

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh a implementace bezdrátových měřicích
modulů pro domácí automatizaci**

Design and implementation of wireless sensors for home automation

Plzeň, 2014

Autor:

Bc. Martin Hulík

Vedoucí práce:

Ing. Roman Pišl

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin HULÍK**
Osobní číslo: **A12N0160P**
Studijní program: **N3918 Aplikované vědy a informatika**
Studijní obor: **Kybernetika a řídicí technika**
Název tématu: **Návrh a implementace bezdrátových měřicích modulů pro domácí automatizaci**
Zadávací katedra: **Katedra kybernetiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

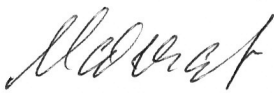
1. Seznamte se s principy fungování bezdrátových sítí a bezdrátových komunikací používaných v domácí a průmyslové automatizaci.
2. Prozkoumejte současné hardwarové trendy v oblasti domácí automatizace.
3. Navrhněte bezdrátové měřicí moduly pro domácí automatizaci.
4. Moduly implementujte na vhodně vybraném hardwaru.
5. Funkčnost řešení demonstруйте na vybrané ukázkové aplikaci.
6. Navrhněte způsob začlenění vyvinutých modulů do existujícího řídicího systému.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **35-50 stránek A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:


- [1] Ježek O. Síť bezdrátových senzorů pro automatické řízení. Odborná práce předkládaná ke státní doktorské zkoušce. Plzeň, 2011
- [2] Akerberg, J. ; Gidlund, M. ; Bjorkman, M. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. 2011
- [3] A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz. Wireless Technology in Industrial Networks. Proceedings of the IEEE, 93(6):1130-1151, červen 2005.
- [4] nRF24L01 Product Specification. Dostupné online:
<http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>
- [5] REX Controls: Stručný popis systému REX. Plzeň, 2013.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Pišl**
Katedra kybernetiky

Datum zadání diplomové práce: **23. září 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2014**


Doc. Ing. František Vávra, CSc.
děkan




Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne _____

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Romanovi Pišlovi za vedení diplomové práce a čas strávený při konzultacích. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu. Rovněž bych rád poděkoval své přítelkyni za toleranci při vypracovávání této práce.

Abstrakt

Tato práce se věnuje ucelenému návrhu bezdrátového komunikačního systému, skládající se z miniPC v roli master a z mikrokontrolérů v roli slave zařízení. Komunikace mezi zařízeními je realizována pomocí bezdrátových modulů Nordic Semiconductor nRF24L01+. Práce se věnuje fyzickému návrhu zařízení a ovládací aplikaci, která komunikuje s jednotlivými zařízeními. Návrh fyzických zařízení je zaměřen na snímání fyzikálních veličin pomocí senzorů a ovládání aktorů. Jedno z navržených zařízení je vhodné i pro bateriové napájení. Ovládací aplikace je složena z tenkého klienta v podobě HTML5 stránky a z aplikace běžící na miniPC realizující most mezi uživatelem a koncovým zařízením.

Klíčová slova

nRF24L01+, Arduino, Websocket, bezdrátový přenos dat, Raspberry Pi, internet věcí

Abstract

This paper deals with design of a wireless communication system. MiniPC in the role of master and microcontrollers in the role of slave. Communication between devices is implemented using wireless RF transceiver Nordic Semiconductor nRF24L01+. The work focuses on physical equipment design and control application that communicates with individual devices. Design of physical devices focuses at sensing physical quantities using sensors and control actuators. One of the proposed device is suitable with power battery. Control application is composed of a thin client in the form of HTML5 sites and application running on miniPC implements a bridge between the user and devices.

Keywords

nRF24L01+, Arduino, Websocket, Wireless Data Communication, Raspberry Pi, Internet Of Things

Obsah

1	Úvod	1
2	Bezdrátové sítě	3
2.1	Bezdrátové senzorické sítě	4
2.2	Standard IEEE 802.15.4	5
2.3	Průmyslové řešení bezdrátových sítí	10
3	Moduly pro bezdrátovou komunikaci	15
3.1	Seznámení s praktickou částí	15
3.2	Inspirace u podobných projektů	16
3.3	Výběr modulů vhodných pro bezdrátový přenos dat	17
3.4	Modul s Nordic Semiconductor nRF24L01+	17
4	Aplikace s bezdrátovými moduly	23
4.1	Aplikace pro Arduino	23
4.2	Komunikační část	25
4.3	Uživatelská aplikace	26
4.4	Schéma komunikace	26
4.5	Výběr kanálu pro vysílání	29
5	Navržené moduly s Arduinem	31
5.1	Univerzální testovací modul	31
5.2	Modul pro spínání zásuvek	32
5.3	Modul vhodný pro bateriový provoz	32
5.4	Modul pro měření solárního panelu	32
6	Závěr	35
	Literatura	37
A	Fotografie	I
B	Obsah přiloženého CD	VII

1 Úvod

Práce se věnuje možnostem bezdrátové komunikace s ovládacími prvky a snímáním veličin. Obsah práce se dělí na dvě části.

