

## Spis treści

Spis skrótów akronimów i oznaczeń .....	2
1. Wstęp .....	3
2. Koncepcja systemu .....	4
3. Technologia Bluetooth Smart .....	5
4. Moduły Bluetooth Low Energy .....	13
5. Opis i porównanie beaconów .....	14
6. Alternatywne metody lokalizacji .....	23
7. Prototyp urządzenia dla komunikacji bezprzewodowej .....	26
8. Testy funkcjonalne beaconów i modułów Bluetooth Smart .....	28
9. Realizacja systemu .....	32
10. Podsumowanie .....	39
Spis rysunków: .....	40
Spis tabel .....	42
Bibliografia: .....	43
Dodatek .....	<b>Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.</b>

## Spis skrótów akronimów i oznaczeń

BLE	– bezprzewodowa technologia Bluetooth z małym poborem mocy (ang. <i>Bluetooth Low Energy</i> )
MIC	– dołowa stacja bazowa (ang. <i>Mining Infrastructure Computer</i> )
ATEX	– dyrektywa Unii Europejskiej, która definiuje wymagania zasadnicze, jakie musi spełniać każdy produkt, przeznaczony do stosowania w strefach zagrożonych wybuchem (fr. <i>Atmosphères Explosibles</i> )
RSSI	– wskaźnik mocy odbieranego sygnału (ang. <i>Received Signal Strength Indication</i> )
UUID	– standard, który pomaga unikatowo identyfikować informacje bez centrum koordynacji (ang. <i>Universally Unique Identifier</i> )
URL	– format adresowania informacji stosowany w Internecie i w sieciach lokalnych (ang. <i>Uniform Resource Locator</i> )
MAC	– unikatowy sprzętowy identyfikator urządzenia (ang. <i>Media Access Control</i> )
FHSS	– metoda rozpraszania widma w systemach szerokopasmowych (ang. <i>Frequency-hopping spread spectrum</i> )
Wi-Fi	– zestaw standardów stworzonych do budowy bezprzewodowych sieci komputerowych (ang. <i>Wireless Fidelity</i> )
WLAN	– bezprzewodowa sieć lokalna (ang. <i>Wireless Local Area Network</i> )
GATT	– protokół atrybutów profili (ang. <i>Generic Attribute Profile</i> )
BER	– bitowa stopa błędów (ang. <i>Bit error rate</i> )
IoT	– Internet rzeczy (ang. <i>Internet of Things</i> )
LLC	– wyższa podwarstwa warstwy łącza danych w modelu OSI (ang. <i>Logical Link Control</i> )
L2CAP	– protokół łącza logicznego (ang. <i>Logical Link Control and Application Layer Protocol</i> )
SMP	– protokół bezpieczeństwa (ang. <i>Security Manager Protocol</i> )
ATT	– protokół atrybutów (ang. <i>Attribute Protocol</i> )
GAP	– protokół ogólnego dostępu (ang. <i>Generic Access Profile</i> )
HCI	– protokół, który służy do standaryzacji stosu hosta i kontrolera (ang. <i>Host Controller Interface</i> )
GFSK	– modulacja częstotliwości dla sygnałów cyfrowych (ang. <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> )
TDMA	– technika, która pozwala na dostęp więcej niż jednego użytkownika do medium transmisyjnego (ang. <i>Time Division Multiple Access</i> )
MD	– bit, który oznacza więcej danych (ang. <i>More Data</i> )
IR	– promieniowanie podczerwone (ang. <i>InfraRed</i> )
SN	– numer sekwencji (ang. <i>Sequence Number</i> )
NESN	– następny numer sekwencji (ang. <i>Next Sequence Number</i> )
RTLS	– system lokalizacji w czasie rzeczywistym (ang. <i>Real Time Location System</i> )
UWB	– Technika, która bazuje się na szybkim wysyłaniu krótkotrwałych impulsów (ang. <i>Ultra WideBand</i> )
WiMAX	– standard IEEE 802.16 komunikacji bezprzewodowej (ang. <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> )
SoC	– układ scalony zawierający kompletny system elektroniczny (ang. <i>System on Chip</i> )
IPv6	– protokół komunikacyjny (ang. <i>Internet Protocol version 6</i> )

## 1. Wstęp

Kopalnie podziemne są potencjalnie niebezpiecznymi obszarami roboczymi. Bezpieczeństwo w kopalniach jest tradycyjnie regulowane przez przepisy prawne. Normy te obejmują komunikacje między pracownikami znajdującymi się pod ziemią. Dotyczą również wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracy. Uwzględniając szereg poważnych wypadków górniczych, wykazano, że konwencjonalne podziemne systemy komunikacji, takie jak telefony, nie są już w stanie sprostać takim wymaganiom jak mobilność, niezawodność, odporność na uszkodzenia, wygoda dla użytkownika oraz możliwość integracji z innymi urządzeniami.

Ponadto, przedsiębiorstwa górnicze są obecnie zobowiązane do spełniania ogólnych obowiązków prawnych w zakresie bezpieczeństwa i zdrowia pracowników. Wymagane są również przepisy związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym i odpornością podziemnych systemów łączności elektronicznej.

Na przestrzeni ostatnich lat, można zauważyć duży postęp w automatyzacji kopalni. Postęp w elektronice pozwolił na stworzenie nowych urządzeń oraz interfejsów służących do komunikacji bezprzewodowej. Obecnie, możliwość lokalizacji ludzi jest warunkiem koniecznym do dalszej poprawy bezpieczeństwa pracy w górnictwie. Dzięki takim systemom, w razie awarii, akcja ratunkowa może być skierowana dokładnie do miejsca niebezpieczeństwa lub ostatniej znanej lokalizacji ludzi. Czas, spędzony na poszukiwanie, zostanie zminimalizowany.

W dniu 5 września 2010 roku w wyniku zawalenia się kopalni San Jose w Chile pod ziemią zostało uwięzionych 33 pracowników. Kopalnia nie posiadała żadnego systemu umożliwiającego komunikację bezprzewodową. Miejsce pracowników nie mogło zostać zlokalizowane. W rezultacie, początkowo sądzono, że prawdopodobnie robotnicy nie przeżyli zawalenia się lub zmarli z głodu. W celu poszukiwania uwięzionych osób firma Codelco rozpoczęła wiercenie ośmiu odkrywczych otworów wiertniczych. Dopiero 22 września 2010 roku, czyli 17 dni po tragedii, znaleziono kartkę, przyklejoną do jednego z wiertel. Napisane na niej było: „Jesteśmy pod osłoną, jest nas 33 osoby”. W końcu, po 69-ciu dniach od momentu wypadku, wszystkich uwięzionych robotników udało się ocalić i bezpiecznie ewakuować. Prawie wszyscy byli w dobrym stanie medycznym [4]. Problem ten mógłby być rozwiązany wcześniej, gdyby górnicy byli wyposażeni w urządzenia do bezprzewodowej lokalizacji. Akcja ratunkowa mogłaby być prowadzona w sposób bardziej zorganizowany i efektywny.

Celem niniejszej pracy było opracowanie koncepcji systemu lokalizacji górników, wykorzystującej do komunikacji technologię Bluetooth Smart oraz jej wstępna realizacja.

Taki system może służyć do:

- lokalizacji górników w czasie rzeczywistym,
- uzyskania informacji dotyczących osób przebywających w strefach niebezpiecznych,
- monitorowania pracy górników (np. poprawa wydajność pracy).

## 2. Koncepcja systemu

Tunel kopalni można podzielić na tzw. sektory. Szerokość takiego sektora będzie odpowiadała zasięgowi jednego beacons<sup>1</sup>. Stosując taką metodę można określić położenie górnika z dokładnością ok. 5-7 m. Urządzenie dla komunikacji, które posiada każdy górnik, będzie miało dwa interfejsy dla komunikacji bezprzewodowej: Bluetooth Smart oraz Wi-Fi. Bezprzewodowa technologia Bluetooth Smart służy do komunikacji z beaconami. Każdy beacon jest wyposażony w nadajnik Bluetooth Smart. Wi-fi w urządzeniu mobilnym będzie służyło do komunikacji z inteligentną infrastrukturą ze stacją bazową MIC firmy Minetronics. MIC będzie połączony z komputerem, w celu dalszego przetwarzania otrzymanych danych. Antena, która będzie połączona ze stacją bazową, może być rozmieszczona co ok. 50-60 m. Dzięki temu będzie możliwa komunikacja przez Wi-Fi. Odległość ta będzie zależała od kształtu tunełu, charakterystyki anteny oraz warunków panujących w kopalni.

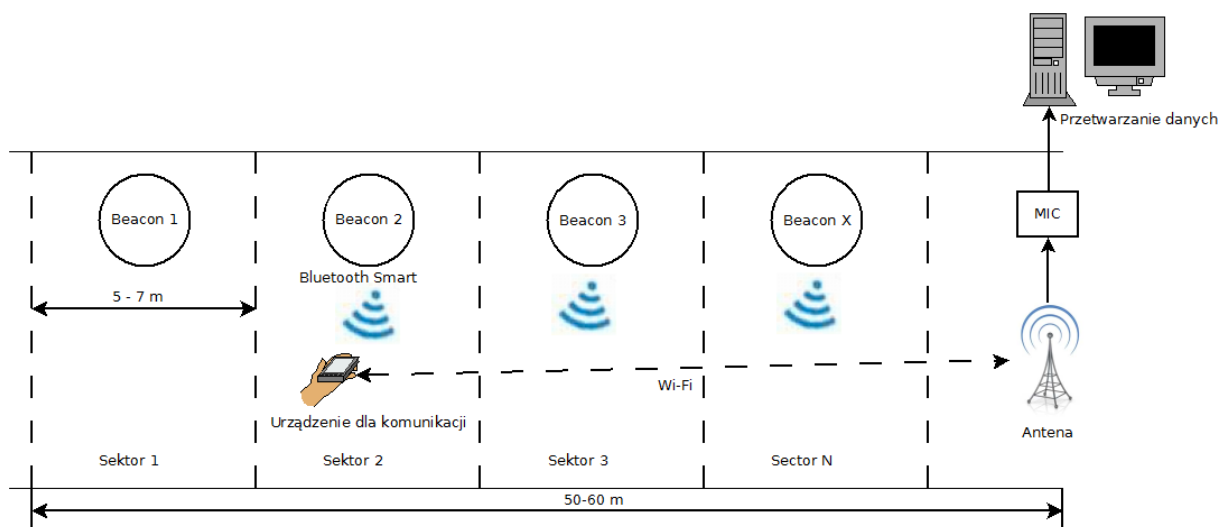
Każdy beacon będzie posiadał unikatowy identyfikator, który zostanie przypisany do określonej pozycji na mapie w kopalni. Częstotliwość z jaką beacony będą wysyłać ramki z danymi należy dobrać tak, aby dane były wysyłane z odpowiednią częstotliwością. Zbyt częste wysyłanie danych spowoduje krótszy czas pracy na baterii. Optymalny czas może wynosić np. 1 s, zakładając, że górnik nie będzie mógł przejść odległości 5 metrów w czasie mniejszym od 1 s.

Stosując taką koncepcję system jest dobrze skalowalny. Bardzo dużym atutem jest to, że koszty instalacji i eksploatacji są małe w porównaniu do innych systemów. Również czas instalacji takiego systemu jest krótki.

---

<sup>1</sup> beacon – urządzenie, które komunikują się za pomocą interfejsu Bluetooth Smart

Na rys. 2.1 obrazowo przedstawiono koncepcję systemu lokalizacji górników, którą można zastosować w kopalni. Taki system może zaowocować zwiększeniem bezpieczeństwa w kopalniach oraz zwiększyć wydajność pracy.



Rys. 2.1. Koncepcja systemu lokalizacji

### 3. Technologia Bluetooth Smart

Nazwy technologii Bluetooth Smart (BS) i Bluetooth Low Energy (BLE) zostały użyte przemiennie w pracy, gdyż są to synonimy i oznaczają tą samą technologię komunikacji bezprzewodowej.

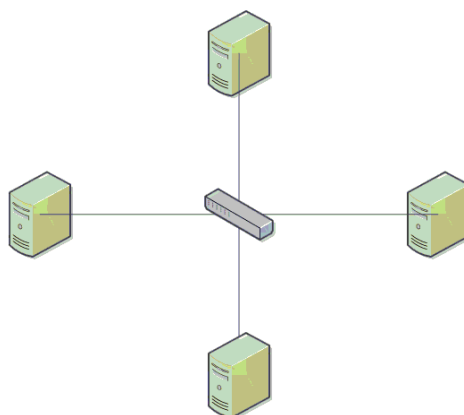
Bluetooth jest jedną z najbardziej spotykanych bezprzewodowych technologii w życiu codziennym. Dzięki porównywalnie dużym prędkościom przesyłania danych i dobrej energooszczędności, technologia Bluetooth znalazła duże rozpowszechnienie w telefonach komórkowych, laptopach, słuchawkach bezprzewodowych, klawiaturach, myszkach. Standard pozwala obsługiwać dość dużą i skomplikowaną sieć urządzeń. Natomiast dla zastosowań w sieciach sensorów i nawigacji, klasyczny Bluetooth nie nadaje się, gdyż zapotrzebowania na energię jest za duże. Wynika to z pewnych cech pracy stosu protokołu.

Technologia Bluetooth Low Energy od samego początku jest zorientowana na zastosowania w systemach monitoringu z autonomicznym zasilaniem. IETF 6LoWPAN Working Group rozważa BLE jak jedną z istotnych składowych IoT i pracuje nad specyfikacją, która pozwoli rozgłaszać pakiety IPv6 za pomocą BLE. Interfejs Bluetooth Smart jest również obsługiwany przez systemy operacyjne Android oraz iOS dla telefonów komórkowych [27].

W technologii Bluetooth Smart udało się osiągnąć krótkie czasy podłączenia oraz mały pobór mocy bez integracji w fizyczną warstwę protokołu. Cel został osiągnięty dzięki zmianom w algorytmie tak, aby pracował optymalnie z małymi porcjami danych, które są przesy-

łane sporadycznie. Oznacza to jednocześnie, że moduł, który pracuje intensywnie w trybie małego poboru mocy, będzie zużywał tyle samo energii, co w trybie zwykłym. Jeżeli w teoretycznym przypadku spróbujemy przesyłać strumień z wideo, interfejs ten będzie pracował mniej sprawnie. W dodatku będzie pobierał więcej energii niż zwykły moduł Bluetooth 3.0.

W odróżnieniu od technologii sieci sensorów, takich jak ZigBee, 6LoWPAN, Z-Wave, dla interfejsu BLE jedyną możliwą topologią sieci jest topologia gwiazdy (rys. 3.1), kiedy pojedyncze urządzenie może pracować jako *master* lub *slave* lub punkt-punkt. Praca w obu trybach równocześnie jest niemożliwa. Jeżeli urządzenie zostanie skonfigurowane jako *master* będzie można obsługiwać połączenia z wieloma urządzeniami podrzędnymi [22].



