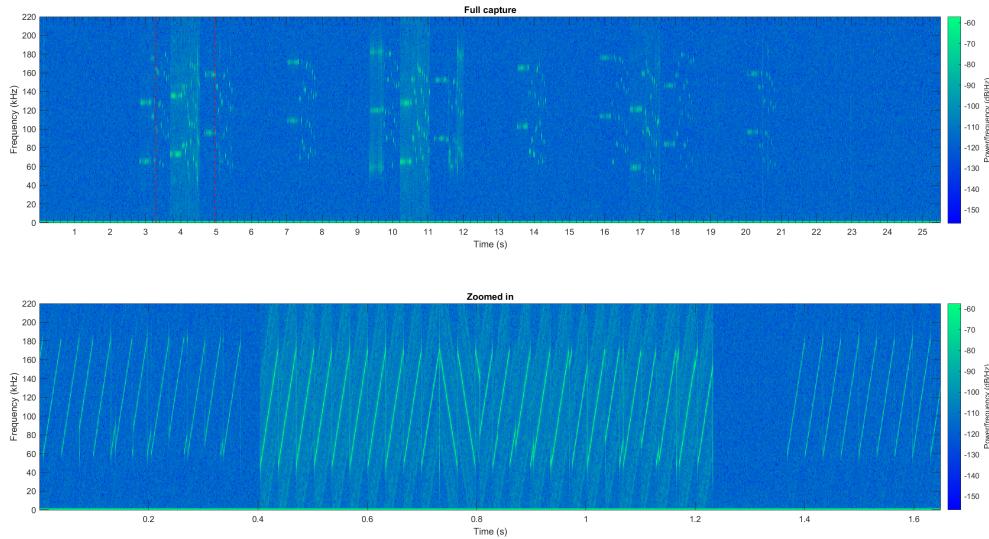


Rysunek 34. Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 2.5 s a 5.5 s

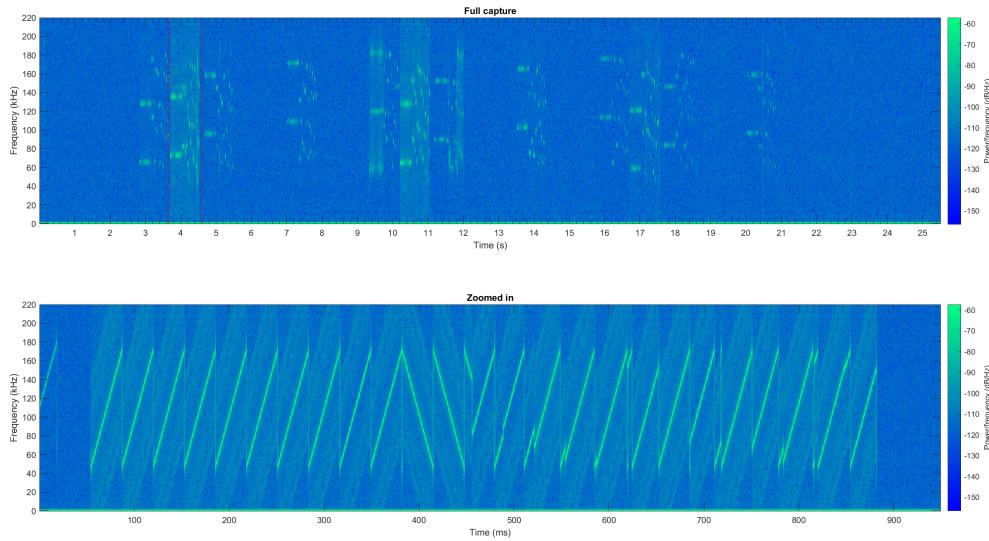


Rysunek 35. Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 3 s a 5.1 s

6.2. Analiza widmowa transmisji w standardzie LoRa

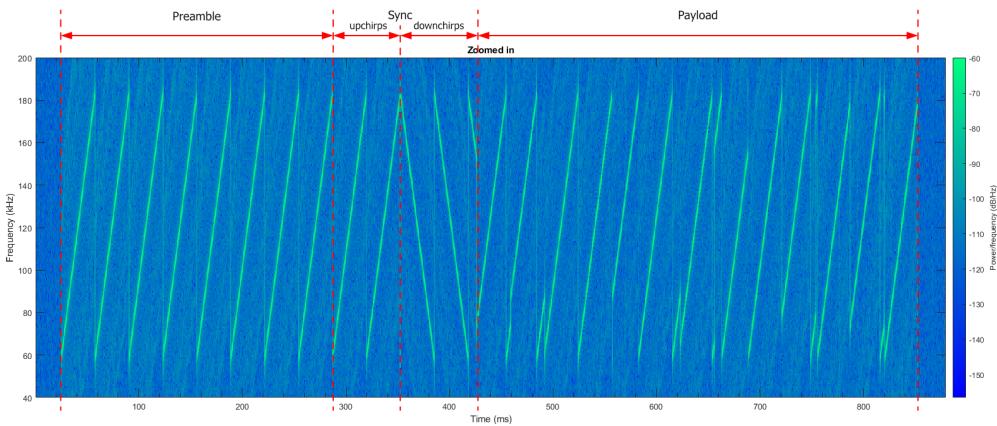


Rysunek 36. Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 3.4 s a 5 s

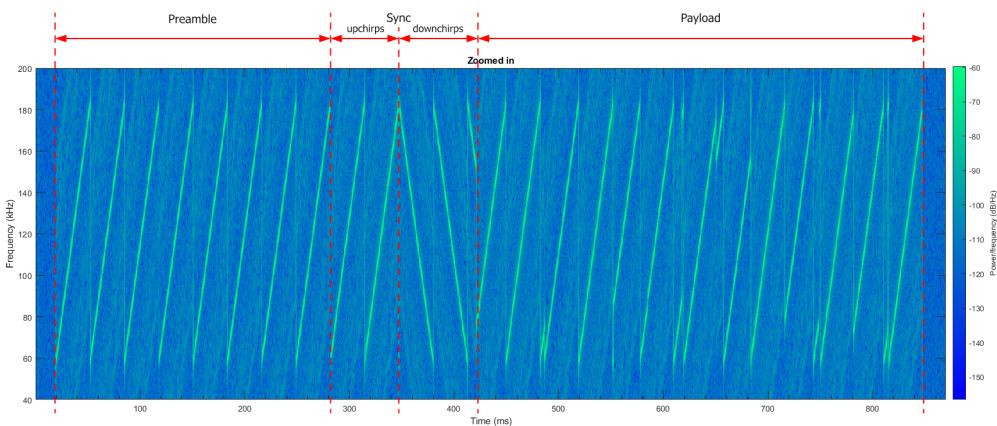


Rysunek 37. Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 3.6 s a 4.6 s, widoczna jedna transmisja

Na podstawie wygenerowanych spektrogramów możliwe było przeanalizowanie jednej pełnej ramki transmisji danych. Dzięki uzyskanemu dużemu przybliżeniu na analizowany sygnał możliwe było wyznaczenie granic poszczególnych elementów ramki LoRa. Przedstawione zostało to na rys. 38 oraz 39 (odpowiednio dla fragmentu z zarejestrowanych próbek drugiej oraz trzeciej).



Rysunek 38. Fragment drugiej próbki sygnału z oznaczonymi poszczególnymi elementami ramki LoRa



Rysunek 39. Fragment trzeciej próbki sygnału z oznaczonymi poszczególnymi elementami ramki LoRa

Na przedstawionych fragmentach spektrogramów widoczne są różnice, pokazujące, że możliwe jest w pewnym stopniu rozróżnienie elementów transmisji. Są one widoczne tylko w częściach oznaczonych jako "Payload" na wygenerowanych wykresach, ponieważ tylko te elementy są zmienne w każdej transmisji – zawierają nagłówek, właściwe przesyłane dane oraz kod CRC (ang. *Cyclic Redundancy Check*, służący wykrywaniu potencjalnych błędów w transmisji). Pozostałe elementy są elementami stałymi dla każdej ramki: preambuła (której długość ustawiona została na 8 symboli) – pozwala innym

