Politechnika Poznańska
Wydział Elektroniki i Telekomunikacji
Katedra Radiokomunikacji

Wojciech Błauciak

Bezprzewodowa komunikacja pomiędzy robotem a komputerem w oparciu o standard Bluetooth

Praca inżynierska
napisana pod kierownictwem
dr hab. inż. Pawła Szulakiewicza, prof. PP

Poznań 2010

Temat
pracy dyplomowej inżynierskiej
nr 18/09/10

Politechnika Poznańska
Wydział Elektroniki i Telekomunikacji
Katedra Radiokomunikacji

Studia stacjonarne inżynierskie
Kierunek: Elektronika i Telekomunikacja
Specjalność: Radiokomunikacja

Wojciech BŁAUCIAK

Tytuł pracy:	**Bezprzewodowa komunikacja pomiędzy robotem a komputerem w oparciu o standard Bluetooth**
Wersja angielska tytułu:	***Wireless communication between computer and robot based on Bluetooth***
Dane wyjściowe:	Opis standardu Bluetooth uzyskany z Internetu oraz artykułów w czasopismach naukowych i w Internecie.
Zakres pracy:	Propozycja i realizacja zastosowania standardu Bluetooth do bezprzewodowej komunikacji pomiędzy komputerem a robotem. Opis standardu, analiza wad i zalet opisywanego zastosowania standardu, opis realizacji systemu, porównanie z innymi rozwiązaniami
Miejsce prowadzenia prac:	**Politechnika Poznańska, Katedra Radiokomunikacji**
Termin oddania pracy:	31.01.2010
Promotor:	Dr hab. inż. Paweł Szulakiewicz, prof. PP
Koreferent:	Dr inż. Robert Kotrys

Zobowiązuję się samodzielnie wykonać pracę w zakresie wyspecyfikowanym wyżej. Wszystkie elementy (m.in. rysunki, tabele, cytaty, programy komputerowe, urządzenia itp.), które zostaną wykorzystane w pracy, a nie będą mojego autorstwa będą w odpowiedni sposób zaznaczone i będzie podane źródło ich pochodzenia.

	Imię i nazwisko	Nr albumu	Data i podpis
Student:	Wojciech Błauciak		

Kierownik Katedry
Radiokomunikacji
prof. dr hab. inż. Krzysztof Wesołowski
Kierownik Katedry

PRODZIEKAN
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ
dr inż. Jan Lamperski
Dziekan

Poznań, 30.09.2009
Miejscowość, data

Spis treści:

1. Wstęp 5
2. Standard Bluetooth i jego zastosowanie 6
2.1 Podstawy transmisji bezprzewodowej 6
2.2 Podstawowe informacje o sieciach bezprzewodowych 9
2.3 Technologia Bluetooth 12
2.4 Wykorzystanie standardu Bluetooth do budowy systemu bezprzewodowej komunikacji robot-komputer 27
3. Realizacja systemu bezprzewodowej komunikacji robot –komputer 36
3.1 Robot 36
3.2 Aplikacja na PC 53
3.3 Komunikacja 54
Rys. 3.19 Format ramki z danymi z czujników robota 55
4. Podsumowanie 56
5. Literatura 58
6. Opis zawartości płyty CD 59

Streszczenie

Pierwsza część teoretyczna pracy obejmuje podstawowe zagadnienia z bezprzewodowej transmisji informacji oraz zagadnienia związane z sieciami bezprzewodowymi. Następnie w dość szczegółowy sposób opisana jest specyfikacja Bluetooth. Ostatnią częścią rozdziału teoretycznego stanowiącą jednocześnie wstęp do części projektowej pracy jest opis zastosowania standardu Bluetooth. Część projektowa pracy obejmuje kompletny opis realizacji systemu bezprzewodowej komunikacji, składającego się z robota mobilnego oraz aplikacji okienkowej dla komputera PC. Opisane zostały założenia projektu oraz budowa mechaniczna i schematy ideowe modułów robota. Wyjaśniony został algorytm działania robota, działania aplikacji okienkowej oraz sposób komunikowania się zbudowanego robota z uruchomioną na komputerze aplikacją. W podsumowaniu zawarte są plany co do dalszej rozbudowy systemu.

Abstract

The first theoretical part of labour includes basic issues from wireless transmission of information’s and issues regard wireless networks. Next, quite detailed, there is described specification of Bluetooth. The last part of theoretical chapter, which is simultaneously introduction to part of design labour, is description about application standard of Bluetooth. The part of design labour embrace complete description about realization of system wireless communication which consists of mobile robot and windows application for PC computer. Guidelines of project, mechanical structure and ideological draft of robot module was described. There is explanation of algorithm action of robot, action of application windows and manner of communication constructed robot with application in computer which is active. Summary includes planes about continued development of system.

1. Wstęp

Temat „Bezprzewodowa komunikacja pomiędzy robotem a komputerem w oparciu o standard Bluetooth” został zaproponowany przez autora pracy-jest on zgodny z zainteresowaniami i tematyką prac prowadzonych w ramach kółka naukowego robotyków, działającego na Politechnice Poznańskiej, którego autor jest członkiem. Od roku 2008 autor pracy reprezentuje Politechnikę Poznańską na ogólnopolskich i międzynarodowych zawodach robotów amatorskich, odnosząc sukcesy.

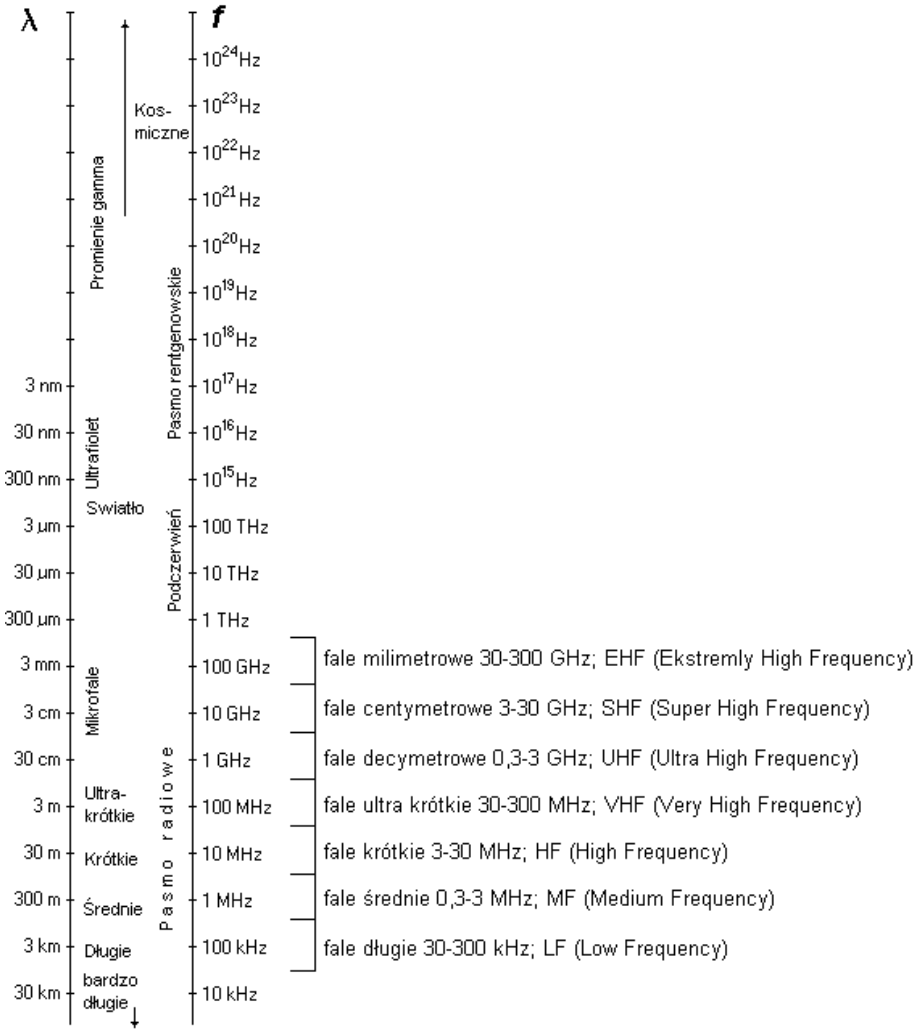
Celem pracy jest zbudowanie kompletnego systemu bezprzewodowej komunikacji pomiędzy robotem a komputerem. W ramach budowanego systemu powstać ma niewielki robot mobilny, wyposażony w szereg czujników oraz aplikacja okienkowa komunikująca się z robotem za pośrednictwem standardu łączności bezprzewodowej Bluetooth. Jednym z założeń jest wymiana informacji pomiędzy elementami systemu odbywająca się w obrębie jednego budynku. Istotnym elementem projektu jest również ciągły monitoring czynności wykonywanych przez robota.

W oparciu o fachową literaturę zostały napisane trzy pierwsze podrozdziały rozdziału teoretycznego, obejmujące zagadnienia z bezprzewodowej transmisji informacji, sieci bezprzewodowych oraz specyfikacji Bluetooth. Ostatnia część tego rozdziału, mówiąca o zastosowaniu standardu Bluetooth została napisana na podstawie materiałów dostępnych na stronach internetowych, głównie materiałów udostępnionych przez firmy zajmujących się wdrażaniem tego standardu. Realizowany projekt powstawał na podstawie pomysłów i wiedzy autora, przy wykorzystaniu profesjonalnych programów typu CAD, a także profesjonalnych środowisk programistycznych.

2. Standard Bluetooth i jego zastosowanie

2.1 Podstawy transmisji bezprzewodowej

Sieć bezprzewodowa to taka, która do transmisji informacji nie wykorzystuje medium transmisyjnego w postaci przewodu (np. miedzianego lub światłowodowego). Jako nośnik informacji wykorzystywane są fale elektromagnetyczne, natomiast jako medium transmisyjne wykorzystywana jest otaczająca nas przestrzeń. Umownie przyjęto, ze wykorzystanie pasma fal elektromagnetycznych w celu przesyłu informacji do częstotliwości około 1THz (długość fali λ = 0,3mm) nazywamy radiokomunikacją. Rysunek 2.1 przedstawia widmo fal elektromagnetycznych oraz jego podział.



Rys. 2.1 Podział widma fal elektromagnetycznych

Prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w próżni równa jest prędkości światła i wyraża się wzorem:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 299792548\ m/s \tag{2.1}$$

gdzie: ε_0 – przenikalność elektryczna próżni $= 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ F/m$

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni $= 4\pi \cdot 10^{-7}\ H/m$

W dalszych rozważaniach i obliczeniach przyjmę, że prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w powietrzu równa jest prędkości światła i po zaokrągleniu wynosi:

$$c = 3\ \cdot 10^{8} m/s \tag{2.2}$$

Długość fali propagującej w próżni określa wzór:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.3}$$

gdzie: λ – długość fali elektromagnetycznej [m]

c – prędkość światła [m/s]

f – częstotliwość fali elektromagnetyczne [Hz]

Z punktu widzenia transmisji sygnałów radiowych istotnym parametrem falowym jest impedancja falowa Z_0 [Ω]. Dla próżni wynosi ona:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\ \Omega \tag{2.4}$$

Z powyższego wzoru wynika, że próżnia może być traktowana jako tor transmisyjny o impedancji falowej równej 377 Ω.

2.1.2 Propagacja fal elektromagnetycznych

Fale elektromagnetyczne w próżni rozchodzą się po liniach prostych z prędkością światła, natomiast fala propagująca w ośrodku niematerialnym (np. w powietrzu) podlega różnym zjawiskom. Najważniejsze z nich to: rozpraszanie, tłumienie, dyfrakcja, refrakcja, wielodrogowość (wielokrotne odbicia) oraz interferencja. Gdy przynajmniej jedna ze stacji jest ruchoma dochodzą dodatkowe zjawiska takie jak zmienność kanału transmisyjnego w czasie oraz zjawisko Dopplera. Przy transmisji na duże odległości należy jeszcze wziąć pod uwagę m.in. strefy Fresnela

i horyzont radiowy. Ponieważ niniejsza praca skupia się na standardzie Bluetooth, w którym zasięg transmisji dochodzi maksymalnie do dwustu metrów rozważania na temat propagacji fal elektromagnetycznych można ograniczyć do rozpatrzenia wpływu tłumienia, wielodrogowości oraz zjawiska Dopplera.

Moc odebrana przez antenę odbiorczą i oddana do dopasowanego odbiornika wyraża się wzorem:

$$P_O = P_N \cdot \frac{G_N G_O \lambda^2}{(4\pi \cdot r)^2} \tag{2.5}$$

gdzie: P_O – moc oddana przez antenę odbiorczą do dopasowanego obciążenia [W]

P_N – moc wypromieniowana przez antenę nadawczą [W]

G_O – zysk energetyczny anteny odbiorczej

G_N – zysk energetyczny anteny nadawczej

λ – długość fali [m]

r – odległość między antenami [m]

Powyższy wzór odnosi się do fal rozchodzących się w próżni, natomiast gdy fala rozchodzi się w ośrodku materialnym ulega tłumieniu. Tłumienie to można uwzględnić dodając do powyższego wzoru współczynnik osłabienia *W*, który zależy od odległości:

$$P_O = P_N \cdot \frac{G_N G_O \lambda^2}{(4\pi \cdot r)^2} \cdot |W|^2 \tag{2.6}$$

Dla uproszczenia obliczeń można powyższe równanie zlogarytmować stronami i pomnożyć przez 10, otrzymamy wtedy wartości wyrażone w decybelach:

$$P_O = P_N + 20log\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} + G_N + G_O + W \tag{2.7}$$

Wpływ wielodrogowości na moc odbieranego sygnału można obliczyć z poniższego wzoru [5]:

$$P_O = P\left|\sum_{i=0}^{L} \frac{a_i}{d_i} e^{j\varphi i}\right|^2 \tag{2.8}$$

gdzie: P – moc odniesienia [W]

L – liczba dróg po jakich sygnał dociera do anteny odbiorczej

i – numer *i-tej* drogi

a_i – łączny współczynnik odbicia dla *i-tej* drogi

d_i – długość *i-tej* drogi [m]

φ_i – faza sygnału docierającego po *i-tej* ścieżce

Ze zjawiskiem Dopplera mamy do czynienia gdy nadajnik i odbiornik oddalają się od siebie lub przybliżają się. Jest to zjawisko często występujące w sieciach bezprzewodowych. Maksymalną częstotliwość (przesunięcie) Dopplera obliczmy ze wzoru [3]:

$$f_{Dmax} = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{c} f_c \tag{2.9}$$

gdzie: v – prędkość z jaką nadajnik oddala się od odbiornika [m/s]

λ – długość fali [m]

f_c – częstotliwość fali [Hz]

2.2 Podstawowe informacje o sieciach bezprzewodowych

2.2.1 Rodzaje sieci bezprzewodowych

Lokalne sieci bezprzewodowe (WLAN – Wireless local area network) jest to rodzaj sieci do ustanawiania bezprzewodowych połączeń lokalnych. WLAN zastępuje sieć LAN w miejscach, w których wykonanie połączenia przewodowego jest niemożliwe lub nieekonomiczne. Wyróżnia się dwa sposoby działania sieci WLAN: jako lokalne sieci bezprzewodowe w których stacje bezprzewodowe łączą się z punktami dostępowymi oraz jako sieci peer-to-peer, w których grupa stacji bazowych łączy się ze sobą na zasadzie każdy z każdym. Prawie wszystkie współczesne sieci WLAN pracują w oparciu o standard IEEE 802.11 w ogólnodostępnym paśmie 2,4GHz oraz rzadziej 5GHz.

Miejskie sieci bezprzewodowe (WMAN – Wireless Metropolitan Area Network) budowane są głównie w obrębach dużych aglomeracji i pozwalają na ustanawianie połączeń między wieloma budynkami. Sieci te uzupełniają sieci przewodowe zwiększając ich niezawodność i przepustowość. W sieciach tych do transmisji wykorzystuje się fale radiowe w paśmie wysokich częstotliwości (w Europie 26-29GHz), a także podczerwień lub lasery.

Regionalne sieci bezprzewodowe (WRAN – Wireless Regional Area Network) są stosunkowo nową technologią, stanowią uzupełnienie innych sieci bezprzewodowych, pokrywających dany obszar. Zazwyczaj oferują bardzo dużą szybkość transmisji oraz duży zasięg. Dzięki specyficznej budowie sieci WRAN możliwe jest udostępnienie za jej pomocą oprócz dostępu do Internetu, transmisji telewizyjnej oraz innych usług multimedialnych.

Rozległe sieci bezprzewodowe (WWAN – Wireless Wide Area Network) są to sieci obejmujące swoim zasięgiem dużą liczbę komputerów na rozległym obszarze (np. wiele miast, kraj). Głównie służą do łączenia ze sobą odległych sieci WLAN, wykorzystują w tym celu rozbudowaną sieć anten naziemnych oraz satelity. Połączenia w sieciach WWAN realizowane są przy pomocy różnych technologii: np. GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA.

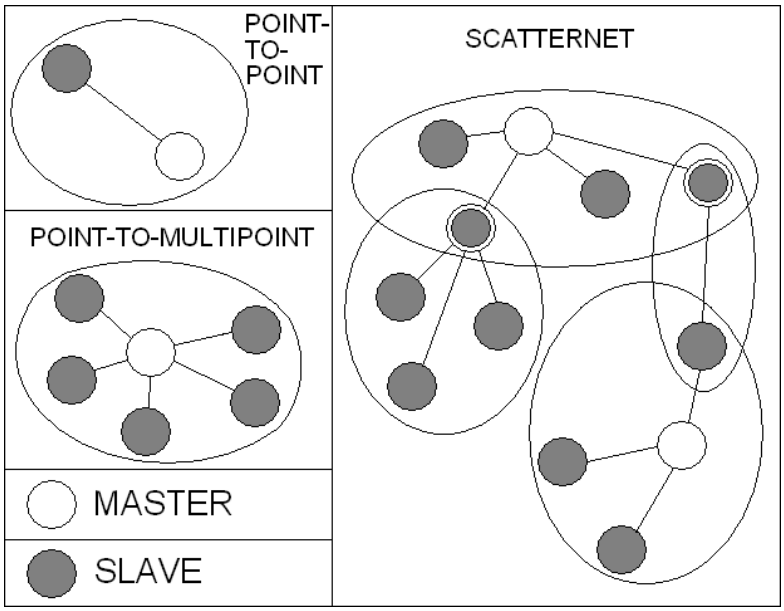
Osobiste sieci bezprzewodowe (WPAN – Wireless Personal Area Network) jest to rodzaj sieci do ustanawiania natychmiastowych połączeń między przenośnymi urządzeniami m.in. telefonami komórkowymi, komputerami przenośnymi, urządzeniami peryferyjnymi. Szybkość transmisji danych jest znacznie większa w porównaniu z innymi rodzajami mobilnych sieci bezprzewodowych ale ich zasięg jest bardzo ograniczony. Obecnie w sieciach WPAN stosuje się dwie technologie: Bluetooth oraz technologię podczerwieni. Standard Bluetooth obecnie wypiera podczerwień z zastosowań w sieciach osobistych dzięki możliwości połączenia więcej niż dwóch urządzeń jednocześnie oraz brakowi konieczności bezpośredniej widzialności między urządzeniami. Większość osobistych sieci bezprzewodowych wykorzystujących standard Bluetooth ma zasięg do kilku metrów, ale standard ten pozwala również na połączenia o zasięgu powyżej stu metrów. Standaryzacją bezprzewodowych sieci osobistych zajmuje się Grupa Robocza 802.15 WPAN^{TM}.

2.2.2 Topologie sieci bezprzewodowych

W sieciach bezprzewodowych wyróżnia się dwie główne topologie: topologię gwiazdy oraz topologię siatki. Najczęściej występującym rodzajem sieci bezprzewodowej jest sieć na bazie topologii gwiazdy. W sieci tej stacje klienckie dołączone są do punktu dostępowego i cała transmisja realizowana jest za jego pośrednictwem. Sieć taka może być łatwo rozbudowywana poprzez łączenie ze sobą kilku punktów dostępowych. W sieci opartej na topologii siatki stacje klienckie połączone są ze sobą na zasadzie każdy z każdym. Tego typu sieć wykorzystuje się do

budowy sieci tymczasowych, a transmisja realizowana jest na podstawie informacji o sieci które posiada każda ze stacji.

W standardzie Bluetooth mogę występować trzy rodzaje połączeń: point-to-point, point-to-multipoint oraz scatternet.



Rys. 2.2 Topologie sieci w systemie Bluetooth [1]

Możliwe jest skonstruowanie sieci bezprzewodowej składającej się maksymalnie z ośmiu urządzeń pracujących w tym samym kanale fizycznym i tworzących tzw. pikosieć. W takiej pikosieci jedno z urządzeń pełni rolę urządzenia nadrzędnego (master) a pozostałe są urządzeniami podrzędnymi (slave). Liczba aktywnych stacji w pikosieci jest ograniczona do siedmiu, pozostałe stacje pozostają w stanie wyczekiwania. W trybie tym stacje utrzymują synchronizację z urządzeniem master ale nie uczestniczą w wymianie danych, natomiast w razie potrzeby mogą zająć miejsce jednej ze stacji aktywnej i zrealizować połączenie. Kilka pikosieci o częściowo nakładającym się zasięgu mogą stworzyć tzw. scatternet (sieć rozproszoną). Poszczególne pikosieci nie są ze sobą zsynchronizowane i pracują na różnych kanałach. Stacja, która w jednej pikosieci pracuje jak master nie może pełnić tej funkcji w drugiej pikosieci, może natomiast pełnić w jednej pikosieci rolę master a w drugiej slave lub w obu pikosieciach być urządzeniem podrzędnym. Każda z pikosieci wykorzystuje własne sekwencje przeskoków po częstotliwościach wybrane przez urządzenie nadrzędne. Pikosieci mogą być formowane statycznie lub dynamicznie, lecz zazwyczaj powstają spontanicznie i istnieją tylko na czas przesyłania informacji.