První část se zabývá popisem bezdrátových sensorických sítí, jejich vlastnostmi a rozdíly od klasických bezdrátových sítí. Pro tento typ sítí platí norma IEEE 802.15.4, jejíž obsah je přiblížen v kapitole 2.2. Důležitá, nicméně nepřilíš rozšířená aplikace těchto sítí je v průmyslu. Bližší popis průmyslových protokolů postavených na normě IEEE 802.15.4 je rozebrán v kapitole 2.3.

Praktická část práce se zabývá realizací levné bezdrátové sensorické sítě vhodné pro domácí automatizaci. Nejdůležitější prvek je bezdrátový modul. Jeho výběr a popis charakteristik vybraného modulu je v kapitole 3. Programová část práce se skládá ze tří softwarových aplikací. První slouží k ovládání koncového zařízení. Druhá aplikace je komunikační most mezi koncovým zařízením a uživatelskou aplikací. Třetí aplikace je reprezentována v podobě tenkého klienta dostupného přes webový prohlížeč.

V kapitole 5 jsou popsány čtyři realizované koncové zařízení, které mohou dohromady tvořit základ pro monitorovací stanici. Společně s Raspberry Pi kamerou tvoří atraktivní propojení uživatele a vzdáleně ovládané sensorické sítě.

2 Bezdrátové sítě

Bezdrátová síť se řadí pod počítačové sítě [10]. Spojení mezi jednotlivými účastníky sítě je provedeno pomocí bezdrátové komunikace. Data jsou přenášena šířením změn elektromagnetických vlastností prostředí. Vzduchem lze šířit pouze analogové signály, proto je nutno digitální data zakódovat pomocí amplitudové, frekvenční nebo fázové modulace. Implementace přenosu dat se nachází na fyzické vrstvě síťové struktury.

Typy bezdrátových sítí lze rozdělit na:

Wireless PAN Bezdrátová osobní síť (WPAN) spojuje jednotlivá zařízení v relativně malé oblasti. Například pomocí bluetooth nebo infračerveného světla můžeme připojit sluchátka k laptopu a tím si vytvořit malou osobní bezdrátovou síť (WPAN). ZigBee také podporuje WPAN aplikace. Tuto oblast popisuje IEEE 802.15 norma.

Wireless LAN Místní bezdrátová síť (WLAN) spojuje dvě nebo více zařízení pomocí určité distribuční metody, jako např. rozprostřené spektrum nebo OFDM modulace. Obvykle tato síť je připojena do internetu přes přístupový bod. To umožňuje uživatelům možnost pohybovat se oblastí pokryté signálem a být stále připojen do sítě. Většina WLAN sítí (známé pod pojmem Wi-Fi) je založena na normě IEEE 802.11.

Wireless WAN Bezdrátová rozsáhlá síť (WWAN) typicky pokrývá velké oblasti, jako například mezi sousedními vesnicemi a městy, nebo městem a předměstím. Bezdrátové spojení mezi přístupovými body je obvykle point-to-point a mikrovlnná linka používá parabolický reflektor na frekvenci 2,4 GHz.

Wireless MAN Bezdrátová metropolitní síť (WMAN) je navržena pro bezdrátový přenos v rámci metropolitní oblasti. Nejznámějším zástupcem v této kategorii je síť typu WiMAX, která je definována v normě IEEE 802.16.

Mobilní síť Typicky sítě GSM

Bezdrátovou síť upřednostňujeme před kabelovým propojením [7], když požadujeme mobilitu klientů, nemožnost natažení kabelu nebo kabelové připojení je příliš drahé a neefektivní. Nevýhodou bezdrátové sítě je malá šířka pásma v porovnání s metalickými sítěmi. Další nevýhody jsou omezení, které jsou stanoveny národními regulačními úřady. V České republice tyto stanovení spravuje Český telekomunikační úřad (ČTÚ).

Povolená pásma v České republice - nejčastěji se využívají volné pásma ISM¹

- 27MHz pro rádiově řízené modely, taktéž v pásmu 27MHz se provozuje radiové občanské pásmo CB² uvolněné k provozu široké veřejnosti bez nutnosti jakékoliv registrace a placení provozních poplatků (celkem 80 kanálů)
- 433MHz
- 868MHz
- 2,4GHz pásmo, které v ČR platí v rozmezí 2400–2483,5 MHz, maximální povolený vyzařovaný výkon je 100mW.

Dále se práce bude věnovat posledně jmenovanému pásmu ISM a jeho využití pro přenos dat. Nicméně budou zmíněny i vysílací/přijímací moduly pro pásma 433MHz a 868MHz.

2.1 Bezdrátové senzorické sítě

Pojem bezdrátová senzorová síť (WSN) je v knize Wireless Sensor Network (WSN) [9],[8] definovaný jako infrastruktura, která se skládá z nejrůznějších měřících, výpočetních a komunikačních prvků, které správci dané sítě umožňují sledovat, dokumentovat a reagovat na vzniklé situace a jevy ve specifickém prostředí (fyzický nebo i internetový svět). Pojmem správce se rozumí osoba, administrátor, který sleduje své zájmy v oblasti civilní, vojenské, obchodní nebo průmyslové.

