

Niskoenergetyczne bezprzewodowe personalne sieci sensorowe

Streszczenie. W artykule przedstawiono dwa spośród szerokiej gamy protokołów bezprzewodowych, personalnych sieci sensorowych – ANT/ANT+ oraz Smart Bluetooth (BLE). Protokoły te należą obecnie do najpowszechniej używanych, a ich popularność jest związana z faktem, iż większość urządzeń mobilnych (tabletów i smartfonów) jest wyposażona w interfejsy obsługujące te standardy. Skoncentrowano się na porównaniu obu protokołów oraz przedstawianiu struktury systemu monitoringu aktywności węzła sieci, opartego na uniwersalnym module transmisyjnym BLE/ANT.

Abstract: In the paper two from many different personal wireless sensor networks standards, namely ANT/ANT+ and Smart Bluetooth (BLE) are presented. Both are currently most popular and it is because vast majority of mobile devices (smartphones and tablets) are equipped with interfaces supporting this standards. Emphasis is put on comparative study of both protocols and description of activity monitoring system proposal based on universal BLE/ANT transmission module. **Personal wireless sensor networks standards ANT/ANT+ and Smart Bluetooth**

Słowa kluczowe: Bezprzewodowe sieci sensorowe, bezprzewodowe sieci personalne, Bluetooth Low Energy, ANT

Keywords: Wireless Sensor Networks, Wireless Personal Networks, Bluetooth Low Energy, ANT

Wprowadzenie

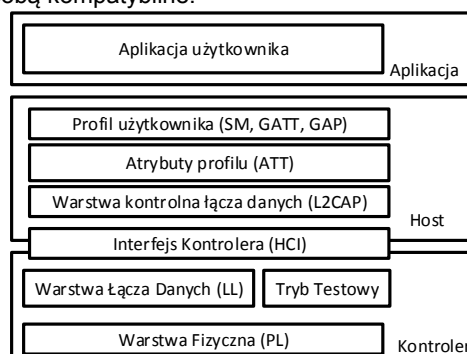
Bardzo popularne obecnie urządzenia sensoryczne, wykorzystywane do realizacji różnego typu pomiarów i dostarczające bezprzewodowo informacji do systemów nadrzędnych, często wymagają wykorzystania zasilania baterijnego. Ponieważ z punktu widzenia użyteczności funkcjonalnej powinny one działać w sposób nieprzerwany (nie wymagający wymiany baterii) jak najdłużej, bardzo istotne staje się opracowanie i wykorzystanie protokołów transmisji danych, zoptymalizowanych pod względem zużycia energii. Zdefiniowano wiele różnorodnych protokołów (często dla konkretnych zastosowań), które wykorzystywane są do tworzenia bezprzewodowych sieci sensorowych. Większość z nich ma jednak jedną podstawową wadę. Wprowadzenie odczytanych danych do sieci ogólnodostępnej lub wizualizacja odczytanych wyników na urządzeniach przenośnych, związane są z koniecznością stworzenia dedykowanych, sprzętowych interfejsów transmisyjnych, które muszą być dołączane jako elementy zewnętrzne do urządzeń typu komputery, tablety czy smartfony. Ponadto niezbędne jest wykonanie oprogramowania dla potrzeb sterowania takim interfejsem. Oba te czynniki znacznie opóźniają proces powstawania nowych systemów, często decydują również o nieopłacalności ekonomicznej projektu. Wady tej nie posiadają dwa protokoły komunikacyjne: Smart Bluetooth oraz ANT. Na rynku dostępne są obecnie zarówno tablety jak i smartfony wyposażone standardowo w te właśnie interfejsy komunikacyjne. Stwarza to możliwość, łatwego i szybkiego podłączenia szeroko rozumianych układów sensorycznych do urządzeń mobilnych powszechnego użytku. Obydwa protokoły wykorzystują popularne pasmo ISM-2.4GHz i optymalizują poziom zużycia energii, poprzez redukcję czasu aktywnej pracy urządzeń transmisyjnych, wyłącznie do okresów nadawania i odbioru sygnałów, różnią się jednak znacząco w sposobie realizacji procesu transmisji.

W pracy przedstawiono porównanie protokołów Smart Bluetooth i ANT, w kategoriach przepustowości, zakresu transmisji oraz energooszczędności urządzeń. Przedstawiono ponadto przykłady układów scalonych umożliwiających realizację transmisji zgodnej z tymi standardami oraz opracowywanego aktualnie przez autorów urządzenia do detekcji ruchu i położenia obiektu, wyposażonego w uniwersalny interfejs BLE/ ANT.