2.3 Technologia Bluetooth

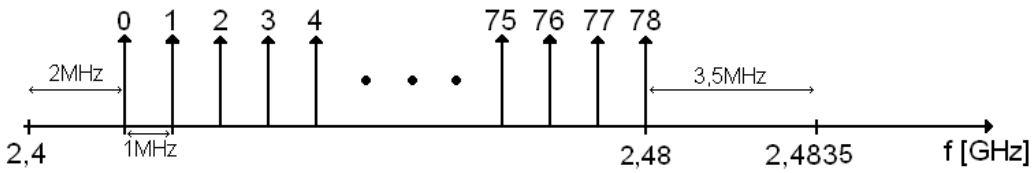
Bluetooth jest to standard opisany w specyfikacji IEEE 802.15.1. Jest to technologia bezprzewodowego przesyłu sygnału na nieduże odległości przy wykorzystaniu małej mocy. Założeniem standardu jest zastąpienie łączem radiowym połączeń przewodowych pomiędzy takimi urządzeniami jak: komputer, notebook, netbook, palmtop, myszka, drukarka, klawiatura, telefon komórkowy, zegarek itd. Specyfikacja wyróżnia trzy klasy urządzeń Bluetooth różniące się nadawaną mocą i zasięgiem transmisji:

-klasa 1 o największym zasięgu dochodzącym w otwartej przestrzeni do 200 metrów i największej nadawanej mocy 100mW

-klasa 2 która jest najpopularniejsza, zasięg transmisji w tej klasie wynosi około 10 metrów a nadawana moc wynosi 2,5mW

-klasa 3 jest bardzo rzadko wykorzystywana, zasięg transmisji wynosi około jednego metra a sygnał nadawany jest z mocą 1mW

Bluetooth wykorzystuje pasmo ISM 2,4GHz którego używanie nie wymaga koncesji. Do transmisji danych wykorzystywane jest kluczowanie częstotliwości widma rozproszonego (FHSS- *Frequency-hopping spread spectrum*). Standard ten wykorzystuje 79 kanałów częstotliwości pasma ISM 2,4GHz (2,4GHz – 2,4835GHz) oddalonych od siebie o 1MHz. Rysunek 2.3 przedstawia rozmieszczenie kanałów. Częstotliwości z zakresu 2400-2402MHz oraz 2480-2483,5MHz stanowią odpowiednio dolny i górny odstęp ochronny:



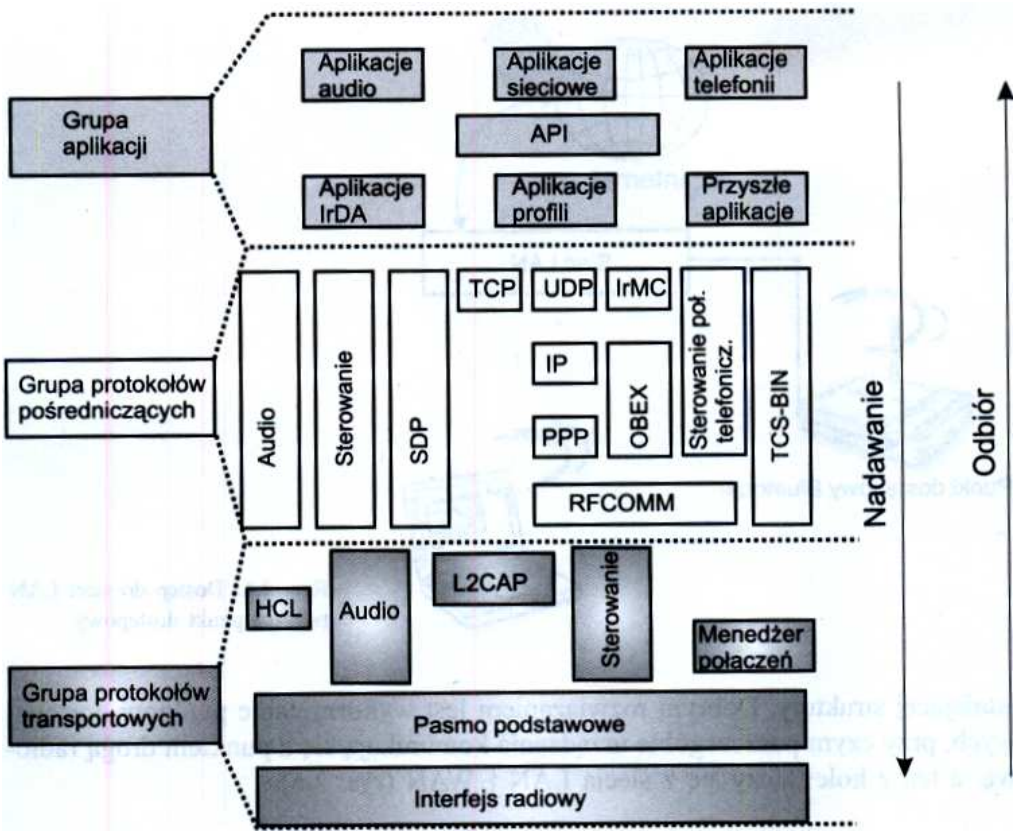
Rys. 2.3. Rozmieszczenie kanałów w paśmie ISM 2,4GHz

Obecnie najczęściej wykorzystywany jest standard Bluetooth w wersji 2.1+EDR(*Enhanced Data Rate*) pozwalający osiągnąć prędkość transmisji do 3Mb/s, natomiast najnowsza wersja o oznaczeniu 3.0+HS(*High Speed*) została wydana 21 kwietnia 2009 roku i pozwala osiągać prędkość transmisji danych do 24Mb/s dzięki nowej funkcji AMP(*Alternate MAC/PHY*). Polega to na zmianie warstwy MAC oraz warstwy fizycznej na warstwy zaczerpnięte ze standardu 802.11 gdy do przesłania jest

duży pakiet danych. Jako ciekawostkę warto wspomnieć o ogłoszonej 17 grudnia 2009 roku specyfikacji *Bluetooth low energy* [8][9], która ma stać się podstawą dla nowej wersji standardu Bluetooth 4.0. Standard *Bluetooth low energy* został zaprojektowany z myślą o urządzeniach, które mają pracować na zasilaniu bateryjnym przez okres nawet kilku lat [8]. Jest to możliwe dzięki nawet 100 krotnie mniejszemu zapotrzebowaniu na energię, a przy tym zasięg transmisji został zwiększony dwukrotnie.

2.3.1 Architektura systemu Bluetooth

System Bluetooth ma budową warstwową, jego budową można przedstawić jako stos protokołów. Stos ten dzielimy na trzy grupy: grupa protokołów transportowych, grupa protokołów pośredniczących oraz grupa aplikacji.



Rys. 2.4. Stos protokołów Bluetooth [2]

2.3.1.1 Protokoły transportowe

Protokoły transportowe należą do warstwy łącza danych i warstwy fizycznej modelu OSI. Tworzą one wirtualny kanał do przesyłania danych pomiędzy urządzeniami za pomocą interfejsu radiowego Bluetooth.

Najniższą warstwą tej grupy protokołów jest interfejs radiowy. System Bluetooth wykorzystuje transmisję z widmem rozproszonym, skacząc po

częstotliwościach w sposób pseudolosowy, wybierając co najmniej 75 z 79 kanałów radiowych. Typowa szybkość przeskoków wynosi 1600 razy na sekundę, a czas pozostawania na częstotliwości (w jednym kanale) nie trwa dłużej niż 625µs. W zapytaniach i przywołaniach szybkość przeskoków podwaja się, a czas pozostawania na częstotliwości wynosi 312,5µs. Po stronie nadawczej ustalana jest częstotliwość nośnej, do której dostraja się nadajnik przed rozpoczęciem transmisji strumienia bitów, oraz poziom mocy wyjściowej. Po stronie odbiorczej informacje sterujące określają częstotliwość, do której musi dostroić się odbiornik, a także poziom odbieranego sygnału. Odbiornik musi zapewnić bitową stopę błędów na poziomie 0,1%, przy poziomie sygnału wejściowego nie mniejszym niż -70dBm. Nośna kształtowana jest poprzez kluczowanie częstotliwości z gaussowskim kształtowaniem sygnału (GFSK), z szybkością 1 Megasymbolu na sekundę. Bezprzewodowe urządzenia wykorzystujące to samo pasmo ISM (np. urządzenia standardu 802.11, Bluetooth, ZigBee) mogą często wchodzić ze sobą w kolizje, co w efekcie powoduje wyraźne zmniejszenie wydajności sieci funkcjonujących w bezpośrednim sąsiedztwie innych urządzeń. W celu minimalizacji wspomnianych interferencji w standardzie Bluetooth 1.2 zaproponowano implementację mechanizmu AFH (*Adaptive Frequency Hopping*). Umożliwia on urządzeniom Bluetooth identyfikowanie źródeł potencjalnych interferencji i wykluczanie niedostępnych kanałów. Zaletą technik AFH oraz FHSS jest możliwość współdzielenia pasma. Korzystając z 79 kanałów o szerokości 1MHz można zapewnić efektywną pracę w paśmie ISM wielu niezależnym sieciom, każda z tych sieci pracuje w danym momencie tylko w jednym kanale [2].

2.3.2 Radiospecyfikacja i interfejs radiowy

Interfejs radiowy Bluetooth ma szereg funkcji, do których należą: generowanie nośnej, modulacja i demodulacja nośnej, sterowanie mocą nadawczą oraz pomiar siły sygnału. W standardzie tym zastosowano modulację GFSK (*Gaussian frequency-shift keying*). Jest to dwuwartościowa modulacja FSK (*Frequency-shift keying*) o impulsie częstotliwościowym kształtowanym przez filtr o charakterystyce gaussowskiej. Minimalna wartość dewiacji częstotliwości określona w specyfikacji to 115kHz. Oznacza to, że sygnał o częstotliwości wyższej przynajmniej o 115kHz od nośnej odpowiada logicznej jedynce, a sygnał o częstotliwości niższej o przynajmniej 115kHz odpowiada logicznemu zeru. Prędkości symbolowa transmisji wynosi 1Megasymbol na sekundę, co w pierwszej wersji standardu Bluetooth odpowiada szybkości transmisji

1Mbit/s. Technika EDR (*Enhanced Data Rate*) stosowana w wersjach 2.0 oraz 2.1 standardu Bluetooth umożliwia uzyskanie prędkości 2Mbit/s oraz 3Mbit/s. Kluczową cechą techniki EDR jest zmiana schematu modulacji wraz ze zmianą zawartości transmitowanego pakietu. W trakcie nawiązywania połączenia, transmitowania kodu dostępu oraz nagłówka pakietu stosowana jest modulacji GFSK, natomiast w trakcie transmisji pola danych modulacja zmieniana jest na wielowartościową modulację PSK(*Phase shift-keying*) umożliwiającą kodowanie dwóch lub trzech bitów na symbol. Dla przepływności równej 2Mbit/s stosuje się kwadraturową różnicową modulację PSK z przesunięciem fazy co jeden odstęp modulacji czyli modulację π/4-DQPSK. W modulacji tej , symbole podzielone są na dwójki bitów (tzw. dibity), które wyznaczają skok fazy w porównaniu z fazą poprzednią, wynoszący ±π/4, ±3π/4 [4]. Kodowanie różnicowe, określające relacje pomiędzy binarnymi danymi wejściowymi a zmianami stanu fazy przedstawione zostały w tabeli 2.1.

Bity wejściowe		Zmiana fazy
b_{2k-1}	b_{2k}	φ_k
0	0	π/4
0	1	3π/4
1	1	-3π/4
1	0	-π/4

Tab. 2.1 Relacja pomiędzy danymi wejściowymi a zmianami stanu fazy [8]

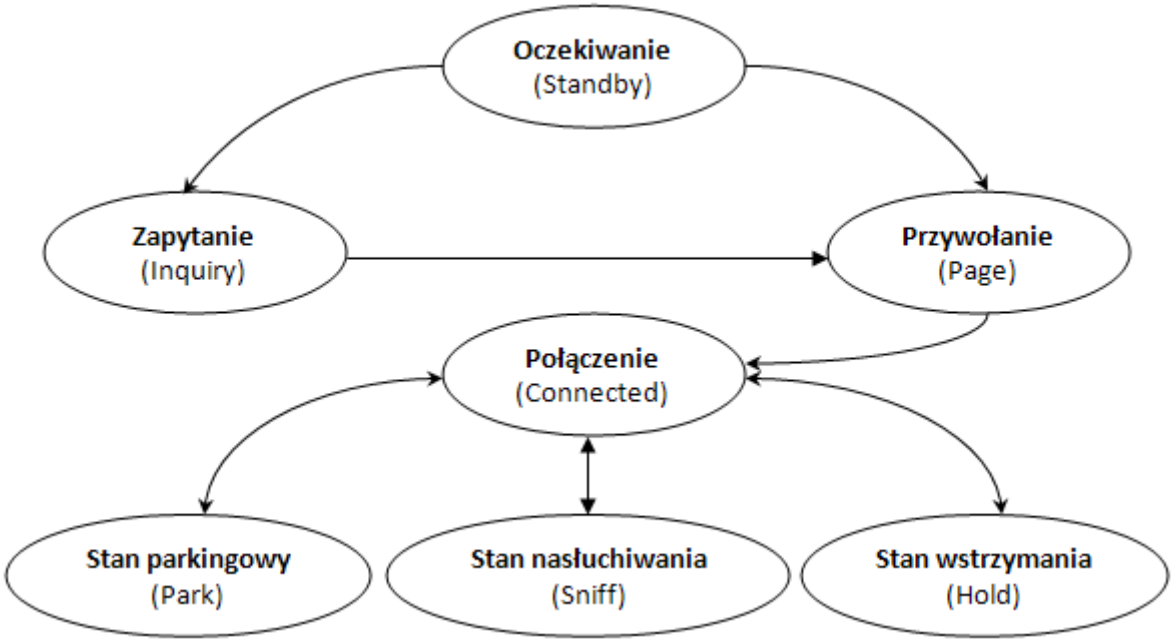
Dla prędkości 3Mbit/s zastosowano ośmiowartościową różnicową modulację fazy 8DPSK umożliwiającą zakodowanie 3 bitów na symbol. W urządzeniach Bluetooth pracujących w pierwszej klasie mocy, aby ograniczyć interferencje niezbędne jest zaimplementowanie mechanizmu regulacji nadawanej mocy w zakresie 4dBm – 20dBm. Dla wszystkich trzech klas możliwe jest opcjonalne sterowanie mocą na poziomie -30dBm – 4dBm, mające na celu optymalizację poziomu interferencji i oszczędzanie energii. Sterowanie mocą realizowane jest na bazie mechanizmu przesyłania informacji zwrotnej pomiędzy urządzeniami *master* i *slave* w ramach pikosieci.

2.3.3 Pasmo podstawowe

Warstwą znajdującą się nad interfejsem radiowym w stosie protokołów jest warstwa pasma podstawowego. Warstwa ta definiuje interfejs radiowy Bluetooth, jest odpowiedzialna za [1]:

- funkcje sterujące urządzeniem i pikosiecią (wyszukiwanie się urządzeń, tworzenie połączeń, wybór sekwencji skakania po częstotliwościach oraz ich synchronizacja),
- zarządzanie trybami pracy (sterowanie mocą oraz funkcjami związanymi z bezpieczeństwem),
- sterowanie dostępem do medium (przepytywanie, ustalanie rodzajów pakietów, przetwarzanie i dobór rodzaju połączeń).

W ramach pasma podstawowego zdefiniowane są stany i tryby pracy interfejsu radiowego. Ułatwiają one oszczędzanie energii poprzez umożliwienie urządzeniom przejście w tryb niskiego poboru mocy. Rysunek 2.5 przedstawia możliwe tryby pracy oraz przejścia między nimi.

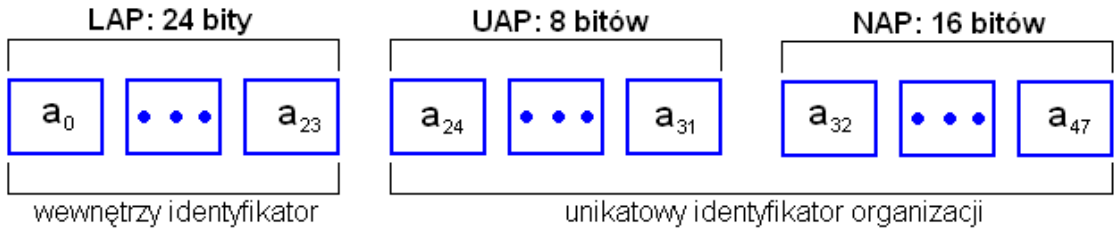


Rys. 2.5. Diagram przejść stanów i trybów pracy urządzenia Bluetooth [8]

Urządzenie w stanie oczekiwania na wejście do sieci jest bezczynne i zazwyczaj oszczędza energię. Jest to domyślny stan pracy Bluetooth. Oby urządzenie przeszło z trybu oczekiwania do trybu połączenia konieczne są dwie procedury: zapytania i przywołania lub przywołania. Gdy nadajnik nie wie czy w jego pobliżu znajduje się inne urządzenie Bluetooth wysyła pakiet identyfikacji zapytania i oczekuje na odpowiedź. Urządzenie po odebraniu zapytania odczekuje losowy okres czasu, aby uniknąć kolizji z innymi urządzeniami, które chcą odpowiedzieć na to samo zapytanie, a następnie wysyła pakiet, który zawiera adres urządzenia Bluetooth oraz tzw. pakiet FHS (*Frequency Hop Synchronization*). Po tym jak urządzenie zorientuje się czy w

pobliżu znajduje się inne urządzenie Bluetooth, wysyłany jest sygnał przywołania. Przywoływane urządzenie może odpowiedzieć tylko jeśli znajduje się w trybie nasłuchiwania. W procesie przywoływania nadajnik wysyła do znalezionego urządzenia własną sekwencję przeskoków częstotliwości, która będzie obowiązywać po zestawieniu połączenia. Urządzenie przywołujące przejmie wtedy rolę urządzenia nadrzędnego i będzie miało prawo przyznawać innym urządzeniom 3-bitowy adres AMA (*Active Member Address*) obowiązującego w pikosieci. W pikosieci może znajdować się więcej niż osiem urządzeń, ale tylko osiem z nich może być w stanie aktywnym. Pozostałe muszą przebywać w jednym z podstanów: parkingowym, nasłuchiwania lub wstrzymania. W trybie parkingowym urządzenie traci swój adres AMA, a w zamian otrzymuje 8-bitowy identyfikator PMA (*Parked Member Address*). W trybie tym urządzenie może tylko sprawdzać czy urządzenie nadrzędne nie przywołuje go do powrotu do sieci. W stanie wstrzymania urządzenie zatrzymuje swój adres AMA ale jest uśpione i nie transmituje żadnych danych. W trybie nasłuchiwania urządzenie również zachowuje adres AMA i jest uśpione, ale może co określony okres czasu transmitować niewielkie ilości danych.

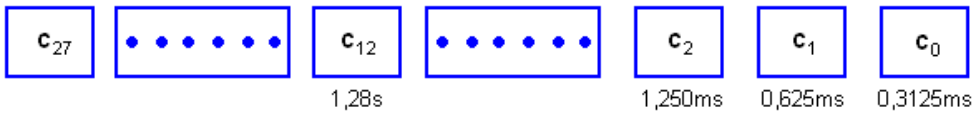
Aby urządzenie w ogóle mogło przeprowadzić procedurę zestawiania połączenia niezbędna jest znajomość adresu urządzenia Bluetooth oraz znajomość funkcjonowania zegara Bluetooth.



Rys. 2.6. Struktura 48-bitowego pola adresowego Bluetooth [2]

Adres urządzenia Bluetooth jest wartością unikatową w skali globalnej urządzeń standardu IEEE 802.15, podobnie jak wszystkich interfejsów sieciowych [2]. 48-bitowe pole adresowe podzielono na trzy segmenty: 24-bitowy LAP (*Lower Address Part*), 8-bitowy UAP (*Upper Address Part*), 16-bitowy NAP (*Non-significant Address Part*). Elementy UAP i NAP tworzą unikatowy identyfikator organizacji, a LAP przydzielany jest przez organizacją wprowadzającą produkt na rynek. Najmłodsze bity znajdują się w LAP, a najstarsze w NAP.

Zegar Bluetooth ma częstotliwość 3,2kHz, co odpowiada dwukrotnej szybkości przeskoków częstotliwości (1600 razy na sekundę) [2]. Z szybkości taktowania wynika, że jeden tak trwa 0,3125ms. Zegar ma strukturę 28-bitową.