Senzorová síť se skládá z komponent:

- množiny rozptýlených senzorů
- propojovací sítě mezi senzory (ve většině založeny na bezdrátové komunikaci)
- centrální zařízení tzv. koordinátor, starající se o komplementaci a shromažďování informací
- množina výpočetních zdrojů, které jsou soustředěny v centrálním zařízení sloužící ke korelaci dat, získávání informací o stavu sítě a zjišťovaných datech.

Popis senzorové sítě

Síť WSN je sestavena z uzlů (nodes). Jednu síť může tvořit od jednotek až po stovky uzlů. Ke každému uzlu může být připojen senzor (nebo i více) nebo může fungovat jako transportní uzel pro komunikaci mezi ostatními uzly. Uzel je typicky sestaven z několika částí: rádiový

¹ISM = Industrial, Scientific and Medical

²CB = Citizen Band

vysílač s interní nebo externí anténou, mikrořadiče, elektrického obvodu pro připojení senzoru a obvod se zdrojem energie (externí napájení, baterie nebo autonomní zdroj energie). Hlavní požadavky jsou kladeny na cenu, multifunkčnost a energetickou nenáročnost uzlu. Úloha uzlu v síti je nejen informaci snímat, zpracovávat nebo odesílat, ale možnost naprogramovat uzel jednoduchými povely, aby se stal autonomním systémem s vnitřní programovatelnou logikou.

Každou síť WSN lze popsat základními vlastnostmi [6],[8]: (1) Topologie sensorové sítě, tj. propojení jednotlivých uzlů mezi sebou a jejich vzájemné rozmístění; (2) Propojenost sítě je klíčová pro určení, které uzly sensorové sítě jsou ve vzájemném kontaktu v průběhu komunikace a zda během procesu dochází k přerušení komunikace; (3) Pokrytí a velikost sítě. Tyto charakteristiky definují vzájemné propojení a hustotu rozmístění sensorů uvnitř sítě v rámci jedné oblasti; (4) Způsob komunikace - sensorový uzel může komunikovat nejen rádiově, ale také pomocí světelných či zvukových signálů.

Charakteristiky WSN oproti klasické bezdrátové síti [11],[8]:

- Vyšší počet sensorických uzlů.
- Bateriové nebo alternativní napájení.
- Omezení týkající se zdroje energie, výpočetní a paměťové kapacity. Nižší rychlost přenášených dat a rozdílná velikost komunikačních rámců. Uzel je zaměřen primárně na sběr a zpracování dat.
- Začlenění uzlu do sítě může probíhat automaticky.
- Vnější omezení ovlivňující funkčnost zařízení. Uzel může být vystaven nepříznivému prostředí bez obsluhy, kde hrozí fyzické poškození.
- Velkou roli v WSN hrají algoritmy obsluhující chod sítě.
- Nasazení uzlů může být závislé na specifické aplikaci, z tohoto důvodu i návrh sítě by měl být přizpůsoben vlastní aplikaci.

2.2 Standard IEEE 802.15.4

Standard IEEE 802.15.4 patří do rodiny standardů IEEE 802.15. Celá rodina popisuje komunikaci pro WPAN sítě. Normu 802.15 tvoří celkem 7 skupin, popisující jednotlivé možnosti bezdrátových sensorických sítí. Dále v této práci bude rozebrána 4. skupina popisující detailně zařízení spadající do skupiny LR-WPAN³.

LR-WPAN je jednoduchá, nízko nákladová komunikační síť, která umožňuje bezdrátovou komunikaci pro aplikace, kde jsme omezeni výkonem zařízení. Hlavní cíl LR-WPAN je jednoduchost instalace, spolehlivost přenosu dat, nízká cena komunikačního modulu a malá spotřeba

³LR-WPAN = Low Rate Wireless Personal Area Network

energie. Přitom je snaha o zachování jednoduchosti a flexibility protokolu.

Základní charakteristiky sítě:

- přenos informace typu peer-to-peer nebo hvězda
- unikátní 64-bitová adresa nebo krátká 16-bitová adresa
- možnost rozdělení komunikačního toku do časově pevných úseků (GTS)
- vícenásobný přístup vyhýbání se kolizím metodou CSMA-CA nebo ALOHA přístup ke kanálu
- potvrzení došlé zprávy znakem ACK
- nízká spotřeba energie
- indikace kvality spojení

Norma se věnuje popisu architektury jako fyzické vrstvy (PHY⁴) a vrstvy přístupu k mediu (MAC⁵). Nad těmito vrstvy se pak staví další vrstvy sítě tzv. protokoly (např. ZigBee), které se věnují popisu síťové a aplikační vrstvy modelu sítě.

2.2.1 Prvky sítě IEEE 802.15.4 WPAN

Norma [1] podporuje dva typy zařízení, plně funkční zařízení (FFD⁶) a zařízení s omezenou funkcí (RFD⁷). Uzel RFD lze připojit jen k FFD, protože zajišťuje jen vlastní komunikaci, lze šetřit jeho systémovými prostředky (sleep mode, menší program v paměti atd.). Oproti tomu zařízení FFD musí kontrolovat komunikaci i od příchozích FFD nebo RFD zařízení a slouží k přeposílání zpráv.