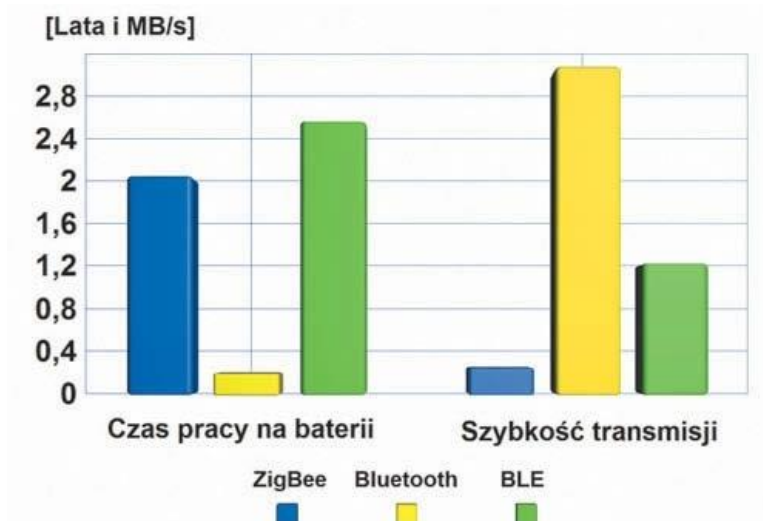
Rys. 3.1. Topologia gwiazdy [1]

Wprowadzenie technologii „rozgłaszania” jest nowością w technologii Bluetooth Low Energy. Polega ona na periodycznym rozsyłaniu danych przez proste urządzenia podrzędne. W takiej konfiguracji sieci, urządzenie nadrzędne przechodzi w tryb skanera. Używając jednego z trzech wydzielonych kanałów, w skanerze rejestruje się urządzenie zgłaszające chęć wysłania danych [18].

Tabela 3.1 Porównanie klasycznej technologii Bluetooth oraz Bluetooth Low Energy

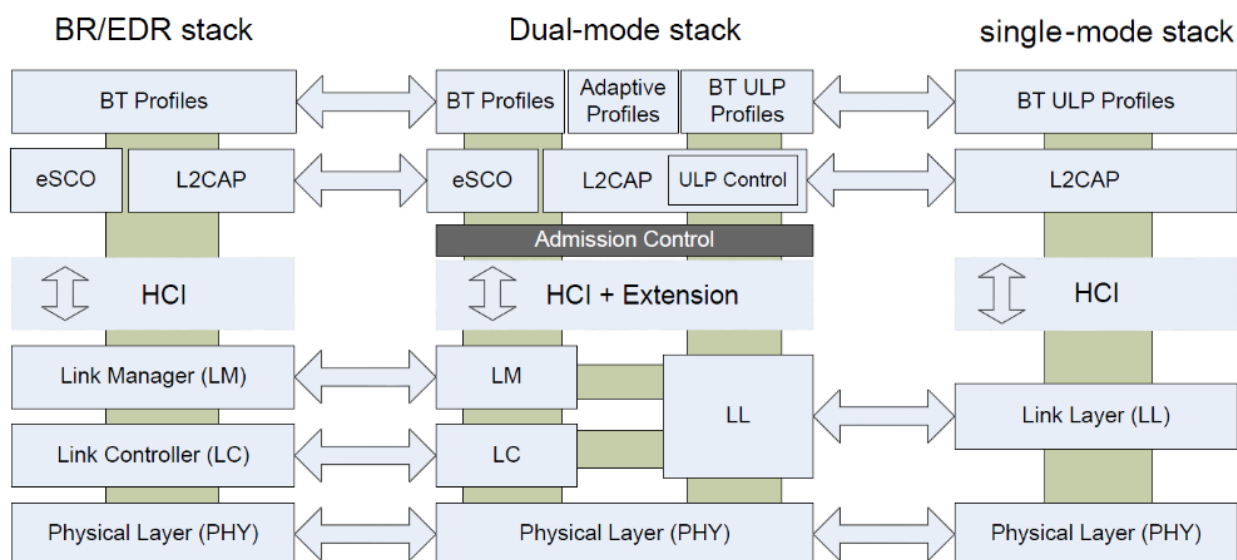
	<b>Standardowy Bluetooth</b>	<b>Bluetooth Low Energy</b>
Częstotliwość [GHz]	2,4	2,4
Zasięg [m]	10-100	10-100
Liczba kanałów	79	40
Przepustowość [Mbit/s]	0,7-2,1	0,3
Liczba urządzeń w sieci	7	Nieograniczona
Czas odpowiedzi [ms]	100+	<6
Zużycie energii [1 – odniesienie]	1	0,01-0,5

Na rys. 3.2 przedstawiono porównanie czasu pracy modułu BLE na baterii oraz szybkości transmisji dla klasycznej technologii Bluetooth, Bluetooth Low Energy oraz ZigBee.



Rys. 3.2. Porównanie czasu pracy modułu BLE na baterii oraz szybkości transmisji dla klasycznej technologii Bluetooth, Bluetooth Low Energy oraz ZigBee [2]

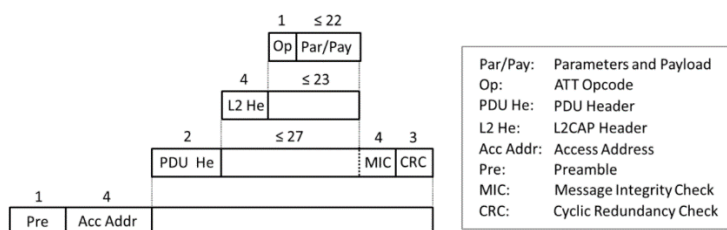
Mimo tego, że niektóre funkcje kontrolera BLE zostały zapożyczone z kontrolera Bluetooth, nie są one zgodne ze sobą. Oznacza to, że urządzenie, które pracuje tylko w jednym trybie BLE (ang. *single-mode device*) nie będzie mogło współpracować z urządzeniem, które obsługuje tylko Bluetooth 2.x/3.x. Dla nawiązania połączenia między nimi, chociaż jedno z tych urządzeń powinno obsługiwać obydwa typy stosu protokołów (ang. *dual-mode device*) [26].



Rys. 3.3. Schemat współpracy między urządzeniami typu single-mode, dual-mode i klasycznymi urządzeniami Bluetooth [3]



Na rys. 3.4 przedstawiono strukturę pakietu danych BLE.



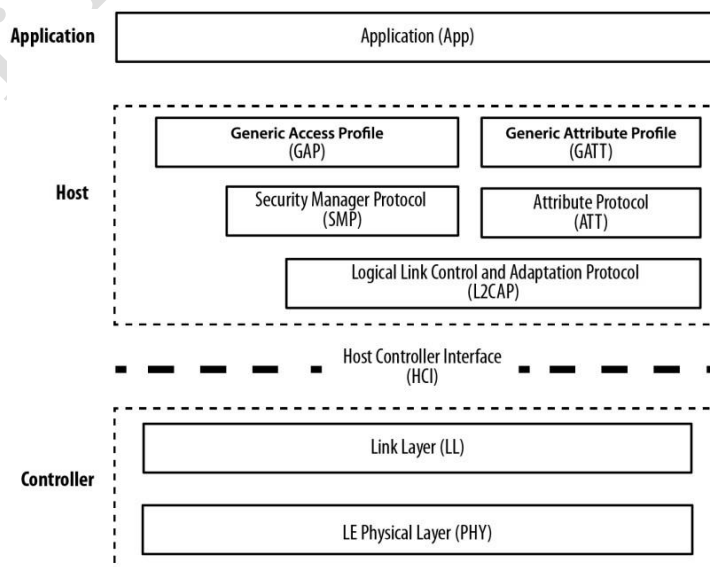
Rys. 3.4. Strukturę pakietu danych BLE [3]

Stos BLE tak samo jak i klasycznego Bluetootha składa się z dwóch głównych części: kontrolera (Controller) i węzła sieci (Host). Kontroler składa się z warstwy fizycznej i warstwy łącza danych. Często kontroler realizowany jest w postaci układu SoC ze zintegrowanym bezprzewodowym nadajnikiem. Część stosu, którą nazywa się węzłem sieci, realizowana jest programowo na mikrokontrolerze i zawiera w sobie funkcjonalności wyższych warstw:

- wyższej podwarstwy warstwy łącza danych LLC,
- protokołu łącza logicznego L2CAP,
- protokołu atrybutów ATT,
- protokołu atrybutów profili GATT,
- protokołu bezpieczeństwa SMP,
- protokołu ogólnego dostępu do funkcji profilu urządzenia GAP.

Współpraca między dolnymi a górnymi częściami stosu jest realizowana za pomocą interfejsu HCI. Dodatkowa funkcjonalność warstwy aplikacji może być realizowana nad poziomem węzła sieci [26].

Na rys. 3.5 przedstawiono stos protokołu Bluetooth Low Energy.



Rys. 3.5. Stos protokołu Bluetooth Low Energy [3]

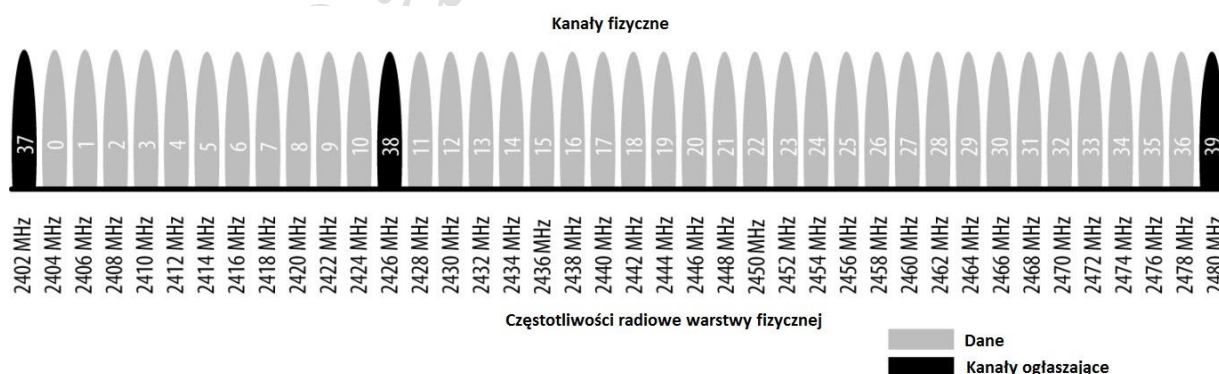


Poniżej opisano stos protokołu Bluetooth Low Energy.

### Warstwa fizyczna.

Urządzenia BLE pracują w paśmie 2,4 GHz. W standardzie określono 40 kanałów z odstępem 2 MHz między kanałami. Dla porównania, w tradycyjnym standardzie Bluetooth, tzw. interfejs radiowy, który również działa w paśmie 2,4 GHz, jest podzielony na 79 kanałów z odstępem 1 MHz. W obu interfejsach urządzenie przełącza się na inny kanał co 625  $\mu$ s zgodnie z techniką FHSS. Duża liczba kanałów o niewielkiej szerokości pasma sprzyja niezawodnej komunikacji [3].

W warstwie fizycznej została zastosowana modulacja GFSK<sup>2</sup> ze współczynnikiem modulacji od 0,45 do 0,55, co pozwala zmniejszyć szczytowy pobór mocy. Szybkość transmisji w warstwie fizycznej wynosi 1 Mbit/s. W standardzie Bluetooth Smart czułość odbiornika jest określona jako poziom sygnału na odbiorniku, przy którym BER osiąga wartość  $10^{-3}$  i musi wynosić -70 dBm lub więcej. Rozróżnia się 2 typy kanałów: kanały ogłaszające oraz kanały danych (rys. 3.6). Kanały ogłaszające (3 kanały) wykorzystuje się do wyszukiwania urządzeń, nawiązywania połączenia, transmisji szerokopasmowej. Dzięki użyciu 3 kanałów, czas nawiązywania połączeń został skrócony do 7,5 ms. Czas ten może nieznacznie wzrastać przy większej liczbie urządzeń podrzędnych. Kanały danych (37 kanałów) są wykorzystywane do dwukierunkowej wymiany danych między połączonymi urządzeniami. Przy takich parametrach transmisji jedno urządzenie *master* jest w stanie pobrać dane od ponad 100 czujników w czasie 1 s [5].

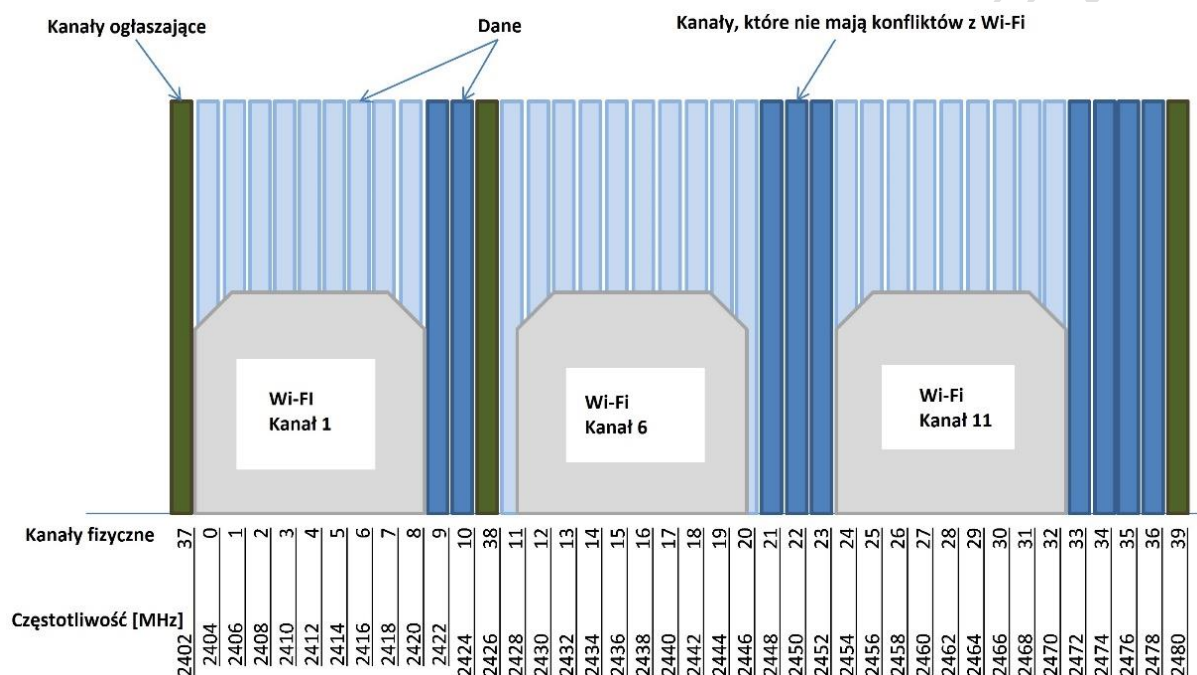


Rys. 3.6. Częstotliwości radiowe wykorzystywane przez Bluetooth Smart oraz odpowiadające im kanały fizyczne [5]

Podczas transmisji sprawdzane jest aktualne obciążenie każdego kanału. Najbardziej obciążone mogą zostać umieszczone na „specjalnej liście” i będą wykorzystywane w mniejszym stopniu. Kanały te zostają oznaczone jako zajęte i są wyłączone z katalogu dostępnych często-

<sup>2</sup> GFSK – modulacja częstotliwości dla sygnałów cyfrowych

tliwości podczas przeskoków. Lista, która zawiera zajęte kanały jest uaktualniana po to, aby móc elastycznie reagować na krótkotrwałe zakłócenia. Również można zaprogramować kanały, które nie powinny być używane. Wykorzystuje się to w sytuacji, gdy Bluetooth musi współistnieć z innym znanym systemem komunikacji i źródła potencjalnych konfliktów w kanałach radiowych można z góry przewidzieć. Przykład takiej sytuacji przedstawiono na rys. 3.7. Dla bezproblemowego działania interfejsu Bluetooth oraz Wi-Fi, 3 kanały BLE odpowiedzialne za inicjalizację połączenia (kolor zielony) zostały tak ustalone, aby uniknąć kolizji. Minimalizuje to pokrycie z kanałami 1, 6 i 11 standardu IEEE 802.11. Reszta kanałów jest wykorzystywana do wymiany danych [25].