Rys. 2.7. Zegar systemu Bluetooth [2]

Zegar decyduje kiedy urządzenie ma rozpocząć proces nadawania lub nasłuchiwania oraz na jakiej częstotliwości odbywa się transmisja pakietów. Bit C_1 określa się mianem szczeliny czasowej. W czasie normalnej pracy bit ten decyduje o szybkości przeskoków. Można zauważyć, że wartość logiczna tego bitu wyznacza czas 626µs, co oznacza, że przeskoki częstotliwości odbywają się z szybkością 1600 zmian na sekundę. W czasie 625µs urządzenie pozostaje w wybranym kanale i nadaje pojedynczy pakiet informacji [2]. Dokładność zegara w stanie aktywnym utrzymywana jest na poziomie ±20ppm, a w trybie oszczędzania energii na poziomie ±250ppm [8].

W systemie Bluetooth, kanał fizyczny definiowany jest jako pseudolosowa sekwencja przeskoków po częstotliwościach nośnych. Wzorzec przeskoków jest unikatowy dla pikosieci i określany na podstawie 48-bitowego adresu urządzenia i jego zegara [4]. Kanał podzielony jest na szczeliny czasowe o długości 625µs. Każdej szczelinie czasowej odpowiada inna częstotliwość nośna. Urządzenie nadrzędne i podrzędne może transmitować pakiet w trakcie trwania szczeliny czasowej. Transmisja dwukierunkowa odbywa się przy użyciu dupleksu czasowego. Przewidziane jest, że urządzenie nadrzędne nadaje w szczelinach czasowych o numerach parzystych, a urządzenie podrzędne w szczelinach o numerach nieparzystych. Początek transmisji powinien przypadać idealnie na początek szczeliny czasowej. W typowych sytuacjach długość pakietu nie przekracza jednej szczeliny czasowej, ale możliwe są też pakiety o długości trzech lub pięciu szczelin.

2.3.4 Ustanawianie połączenia

Urządzenie znajdujące się w trybie oczekiwania musi sprawdzać czy inne urządzenie chce się z nim komunikować. Dlatego co 1,28 lub 2,56 sekundy stacja nasłuchuje zapytań i poszukuje kanału z jej kodem dostępu, który jest równoznaczny

sygnałowi wywołania. Poszukiwanie to polega, na korelacji otrzymanych danych z kodem dostępu stacji i trwa około 10ms [5]. Podczas fazy nasłuchu urządzenie sprawdza jedną z 32 częstotliwości ze stosowanej okresowo powtarzanej sekwencji. Urządzenie wywołujące nadaje pakiety identyfikacji na różnych częstotliwościach z sekwencji. Częstotliwości te zmieniają się bardzo szybko, tak aby jak najszybciej urządzenie wywołujące i wywoływane znalazły się na jednej częstotliwości. Podczas wysyłania zapytań częstotliwość przeskoków po częstotliwościach jest dwa razy większa niż w trakcie normalnej pracy i wynosi 3200 przeskoków na sekundę. Urządzenie wywołujące nadaje i nasłuchuje odpowiedzi na 16 częstotliwościach z sekwencji przeskoków przez okres 10 milisekund. Taki przedział czasowy określa 16 szczelin czasowych (8 nadawczych i 8 odbiorczych ułożonych naprzemian) [8]. Ponieważ urządzenie wywołujące nie wie kiedy urządzenie, z którym chce się połączyć nasłuchuje zapytań, powtarza ten proces cyklicznie na tych samych częstotliwościach. Jeżeli po upływie tego czasu nie zostanie uzyskana odpowiedź sprawdzane są pozostałe 16 częstotliwości z sekwencji przeskoków [5]. Jeśli urządzenie wywołujące odbierze kod dostępu od wywoływanego urządzenia to wysyła mu w odpowiedzi pakiet FHS, który zawiera informacje o zegarze oraz informacje potrzebne do zsynchronizowania sekwencji przeskoków obu urządzeń. Po zsynchronizowaniu się urządzeń powstaje pikosieć. Urządzenie wywołujące zostaje w tej sieci urządzeniem nadrzędnym, a urządzenie wywołane zostaje urządzeniem podrzędnym.

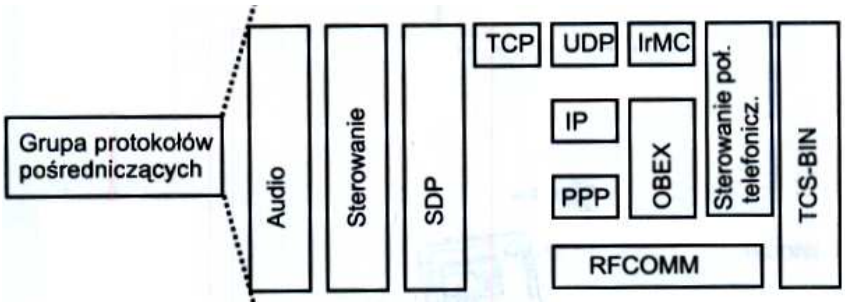
Połączenia w standardzie Bluetooth można podzielić na dwa rodzaje[1]:

- synchroniczne SCO (*Synchronous Connection Oriented*), dla połączeń głosowych,
- asynchroniczne ACL (*Asynchronous Connectionless Links*), dla transmisji danych.

Transmisja synchroniczna łącza SCO jest zorientowana połączeniowo. Występuje między stacją nadrzędną i podrzędną w ramach pikosieci i jest zawsze symetrycznym połączeniem dwupunktowym w konfiguracji punkt-punkt. Możliwe są maksymalnie trzy jednoczesne połączenia dla usług głosowych. Pakiety wysyłane są regularnie w zarezerwowanych szczelinach czasowych, w jednakowych odstępach czasu i nie są nigdy retransmitowane. Gwarantuje to małe opóźnienia, dlatego transmisja synchroniczna może służyć do transmisji dźwięku. Ruch SCO ma wyższy priorytet niż ACL [1].

Transmisja asynchroniczna ACL działa w trybie bezpołączeniowym. W tym przypadku możliwe jest przesyłanie informacji między stacją nadawczą i wieloma stacjami podrzędnymi w konfiguracji punkt-wielopunkt. Między stacją nadrzędną a podrzędną można zestawić maksymalnie jedno połączenie typu ACL. Transmisja na łączach asynchronicznych jest ustalana w oparciu o szczeliny nie zarezerwowane dla transmisji synchronicznej. Ramki uszkodzone mogą być retransmitowane. Po transmisji ACL z urządzenia nadrzędnego jedynie urządzenie podrzędne, do którego była adresowana wiadomość, może odpowiedzieć w kolejnej szczelinie czasowej. Jeśli nie zostało wskazane żadne urządzenie wiadomość jest traktowana jako rozgłoszeniowa. Między urządzeniami elektronicznymi komunikującymi się w standardzie Bluetooth możliwa jest jednoczesna transmisja synchroniczna i asynchroniczna[1].

2.3.5 Protokoły pośredniczące



Rys. 2.8. Grupa protokołów pośredniczących [2]

Protokoły pośredniczące stanowią dodatkową grupę protokołów transportowych, które wspomagają działanie obecnych oraz przyszłych aplikacji korzystających z technologii Bluetooth. Korzystają one z protokołów transportowych i udostępniają warstwie aplikacji interfejs [2]. Protokoły RFCOMM oraz SPD umieszczone są bezpośrednio pod warstwą L2CAP i realizują własne zadanie przy pomocy tej warstwy. Protokoły RFCOMM oraz SPD zostaną opisane w dalszej części rozdziału, ponieważ będą one bezpośrednio wykorzystywane w projekcie.

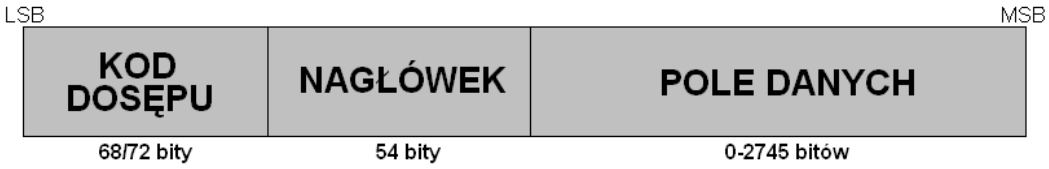
Protokół SDP pozwala określić jakie usługi Bluetooth są dostępne w danym urządzeniu. Pozwala wyszukać konkretną usługę lub przeglądać wszystkie usługi dostępne w danym urządzeniu. Protokół ten definiuje relację serwer-klient podobny do relacji występujących w innych sieciach bezprzewodowych. Często po utworzeniu sieci zachodzi potrzeba pobrania informacji od innego urządzenia o udostępnianych przez nie usługach. Klient (urządzenie pytające o usługę) może wymienić się rolami z serwerem

(urządzeniem dostarczającym usługę). Każde urządzenie Bluetooth może przyjmować dowolną z ról w danym momencie. Urządzenie udostępniające usługi musi posiadać rejestr usług, w którym zdefiniowane są możliwe do udostępnienia usługi oraz tzw. atrybuty usług. Rekordy usług mogą mieć atrybuty uniwersalne oraz indywidualne [2]. Atrybuty uniwersalne są charakterystyczne dla wszystkich rodzajów usług, jest w nich określona klasa usługi oraz informacje na temat stosu protokołów wykorzystujących tą usługę. Atrybuty indywidualne odnoszą się do konkretnej usługi lub klas usług i zawierają już konkretne ustawienia wykorzystywane przez usługę. Proces wyszukiwania usługi polega na wysłaniu przez klienta do serwera żądania informacji o usługach, serwer zwraca uchwyt do usługi. Klient wykorzystuje otrzymany uchwyt do żądania dodatkowych informacji (atrybutów) o usłudze.

Interfejs szeregowy znajduje się obecnie w większości urządzeń komputerowych i telekomunikacyjnych [1][2]. Założeniem technologii Bluetooth było zastąpienie połączeń kablowych, dlatego stos protokołów Bluetooth wyposażono w warstwę RFCOMM, emulującą działanie portu szeregowego, za pośrednictwem bezprzewodowej komunikacji Bluetooth. Dzięki tej warstwie w urządzeniu może zostać utworzony wirtualny port szeregowy COM, który może być wykorzystywany jak zwykły port szeregowy. W danej chwili może istnieć tylko jedno połączenie RFCOMM, ale można utworzyć wiele kanałów poprzez multipleksację. Pierwsze urządzenie zestawiające połączenie RFCOMM wykorzystuje warstwę L2CAP, a kolejne urządzenia dołączają się wykorzystując funkcję multipleksację. Specyfikacja dopuszcza maksymalnie 60 zmultipleksowanych połączeń szeregowych. Ostatnie urządzenie rozłączające połączenie szeregowe musi zwolnić kanał L2CAP. W komunikacji bezprzewodowej wykorzystuje się komendy i odpowiedzi RFCOMM do symulacji sygnałów portu RS-232. W standardzie RS-232 ważne jest ustawienie prędkości transmisji, czyli częstotliwości zegara określającego czas trwania logicznego poziomu wysokiego i niskiego. W środowisku bezprzewodowym nie mamy kabla, dlatego prędkość transmisji determinowana jest typem i strukturą przesyłanych pakietów.

2.3.6 Rodzaje pakietów

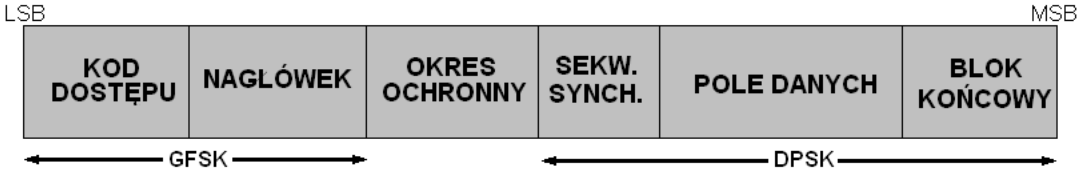
Rysunek 2.9 obrazuje budowę pakietu dla podstawowej prędkości transmisji (1Mbit/s). Pakiet składa się z trzech części: kodu dostępu (68 lub 72 bity), nagłówka (54bity) oraz pola danych (w zależności od potrzeby od 0 do 2745 bitów).



Rys. 2.9. Ogólny format pakietu dla prędkości podstawowej [8]

Pakiet może składać się tylko z kodu dostępu (pakiet ID), z kodu dostępu i z nagłówka lub ze wszystkich trzech części.

Ogólny format pakietu dla specyfikacji Bluetooth *Enhanced Data Rate* pokazany jest na rysunku 2.10. Kod dostępu i nagłówek są identyczne jak dla pakietu podstawowej prędkości. Za nagłówkiem znajduje się okres ochronny oraz sekwencja synchronizacyjna, a na końcu pakietu umieszczony jest blok końcowy.



Rys. 2.10. Ogólny format pakietu dla Bluetooth *Enhanced Data Rate* [8]

Każdy pakiet zaczyna się od kodu dostępu. Jeśli po kodzie dostępu następuje nagłówek to kod dostępu składa się z 72 bitów, w przeciwnym razie z 68 bitów. Pole to służy do synchronizacji, kompensacji przesunięć w czasie oraz identyfikacji. Rysunek 2.11 przedstawia format pola kodu dostępu.

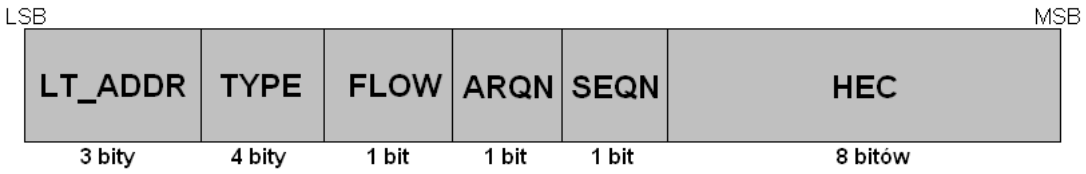


Rys. 2.11. Format kodu dostępu [8]

Preambuła jest to ustalony ciąg bitów służący do kompensacji przesunięć w czasie. Słowo synchronizacji służy do synchronizacji oraz zawiera kod pikosieci. Stacje które odbierają pakiet sprawdzają czy pakiet został wysłany z tej samej pikosieci, jeżeli nie to

dalsza część pakietu jest ignorowana. Blok końcowy w polu kodu dostępu jest opcjonalny i występuje tylko gdy za kodem dostępu następuje nagłówek.

Nagłówek pakietu ma stałą długość 54 bitów i składa się z 6 pól:



Rys. 2.12. Format nagłówka [8]

- LT_ADDR – pole zawierające 3-bitowy adres urządzenia aktywnego (adres AMA), przydzielany urządzeniu podczas przywołania. Adres ten używany jest w piko sieciach w celu identyfikacji nadawcy lub odbiorcy danego pakietu,
- TYPE – 4-bitowy kod określający który spośród 16 zdefiniowanych w systemie typów pakietów został zastosowany,
- FLOW – znacznik sterowania przepływem danych w łączu asynchronicznym, ustawiany jest przez odbiornik w pakiecie odpowiedzi do nadawcy,
- ARQN – znacznik służący do informowania o poprawnym odebraniu pakietu,
- SEQN – znacznik pakietów parzystych i nieparzystych, pozwalający filtrować powtórzone transmisje,
- HEC – 8-bitiwe pole kontroli błędów. Nagłówek pakietu jest zabezpieczony za pomocą kodu repetycji o sprawności 1/3. Jest to sekwencja potrojonych bitów słowa kodowego.

W technologii Bluetooth zdefiniowane jest 16 typów pakietów. Identyfikowane są one na podstawie pola TYPE. Typy pakietów podzielone są na 4 grupy. Pierwsza grupa to grupa pakietów sterujących. Pakiet NULL jest to pakiet wykorzystywany do zgłaszania przez urządzenia podrzędne swojej obecności w pikosieci oraz do nadawania informacji sterujących przepływem. Pakiet POLL jest to pakiet wywoławczy wysyłany z urządzenia nadrzędnego do podrzędnego w celu umożliwienia mu nadawania. A kolejne grupy podzielone są według ilości zajmowanych szczelin czasowych. Podział ten przedstawia tabela 2.1.

Grupa	TYPE	Ilość zajmowanych szczelin	SCO (1Mbit/s)	eSCO (1Mbit/s)	eSCO (2-3Mbit/s)	ACL (1Mbit/s)	ACL (2-3Mbit/s)
1	0000	1	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
	0001	1	POLL	POLL	POLL	POLL	POLL
	0010	1	FHS	zarezerwowane	zarezerwowane	FHS	FHS
	0011	1	DM1	zarezerwowane	zarezerwowane	DM1	DM1
2	0100	1	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	DH1	2-DH1
	0101	1	HV1	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.
	0110	1	HV2	nie zdef.	2-EV3	nie zdef.	nie zdef.
	0111	1	HV3	EV3	3-EV3	nie zdef.	nie zdef.
	1000	1	DV	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	3-DH1
	1001	1	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	AUX1	AUX1
3	1010	3	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	DM3	2-DH3
	1011	3	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	DH3	3-DH3
	1100	3	nie zdef.	EV4	2-EV5	nie zdef.	nie zdef.
	1101	3	nie zdef.	EV5	3-EV5	nie zdef.	nie zdef.
4	1110	5	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	DM5	2-DH5
	1111	5	nie zdef.	nie zdef.	nie zdef.	DH5	3-DH5

Tab. 2.1. Typy pakietów zdefiniowane dla łącz synchronicznych i asynchronicznych [8]

Pole okresu ochronnego zdefiniowane jest jako przedział czasowy między ostatnim symbolem nagłówka transmitowanego przy zastosowaniu modulacji GFSK, a początkiem symbolu odniesienia w polu sekwencji synchronizacyjnej. Czas trwania okresu ochronnego wynosi 5µs.

Pole sekwencji synchronizacyjnej ma długość 11µs co odpowiada czasowi trwania 11 symbolom modulacji DPSK. Sekwencja ta składa się z symbolu odniesienia oraz dziesięciu ustalonych symboli DPSK. Dla modulacji π/4-DQPSK uzyskuje się 20-bitową sekwencje synchronizacyjną a dla modulacji 8DPSK 30-bitową.

Pole danych składa się zawsze z trzech części, niezależnie od prędkości transmisji. Są to:

- nagłówek pola danych (*Payload header*),
- część przenosząca informacje (*Payload body*),
- kod CRC (*Cyclic Redundancy Check Code*),

Jeśli pakiet jest transmitowany w czasie jednej szczeliny to nagłówek pola danych ma długość 8 bitów, jeśli w czasie trzech lub pięciu szczelin to ma długość 16 bitów. Zawiera on informacje o podziale pakietu oraz o rozmiarze pola danych. Pole przenoszące informacje w polu danych ma długość zależną od typu pakietu. Rozmiar tego pola określa efektywność transmisji między urządzeniami Bluetooth. W zależności od typu łącza, sprawności zastosowanego kodu, długości pola danych i symetryczności lub asymetryczności połączenia możemy wyróżnić typy pakietów przedstawione w tabelach 2.2 i 2.3.

Typ	Nagłówek pola danych [bajty]	Rozmiar pola danych [bajty]	Skuteczność kodu korekcyjnego	CRC	Maksymalna prędkość w transmisji symetrycznej [kbit/s]	Maksymalna prędkość w transmisji asymetrycznej [kbit/s]	
						„do przodu”	„do tylu”
DM1	1	0-17	2/3	tak	108,8	108.8	108,8
DH1	1	0-27	-	tak	172,8	172,8	172,8
DM3	2	0-121	2/3	tak	258,1	387,2	54,4
DH3	2	0-183	-	tak	390,4	585,6	86,4
DM5	2	0-224	2/3	tak	286,7	477,8	36,3
DH5	2	0-339	-	tak	433,9	723,2	57,6
AUX1	1	0-29	-	nie	185,6	185,6	185,6
2-DH1	2	0-54	-	tak	345,6	345,6	345,6
2-DH3	2	0-367	-	tak	782,9	1174,4	172,8
2-DH5	2	0-679	-	tak	869,1	1448,5	115,2
3-DH1	2	0-83	-	tak	531,2	531,2	531,2
3-DH3	2	0-552	-	tak	1177,6	1766,4	235,6
3-DH5	2	0-1021	-	tak	1306,9	2178,1	177,1

Tab. 2.2. Parametry pakietów w połączeniach asynchronicznych [8]

Dla pakietów w łączach asynchronicznych zastosowano kodowanie korekcyjne o sprawności 2/3. Jedynym pakietem niezabezpieczonym kodem CRC jest pakiet AUX1, co uniemożliwia jego ewentualną korekcję. W przypadku łącza symetrycznego, dwa komunikujące się urządzenia używają pakietów tego samego rodzaju.

Typ	Rozmiar nagłówka [bajty]	Rozmiar danych użytecznych [bajty]	Skuteczność kodu korekcyjnego	CRC	Maksymalna szybkość transmisji symetrycznej [kbit/s]
HV1	-	10	1/3	nie	64,0
HV2	-	20	2/3	nie	64,0
HV3	-	30	-	nie	64,0
DV	1*	10+(0÷9)*	2/3*	tak*	64,0 + 57,6*
EV3	-	1-30	-	tak	96
EV4	-	1-120	2/3	tak	192
EV5	-	1-180	-	tak	288
2-EV3	-	1-60	-	tak	192
2-EV5	-	1-360	-	tak	576
3-EV3	-	1-90	-	tak	288
3-EV5	-	1-540	-	tak	864

*dotyczy pola danych

Tab. 2.3. Parametry pakietów w połączeniach synchronicznych [8]

W tabeli 2.3 można zauważyć, że pakiety stosowane w łączach synchronicznych nie posiadają nagłówka pola danych. Standard Bluetooth 1.2 dodatkowo definiuje łącza eSCO, które stosowane są między innymi przy wysokiej jakości transmisji dźwięku. Pakiety EV wykorzystywane w łączach eSCO zawierają sumę kontrolną CRC, która umożliwia wykrycie i retransmisją błędnych pakietów. Pakiet DV (*Data Voice*) umożliwia oprócz przesyłania dźwięku również transmisję danych. Pole danych tego pakietu zostało podzielone na dwie niezależne części, z których część zawierająca dane może być retransmitowana.

