

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 Informatyka Stosowana
w specjalności Inżynieria Oprogramowania

Nowe możliwości Bluetooth 5 w aplikacjach Internetu Rzeczy

inż. Krzysztof Paweł Kruk
numer albumu 301140

promotor
dr inż. Łukasz Makowski

WARSZAWA 2022

Nowe możliwości Bluetooth 5 w aplikacjach Internetu Rzeczy

Streszczenie

To jest streszczenie. To jest trochę za krótkie, jako że powinno zająć całą stronę.

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

 Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

 Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Słowa kluczowe: Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Mesh, Packet Error Rate

New Bluetooth 5 features in Internet of Things applications

Abstract

I am going to fill this abstract with some English text. I promise :)

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

 Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

 Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Keywords: Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Mesh, Packet Error Rate

Spis treści

1 Wstęp	9
2 Komunikacja radiowa bliskiego zasięgu	11
2.1 ZigBee	11
2.2 OpenThread	11
2.3 Bluetooth Low Energy	11
2.3.1 Porównanie przedstawionych standardów	11
3 Modele teoretyczne	13
3.1 Zużycie energii	13
3.1.1 Tryb ogłoszeniowy (*komentarz*: model zapożyczony z literatury)	13
3.1.2 Tryb połączenia (*komentarz*: model zapożyczony z literatury)	13
3.2 Packet Error Rate	13
3.2.1 Model zależności PER od odległości i ilości między-węzłów	13
3.2.2 Wpływ tła radiowego na model (*komentarz*: prezentacja hipotez)	13
4 Doświadczalna weryfikacja modeli	15
4.1 Przygotowanie eksperymentu	16
4.1.1 Sprzęt i oprzyrządowanie	16
4.1.2 Narzędzia i elementy dodatkowe	18
4.1.3 Oprogramowanie mikrokontrolera	21
4.1.4 Oprogramowanie PC	21
4.2 Zużycie energii	21
4.2.1 Metodologia badania	22
4.2.2 BT Low Energy - Usługa Heart Rate	24
4.2.3 BLE Mesh - Model Generic OnOff	28
4.3 Packet Error Rate	31
4.3.1 Metodologia badania	31
4.3.2 Zależność PER względem częstości zapytań	36
4.3.3 Zależność PER względem odległości między węzłami	40

5 Podsumowanie	45
Bibliografia	47
Wykaz skrótów i symboli	49
Spis rysunków	51
Spis tablic	53
Spis załączników	55

Rozdział 1

Wstęp

Wstęp TBD

Rozdział 2

Komunikacja radiowa bliskiego zasięgu

2.1 ZigBee

2.2 OpenThread

2.3 Bluetooth Low Energy

2.3.1 Porównanie przedstawionych standardów

Rozdział 3

Modele teoretyczne

Możliwe, iż ten rozdział nie zostanie rozwinięty

3.1 Zużycie energii

[14] jako podstawa dla części teoretycznej. Spróbować symulacji zużycia energii z użyciem PCC w Cube'ie. Dodatkowo, oprzeć się na literaturze i artykułach naukowych, które poruszają tę kwestię - przynajmniej jeden.

3.1.1 Tryb ogłoszeniowy (*komentarz*: model zapożyczony z literatury)

3.1.2 Tryb połączenia (*komentarz*: model zapożyczony z literatury)

3.2 Packet Error Rate

3.2.1 Model zależności PER od odległości i ilości między-węzłów

3.2.2 Wpływ tła radiowego na model (*komentarz*: prezentacja hipotez)

Rozdział 4

Doświadczalna weryfikacja modeli

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

4.1 Przygotowanie eksperymentu

Eksperimentalna część pracy bezsprzecznie wymaga przygotowania odpowiedniego zestawu sprzętu i narzędzi. Konieczne jest wybranie odpowiedniej platformy sprzętowej wspierającej komunikację bezprzewodową Bluetooth Low Energy w wersji minimum 5.0. Niezbędne jest również oprzyrządowanie pomiarowe, które umożliwia pomiar natężeń prądu poniżej 1mA, ze względu na energooszczędność urządzeń Bluetooth Low Energy (BLE).

Badania zużycia energii wymagają aparatury, która w pełni zarejestruje minima i maksima poboru prądu przy niskich błędach pomiarowych.

Eksperiment Packet Error Rate (PER) wymaga przygotowania wielu zestawów uruchomieniowych obsługujących komunikację BLE w konfiguracji Mesh. Dodatkowo, wymagane jest stworzenie dedykowanego oprogramowania na mikrokontroler jak i komputer osobisty. Jest to niezbędne w celu kontroli przepływu doświadczenia jak i akwizycji danych.

Niniejszy rozdział omawia zakres przygotowań do przeprowadzenia właściwych eksperymentów.

4.1.1 Sprzęt i oprzyrządowanie

Próby doświadczalne oparto o produkty firmy ST. Decyzja podjęta została w oparciu o osobiste preferencje autora pracy.

P-NUCLEO-WB55

Badania Bluetooth Low Energy wymagały wyboru platformy, która umożliwia eksperimentalną weryfikację wybranych celów badawczych. Ostatecznie, zdecydowano się na wykorzystanie mikrokontrolera *STM32WB55RG*. W celu zapewnienia powtarzalności eksperymentu jak i ze względu na ograniczenia czasowe, docelową platformą badawczą stał się zestaw uruchomieniowy *P-NUCLEO-WB55* [3].



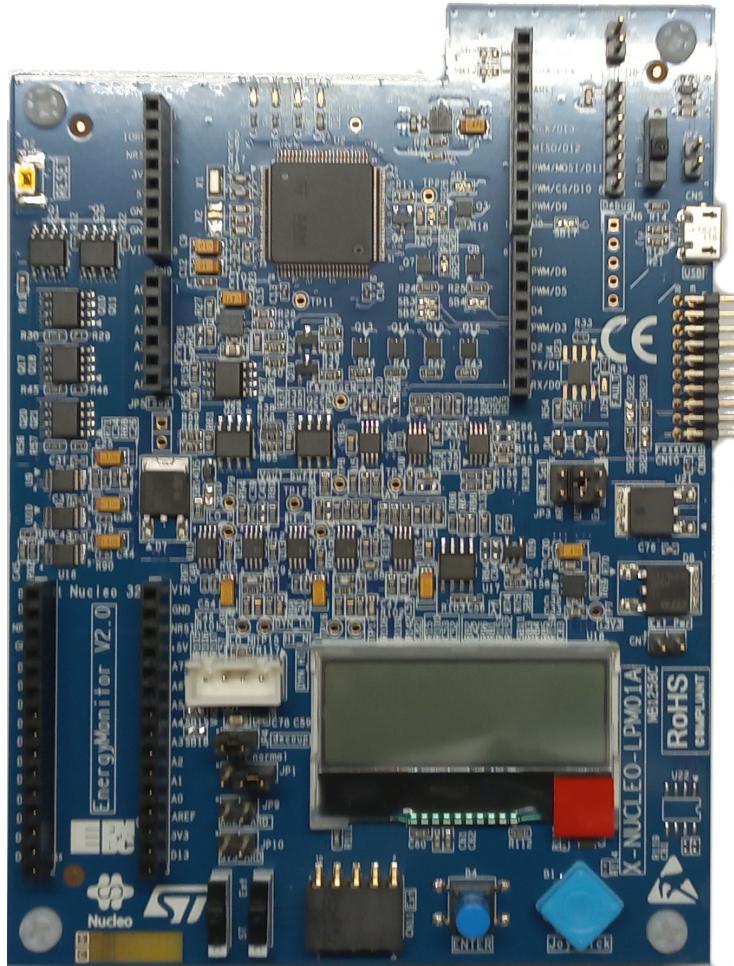
Rysunek 1. Zestaw uruchomieniowy P-NUCLEO-WB55

Zestaw ten zgodny jest ze specyfikacją Bluetooth Low Energy v5.0. Dodatkowo, wspiera on inne standardy komunikacji, m.in. Zigbee [11]. Ten fakt może zostać wykorzystany w celu bezpośredniego porównania różnych stosów komunikacji bezprzewodowej. Nie jest to jednak celem niniejszej pracy, a stanowi możliwość jej dalszego rozwinięcia.

X-NUCLEO-LPM01A

Płytkę rozszerzeń X-NUCLEO-LPM01A spełnia wszelkie oczekiwania dotyczące możliwości pomiarowych stawianych przed projektem. Wg oficjalnej dokumentacji [15], układ oferuje:

- Programowalne źródło napięciowe 1,8V do 3,3V
- Dynamiczne próbkowanie w zakresie od 100nA 50mA przy maksymalnej częstotliwości 100kHz z 2%-ową dokładnością pomiarów
- Pomiar statyczny natężenia prądu do 200mA
- Integracja z aplikacją do dedykowaną aplikacją akwizycji danych [8]



Rysunek 2. Zestaw pomiarowy X-NUCLEO-LPM01A

Moduł ten nie ogranicza się tylko do wykorzystywania autorskich złącz firmy ST. Schemat wyprowadzeń pinów umożliwia wykorzystanie popularnych platform takich jak Arduino¹. Co istotniejsze, wybrana płytka umożliwia zasilanie dowolnego układu dzięki wyprowadzeniu źródła napięciowego za pośrednictwem pinów (za dokumentacją: złącze CN14). Ten fakt został wykorzystany w badaniach,

¹<https://www.arduino.cc/>

pozwalać uniknąć kłopotliwej konfiguracji P-NUCLEO-WB55 wymagającej tworzenia dodatkowych ścieżek lutowanych.

Dodatkową cechą tego modułu jest akwizycja danych z użyciem komputera osobistego. Dzięki dedykowanej aplikacji, dostarczanej wraz z modułem, możliwa jest akwizycja danych w czasie rzeczywistym przy wybranych częstotliwościach próbkowania. Zebrane w ten sposób dane służą dalszym analizom, co zostało wykorzystane w niniejszej pracy.

Narzędzia i firmware firmy ST

Firma ST wraz z zestawem uruchomieniowym udostępnia pełne zintegrowane środowisko programistyczne oraz niezbędne biblioteki i certyfikowany firmware:

- **STM32CubeIDE** [7] - multiplatformowe zintegrowane środowisko programistyczne dostarczane przez ST bazujące na otwartoźródłowym środowisku *Eclipse*².
- **STM32CubeProgrammer** [9] - narzędzie umożliwiające wykonywanie operacji odczytu, zapisu i weryfikacji skompilowanego oprogramowania produktów STM32.
- **STM32CubeMonitor-Power** [8] - oprogramowanie służące akwizycji danych o zużyciu energii m.in. w zestawie X-NUCLEO-LPM01A Rysunek: 2.
- **Firmware STM32CubeWB** [10] - zestaw bibliotek, narzędzi oraz przykładów przeznaczonych dla mikrokontrolerów rodziny STM32WB. W skład tego repozytorium wchodzą zależności takie jak: skompilowany, zamknięty firmware ko-processora dla różnych stosów połączeń bezprzewodowych; przykłady programów wykorzystujące biblioteki HAL jak i również bezpośrednio rejestrów; przykłady BLE; przykłady BLE Mesh.