elementom sieci na wykrycie początku transmisji ramki, a także dodatkowe symbole w modulacjach Up-chirp (niższe do wyższych częstotliwości) oraz Down-chirp (wyższe do niższych częstotliwości) – w sumie 4.25 symbolu, służące synchronizacji, aby mieć jak największą pewność, że dane, które mają zostać przesłane, nie zostaną w żaden sposób zniekształcone przez ew. przesunięcia w czasie.

Ponieważ każda ramka LoRa jest kodowana, możliwe jest jedynie rozróżnienia pojedynczych ramek między sobą, jednakże nie jest już możliwe, korzystając wyłącznie ze spektrogramów, rozpoznanie co w danym momencie jest przesyłane. W zaprezentowanych ramkach z dwóch różnych próbek widać pewne różnice w przesyłanych symbolach, jednakże tylko na podstawie tego nie jest możliwe pokazanie, które symbole przedstawiają konkretne bity przesyłanych wiadomości.

6.3 Badanie parametrów komunikacyjnych sieci

Kolejnym elementem wartym zbadania w przypadku budowania sieci bezprzewodowych jest określenie ich możliwości komunikacji. Parametry, jakie zostały sprawdzone to skuteczny zasięg komunikacji oraz przepustowość sieci – teoretycznie, korzystając z dostępnych wzorów, w celu określenia co jest możliwe do uzyskania oraz porównanie faktyczne uzyskanymi wynikami, na podstawie zebranych danych I/Q oraz wygenerowanych spektrogramów.

6.3.1 Skuteczny zasięg komunikacji

Zasięg komunikacji sprawdzony został dla dwóch różnych przypadków. Modyfikując wartość parametru *Spreading Factor* (SF, długość symbolu, związana z ilością przesyłanych bitów) sprawdzone zostały dwa skrajne przypadki – krótkie, szybkie transmisje dla SF7 oraz wolniejsze, dłuższe transmisje dla SF12. Badanie przeprowadzone zostało w terenie średnio zabudowanym i częściowo zalesionym. Otoczenie to wybrane zostało, ponieważ założyć można było, że komunikacja między modułami będzie odbywać się bez zakłóceń zewnętrznych pochodzących z innych urządzeń nadających na tym samym paśmie co badana sieć.