Blok końcowy składa się z dwóch symboli zawierających bity o wartości logicznej 0.

2.3.7 Profile zastosowań

Istotnym, jednoczącym aspektem standardu Bluetooth są profile zastosowań służące zapewnieniu kompatybilności między urządzeniami i aplikacjami Bluetooth różnych producentów. Profile definiują wymagania stawiane urządzeniom i aplikacją realizującym różnego typu usługi teleinformatyczne. Liczba profili wciąż rośnie, dlatego też zostały one podzielone przez organizację SIG na cztery grupy: profile ogólne, profile telefonii, profile portu szeregowego, profile pracy sieciowej.

Profile ogólne zawierają profile dostępu podstawowego stanowiące rdzeń dla innych profili [1]. Zawierają profil ogólnego dostępu GAP (*Generic Access Profile*) oraz profil aplikacji i wykrywania usług SDAP (*Service Discovery Application Profile*). Obydwa profile określają wymagane lub pożądane funkcje urządzeń. GAP zawiera reguły zestawiania połączeń, tryby zabezpieczeń oraz procedury pracy w trybie jałowym. SDAP udostępnia metody wyszukiwania usług, określa jak aplikacja korzystająca z protokołu SDP powinna być zbudowana i jak powinna się zachowywać.

Grupa profili telefonicznych składa się z profili obsługujących przenoszenie fonii. Składają się na nią trzy główne profile. Profil CTP (*Cordless Telephony Profile*) jest profilem telefonii bezprzewodowej, pozwalający telefonom komórkowym na komunikację głosową na niewielkich odległościach. HSP (*Head Set Profile*) określający w jaki sposób słuchawki bezprzewodowe Bluetooth, aby działały jako przystawka audio dla innych urządzeń jak np. telefon komórkowy. Profil interkomu IntP (*Intercom Profile*)

Podstawą grupy profili szeregowych jest profil portu szeregowego SPP (*Serial Port Profile*). Odwołuje się on do protokołu RFCOMM umożliwiając utworzenie wirtualnego połączenia szeregowego pomiędzy dwoma urządzeniami Bluetooth. W grupie tej znajdują się jeszcze profile GEOP, OPP i FTP. Profil GEOP (*Generic Object Exchange Profile*) wykorzystywany jest do przesyłania plików, synchronizacji oraz wymiany informacji. Profil ten korzysta z protokołu OBEX. Połączenia realizowane są w relacji serwer-klient. OPP (*Object Push Profile*) jest prostym profilem zgodnym z GEOP służącym do wymiany obiektów np. elektronicznych wizytówek. Profil FTP (*File Transfer Profile*) również służy do wymiany obiektów, ale w tym przypadku chodzi o pliki i katalogi. Używany jest głównie do transferu większej ilości danych.

Profil pracy sieciowej umożliwia dostęp do sieci lokalnych LAN, sieci komutowanych oraz faksu. Profil pracy sieciowej z połączeniem komutowanym odnosi się do dwóch rodzajów urządzeń: komputerów i telefonów. W tym przypadku komunikacja bezprzewodowa Bluetooth ogranicza się do eliminacji połączeń przewodowych. Profil dostępu do sieci LAN umożliwia dostęp do sieci bazując na punktach dostępowych Bluetooth, które wyposażone są w interfejs sieci LAN.

2.4 Wykorzystanie standardu Bluetooth do budowy systemu bezprzewodowej komunikacji robot-komputer

2.4.1 Cele komunikowania się z robotem

Dane jakie może przesyłać robot do komputera to m.in.:

- wyniki pomiarów czujników,
- prędkość poruszania się robota,
- napięcie akumulatora,
- pozycja serwomechanizmów poruszających wieżą robota.

Podstawową rzeczą jaką można zrobić z danymi otrzymanymi z czujników umieszczonych na robocie jest ich wizualizacja, pozwala to jakby spojrzeć na świat oczami robota. Dane z czujników zazwyczaj są bardzo skąpe, kilka wyników pomiarów dookoła robota nie pozwala zorientować się w jakim otoczeniu robot się znajduje, ale już umieszczenie czujnika odległości na ruchomej wieży o dwóch stopniach swobody i wykonanie serii pomiarów pozwala utworzyć całkiem dokładną mapę otoczenia a nawet badać kształty przedmiotów. Zapisując zmiany napięcia na akumulatorze można wykryć kiedy należy akumulator naładować, a w dalszej perspektywie można również sprawdzić kiedy akumulator się zużyje i wymaga wymiany na nowy.

W robotach typu linie-follower czyli robotach ścigających się po trasie wyznaczonej przez czarną linię na białym podłożu, do wykrywania czarnej linii wykorzystywane są proste transoptory odbiciowe wykrywające odcień podłoża poprzez ilość odbitego światła. Rejestracja danych z czujników odbiciowych umieszczonych na spodniej stronie robota oraz danych o przebytej drodze z np. enkoderów optycznych umożliwia zarejestrowanie trasy. Po wyświetleniu takiej trasy na ekranie komputera, możemy np. wskazać w którym miejscu robot może się bardziej rozpędzić, w których miejscach hamować albo, w którym miejscu ściąć zakręt.

Jednym z trybów pracy robota ma być tryb strażnika mieszkania, w trybie tym robot ma poruszać się po mieszkaniu i w zaprogramowanych miejscach dokonywać pomiarów wilgotności w łazience, stężenia gazu ziemnego w kuchni, stężenia tlenku węgla i dwutlenku węgla oraz temperatury powietrza. Robot po wykonaniu pomiarów, mógłby w razie potrzeby zawiadomić właściciela mieszkania za pośrednictwem komputera i sieci Internet np. o zbyt dużym stężeniu gazu ziemnego. W czasie pomiędzy wykonywaniem pomiarów robot mógłby ustawiać się przed drzwiami i za pomocą czujników odległości badać czy ktoś włamuje się do mieszkania i otwiera drzwi i również w razie potrzeby zawiadomić właściciela.

Za pomocą komputera można również przejąć kontrolę nad wszystkimi funkcjami robota i sterować go zdalnie, gdy robot jest w polu widzenia osoby siedzącej przed komputerem i sterującej robotem. Za pośrednictwem aplikacji komunikującej się z robotem wybierany jest tryb pracy oraz stopień autonomiczności robota Komputer może również służyć do archiwizacji pracy robota np. tworząc coś w rodzaju licznika przejechanych kilometrów lub mapy „odwiedzonych" pomieszczeń w mieszkaniu.

2.4.2 Zalety i wady wykorzystania standardu Bluetooth

Zaletami wykorzystania standardu Bluetooth do komunikacji pomiędzy robotem a komputerem, są praktycznie wszystkie najważniejsze zalety standardu Bluetooth:

- niski pobór mocy,
- łatwość i szybkość nawiązywania połączenia,
- praca w nielicencjonowanym paśmie ISM 2,4GHz dostępnym na całym świecie.

Dzięki niskiemu poborowi mocy moduły Bluetooth idealnie nadają się do pracy w urządzeniach zasilanych bateryjnie, takich jak np. roboty mobilne. Nawiązywanie połączeń w tym standardzie jest bardzo proste, od strony użytkownika ogranicza się do wyszukania urządzenia i połączenia się z nim za pomocą jednej z oferowanych usług. Niewątpliwą zaletą tego standardu jest również dostępność gotowych, niedrogich i niewielkich modułów integrujących sterownik Bluetooth, interfejs radiowy, a niekiedy również antenę. Wykorzystanie takich modułów w najprostszym przypadku wiąże się tylko z podłączeniem mikrokontrolera do modułu za pomocą jednego z dostępnych interfejsów np. UART, SPI, USB. Moduły takie zajmują niewiele miejsca na obwodzie drukowanym i wymagają bardzo niewielu dodatkowych elementów do działania, dzięki czemu koszt ich wykorzystania jest dużo niższy od np. modułów WIFI. Możliwe jest również wykorzystanie do komunikacji z robotem innych urządzeń niż komputer. Mogą

to być telefony komórkowe, palmtopy itp. Coraz więcej telefonów i palmtopów pracuje w oparciu o system operacyjny Windows. W takim przypadku bardzo wygodne jest pisanie aplikacji w języku C#. Przeniesienie aplikacji napisanej w języku C# nie wymaga praktycznie żadnych zmian kodu programu, niezbędne byłoby tylko zmiana wyglądu interfejsu oraz przekompilowanie programu.

Przed wymienieniem wad standardu należy zastanowić się, jaki wpływ na transmisję będzie miała mobilność robota. Budowany robot z założenia nie będzie poruszał się z prędkością większą niż 1m/s. Zakładając najgorszy przypadek: robot porusza się w linii prostej od lub do komputera z maksymalną prędkością i korzystając ze wzoru 2.9 można wyliczyć, że przesunięcie dopplerowskie częstotliwości będzie się wahać w granicach ± 8Hz. Jest to wartość na tyle mała, że nie wpłynie istotnie na jakość transmisji.

Największą wadą wykorzystywanego standardu jest oczywiście mały zasięg transmisji, ale biorąc pod uwagę, że robot ma poruszać się wewnątrz budynku (np. mieszkania) zasięg okazuje się wystarczający. Kolejnym ograniczeniem standardu Bluetooth jest niska prędkość transmisji. Jest ona w zupełności wystarczająca do przesyłania przez wirtualny port szeregowy prostych komunikatów, ale gdyby wyposażyć robota w kamerę, to przesyłany obraz musiałby mieć znacząco ograniczoną rozdzielczość oraz zmniejszoną ilość klatek na sekundę.

2.4.3 Wybór modułów Bluetooth dla robota i PC oraz anten

Aby zrealizować system bezprzewodowej komunikacji pomiędzy robotem i komputerem potrzebne są dwa urządzenia: adapter Bluetooth USB, który podłączony zostanie do komputera, oraz moduł Bluetooth który zostanie wlutowany w układ sterownika robota. Jest to tylko jedna z możliwości zbudowania systemu. Nic nie stoi na przeszkodzie, aby zbudować moduł komunikacyjny do komputera na bazie modułu Bluetooth podłączanego np. do portu LPT, albo wyposażyć robota w hosta USB i używać adaptera Bluetooth USB zarówno w komputerze jak i w robocie. Proponowane w projekcie rozwiązanie jest natomiast na pewno jednym z najprostszych.

Do komputera wybrany został adapter Bluetooth w formie „Pendriva”. W wielu sklepach z urządzeniami RTV można zakupić adaptery Bluetooth, ale często ani na opakowaniu, ani w instrukcji nie jest podane z jaką wersją specyfikacji Bluetooth jest on kompatybilny, w jakiej klasie mocy pracuje, ani jakie profile pracy oferuje. Dlatego też do projektu zakupiony został adapter w firmie Transfer Multisort Elektronik.

Fotografia 2.1 przedstawia zakupiony adapter, jest on zgodny ze standardem Bluetooth V2.0 + EDR, pracuje w pierwszej klasie mocy (100mW), jest zgodny z interfejsem USB 1.1. Oferuje miedzy innymi wykorzystywany w projekcie profil portu szeregowego.



Fot. 2.1 Adapter Bluetooth USB

Moduły Bluetooth dostępne są w postaci miniaturowych modułów integrujących w sobie układ nadawczo-odbiorczy, mikrokontroler, interfejsy oraz inne niezbędne elementy. Często też moduły wyposażone są w miniaturowe anteny. Moduły takie przeznaczone są do wlutowania w technice SMD. Zastosowany moduł powinien mieć maksymalnie duży zasięg transmisji, a więc powinien pracować w pierwszej klasie mocy standardu Bluetooth, powinien również posiadać interfejs USART do komunikacji z mikrokontrolerem. W tabeli 2.4 zestawiono wybrane trzy moduły, które są dostępne w Polsce wraz z parametrami branymi pod uwagę przy wyborze.

Producent	Oznaczenie	Standard Bluetooth	Sterowanie	Obudowa	Wbudowana antena	Cena
Bluegiga	WT11	V2.1+EDR	stos iWrap	SMD 28 padów	TAK	128zł
Free2Move	F2M03GLA	V2.0+EDR	wireless UART	SMD 32 pady	TAK	152zł
Rayson	BTM-220	V2.0+EDR	Komendy AT	SMD 38 padów	NIE	81zł

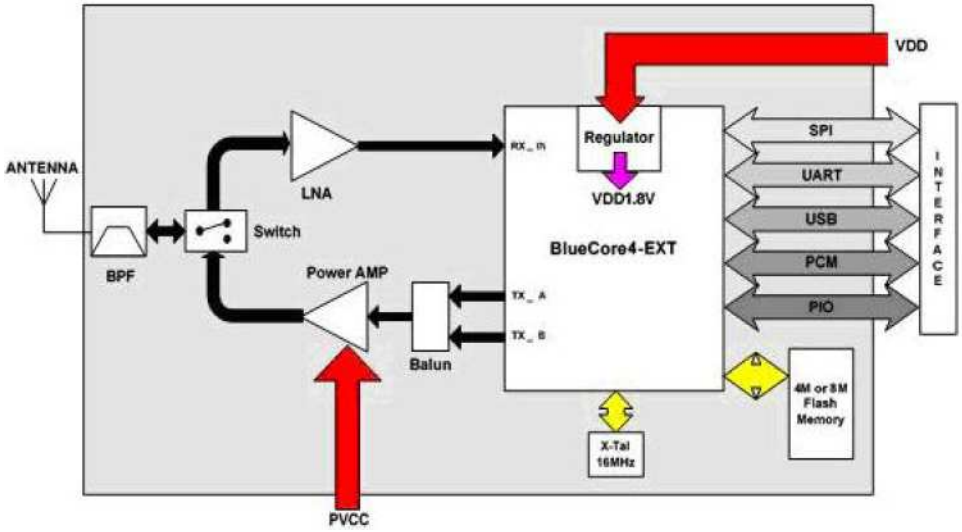
Tab. 2.4 Wybrane parametry modułów Bluetooth

Do projektu wybrany został moduł firmy Rayson BTM-220, przy wyborze decydująca okazała się dużo ilość gotowych projektów dostępnych na polskich forach elektronicznych, wykorzystujących właśnie ten moduł oraz bardzo proste sterowanie modułem poprzez interfejs USART mikrokontrolera i komendy AT. Pozostałe parametry układu zostały wymienione poniżej [14]:

- napięcia zasilania od 3,0V do 3,6V,

- moc nadajnika do 18dBm,
- brak wbudowanej anteny,
- interfejsy UART, USB, PCM i SPI,
- profil SPP (Serial Port Profile) i komendy AT,
- wykonany w technologii bezołowiowej,
- wymiary: 28,2 x 15,0 x 2,8mm,
- dopuszczalny zakres temperatur pracy od -10°C do +70°C.

Na rysunku 2.13 przedstawiono schemat blokowy modułu BTM-220. Układ BlueCore4-EXT firmy CSR integruje stos Bluetooth, 16-bitowy mikrokontroler RISC oraz układ radiowy. Wbudowany mikrokontroler posiada 48kB pamięci RAM, taktowany jest z częstotliwością 16MHz i spełnia rolę sterownika dla systemu Bluetooth [14]. Do układu sterownika dołączona jest 8Mbitowa pamięć *flash* w której przechowywany jest stos protokołów Bluetooth oraz oprogramowanie *firmware*. Pozostałe bloki modułu składają się na fizyczny interfejs radiowy.



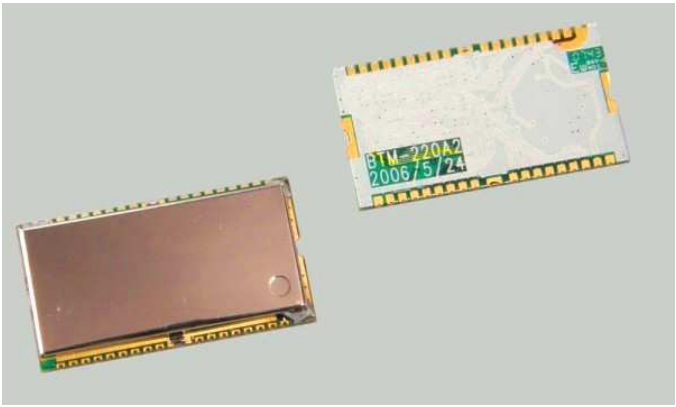
Rys. 2.13 Schemat blokowy modułu BTM-220

Komunikacja pomiędzy mikrokontrolerem i modułem BTM-220 odbywa się przy pomocy komend AT. Wysłanie komendy AT polega na wysłaniu za pośrednictwem interfejsu szeregowego (np. UART) ciągu znaków ASCII. Każda komenda AT zaczyna się od znaków ‘A’ i ‘T’. Spis wszystkich dostępnych dla modułu BTM-220 komend AT znajduje się w nocie katalogowej modułu. Większość z nich znajduje zastosowanie gdy moduł pracuje w urządzeniu nawiązującym połączenie i przyjmującym rolę urządzenia nadrzędnego. W budowanym systemie połączenie będzie

nawiązywane ze strony komputera. Komputer automatycznie wykryje dostępną w module funkcję wirtualnego portu szeregowego i połączy się z nim poprzez utworzony w ten sposób wirtualny port COM. Moduł ma następujące domyślne ustawienia portu szeregowego:

- prędkość transmisji 19200bps,
- 8 bitów danych,
- brak bitów parzystości,
- jeden bit stopu,
- sprzętowa kontrola transmisji lub brak kontroli,
- włączone lokalne echo wysyłanych danych.

W budowanym systemie wykorzystane zostały w większości domyślne ustawienia modułu, wyłączone zostało tylko echo wysyłanych danych przy pomocy komendy ‘ATE0’. Wszystkie ustawienia zapisywane są w nieulotnej pamięci modułu i nie jest konieczne każdorazowe konfigurowanie modułu po włączeniu zasilania.

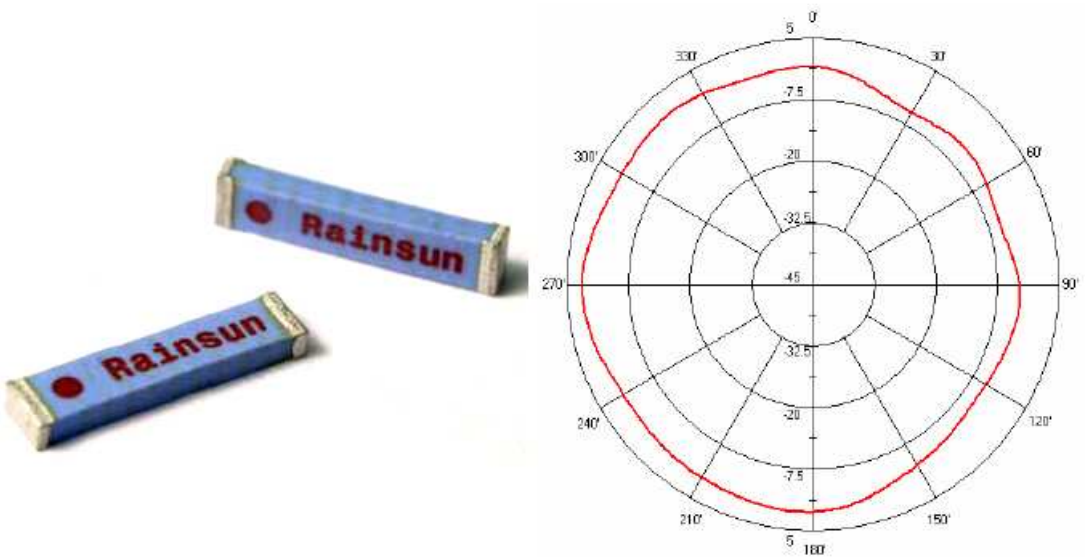


Fot. 2.2 Moduł Bluetooth BTM-220

Ponieważ wybrany moduł Bluetooth nie ma wbudowanej anteny, należało takową dobrać. Bluetooth pracuje w paśmie ISM 2,4GHz, a więc w tym samym co urządzenia ZigBee oraz bezprzewodowe sieci WLAN, dlatego też możliwe jest wykorzystanie tych samych anten. Ponieważ na ryku dostępne są anteny o bardzo różnej budowie i przeznaczeniu, przed przystąpieniem do wyboru anteny należy sprecyzować jakie parametry powinna ona posiadać. Zastosowana antena powinna być niewielka, najlepiej w obudowie SMD, aby nie zakłócała pracy czujników (nie zasłaniała ich) umieszczonych na wieżyczce robota, dzięki temu będzie również mniej podatna na uszkodzenia mechaniczne. Charakterystyka promieniowania anteny

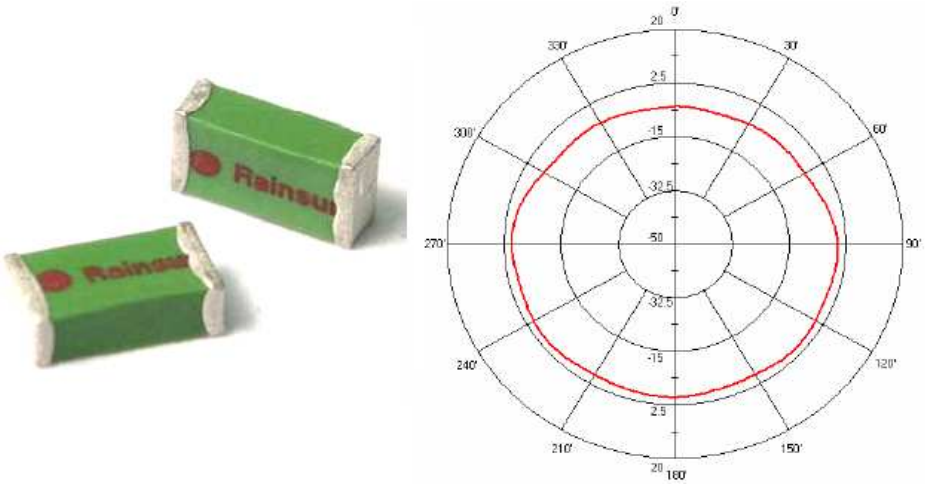
powinna być równomierna, tak aby siła sygnału nie zależała od kąta pod jakim obrócony jest robot względem komputera. Ponieważ anteny te są bardzo tanie (nawet poniżej 1zł) cena nie została uwzględniona przy wyborze. Powyższe założenia spełnia bardzo wiele anten dostępnych na polskim rynku, dlatego też w dalszej części podrozdziału opisane zostaną tylko cztery przykładowe anteny.