Protokół Bluetooth Low Energy

Protokół Bluetooth należy do najwcześniejszych protokołów komunikacji bezprzewodowej, dedykowanych

do komunikacji pomiędzy centralnym urządzeniem komputerowym (ang. Host) a urządzeniami peryferyjnymi (ang. Peripheral Device). Jego wykorzystanie od wielu lat jest powszechne, jednakże kierunek rozwoju i ewolucji protokołu zmierzał przede wszystkim do zwiększenia prędkości, przepustowości i zasięgu transmisji (kolejne wersje protokołu – Bluetooth Core 2.1 Enhanced Data Rate, Bluetooth Core 3.0 High Speed). Dopiero specyfikacja Bluetooth 4.0, opracowana w 2010r. zawiera opis modyfikacji protokołu, gwarantujących niski pobór prądu przez układy transmisyjne, nazwanych specyfikacją Bluetooth Low Energy (BLE). Na pierwszy rzut oka różnice pomiędzy protokołem klasycznym a BLE są niewielkie, jednak układy realizujące transmisje w tych standardach nie są ze sobą kompatybilne.



Rys. 1. Struktura stosu Protokołu Bluetooth Low Energy

W specyfikacji BLE opisano stos protokołów transmisyjnych (Rys. 1) definiujący parametry warstwy fizycznej (ang. Physical Layer), warstwy łączy danych (ang. Link Layer) oraz HCI (ang. Host Controller Interface) – interfejsu opisującego połączenie między hostem a kontrolerem (najczęściej realizowane poprzez interfejsy UART, SPI lub USB). W wyższych warstwach zdefiniowano podwarstwę L2CAP (ang. Logical Link Control and Adaptation Protocol), będącą interfejsem pomiędzy warstwami wyższymi i warstwami transmisyjnymi protokołu oraz podwarstwę ATT (ang. Attribute Protocol), która odpowiada za realizację procesu komunikacji pomiędzy węzłami pełniącymi funkcję klienta i serwera za pośrednictwem danego kanału L2CAP. W wyższych warstwach wyróżnia się warstwę SM (ang. Security Manager), która generuje, zarządza i przechowuje klucze szyfrujące oraz warstwę GATT (ang. Generic Attribute Profile), opisującą procedury korzystania z ATT oraz profile Bluetooth i podwarstwę GAP (ang. Generic Access Profile)

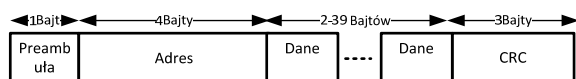
będącą interfejsem między aplikacją a profilami BLE oraz odpowiadającą za wyszukiwanie urządzeń i usług, nawiązywanie i konfigurowanie połączeń oraz kwestie bezpieczeństwa transmisji [1].

Podstawowe różnice pomiędzy wersjami protokołu dotyczą warstwy fizycznej. Bluetooth Low Energy transmituje dane w paśmie ISM 2.4-2.4835 GHz, wykorzystując modulację GFSK (ang. Gaussian Frequency Shift Keying) oraz mechanizm sekwencyjnej zmiany częstotliwości (ang. Frequency Hopping - FH). Pasmo transmisyjne podzielone zostało na 40 kanałów o szerokości 2 MHz. Nominalna prędkość nadawania danych wynosi 1 Mbps, zaś maksymalna przepustowość transmisji sięga 300 kbps. Dzięki zwiększeniu współczynnika modulacji udało się zwiększyć niezawodność transmisji i jednocześnie zasięg transmisji do ponad 100 m w otwartej przestrzeni. Porównanie parametrów transmisyjnych protokołu Bluetooth i BLE przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie cech protokołów Bluetooth i BLE

	Bluetooth	Bluetooth Low Energy
Technika Modulacji	FH	FH
Modulacja	GFSK	GFSK
Współczynnik modulacji	0.35	0.5
Szerokość kanału	1MHz	2MHz
Nominalna prędkość transmisji	1-3Mbps	1Mbps
Przepustowość	0.7-2.1Mbps	<0.3Mbps
Liczba węzłów	7	nielimitowana
Zabezpieczenie	56-128 bitowe	AES 128-bitowy