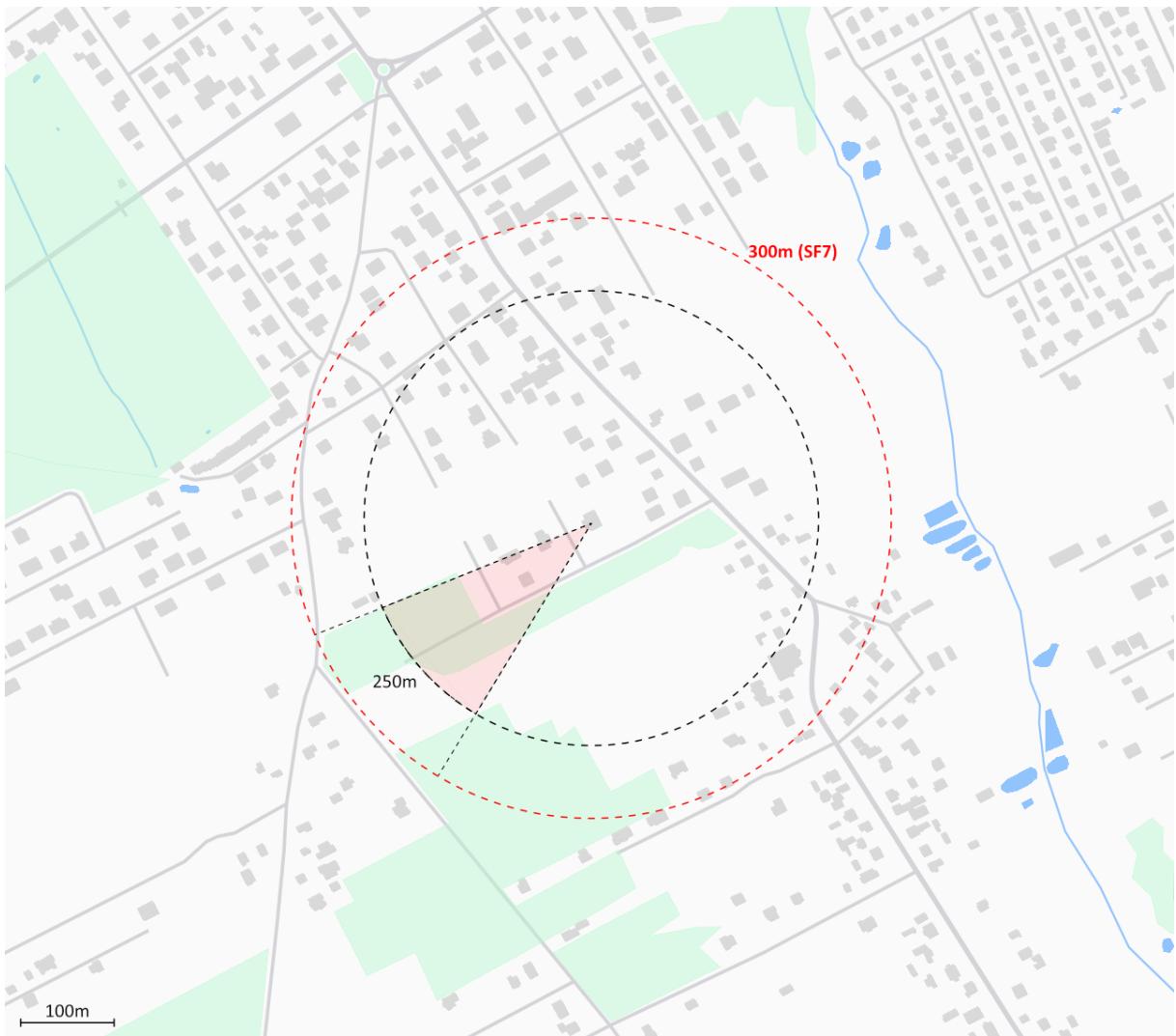
Według specyfikacji standardu oraz na podstawie innych badań teoretyczny zasięg komunikacji między modułami określony został na 5 km [19]. Podczas badania wykorzystane zostało nieznacznie zmodyfikowane oprogramowanie – wyłączona została funkcja zegara i każdorazowo zapytania były wysyłane ręcznie, wykorzystując do tego przycisk na module MASTER.

Scenariusz badania opierał się na pozostawieniu modułów SLAVE podłączonych do komputera stacjonarnego (w celu późniejszej obserwacji logów z ich pracy), natomiast modułem „poruszającym się” był moduł MASTER. Wykorzystując dostępne online mapy, określone zostały miejsca, gdzie należało się zatrzymać i zainicjować transmisję. Badanie nie zostało wykonane w ruchu, aby moduły miały jak największe szanse na uzyskanie połączenia, a także dlatego, że celem było symulowanie statycznej sieci operującej na dużych odległościach, a nie mobilnego punktu pomiarowego. Ponadto zwiększyły został czas, który moduł MASTER oczekiwany na odpowiedź – z normalnie wykorzystywanych 500 ms na 5 s, aby moduły miały jak największe szanse na komunikację. Dodatkowo podczas