Rysunek 2.14 przedstawia wygląd anteny mikropaskowej firmy Rainsun AN9520 oraz charakterystykę promieniowania w płaszczyźnie poziomej. Antena ta ma wymiary 9,5x2x1mm. Zysk kierunkowy anteny dochodzi do 1,5dBi. Antena ta wykonana jest jako element SMD w technologii bezołowiowej i montowana jest bezpośrednio na obwodzie drukowanym. Nie wymaga żadnego złącza dzięki czemu jest wygodna w użyciu i zajmuje mało miejsca. Częstotliwość środkowa wynosi 2,45GHz a pasmo przenoszenia ma szerokość 200MHz.



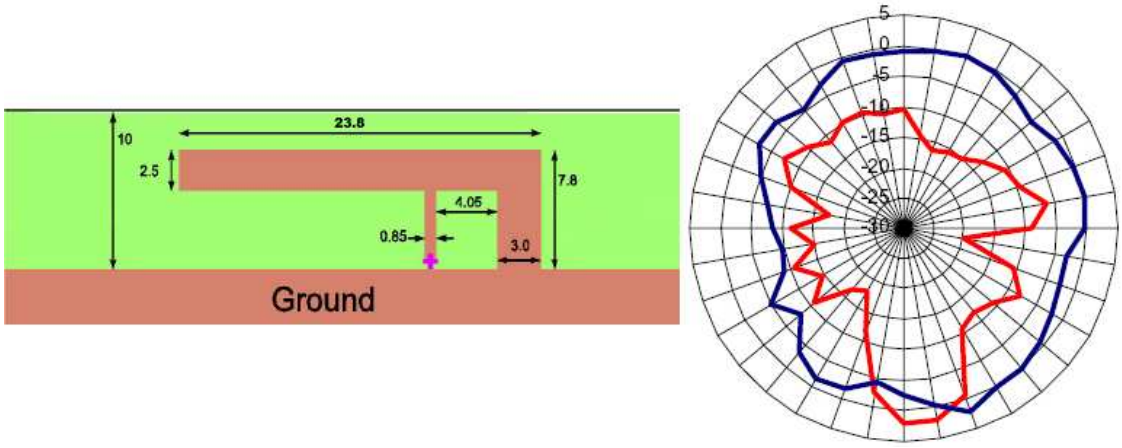
Rys. 2.14 Wygląd oraz charakterystyka anteny AN9520

Druga antena AN3216 również produkowana przez firmę Rainsun, jest jeszcze mniejsza, ma wymiary 3,2x1,6x0,9mm. Niestety mniejsze wymiary spowodowały, że antena ta ma gorsze parametry. Zysk kierunkowy anteny wynosi tylko 0,5dBi. Rysunek 2.15 przedstawia jej wygląd oraz charakterystykę promieniowania.



Rys. 2.15 Antena AN3216 oraz jej charakterystyka

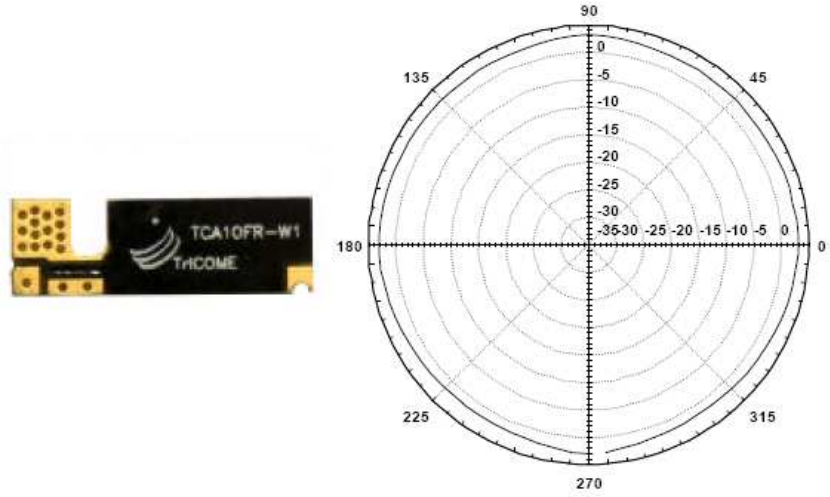
Trzecią rozważaną do wykorzystania anteną jest antena typu „F” wykonywana na obwodzie drukowanym. Aby wykonać taką antenę wystarczy odpowiednio ukształtować miedź na laminacie, np. według rysunku 2.16. Anteny tego typu mają charakterystykę w przybliżeniu dookólną (niebieski wykres). Zysk anteny wykonanej według rysunku 2.16 waha się w okolicach 0dBi.



Rys. 2.16 Przykładowe wymiary anteny typu „F” oraz jej charakterystyka

Anteny typu „F” można również kupić w formie gotowego elementu. Często jest to kawałem laminatu, na którym wytrawiona jest antena. Przykładem takiej anteny jest antena TCA10F firmy TriCOM. Ma ona wymiary 16x5x1.8mm. Montowana jest na płytce obwodu powierzchniowo. Ma bardzo równomierną charakterystykę dookólną, pasmo przenoszenia o szerokości 300MHz a jej zysk kierunkowy wynosi maksymalnie 3dBi. Antena ta posiada bardzo dobre parametry ale wymaga specjalnie przygotowanego miejsca do montażu na obwodzie drukowanym. Zamontowana musi

być na brzegu płytki a laminat pod anteną musi być wycięty co dosyć poważnie komplikuje jej wykorzystanie.



Rys. 2.17 Antena TCA10F oraz jej charakterystyka

W tabeli 2.5 zostały przedstawione najważniejsze parametry opisanych anten. Można zauważyć, że wszystkie anteny mają taką samą częstotliwość środkową, oraz wystarczająco szerokie pasmo przenoszenia (pasmo ISM 2,4GHz ma szerokość 83,5MHz). Wszystkie są również na tyle małe, że umieszczenie ich na powierzchni obwodu drukowanego nie jest kłopotliwe.

Antena	Częstotliwość środkowa [GHz]	Szerokość pasma przenoszenia [MHz]	Zysk kierunkowy [dBi]	Charakterystyka promieniowania	Impedancja [Ω]	Cena [zł]
AN9520	2,45	200	1,5	dookólna	50	1,49
AN3216	2,45	100	0,5	dookólna	50	0,99
Typu „F" na laminacie	2,45	200	0	dookólna	50	0
TCA10F	2,45	300	3	dookólna	50	8,09

Tab. 2.5 Zestawienie parametrów anten

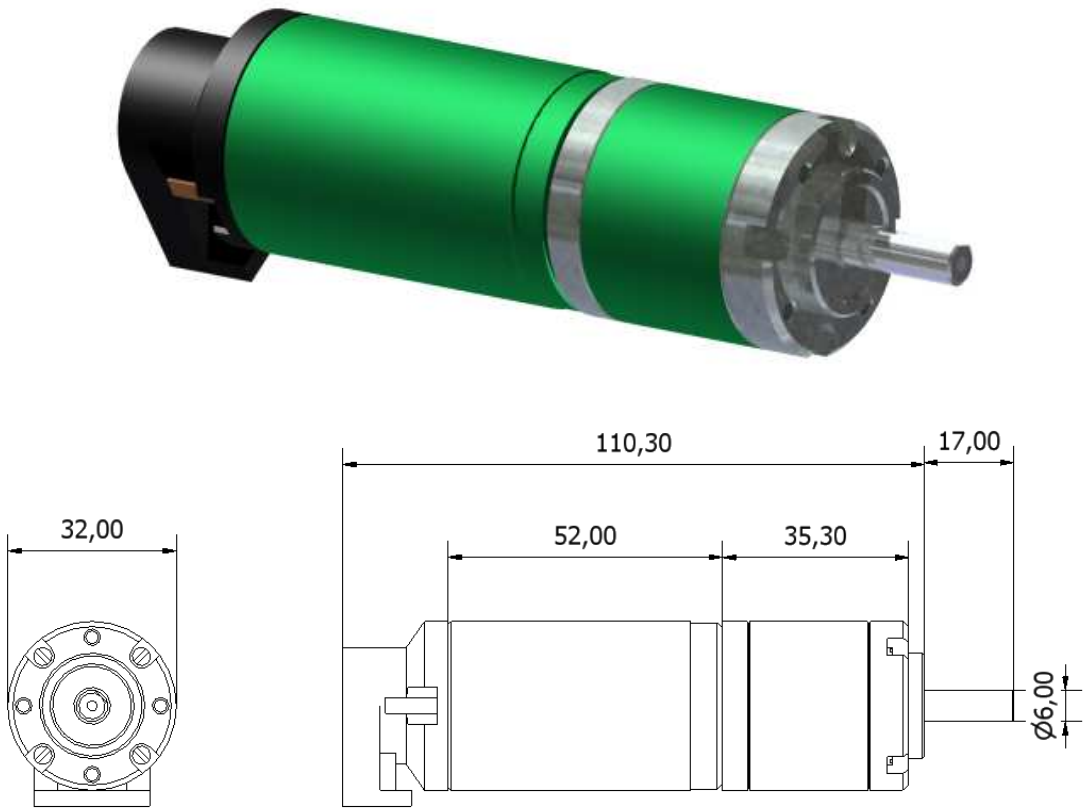
Wydaje się, że najlepszym wyborem jest antena TCA10F z powodu największego zysku kierunkowego, ale z powodu dosyć skomplikowanego montażu tej anteny została wybrana druga pod względem zysku kierunkowego antena AN9520.

3. Realizacja systemu bezprzewodowej komunikacji robot – komputer

3.1 Robot

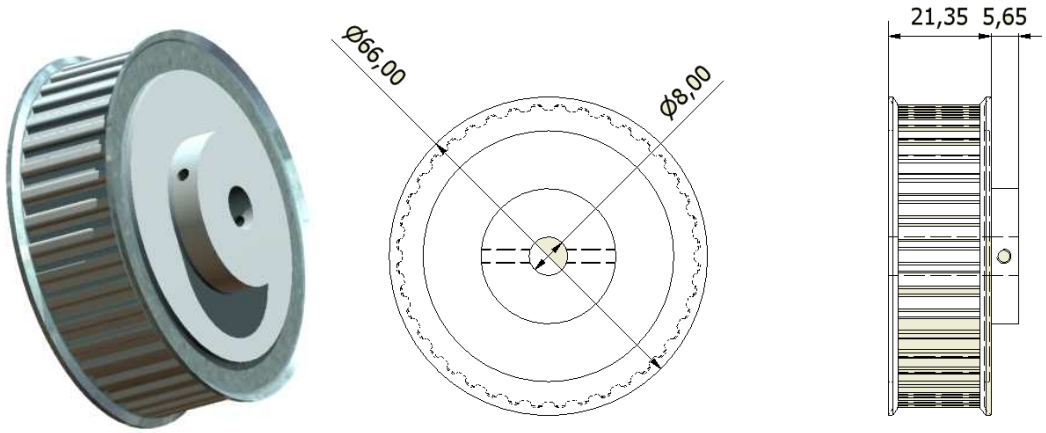
Pierwszą fazą realizacji projektu było sprecyzowanie założeń. Przede wszystkim robot miał mieć estetyczną i prostą budowę. Zdecydowano, że układ jezdny robota będzie napędzany dwoma silnikami, a robot będzie poruszał się na gąsienicach. Zasilanie robota stanowi pakiet 6 ogniw litowo-polimerowych o napięciu 22,2 wolta i pojemności 800 miliamperogodzin. Na górze robota ma znajdować się wieżyczka o dwóch stopniach swobody zbudowana z serw modelarskich. Cała konstrukcja natomiast ma się opierać na laminacie, na którym będzie jednocześnie znajdować się układ elektroniczny robota. Konstrukcja na laminacie zapewni estetykę wykonania, zminimalizuje do minimum połączenia przewodowe wewnątrz robota oraz znacząco uprości całą budowę. Cały robot ma być podzielony na moduły które łączyć się będą ze sobą za pomocą magistrali I^2C, dzięki czemu uprości się jego budowa, oraz możliwa będzie rozbudowa robota w przyszłości o kolejne moduły. Ma być on również wyposażony w różnego rodzaju czujniki. Na „podwoziu" robota mają się znajdować czujniki odległości oraz czujniki refleksyjne do badania podłoża, po którym porusza się robot. Silniki napędzające robota mają być wyposażone w enkodery dzięki którym można będzie określić z jaką prędkością porusza się robot. Dodatkowo na ruchomej wieży robota mają znajdować się optyczne oraz ultradźwiękowe mierniki odległości.

Drugim etapem realizacji projektu było wykonanie rysunku przestrzennego robota. Posłużył do tego program Autodesk Inventor 11. Na etapie wykonywania rysunku należało już dobrać wszystkie części mechaniczne. Do napędzania robota wybrane zostały silniki elektryczne firmy Maxon Motor o oznaczeniu 44.032.000-00.16-111 wraz z przekładniami planetarnymi o oznaczeniu 110462. Silniki dodatkowo wyposażone są w enkodery optyczne.



Rys. 3.1 Silnik wraz z przekładnią

Jako koła wykorzystane zostały koła zębate T5 o oznaczeniu: 21T5-40. Koła takie wykorzystywane są w przemyśle do przenoszenia napędu. Wykonane są z aluminium co zapewnia ich niewielką wagę oraz łatwość obróbki. Koła tego typu są też chętnie wykorzystywane przy budowie amatorskich robotów sumo.



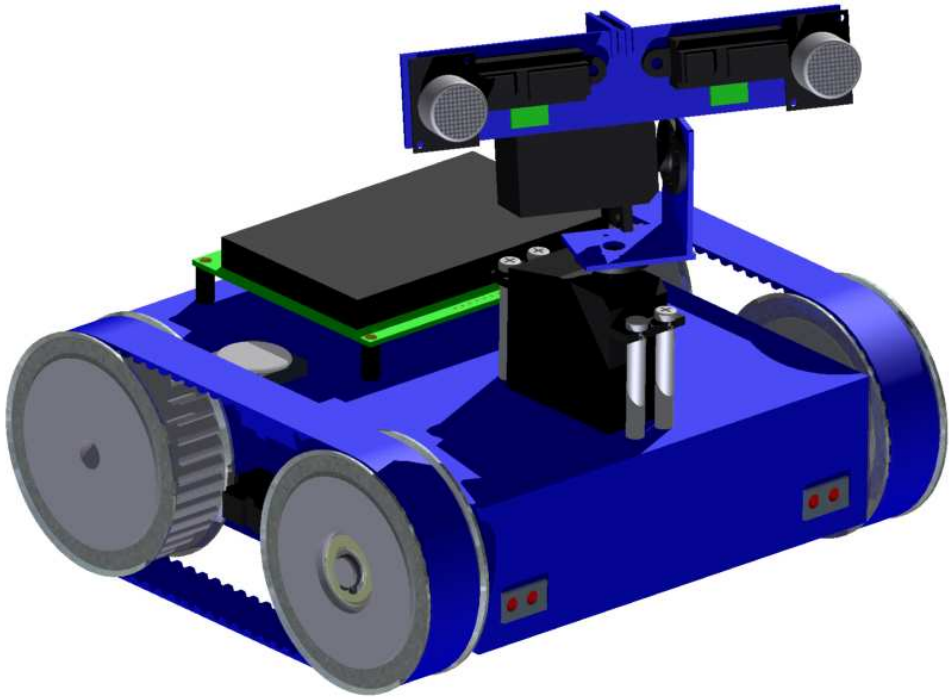
Rys. 3.2 Koło zębate 21T5-40

Gąsienice zostały wykonane z pasa zębatego T5 o szerokości 16mm i długości 400mm, na który została naklejona warstwa bieżnikowanej gumy.



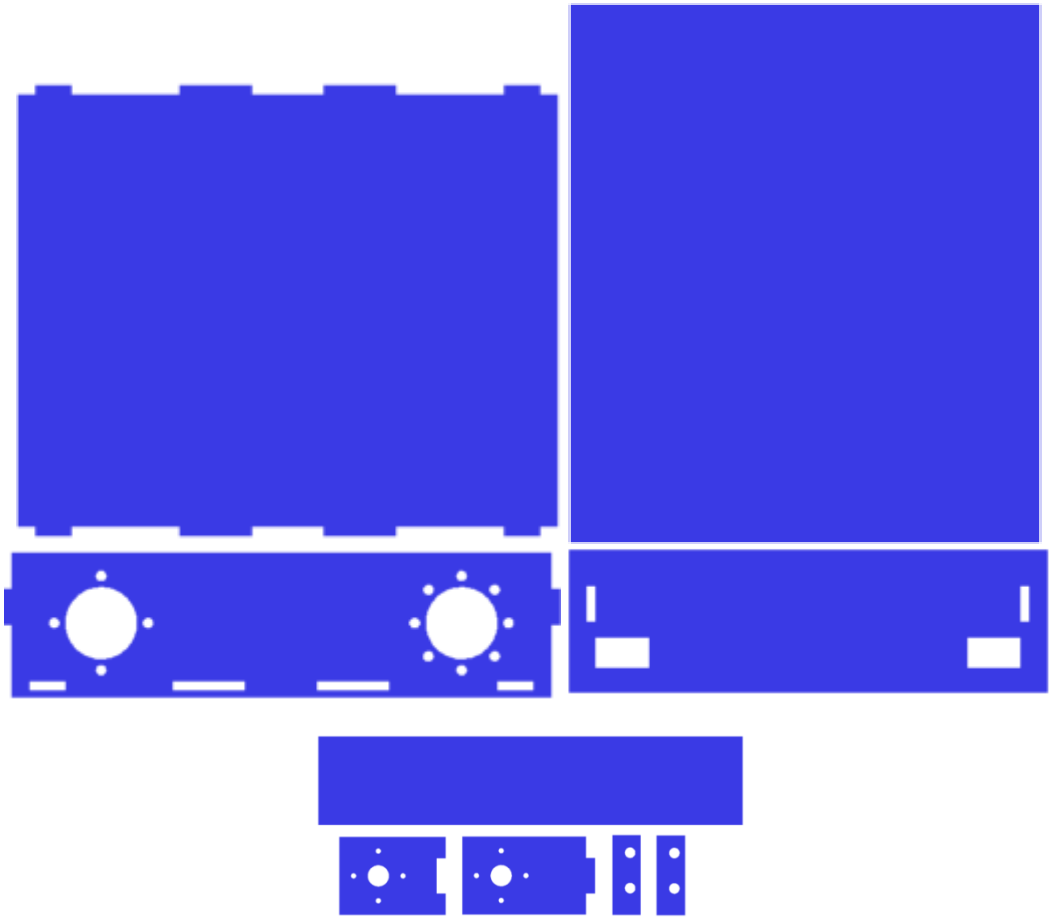
Fot. 3.1 Gąsienica

Zgodnie z założeniami szkielet robota stanowią płytki laminatu zlutowane razem pod kątem 90 stopni. Rysunek przestrzenny nie uwzględnia wszystkich szczegółów budowy, ale pozwala rozplanować rozmieszczenie głównych elementów i pomaga uniknąć wielu błędów. Gotowy projekt robota przedstawia rysunek 3.3.



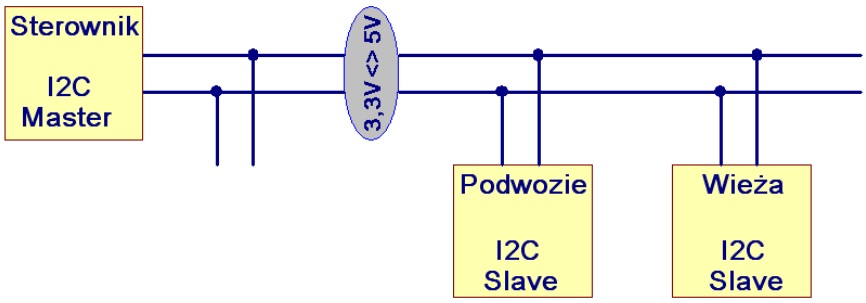
Rys. 3.3 Gotowy projekt robota wykonany w programie Autodesk Inventor

Kształt zaprojektowanych płytek laminatu posłużył do narysowania obrysu płytek, na których zastała umieszczona elektronika robota.