4.1.2 Narzędzia i elementy dodatkowe

Zasilanie

Próby terenowe wymagają odrębnego, właściwego zasilania. Wybrane zestawy uruchomieniowe wykorzystują ustandaryzowane złącze komunikacyjne USB. Złącze to oprócz komunikacji oferuje zasilanie linią +5V. Przeprowadzając właściwe eksperymenty wykorzystano komercyjnie dostępne banki energii tzw. powerbanki. Są to akumulatory litowo-jonowe lub litowo-polimerowe z wbudowanym systemem zarządzania baterią³ i właściwymi przetwornicami impulsowymi w celu zapewnienia odpowiedniego napięcia zasilania.

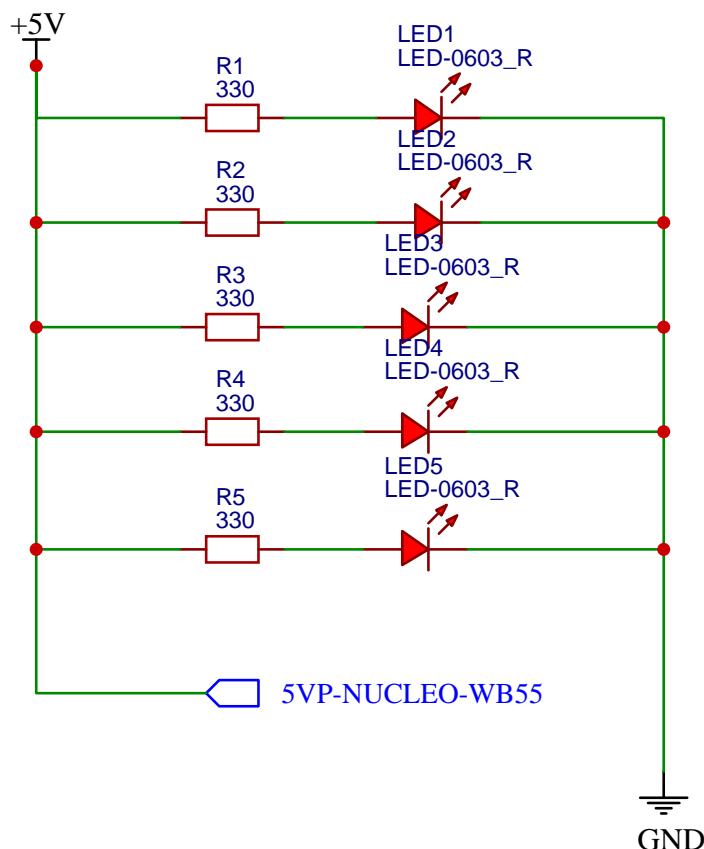
Elektronika wbudowana w magazyny energii automatycznie wyłącza zasilanie w przypadku braku podłączonego urządzenia lub gdy dane urządzenie pobiera marginalnie niskie wartości prądu. Służy to ochronie cennego i delikatnego akumulatora. Jest to cecha korzystna z punktu widzenia konsumenta kupującego powerbank w celu szybkiego ładowania urządzeń elektronicznych. Niestety, zaleta ta staje się wadą w przypadku przeprowadzanych doświadczeń. Podłączając moduł P-NUCLEO-WB55,

²<https://www.eclipse.org/ide/>

³Battery Management System (BMS) - ang. Battery Management System

urządzenie po pewnym okresie działania wyłącza się na skutek uruchomionych zabezpieczeń w źródle energii.

W celu skonstruowano trywialne urządzenie, które wlutowane równolegle w linię zasilania 5V, konsumuje ok. 100mA prądu: $0,5W = 5V \cdot 0,02A \cdot 5[\text{diod}]$. Doświadczalnie stwierdzono, że tak włączony odbiornik energii umożliwia stabilne działanie włączonego do sieci modułu STM32. Schemat zaprezentowano na Rysunku 3



Rysunek 3. Odbiornik energii

Obudowa - druk 3D

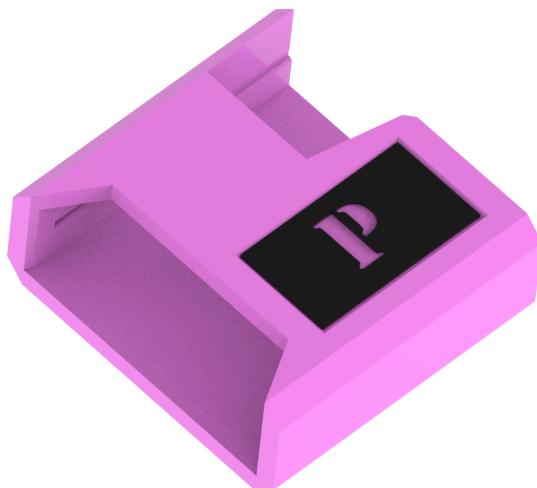
Kolejnym elementem niezbędnym w celu przeprowadzenia eksperymentów terenowych jest zapewnienie ochrony mechanicznej wybranych zestawów uruchomieniowych. Podczas prób elementy mogą zostać fizycznie uszkodzone poprzez m.in. wyłamanie fragmentu Printed Circuit Board (PCB) (w tym anteny), uszkodzenie pinów etc.

Wykorzystując techniki projektowania wspomaganego komputerowo⁴, zaprojektowano autorską obudowę. Głównym celem projektowym było zapewnienie minimalnej ochrony mechanicznej, jed-

⁴Computer-aided Design (CAD) - ang. *Computer-aided Design*

Rozdział 4. Doświadczalna weryfikacja modeli

nocześnie redukując możliwy wpływ materiału na tłumienie sygnału. Elementy interfejsu: przyciski i antena, zostały celowo wyeksponowane. Rzut izometryczny przedstawiony został na Rysunku 4.



Rysunek 4. Model obudowy dla zestawu P-NUCLEO-WB55

Obudowa wykonana została z materiału Polylactic Acid (PLA)⁵ techniką druku 3D Fused Deposition Modeling (FDM)⁶/Fused Filament Fabrication (FFF)⁷. Jednobryłowa konstrukcja podyktowana została chęcią uproszczenia wydruku, kosztem zwiększych trudności doboru tolerancji dla umieszczanych wewnętrz płytka PCB. Obudowa przewiduje wsuwanie modułu Nucleo do wewnętrz, zapewniając jednoczesne pewne jego mocowanie.

Dobór koloru wydruku również nie był przypadkowy. Przewidując potencjalne lokalizacje przeprowadzanych doświadczeń, wybrano kolor możliwie jaskrawy. Podstawowym założeniem było ułatwienie dostrzeżenia obudowy, a wraz z obudową również zestawu uruchomieniowego, pośród flory leśnej czy terenów zurbanizowanych. Ostateczne wykonanie obudów zaprezentowano na Rysunku 5.



Rysunek 5. Obudowa zestawu uruchomieniowego Nucleo wykonana w technologii druku 3D - realizacja

⁵PLA - ang. *Polylactic acid*, polilaktyd

⁶FDM - ang. *Fused Deposition Modeling*

⁷FFF - *Fused Filament Fabrication*

4.1.3 Oprogramowanie mikrokontrolera

```

1 MOBLE_RESULT Appli_Generic_OnOff_Set(Generic_OnOffStatus_t*
2     pGeneric_OnOffParam,
3                         MOBLEUINT8 OptionalValid,
4                         MOBLEUINT16 dstPeer,
5                         MOBLEUINT8 elementIndex)
6 {
7     /* LED control only for main element */
8     if(elementIndex == GENERIC_SERVER_MAIN_ELEMENT_INDEX)
9     {
10        // [...]
11        if(AppliOnOffSet[elementIndex].Present_OnOffValue == AppliOnOffSet
12            [elementIndex].TargetValue)
13        {
14            if (dstPeer != 0xc000) {
15                increment_generic_onoff_counter_packet_error_rate_experiment(
16                    AppliOnOffSet[elementIndex].Present_OnOffValue, dstPeer);
17            }
18            if(AppliOnOffSet[elementIndex].Present_OnOffValue > 0)
19            {
20                BSP_LED_On(LED_BLUE);
21            }
22            else
23            {
24                BSP_LED_Off(LED_BLUE);
25            }
26        }
27    }
28    // [...]

```

Listing 1. Testowy kod C

4.1.4 Oprogramowanie PC

4.2 Zużycie energii

Celem niniejszego podrozdziału jest omówienie empirycznej weryfikacji zużycia energii przez wybrany zestaw uruchomieniowy BLE.

Zaprezentowanie zostanie metodologią pomiaru oraz sposób połączenia układu pomiarowego. Omówione zostaną parametry próbkowania i długość trwania pojedynczej sesji badawczej. Ostatecznie, przedstawia się wzór i sposób przeprowadzonych obliczeń, które ostatecznie zapewniają oczekiwane wyniki.

Ostatnim, aczkolwiek najistotniejszym elementem poruszonym przez podrozdział, jest prezentacja wyników. Pogrupowane są one na dwie kategorie: BLE Heart Rate i BLE Mesh. Każda z nich

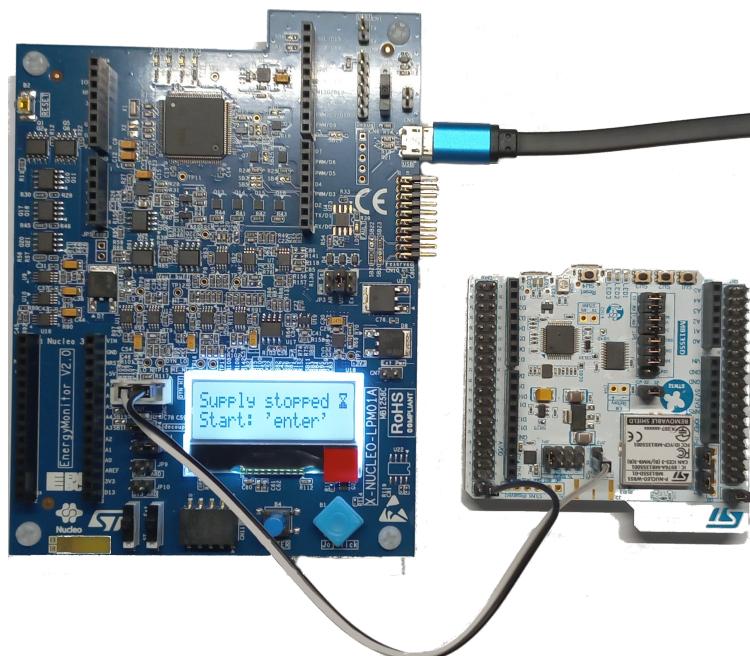
przedstawia zebrane empirycznie dane, wskazując na właściwe tryby działania i całkowite zużycie energii.