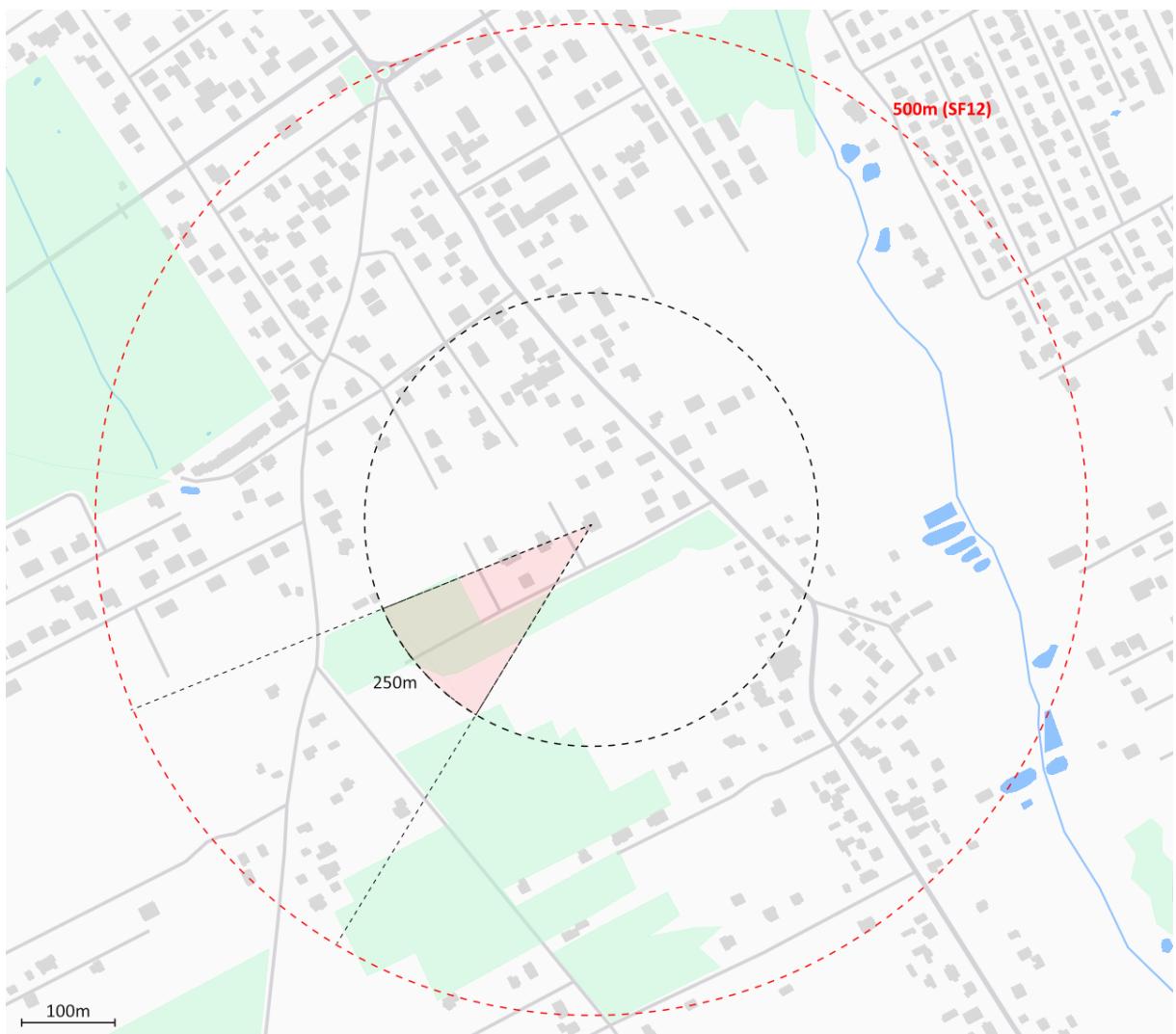
Rozdział 6. Badania działającej sieci

badania sprawdzony został wpływ przeszkody w postaci dość gęstego lasu na możliwości komunikacji modułów. Testy przeprowadzone zostały zwiększając odległość od modułów SLAVE co około 100 m za każdym razem.

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzone zostały mapy odległości, które pozwoliły na uzyskanie komunikacji między modułami. Rys. 40 przedstawia wyniki uzyskane dla SF7, natomiast 41 dla SF12.



Rysunek 40. Mapa z oznaczonymi odlegściami dla ustawienia SF7



Rysunek 41. Mapa z oznaczonymi odległościami dla ustawienia SF12

Kolorem czerwonym oznaczone zostały maksymalne uzyskane odległości dla każdego z ustawień *Spreading Factor*. W przypadku dystansów większych niż zaznaczone, wszystkie przesyłane zapytania kończyły się brakiem wymiany danych – każdorazowo przez przekroczenie maksymalnego czasu oczekiwania na odpowiedź przez moduł MASTER. Uzyskane odległości, na których moduły mogły się swobodnie komunikować, były znacznie mniejsze niż sugerowane przez opisywane możliwości standardu LoRa – dokumentacja podaje wartości w zakresie do 2-8 km, w zależności od terenu [3].

Niezależnie od wykorzystanego ustawienia parametru *Spreading Factor* tereny zalesione stanowiły największą przeszkodę dla komunikacji między modułami. W obu przypadkach znacznie ograniczona lub całkowity brak występowały już przy 250 m (na mapach przedstawionych jako zaciemnione jasnoczerwonym kolorem tereny). Jednakże takie problemy występowały tylko w przypadku, gdzie las był dość gęsty, ponieważ w przypadkach, gdy na linii pomiędzy modułem MASTER a modułami SLAVE występowało niewiele drzew, komunikacja była możliwa do uzyskania.

Po zakończeniu badania, obserwując informacje logowane przez port szeregowy, można było zaobserwować całkowity brak części zapytań po stronie modułów SLAVE. Widoczne były tylko te, na które podjął próbę wysłania odpowiedzi. Sugerowało to, że część zapytań, które moduł MASTER wysyłał nie były kompletnie rejestrowane po stronie modułów SLAVE, stąd ich brak odpowiedzi oraz przekroczenia czasu oczekiwania (timeout).

Na podstawie uzyskanych wyników pojawia się wniosek, że aby możliwym było uzyskanie znacznie większych odległości komunikacji między modułami, środowisko, w jakim one pracują, musiałoby być znacznie mniej zabudowane oraz pozbawione znacznej ilości przeszkód, jakie mogły występować podczas badania. Hipotezę tę potwierdzają zaobserwowane podczas badania problemy w komunikacji, gdy próby wykonywane były w pobliżu terenów zalesionych – w tych przypadkach dystanse pozwalające na uzyskanie połączenia były dodatkowo zmniejszone. Jednakże uzyskane wyniki pokazują też, że możliwe jest zbudowanie oraz zaimplementowanie sieci, która pozwala na komunikację na znacznych dystansach, nawet gdy środowisko nie jest idealnie do tego przystosowane.

6.3.2 Badanie przepustowości sieci

Niezależnie od tego, czy budowana jest sieć przewodowa, czy bezprzewodowa, ważnym parametrem jest jej przepustowość. W przypadku, gdy będzie ona zbyt niska, sieć mogłaby nie spełniać założeń projektowych lub wymagań, które zostały przyjęte. W przypadku zaprojektowanej oraz zaimplementowanej sieci czujnikowej parametr nie był kluczowy, pomimo tego został on zbadany, w celu określenia możliwości stworzonego rozwiązania.