2.2.2 Použité topologie

Dle požadavků aplikace, norma IEEE 802.15.4 WPAN umožňuje pracovat v jedné ze dvou topologiích: hvězdicová topologie nebo topologie peer-to-peer. Obě jsou znázorněny na obrázku 2.1.

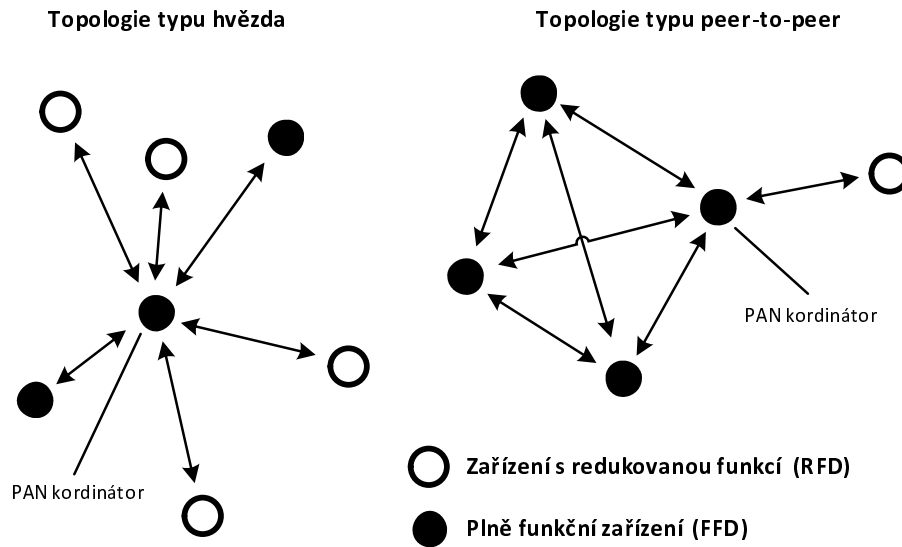
V topologii typu **hvězda** komunikace probíhá mezi zařízeními a jedním centrálním koordinátorem (PAN koordinátor). Každé zařízení v síti má obvykle specifickou sekvenci úkonů, které se provádí pořád dokola. PAN koordinátor může mít specifickou úlohu, ale taktéž obvykle obsahuje procedury pro zahájení, ukončení nebo metody pro řízení sítě. PAN koordinátor je primární kontrolér pro PAN síť. Všechna zařízení v síti mají unikátní adresu. Zařízení používají rozšířené

⁴PHY = Physical Layer

⁵MAC = Medium Access Control

⁶FFD = Full Functional Device

⁷RFD = Reduced Functional Device



Obrázek 2.1: Topologie typu hvězda a peer-to-peer podle IEEE 802.15.4

adresy pro komunikaci bez zásahu PAN koordinátoru, nebo zkrácené adresy, které jsou určeny PAN koordinátor. PAN koordinátor je nejčastěji napájen ze sítě, zatímco ostatní zařízení mohou být napájeny z baterie nebo z alternativního zdroje napájení. Hvězdicová topologie nejčastěji najde uplatnění v domácí automatizaci, pro periferie PC, ve herních ovladačích nebo osobní zdravotní péči.

Peer-to-peer topologie má také PAN koordinátora, ale hlavní rozdíl je v zařízeních, které mohou komunikovat s jiným zařízením pokud jsou ve vzájemném dosahu. Peer-to-peer topologie umožňuje složitější sítě např. mesh sítě. Možné aplikace této topologie jsou např. v průmyslovém řízení a monitorování (sběr dat), WSN, sledování zásob a inteligentní zemědělství. Peer-to-peer umožňuje posílání zpráv typu multiple hops z jednoho zařízení na druhé. Tato vlastnost je přidána vyšším vrstvám sítě a není v IEEE normě popsána.

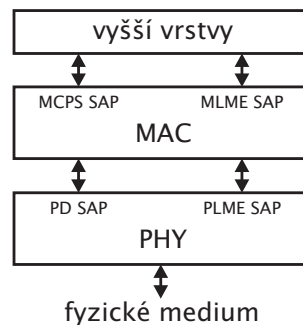
2.2.3 Architektura

Architektura standardu IEEE 802.15.4 se skládá z bloků. Bloky se nazývají vrstvy. Každá vrstva je zodpovědná za jednu část standardu a nabízí služby vyšším vrstvám.

Rozhraní mezi vrstvami definuje logické vazby, které jsou popsány v tomto standardu.

LR-WPAN zařízení obsahuje vrstvu PHY, která obsahuje RF vysílač spolu s řídicím low-level mechanismem a vrstvu MAC, která poskytuje přístup k fyzickému kanálu pro všechny přenosy. Na obrázku 2.2 jsou tyto bloky znázorněny v grafické podobě.

Fyzická vsrtva PHY poskytuje dvě služby: PHY data service a PHY management service. PHY data service zajišťuje odesílání a příjem PHY datových jednotek fyzické vrstvy (PPDUs)



Obrázek 2.2: LR-WPAN architektura

po fyzickém rádiovém kanálu. PHY vrstva se stará o zapnutí a vypnutí rádiového vysílače, ED, LQI, vybrání kanálu pro přenos, dostupnost kanálu (CCA), vysílání a přijímání paketů na fyzickém mediu.