4.2.1 Metodologia badania

Podstawą badania zużycia energii jest pomiar wartości pobieranego prądu przez zestaw uruchomieniowy P-NUCLEO-WB55 w czasie. Posiadając dane wymienione dane, na podstawie oczywistych zależności fizycznych wyznacza się parametry jak całkowita wykorzystana energia podczas badania, przedstawiona w przystępnej postaci parametru mocy.

Pomiary wartości chwilowego poboru prądu oparto o moduł opisany w punkcie 4.1.1. Źródłem energii dla płytki pomiarowej jest komputer klasy PC, a precyzyjniej udostępniany port USB. Wykorzystując również ten protokół następuje transmisja danych poprzez komunikację szeregową UART, umożliwiając akwizycję danych.

Połączenie z zestawem uruchomieniowym oparto o konektor CN14 udostępniający piny: PIN1 - masa GND, PIN3 - VCC 3.3V [15]. Wyrowadzone przewody połączono następnie z P-NUCLEO-WB55 poprzez konektor JP2, wcześniej pozbawiony zawleczki. Jest to metoda rekomendowana dla pomiaru prądu opisana w dokumentacji zestawu [12]⁸. Porty kompatybilne z Arduino/ST Morpho mogłyby stanowić równorzędny sposóbłączenia zestawu uruchomieniowego do obwodu płytki pomiarowej. Autorska analiza dokumentacji sugeruje jednak, iż opcja ta nie jest wspierana. Wymagane byłoby lutowanie dodatkowego połączenia w (punkcie SB27), by móc wykorzystać zasilanie napięciem 3.3V.



Rysunek 6. Podłączony zestaw pomiarowy

⁸Rozdział 7.12 Current measurement

Celem akwizycji danych wybrano dostarczane przez producenta oprogramowanie *STM32CubeMonitor-Power*. Pojedyncza sesja pomiarowa trwająca 100 sekund zapewnia niezbędne dane. Są one następnie odpowiednio przetwarzane poprzez odcięcie wartości zebranych w ostatnich sekundach. Związane to było ze sposobem działania mikrokontrolera, który po 60 sekundach przechodzi w stan zwiększonej oszczędności energii. Stąd, by rozróżnić różne tryby pracy BLE, zdecydowano o odcięciu połowy okresu pomiarowego, zapewniając jednolite wartości względem trybów zużycia energii w 50 sekundowym oknie.



Rysunek 7. Przykładowa sesja pomiarowa dla BLE Mesh - sieć w trybie nasłuchującym

Tak zebrane dane następnie przetworzono uzyskując wartości energii i średniej mocy użytej przez układ. Wykorzystuje się w celu oczywistą zależność fizyczną zaprezentowaną wzorem 1[6].

$$E_{\text{całkowita}} = U \cdot \int_{t=0[s]}^{t=50[s]} di \, dt \quad (1)$$

$$P = \frac{E_{\text{całkowita}}}{t} \quad (2)$$

gdzie:

$E_{\text{całkowita}}[J]$ - wykorzystana energia podczas 50s sekundowej sesji rejestracji danych

$P[W]$ - moczużyta podczas 50s sekundowej sesji rejestracji danych

$U[V]$ - napięcie zasilania mikrokontrolera - 3.3V - stała

$di[A]$ - prąd w danej chwili

$dt[s]$ - podstawa czasowa całkowania, 0.01s/interwał (100Hz) - stała

Zebrane dane w postaci wartości chwilowych pobieranego przez mikrokontroler prądu względem czasu przetworzono z użyciem metod numerycznych. W celu wyliczenia łącznej wykorzystanej energii, a tym samym mocy, stosuje się zależność 1. Uwzględniając fakt działania w domenie dyskretnej, wykorzystano kompozytową metodę całkowania Simpsona [5]. Podstawą dla całkowania są wartości zebrane w równoodległych odstępach. Dokonując akwizycji danych dobrano częstotliwość próbkowania jako 100Hz. Każda kolejna wartość charakteryzuje się więc 10 milisekundową różnicą w podstawie czasu. Uwzględniając ten fakt, wyliczenie wartości wykorzystanej energii jak i mocy staje się trywialne.

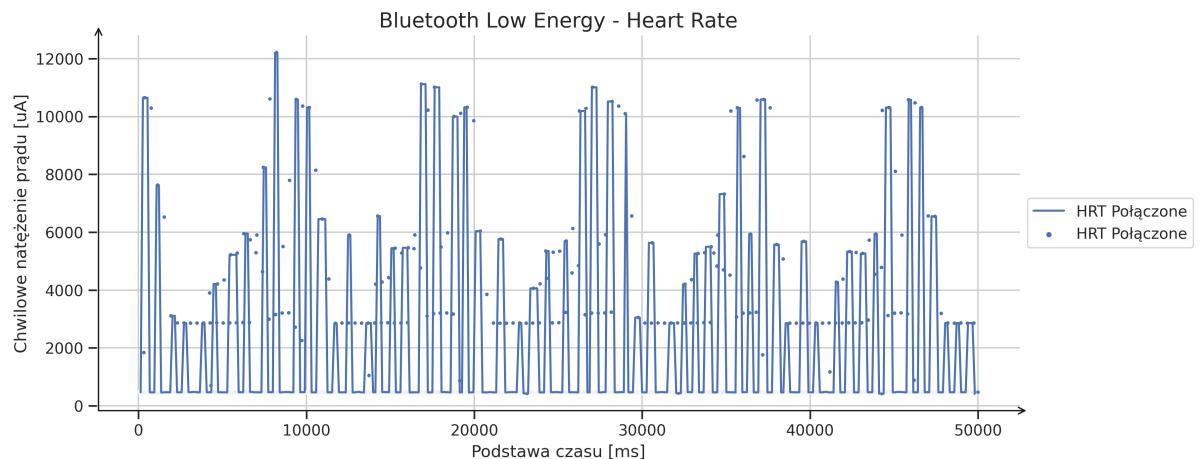
4.2.2 BT Low Energy - Usługa Heart Rate

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer



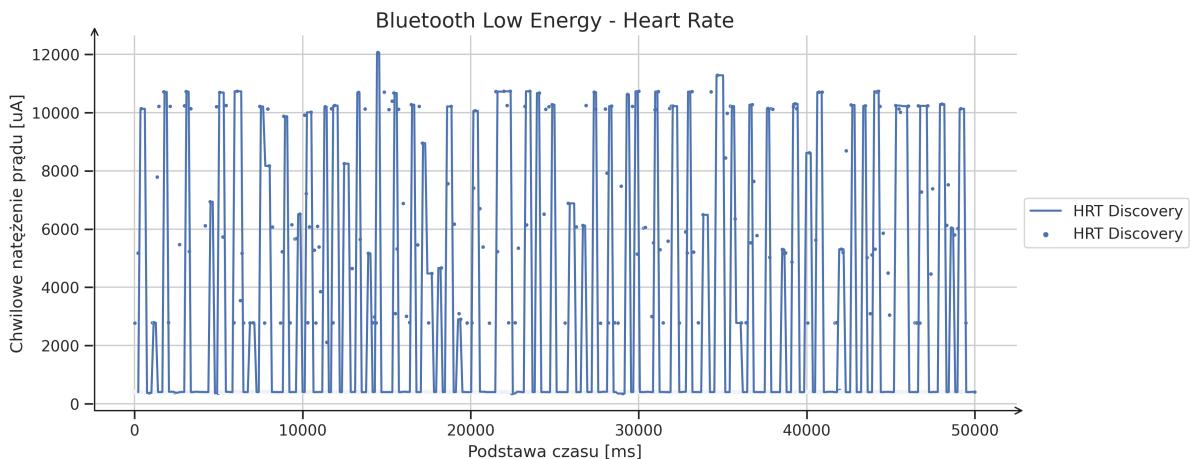
Rysunek 8. Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate - Usługa Połączona

id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus



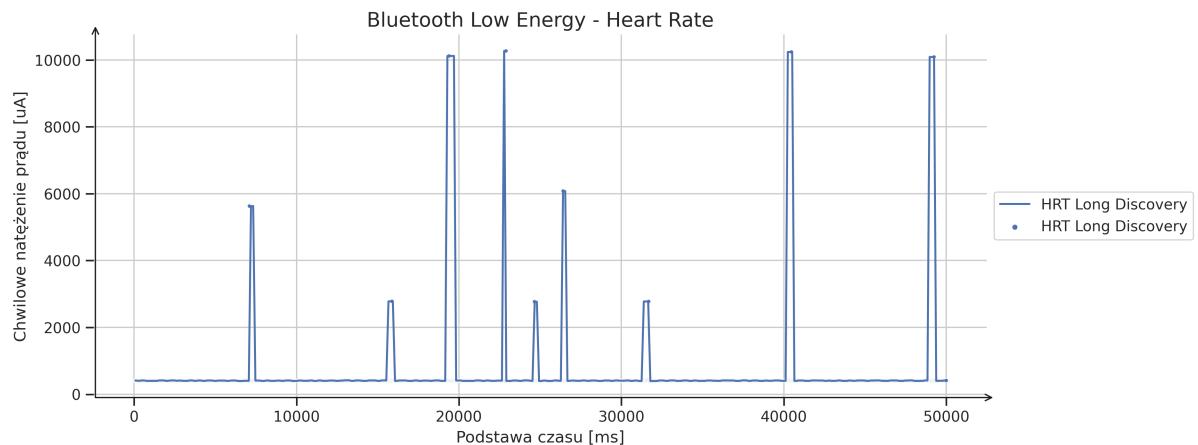
Rysunek 9. Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate - Wyszukiwanie

sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

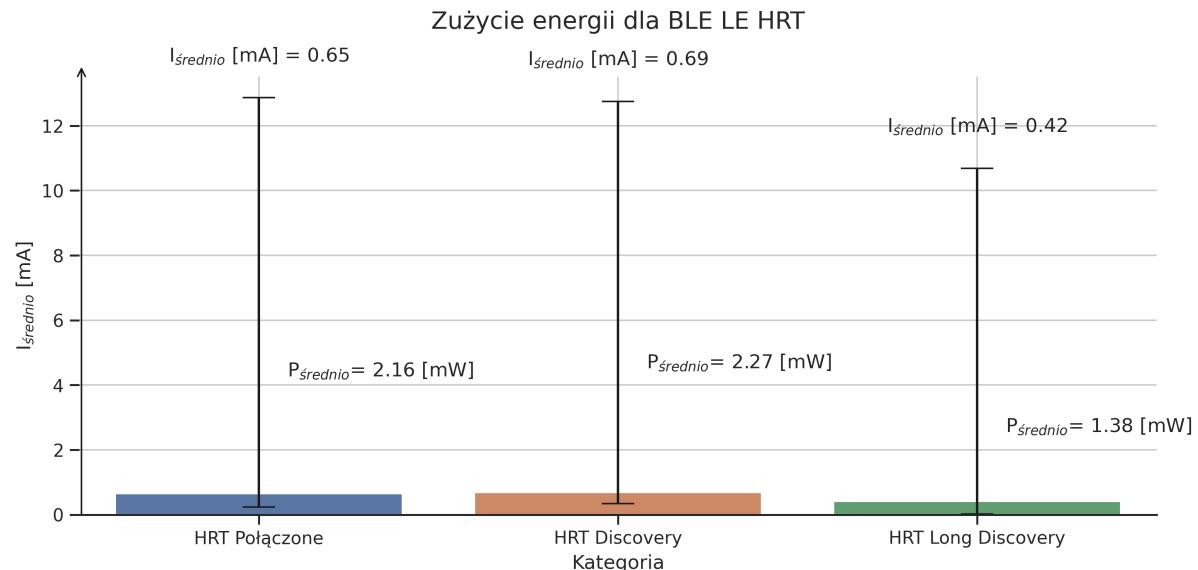
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo



Rysunek 10. Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate - Wyszukiwanie, urządzenie w gotowości

ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur



Rysunek 11. Zestawienie zużycia prądu dla usługi Heart Rate w zależności od trybu działania

adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

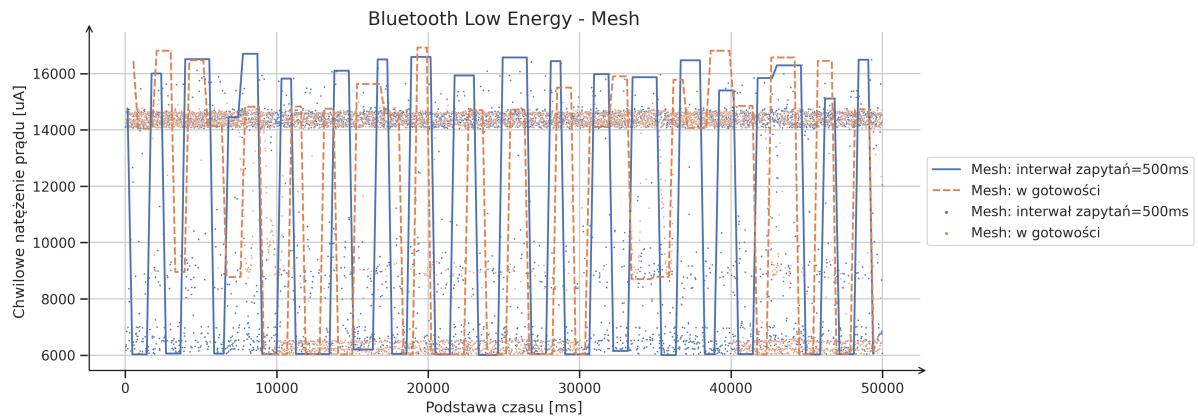
Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

4.2.3 BLE Mesh - Model Generic OnOff

Pomiary dla BLE Mesh uwzględniające dwa tryby działania: sieć w oczekująca na komunikaty oraz podczas działania aktywnego korzystania z Modelu Generic OnOff.

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

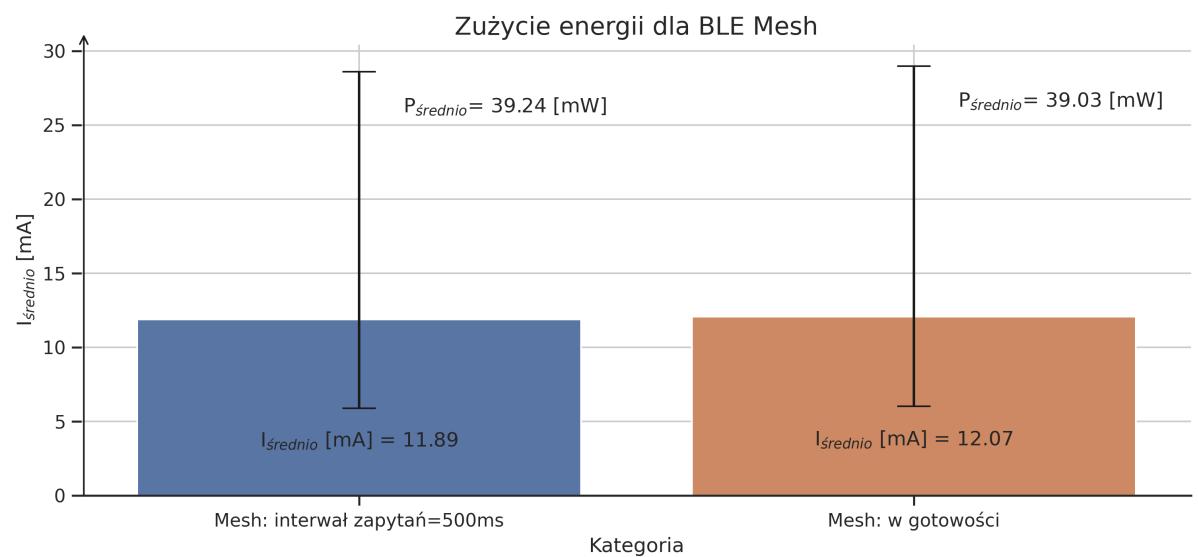
 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan



Rysunek 12. Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE Mesh i modelu Generic OnOff

bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

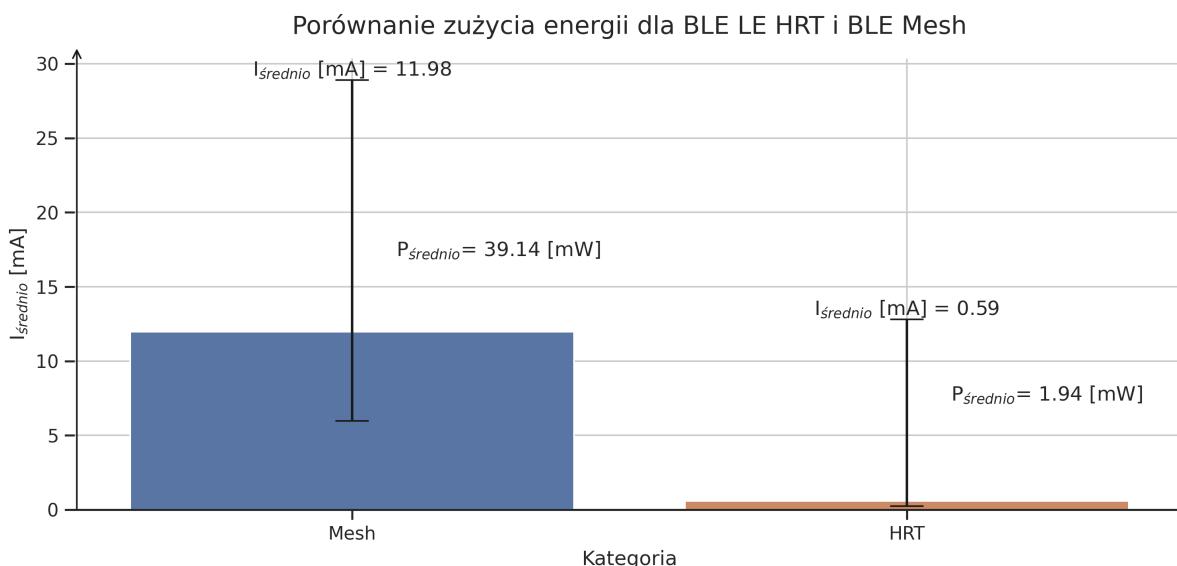


Rysunek 13. Zestawienie zużycia prądu dla BLE Mesh w zależności od trybu działania

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

 Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.



Rysunek 14. Porównanie średniego zużycia energii pomiędzy BT Low Energy HRT i BLE Mesh

4.3 Packet Error Rate

Celem niniejszego podrozdziału jest omówienie przeprowadzonego eksperymentu PER. Omówiona zostanie metodologia badań. Zdefiniowany zostanie termin *pakietu*, który stanowi podstawę dla doświadczenia.

Wychodząc z definicji, prezentuje się właściwy wzór matematyczny, definiujący badany problem. Równanie stanowi podstawę dla eksperimentu. Jego zrozumienie pozwoliło zaprojektowanie właściwego doświadczenia jak i przygotowanie kompletnego stosu technologicznego niezbędnego do jego przeprowadzenia.

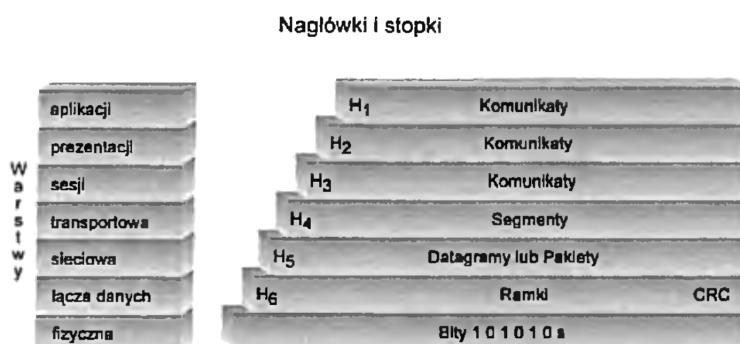
Ostatecznym efektem przeprowadzonego eksperymentu jest przedstawienie zebranych danych pod postacią wykresów. Prezentują one badane cechy zmienne zaprezentowane w sekcji opisu metodologii. Końcowym krokiem jest wyciągnięcie wniosków z zebranych danych.

4.3.1 Metodologia badania

Definicja pakietu

Przed przystąpieniem do badań należy precyzyjnie zdefiniować wykorzystywana terminologię.

Pakietem nazywamy pojedynczą porcję danych przetwarzaną na poziomie warstwy sieciowej modelu ISO OSI [4]. Warstwa ta umożliwia routing, adresowanie logiczne oraz przetwarzanie i dostarczanie pakietów.