Pierwszym elementem było określenie teoretycznych parametrów, które sieć powinna móc osiągnąć dla obu skrajnych przypadków – SF7 oraz SF12. Następnie, korzystając z otrzymanej analizy danych I/Q podjęta została próba porównania otrzymanych wyników do wyliczonych wartości teoretycznych.

Parametrami, którebrane są pod uwagę przy określaniu przepustowości sieci LoRa, są:

- *Spreading Factor*, SF, określa ilość bitów na symbol,

- Code Rate, CR, używany do określenia stosunku bitów użytecznych do ilości bitów przesyłanych,
- Bandwidth, BW, szerokość pasma transmisji.

Do wyznaczenia wartości teoretycznych przyjęte zostały $CR = 1$ oraz $BW = 125 \text{ kHz}$, ponieważ dla takich ustawień zebrane zostały dane I/Q podczas analizy widmowej sygnałów.

Do określenia nominalnej, teoretycznej przepustowości R_b wykorzystana została zależność przedstawiona równaniem 8:

$$R_b = SF \cdot \frac{4 \cdot (4 + CR)^{-1}}{2^{SF} \cdot BW^{-1}} \cdot 1000 \quad [\text{bps}] \quad (8)$$

Dla ustawienia *Spreading Factor*, SF7 (7 bitów na symbol) nominalna przepustowość sieci równa jest:

$$R_b = SF \cdot \frac{4 \cdot (4 + CR)^{-1}}{2^{SF} \cdot BW^{-1}} \cdot 1000 = 7 \cdot \frac{4 \cdot 5^{-1}}{2^7 \cdot 125^{-1}} \cdot 1000 = 5468.75 \text{ bps} = 5.47 \text{ kbps}$$

natomiast dla SF12 (12 bitów na symbol) wartość ta jest znacznie mniejsza:

$$R_b = SF \cdot \frac{4 \cdot (4 + CR)^{-1}}{2^{SF} \cdot BW^{-1}} \cdot 1000 = 12 \cdot \frac{4 \cdot 5^{-1}}{2^{12} \cdot 125^{-1}} \cdot 1000 = 293 \text{ bps}$$

Korzystając ze spektrogramów wygenerowanych na podstawie danych I/Q, przedstawionych na rys. 38 oraz 39 możliwe było określenie, że na każdą z zarejestrowanych transmisji składało się w sumie 24 do 25 symboli (8 preambuły, 4.25 synchronizacji oraz około 12 właściwej przesyłanej wiadomości), które zostały przesłane w czasie około 820 milisekund. Wiedząc, że zarejestrowane transmisje korzystały z ustawienia SF12 (czyli 12 bitów na symbol), wyznaczona została ilość przesłanych w sumie bitów – około 290. Na podstawie tych informacji możliwe było określenie szacowanej uzyskanej szybkości transmisji (przepustowości sieci) na około 353 bps (bitów na sekundę). Otrzymane wartości były zbliżone do wartości nominalnych, w tym przypadku nawet wyższe niż zostało to wyznaczone teoretycznie.

6.4 Badanie poboru prądu i zużycia energii

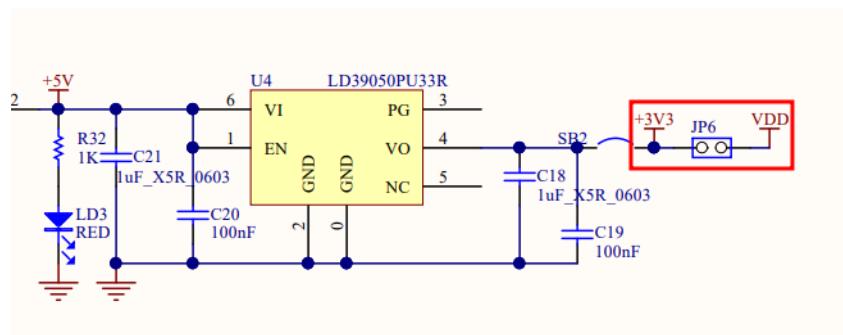
Ważnym elementem określającym jak dobrze może działać sieć bezprzewodowa, jest jej zużycie energii oraz możliwość pracy tylko na zasilaniu baterijnym. W tym celu zbadano pobór prądu modułów w różnych momentach:

- praca normalna (stan „IDLE”, spoczynku, aktywny tylko zegar),
- aktywna komunikacja między modułami,
- wykonywanie pomiarów otoczenia (moduły SLAVE),
- transmisja danych przez I2C (moduł MASTER).

Badanie wykorzystywało standardowe stanowisko testowe – moduły SLAVE umieszczone w odległości około 45 cm (0.45 m) od modułu MASTER, gdzie wszystkie pracowały na niezmodyfikowanym oprogramowaniu. Testy nie obejmowały sprawdzenia poboru prądu przez moduł serwera sieciowego z uwagi na to, że nie posiadał dostępnego miejsca pomiarowego, a pomiary z wykorzystaniem jego portu USB posiadałyby znaczną niedokładność pomiarową powiązaną przykładowo z poborem prądu innych elementów płytki (np. diod LED). Na podstawie zebranych danych wyznaczone zostały pobór mocy przez moduły oraz teoretyczny maksymalny czas pracy na zasilaniu baterijnym.

6.4.1 Badanie poboru prądu przez moduły sieci

Wykorzystane moduły STM32 L152 Nucleo-64 wyposażone są w zworkę JP6 umieszczoną za stabilizatorem napięcia, z której był zasilany mikrokontroler STM32L152RE. Fragment schematu z dokumentacji płytki [20] z oznaczoną zworką przedstawiony został na rys. 42. Gdy była ona założona na wyprowadzone piny, mikrokontroler był zasilany, wykorzystując płytkę rozszerzenia ze złączem Mini USB typu B, z portu USB komputera, gdzie moduł był podłączony. W momencie, gdy była ona usunięta, możliwe było w to miejsce podłączenie amperomierza, co umożliwiało pomiar prądu pobieranego bezpośrednio przez mikrokontroler.