Vrstva přístupu k mediu MAC poskytuje dvě služby: MAC data service a MAC management service. MAC management service tvoří rozhraní na MAC vrstvu přístupu k mediu (MLME-SAP⁸). MAC data service zajišťuje příjem a vysílání MAC datových jednotek vrstvy řízení přístupu k mediu (MPDUs⁹). MAC vrstvy zajišťuje přístup k komunikačnímu kanálu, validace rámců, potvrzení doručení rámců, začlenění uzlu od sítě, v případě aktivního režimu nadrámců i správa synchronizačních signálů (beacon) a volitelně správa garantovaných časových úseků. Norma umožňuje přistupovat k mediu pomocí tzv. nadrámců, které umožňují synchronizovaný přenos dat na úrovni vrstvy řízení. Pokud je tato vlastnost zapnuta, vysílá koordinátor i ostatní koordinátoři sítě synchronizační signály a komunikace probíhá v nadrámcích.

2.2.4 Struktura nadrámcce

Formát nadrámcce je definován PAN koordinátorem. Rámec je ohraničen synchronizačními impulsy, které zasílá koordinátor. Díky těmto impulsům koordinátor dokáže synchronizovat komunikaci připojených zařízení. Nadrámcce mohou být s neaktivní periodou nebo bez neaktivní periody viz. obrázek 2.3. Během neaktivní periody může koordinátor přejít do režimu spánku. Aktivní perioda nadrámcce se dělí na 16 stejných slotů o stejné délce.

Tyto sloty mohou být se soupeřivým přístupem (CAP¹⁰) nebo s nesoupeřivým přístupem (CFP¹¹). Každé zařízení, které chce komunikovat během CAP, soutěží s ostatními zařízeními pomocí zarovnaného CSMA-CA nebo ALOHA algoritmu.

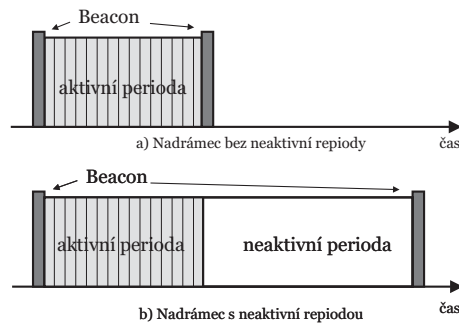
Pro aplikace s nízkou latencí nebo aplikace vyžadující specifickou šířku pásma, může PAN

⁸MLME-SAP = MAC sublayer management entity service access point

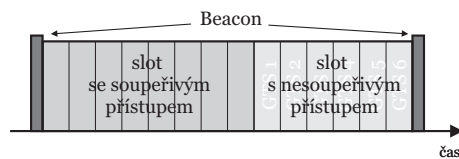
⁹MPDU = MAC protocol data units

¹⁰CAP = Contention Access Period

¹¹CFP = Contention Free Period



Obrázek 2.3: Struktura nadrámcce



Obrázek 2.4: Struktura aktivní periody s GTS

koordinátor věnovat část aktivní periody rámcce, viz obrázek 2.4. Tato část se nazývá sloty s garantovaným časem (GTSs¹²) a jsou umístěny hned za CAP sloty, těchto slotů v jednom nadrámcce může být až 7. Tyto sloty jsou určeny přímo pro konkrétní zařízení. Rezervace časového intervalu se přiděluje na žádost koordinátora.

Vysílání nadrámcce se může opakovat v intervalech 15 ms až 252 s.

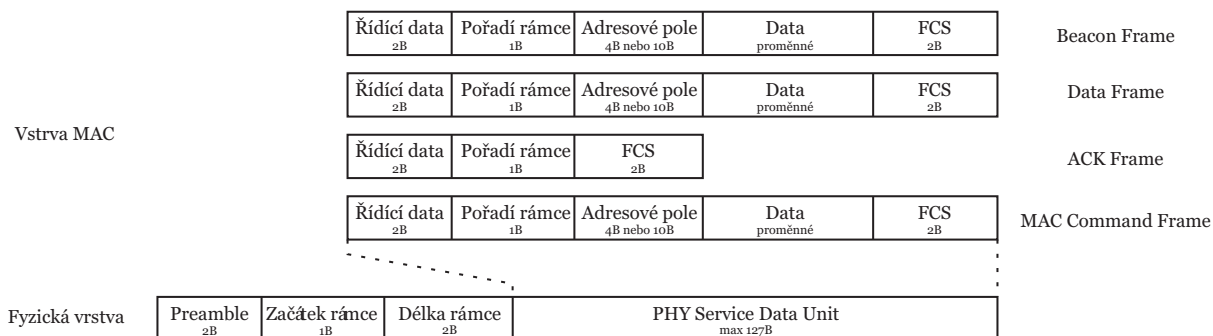
Typy rámců

Pro vlastní komunikaci jsou definovány čtyři typy rámců[4], které jsou buď řídicí nebo datové:

- Beacon Frame - slouží pro synchronizaci a v beacon-enabled sítích k probuzení uživatelských zařízení
- Data Frame - slouží pro všechny datové přenosy, je možné jej použít pro přenos až 104 byte užitečných dat
- Acknowledgment Frame - slouží pro potvrzení úspěšně přijatého rámcce. Jsou vysílány okamžitě po příjmu datového rámcce v čase mezi rámcce (IFS - Interframe Space)
- MAC Command Frame - slouží k nastavení a řízení klientských zařízení v síti.