Ograniczenie zużycia energii uzyskano między innymi poprzez zmodernizowanie procedury parowania urządzeń. Urządzenie, które chce transmitować dane wysyła pakiet inicjujący w jednym z trzech kanałów zgłoszeniowych (ang. Advertising Channel). Jeśli układ centralny odbierze pakiet wysyła do węzła pakiet żądania przyłączenia, zawierający parametry z jakimi realizowana będzie transmisja (min. sekwencję zmian częstotliwości FH) i automatycznie staje się Masterem sieci. Węzeł zgłaszający wysyła potwierdzenia odebrania żądania i automatycznie staje się urządzeniem typu Slave w sieci. Na tym kończy się proces parowania, od tego momentu urządzenia mogą wymieniać dane. Są one transmitowane w postaci ramek o polu danych zmiennej długości. Format ramki protokołu BLE przedstawia Rys. 2.



Rys. 2. Struktura ramki protokołu Bluetooth Low Energy

Protokół ukierunkowany jest na cykliczne transmisje niewielkich ilości informacji (minimalny odstęp pomiędzy ramkami musi wynosić co najmniej 150 us), pomiędzy którymi następuje uśpienie hosta i transmitera, redukujące pobór prądu do zaledwie kilku mikroamperów.

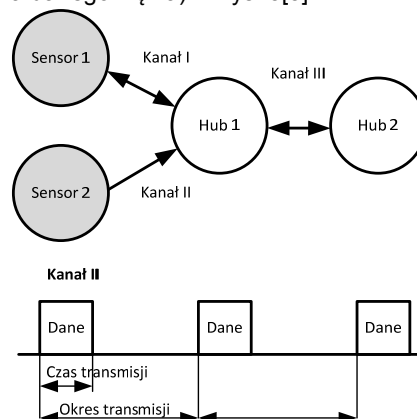
Kolejne modyfikacje protokołu BLE nie zmieniły zasad realizacji transmisji, ale zajęły się ujednolicaniem interfejsu pomiędzy układem transmisji a warstwą aplikacji. Wprowadzono profile użytkownika, ściśle definiujące atrybuty danej klasy węzła i ujednolicające proces wymiany informacji pomiędzy aplikacją i układem transmisyjnym. To właśnie po tych modyfikacjach wprowadzono termin Smart Bluetooth jako „marketingową” nazwę protokołu Bluetooth Low Energy, dedykowanego do zastosowań z nowoczesnymi urządzeniami mobilnymi [2]. Dość duży problem stanowi niekompatybilność omawianych protokołów. Wcześniejsze wersje Bluetooth wykorzystywane są przede wszystkim do komunikacji z

urządzeniami peryferyjnymi, wymagającymi transmisji dużej ilości danych (często też strumieniowania), do czego nie jest przystosowany protokół BLE. Nie opracowano jak dotąd optymalnego rozwiązania. Na rynku dostępne są urządzenia wyposażone w standardowy interfejs Bluetooth, obydwa interfejsy, pracujące niezależnie (ale nie jednocześnie) (ang. Smart Bluetooth Ready Devices) oraz urządzenia wyposażone wyłącznie w interfejsy BLE (ang. Smart Bluetooth Devices) [3][4].

Protokół ANT

Protokół ANT został opracowany przez firmę Dynastream Innovations (obecnie stanowi część firmy Garmin). Firma zajmowała się tworzeniem urządzeń sensorycznych dla zastosowań medycznych i sportowych, stąd wzięły się pierwsze implementacje protokołu. Protokół definiuje warstwę fizyczną, sieciową i transportową, wyższe warstwy wymagają implementacji w aplikacji użytkownika (jeśli zachodzi taka potrzeba).

W warstwie fizycznej protokół działa w paśmie ISM 2.4 GHz, wykorzystując do transmisji kanał radiowy o stałej częstotliwości nośnej i szerokości 1 MHz (możliwe jest wykorzystanie jednego z 125 kanałów radiowych). Dane transmitowane są z maksymalną prędkością 1 Mbps, przy wykorzystaniu modulacji GFSK. Transmisja realizowana jest w tzw. kanale transmisyjnym, który jest jedno lub dwukierunkowym kanałem logicznym utworzonym poprzez mechanizm TDMA (ang. Time Division Multiple Access), definiujący synchroniczną szczelinę czasową, w której węzeł nadaje swoje dane (ilość danych determinuje szerokość czasowa szczeliny oraz okres transmisyjny ustalony dla danego węzła) – Rys. 3[5].