Rys. 3.7. Częstotliwości radiowe wykorzystywane przez Bluetooth Smart i bezprzewodową sieć lokalną [7]

### Warstwa łączy danych.

W BLE dla szerokopasmowej transmisji pakietów wykorzystuje się kanały ogłaszające. Każde urządzenie, które wysyła dane po takich kanałach jest nazywane urządzeniem ogłaszającym. Transmisja odbywa się tylko w pewnych wydzielonych szczelinach czasowych, które nazywają się zdarzeniami ogłoszeń. W czasie tych zdarzeń urządzenie ogłaszające wysyła pakiety po kolei każdym z trzech kanałów. Urządzenia, które tylko odbierają dane, nazywają się skanerami.

Dwukierunkowa wymiana danych między urządzeniami BLE możliwa jest tylko po nawiązaniu połączenia między nimi. Utworzenie nowego połączenia między dwoma urządzeniami jest procedurą asymetryczną, w trakcie której urządzenie ogłaszające sygnalizuje kanałami ogłaszającymi o swojej gotowości połączenia. W tym czasie drugie urządzenie, które jest

inicjatorem połączenia, nasłuchuje te kanały. Kiedy inicjator połączenia znajduje potrzebne urządzenie, może on wysłać zapytania o nawiązanie połączenia ogłaszającemu (ang. *connection request*), który nawiązuje połączenie między nimi. Od tego momentu urządzenia mogą wymieniać się danymi korzystając z kanałów posiadających dane. Pakiety, które dotyczą połączenia, zostaną oznaczone losowo wygenerowanym 32 bitowym kodem dostępu [3].

Także jak i w klasycznej wersji Bluetooth, w BLE dla nawiązania połączenia jedno z urządzeń pełni rolę *mastera*, a drugie — *slavea*. *Master* może podtrzymywać kilka połączeń ze *slaveami*, w tym czasie *slave* może mieć tylko jedno połączenie z *masterem*. A zatem, urządzenie BLE jednocześnie może należeć tylko do jednej piko-sieci<sup>3</sup>. Ten element odróżnia interfejs BLE od interfejsu Bluetooth. W interfejsie Bluetooth urządzenie typu *slave* mogło pełnić rolę *mastera* w swojej własnej piko-sieci.

Dla oszczędzania energii, urządzenie *slave* domyślnie znajduje się w trybie śpiącym, budząc się od czasu do czasu dla sprawdzenia obecności pakietów z danymi od *mastera*. *Master* wyznacza dla swoich urządzeń *slave* szczeliny czasowe, kiedy urządzenie przechodzi w tryb aktywności dla nasłuchiwanie kanału. Dostęp urządzeń do medium transmisyjnego realizowany jest za pomocą techniki TDMA<sup>4</sup>. Urządzenia *master* również przekazują do nich schemat przełączenia kanałów. Parametry połączenia są przekazywane w ramce (przy potrzebie mogą być zmienione) z zapytaniem o nawiązanie połączenia.

Po nawiązaniu połączenia fizyczny kanał transmisji rozdziela się na nienakładające się na siebie interwały czasowe, które są nazywane zdarzeniami połączenia (ang. *connection events*). W czasie tego zdarzenia wszystkie pakiety są przekazywane po jednym kanale. Każde takie zdarzenie zaczyna urządzenie typu *master* transmisją pakietu. W tym przypadku, jeżeli urządzenie *slave* otrzymało pakiet, to musi wysłać pakiet potwierdzenie. Potwierdzenie od urządzenia typu *master* do urządzenia *slave* nie jest potrzebne. Między dwoma kolejnymi pakietami musi być zachowany odstęp min 150  $\mu$ s.

Do czasu, kiedy między urządzeniami *master* i *slave* trwa wymiana pakietów, zdarzenie połączenia uważane są za otwarte. W razie potrzeby dalszej wymiany, w ramach z danymi ustawia się bit MD. Jeżeli jedno z urządzeń nie ma danych dla transmisji, zdarzenie połączenia zostanie zamknięte i urządzenie typu *slave* nie powinno więcej nasłuchiwać kanału do czasu rozpoczęcia następnego zdarzenia. Dwie inne przyczyny, które doprowadzają do zamknięcia zdarzenia są to dwa kolejno otrzymane z błędami pakiety oraz błędny adres urządzenia w pakiecie [7].

---

<sup>3</sup> piko-sieć – sieć typu Ad-Hoc, w której urządzenie może pełnić rolę punktu dostępu i klienta

<sup>4</sup> TDMA – technika, która pozwala na dostęp więcej niż jednego użytkownika do medium transmisyjnego

Dla nowego zdarzenia połączenia, *master* i *slave* wykorzystują nowy kanał. Czas między rozpoczęciem dwóch kolejnych zdarzeń jest ustawiany za pomocą parametru *connInterval*, który jest wielokrotnością 1,25 ms i może mieścić się w zakresie od 7,5 ms do 4 s. Drugim ważnym parametrem piko-sieci BLE jest parametr *connSlaveLatency*, który definiuje liczbę kolejnych zdarzeń połączeń, w trakcie których urządzenie *master* nie nasłuchuje kanału i może na ten czas wyłączyć transceiver. Ten parametr może przyjmować wartość w zakresie od 100 ms do 32 s. Jego wartość oznacza czas wykrycia zerwania połączenia z urządzeniem przez gorszą jakość kanału lub przemieszczenie go poza zasięg dostępu.

Na poziomie kanałowym, dla zarządzania strumieniem z danymi działa mechanizm zatrzymania się i czekania (*stop-and-wait mechanism*) na podstawie tzw. podtrzymywania kumulacyjnego, które jednocześnie służy do powiadomień o błędach. Nagłówek każdego pakietu zawiera dwa jednakowe pola bitowe: SN i NESN. SN identyfikuje pakiet, a NESN pokazuje jaki pakiet jest oczekiwany od urządzenia, z którym nawiązano połączenie. Jeżeli pakiet został otrzymany z powodzeniem, pole NESN w swoim następnym pakiecie zostanie zwiększone. W przeciwnym razie, jeżeli urządzenie wykryje błąd (suma kontrolna nie jest taka sama), pole NESN w odebranym pakiecie nie będzie poprawne i urządzenie, które odebrało taki pakiet, powtarza wysyłkę swojego ostatniego pakietu. Po stronie odbiornika taka sytuacja zostanie zinterpretowana jako powiadomienie o błędzie [3].

### **L2CAP.**

Bluetooth Low Energy protokół L2CAP jest uproszczoną i zoptymalizowaną wersją odpowiedniego protokołu w Bluetooth 2.x/3.x. Głównym zadaniem L2CAP w BLE jest multipleksowanie danych trzech protokołów ATT, SMP oraz warstwy dostępu do sieci. Odpowiada on za nawiązanie logicznego połączenia. Nie odbywa się segmentacja pakietów lub zbieranie pakietów, gdyż maksymalne efektywne obciążenie L2CAP w BLE wynosi 23 bajty [7].

### **ATT.**

Określa wiadomości komunikacyjne między dwoma urządzeniami, które występują w danym protokole jako klient i serwer. Serwer zawiera zestaw atrybutów, które są reprezentowane jako struktura danych. Role klienta i serwera określa protokół GATT i nie zależą one od roli urządzenia w połączeniu (*master/slave*).

Klient za pomocą zapytań może dostać dostęp do atrybutów serwera. Oprócz tego serwer wysyła do klienta dwa typy wiadomości, które zawierają atrybuty:

- powiadomienia, które nie wymagają potwierdzenia,
- wskaźniki, na który klient musi dać odpowiedź.

Klient może też przesłać serwerowi komendy w celu zmiany wartości atrybutów [7].

## **GATT.**

Protokół GATT wyznacza środowisko wykonania, które wykorzystuje ATT dla znajdowania serwisów i wymiany charakterystyk między urządzeniami. Pełni on dwie role: serwera i klienta. W tym przypadku charakterystyka reprezentuje zestaw z danymi, które zawierają w sobie wartości i właściwości. Dane, które dotyczą serwisów i charakterystyk, zapisywane są w atrybutach.

Dla przykładu, serwer, który współpracuje z usługą związaną z czujnikiem temperatury, może być związany z charakterystyką „temperatura”, która jest wykorzystywana do opisanie czujnika. Drugi atrybut może być stosowany do przechowywania wyników pomiarów [3].

## **GAP i profile aplikacji.**

Protokół GAP wyznacza rolę urządzeń, tryby i procedury znajdowania urządzeń serwisów, zarządza nawiązanym połączeniem i bezpieczeństwem. W BLE GAP zawiera cztery role dla kontrolera:

- szerokopasmowej transmisji,
- nadzorczą,
- peryferyjną,
- centralną.

Węzeł szerokopasmowej transmisji może tylko przekazywać pakiety po znanych kanałach i nie obsługuje połączenia z innymi urządzeniami. Nadzorca może tylko nasłuchiwać kanały. Dodatkowo może przyjmować pakiety, które są przekazywane węzłem transmisji szerokopasmowej. Centralne węzły reprezentują urządzenia, które są w stanie podtrzymywać kilka połączeń. Urządzenia peryferyjne reprezentują proste urządzenia, które są w stanie podtrzymywać jedno połączenie z węzłem centralnym. Role węzła centralnego i peryferyjnego sugerują, że urządzenia są w stanie odpowiednio pełnić role *mastera* lub *slavea*. Urządzenia może podtrzymywać kilka ról, ale jednocześnie aktywne może być tylko jedna z nich.

Na GAPem mogą być zbudowane dodatkowe profile aplikacji, które podtrzymują funkcjonalność potrzebną użytkownikowi. W BLE podtrzymywana jest hierarchia profili, tzn. profil wyższego poziomu może korzystać z funkcji profilu niższego poziomu [20].

## **4. Moduły Bluetooth Low Energy**

Dla fizycznej realizacji układu, który komunikuje się za pomocą Bluetooth Smart potrzebne są odpowiednie moduły. Takie moduły można już znaleźć w ofercie producentów,



takich jak: Texas Instruments, Bluegiga, Nordic Semiconductor czy Cambridge Silicon Radio. Dostępne na rynku produkty Bluetooth Low Energy można podzielić na 4 grupy:

- single mode – układy pracujące jedynie w konfiguracji małej mocy (ang. *low power*),
- dual mode – układy Bluetooth 4.0, które można stosować w trybie pracy małej mocy *low power*,
- układy rozszerzone – istniejące układy Bluetooth 2.1 lub 3.0 można wzbogacić o tryb pracy *low power*, rozbudowując istniejący stos Bluetooth.

W tabeli 4.1 przedstawiono informacje o modułach dostępnych aktualnie na rynku. Pierwsze dwa są zintegrowanymi modułami na płytkach PCB. Mają one układ Bluetooth Low Energy, dodatkowy procesor oraz układ antenowy. Pozostałe moduły są układami scalonymi. Koszt jednego modułu średnio wynosi od 15 do 25 zł.

Tabela 4.1. Dostępne na rynku moduły BLE

Moduł	Producent	Grupa	Obudowa	Interfejsy
BLE112	Bluegiga	Single mode	12x18 mm	UART, USB, SPI, 8xAIO, 16xGPIO
OBS421	Connect blue	Układ rozszerzony	16x36 mm	UART, 9xGPIO
CC254x	Texas Instruments	Single mode	VQFN 40 pin	USB 2.0, 2xUSART, 21xGPIO
nRF8001 nRF51822	Nordic Semiconductor	Dual mode	QFM 32 pin 5x5 mm	UART, SPI
CSR1000 CSR1001	Cambridge Silicon Radio	Single mode	QFN 32 pin QFN 52 pin	UART, SPI, I <sup>2</sup> C, 3xAIO, 1xADC

Do wymienionych w tabeli 4.1 modułów BLE dostępne są też płyty prototypowe:

- dla modułu BLE112 – BLE112 evaluation board, BLED112 USB Dongle,
- dla modułu OBS421 – cB-ACC-26 (RS232 kit), cB-ACC-41 (USB kit),
- dla modułów CC254x – CC2540 USB Dongle, CC2530 development kit, CC2540DK-MINI development kit,
- dla modułu nRF8001- nRFgo Starter Kit, nRF8001 Development Kit, nRF8001 SDK

## 5. Opis i porównanie beaconów

Beacony są małymi urządzeniami, które wysyłają sygnał radiowy i komunikują się z urządzeniami za pomocą interfejsu Bluetooth Smart. Sercem beaкона jest moduł BLE. Zasi-

lane są one za pomocą baterii pastylkowej. Dzięki małemu poborowi mocy mogą działać na jednej baterii nawet do kilku lat. Wybór odpowiedniego czasu wysyłania zależy od tego, jak często chce się wysyłać dane. Większa częstotliwość wysyłania danych zmniejsza żywotność urządzenia na jednej baterii.

Beacony mogą wysyłać ramki w dwóch standardach: iBeacon i Eddystone. Są to standardy stworzone odpowiednio przez firmy Apple i Google. W tabeli 5.1 przedstawiono porównanie formatu iBeacon i Eddystone. Stosowane są one głównie do lokalizacji wewnątrz pomieszczenia. Zasada ich działania jest taka sama. Różnią się one tylko formatem transmitowanych danych [21].

Beacon co określony czas wysyła pakiety za pomocą interfejsu BLE. Urządzenia mogą tylko pracować w trybie jednostronnej transmisji, bez nawiązywania połączenia. Przy czym, cała informacja takiej transmisji znajduje się w pakiecie z danymi, które oprócz nagłówka zawierają dodatkową informację. Technologia ta nie jest przeznaczona do dokładnej lokalizacji w pomieszczeniach, ale tylko do przybliżonego określenia położenia [24].