Na obrázku 2.5 jsou uvedeny struktury jednotlivých typů rámců používaných ve vrstvě MAC. Maximální délka rámců je 127 byte.

¹²GTS = Guaranteed Time Slot



Obrázek 2.5: Struktury rámců

2.3 Průmyslové řešení bezdrátových sítí

V oblasti bezdrátových sítí využívaných v průmyslu je kladen velký důraz na regulaci v reálném čase u procesů vyžadující rychlou odezvu. Tento důležitý požadavek způsobuje, že v průmyslu se uchytí jen některé osvědčené bezdrátové systémy. Ze základu standard IEEE 802.11.4 zcela přímo nevyhovuje průmyslovým aplikacím. Jako hlavním nedostatek je uváděn nedeterministický přístup k mediu, nedostatečné zabezpečení a chybějící návaznost na protokoly vyšších vrstev. Ale i přes tyto nedostatky se standard IEEE 802.15.4 stal základem mnoha firemních protokolů. V této podkapitole budou popsány tři nejrozšířenější systémy: WirelessHart, norma ISA 100.11a a protokol WIA-PA. Každý z těchto systémů má společné některé prvky se standardem IEEE 802.15.4. Následující popis je výtahem z článků odborného časopisu Automa[3].

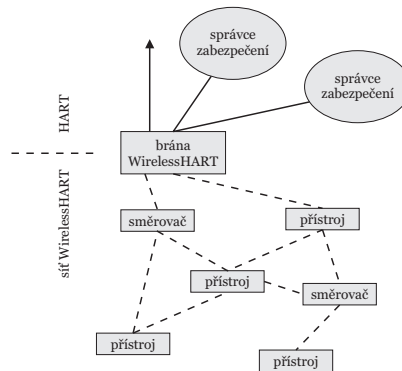
2.3.1 WirelessHart

Jedná se o bezdrátovou variantu protokolu HART¹³, jenž je hojně využívaný v průmyslové automatizaci, zejména k nastavování parametrů a diagnostice systémů. Protokol HART tvoří fyzickou vrstvu (superpozice digitálního frekvenčně modulovaného signálu na analogový signál v proudové smyčce 4 až 20mA), linkovou vrstvu, transportní vrstvu (spolehlivý přenos s automatickou fragmentací) a aplikační vrstvu (formát příkazů a odpovědí a formát datových struktur). WirelessHART vymezuje alternativní bezdrátovou fyzickou vrstvu a dále linkovou a síťovou vrstvu. Ostatní vrstvy (transportní a aplikační) jsou zachovány shodně s drátovou verzí protokolu.

Architektura

Protokol WirelessHART rozlišuje tři základní typy zařízení: správce sítě, bránu a přístroj. Úkolem správce je spravovat konfiguraci sítě, udržovat směrovací tabulky a plánovat komunikaci

¹³HART = Highway Addressable Remote Transducer



Obrázek 2.6: Příklad topologie sítě využívající protokol WirelessHART

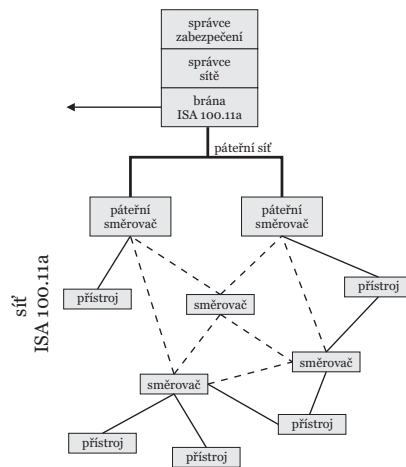
mezi jednotlivými zařízeními. K síti je připojen pomocí brány. Brána je určena k napojení sítě WirelessHART k dalšímu systému. Přístroje WirelessHART jsou přímo provozní přístroje nebo jsou realizovány prostřednictvím adaptéru, který umožňuje připojit drátové přístroje HART do bezdrátové sítě WirelessHART. Z pohledu normy IEEE 802.15.4 jsou všechny zařízení WirelessHART zařízení s plnou funkcí (FFD).