Rysunek 42. Fragment schematu płytki wykorzystanego modułu STM32 Nucleo-64. Napięcie VDD wyrowadzone jest bezpośrednio do zasilania mikrokontrolera

Wykorzystując monitor portu szeregowego, gdzie logowane są informacje o pracy modułów oraz opisaną metodę pomiaru pobieranego prądu zebrane zostały jego wartości w wyszczególnionych momentach pracy. Ponieważ pobór nie był równomierny przez cały czas pracy modułów, szczególnie w przypadkach aktywnej komunikacji oraz pracy w stanie IDLE, w tych momentach zebrano szereg pomiaru, a następnie wyznaczona została ich średnia. Otrzymane wyniki zebrane zostały w tabelach 2a, 2b oraz 3a, 3b, odpowiednio dla ustawień SF7 oraz SF12.

Tabela 2a. Wyniki pomiarów poboru prądu przez moduły MASTER, SLAVE 1 dla SF7.

Tryb pracy	MASTER			SLAVE 1		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
Normalna, spoczynek [mA]	11.21	11.40	11.55	11.09	11.14	11.19
Aktywna komunikacja [mA]	11.69	11.89	12.12	11.63	11.77	11.91
Pomiary otoczenia [mA]		nd.		11.19	11.28	11.37
Transmisja po I2C [mA]	-	11.60	-		nd.	

Tabela 2b. Wyniki pomiarów poboru prądu przez moduły SLAVE 2, SLAVE 3 dla SF7.

Tryb pracy	SLAVE 2			SLAVE 3		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
Normalna, spoczynek [mA]	11.08	11.12	11.16	11.46	11.52	11.58
Aktywna komunikacja [mA]	11.54	11.61	11.68	11.88	11.96	12.04
Pomiary otoczenia [mA]	11.23	11.28	11.33	11.25	11.31	11.37
Transmisja po I2C [mA]		nd.			nd.	

Tabela 3a. Wyniki pomiarów poboru prądu przez moduły MASTER, SLAVE 1 dla SF12.

Tryb pracy	MASTER			SLAVE 1		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
Normalna, spoczynek [mA]	11.12	11.35	11.52	11.13	11.23	11.25
Aktywna komunikacja [mA]	11.69	11.82	12.12	11.66	11.84	11.97
Pomiary otoczenia [mA]		nd.		11.24	11.37	11.40
Transmisja po I2C [mA]	-	11.71	-		nd.	

Tabela 3b. Wyniki pomiarów poboru prądu przez moduły SLAVE 2, SLAVE 3 dla SF12.

Tryb pracy	SLAVE 2			SLAVE 3		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
Normalna, spoczynek [mA]	11.22	11.31	11.37	11.32	11.38	11.54
Aktywna komunikacja [mA]	11.68	11.70	11.81	11.74	11.86	12.00
Pomiary otoczenia [mA]	11.33	11.38	11.48	11.09	11.15	11.22
Transmisja po I2C [mA]		nd.			nd.	

W uzyskanych wynikach można zauważyc, że poszczególne momenty pracy modułów charakteryzują się różnymi wartościami poboru prądu, a zdecydowanie najwięcej wymagane było podczas komunikacji w sieci.

Biorąc pod uwagę fakt, że zmiana parametru *Spreading Factor* w przypadku zasięgu komunikacji wprowadziła znaczącą zmianę w możliwościach komunikacji, złożone zostało, że podobne zachowanie zostanie zaobserwowane w przypadku poboru prądu – moduły przez wydłużony czas komunikacji będą pobierały widocznie więcej prądu. Jednakże w przypadku tego badania takie zachowanie nie zostało zaobserwowane. Moduły pobierały bardzo zbliżony prąd niezależnie od ustawienia, a różnice w otrzymanych wartościach można przypisać do niedokładności pomiarowej, różnic w elementach aktywnych oraz pasywnych wykorzystanych do produkcji, a także do nieznacznych różnic w samych mikrokontrolerach na użytych płytach.

6.4.2 Maksymalny teoretyczny czas pracy sieci

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów wyznaczone zostały średnie wartości poboru prądu dla każdego z modułów. Z uwagi na to, że nie zaobserwowało znaczących różnic między ustawieniami SF7 oraz SF12, obliczenia wykonane zostały tylko dla przypadku SF7:

- moduł MASTER: 11.63 mA,
- moduł SLAVE 1: 11.39 mA,
- moduł SLAVE 2: 11.34 mA,
- moduł SLAVE 3: 11.73 mA.

Na podstawie otrzymanych wartości zauważyc można, że moduł SLAVE 3 charakteryzował się największym średnim poborem prądu spośród wykorzystanych modułów.

Do wyznaczenia teoretycznego maksymalnego czasu pracy modułów na zasilaniu baterijnym przyjęta została pojemność takiego zasobnika na 10000 mAh – wartość taka jest często spotykana w dostępnych na rynku powerbankach (zasilaniach baterijnych stosowanych np. do telefonów), które mogą zasilać urządzenia poprzez połączenie ich przez USB. Do obliczeń wykorzystana została zależność przedstawiona równaniem 9:

$$\text{Żywotność baterii} = \frac{\text{Pojemność baterii [mAh]}}{\text{Prąd obciążenia [mA]}} \quad [h] \quad (9)$$

Obliczenia wykonane zostały dla przypadku największego poboru prądu przez moduły (SLAVE 3), zakładając ciągłą, nieprzerwaną pracę modułu. Otrzymana została wartość:

$$\text{Żywotność baterii} = \frac{10000}{11.73} = 852.5 \text{ h}$$

co przeliczając, równa się 35.52 dniom (lub niespełna 5 tygodniom). Biorąc pod uwagę możliwe większe zużycie energii związane z zasilaniem także innych elementów wykorzystanych płyt (diody LED, czujniki BME280, itp.) wartość ta byłaby w pewnym stopniu mniejsza. Otrzymane wyniki

6.4. Badanie poboru prądu i zużycia energii

pokazują, że sieć bazująca na standardzie LoRa mogłaby zostać wykorzystana do zbudowania sieci czujnikowej, która wymagałaby niewielkiego wkładu pracy w jej utrzymanie.