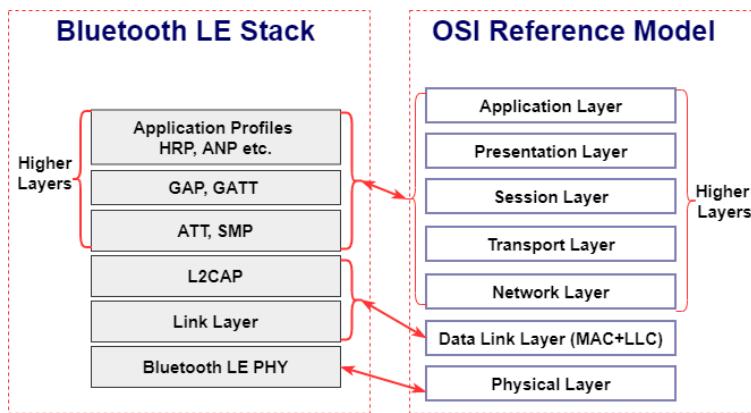


Rysunek 15. Model ISO OSI wraz i odpowiadające mu nazwy porcji danych. Źródło: [4]

BLE wprowadza własną nomenklaturę dla poszczególnych warstw sieciowych. Jest to o tyle istotne, iż standard ten nie zapewnia odpowiadających modelowi ISO OSI warstw jeden-do-jednego. Część z tych warstw jest agregowanych w zespół protokołów wyższych warstw - Rysunek 16.

Bazując na definicji modelu OSI oraz stosie BLE, pakietem można nazwać wiadomości będące możliwe blisko warstwy *Link Layer (LL)*. Podobną definicję prezentuje dokumentacja ST: „Pakiet to pojedyncza oznaczona wiadomość wysłana przez jedno i odebraną przez co najmniej jedno urządzenie.”⁹ [13]

⁹Tłumaczenie własne



Rysunek 16. Zestawienie stosu BLE i modelu ISO OSI. Źródło: [1]

BLE Mesh dodatkowo wprowadza własne dodatkowe warstwy komunikacji, biorąc za podstawę stos BLE [2]. Każda z wymienionych warstw jest hermetyzowana za pośrednictwem dostarczanego przez producenta Application Programming Interface (API). Uwzględniając zamknięcie middleware'u i dwu-procesorową architekturę mikrokontrolera STM32WB55, oznacza to brak możliwości bezpośredniego nasłuchiwania pakietów w warstwie LL.

Uwzględniając powyższe czynniki, *pakietem* dla BLE Mesh nazywana będzie wiadomość najbliższa warstwie LL. W przypadku stworzonego oprogramowania, oznacza to odbiór komunikatu odebranego jako zdarzenie zarejestrowane przez koprocesor Cortex-M0, będący integralną częścią mikrokontrolera STM32WB55 odpowiadający za obsługę radia.

Definicja Packet Error Rate

Posiadając definicję pakietu, PER możliwe staje się zdefiniowanie wzoru, a zarazem znaczenia głównego celu badań.

PER jest miarą ilości błędnych pakietów w proporcji do wszystkich wysłanych pakietów, zgodnie ze wzorem:

$$PER = \frac{s - r}{s} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

s is ilość wysłanych pakietów

r is ilość odebranych pakietów

s-r - ilość niepoprawnych/błędnych pakietów

Powyższy wzór stanowi podstawę eksperymentu pozwalającego wyznaczyć jakość łącza w zależności od wybranych parametrów zmiennych.

Procedura badawcza

Procedurę badawczą skonstruowano bazując na wzorze 3. Niezbędnym mechanizmem, o które oparte jest doświadczenie, to zliczanie ilości pakietów. Zliczanie dotyczy zarówno węzła bliższego jak i również węzła dalszego odbierającego wysypane komunikaty. W przypadku drugiego elementu opracowano mechanizm odczytywania licznika zmiany badanej wartości, patrz: 4.1.3.

Całość doświadczenia przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania PC - 4.1.4. Oprogramowanie zapewnia dwie główne funkcjonalności: wysyłanie komunikatów przy określonej częstotliwości przez zadaną ilość czasu; odczytywanie wartości licznika węzła dalszego.

Wysyłanym komunikatem jest polecenie zmiany stanu modelu *Generic OnOff*. Wybrano ten standardowy element stosu BLE Mesh ze względu na jego uniwersalność. Nie ogranicza się on jedynie do wybranej platformy czy właściwościowego modelu. Model ten jest zdefiniowany przez Bluetooth SIG przez co jest niezależny od producenta. Czyni to eksperiment powtarzalny, niezależnie od mikrokontrolera.

Odczytywanie stanu licznika wymagało wykorzystania autorskiego rozwiązania oparte o właściwy model Mesh ST. Nie wpływa to jednak na ostateczny rezultat badań, gdyż stworzone polecenia wykorzystywane jest tylko do odczytu i wysłania wartości licznika węzła dalszego do węzła bliższego i komputera osobistego kontrolującego przepływ doświadczenia. Z każdą kolejną próbą badania PER ten licznik jest automatycznie zerowany, przez co sesja zliczeń zawsze rozpoczyna się od zera.

Eksperyment wyznaczający PER oparto o następujące czynniki zmienne:

- środowisko: teren leśny, teren zurbanizowany
- interwał zapytań
- dystans pomiędzy węzłami
- ilość węzłów składających się na sieć Mesh

Wyznaczanie PER odbyło się w dwóch różnych środowiskach. Jednym z głównych hipotez jest znaczący wpływ środowiska na jakość transmisji danych. Czynniki takie jak temperatura, wilgotność, rodzaj gleby czy tło radiowe może mieć wpływ na komunikację pomiędzy węzłami. Założono, iż tło radiowe może mieć największy wpływ na transmisję danych. Stąd dobrano możliwie skrajne miejsca do badań oceniając to jako najistotniejszy czynnik:

- Kampinoski Park Narodowy (lokalizacja: parking Roztoka) - jako teren leśny oddalony od ośrodka miejskiego ze względu niewielkim tłem radiowym. Pogoda: pochmurnie, wilgotno, temperatura poniżej 20°C.
- Park Pola Mokotowskie - jako teren zurbanizowany charakteryzujący się bogatym tłem radiowym działającym w pasmach Industrial, Scientific, Medical (ISM). Pogoda: słonecznie, temperatura ok. 20°C.

Kolejnym badanym czynnikiem jest interwał zapytań. Parametr ten został wybrany ze względu na obserwowane problemy z komunikacją podczas etapu tworzenia oprogramowania. Parametry dobrano w takim stopniu, by ów problem ukazać. Obrano następujące interwały:

- 100ms



Rysunek 17. Fotografia miejsca badań w Kampinoskim Parku Narodowym



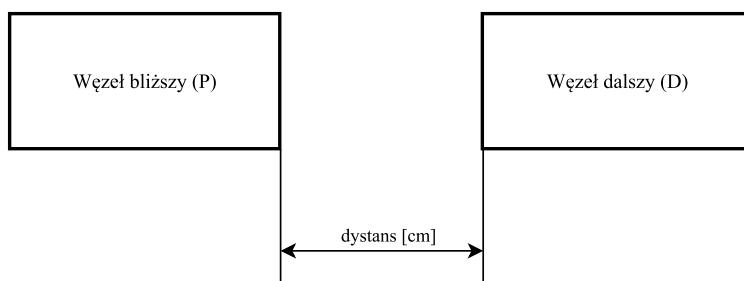
Rysunek 18. Fotografia miejsca badań na Polach Mokotowskich

- 500ms
- 800ms
- 1300ms

- 2100ms

Interesującym parametrem dla bezprzewodowej transmisji danych jest zasięg. Stąd też, jednym z badanych czynników jest określenie jakości PER w zależności od odległości - Rysunek 19.

- 1,5m
- 3,0m
- 5,0m
- 8,0m
- 13,0m
- 16,0m
- 21,0m



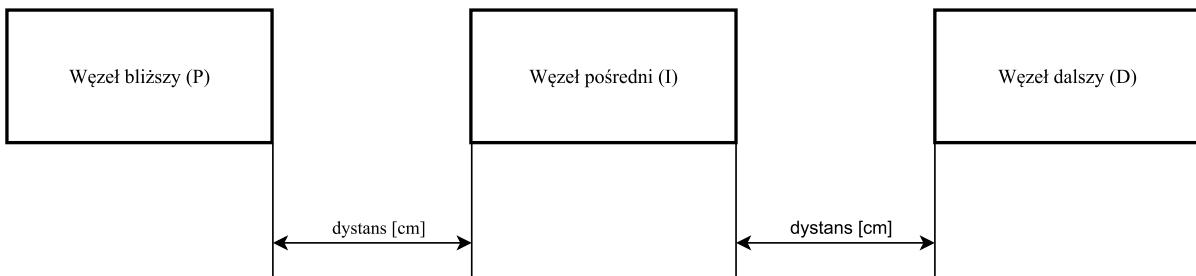
Rysunek 19. Dystans pomiędzy węzłami dla sieci dwóch mikrokontrolerów

Wyżej wymienione odległości stosowano również w przypadku kolejnego badanego parametru, tj. ilości węzłów składających się na sieć BLE. W celu łatwej identyfikacji węzłów, wprowadza się następujące nazewnictwo:

- węzeł bliższy (ang./łac. *proximal node/nodus proximalis*) - węzeł będący połączony bezpośrednio ze stacją akwizycji danych i kontroli przepływu eksperymentu.
- węzeł środkowy (ang./łac. *intermedial node/nodus [inter]medius*) - węzeł działający w trybie przekaźnika (terminologia Mesh: *Relay*). Węzeł ten nie uczestniczy bezpośrednio w badaniach tj. nie są z niego odczytywane jakiekolwiek dane.
- węzeł dalszy (ang./łac. *distal node/nodus distalis*) - węzeł zliczający ilość odebranych danych r , udostępniający jednocześnie usługę umożliwiającą odczyt tych wartości tak jak opisano to w podrozdziale 4.1.3.

Postanowiono o równoodległym rozstawieniu węzłów - Rysunek 20. Dla sieci 3 węzłów, maksymalna odległość dzieląca węzeł bliższy od węzła dalszego to 42m. Protokół badawczy zawiera informację tylko o odległości w rozumieniu równoodległego rozstawienia węzłów. Odległość pomiędzy elementami jest oczywistą operacją arytmetyczną.

Odległość pomiędzy węzłami mierzona jest z użyciem taśmy mierniczej z podziałką 1mm. Tolerancję pomiarów należy przyjąć jako najdłuższy wymiar zestawu uruchomieniowego P-NUCLEO-WB55 - 70mm [12]. Pomiar odbywał się na płasko, mierząc odległość pomiędzy leżącymi na glebie węzłami. Błędy pomiarowe wynikłe z ukształtowania terenu są prawdopodobne i wynikają z terenowego charakteru badań.