Tabela 5.1. Porównanie formatu iBeacon i Eddystone

<b>iBeacon</b>	<b>Eddystone</b>
Kompatybilny z iOS i Androidem, ale natywny tylko dla iOS	Kompatybilny z iOS i Androidem
Prosty i łatwy do zaimplementowania	Elastyczny, otwiera nowe możliwości, ale wymaga bardziej skomplikowanego kodowania, gdyż wysyła więcej typów danych niż iBeacon
Standard stworzony przez firmę Apple Inc. (2013 r.)	Standard stworzony przez firmę Google Inc. (2015 r.)
Użycie w projektach komercyjnych wymaga zgody firmy Apple Inc.	Otwarte oprogramowanie ( <a href="https://github.com/google/eddystone">https://github.com/google/eddystone</a> )
Rozgłasza 1 pakiet <ul style="list-style-type: none"><li>Unikatową numer identyfikacyjny (UUID, Major i Minor)</li></ul>	Rozgłasza 3 różne pakiety: <ul style="list-style-type: none"><li>Unikatową numer identyfikacyjny (Eddystone-UUID)</li><li>Adres URL (Eddystone-URL)</li><li>Dane odczytane z sensorów (Eddystone-TLM)</li></ul>

Każdy identyfikator iBeacona zajmuje 20 bajtów (dane w ramach są zapisywane w szesnastkowym systemie liczbowym), które są podzielone na 3 sekcje:

1. UUID (zajmuje 16 bajtów).
2. Major (zajmuje 2 bajty).



### 3. Minor (zajmuje 2 bajty).

Wartość sekcji UUID można zmieniać i ustawiać na taką samą dla pewnej grupy beaconów. Daje to możliwość rozdzielenia jednej grupy beaconów od innej. Dla przykładu Estimote ma jednakowe UUID dla swoich wszystkich beaconów [23].

Wartość sekcji major identyfikuje mniejsze obszary dla poszczególnych lokalizacji. Dla przykładu wszystkie beacons w jednym tunelu w kopalni mają taką samą wartość major.

Wartość sekcji minor służy do określenia położenia konkretnego beaconsa.

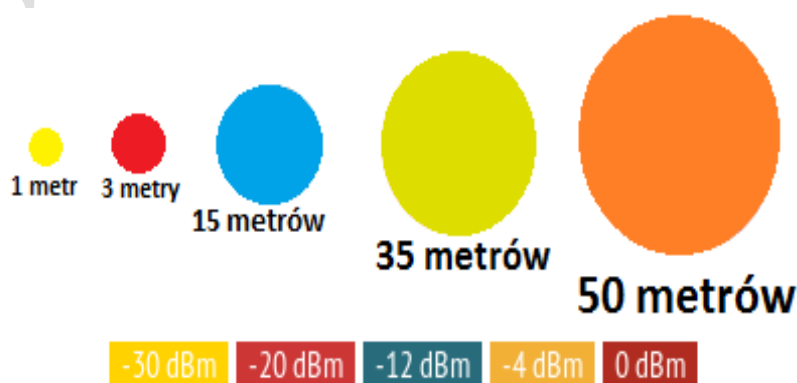
Wartości UUID, major oraz minor można zmieniać, ale nie można dopuścić do takiej sytuacji, kiedy dwa beaconsy Estimote mają dokładnie ten sam identyfikator. Za pomocą 2-bajtowej wartości major można grupować beaconsy z takim samym UUID. Natomiast za pomocą 2-bajtowej wartości minor można grupować beaconsy z identycznym UUID oraz major [21].

Przykładową konfigurację beaconów w dwóch różnych tunelach przedstawiona w tabeli 5.2. Aby jednoznacznie zdefiniować beaconsa trzeba ustawić wszystkie 3 wartości (UUID, major i minor).

Tabela 5.2. Przykładowa konfiguracja beaconów

	Beacon 1	Beacon 2	Beacon 3	Beacon 4	Beacon 5
Położenie	Tunel 1			Tunel 2	
UUID	B9407F30F5F8466EAF925556B57FE6D				
Major	1			2	
Minor	1	2	3	1	2

Na rys. 5.2 przedstawiono przybliżony zasięg beaconów dla różnej mocy sygnału (od -30 dBm do 0 dBm) w prostej linii. Ten zasięg może być mniejszy, kiedy między beaconem a odbiornikiem pojawiają się przeszkody.



Rys. 5.1. Moc z jaką beacon nadaje sygnał wraz z zasięgiem [8]

Na rys. 5.3 przedstawiono beacons, które są aktualnie dostępne na rynku.

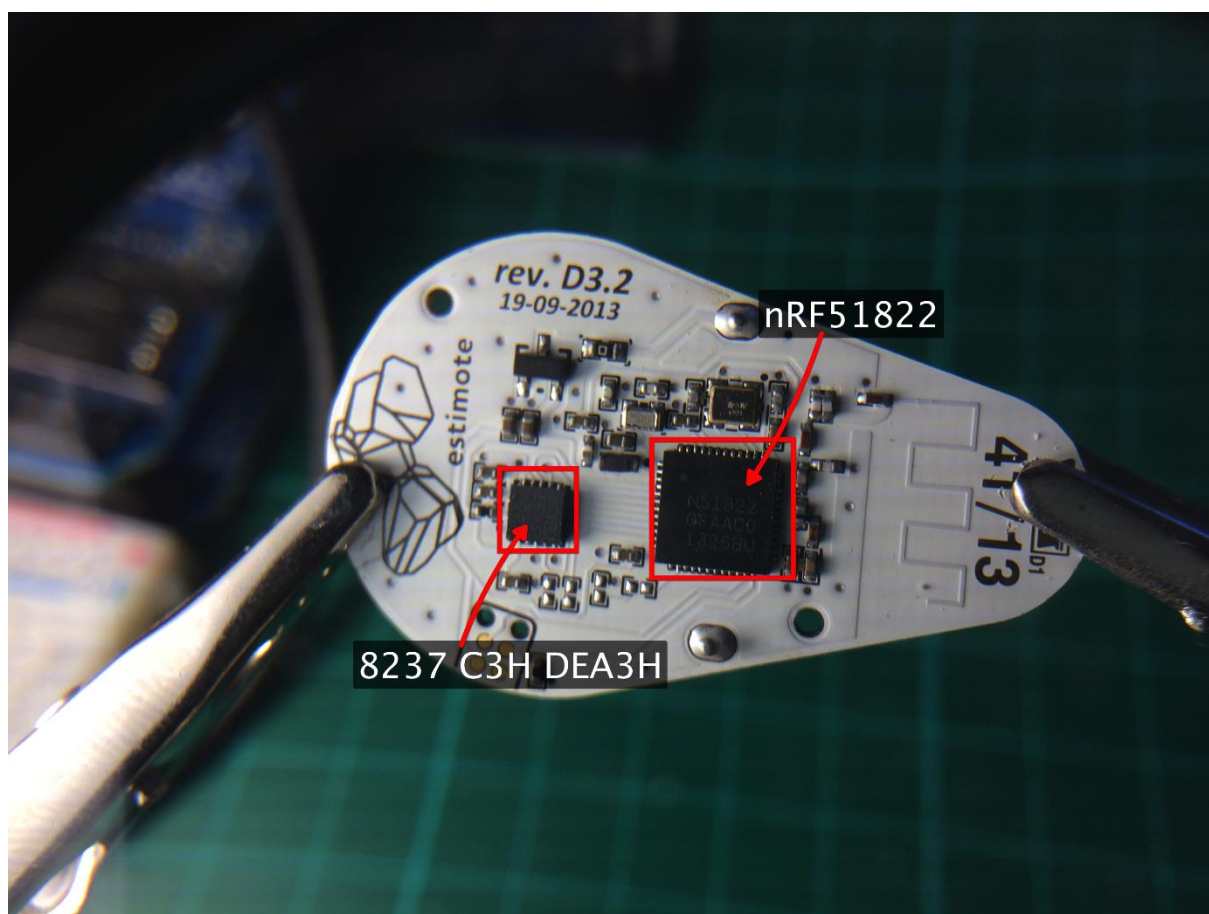


Rys. 5.2. Dostępne na rynku beacons [9]

W celu realizacji pracy zdecydowano na zakup beaconsa Estimote, sercem którego jest moduł dla komunikacji radiowej firmy Nordic Semiconductor nRF51822. Ma on 32-dwu bitowy procesor ARM Cortex - M0. Urządzenie jest również wyposażone w czujnik temperatury oraz akcelerometr. Dzięki akcelerometrowi można wykrywać czy beacon się przemieszcza. Beacon zasilany jest z baterii CR2477 o pojemności 1000 mAh. Firma oferuje swoje beaconsy które są zalane silikonem. Wymiana baterii w tym przypadku jest praktycznie niemożliwa [6].

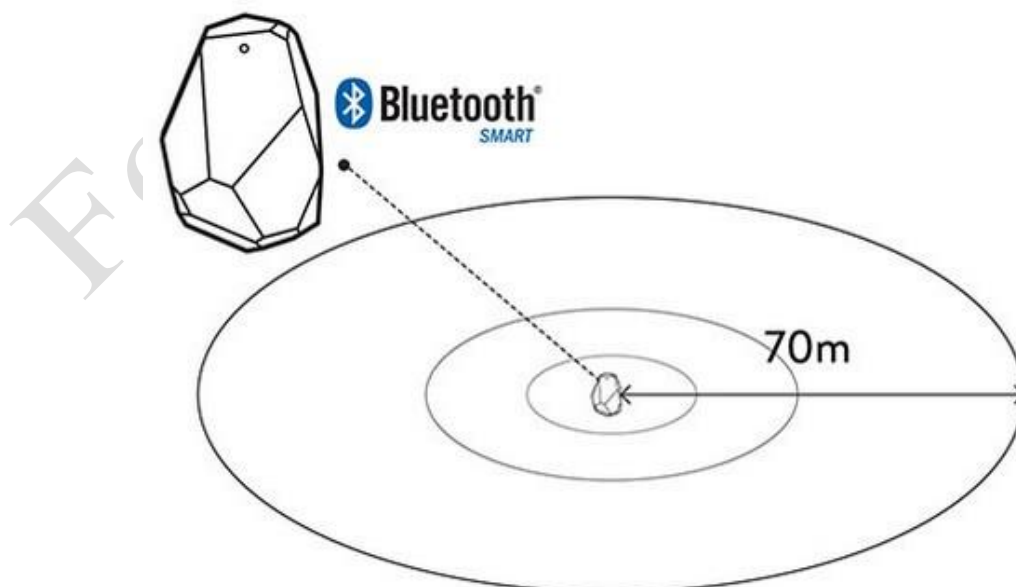


Rys. 5.3. Konstrukcja beaconsa Estimote [10]



Rys. 5.4. Płytkę obwodu drukowanego beacons firmy Estimote, gdzie: nRF51822 – moduł BLE, a 8237 C3H DEA3H - akcelerometr [11]

Maksymalny zasięg beacons firmy Estimote podany przez producenta wynosi ok. 70 metrów [12]. W praktyce wynosi on około 40 metrów (rys. 5.6).



Rys. 5.5. Maksymalny zasięg beacons firmy Estimote [12]

Na rys. 5.7 przedstawiono wygląd beacons firmy Estimote, który jest przyklejony na ścianie.



Rys. 5.6. Beacon Estimote przyklejony na ścianie [13]

Ponadto, w ramach realizacji pracy zakupiono beacon firmy Texas Instruments. Sensor-Tag (rys. 5.8) jest beaconem, który ma 2 przyciski oraz następujące czujniki:

- czujnik ciśnienia,
- czujnik temperatury,
- czujnik temperatury IR,
- magnetometr,
- akcelerometr,
- żyroskop.

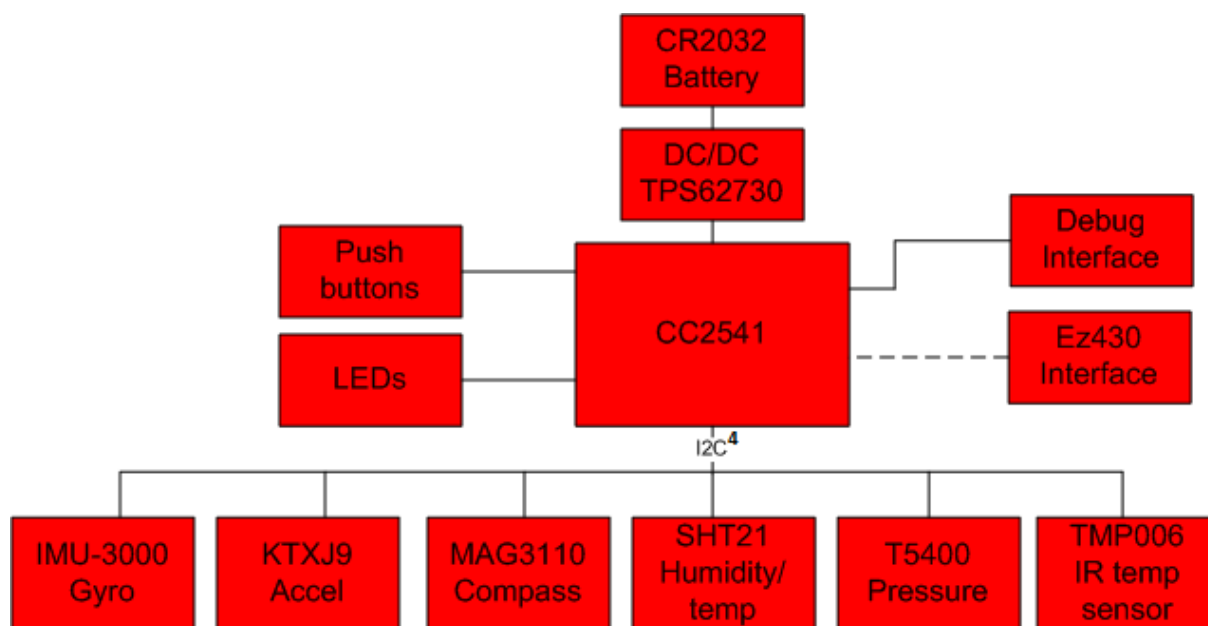
Zaletą takiego urządzenia jest to, że oprócz parametrów, takich jak odległość człowieka od miejsca, gdzie został umieszczony beacon, można monitorować różne wartości fizyczne (ciśnienie, temperaturę i in.) oraz wykrywać ruch.



Rys. 5.7. Testowane SensorTagi firmy Texas Instruments



Na rys. 5.9 przedstawiono diagram blokowy SensorTaga.



Rys. 5.8. Diagram blokowy SensorTaga [14]

Na rys. 5.10 przedstawiono poglądową wizualizację lokalizacji w pomieszczeniach, z zastosowaniem SensorTagów. Komunikacja między czujnikami odbywa się za magistrali I<sup>2</sup>C<sup>5</sup>.