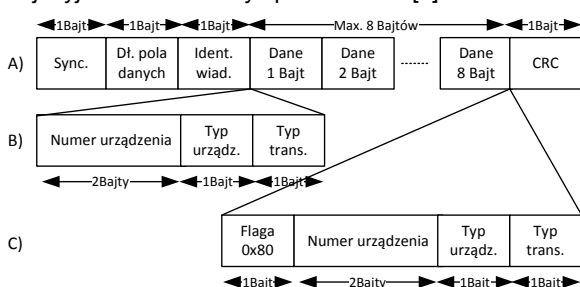


Rys. 3. Struktura sieci i przykładowy kanał transmisyjny protokołu ANT

Transmisja odbywa się z reguły wyłącznie w wyselekcjonowanym wstępnie kanale, ale w przypadku pogorszenia parametrów transmisji kanał może zostać zmieniony. Transmisja realizowana jest w trybie Master-Slave. W sieci musi być co najmniej jeden układ typu Master, który transmituje dane do pojedynczego lub grupy urządzeń Slave. Urządzenie może pełnić różnorodne role w sieci. Przykładowa sieć z Rys. 3 składa się z dwóch urządzeń Master (Sensor 1 i Sensor 2), które odpowiednio w kanałach I i II nadają do urządzenia Slave, którym jest Hub 1. Hub ten jest jednocześnie układem Master, który nadaje w kanale III dane do urządzenia Slave (Hub 2). Topologie połączeń sieciowych mogą być bardzo różnorodne – zaczynając od P2P (ang. Peer to Peer), poprzez topologię gwiazdy i drzewa, aż po nowoczesne struktury typu siatka (ang. mesh). Dane transmitowane są przez urządzenie Master w każdej kolejnej szczelinie czasowej. Zdefiniowano trzy typy danych:

- rozgłoszeniowe (ang. Broadcast) – dane transmitowane do wszystkich urządzeń Slave, nie potwierdzane przez odbiorców,
- dane potwierdzone (ang. Acknowledged) – urządzenie Slave odsyła w kanale zwrótnym potwierdzenie odbioru danych,
- dane o charakterze „wybuchowym” (ang. Burst) – dane przesyłane zazwyczaj w większej ilości w kolejnych szczelinach czasowych, potwierdzone przez odbiorcę, z automatyczną retransmisją w wypadku braku potwierdzenia.

Przed realizacją transmisji urządzenia muszą oczywiście zostać odpowiednio skonfigurowane (musi zostać zdefiniowany numer i klucz sieci, częstotliwość nadawania oraz typ kanału transmisyjnego). Ponadto przeprowadzona musi zostać procedura parowania urządzeń Master-Slave. Wszystkie te czynności wykonywane są jednokrotnie w momencie startu systemu, później podczas pracy układu, pomimo że urządzenie nadaje niewielkie porcje danych i przechodzi w tryb uśpienia (energooszczędny) procedury inicjacyjne nie muszą być powtarzane. [5]



Rys. 4. Struktura ramki podstawowej A) oraz dwóch typów ramek rozszerzonych: dziedzicznej B) i flagowanej C) dla protokołu ANT

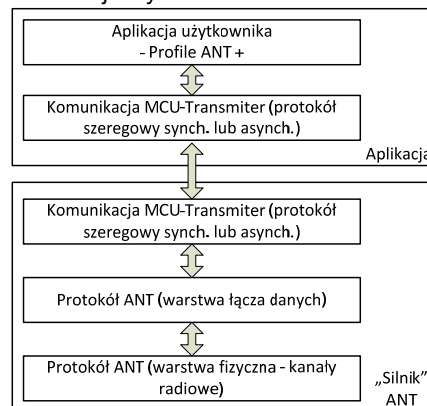
Dane transmitowane są w postaci ramek, w których pole danych może przyjmować rozmiar 1-8 bajtów (Rys. 4). Urządzenia nadają najczęściej w trybie rozgłoszeniowym (co upraszcza proces transmisji), jeśli wykorzystywany jest tryb z potwierdzeniami ramka musi być zmodyfikowana i zawierać pola adresowe, identyfikujące odbiorców. Rozszerzone formaty ramek wykorzystywane są ponadto do przekazywania informacji systemowych. Ramka z flagą 0x40 zawiera znacznik czasowy (ang. Timestamp) wykorzystywany do synchronizacji urządzeń, natomiast ramka z flagą 0x20 przekazuje wartość współczynnika jakości sygnału w kanale (RSSI – ang. Received Signal Strength Indication), wykorzystywaną przez procedurę zmiany kanału transmisyjnego, w przypadku utraty jakości transmisji.