Rysunek 20. Dystans pomiędzy węzłami dla sieci trzech mikrokontrolerów

W celu zminimalizowania ryzyka pojawienia się losowych błędów o nieznanym pochodzeniu badanie powtarzano pięciokrotnie, w sposób następujący: dla wybranego środowiska, ilości węzłów i zadanej odległości pomiędzy węzłami, wykonaj 5 powtórzeń pomiarowych dla każdego z zadanych interwałów pomiarowych.

$$\exists e, \exists n, \exists d : PER_i = f(e, n, d), i = 1, \dots, 5 \quad (4)$$

gdzie:

e - środowisko

n - ilość węzłów

d - równoodległy dystans pomiędzy węzłami

i - ilość powtórzeń

PER - Packet Error Rate dla wybranego powtórzenia przy stałych parametrach e, n, d

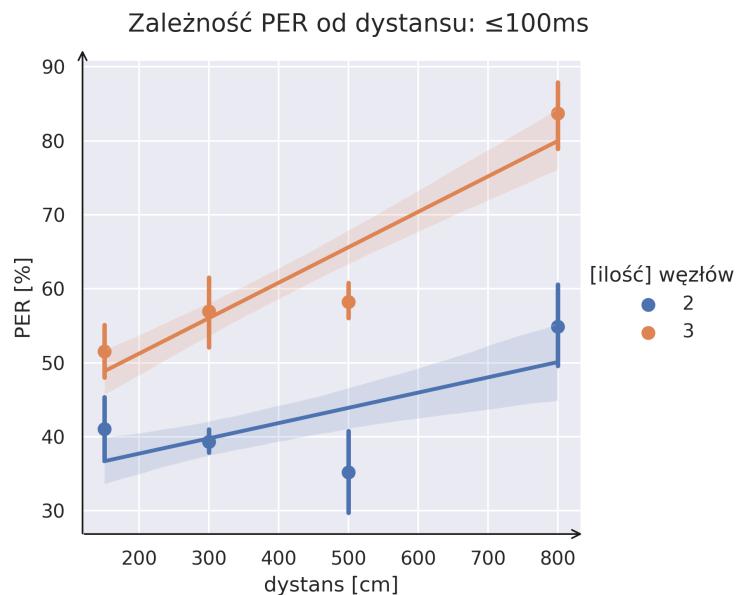
Wykorzystując tak zebrane dane, wyrysowano je na szeregu wykresów wyznaczając jednocześnie linie aproksymacyjne z użyciem modelu liniowego wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów. Odchylenia standardowe zaprezentowane są z użyciem ograniczonego tła otaczającego linię w tym samym kolorze o zmienionym parametrze nieprzezroczystości.

Parametry transmisji danych nie ulegały zmianie podczas przeprowadzanych doświadczeń. Poniższe wartości należy przyjąć za stałe:

- Szybkość transmisji: 2Mbps
- Moc transmisji danych: 0dBm

4.3.2 Zależność PER względem częstości zapytań

Pierwszą sprawdzaną hipotezą jest empiryczna weryfikacja czy częstość zapytań wpływa na PER. W tym celu wykreślono szereg wykresów dla wybranych interwałów czasowych. Pozostałe parametry traktowane są jako stałe.



Rysunek 21. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ dla różnych liczb węzłów

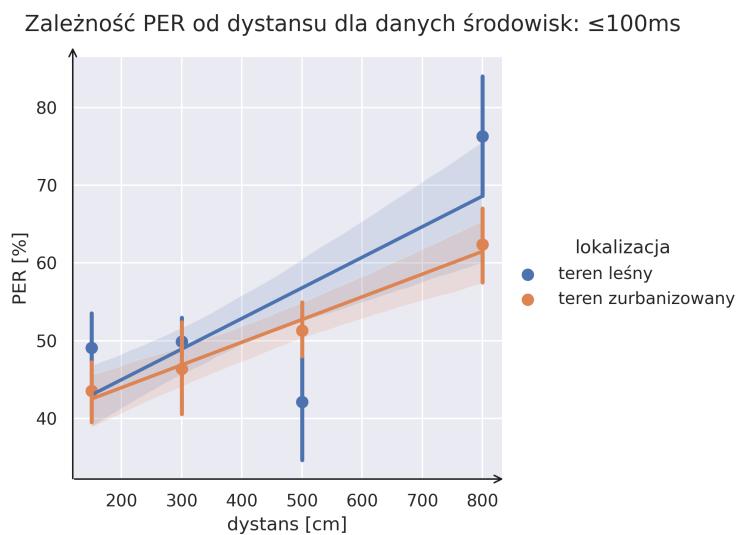
Rysunek 21 przedstawia zależność PER dla interwału 100 milisekund w zależności od odległości dla sieci złożonej z dwóch i trzech węzłów.

Niewątpliwą cechą ukazanych danych jest wysoka wartość PER już przy tak niewielkiej odległości jak 150 cm pomiędzy węzłami. Utrata 40-50% wysyłanych pakietów danych już na pierwszym dystansie pomiarowym może być spowodowana wieloma czynnikami. Przypuszczalnie, wpływ na taki rezultat wywodzi się z czynników środowiskowych lub ze sposobu wykonywania eksperymentu. Niewykluczone są również ograniczenia sprzętowe.

Wraz ze wzrostem odległości pomiędzy węzłami PER wzrasta pomimo wysokiej wartości początkowej. Jest to oczekiwana zależność i zgodna z wiedzą techniczną.

Prowadząc dalszą analizę zależności PER od częstotliwości zapytań, sprawdzono wpływ środowiska na jakość transmisji danych. Rysunek 22 przedstawia wybraną zależność. Rozróżnienie na ilość węzłów nie zostało tutaj uwzględnione. Pomiary przeprowadzone w najbliższym dobranym dystansie ponownie wskazują na 40-50% utratę pakietów w węźle dalszym. Analogiczne rezultaty obserwowane są na pozostałych dystansach z oczekiwana tendencją wzrostową. Wykres dodatkowo przedstawia pewną różnicę w jakości transmisji danych w zależności od środowiska. Różnica ta jednak mieści się w odchyleniu standardowym, posiadającą część wspólną dla zadanych parametrów. Nie jest to wystarczające do stwierdzenia jednoznacznego wpływu środowiska.

Zestawiając ze sobą wymienione wcześniej czynniki, obserwuje się interesujące zależności. Rysunek 23 wskazuje na zależność dystansu, ilości węzłów i rodzaju środowiska dla wybranego interwału zapytań 100 milisekund. Po raz kolejny obserwowany jest PER wynoszący 40-50%, niezależnie od środowiska czy ilości węzłów. Sugeruje to wpływ samej testowanej platformy na ostateczny rezultat. Prawdopodobną hipotezą jest niewystarczająca wielkość zaallokowanych buforów



Rysunek 22. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów

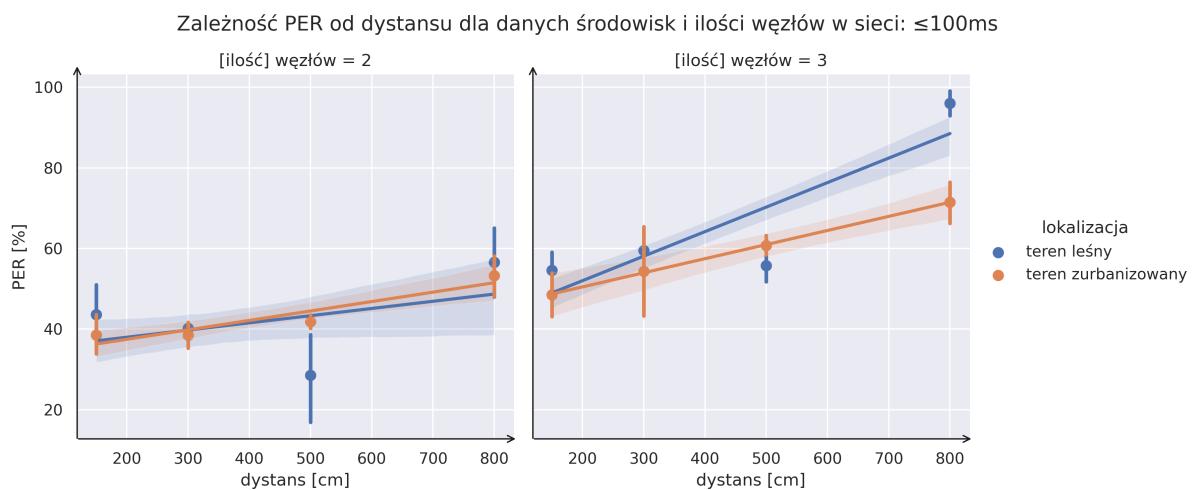
obsługujących transmisję danych. Mikrokontroler nie będąc w stanie obsłużyć tak częstej transmisji może doświadczyć awarii, co zaobserwowano podczas badań. Awaria objawiała się brakiem reakcji węzła bliższego na jakiekolwiek komendy AT, co wymagało ponownego uruchomienia urządzenia. Weryfikacja tego zagadnienia wymagałaby zaangażowania zaawansowanych narzędzi programistycznych ingerujących m.in. w pamięć urządzenia. Niniejsza praca nie podejmuje się wyjaśnienia przyczyn obserwowanych anomalii w działaniu mikrokontrolera, udostępniając jednocześnie możliwy punkt dla dalszych prac badawczych z zakresu BLE Mesh.

Wpływ samego stosu łączności na PER przy zadanej częstotliwości zapytań zdaje się potwierdzać wykres uwzględniający jakość transmisji dla dwóch węzłów. Niemalże pozioma linia aproksymacji sugeruje niewielki wpływ dystansu na PER. Dotyczy to zarówno terenu zurbanizowanego jak i terenu leśnego. Zbliżone rezultaty zdają się wykluczać czynniki zewnętrzne.

Interesującą zależnością jest nachylenie wykresu względem osi odciętych. Dla przypadku dwóch węzłów sieci, połączenie bezpośrednio między węzłami, PER jest niemal stałe na wybranych odległościach, porównywalne z przypadkiem terenu leśnego. W przypadku trzech węzłów, ujawnia się potencjalny wpływ węzła środkowego, przekazującego pakiety z punktu bliższego do dalszego. Wraz ze wzrostem dystansu, rośnie wartość PER sięgając nawet 90% w terenie leśnym. Różne nachylenie dla wybranych środowisk również sugeruje znaczący wpływ środowiska na PER.

Znając charakterystykę łączności dla okresów poniżej 100 milisekund, weryfikuje się pozostałe wybrane częstotliwości, zgodnie z podanymi wartościami 4.3.1. Rysunek 24 prezentuje pozostałe interwały w zależności od dystansu i wybranych środowisk bez rozróżnienia na ilość węzłów w sieci.