Rozdział 7

Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie, zaimplementowanie oraz weryfikacja hipotezy – zbadanie możliwości zbudowania prywatnej sieci czujnikowej bazującej na standardzie LoRa. W ramach tego zapoznano się z podstawami standardu: działaniem modulacji, elementami składowymi przesyłanej ramki oraz parametrami wpływającymi na transmisję. Opisany został proces przygotowania środowiska do tworzenia oprogramowania, kroki wymagane do zaczęcia pracy, wykorzystane biblioteki oraz ograniczenia związane z wybraną platformą. Ponadto przedstawione zostały elementy składające się na całość implementowanego oprogramowania – części dedykowane dla modułów pracujących w budowanej sieci oraz modułu wpierającego działanie systemu (serwera sieciowego do prezentacji danych). W pracy przedstawione zostały także przeprowadzone badania, które pozwoliły na określenie możliwości budowania sieci czujnikowych opartych o standard LoRa.

W ramach części projektowej (implementacji sieci) napisane zostało oprogramowanie, które pozwoliło na komunikację na płytce rozwojowej STM32 Nucleo64 L152 wyposażone w moduły LoRa. Oprogramowanie zawiera elementy, które pozwoliły na weryfikowanie przesyłanych danych, zbieranie pomiarów oraz wyznaczanie z nich średniej kroczącej, w celu wyeliminowania chwilowych znaczących zmian w otoczeniu pracy sieci. Ponadto zaimplementowane zostało oprogramowanie na moduł serwera sieciowego, który mógł odbierać dane z modułu MASTER sieci LoRa. W tym celu wykorzystana została zakodowana transmisja przez magistralę I2C, która pozwalała na wykrywanie błędów w transmisji danych. Zaimplementowana strona internetowa jest bardzo prostym narzędziem pozwalającym na przeglądanie danych zbieranych przez sieć. Element ten mógłby zostać znacznie ulepszony przez wykorzystanie innego typu sprzętu. Jednakże wybrana metoda pozwoliła na pokazanie, że nawet bardzo małe urządzenie, które mogą działać na zasilaniu baterijnym, mogą zastać z sukcesem wykorzystane do takiego zadania.

W ramach badań zweryfikowana została postawiona hipoteza – czy możliwe jest zbudowanie prywatnej sieci czujnikowej bazującej na standardzie LoRa. Przeprowadzone badania pozwoliły na zapoznanie się z wyglądem przesyłanej ramki, weryfikację działania sieci (w celu sprawdzenia stopnia błędów w przesyłaniu wiadomości z danymi), sprawdzenie skutecznego zasięgu komunikacji oraz przepustowości, a także poboru prądu oraz możliwości wykorzystania zasilania baterijnego do

Rozdział 7. Podsumowanie

podtrzymania modułów sieci. Otrzymane wyniki badań pozwoliły na określenie, że standard LoRa może zostać wykorzystany w przypadku sieci prywatnych, projektowanych na mniejszą skalę.

W przyszłości możliwe byłoby rozwinięcie oraz usprawnienie działania zaimplementowanego rozwiązania. Jednym z elementów byłoby zmiana modułu, sprzętu odpowiedzialnego za funkcję serwera sieciowego do zbierania danych. Możliwe byłoby zastosowanie rozwiązania wyposażonego w bazę danych. Pozwoliłoby to na zapisywanie zbieranych danych w celu dokładniejszej obróbki oraz bardziej przejrzystej prezentacji ich w oparciu także o dane historyczne, np. poprzez wyświetlanie użytkownikowi wykresów pokazujących zmiany w czasie. Zmiana wykorzystanego sprzętu mogłaby też pozwolić na usprawnienie działania sieci czujnikowej – zwiększenie skutecznego zasięgu komunikacji lub zmniejszenie stopnia błędu w transmisjach na większych dystansach.

Bibliografia

- [1] LoRa Alliance, About LoRa Alliance®, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [2] Sigfox, What is Sigfox 0G Technology, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [3] SEMTECH, What are LoRa® and LoRaWAN®?, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [4] „IEEE Standard for Information technology— Local and metropolitan area networks— Specific requirements— Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs): Amendment 1: Add Alternate PHYs”, *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, s. 1–210, 2007.
- [5] Cloudflare, What is the OSI Model?, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [6] SEMTECH, AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, Wersja zarchiwizowana w dn. 2018-07-18 przez Internet Archive Wayback Machine z oryginału. Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [7] Vangelista, L., „Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation”, *IEEE Signal Processing Letters*, t. 24, nr. 12, s. 1818–1821, 2017.
- [8] Al Homssi, B., Dakic, K., Maselli, S., Wolf, H., Kandeepan, S. i Al-Hourani, A., „IoT Network Design Using Open-Source LoRa Coverage Emulator”, *IEEE Access*, t. 9, s. 53 636–53 646, 2021, Artykuł udostępniony pod licencją Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).
- [9] LoRa Alliance, RP002-1.0.4 Regional Parameters, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [10] Reynders, B. i Pollin, S., „Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication”, w *2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*, 2016, s. 1–5.
- [11] The Things Network, LoRaWAN® Device Classes, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [12] Elbsir, H. E., Kassab, M., Bhiri, S. i Bedoui, M. H., „Evaluation of LoRaWAN Class B efficiency for downlink traffic”, w *2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2020, s. 105–110.
- [13] PlatformIO Documentation, Development Platforms, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [14] Snyk, Open source licenses: What is a software license?, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [15] Doxygen manual, Documenting the code, Dostęp uzyskano: 2023-06.