Do podstawowych cech protokołu ANT należą:

- niski pobór mocy,
- bardzo uproszczony protokół komunikacyjny pozwalający jednak na pracę w różnych topologiach,
- wykorzystywane bez licencji (wspólne na całym świecie) pasmo ISM 2,4 GHz,
- transmisje jedno i dwukierunkowe w jednym kanale logicznym,
- możliwość zaadresowania do 2^{32} urządzeń,
- 64-bitowy klucz sieciowy z dodatkową podwarstwę zabezpieczeń definiowanych w warstwie aplikacji.

Ponadto w ostatnich latach protokół ewoluował do standardu nazwanego ANT+. Modyfikacja polega na wprowadzeniu „profilu urządzeń”, określających sposób wysyłania danych. Każdy profil urządzenia ANT+ definiuje szczegółowo zasady transmisji, odpowiednio do danego zastosowania. Określone są ustawienia parametrów kanału, format przekazywanych danych i inne specyficzne mechanizmy komunikacji dla interakcji pomiędzy dwoma

urządzeniami predefiniowanego typu. Implementacja profili stanowi o uniwersalności rozwiązań – zaprojektowany układ w pełni wykorzystujący dany profil będzie współpracował z dowolnym urządzeniem, które zawiera implementację profilu tego samego typu. Strukturę stosu protokołów ANT/ANT+ obrazuje Rys. 5.



Rys. 5. Struktura stosu ANT/ANT+ (dla implementacji opartej o rozdzielone układy hosta i kontrolera transmisji)

Ogólna idea jest następująca: urządzenie ANT+ obsługujące co najmniej jeden z predefiniowanych profili urządzeń ANT+, wykorzystuje klucz ANT+ aby uzyskać dostęp do zarządzanej, ogólnej sieci ANT+.[5]

Porównanie technologii BLE i ANT

Można zaobserwować bardzo liczne podobieństwa pomiędzy protokołami ANT i BLE. Jednakże różnice pomiędzy nimi są bardzo istotne. Obydwa są predysponowane do tworzenia aplikacji charakteryzujących się niskim poborem mocy. Protokół komunikacyjny ANT jest zdecydowanie bardziej uproszczony, co więcej ilość danych dodatkowych protokołu (narrut) jest zminimalizowana. Ponadto możliwe jest realizowanie transmisji w sieciach o różnych topologiach (łącznie z topologią mesh). Bluetooth Low Energy pracować może wyłącznie w topologii gwiazdy.

Tabela 2. Porównanie cech protokołów BLE i ANT

Protokół	Bluetooth	ANT/ANT+
Częstotliwość	2.4-2.483 GHz	2.4-2.483 GHz
Topologie	P2P, gwiazda	P2P, gwiazda, drzewo, siatka
Modulacja	GFSK	GFSK
Szerokość kanału	1 MHz	2 MHz
Protokół	Bardziej złożony niż ANT	Prosty
Przepustowość	<300 kbps	~20 kbps
Zasięg	>50 m	>50 m
Zabezpieczenie	AES 128-bitowy	64-bitowe

Obydwa protokoły wykorzystują popularne pasmo 2.4 GHz i optymalizują poziom zużycia energii, poprzez redukcję czasu aktywnej pracy urządzeń transmisyjnych wyłącznie do okresów nadawania i odbioru sygnałów, różnią się jednak znacząco w sposobie realizacji procesu transmisji.

Rozwiązania układowe

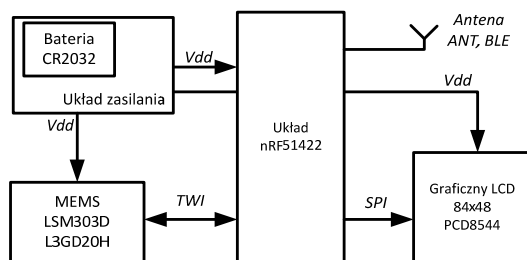
W ostatnich latach wiele firm wprowadziło na rynek swoje układy scalone, realizujące transmisje w standardach BLE i ANT (z zaimplementowanym w formie firmware'u stosem protokołowym). Ponieważ implementacje różnią się od siebie, dla potrzeb porównania efektywności energetycznej wybrano rozwiązania oferowane przez dwie z firm – Texas Instruments i Nordic Semiconductor.