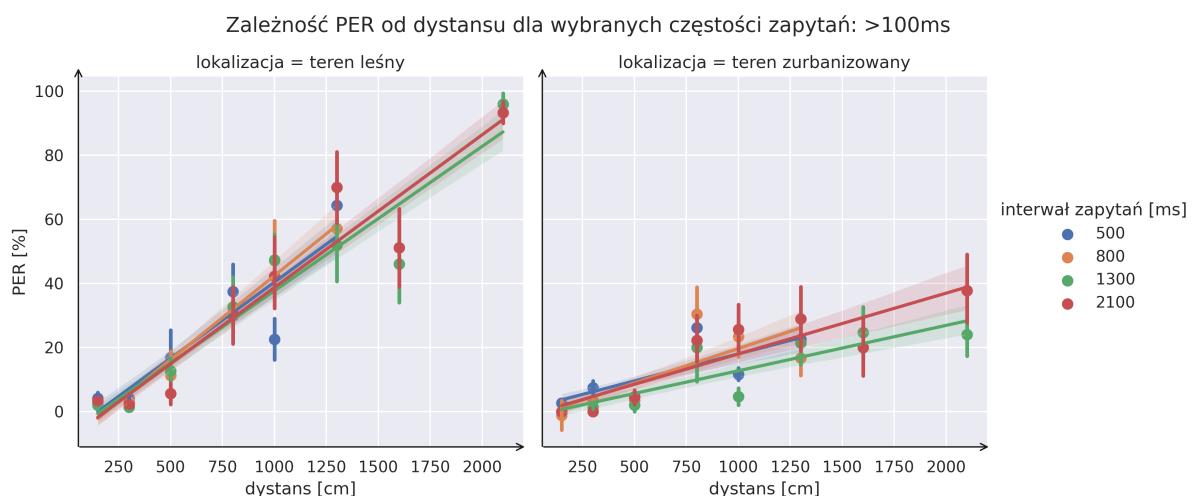
Przeprowadzone pomiary w terenie leśnym wskazują charakterystykę połączenia zgodną z intuicyjnymi przewidywaniami. Na początkowym dystansie 150cm nie obserwuje się problemów z łącznością. Wszystkie wysłane pakiety zostały odebrane przez węzeł dalszy. Kolejny dystans wskazuje już na



Rysunek 23. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ w wybranych środowiskach i liczbie badanych węzłów

pewną utratę pakietów poniżej 20%. Prawdopodobnym czynnikiem jest pogoda lub ukształtowanie terenu leśnego. Co istotne, pomiary dla różnych interwałów odpytywań są zbliżone. Sugerowałoby to brak wpływu częstotliwości na PER. Na pozostałych dystansach pomiarowych, wartości utraty pakietów są do siebie wzajemnie zbliżone osiągając swoje maksimum na dystansie 21m - blisko 100% zaginionych pakietów.

Charakterystyka łączności w terenie zurbanizowanym prezentuje się podobnie. Nie obserwuje się znaczącej utraty pakietów na względnie bliskich dystansach (150, 300 i 500cm). Wartość PER rośnie wraz ze wzrostem odległości pomiędzy węzłami osiągając w swoim szczytzie wartość ok. 40%. Co istotne, linie aproksymacyjne są do siebie zbliżone, ponownie sugerując brak korelacji pomiędzy częstotliwością wysyłania komunikatów a wartością PER.



Rysunek 24. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $>100\text{ms}$ w wybranych środowiskach

Zależność pomiędzy PER a częstością odpytywań została zbadana wykorzystując narzędzia statystyczne. Traktując model liniowy, jak sugerują zaprezentowane wykresy, tworzonych zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów wylicza się współczynnik determinacji dla następujących zmiennych niezależnych: dystans oraz PER. W kolejnym kroku uwzględnia się fakt wykorzystywania korelacji wielu zmiennych, dostosowując odpowiednio wartość.

Środowisko	R^2	$R^2_{dostosowany}$
Teren leśny	0.04958	0.04272
Teren zurbanizowany	0.04887	0.04200

Tablica 1. Współczynnik determinacji dla zależności interwału zapytań od dystansu i PER w wybranych środowiskach

Ostatecznie, otrzymany współczynnik determinacji przyjmujący wartość $R^2 = 0,04–0,05$. Istnieje 4%-owy wpływ interwału zapytań o częstościach większych niż 100 milisekund na ostateczny rezultat PER. Pozwala to wykluczyć ten czynnik wykluczyć z dalszych rozważań uznając go za marginalny.

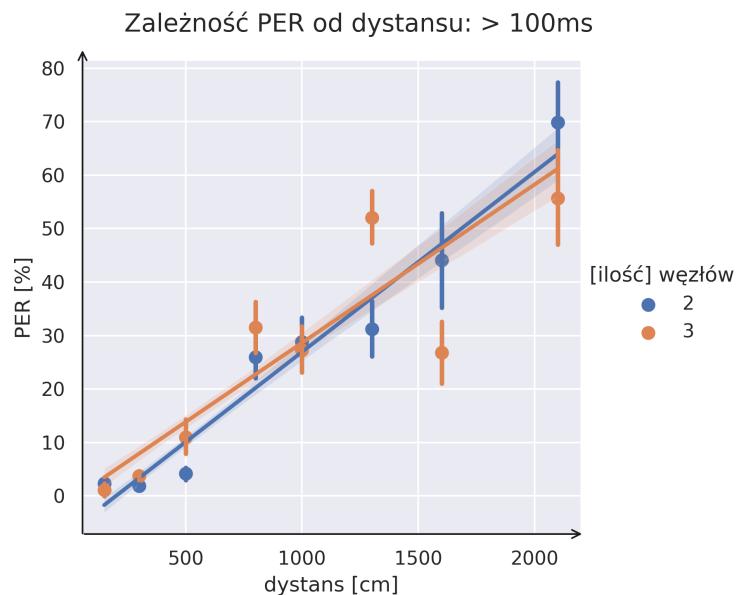
4.3.3 Zależność PER względem odległości między węzłami

Ustaliwszy brak (pomijalnie mały) wpływu częstości zapytań (dla częstości wartości $>100\text{ms}$), praca podejmuje dalszą prezentację danych pod postacią zależności odległości na PER.

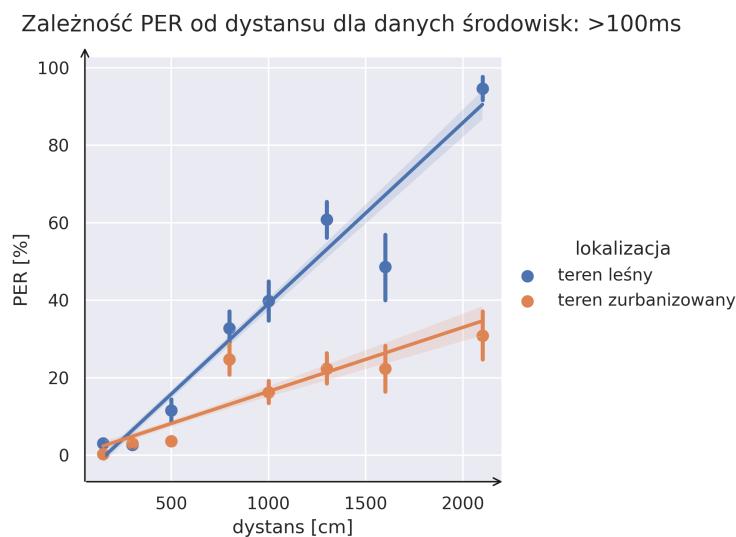
Rysunek 25 przedstawia zebrane dane zestawiając odległość i ilość węzłów składających się na sieć Mesh. Na początkowych dystansach PER ma wartość bliską bądź równą zeru. Wraz ze wzrostem odległości pomiędzy węzłami, badany współczynnik rośnie, co jest zgodne z oczekiwaniami. Na dystansie 16m obserwuje się przełamanie linii aproksymacji. Dodatkowy węzeł środkowy znacząco i pozytywnie wpływa na PER przy kolejnych odległościach umożliwiając przekazywanie informacji w sieci. PER w najdalszym punkcie pomiarowym osiąga wartości od ok. 60% do 70%. Należy jednak mieć na uwadze, iż zestawienie nie rozróżnia środowiska w którym następowało zliczanie pakietów.

Rysunek 26 uwzględnia wpływ środowiska na PER. Wykres zdecydowanie wskazuje na różnicę pomiędzy terenem zurbanizowanym a terenem leśnym. Na początkowych dystansach PER jest zbliżone niezależnie od odległości międzywęzłowych. Znaczące różnice w pomiarach, a dzięki temu również względem linii aproksymacyjnej, występują już na dystansie 5m. PER w przypadku miejskim jest bliskie zera, gdzie analogiczne pomiary w środowisku leśnym sugerują piętnastoprocentowy poziom zgubionych pakietów. Wraz ze wzrostem dystansu, wartość PER wzrasta. Niemniej jednak nachylenie linii wskazuje na zdecydowanie wolniejsze narastanie utraty danych podczas transmisji bezprzewodowej dla przypadku miejskiego. Na maksymalnym dystansie międzywęzłowym wynoszącym 21m, PER przybiera wartość ok. 30%. W analogicznym przypadku dla środowiska leśnego następuje niemal całkowita utrata transmisji.

Ostatnia prezentowana zależność ukazana jest na Rysunku 27. Przedstawia on zależność PER od dystansu dla wybranych środowisk i liczby węzłów. Uwidaczniają się wyżej wymienione cechy transmisji opisane w poprzednich akapitach.