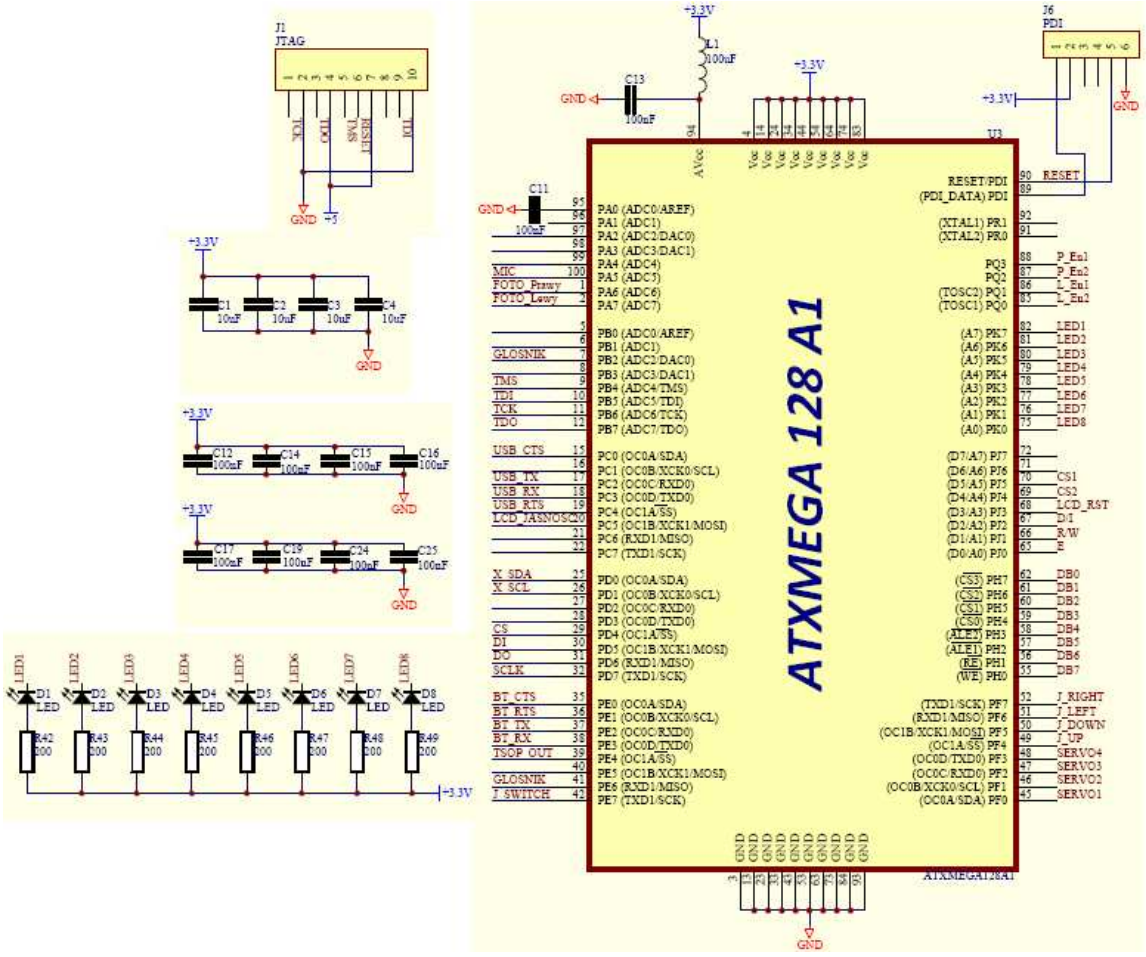
Rys. 3.4 Kształty płytek laminatu

Kolejnym etapem projektu było zaprojektowanie schematu ideowego oraz zaprojektowanie obwodu drukowanego. Zarówno schemat ideowy jak i obwód drukowany zostały zaprojektowane przy pomocy programu Protel99se. Zgodnie z założeniami robot ma budowę modułową, a kolejne moduły połączone są ze sobą za pomocą magistrali I^2C. Robot będzie posiadał 3 moduły. Pierwszy z nich będzie głównym sterownikiem robota, a znajdujący się na tym module procesor będzie pełnił rolę kontrolera magistrali I^2C. Na tym module będą się również znajdować gniazda do których będzie można podłączyć dodatkowe moduły. Kolejne moduły będą pełniły role podrzędne na magistrali I^2C, a będą to moduły znajdujące się na podwoziu robota oraz na jego wieży.



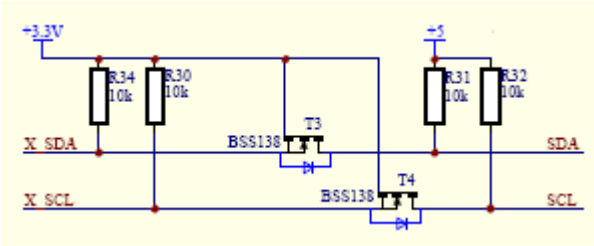
Rys. 3.5 Podział układu na moduły

Na module sterownika znajduje się mikrokontroler firmy Atmel ATXmega128A1, który jest głównym procesorem robota. Jest to jeden z najnowocześniejszych mikrokontrolerów ośmiobitowych, wyposażony jest w 128 kilobajtów pamięci flash, 8 kilobajtów pamięci SRAM oraz 4 kilobajty pamięci EEPROM. Zasilany jest napięciem z zakresu 1,6-3,6 wolta i może pracować z częstotliwością 32MHz. W projekcie wykorzystana została wersja mikrokontrolera ze stu nóżkową obudową TQFP. Posiada on 78 programowalnych linii wejścia/wyjścia, z których 61 zostało wykorzystanych. Procesor ten został wybrany m.in., ze względu na wymaganą liczbę linii wej/wyj, dużą ilość wbudowanych układów peryferyjnych, ale także ze względu na chęć wykorzystania nowoczesnego procesora i nauczenia się jego obsługi. Na schemacie oraz płytce umieszczone są dwa złącza służące do programowania robota, złącze do interfejsu PDI oraz JTAG. Oba złącza mogą być wykorzystane do programowania oraz debugowania programu.



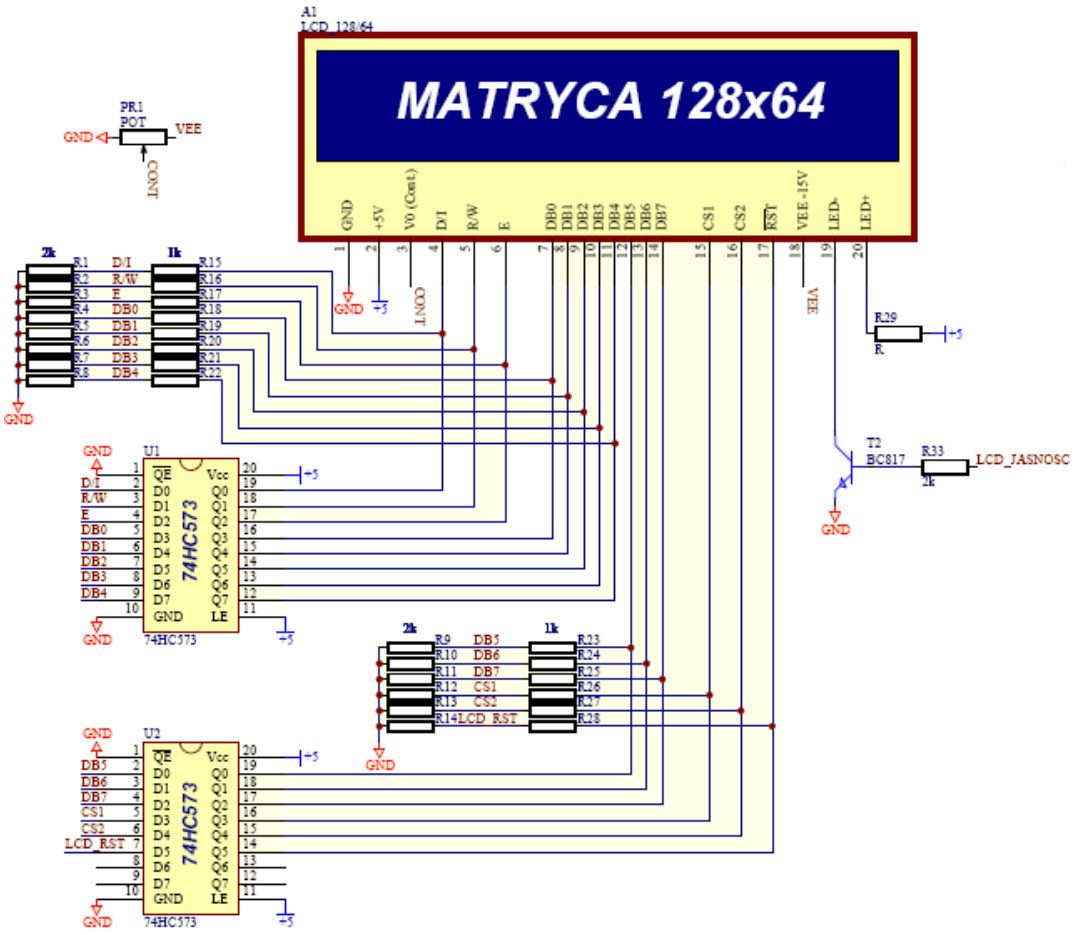
Rys. 3.6 Główny procesor robota

Ponieważ, procesor na płytce sterownika jest zasilany napięciem 3,3V pozostałe dwa moduły są zasilane napięciem 5V, niezbędne okazało się zastosowanie konwertera napięć na liniach magistrali łączącej moduły. Na rysunku 3.7 pokazany jest schemat dwukierunkowego konwertera napięć opracowanego przez firmę NXP.



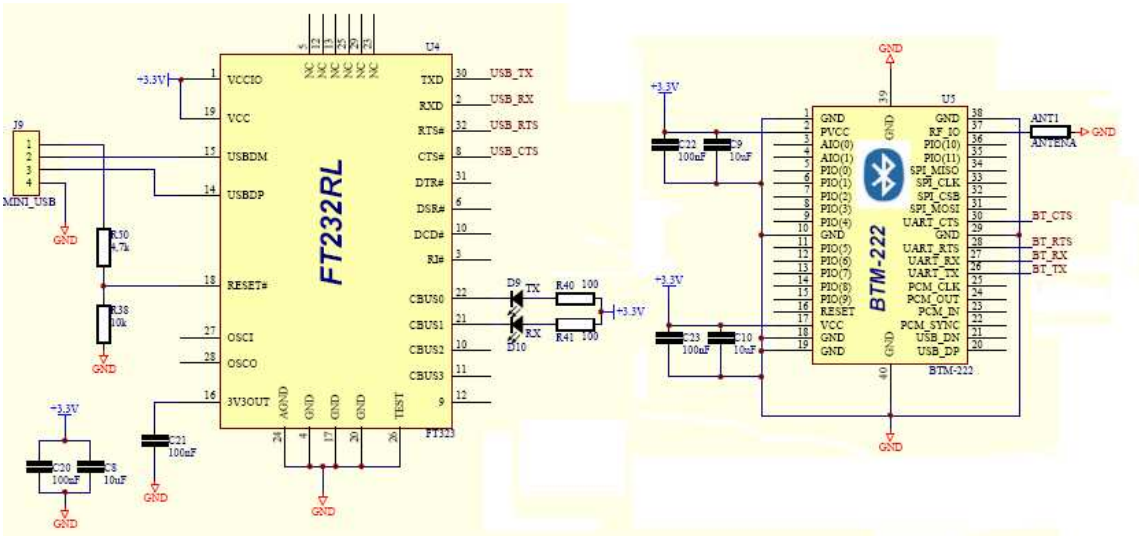
Rys. 3.7 Dwukierunkowy konwerter napięć magistrali I^2C

Aby niektóre komendy mogły być wydane robotowi bez użycia komputera, na płytce sterownika został umieszczony wyświetlacz graficzny LCD o rozdzielczości 128 na 64 pikseli, oraz miniaturowy joystick który ma służyć do poruszania się po wyświetlanym na matrycy LCD menu. Na rysunku 3.8 pokazany jest schemat połączeń pomiędzy wyświetlaczem. Ponieważ wyświetlacz zasilany jest napięciem 5V niezbędnym okazało się podłączenie linii sterujących z procesora za pośrednictwem dwukierunkowego konwertera napięć zbudowanego z buforów znajdujących się w układzie 74HC573 oraz rezystorów tworzących dzielnik napięcia. Potencjometr PR1 służy do ustawienia kontrastu matrycy, natomiast tranzystor T2 który sterowany jest sygnałem PWM z mikrokontrolera służy do regulacji jasności podświetlania matrycy.



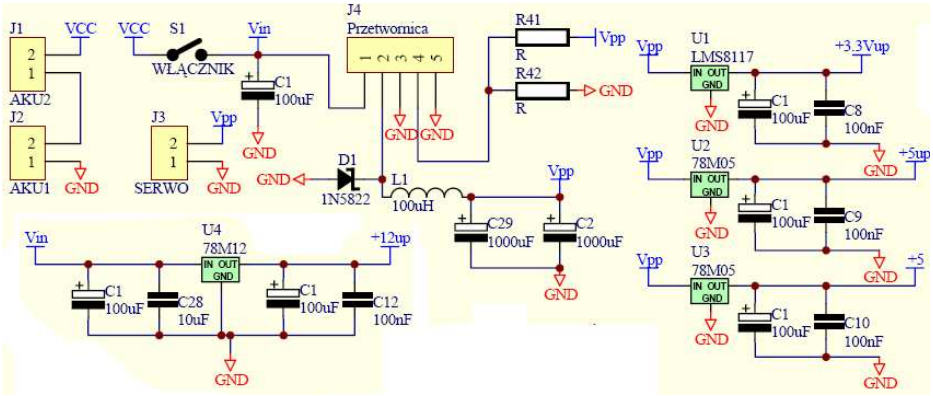
Rys. 3.8 Schemat podłączenia wyświetlacza LCD

Do komunikacji z komputerem służą dwa moduły, oba działają na podobnej zasadzie tworząc pomiędzy komputerem a mikrokontrolerem wirtualny port szeregowy. Pierwszy z nich zbudowany jest na bazie układu FT232RL. Jest to układ konwertera interfejsu USB na USART. Natomiast drugi moduł zbudowany jest w oparciu o moduł Bluetooth BTM-222 i w połączeniu z modułem Bluetooth zainstalowanym w komputerze tworzy wirtualne bezprzewodowe połączenie szeregowe. Na rysunku 3.9 pokazany jest schemat połączeń obu układów. Układ FT232RL połączony jest z mikrokontrolerem za pośrednictwem 4 linii standardu RS232, są to linie TX, RX, RTS oraz CTS, natomiast linie interfejsu USB wyprowadzone są na złącze mini-usb. Moduł BTM-222 połączony jest z mikrokontrolerem również za pomocą 4 linii, ale wykorzystywane są tylko dwie z nich TX oraz RX.



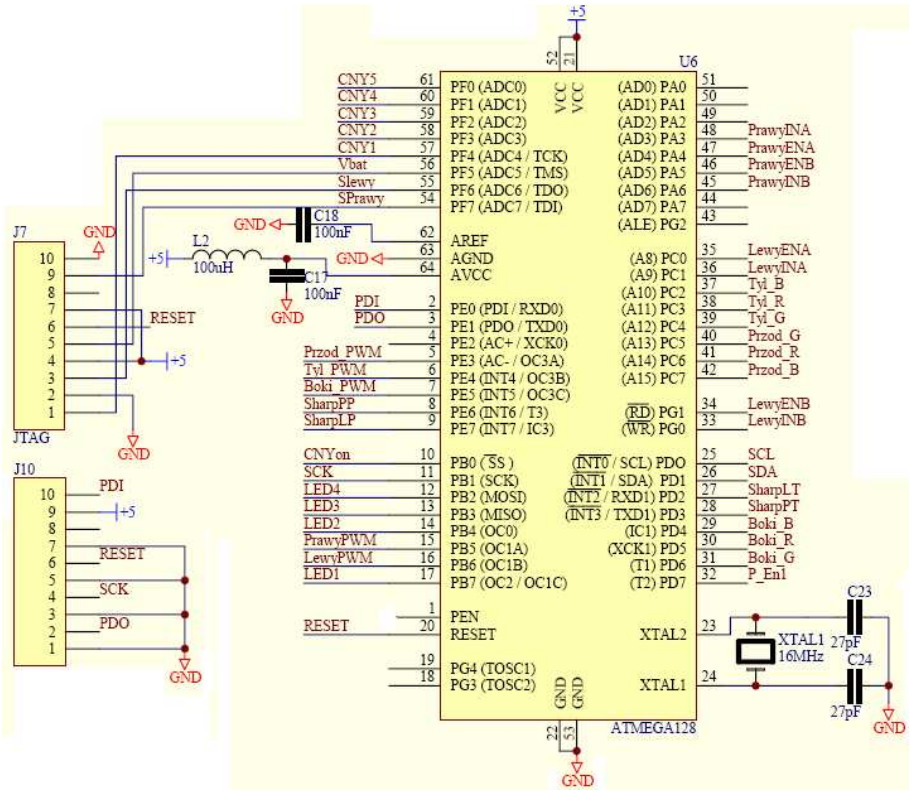
Rys. 3.9 Schematy podłączenia modułu BTM-222 oraz układu FT232RL

Na rysunku 3.10 znajduje się schemat bloku zasilania robota. Do podłączenia akumulatora służą dwie wtyczki, dzięki czemu jako akumulator można wykorzystać dwa modelarskie pakiety litowo-polimerowe o napięciu 11,1V, a więc w rezultacie robot zasilany jest napięciem 22,2V. Układy scalone mostków H zasilane są bezpośrednio z akumulatora. Aby zasilić pozostałe układy, napięcie wstępnie obniżane jest przy pomocy przetwornicy impulsowej zbudowanej na bazie układu LM2576. Zasilanie do przetwornicy doprowadzane jest poprzez włącznik hebelkowy. Napięcie wyjściowe przetwornicy zostało ustawione przy pomocy rezystorów R41 i R42 na około 6V. Napięcie to zostało wykorzystane do zasilania serwomechanizmów z których zbudowana jest wieża robota, oraz jako napięcie wejściowe scalonych stabilizatorów liniowych LDO które zasilają pozostałe układy robota. Wykorzystane zostały 3 stabilizatory dwa z nich mają napięcie wyjściowe równe 5V oraz jeden o napięciu wyjściowym 3,3V. Dodatkowo w bloku zasilania znalazł się stabilizator o napięciu wyjściowym równym 12V które może zostać wykorzystane w przyszłej rozbudowie robota. Jeden ze stabilizatorów 5V zasilana płytkę modułu podwozia natomiast pozostałe napięcia (3,3V,5V,12V) zostały wyprowadzone na złącze i podłączone do płytki sterownika.



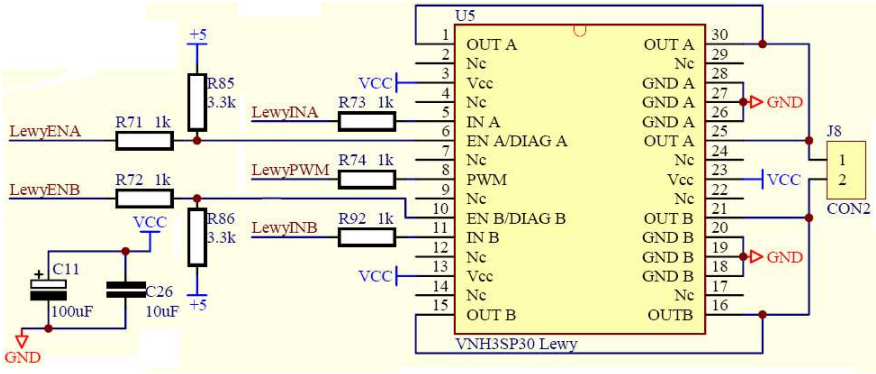
Rys. 3.10 Schemat bloku zasilania

Procesorem sterującym modułem podwozia został wybrany mikrokontroler firmy Atmel ATmega128, jest on taktowany zewnętrznym rezonatorem kwarcowym o częstotliwości 16MHz. Został on wyposażony w dwa 10-pinowe złącza. Pierwsze z nich ISP służy do programowania, natomiast drugie złącze JTAG może służyć do programowania oraz do debugowania programu. Mikrokontroler ten pracuje jako podrzędny na magistrali I^2C. Odpowiedzialny jest on za sterowanie silnikami, sterowanie oświetleniem robota, odczyt wyników pomiarów z czujników oraz pomiar napięcia akumulatora.