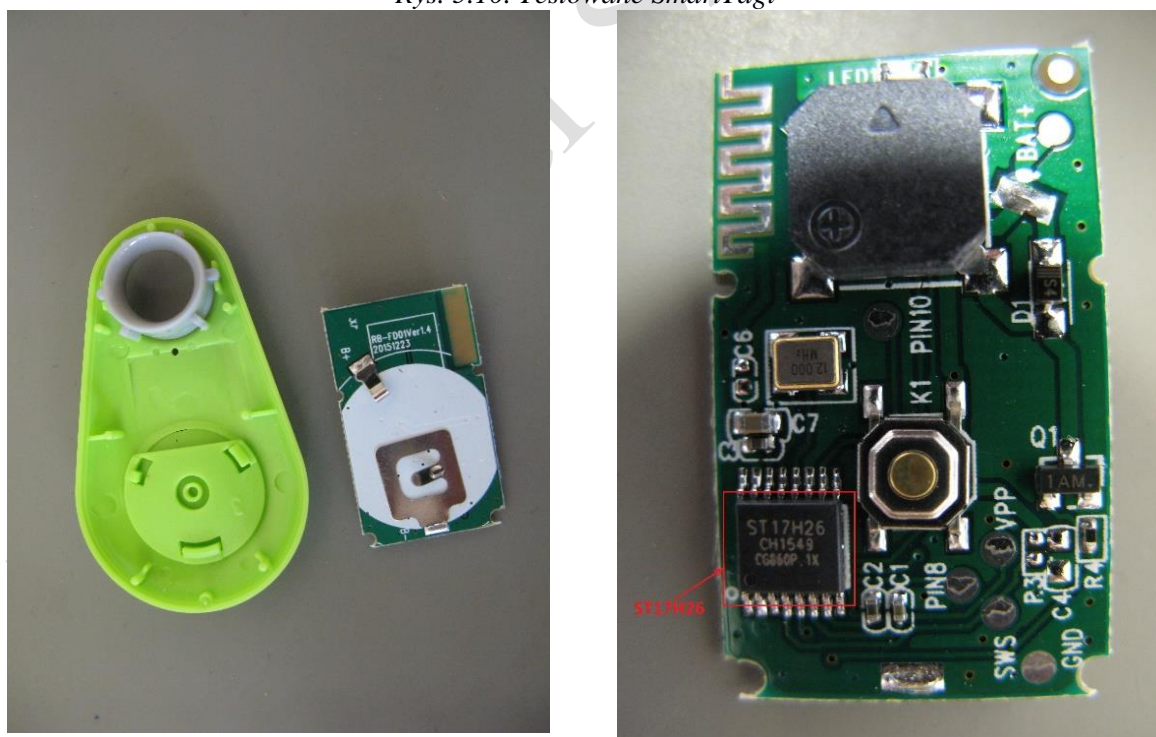
Rys. 5.9. Przykładowa wizualizacja lokalizacji w pomieszczeniu za pomocą SensorTaga [15]

<sup>5</sup> I<sup>2</sup>C – szeregową magistralę, która służy do przesyłania danych

W celach testowych kupiono również beacony z Chin – SmartTagi. Taki beacon jest zasilany z baterii CR2032. Zaletą tych beaconów jest bardzo mała waga – 9 g. Producent zapewnia zasięg około 22 m. Na rys. 5.11 i 5.12 przedstawiono konstrukcje oraz płytkę obwodu drukowanego SmartTagów.



Rys. 5.10. Testowane SmartTagi



Rys. 5.11. Konstrukcja oraz płytka obwodu drukowanego SmartTaga, gdzie: ST17H26 – moduł do komunikacji BLE

W tabeli 5.3 przedstawiono cenę oraz przewidywaną dostępność na rynku testowanych beaconów.

*Tabela 5.3. Porównanie cen oraz dostępności testowanych beaconów*

Beacon	Producent	Cena za 1 szt [zł]	Przewidywana dostępność
Estimote	Estimote	80	5 lat
SensorTag	Texas Instruments	80	3 lata
SmartTag	Chiny	8	brak danych
Ghostyu	Chiny	40	brak danych

W tabeli 5.4 przedstawiono wymagania wobec beaconów dla systemu lokalizacji w kopalniach.

*Tabela 5.4. Wymagania wobec beaconów dla systemu lokalizacji w kopalniach, gdzie 1 – istotna funkcja, 2 – pożądana funkcja, 3 – opcjonalna funkcja*

Opis	1	2	3
Odczyt mocy sygnału	X		
Wbudowane czujniki		X	
Przyciski			X
Zgodne z normami ATEX	X		
Mały pobór mocy	X		
Kompatybilność elektromagnetyczna	X		
Możliwość wymiany baterii			X

Podczas projektowania systemów przemysłowych należy brać pod uwagę fakt, że komponenty kluczowe dla funkcjonowania oraz prawidłowego działania systemu muszą być dostępne na rynku przez dłuższy czas. Producent w Chinach bardzo rzadko może zapewnić długoterminowe wsparcie. Również istotną rzeczą jest fakt, że urządzenia, które komunikują się drogą radiową, muszą posiadać odpowiednie certyfikaty jakości, ze względu na montaż w kopalni. Urządzenia dostępne w Chinach zwykle takich certyfikatów nie posiadają. Koszt takiego urządzenia zwiększa się bardzo istotnie, w związku z koniecznością uzyskania odpowiednich certyfikatów.

W przypadku posiadania własnych modułów do komunikacji bezprzewodowej, można wykonać własne beacony. Warto zaznaczyć, że koszt produkcji własnych beaconów może być o wiele większy niż beaconów dostępnych na rynku. W takim przypadku należy liczyć się z kosztami potrzebnymi na wytworzenie płytki obwodu drukowanego, zakup elementów elektronicznych oraz wykonania obudowy. Urządzenia, które będą wykorzystywane w kopalni muszą być zalane silikonem (zgodnie z wymaganiami i normami ATEX). Zalanie takich urządzeń stanowi dodatkowy koszt, ze względu na znaczący koszt silikonu.



## 6. Alternatywne metody lokalizacji

System lokalizacji w czasie rzeczywistym RTLS<sup>6</sup> można również wykonać bazując na alternatywnych technikach i technologiach. Wybór odpowiedniej techniki zależy od postawionego celu.

Oprócz technologii Bluetooth Smart wykorzystywane są inne metody:

- techniki radiolokacji,
- nawigacja inercyjna,
- metody optyczne,
- technologie ultradźwiękowe.

Największą grupą, która zawiera w sobie kilka podgrup, jest radiolokacja. Wykorzystuje ona zjawisko prostoliniowego rozchodzenia się fal elektromagnetycznych oraz zjawisko ich odbicia od przeszkód. Technika ta wykorzystuje fale radiowe o długościach od kilku metrów do kilku milimetrów.

Do tej techniki możemy zaliczyć następujące metody:

- 1) UWB, która bazuje się na szybkim wysyłaniu krótkich impulsów. Czas trwania pojedynczego impulsu wynosi kilkadziesiąt pikosekund. Technologie RTLS bazujące na UWB charakteryzują się bardzo dużą dokładnością lokalizacji. Największą zaletą opisywanej techniki jest duża niezawodność w pomieszczeniach posiadających złożoną geometrię oraz dużą liczbę przeszkód.

Zalety:

- duży poziom ochrony przed zakłóceniami,
- ciężko wykryć komunikację (duże bezpieczeństwo),
- praktycznie nie stwarza zakłóceń dla innych technik komunikacji,
- im wyższa częstotliwość, tym większa dokładność, lecz niestety zasięg maleje.

Wady:

- mały zasięg (do 10 m),
- skomplikowana infrastruktura [9].

- 2) Wi-Fi jest technologią transmisji danych, której zasięg to dziesiątki metrów. Początkowo Wi-Fi nie była wykorzystywana jako technika RTLS. Dlatego standar-

---

<sup>6</sup> RTLS – system lokalizacji w czasie rzeczywistym

dowa sieć przedstawia informacje tylko z dokładnością do punktu dostępu. Dla zwiększenia dokładności wykorzystuje się RSSI<sup>7</sup>.

Zalety:

- duże rozpowszechnienie,
- tania infrastruktura.

Wady:

- dla zwiększenia dokładności potrzebna jest duża gęstość rozmieszczenia stacji bazowych,
- obciążenia kanałów radiowych [18].

- 3) WiMax pracuje w dwóch pasmach częstotliwościowych. Pasmo 2-11 GHz wykorzystywane jest do połączenia stacji bazowej z klientem, a pasmo 10-66 GHz – do transmisji między stacjami bazowymi na duże odległości. Technologia ta, również jak i Wi-Fi, początkowo nie była przystosowana dla stosowania w systemie RTLS.

Zalety:

- duże zasięg (kilka kilometrów),
- duża przepustowość,
- niezawodność.

Wady:

- drogi sprzęt i obsługa,
- mała dokładność [22].

- 4) ZigBee jest standardem wysokopoziomowych protokołów łączności, który wykorzystuje cyfrowe transceivery małej mocy, oparte na standardzie IEEE 802.15.4. Przeznaczony jest dla urządzeń, które wymagają zagwarantowania bezpieczeństwa transmisji danych przy niewielkich prędkościach i są zasilane z baterii.

Zalety:

- obsługuje sieci typu peer-to-peer, drzewo, gwiazda, siatki (mesh),
- istnieje możliwość wyboru algorytmu trasowania w zależności od wymagań aplikacji i stanu sieci,
- prosta obsługa i modernizacja,
- mały pobór mocy.

Wady:

- mała prędkość transmisji danych [18].

---

<sup>7</sup> RSSI – wskaźnik mocy odbieranego sygnału

- 5) MiWi jest bezprzewodowym protokołem, opracowanym przez firmę Microchip, który jest stosowany do budowy sieci radiowych z transmisją danych na niewielkich odległościach. W rzeczywistości jest uproszczonym odpowiednikiem ZigBee.

Zalety:

- tania alternatywa dla stosu protokołów ZigBee,
- idealne rozwiązanie dla tanich urządzeń z ograniczoną pamięcią,
- możliwość szyfrowania wiadomości,
- obsługuje sieci typu siatki (mesh), peer-to-peer i inne topologie.

Wady:

- zamknięta technologia,
- konieczność zainstalowania dodatkowego oprogramowania,
- droga obsługa [22].

Satelitarne metody nawigacji nie są brane pod uwagę, gdyż nie będą działały pod powierzchnią ziemi, np. w kopalni.

*Tabela 6.1 Porównanie technik radiolokacji dla zastosowania w systemach lokalizacji*

	<b>UWB</b>	<b>Wi-Fi</b>	<b>WiMax</b>	<b>ZigBee</b>	<b>MiWi</b>
Koszty infrastruktury	średnie	małe	duże	małe	małe
Koszty obsługi	średnie	średnie	duże	małe	małe
Koszty montażu	duże	średnie	duże	małe	małe
Zasięg	do 40 m	do 100 m	do 5 km	do 300 m	do 300m
Dokładność	do 0,1 m	do 5 m	do 50 m	do 2 m	do 3 m
Zakres używanych częstotliwości	3-10 GHz	2,4 GHz, 5 GHz	2-66 GHz	868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz, 6 GHz	2,4 GHz
Przepustowość	do 480 Mbit/s	802.11ac: do 6,77 Gbit/s	do 1Gbit/s	do 250 kbit/s	do 250 kbit/s

W tabeli 6.2 przedstawiono porównanie bezprzewodowych technologii BLE, Wi-Fi oraz ZigBee pod kątem zastosowania w systemach lokalizacji.

*Tabela 6.2. Porównanie bezprzewodowych technologii BLE, Wi-Fi oraz ZigBee dla lokalizacji w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie 1 – oznacza spełnienie kryterium porównawczego, 2 – oznacza częściowe spełnienie, a 3 – oznacza brak spełnienia kryterium*

	BLE	Wi-Fi	ZigBee
Cena	1	2	2
Zasięg	2	1	2
Niezawodność	1	2	2
Pobór mocy	1	3	1
Łatwy w użyciu	1	1	2
Bezpieczeństwo	2	1	2
Ekosystem	1	1	3

Podczas tworzenia koncepcji systemu, mimo innych metod lokalizacji, wybrano BLE, gdyż ta technologia wygląda bardzo obiecująco. Od dwóch lat powstaje coraz więcej systemów, w których wykorzystywana jest komunikacji radiowa Bluetooth Smart.

## 7. Prototyp urządzenia dla komunikacji bezprzewodowej

Prototyp urządzenia wykonano korzystając z komputera jednoukładowego Raspberry Pi 3, który przedstawiono na rys. 7.1. Posiada on wbudowane moduły Wi-Fi oraz Bluetooth Smart. Na urządzeniu zainstalowano system operacyjny Raspbian Jessie.

Ze względu na obecność niezbędnych interfejsów, jako prototyp urządzenia elektronicznego do komunikacji bezprzewodowej wybrano gotową platformę. Zaprojektowanie specjalnego urządzenia, które spełniałoby wymagania, zajęłoby zbyt dużo czasu. Ponadto wykonane urządzenie nie posiadałoby tyle modułów jak Raspberry Pi 3. Dzięki systemowi operacyjnemu można, który jest dostępny dla Raspberry Pi, można znacznie szybciej stworzyć wstępną konfigurację systemu oraz przeprowadzić pierwsze testy.



*Rys. 7.1. Raspberry Pi 3 podłączone do sieci do routera*

Na rys. 7.2 przedstawiono zmierzony pobór prądu przez działające Raspberry Pi z włączonym modulem BLE. Wynosi on ok. 270 mA. Oznacza to, że moc elektryczna  $P$  wynosi:

$$P = U * I = 5 * 0,27 = 1,35W, \quad (1)$$



Rys. 7.2. Pobór prądu przez działające Raspberry Pi z włączonym modulem BLE

Na rys. 7.3 i 7.4 przedstawiono sposób podłączenia wyświetlacza do Raspberry Pi.



Rys. 7.3. Wyświetlacz podłączony do Raspberry Pi (widok od strony złącza)



Rys. 7.4. Wyświetlacz podłączony do Raspberry Pi

Na rys. 7.5 przedstawiono Raspberry Pi 3 z podłączonym wyświetlaczem, które jest zasilane magazynem energii (ang. *powerbank*).



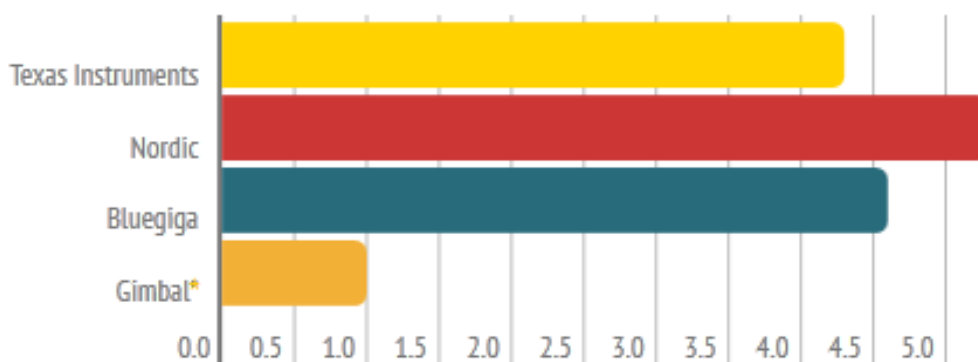


Rys. 7.5. Raspberry Pi 3 z podłączonym wyświetlaczem, które jest zasilane magazynem energii

## 8. Testy funkcjonalne beaconów i modułów Bluetooth Smart

Testy funkcjonalne wykonano głównie pod kątem czasu pracy modułów Bluetooth Smart. W celu wykonania zestawiana czasów pracy skorzystano z testów przeprowadzonych przez różne firmy i instytucje. Również przetestowano czas pracy beaconów firmy Estimote.