Komunikační model

Základem protokolu WirelessHART je norma IEEE 802.15.4, ze které se využívá pouze fyzická vrstva komunikující na frekvenci 2.4GHz. V protokolu je specifikována linková vrstva s časovým multiplexem a dynamickým přeskokováním komunikačního kanálu. Přístup k médiu je rozdělen na časové sloty s pevnou délkou 10ms, přičemž komunikační kanál se pro každý slot mění podle pevně dané pseudonáhodné sekvence (protokol TSCH¹⁴). Střídání kanálů umožňuje vyhnout se úzkopásmovému rušení. Protokol podporuje vynechávání některých kanálů (channel blacklisting), které jsou využity pro jiné účely nebo jsou zatíženy rušením. Plánování komunikace mezi zařízeními zajišťuje správce sítě. Zařízení musí být přesně synchronizována, aby se komunikace uskutečnila v daném čase na daném kanálu. Pro synchronizaci zařízení v síti se využívají časové známky připojené k potvrzování (ACK¹⁵). Na síťové úrovni WirelessHART podporuje topologii mesh. Každé zařízení funguje jako směrovač. Jsou určeny dvě metody směrování paketů, které musí podporovat každé zařízení WirelessHART: graph routing (cesty nastaveny správcem sítě a uloženy ve všech zařízeních, v případě výpadku uzlu je zpráva přeposlána po alternativní cestě) a source routing (cesta je součástí zprávy a při výpadku je zpráva ztracena). Aplikační vrstva WirelessHART odpovídá drátové verzi HART, přičemž některé příkazy jsou specifické pro dané fyzické médium.

¹⁴TSCH = time Synchronized Channel Hopping

¹⁵ACK = Acknowledgement



Obrázek 2.7: Příklad topologie sítě ISA 100.11a

2.3.2 Norma ISA 100.11a

Cílové oblasti této normy jsou: monitorování, přenos alarmů, nadřazené řízení a automatizace procesů výroby. Úlohy využívající tuto normu by měli být schopny tolerovat komunikační zpoždění v řádu stovek milisekund. Norma je orientována na protokol IP a díky adaptaci specifikace 6LoWPAN¹⁶ na síťové vrstvě umožňuje využít adresování IPv6.

Architektura

Bezdrátové přístroje jsou připojeny k provozním přístrojům a komunikují směrem nahoru prostřednictvím pátevní sítě s nadřazenými systémy. Norma nepředpokládá žádnou konkrétní variantu pátevní sítě a umožňuje využít Ethernet i provozní průmyslové sběrnice. Logické role zařízení v síti lze rozdělit do několika skupin: provozní přístroje, bezdrátové směrovače, správce sítě, správce zabezpečení a brány. Provozní přístroje mohou odesílat v jednom slotu současně na několik směrovačů.

Komunikační model

Norma definuje linkovou vrstvu a aplikační vrstvu. Přebírá fyzickou vrstvu standardu IEEE 802.15.4 pro rádiovou komunikaci v pásmu 2.4.GHz a na linkové vrstvě specifikuje vlastní řešení, které je kombinací přístupů TDMA a CSMA k médium s dynamickou změnou kanálu. Komunikace je rozdělena do slotů s volitelnou délkou (typicky 10 až 14 ms). S délkou slotu souvisí i přístupové metody. Pro krátké sloty se používá rychlé přeskakování mezi kanály, kdy každý časový slot odpovídá jiné komunikační frekvenci a přístup k mediu je založen na metodě TDMA. Dlouhé sloty používají pomalou změnu kanálů, sloučením několika slotů do jednoho bloku se stejnou komunikační frekvencí. Využívá se metody CSMA-CA, která je převzatá z linkové vrstvy

¹⁶6LoWPLAN = IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks

IEEE 802.15.4. Třetí možnost je kombinace dvou výše zmíněných. Při přeskokování kanálů se přeskakuje minimálně o tři kanály tak, aby bylo zajištěno, že dva následující zvolené kanály nespádaly do jednoho WiFi kanálu. Správce sítě za provozu sleduje kvalitu každého kanálu a na základně nasbíraných dat dočasně vyřazuje kanály s malou kvalitou. Každý zařízený si udržuje statistiku komunikace se svými nejbližšími sousedy a podle toho může vynechat kanály s horší spolehlivostí přenosu. Linková vrstva dále zajišťuje směrování paketů uvnitř své podsítě, založené na algoritmu směrování v grafu. Směrovací algoritmus realizuje linková vrstva podle tabulky nastavené správcem sítě (tabulka je aktualizována podle stavu komunikace).

Na síťové úrovni využívá norma protokol 6LoWPAN. Smyslem této specifikace je umožnit internetovou konektivitu zařízení s bezdrátovou komunikací podle IEEE 802.15.4. Přenos paketů IPv6 přes síť WPAN naráží na několik problémů, jako je maximální velikost rámců a příliš dlouhá délka adres a hlaviček protokolů IPv6. Tyto problémy jsou řešeny pomocí adaptační vrstvy.

Na úrovni transportní vrstvy se využívá protokol UDP, tedy nespojovanou službu bez záruky doručení. Aplikační vrstva poskytuje služby pro aplikace v provozních přístrojích a pro připojení brány do nadřazeného systému. K podpoře dalších protokolů (Profibus, HART nebo Modbus) je využíváno tunelování a mapování protokolů pomocí objektů v aplikační vrstvě.