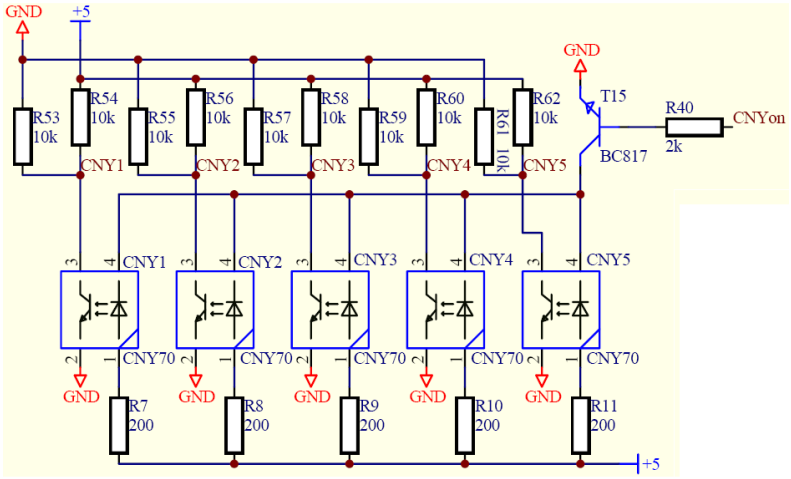
Rys. 3.11 Połączenia procesora modułu podwozia

Do sterowania silników został wykorzystany scalony mostek H VNH3SP30. Jego podstawowe właściwości to: napięcie zasilania do 36V, prąd wyjściowy do 30A, częstotliwość PWM do 10kHz. Został on wybrany ze względu na małe wymiary, dobre parametry oraz to, że nie wymaga przykręcenia do radiatora, a jego chłodzenie realizowane jest poprzez odpowiednio uformowane na płytce drukowanej pola miedzi. Rysunek 3.12 pokazuje sposób podłączenia mostka do mikrokontrolera.



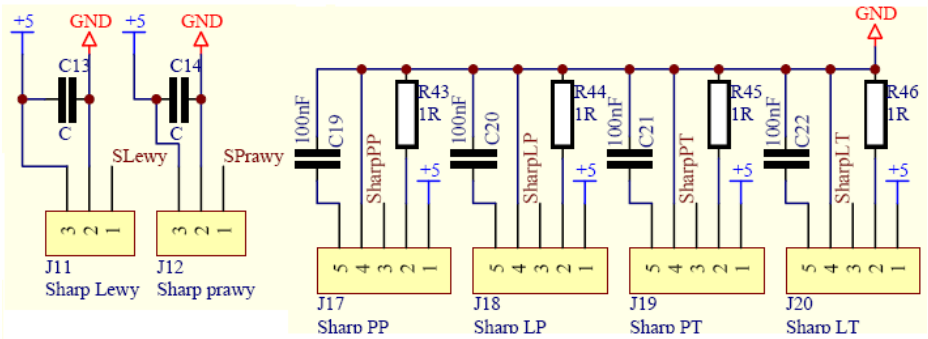
Rys. 3.12 Schemat podłączenia sterownika silników

Na dolnej stronie płytki podwozia znajdują się transoptory odbiciowe CNY70, wykrywają one czy podłoże ma jasny czy ciemny kolor. Mają one służyć do wykrywania czarnej linii gdy robot pracuje w trybie linie-follower. Gdy czujnik znajduje się nad jasną powierzchnią wiązka światła podczerwonego emitowana przez wbudowaną w transoptor diodę odbija się i pada na fototranzystor, który zaczyna przewodzić. Skutkuje o obniżeniem napięcia na wyjściu dzielnika zbudowanego z dwóch rezystorów 10kΩ. Zmiany te są odczytywane przez przetwornika analogowo-cyfrowy mikrokontrolera. Dzielnik w obwodzie kolektora fototranzystora został zastosowany aby na jego wyjściu napięcie zmieniało się w granicach od zera do 2,5V. Taki zakres jest potrzebny, ponieważ jako napięcie referencyjne przetwornika ADC wykorzystywane jest wewnętrzne źródło napięcia odniesienia wbudowane w mikrokontroler o napięciu 2,56V.



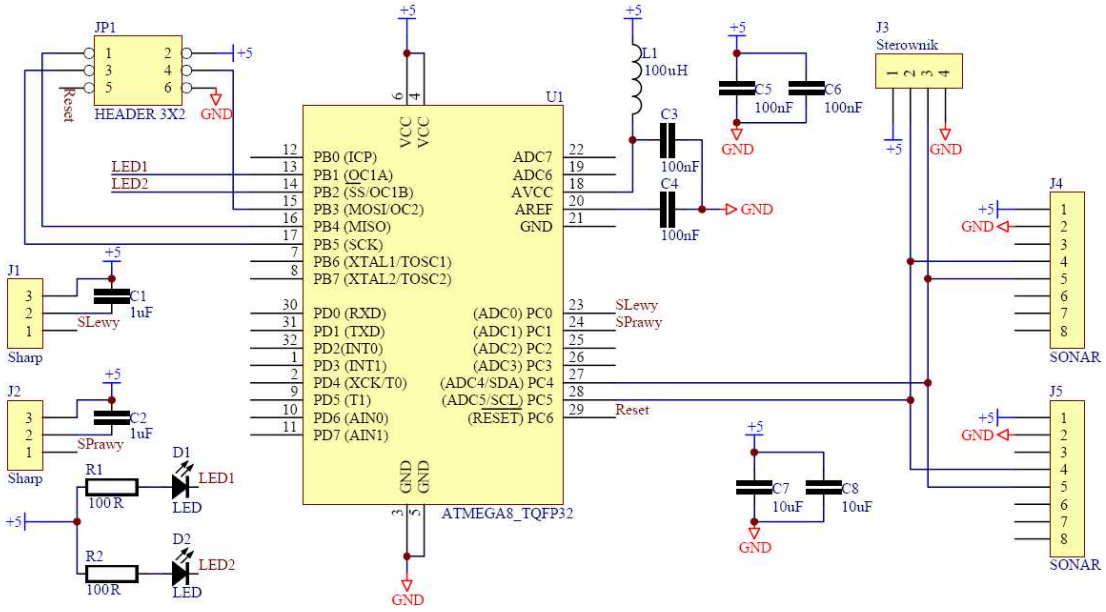
Rys. 3.13 Schemat podłączenia transoptorów odbiciowych (czujników podłoża)

Z przodu oraz z tyłu robota znajdują się po dwa czujniki odległości firmy Sharp o oznaczeniu GP2Y0D340Y. Wykrywają one czy w odległości do 40cm przed czujnikiem znajduje się przeszkoda. Mają być one wykorzystane do uniknięcia zderzenie robota z np. ścianą. Po bokach robota między kołami umieszczone zostały dwa dalmierze optyczne firmy Sharp GP2D12. Na ich wyjściu pojawia się napięcie odwrotnie proporcjonalne do odległości pomiędzy czujnikiem a przedmiotem. Zostaną one wykorzystane do orientacji robota według ścian (jazda wzdłuż ściany lub jazda środkiem korytarza).



Rys. 3.14 Schemat podłączenia dalmierzy optycznych, z lewej GP2D12, z prawej GP2Y0D340Y

Moduł wieży umieszczony jest na szczycie ruchomej wieżyczki. Rysunek 3.15 pokazuje schemat połączeń modułu wieży. Na płytce modułu znajduje się mikrokontroler ATmega8L, dwa dalmierze optyczne Sharp GP2D12, dwie super jasne diody LED super-flux o kącie świecenia 120 stopni, oraz dwa złącza dalmierzy ultradźwiękowych, które zostały zaprojektowane jako osobne moduły. Oznacza to, że w rzeczywistości moduł wieży składa się z trzech mniejszych modułów.



Rys. 3.15 Schemat modułu wieży

Moduł sonaru został zaprojektowany jako uniwersalny dalmierz ultradźwiękowy. Cały układ sonaru umieszczony jest na oddzielnej niewielkiej płytce drukowanej i sterowany jest przez mikrokontroler ATmega8L . Ponieważ moduł ten został zaprojektowany tak, że może być użyty również w innych urządzeniach możliwe jest ustawienie zasięgu oraz czułości sonaru za pomocą komend wydawanych za pośrednictwem magistrali I^2C. Spis wszystkich komend znajduje się w tabeli 3.1.

I bajt	II bajt	Opis komendy	Zakres
0x10	-	Nakazuje wykonanie pomiaru	-
0x20	zasięg	Zmiana maksymalnego zasięgu	0 - 255
0x30	czułość	Zmiana czułości	0 - 100

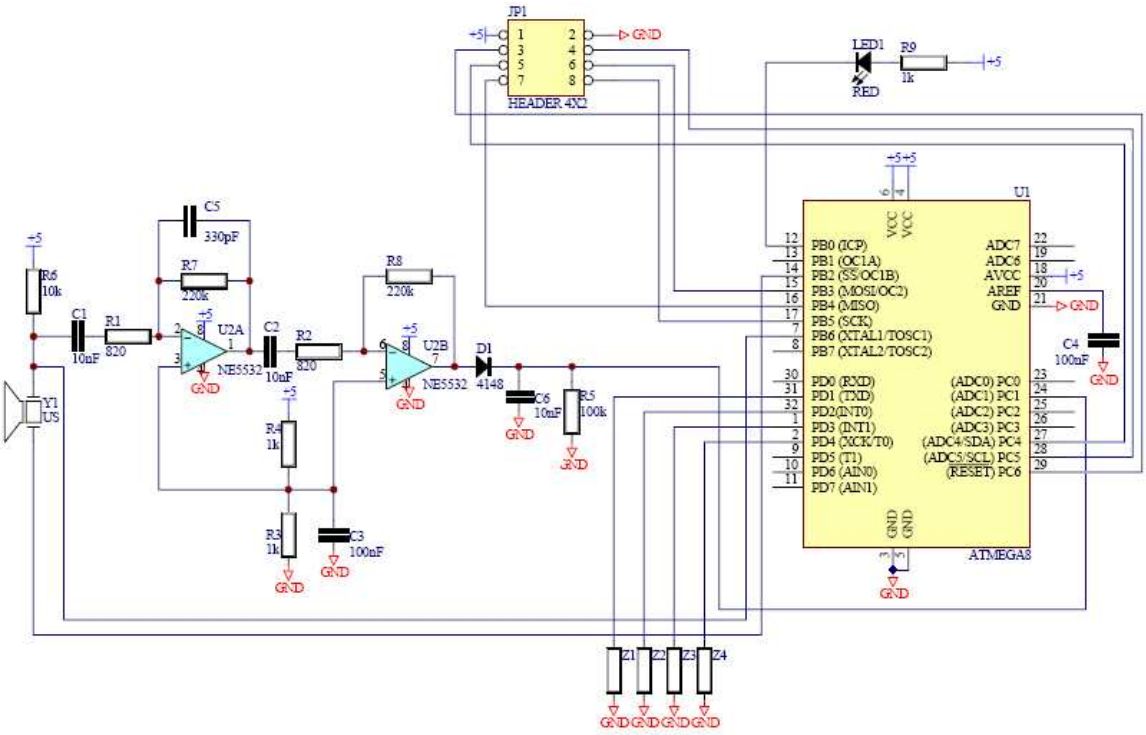
Tab. 3.1. Komendy sterujące sonarem

Pomiar wykonywany jest przez sonar dopiero po wysłaniu odpowiedniej komendy, jest to ważne ponieważ, sonary mogą się nawzajem zakłócać i nie można wydawać polecenia wykonania pomiaru do sonaru gdy w tym czasie inny sonar wykonuje pomiar. Adres jaki będzie posiadał moduł sonaru ustawiany jest za pomocą zworek. Tabela 3.2 przedstawia przyporządkowanie adresów do kombinacji zlutowanych zworek, gdzie „X” oznacza zworkę zlutowaną a „0” zworkę nie zlutowaną.

Nr zworki	Z1	0	X	0	X	0	X	0	X	0	X	0	X	0	X	0	X
	Z2	0	0	X	X	0	0	X	X	0	0	X	X	0	0	X	X
	Z3	0	0	0	0	X	X	X	X	0	0	0	0	X	X	X	X
	Z4	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X
Adres	DEC	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
	HEX	10	12	14	16	18	1A	1C	1E	20	22	24	26	28	2A	2C	2E

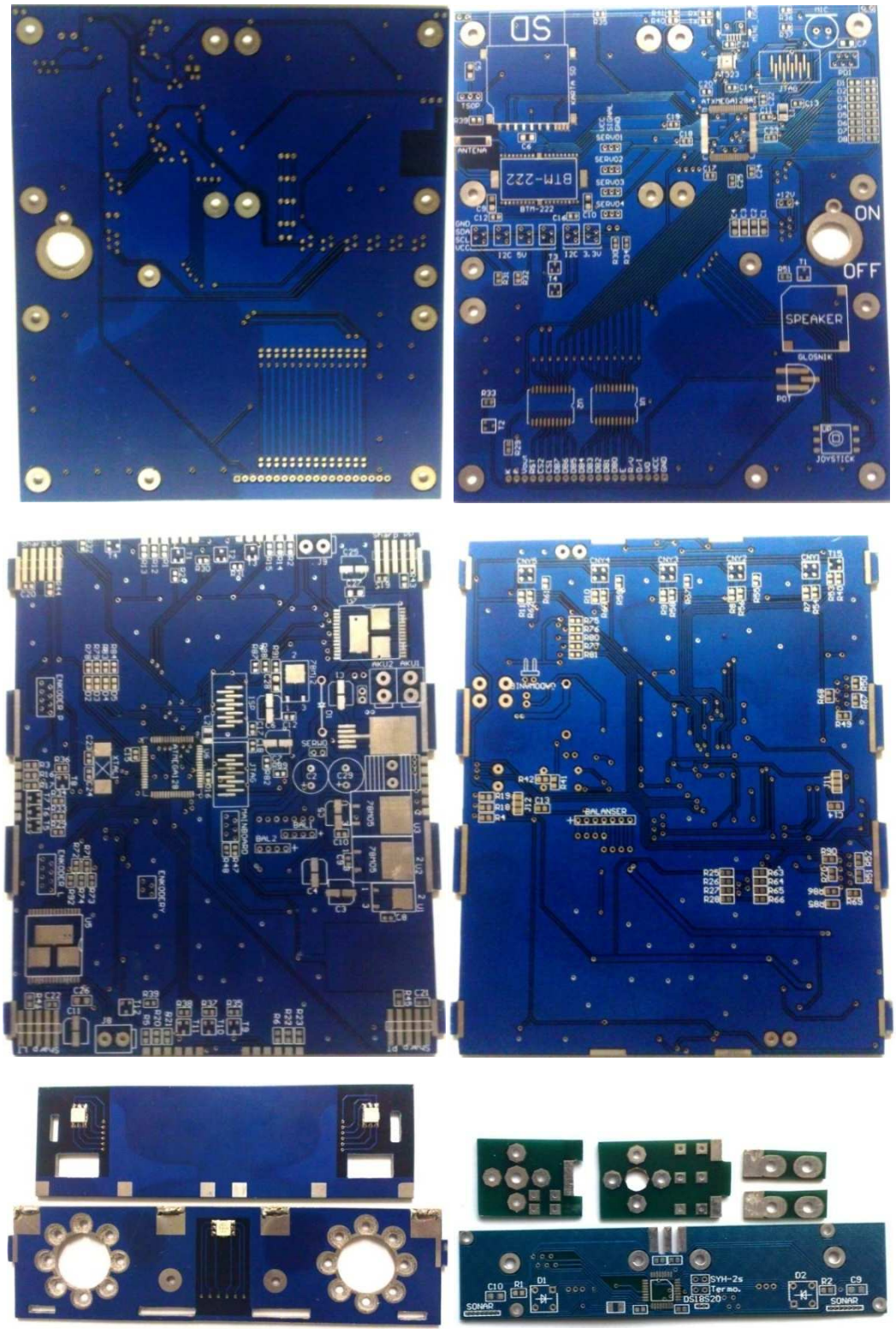
Tab. 3.2 Przyporządkowanie adresów do kombinacji zworek

Rysunek 3.16 prezentuje układ modułu sonaru. Jako przetwornik ultradźwiękowy został wykorzystany przetwornik dwukierunkowy firmy BESTAR pracujący na częstotliwości 40kHz. Przetwornik ten sterowany jest bezpośrednio z portu mikrokontrolera. Po wysłaniu 10 impulsów ultradźwiękowych procesor zaczyna odliczać czas i czeka na powrót odbitej fali dźwiękowej, sygnał odebrany przez przetwornik jest wzmacniany i filtrowany w filtrze aktywnym zbudowanym na bazie wzmacniacza operacyjnego NE5532. Następnie sygnał z filtru podawany jest na prosty detektor obwiedni i dopiero sygnał z detektora podawany jest na wejście przetwornika ADC. Po wykryciu odbitej fali dźwiękowej zatrzymywane jest odliczanie czasu i na jego podstawie obliczana jest odległość od przeszkody.



Rys. 3.16 Schemat modułu sonaru ultradźwiękowego

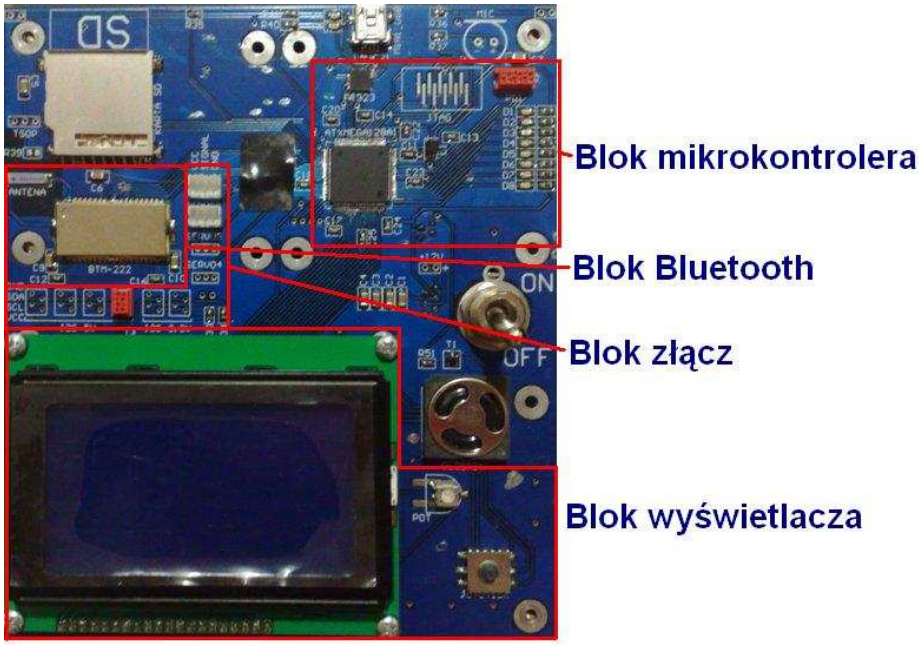
Konstrukcja robota składa się z kilku płytek. Widok wszystkich zaprojektowanych płytek przedstawia fotografia 3.2. Wyróżnić można trzy najważniejsze płytki drukowane: płytki modułów sterownika, podwozia i wieży. Konstrukcję uzupełnia kilka mniejszych płytek.



Fot. 3.2 Płytki drukowane

Na płytce sterownika można wyróżnić kilka bloków :

- blok mikrokontrolera zawierający mikrokontroler ATXmega128A1, kondensatory filtrujące, złącze programowania, złącze debuggera oraz diody LED,
- blok Bluetooth zawierający moduł BTM-220, antenę oraz kondensatory filtrujące,
- blok złącz zawierający złącza serwomechanizmów, cztery złącza I^2C TTL oraz dwa złącza I^2C LV-TTL (*Low Voltage TTL*),
- blok wyświetlacza zawierający matrycę graficzną, konwerter napięć (pod matrycą), potencjometr służący do regulacji kontrastu, tranzystor sterowany sygnałem PWM do regulacji podświetlenia matrycy oraz mini joystick.

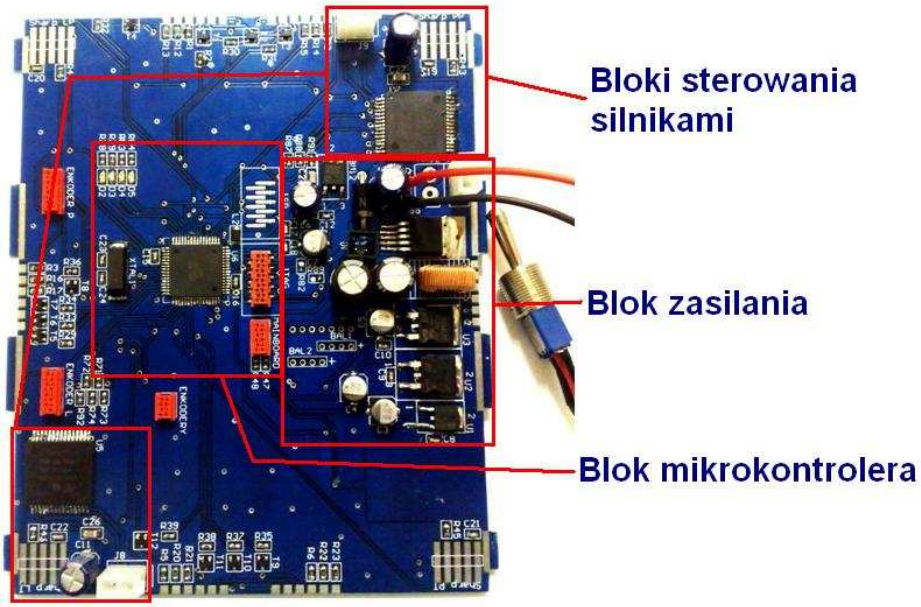


Fot 3.3 Podział modułu sterownika na bloki

Na płytce sterownika znajdują się głownie elementy zasilane napięciem 3,3V. Kondensatory filtrujące napięcie zasilania o pojemności 100nF oraz 10µF zostały umieszczone blisko wyprowadzeń mikrokontrolera oraz modułu Bluetooth. Mają one za zadanie zapewnić jak najbardziej stabilną pracę obu elementów. Moduł BTM-220 wraz z anteną został umieszczony na skraju płytki, w możliwie jak największej odległości od innych elementów, aby zminimalizować wpływ zakłóceń generowanych przez antenę i blok radiowy modułu Bluetooth. Wolne przestrzenie na płytce zostały wypełnione polami miedzi dołączonymi do obwodu masy w układzie. Wokół anteny został zostawiony obszar nie pokryty miedzią, aby nie tłumić nadawanego sygnału.