Układ CC2570 to procesor sieciowy pracujący w standardzie ANT/ANT+, wyposażony w synchroniczny (SPI) i asynchroniczny (USART) interfejs komunikacyjny. Porównanie efektywności energetycznej układów zawiera tabela 3. [6][7].

	CC2540	CC2570
Napięcie zasilające	2-3.6 V	2-3.6 V
Odbiornik – tryb aktywny	19.6 mA	23.7 mA
Nadajnik – tryb aktywny	24 mA	25.9 mA
Tryb uśpienia	0.4-235 uA	0.5-1 uA
Czułość odbiornika	-87 dBm	-86 dBm

	nRF8001	nRF24AP2
Napięcie zasilające	1.9-3.6 V	1.9-3.6 V
Odbiornik – tryb aktywny	14.6 mA	17 mA
Nadajnik – tryb aktywny	8.4-12.7 mA	11-15 mA
Pobór prądu pomiędzy transmisjami	2 uA	2 uA
Tryb uśpienia	0.5 uA	0.5 uA
Czułość odbiornika	-87 dBm	-85 dBm

W ofercie firmy NC znajduje się również układ umożliwiający transmisję zarówno BLE jak i ANT (nRF51422). Układ posiada zintegrowany 32-bitowy mikrokontroler ARM Cortex-M0 oraz szereg elementów peryferyjnych – min. przetwornik A/C, trzy układy licznikowe, interfejsy USART, SPI i TWI, czujnik temperatury oraz układ RTC (ang. Real Time Clock). [10] Układ ten został wybrany na potrzebę opracowania urządzenia wyposażonego w dwa czujniki MEMS – akcelerator i żyroskop, dostarczającego w sposób synchroniczny informacji o ruchu i aktualnym położeniu obiektu do aplikacji zaimplementowanej na smartfonie z systemem Android. Ponadto sam układ posiada wbudowany wyświetlacz LCD, pokazujący aktualny czas i temperaturę obiektu. Schemat blokowy opracowywanego urządzenia przedstawiono na Rys. 6.



Dzięki uniwersalnemu interfejsowi komunikacyjnemu możliwe będzie przetestowanie układu pracującego w identycznych warunkach dla dwóch różnych protokołów komunikacji bezprzewodowej.

Oba protokoły komunikacyjne predysponowane są do pracy w układach z niskim poborem energii. Parametry elektryczne układów transmisyjnych są bardzo podobne, jednakże w związku ze zmniejszeniem czasu trwania transmisji pojedynczej ramki oraz znaczącym uproszczeniem protokołów wstępnej inicjalizacji sieci protokół ANT wydaje się być efektywniejszym energetycznie rozwiązaniem.

Autorzy: dr hab. inż. Witold Machowski; dr inż. Jacek Kołodziej; dr inż. Jacek Stępień; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza imienia Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektroniki, al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: [witold.machowski, jacek.kolodziej, jacek.stepien]@agh.edu.pl

- [1] Specification of the Bluetooth System, Covered Core Package, Version: 4.0; The Bluetooth Special Interest Group: Kirkland, WA, USA, 2010
- [2] West, A. Smartphone, the key for Bluetooth low energy technology. [Online] <http://www.bluetooth.com/Pages/Smartphones.aspx>
- [3] Gomez C., Oller J., Paradells J. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology, Sensors (Open Access), 2012
- [4] Bluetooth low energy white paper http://www.litepoint.com/wp-content/uploads/2014/02/Bluetooth-Low-Energy_WhitePaper.pdf
- [5] ANT Message Protocol and Usage. [Online] <http://www.thisisant.com/resources/ant-message-protocol-and-usage.pdf>
- [6] CC2540 Texas Instruments, Bluetooth low energy System-on-Chip
- [7] CC2570 Texas Instruments, Single Channel ANT RF Network Processor
- [8] nRF8001 Nordic Semiconductor, Bluetooth Smart Connectivity IC datasheet
- [9] nRF24AP2 Nordic Semiconductor, Product Specification.
- [10] nRF51422 Nordic Semiconductor, ANT and ANT/Bluetooth Smart multiprotocol SoC