Rysunek 25. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość >100ms dla różnych liczb węzłów



Rysunek 26. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość >100ms w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów

Środowisko	r
Teren leśny	0.62262
Teren zurbanizowany	0.23582

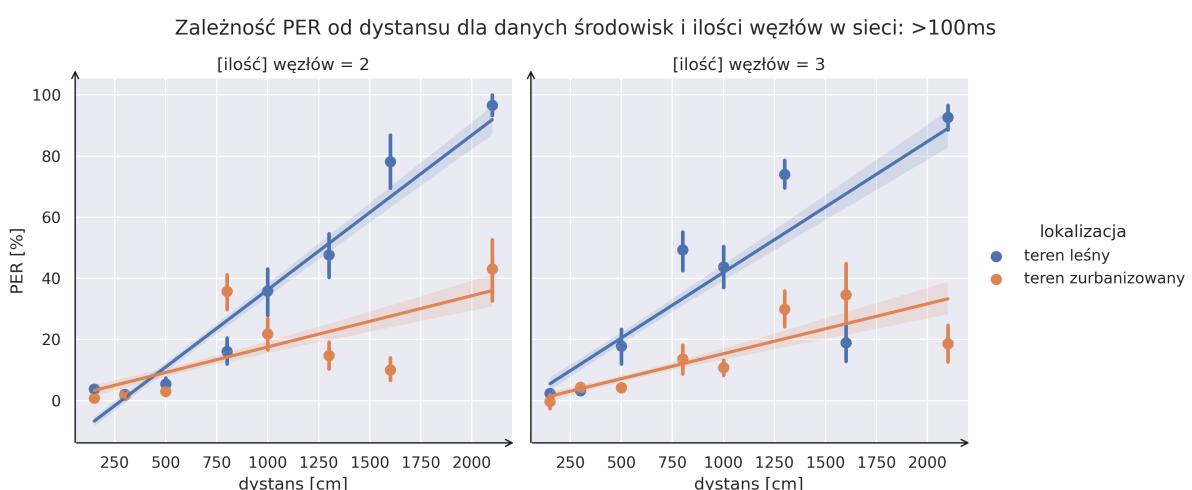
Tablica 2. Współczynnik korelacji Pearsona dla zależności PER od odległości międzywęzłowej dla zadanych środowisk

Dla przypadku dwóch węzłów, PER jest bliskie zeru na początkowych dystansach do 5m niezależnie od środowiska. W odległości 8m od stacji bazowej obserwuje się miejscową anomalię polegającą na

blisko 40%-ej utraty pakietów dla terenu zurbanizowanego. Zarówno jak w poprzednich jak i kilku następujących po sobie punktach pomiarowych, PER nie przybiera takich wartości. Anomalia może być wyjaśniona cechami środowiska - np. węzeł dalszy ułożony został w zagłębieniu, co utrudniło odbiór propagowanej fali radiowej. W pozostałych punktach pomiarowych w terenie zurbanizowanym obserwuje się spadek wartości PER wraz ze zwiększonym dystansem, co znów sugeruje wpływ ukształtowania terenu. Utrata pakietów wynosząca niewiele powyżej 40% zaobserwowana jest na odległości 21m. Jest to o tyle zaskakujące, o tyle dla analogicznego dystansu pomiarowego w terenie leśnym PER wynosi niemal 100%.

Charakterystyka transmisji dla badanego przypadku trzech węzłów przybiera podobną postać. Wartości PER w terenie zurbanizowanym są zbliżone w początkowych dystansach pomiarowych. Dystans 8m (węzeł dalszy na odległość 16m) wskazuje na analogiczną anomalię jak w opisywanym przypadku dwóch węzłów. Obserwuje się maksimum lokalne PER poniżej 20% w otoczeniu najbliższych punktów pomiarowych. Kolejne pomiary wskazują na stały przyrost PER względem równoodległych węzłów. Utrata pakietów na maksymalnym całkowitym dystansie 42m wynosi ok. 20%.

Transmisja danych w środowisku leśnym charakteryzuje się większym przyrostem PER względem odległości w porównaniu do warunków miejskich. Przypadek dwuwęzłowej sieci wskazuje zbliżone wartości utraty pakietów na odległości do 5m włącznie. Na każdym kolejnym dystansie pomiarowym PER wzrasta zbliżając się do 100% w miejscu oddalonym o 21m od węzła bliższego. Oznacza to niemal całkowitą utratę łączności. Charakterystyka dla sieci zbudowanej z trzech węzłów jest analogiczna. Wyjątkiem jest zbiór pomiarów zebranych na dystansie pomiędzy węzłami wynoszącym 16m. PER w tym przypadku spada do ok. 20%. Jest to o tyle niespodziewane iż, poprzedzające i następujące pomiary i wynikłe w konsekwencji PER są blisko 4-krotnie wyższe. Taką konsekwencję należy przypisać ukształtowaniu terenu aniżeli nieznanej właściwości transmisji radiowej.



Rysunek 27. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstość $>100\text{ms}$ w wybranych środowiskach i liczbie badanych węzłów

Przedstawione dane prezentują wpływ dystansu na PER w różnych środowiskach. Określona kategoria badanych środowisk nie jest jedynym parametrem charakteryzującym przeprowadzone badania. Dużą odpowiedzialność w ostatecznych zebranych wartościach należy położyć na czynniki takie jak ukształtowanie terenu i pogoda. Pomimo organoleptycznego doboru terenu o możliwie nieurozmaiconej charakterystyce, badane węzły mogły zostać ułożone w lokalnym zagęszczeniu wynikłym z gleby bądź nawet zagęszczeniu trawy w danym miejscu. Różnica w wilgotności również mogła mieć znaczenie w zebranych danych. Niepewności te są konsekwencją metodologii przeprowadzonych badań w warunkach nielaboratoryjnych (terenowych). Czynniki te, nie będące częścią formalnie zebranych danych, najprawdopodobniej miały wpływ na ilość odebranych pakietów. Ukształtowanie terenu jak i wilgotność mają bezpośredni wpływ jakość transmisji stanowiąc przeszkody dla strefy propagacji sygnału radiowego (strefy Fresnela).

Rozdział 5

Podsumowanie

- Teoria: wiemy jak ma działać, ale jednak nie działa.
- Praktyka: działa, ale nie wiemy – dlaczego?
- Łączymy teorię z praktyką: nic nie działa i nie wiemy, dlaczego.

Więcej informacji na temat \LaTeX a:

- <<https://www.overleaf.com/learn>> – przystępny tutorial na stronie Overleaf,
- <<https://www.latex-project.org/>> – strona domowa projektu,
- <<https://www.tug.org/begin.html>> – dobry zbiór odnośników do innych materiałów.

Powodzenia!

Bibliografia

- [1] *Bluetooth Protocol Stack - MATLAB & Simulink*. adr.: <https://www.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-protocol-stack.html> (term. wiz. 15.05.2022).
- [2] Group, M. W., *Mesh Profile Bluetooth® Specification*, sty. 2019.
- [3] *P-NUCLEO-WB55 - Bluetooth 5 and 802.15.4 Nucleo Pack including USB dongle and Nucleo-64 with STM32WB55 MCUs, supports Arduino Uno V3 and ST morpho connectivity - STMicroelectronics*, en. adr.: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/p-nucleo-wb55.html> (term. wiz. 10.05.2022).
- [4] SA, H., *TCP/IP. Szkoła programowania*, pl, ISBN: 978-83-246-0293-3. adr.: <https://helion.pl/ksiazki/tcp-ip-szkola-programowania-heather-osterloh,tcpiszp.htm> (term. wiz. 15.05.2022).
- [5] *scipy.integrate.simpson — SciPy v1.8.1 Manual*. adr.: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.integrate.simpson.html> (term. wiz. 25.05.2022).
- [6] Skoro, M., *Fizyka*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1973.
- [7] *STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [8] *STM32CubeMonPwr - Graphical tool displaying on PC power data coming from X-NUCLEO-LPM01A* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemonpwr.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [9] *STM32CubeProg - STM32CubeProgrammer software for all STM32* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeprog.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [10] *STM32CubeWB MCU Firmware Package*, original-date: 2019-04-19T13:27:35Z, maj 2022. adr.: <https://github.com/STMicroelectronics/STM32CubeWB> (term. wiz. 14.05.2022).
- [11] *STM32WB - Bluetooth, Wireless Microcontrollers (MCU)* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wb-series.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [12] STMicroelectronics, *UM2435 - Bluetooth® Low Energy and 802.15.4 Nucleo pack based on STM32WB Series microcontrollers*, 2019.

Bibliografia

- [13] ——, *PM0271 - STM32WB BLE stack programming guidelines*, grud. 2021. adr.: https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0271-stm32wb-ble-stack-programming-guidelines-stmicroelectronics.pdf.
- [14] *UM1718 - STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation*, maj 2022. adr.: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00104712-stm32cubemx-for-stm32-configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf.
- [15] *UM2243 - STM32 Nucleo expansion board for power consumption measurement*, mar. 2018. adr.: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2243-stm32-nucleo-expansion-board-for-power-consumption-measurement-stmicroelectronics.pdf.

Wykaz skrótów i symboli

API Application Programming Interface 32

BLE Bluetooth Low Energy 16, 22, 31

BMS Battery Management System 19

CAD Computer-aided Design 20

FDM Fused Deposition Modeling 20

FFF Fused Filamnet Fabrication 20

ISM Industrial, Scientific, Medical 34

LL Link Layer 32

PCB Printed Circuit Board 20

PER Packet Error Rate 16, 31, 33, 37–43

PLA Polylactic Acid 20

Spis rysunków

1	Zestaw uruchomieniowy P-NUCLEO-WB55	16
2	Zestaw pomiarowy X-NUCLEO-LPM01A	17
3	Odbiornik energii	19
4	Model obudowy dla zestawu P-NUCLEO-WB55	20
5	Obudowa zestawu uruchomieniowego Nucleo wykonana w technologii druku 3D - realizacja	20
6	Podłączony zestaw pomiarowy	22
7	Przykładowa sesja pomiarowa dla BLE Mesh - sieć w trybie nasłuchującym	23
8	Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate - Usługa Połączona	25
9	Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate - Wyszukiwanie .	26
10	Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate - Wyszukiwanie, urządzenie w gotowości	27
11	Zestawienie zużycia prądu dla usługi Heart Rate w zależności od trybu działania . . .	27
12	Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE Mesh i modelu Generic OnOff . . .	29
13	Zestawienie zużycia prądu dla BLE Mesh w zależności od trybu działania	29
14	Porównanie średniego zużycia energii pomiędzy BT Low Energy HRT i BLE Mesh .	30
15	Model ISO OSI wraz i odpowiadające mu nazwy porcji danych. Źródło: [4]	31
16	Zestawienie stosu BLE i modelu ISO OSI. Źródło: [1]	32
17	Fotografia miejsca badań w Kampinoskim Parku Narodowym	34
18	Fotografia miejsca badań na Polach Mokotowskich	34
19	Dystans pomiędzy węzłami dla sieci dwóch mikrokontrolerów	35
20	Dystans pomiędzy węzłami dla sieci trzech mikrokontrolerów	36
21	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ dla różnej liczby węzłów	37
22	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów	38
23	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ w wybranych środowiskach i liczbie badanych węzłów	39
24	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $>100\text{ms}$ w wybranych środowiskach	39
25	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $>100\text{ms}$ dla różnej liczby węzłów	41

26	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość >100ms w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów	41
27	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość >100ms w wybranych środowiskach i liczbę badanych węzłów	42

Spis tabelic

1	Współczynnik determinacji dla zależności interwału zapytań od dystansu i PER w wybranych środowiskach	40
2	Współczynnik korelacji Pearsona dla zależności PER od odległości międzywęzłowej dla zadanych środowisk	41

Spis załączników

1	Dowód próżni doskonałej	57
2	Dowód zera bezwzględnego	59
3	Dowód czasu zatrzymanego	61
4	Dowód nieskończoności urojonej	63

Załącznik 1

Dowód próżni doskonałej

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Załącznik 2

Dowód zera bezwzględnego

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Załącznik 3

Dowód czasu zatrzymanego

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Załącznik 4

Dowód nieskończoności urojonej

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetuer at, consectetuer sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.