Na rys. 8.1 przedstawiono czas pracy modułów Bluetooth Low Energy różnych producentów, zasilanych baterią CR2032 (240 mAh). Z tego porównania można wywnioskować, że czas pracy modułu BLE firmy Gimbal jest najkrótszy. Natomiast czas pracy modułów innych producentów jest porównywalny.



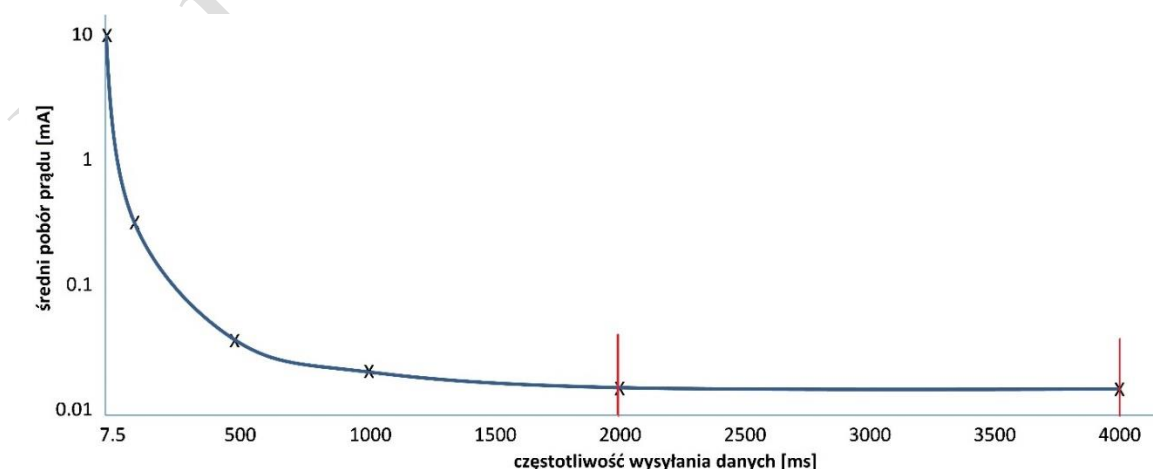
Rys. 8.1. Czas pracy (w miesiącach) modułów Bluetooth Low Energy różnych producentów zasilanych baterią CR2032 [16]

W tabeli 8.1 przedstawiono porównanie czasu pracy różnych modułów na jednej baterii w zależności od modułu i częstotliwości wysyłania danych. Z przedstawionej tabeli można wywnioskować, że dla częstotliwości wysyłania danych 900 ms (czas, który jest optymalny dla ustawienia w kopalni), najdłużej na jednej baterii pracuje moduł firmy Bluegiga.

*Tabela 8.1. Czas pracy różnych modułów na jednej baterii w zależności od modułu i częstotliwości wysyłania danych*

Producent	Częstotliwość wysyłania danych [ms]	Czas pracy [miesiące] Bateria CR2032	Czas pracy [miesiące] Bateria CR2045	Czas pracy [miesiące] Bateria CR2477
Gimbal	100	1	2,5	4
Gimbal	645	-	-	-
Gimbal	900	-	-	-
Nordic	100	1,1	2,8	4,5
Nordic	645	5,4	13,9	22,4
Nordic	900	11	28,7	46,3
Bluegiga	100	0,6	1,6	2,6
Bluegiga	645	5,8	15,1	24,3
Bluegiga	900	13,9	35,8	57,1
Texas Instruments	100	0,7	1,8	2,9
Texas Instruments	645	4,3	11,2	18
Texas Instruments	900	5,6	14,3	23,1

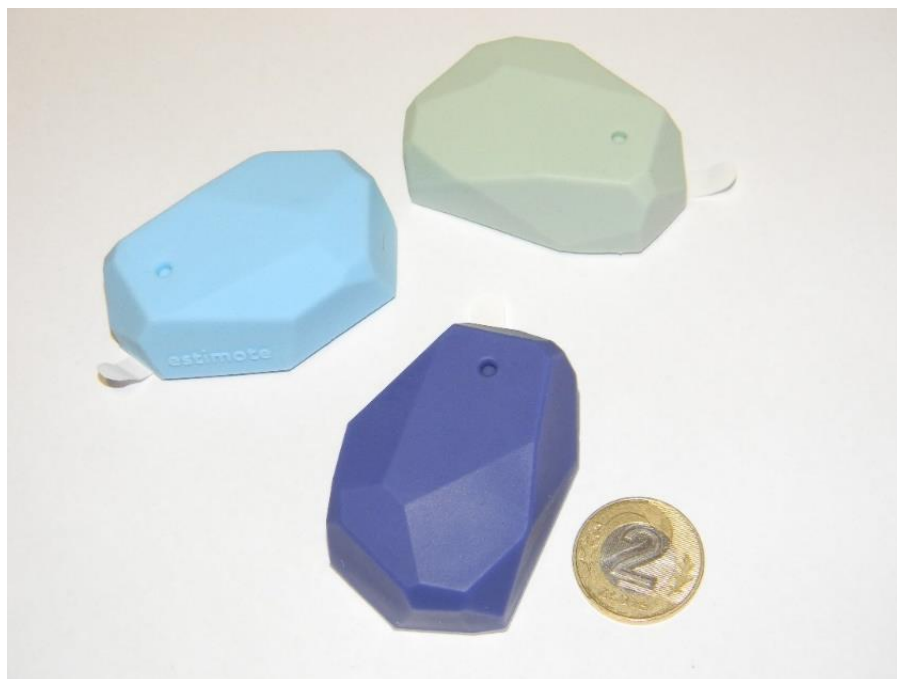
Na rys. 8.2 zamieszczono wykres, który przedstawia średni pobór prądu w funkcji częstotliwości wysyłania danych dla beacons z modułem Texas Instruments CC2540 (moduł komunikacji SensorTaga). Beacon był zasilany baterią o pojemności 230 mAh. Z tego wykresu można wywnioskować, że przy częstotliwości wysyłania danych od 2 do 4 s, pobór prądu jest stały.



*Rys. 8.2. Średni pobór prądu w funkcji częstotliwości wysyłania danych dla beacons z modułem Texas Instruments CC2540 [17]*




Na rys. 8.3 przedstawiono testowane beacons firmy Estimote.



Rys. 8.3. Testowane beacony firmy Estimote

Na rysunkach 8.4-8.6 przedstawiono ustawienia beacons firmy Estimote oraz jego czas pracy na jednej baterii dla stałej mocy sygnału -16 dBm (zasięg ok. 7 metrów) i różnej częstotliwości wysyłania danych.



Battery		34 months
Basic Battery Saving		Off
Smart Battery Saving		Off
Motion Detection		Off
Flip To Sleep		Off
Firmware Version		3.2.0
Hardware Version		D3.4


Name	Sektor 1
Color	Icy Marshmallow
Geo Location	Unknown
Indoor Location	Unknown
Tags	

Broadcast Packets

iBeacon	
Proximity UUID	B9407F30-F5F8-466E-AFF9-25556B57FE6D
Major	1018
Minor	59037
Security UUID	Off
Broadcasting Power	Weak (-16dBm)
Maximum Range	~7m / 22 ft
Advertising Interval	997 ms

Rys. 8.4. Ustawienia i czas pracy beacons dla częstotliwości wysyłania danych co 997 ms




Name	Sektor 1	Battery	17 months
Color	Icy Marshmallow	Basic Battery Saving	Off
Geo Location	Unknown	Smart Battery Saving	Off
Indoor Location	Unknown	Motion Detection	Off
Tags		Flip To Sleep	Off
		Firmware Version	3.2.0
		Hardware Version	D3.4

Broadcast Packets

iBeacon

Proximity UUID	B9407F30-F5F8-466E-AFF9-25556B57FE6D	Broadcasting Power	Weak (-16dBm)
Major	1018	Maximum Range	~7m / 22 ft
Minor	59037	Advertising Interval	497 ms
Security UUID	Off		

Rys. 8.5. Ustawienia i czas pracy beaconsa dla częstotliwości wysyłania danych co 497 ms



Name	Sektor 1	Battery	8 months
Color	Icy Marshmallow	Basic Battery Saving	Off
Geo Location	Unknown	Smart Battery Saving	Off
Indoor Location	Unknown	Motion Detection	Off
Tags		Flip To Sleep	Off
		Firmware Version	3.2.0
		Hardware Version	D3.4

Broadcast Packets

iBeacon

Proximity UUID	B9407F30-F5F8-466E-AFF9-25556B57FE6D	Broadcasting Power	Weak (-16dBm)
Major	1018	Maximum Range	~7m / 22 ft
Minor	59037	Advertising Interval	248 ms
Security UUID	Off		

Rys. 8.6. Ustawienia i czas pracy beaconsa dla częstotliwości wysyłania danych co 248 ms

W tabeli 8.2 przedstawiono porównanie czasu pracy beaconsa dla różnej częstotliwości wysyłania danych. Dla optymalnego czasu wysyłania danych 997 ms i zasięgu 7 m, beacon firmy Estimote może pracować prawie 3 lata.

Tabela 8.2. Porównanie czasu pracy beacons dla różnej częstotliwości wysyłania danych (beacon Estimote)

Beacon	Częstotliwość wysyłania danych [ms]	Zasięg [m]	Czas pracy beacons [miesiące]
Estimote	997	7	34
Estimote	497	7	17
Estimore	248	7	8

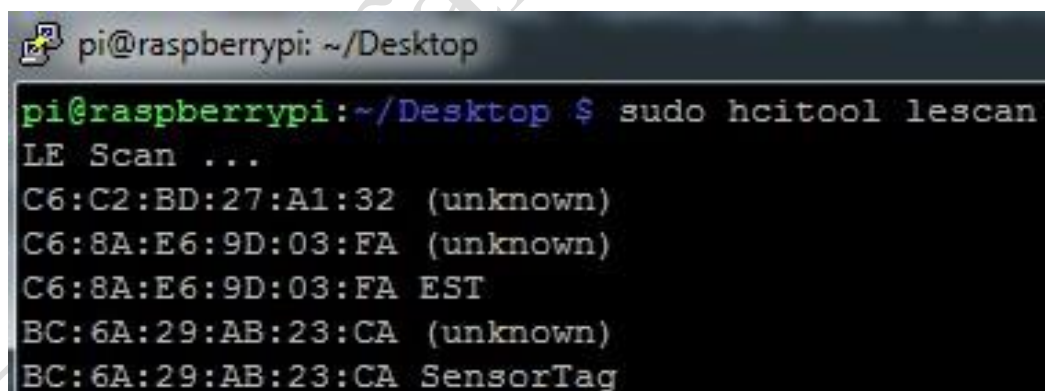
Dla przeprowadzenia następnych testów beacons firmy Estimote zostały ustawione z następującymi parametrami:

- częstotliwość wysyłania danych – 997 ms,
- zasięg – 7 m.

## 9. Realizacja systemu

Realizację systemu zaczęto od skonfigurowania i zainstalowania niezbędnych dla pracy Raspberry Pi 3 modułów.

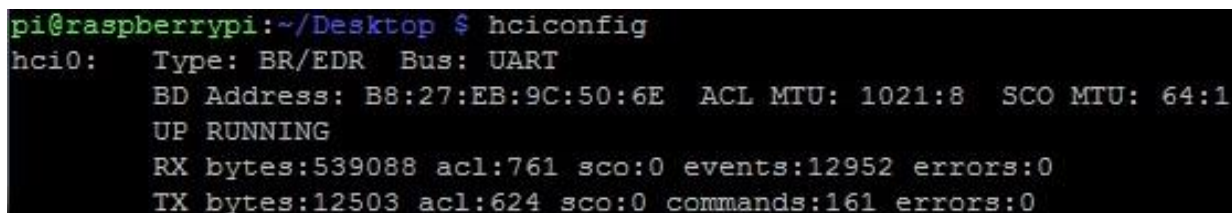
Za pomocą narzędzia hcitool wraz z włączonym modułem Bluetooth Smart można włączyć skanowanie w celu wykrycia urządzeń z uruchomionym modułem BLE oraz ich adresów MAC.



```
pi@raspberrypi: ~/Desktop
pi@raspberrypi:~/Desktop $ sudo hcitool lescan
LE Scan ...
C6:C2:BD:27:A1:32 (unknown)
C6:8A:E6:9D:03:FA (unknown)
C6:8A:E6:9D:03:FA EST
BC:6A:29:AB:23:CA (unknown)
BC:6A:29:AB:23:CA SensorTag
```

Rys. 9.1. Adresy MAC urządzeń z włączonym interfejsem BLE

Na rys. 9.2 przedstawiono ustawienia interfejsu BLE dla Raspberry Pi 3.



```
pi@raspberrypi:~/Desktop $ hciconfig
hci0:   Type: BR/EDR  Bus: UART
        BD Address: B8:27:EB:9C:50:6E  ACL MTU: 1021:8  SCO MTU: 64:1
        UP RUNNING
        RX bytes:539088 acl:761 sco:0 events:12952 errors:0
        TX bytes:12503 acl:624 sco:0 commands:161 errors:0
```