Na płytce modułu podwozia znajdują się trzy główne bloki:

- blok mikrokontrolera zawierający mikrokontroler ATmega128, kondensatory filtrujące, rezonator kwarcowy, złącza programatora i debuggera oraz diody LED,
- blok zasilania zawierający przetwornicę impulsową oraz stabilizatory liniowe,
- bloki sterowania silnikami zawierające scalone mostki H, kondensatory filtrujące oraz złącza silników.



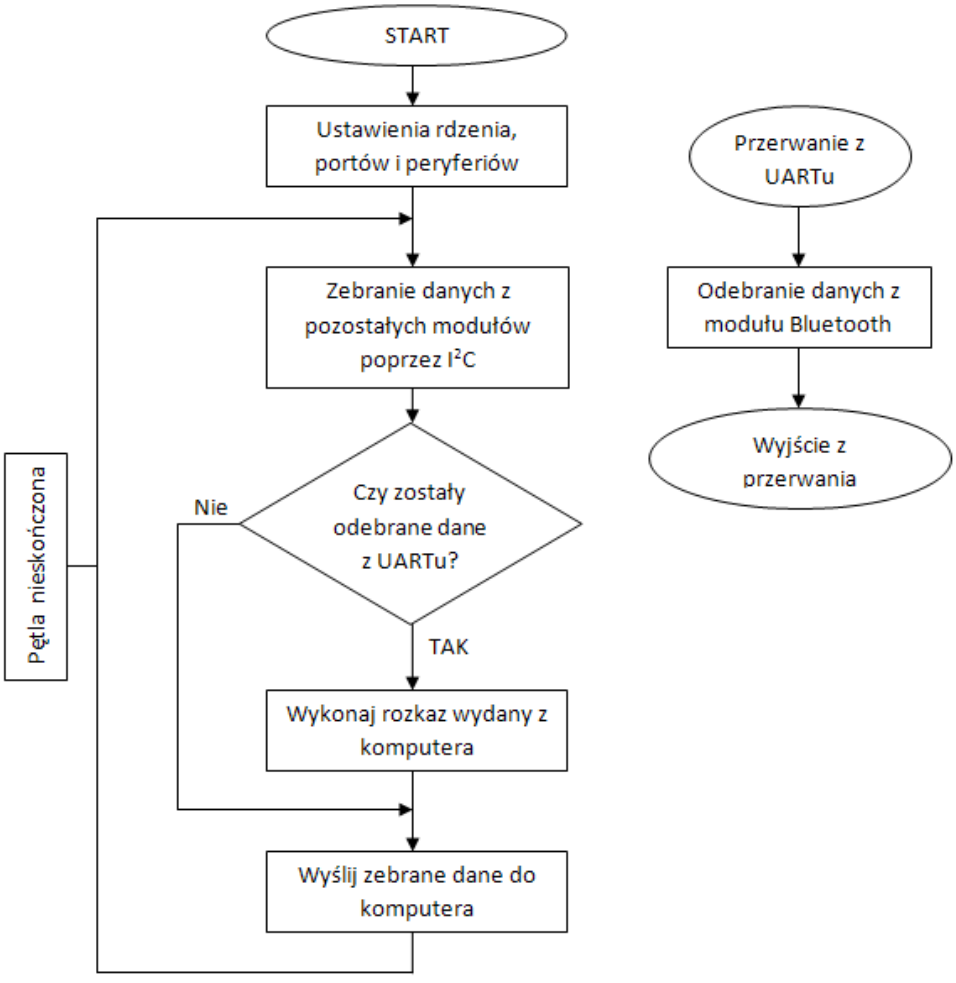
Fot. 3.4 Podział modułu podwozia na bloki

Na module podwozia wszystkie elementy zasilane są napięciem 5V. Mikrokontroler został umieszczony w możliwie dużej odległości od bloku zasilania, sterowników silników oraz samych silników, które stanowią potencjalne źródło zakłóceń elektromagnetycznych oraz wahań napięcia zasilającego. Radiatory do odprowadzania ciepła z mostków H, przetwornicy oraz stabilizatorów zostały wykonane w postaci pól miedzi na płytce obwodu drukowanego.

Program dla robota został napisany w środowisku AVRStudio 4.18 współpracującym z najnowszą wersją kompilatora WinAVR. Program zajmuje około 6kB pamięci mikrokontrolera. Znaczące uproszczenie programu uzyskano dzięki podziałowi zadań pomiędzy moduły robota. Sam program sterownika stanowi „ramę" do dalszego rozwoju. Rysunek 3.17 przedstawia schemat blokowy programu dla modułu sterownika. Wyróżnić w nim można dwa główne zadania. Pierwsze z nich polega na odbieraniu, interpretowaniu i wykonywaniu instrukcji wysyłanych z

komputera, z którym robot ma nawiązane połączenie Bluetooth. Drugie zadanie polega na zebraniu danych z czujników umieszczonych na poszczególnych modułach robota, a następnie wysłanie ich do aplikacji uruchomionej na komputerze. Mikrokontroler ATXmega128A1 po uruchomieniu domyślnie pracuje z częstotliwością taktowania wynoszącą 2 MHz, generowaną przez wbudowany oscylator. Pierwszą czynnością wykonywaną przez mikrokontroler jest zmiana częstotliwości pracy na 32 MHz. Aby zmienić częstotliwość pracy rdzenia należy przeprowadzić odpowiednią procedurę, składa się ona z kilku kroków:

1. uruchomienie oscylatora 32 MHz,
2. ustawienie preskalerów,
3. oczekiwanie na ustabilizowanie się oscylatora,
4. zmiana częstotliwości taktującej rdzeń z 2 MHz na 32 MHz,
5. wyłączenie oscylatora 2 MHz,
6. kalibracja oscylatora 32 MHz.

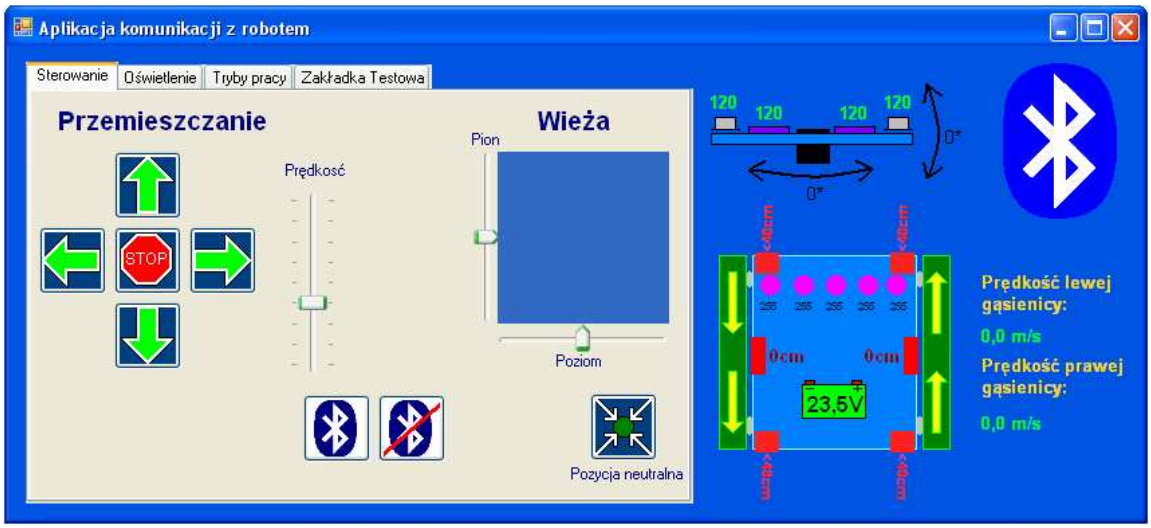


Rys. 3.17. Schemat blokowy programu dla modułu sterownika

Kolejną czynnością jest ustawienie portów oraz peryferiów (modułu UART, modułu TWI/I^2C, liczników oraz przerwań). Następnie program wchodzi w pętle nieskończoną, w której wykonuje kolejno czynności zobrazowane na schemacie blokowym. Za pośrednictwem magistrali I^2C zbierane są wyniki pomiarów z modułu podwozia, wieży i dwóch sonarów. Następnie sprawdzany jest warunek czy odebrany został rozkaz z komputera. Warunek jest spełniony jeżeli od poprzedniego sprawdzenia warunku wystąpiło przerwanie od UARTu. Jeśli warunek jest spełniony, wykonany zostaje fragment kodu odpowiadający odebranemu rozkazowi wybierany za pomocą instrukcji *switch()*. Na końcu pętli zebrane dane „pakowane" są w tablice, która wysyłana jest do aplikacji na komputerze.

3.2 Aplikacja na PC

Aplikacja służąca do komunikacji z robotem została napisana w formie aplikacji okienkowej w języku C#. Wygląd interfejsu przedstawia rysunek 3.18. Po lewej stronie okna znajdują się zakładki, w których znajdują się elementy służące do sterowania robotem. Zakładka pierwsza „Sterowanie" służy do nawiązywania połączenia Bluetooth oraz do ręcznego sterowania ruchami robota. Zakładka „Oświetlenie" służy do ustawiania oświetlenie na robocie. Za jej pomocą można ustawić jasność i kolor diod umieszczonych na podwoziu robota, włączyć lub wyłączyć podświetlania matrycy LCD oraz sterować super jasnymi białymi diodami umieszczonymi na wieży robota. Zakładka „Tryby pracy" służy do wyboru jednego trybów pracy robota. Aktualnie do wyboru są dwa tryby autonomiczne: tryb line follower i tryb samodzielnego zwiedzania pomieszczenia oraz tryb sterowania ręcznego.



Rys. 3.18 Wygląd interfejsu aplikacji

Po prawej stronie okna znajdują się dwa rysunki. Jeden z nich ma obrazować wieżę robota, a drugi obrazuje podwozie. Na rysunkach tych w sposób graficzny oraz liczbowy wyświetlane są wyniki pomiarów czujników, kierunek jazdy robota, napięcie akumulatora, prędkość poszczególnych gąsienic oraz wychylenie wieży robota w pionie i w poziomie. W prawym górnym rogu okna znajduje się duża niebieska ikona z symbolem Bluetooth, która zmienia swój kolor na zielony gdy nawiązane jest połączenie z robotem.

3.3 Komunikacja

Połączenie Bluetooth pomiędzy aplikacją a robotem nawiązywane jest poprzez wirtualny port szeregowy. Port ten jest tworzony przy pomocy programu *BlueSoleil*. Aby utworzyć wirtualny port szeregowy należy w programie *BlueSoleil* wyszukać urządzenia Bluetooth, moduł BTM-220 zostanie wykryty pod nazwą *Serial Adaptor*, następnie należy wykryte urządzenie sparować. Kolejną czynnością jest wykrycie jakie usługi oferuje dane urządzeni. Moduł BTM-220 w wersji dostępnej w sprzedaży oferuje tylko pracę jako wirtualny port szeregowy. Po nawiązaniu połączenia z urządzeniem, utworzony zostanie na komputerze wirtualny port COM o numerze z zakresu 10-30. Od tej pory gdy będzie nawiązywane połączenie z tym samym urządzeniem, przypisywany mu będzie zawsze ten sam numer portu COM.

Aplikacja nawiązuje połączenie Bluetooth z robotem poprzez utworzony wcześniej wirtualny port COM. Od strony programowej komunikacja wygląda tak samo jak komunikacja poprzez połączenie kablowe, tylko podczas wysyłania większej ilości danych można zauważyć minimalne opóźnienia w transmisji. Nawiązanie połączenia czyli tzw. „otwarcie” portu szeregowego trwa około trzech sekund. Komunikaty z aplikacji do robota wysyłane są w formie pojedynczych znaków ASCII. Taka forma danych została zastosowana w fazie testowania robota, gdy do komunikacji wykorzystywany był program *HyperTerminal* a komendy były wydawane z klawiatury i został wykorzystana również w gotowej aplikacji okienkowej.

Mikrokontroler sterujący robotem po zebraniu danych z modułów kopiuje je do jednej tablicy, z której następnie tworzy prostą ramkę danych wysyłaną drogą radiową do komputera. Format ramki przedstawia rysunek 3.19.



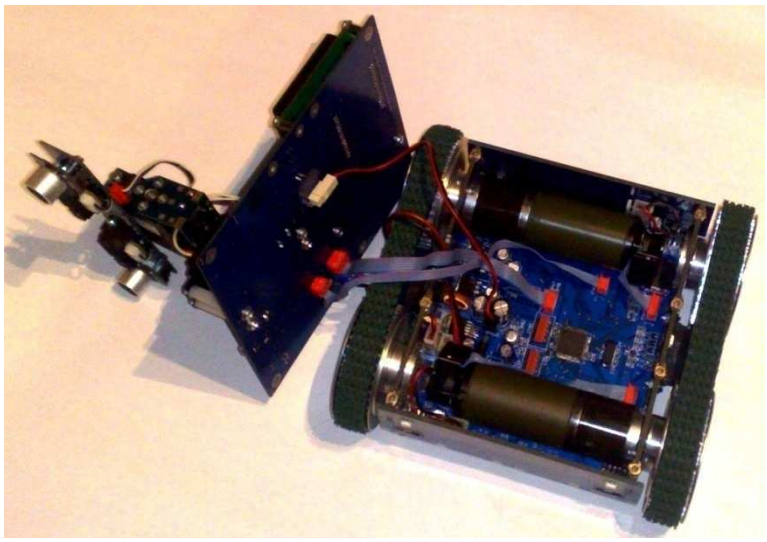
Rys. 3.19 Format ramki z danymi z czujników robota

Wysyłanych danych nie trzeba zabezpieczać przed błędami, ponieważ tym zajmują się niższe warstwy standardu Bluetooth. Niezbędne okazało się jednak dodanie nagłówka do wysyłanych danych, ponieważ jak się okazało często do bufora odbiorczego portu szeregowego zapisywane były dane bez pierwszego bajtu. Niestety nie udało się znaleźć przyczyny tego błędu. Nagłówek zawiera 5 bajtów o wartości 0 który jest usuwany po odebraniu całej ramki. W polu danych w kolejnych bajtach umieszczone są dane z kolejnych czujników. Znak końca linii jest właściwie częściom pola danych, został dodany aby aplikacja mogła zinterpretować odebraną ramkę jako *string* zakończony znakiem *ENTER*. Ramka wysyłana jest co 20 obiegów pętli głównej robota, co w efekcie daje wysyłanie ramki co okres czasu wynoszący od kilkudziesięciu do kilkuset milisekund w zależności od wykonywanych instrukcji. W aplikacji w zależności od odebranych danych ilustrowane są wyniki pomiarów czujników.

4. Podsumowanie

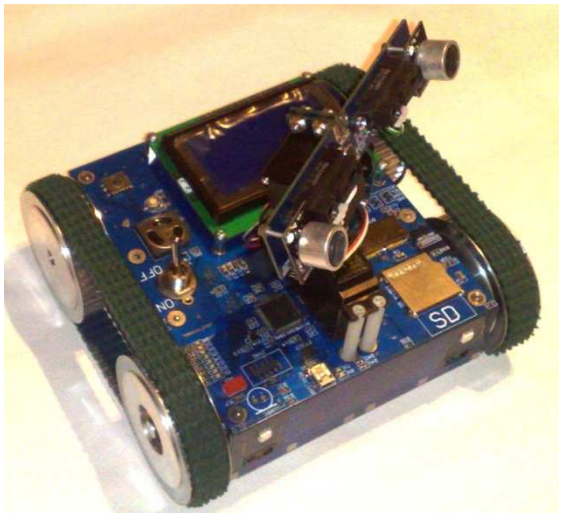
Zbudowany system bezprzewodowej komunikacji spełnia założenia postawione na początku pracy. Umożliwia on dwustronną komunikację pomiędzy robotem i komputerem wykorzystując bezprzewodową technologię Bluetooth. W fazie testów uzyskano zadowalający zasięg transmisji. Z założenia robot miał się poruszać wewnątrz domu lub mieszkania. Zasięg transmisji Bluetooth pozwolił na bezproblemową komunikację nawet gdy robot znajdował się piętro niżej niż współpracujący z nim komputer, mimo nie najlepszego umieszczenia anteny na płytce sterownika.

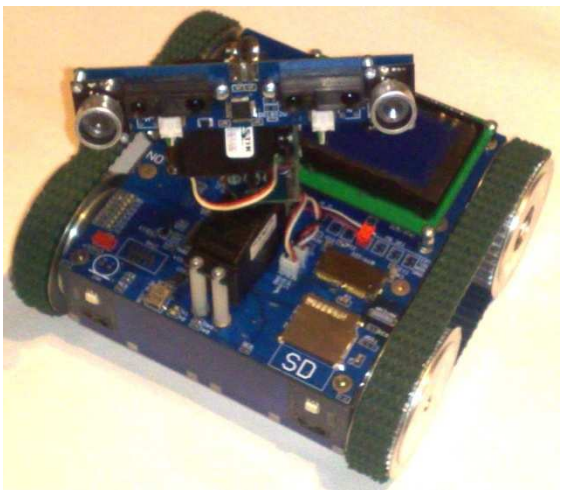
Podsumowując, udało się zbudować działający system komunikacji monitorujący na bieżąco stan wszystkich czujników umieszczonych na robocie. Robot, który przedstawiony jest na fotografiach 4.1, 4.2 i 4.3 wyposażony został w elementy sztucznej inteligencji i może poruszać się samodzielnie po zaprogramowanej wcześniej trasie lub samodzielnie poruszać się po pomieszczeniu wyszukując dla siebie drogi pomiędzy przeszkodami.



Fot 4.1 Wnętrze robota

Największą trudność podczas budowania systemu sprawiło skoordynowanie ze sobą wszystkich elementów systemu, ponieważ wynik pomiaru, który zostanie odczytany z czujnika przez mikrokontroler sterujący danym modułem robota wysyłany jest przez magistralę I^2C do mikrokontrolera sterującego robotem, następnie ten mikrokontroler wysyła dane drogą radiową do aplikacji na komputerze. W efekcie daje to konieczność skoordynowania ze sobą trzech programów i dwóch standardów transmisji danych .





Fot 4.2 i 4.3 Robot

Nie udało się niestety zrealizować wszystkich zaplanowanych funkcji robota. Na płytce sterownika zostały umieszczone elementy, które nie są jeszcze wykorzystywane. Należą do nich:

- odbiornik podczerwieni,
- mikrofon,
- głośnik,
- fototranzystory,
- wyświetlacz LCD,
- mini joystick.

Moduł wieży został również wyposażony w złącza dla czujników wilgotności, temperatury i gazu. W przyszłości planowane jest jeszcze rozbudowanie robota o moduł wyposażony w kamerę aby można było transmitować obraz z robota do komputera, a także aby robot mógł robić zdjęcia i zapisywać je na karcie pamięci. W tym celu na płytce sterownika umieszczone zostało złącze kart SD. Kuszące wydaje się również wykorzystanie telefonu komórkowego wyposażonego w moduł Bluetooth. Możliwe jest napisanie dla telefonu z systemem operacyjnym *Windows* aplikacji o podobnej funkcjonalności do tej przedstawionej w projekcie i stworzenie systemu bardziej mobilnego.

5. Literatura

[1] Kurtynik I.P., Karpiński M.: Bezprzewodowa transmisja informacji, Wydawnictwo PAK, Warszawa 2008

[2] Gajewski P., Wszelak S.: Technologie bezprzewodowe sieci teleinformatycznych, WKŁ, Warszawa 2008

[3] Bogucka H.: Projektowanie i obliczenia w radiokomunikacji Wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005

[4] Klajbor, Tomasz i Józef Woźniak, Standard Bluetooth i jego profile, Przegląd Telekomunikacyjny, 2004: 290-298.

[5] Wesołowski K.: Systemy radiokomunikacji ruchomej, WKŁ, Warszawa 2006

[6] http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_low_energy

[8] http://www.bluetooth.com/bluetooth

[9] http://realitynet.pl/e107_plugins/content/content.php?content.156

[10] www.ieee.org

[11] http://www.ieee802.org/15/

[12] www.tme.eu/pl

[13] www.bluegiga.com

[14] Rayson Technology Co., Ltd. *BTM-220 datasheet*

[15] http://www.csr.com/products/bc4ext_over.htm

6. Opis zawartości płyty CD

Folder	Opis zawartości
Praca pisemna	plik z pełnym tekstem pracy pisemnej w formacie PDF
Schematy i PCB	pliki ze schematami ideowymi i projektami płytek dla wszystkich modułów
Aplikacja	pliki źródłowe aplikacji dla PC
Programy robota	pliki źródłowe programów dla modułów robota