Bibliografia

- [16] STM32duino repository, Arduino core for STM32 MCUs, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [17] cppreference.com, Fixed Width Integer Types, Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [18] National Instruments, What is I/Q Data?, Wersja zarchiwizowana w dn.2020-04-17 przez Internet Archive Wayback Machine z oryginału. Dostęp uzyskano: 2023-06.
- [19] Hill, K., Gagneja, K. K. i Singh, N., „LoRa PHY Range Tests and Software Decoding - Physical Layer Security”, w *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2019, s. 805–810.
- [20] STMicroelectronics, STM32 Nucleo-64 development board with STM32L152RE MCU product overview, Dostęp uzyskano: 2023-06.

Spis rysunków

1	Schemat siedmiowarstwowego modelu OSI	12
2	Schematy sieci w topologiach mesh oraz gwiazdowej	13
3	Przebieg dwóch symboli typu upchirp w modulacji LoRa, ilustracja wykorzystana zgodnie z licencją publikacji [8]	15
4	Schemat stosu technologicznego sieci wykorzystujących LoRaWAN	16
5	Schemat architektury sieci LoRaWAN	17
6	Tworzenie nowego projektu wykorzystując do tego PlatformIO Core (CLI)	20
7	Przykładowe wywołanie komendy pio run, tutaj do komplikacji projektu	22
8	Wyniki wyszukiwania bibliotek powiązanych z hasłem „LoRa”	23
9	Przykład wykorzystania komendy do instalacji bibliotek w projekcie	23
10	Schemat zbudowanej sieci, z oznaczonymi elementami komunikacji	27
11	Schemat blokowy części setup() oprogramowania modułów sieci LoRa, z podziałem na typ płytki	29
12	Schemat blokowy nieskończonej pętli oraz podprogramu zbierania danych zaimplementowanych dla modułu MASTER	32
13	Diagram blokowy pętli loop() zaimplementowanej dla modułów SLAVE	38
14	Schemat działania algorytmu dodawania nowej wartości do średniej kroczącej dla przykładowej tablicy 10 elementów, indeksu 2 oraz nowej wartości 38	41
15	Diagram blokowy sekcji setup() oprogramowania modułu serwera sieciowego	45
16	Wygląd strony internetowej zaimplementowanej do wizualizacji danych zbieranych z sieci	47
17	Schemat blokowy działania funkcji w nieskończonej pętli serwera sieciowego	48
18	Zrzut ekranu z monitora portu szeregowego podczas testowania komunikacji w sieci.	55
19	Logi o transmisji przez magistralę I2C z modułu MASTER.	57
20	Logi pokazujące poprawne odbieranie wartości z magistrali I2C przez moduł serwera sieciowego.	57
21	Zrzut ekranu pokazujący włączony mobilny hotspot.	58
22	Logi pokazujące poprawne połączenie z siecią Wi-Fi oraz uruchomienie serwera sieciowego.	58
23	Zrzut ekranu ze strony bez danych z sieci.	59

Spis rysunków

24	Zrzut ekranu ze strony po otrzymaniu danych przez moduł serwera sieciowego	59
25	Wykres słupkowy przedstawiający wyniki 1-godzinnego testu komunikacji sieci	63
26	Zrzut ekranu z programu pokazujący obserwowane transmisje	64
27	Widok na komunikację pełnej sieci, bez wystąpienia problemów z komunikacją	65
28	Widok na komunikację pełnej sieci, z widocznymi przerwami, gdy jeden z modułów nie odpowiedział na zapytanie	65
29	Widok na komunikację w sieci dwoma modułami SLAVE włączonymi, a jednym wyłączonym	66
30	Widok na komunikację w sieci z tylko jednym modułem SLAVE włączonymi	66
31	Widok spektrum częstotliwości, gdy żaden z modułów nie transmituje	67
32	Widok spektrum częstotliwości podczas transmisji modułu MASTER	68
33	Widok spektrum częstotliwości podczas transmisji modułów SLAVE	68
34	Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 2.5 s a 5.5 s	72
35	Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 3 s a 5.1 s	72
36	Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 3.4 s a 5 s	73
37	Spektrogram sygnałów z pierwszej próbki wraz ze zbliżeniem między 3.6 s a 4.6 s, widoczna jedna transmisja	73
38	Fragment drugiej próbki sygnału z oznaczonymi poszczególnymi elementami ramki LoRa	74
39	Fragment trzeciej próbki sygnału z oznaczonymi poszczególnymi elementami ramki LoRa	74
40	Mapa z oznaczonymi odległościami dla ustawienia SF7	76
41	Mapa z oznaczonymi odległościami dla ustawienia SF12	77
42	Fragment schematu płytka wykorzystanego modułu STM32 Nucleo-64. Napięcie VDD wyprowadzone jest bezpośrednio do zasilania mikrokontrolera	80

Spis tabel

1	Wyniki przeprowadzonego badania komunikacji w czasie 1 godziny.	62
2a	Wyniki pomiarów poboru prąd przez moduły MASTER, SLAVE 1 dla SF7.	81
2b	Wyniki pomiarów poboru prąd przez moduły SLAVE 2, SLAVE 3 dla SF7.	81
3a	Wyniki pomiarów poboru prąd przez moduły MASTER, SLAVE 1 dla SF12.	81
3b	Wyniki pomiarów poboru prąd przez moduły SLAVE 2, SLAVE 3 dla SF12.	81