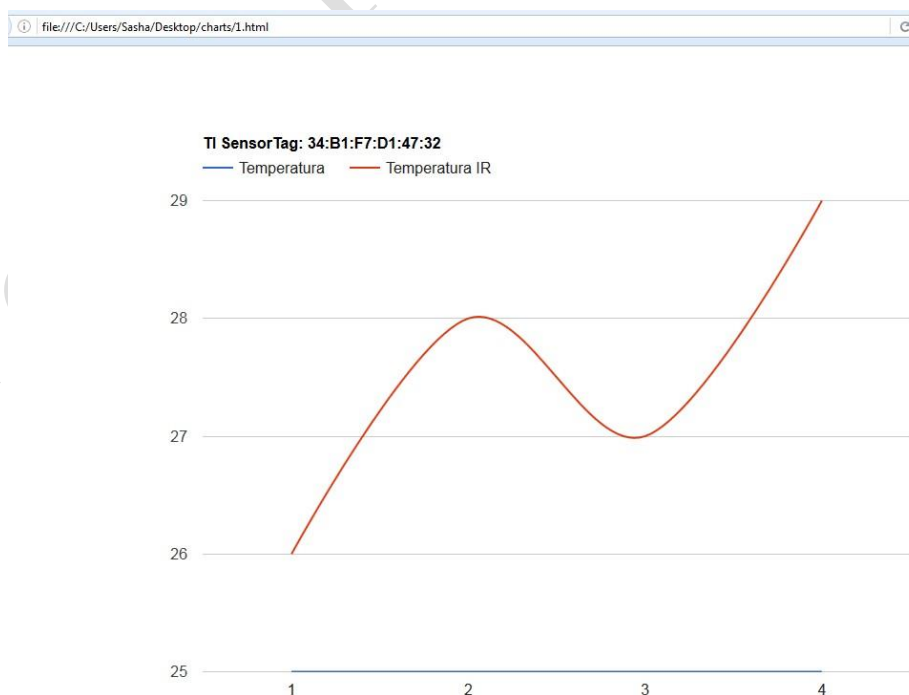
Rys. 9.2. Ustawienia interfejsu BLE dla Raspberry Pi 3



```
** Right button UP
('Temp: ', (23.59375, 25.126853176714008))
** Right button DOWN
** Right button UP
('Humidity: ', (24.01340148925781, 43.01885986328125))
('Barometer: ', (23.985557913780212, 998.0387413165649))
('Accelerometer: ', (0.1875, 0.0625, 0.953125))
** Left button DOWN
('Magnetometer: ', (-15.838623046875, 7.843017578125, 34.027099609375))
** Left button UP
('Gyroscope: ', (-5.98907470703125, -6.73675537109375, 1.91497802734375))
** Left button DOWN
** Left button UP
** Left button DOWN
('Temp: ', (23.5625, 24.00320948679166))
** Left button UP
** Left button DOWN
('Humidity: ', (24.01340148925781, 42.0194091796875))
** Left button UP
('Barometer: ', (23.985557913780212, 998.0908442275963))
** Left button DOWN
** Left button UP
('Accelerometer: ', (0.15625, 0.125, 0.96875))
('Magnetometer: ', (-16.510009765625, 9.1552734375, 33.905029296875))
```

Rys. 9.6. Otrzymane dane z czujników, które posiada SensorTag oraz informacje o wciśniętych przyciskach

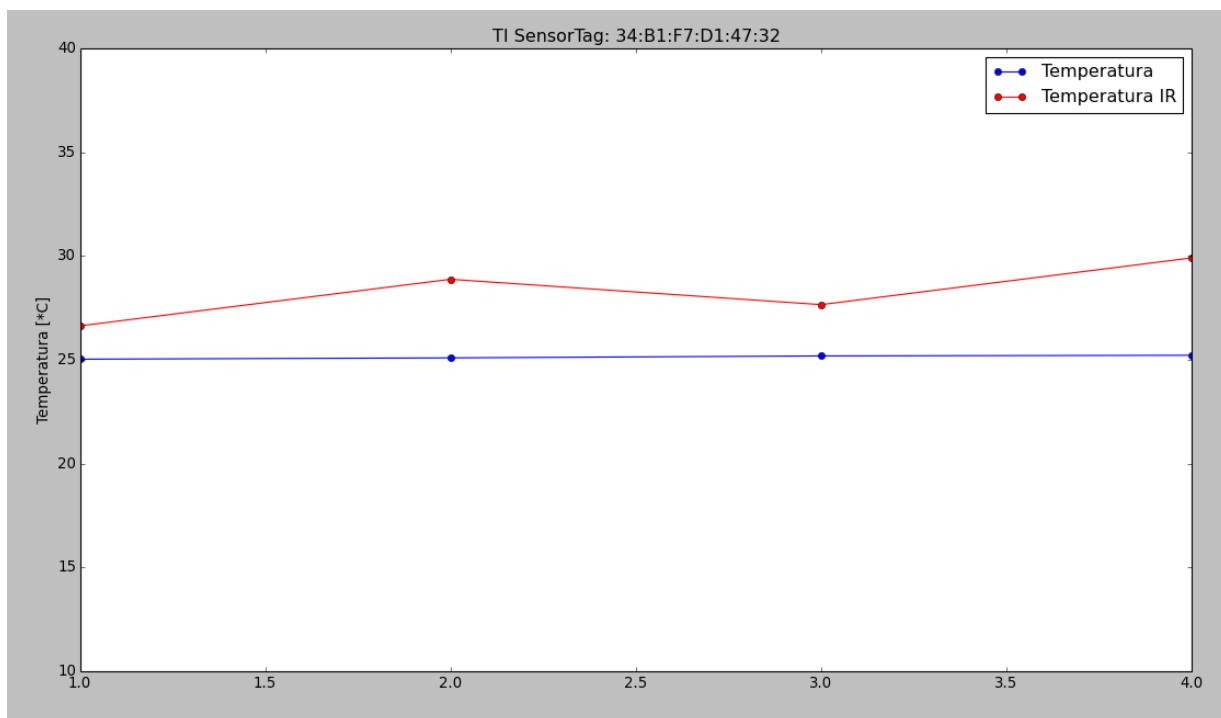
W celu dalszego przetwarzania zebrane dane można zapisywać do różnych formatów plików (\*.txt, \*.csv, \*.log itd.). Następnie wyniki można wyświetlać za pomocą serwisu interaktywnych wykresów Google Charts w przeglądarce (rys. 9.7).



Rys. 9.7. Temperatura odczytana z SensorTaga – wykres w przeglądarce zrobiony za pomocą serwisu Google Charts



Dane te można również przetwarzać za pomocą języka programowania skryptowego Python (rys. 9.8).



Rys. 9.8. Temperatura odczytana z SensorTaga – wykres w Pythonie

Przetworzone dane można również wyświetlać na stronie internetowej, co ułatwi pracę w momencie, kiedy z serwisu będzie korzystało kilka osób. W tym celu na Raspberry Pi uruchomiono serwer WWW (skorzystano z otwartego oprogramowania *RasPiConnectServer*<sup>8</sup>).

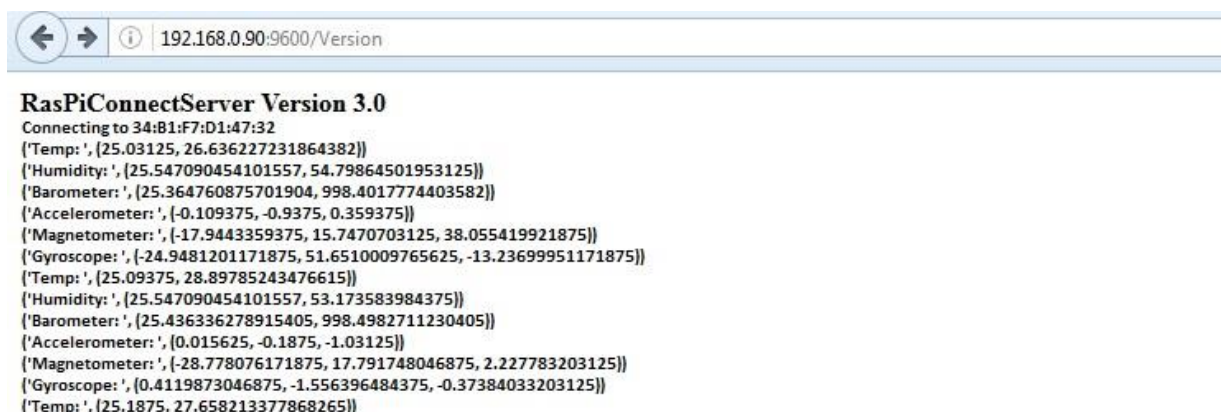
Na rys. 9.9 przedstawiono uruchomiony serwer na Raspberry Pi w konsoli.

```
pi@raspberrypi:~/Desktop/RasPiConnectServer-master/RasPiConnectServer-master $ sudo sh startserver.sh
startserver.sh: 2: cd: can't cd to /home/pi/RasPiConnectServer
numid=3,iface=MIXER,name='PCM Playback Route'
; type=INTEGER,access=rw-----,values=1,min=0,max=2,step=0
: values=1
http://192.168.1.120:9600/
http://0.0.0.0:9600/
192.168.0.124:50236 - - [15/May/2016 17:16:15] "HTTP/1.1 GET /Version" - 200 OK
192.168.0.124:50241 - - [15/May/2016 17:16:39] "HTTP/1.1 GET /Version" - 200 OK
192.168.0.124:50242 - - [15/May/2016 17:16:53] "HTTP/1.1 GET /Version" - 200 OK
192.168.0.124:50242 - - [15/May/2016 17:16:57] "HTTP/1.1 GET /Version" - 200 OK
192.168.0.124:50244 - - [15/May/2016 17:20:09] "HTTP/1.1 GET /Version" - 200 OK
```

Rys. 9.9. Uruchomiony serwer webowy na Raspberry Pi 3

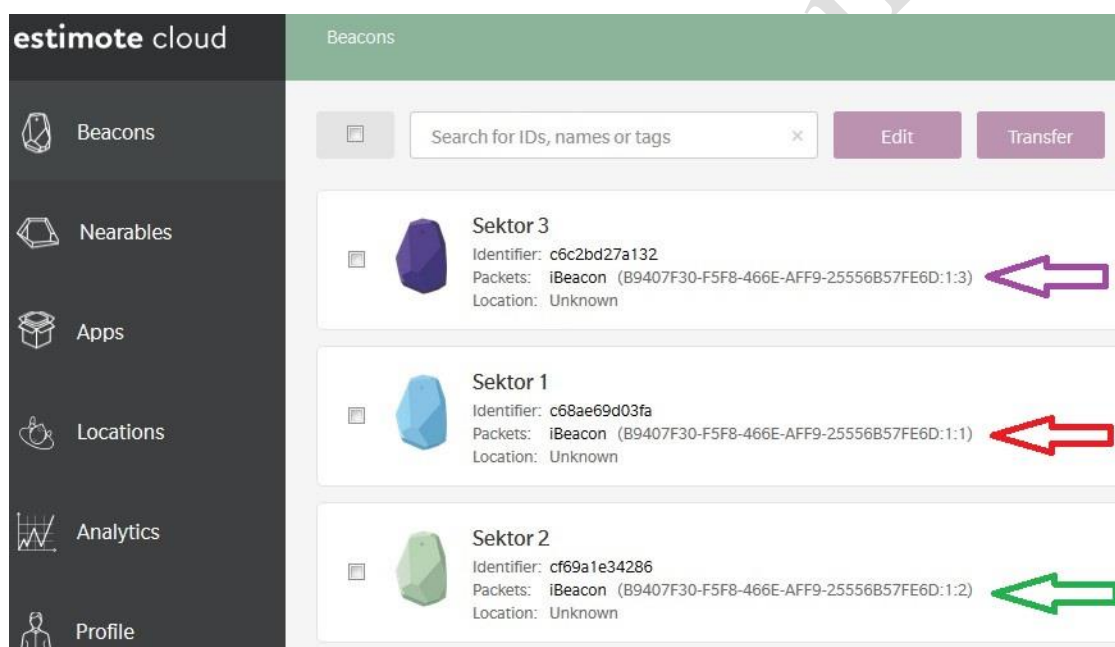
<sup>8</sup> <https://github.com/milocreek/RasPiConnectServer>

Na rys. 9.10 przedstawiono uruchomiony serwer WWW na Raspberry Pi w przeglądarce internetowej wraz z odczytanymi danymi z SensorTaga.



Rys. 9.10. Uruchomiony serwer na Raspberry Pi

Na rys. 9.11 przedstawiono ustawienia UUID, major oraz minor dla beaconów Estimote.



Rys. 9.11. Ustawienia UUID, major oraz minor dla beaconów firmy Estimote

Na rys. 9.12 przedstawiono odczytane dane z beaconów firmy Estimote za pomocą Raspberry Pi. Poszczególne kolory służą do porównania ustawień beaconów wykonanych za pomocą aplikacji firmy Estimote dla systemu Android (rys. 9.11) oraz odczytanych danych w konsoli (kod źródłowy znajduje się w dodatku).



```
ble thread started
-----
cf:69:a1:e3:42:86,b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d,1,2,-91,-87
c6:8a:e6:9d:03:fa,b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d,1,1,-76,-66
c6:8a:e6:9d:03:fa,535403030f180e160a18fa039de68ac6,46081,1,0,-66
cf:69:a1:e3:42:86,b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d,1,2,-91,-86
cf:69:a1:e3:42:86,535403030f180e160a188642e3a169cf,42241,2,0,-85
c6:8a:e6:9d:03:fa,b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d,1,1,-76,-66
c6:8a:e6:9d:03:fa,535403030f180e160a18fa039de68ac6,46081,1,0,-66
c6:c2:bd:27:a1:32,b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d,1,3,-91,-85
c6:c2:bd:27:a1:32,535403030f180e160a1832a127bdc2c6,42241,3,0,-85
```

Rys. 9.12. Parametry beaconów firmy Estimote odczytane za pomocą Raspberry Pi

W tabeli 9.1 przedstawiono odczytane dane z beaconów firmy Estimote za pomocą Raspberry Pi z ich opisem.

Tabela 9.1. Odczytane dane z beaconów firmy Estimote za pomocą Raspberry Pi

Adres MAC	UUID	Major	Minor	P <sub>0</sub> [dBm]	P <sub>d</sub> [dBm]
C6:8A:E6:9D:03:FA	b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d	1	1	-76	-66
CF:69:A1:E3:42:86	b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d	1	2	-91	-86
C6:C2:BD:27:A1:32	b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d	1	3	-91	-85

P<sub>d</sub> inaczej RSSI jest wskaźnikiem mocy odbieranego sygnału. Natomiast moc P<sub>0</sub> jest pomiarem mocy w odległości jednego metra, który może być używany wraz z RSSI do obliczenia i określenia przybliżonej względnej odległości od beacona.

RSSI można wyznaczyć na podstawie równania:

$$P_d = P_0 - 10 * n * \lg\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (2)$$

gdzie:

- P<sub>d</sub> [dBm] – RSSI,
- P<sub>0</sub> [dBm] – moc sygnału urządzenia, zmierzona dla pojedynczej odległości d<sub>0</sub> od urządzenia,
- n – współczynnik strat mocy sygnału przy rozchodzeniu się w przestrzeni (dla powietrza n = 2, zwiększa się przy obecności przeszkód),
- d [m] – odległość od urządzenia do beacona,
- d<sub>0</sub> [m] – odległość od urządzenia do punktu, dla której był wykonywany pomiar mocy sygnału P<sub>0</sub> urządzenia (wybrana jednostkowa (kalibracyjna) odległość, np. 1 m).

Na rys. 9.13 przedstawiono odczytane dane z SensorTagów za pomocą Raspberry Pi.

```
bc:6a:29:ab:23:ca,010000ca23ab296a,48131,513,5,-67
bc:6a:29:ab:23:ca,140a0953656e736f7254616705125000,8195,522,0,-68
34:b1:f7:d1:47:32,0100003247d1f7b1,13315,513,5,-66
34:b1:f7:d1:47:32,140a0953656e736f7254616705125000,8195,522,0,-65
bc:6a:29:ab:23:ca,010000ca23ab296a,48131,513,5,-72
bc:6a:29:ab:23:ca,140a0953656e736f7254616705125000,8195,522,0,-73
34:b1:f7:d1:47:32,0100003247d1f7b1,13315,513,5,-60
34:b1:f7:d1:47:32,140a0953656e736f7254616705125000,8195,522,0,-62
bc:6a:29:ab:23:ca,010000ca23ab296a,48131,513,5,-66
bc:6a:29:ab:23:ca,140a0953656e736f7254616705125000,8195,522,0,-68
```

Rys. 9.13. Parametry dwóch SensorTagów odczytane za pomocą Raspberry Pi

Testowane SensorTagi od Texas Instruments mają następujące adresy MAC:

- *BC:6A:29:AB:23:CA*
- *34:B1:F7:D1:47:32*

Na rys. 9.14 przedstawiono odczytane dane z SmartTaga za pomocą Raspberry Pi.

```
ff:ff:b0:00:14:c7,c71400b0ffff0e020105020a000319c1,771,736,-1,-61
ff:ff:b0:00:14:c7,ffff1211094d4c452d31352020202020,8224,8224,32,-61
ff:ff:b0:00:14:c7,c71400b0ffff0e020105020a000319c1,771,736,-1,-61
ff:ff:b0:00:14:c7,ffff1211094d4c452d31352020202020,8224,8224,32,-61
cf:69:a1:e3:42:86,b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d,1,2,-91,-84
cf:69:a1:e3:42:86,535403030f180e160a188642e3a169cf,42241,2,0,-84
ff:ff:b0:00:14:c7,c71400b0ffff0e020105020a000319c1,771,736,-1,-61
ff:ff:b0:00:14:c7,ffff1211094d4c452d31352020202020,8224,8224,32,-61
c6:8a:e6:9d:03:fa,b9407f30f5f8466eaff925556b57fe6d,1,1,-76,-65
c6:8a:e6:9d:03:fa,535403030f180e160a18fa039de68ac6,46081,1,0,-65
```

Rys. 9.14. Parametry SmartTaga odczytane za pomocą Raspberry Pi

Testowany beacon SmartTag ma następujące adresy MAC:

- *FF:FF:B0:00:14:C7*

W kolejnych krokach należy wykonać następujące zadania:

- uruchomić serwis, który pozwoli podglądać pozycje beaconów na mapie,
- przeprowadzić testy beaconów i urządzenia prototypowego w kopalni,
- skalibrować beacons na podstawie wyników testów,
- zaprojektować urządzenia do komunikacji, zasilane za pomocą akumulatorów, które będą posiadać interfejs Wi-Fi i Bluetooth Smart,
- skonfigurować zaprojektowane urządzenie,
- połączyć system lokalizacji ze stacją bazową MIC,
- przeprowadzić testy końcowe.

## 10. Podsumowanie

Głównym celem pracy było opracowanie koncepcji systemu lokalizacji pracowników w kopalniach. Praca zawiera opis i schemat działania takiego systemu. Opisano zasadę działania technologii Bluetooth Smart, dokonano porównania tej technologii z klasycznym interfejsem Bluetooth. Rozdział 3 został poświęcony przeglądowi oraz porównaniu dostępnych modułów BLE na rynku. Przedstawiono i opisano różne typy beaconów, które można zastosować w kopalniach. Dokonano przeglądu dostępnych alternatywnych technik lokalizacji w pomieszczeniach zamkniętych. W ostatnim rozdziale przedstawiono częściową realizację takiego systemu. Ze względu na ograniczony czas realizacji pracy magisterskiej system nie został ukończony.

Na aktualnym etapie trudno jest stwierdzić jak system będzie zachowywał się w kopalniach. Docelowo planowane są testy w kopalniach. W chwili obecnej nie ma gotowych rozwiązań systemu lokalizacji w kopalniach, który wykorzystuje system oparty na beaconach i komunikuje się za pomocą Bluetooth Low Energy.

W czasie pracy nad systemem wybrano technologię BLE, gdyż jest to nowe i obiecujące rozwiązanie. Bluetooth Smart jest coraz bardziej popularny. Wiele różnych firm pracuje nad nowymi beaconami, dzięki którym można nie tylko lokalizować pracowników lecz również monitorować różne wielkości fizyczne. Dzięki zastosowaniu w kopalniach takich beaconów jak SensorTag firmy Texas Instruments można monitorować warunki, panujące w kopalniach podziemnych. To wszystko daje możliwość stworzenia sieci różnorodnych czujników, co pozwoli na zarządzanie kopalniami w sposób bardziej zautomatyzowany.

## Spis rysunków:

Rys. 2.1. Koncepcja systemu lokalizacji.....	5
Rys. 3.1. Topologia gwiazdy [1].....	6
Rys. 3.2. Porównanie czasu pracy modułu BLE na baterii oraz szybkości transmisji dla klasycznej technologii Bluetooth, Bluetooth Low Energy oraz ZigBee [2] .....	7
Rys. 3.3. Schemat współpracy między urządzeniami typu single-mode, dual-mode i klasycznymi urządzeniami Bluetooth [3] .....	7
Rys. 3.4. Strukturę pakietu danych BLE [3] .....	8
Rys. 3.5. Stos protokołu Bluetooth Low Energy [3] .....	8
Rys. 3.6. Częstotliwości radiowe wykorzystywane przez Bluetooth Smart oraz odpowiadające im kanały fizyczne [5] .....	9
Rys. 3.7. Częstotliwości radiowe wykorzystywane przez Bluetooth Smart i bezprzewodową sieć lokalną [7].....	10
Rys. 5.1. Moc z jaką beacon nadaje sygnał wraz z zasięgiem [8].....	16
Rys. 5.2. Dostępne na rynku beacons [9] .....	17
Rys. 5.3. Konstrukcja beacons Estimote [10] .....	17
Rys. 5.4. Płytki obwodu drukowanego beacons firmy Estimote, gdzie: nRF51822 – moduł BLE, a 8237 C3H DEA3H - akcelerometr [11] .....	18
Rys. 5.5. Maksymalny zasięg beacons firmy Estimote [12] .....	18
Rys. 5.6. Beacon Estimote przyklejony na ścianie [13] .....	19
Rys. 5.7. Testowane SensorTagi firmy Texas Instruments .....	19
Rys. 5.8. Diagram blokowy SensorTaga [14] .....	20
Rys. 5.9. Przykładowa wizualizacja lokalizacji w pomieszczeniu za pomocą SensorTaga [15].....	20
Rys. 5.10. Testowane SmartTagi .....	21
Rys. 5.11. Konstrukcja oraz płytki obwodu drukowanego SmartTaga, gdzie: ST17H26 – moduł do komunikacji BLE .....	21
Rys. 7.1. Raspberry Pi 3 podłączone do sieci do routera .....	26
Rys. 7.2. Pobór prądu przez działające Raspberry Pi z włączonym modulem BLE .....	27
Rys. 7.3. Wyświetlacz podłączony do Raspberry Pi (widok od strony złącza).....	27
Rys. 7.4. Wyświetlacz podłączony do Raspberry Pi .....	27
Rys. 7.5. Raspberry Pi 3 z podłączonym wyświetlaczem, które jest zasilane magazynem energii.....	28

<i>Rys. 8.1. Czas pracy (w miesiącach) modułów Bluetooth Low Energy różnych producentów zasilanych baterią CR2032 [16] .....</i>	<i>28</i>
<i>Rys. 8.2. Średni pobór prądu w funkcji częstotliwości wysyłania danych dla beacona z modulem Texas Instruments CC2540 [17] .....</i>	<i>29</i>
<i>Rys. 8.3. Testowane beacony firmy Estimote .....</i>	<i>30</i>
<i>Rys. 8.4. Ustawienia i czas pracy beacona dla częstotliwości wysyłania danych co 997 ms .....</i>	<i>30</i>
<i>Rys. 8.5. Ustawienia i czas pracy beacona dla częstotliwości wysyłania danych co 497 ms .....</i>	<i>31</i>
<i>Rys. 8.6. Ustawienia i czas pracy beacona dla częstotliwości wysyłania danych co 248 ms .....</i>	<i>31</i>
<i>Rys. 9.1. Adresy MAC urządzeń z włączonym interfejsem BLE .....</i>	<i>32</i>
<i>Rys. 9.2. Ustawienia interfejsu BLE dla Raspberry Pi 3 .....</i>	<i>32</i>
<i>Rys. 9.3. Fragment noty katalogowej z atrybutami serwera GATT SensorTaga .....</i>	<i>33</i>
<i>Rys. 9.4. Odczyt temperatury SensorTaga za pomocą programu do zarządzania atrybutami GATT .....</i>	<i>33</i>
<i>Rys. 9.5. Otrzymane dane z czujników, które posiada SensorTag .....</i>	<i>33</i>
<i>Rys. 9.6. Otrzymane dane z czujników, które posiada SensorTag oraz informacje o wciśniętych przyciskach .....</i>	<i>34</i>
<i>Rys. 9.7. Temperatura odczytana z SensorTaga – wykres w przeglądarce zrobiony za pomocą serwisu Google Charts .....</i>	<i>34</i>
<i>Rys. 9.8. Temperatura odczytana z SensorTaga – wykres w Pythonie .....</i>	<i>35</i>
<i>Rys. 9.9. Uruchomiony serwer webowy na Raspberry Pi 3 .....</i>	<i>35</i>
<i>Rys. 9.10. Uruchomiony serwer na Raspberry Pi .....</i>	<i>36</i>
<i>Rys. 9.11. Ustawienia UUID, major oraz minor dla beaconów firmy Estimote .....</i>	<i>36</i>
<i>Rys. 9.12. Parametry beaconów firmy Estimote odczytane za pomocą Raspberry Pi .....</i>	<i>37</i>
<i>Rys. 9.13. Parametry dwóch SensorTagów odczytane za pomocą Raspberry Pi .....</i>	<i>38</i>
<i>Rys. 9.14. Parametry SmartTaga odczytane za pomocą Raspberry Pi .....</i>	<i>38</i>



## Spis tabel

<i>Tabela 3.1 Porównanie klasycznej technologii Bluetooth oraz Bluetooth Low Energy .....</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 4.1. Dostępne na rynku moduły BLE.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 5.1. Porównanie formatu iBeacon i Eddystone.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 5.2. Przykładowa konfiguracja beaconów .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 5.3. Porównanie cen oraz dostępności testowanych beaconów .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 5.4. Wymagania wobec beaconów dla systemu lokalizacji w kopalniach, gdzie 1 – istotna funkcja, 2 – pożądana funkcja, 3 – opcjonalna funkcja .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 6.1 Porównanie technik radiolokacji dla zastosowania w systemach lokalizacji..</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 6.2. Porównanie bezprzewodowych technologii BLE, Wi-Fi oraz ZigBee dla lokalizacji w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie 1 – oznacza spełnienie kryterium porównawczego, 2 – oznacza częściowe spełnienie, a 3 – oznacza brak spełnienia kryterium .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 8.1. Czas pracy różnych modułów na jednej baterii w zależności od modułu i częstotliwości wysyłania danych .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 8.2. Porównanie czasu pracy beaconsa dla różnej częstotliwości wysyłania danych (beacon Estimote).....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 9.1. Odczytane dane z beaconów firmy Estimote za pomocą Raspberry Pi.....</i>	<i>37</i>

## Bibliografia:

- [1] Wikimedia editors. Topologia gwiazdy. [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Topologia\\_gwiazdy1.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Topologia_gwiazdy1.svg)
- [2] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
<http://elektronikab2b.pl/technika/25627-bluetooth-low-energy---w-kierunku-internetu>
- [3] Gomez, C, Oller, J, & Paradells, J 2012, "Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology", Sensors (14248220), 12, 9, s. 11734-11753
- [4] Wikimedia editors. 2010 Copiapó mining accident. [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/2010\\_Copiapó\\_mining\\_accident](http://en.wikipedia.org/wiki/2010_Copiapó_mining_accident), 2014
- [5] M. Collotta, G. Pau, "Bluetooth for Internet of Things: A fuzzy approach to improve power management in smart homes", Computers and Electrical Engineering 44 (2015), s. 137–152
- [6] Materiały firmy Estimote. [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem: <http://estimote.com/>
- [7] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
<http://www.intuit.ru/studies/courses/12175/1168/lecture/19592?page=5>
- [8] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
<http://habrahabr.ru/company/navigine/blog/269195/>
- [9] Materiały konferencyjne Ewiada Kardawa „Google IoT. Physical Web. Beacons”
- [10] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
<http://estimote.com/assets/gfx/press/press-beacon-product-7.c100be10.jpg>
- [11] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
<http://makezine.com/2014/01/03/reverse-engineering-the-estimote/>
- [12] Instrukcja obsługi beaconów firmy Estimote. [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
<http://developer.estimote.com/>
- [13] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:  
<http://estimote.com/images/estimote-beacon-icy-marshmallow.jpg>
- [14] Wikipedia Texas Instruments, SensorTag. [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:

[http://processors.wiki.ti.com/images/7/7a/Bluetooth\\_SensorTag\\_block\\_diagram.png](http://processors.wiki.ti.com/images/7/7a/Bluetooth_SensorTag_block_diagram.png)

[15] Wikipedia Texas Instruments, SensorTag.[Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:

[http://processors.wiki.ti.com/images/9/95/Location\\_with\\_iBeacon\\_screen.png](http://processors.wiki.ti.com/images/9/95/Location_with_iBeacon_screen.png)

[16] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:

<http://habrahabr.ru/company/navigine/blog/269195/>

[17] [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:

<http://www.intuit.ru/studies/courses/12175/1168/lecture/19592?page=6>

[18] Smart Card Alliance. „Bluetooth Low Energy (BLE) 101: A Technology Primer with Example Use Cases” [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem:

<https://d3nrwezfhbhhm.cloudfront.net/pdf/BLE101-FINAL-053014.pdf>

[19] Texas Instruments. Nota katalogowa z atrybutami serwera GATT “*SensorTag attribute table*”

[20] Texas Instruments. “*CC2540 and CC2541 Bluetooth low energy Software Developer’s. Reference Guide*”

[21] Apple Inc. “Getting Started with iBeacon”. [Dostęp: 15 maja 2016], dostępny w Internecie pod adresem: <https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>

[22] Libelium. “Bluetooth Low Energy. Networking guide”

[23] Roman Czajkowski, Wojciech Nowakowski „iBeacons – mobilne usługi lokalizacyjne”, DOI: 10.15199/13.2015.4.9

[24] Silicon Labs. “Developing Beacons with Bluetooth Low Energy Technology”

[25] Ramsey Faragher and Robert Harle, “Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons”, IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 33, no. 11, 2015

[26] Hangki Joh, Intae Ryoo, “A hybrid Wi-Fi P2P with bluetooth low energy for optimizing smart device’s communication property”

[27] John Leonard, “IPv6 Over Bluetooth Smart Lays IoT Foundations”