2.3.3 Protokol WIA-PA

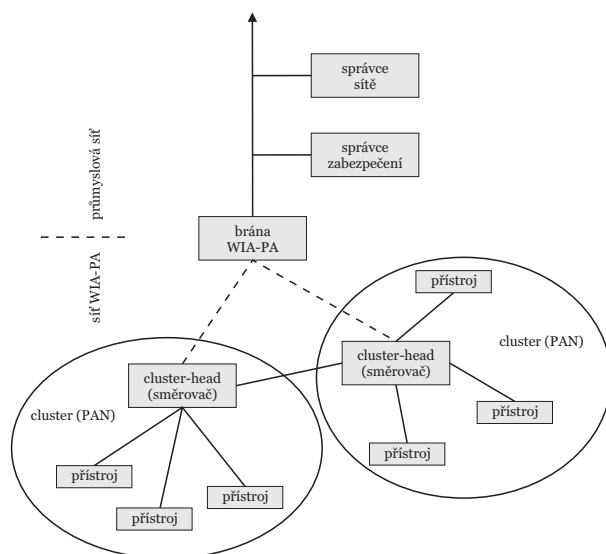
Tento protokol byl vyvinut pro účely provozní automatizace. Taktéž je založen na normě IEEE 802.15.4 a zachovává plnou kompatibilitu jak na fyzické vrstvě, tak i na přístupové a definuje pouze rozšíření na dalších vrstvách.

Architektura

WIA-PA rozlišuje pět fyzických typů zařízení: nadřazený počítač, bránu, směrovač, provozní přístroj, přenosný přístroj. Dále jsou definována dvě logická zařízení: správce sítě a správce bezpečnosti. Správce sítě je zodpovědný za udržování konfigurace sítě, plánování komunikace mezi směrovači, údržbu směrovacích tabulek a monitorování provozu sítě. Správce bezpečnosti udržuje konfiguraci, spravuje kryptografické klíče a autentizuje zařízení v síti.

Komunikační model

Protokol je založen na vrstvomém modelu, ze kterého stanovuje linkovou podvrstvu, síťovou a aplikační vrstvu. Na fyzické a linkové vrstvě používá normu IEEE 802.15.4 pro rádiovou komunikaci na frekvenci 2.4GHz. Na linkové úrovni využívá režim s tzv. nadrámcovou strukturou, která doplňuje vlastní linkovou podvrstvu. Majáky, CAP a CFP části rámce jsou totožné jako v normě IEEE 802.15.4 (viz 2.2.4). Standard WIA-PA rozšiřuje tuto strukturu přidáním dalších



Obrázek 2.8: Příklad topologie sítě WIA-PA

dvou komunikačních fází do neaktivní části nad rámce. Tyto dvě fáze jsou využívány ke komunikaci uvnitř clusterů a ke komunikaci mezi clustery navzájem. Síť WIA-PA využívá současně více kanálů, aby byla zajištěna koexistence několika clusterů na stejném místě a ve stejném čase (přístup FDMA).

V rámci neaktivní části nad rámce probíhá fáze komunikace uvnitř clusteru, tato fáze je využívána ke komunikaci mezi provozními přístroji a směrovačem v rámci jednoho clusteru. Dále v neaktivní části nad rámce následuje fáze komunikace mezi clustery, kde probíhá výměna dat na úrovni směrovačů.

Topologie sítě odpovídá normě IEEE 802.15.4. Směrovače, zařízení FFD ve smyslu IEEE, tvoří mezi sebou síť mesh propojující jednotlivé clustery. Přístroje jsou naproti tomu zařízeními RFD schopné komunikovat pouze se směrovačem.

Na aplikační úrovni může v jednom zařízení existovat několik aplikačních objektů, které mezi sebou mohou komunikovat. K podpoře dalších průmyslových protokolů (Profibus, HART, Modbus) je využíváno virtuálních zařízení.

3 Moduly pro bezdrátovou komunikaci

Na trhu existuje široké spektrum bezdrátových modulů vhodných pro přenos dat. Každá kategorie modulů se zaměřuje na jinou cílovou aplikaci. Některé moduly vytvářejí pouze bezdrátovou sériovou linku mezi dvěma body, z jiných lze vytvořit komplexnější typ sítě. Moduly a jejich čipy se liší ve vysílacím výkonu, implementovanými vrstvy OSI modelu přímo do čipu, odebíraným proudem, standby režimem, vestavěnou anténou a dalšími vlastnostmi. Společně s lepšími parametry modulu roste i jejich cena.

3.1 Seznámení s praktickou částí

V posledních letech se prudce rozvíjí inteligentní domácnosti a všeobecně systémy pro kontrolu a monitoring všeho, co nás obklopuje. Často se jedná o řešení od jednoho výrobce, který dodá vše na klíč. Instalace je velice nákladná a někdy se stane, že cena není vykompenzována kvalitou systému. Komerční systémy jsou uzavřené produkty, které většinou komunikují s zařízeními od stejného výrobce. Navíc nastane-li jakákoliv porucha v systému, často musí majitel řešit tento problém s výrobcem.

Základy této práce staví na otevřených platformách, ke kterým je dostatek informací v podobě dokumentace nebo komunitní podpory. Vývoj aplikace nebo hardware jako open-source či open-hardware je nejrychlejší způsob vývoje. Průběh a výsledek práce velice závisí na komunitě, která tento systém vyvinula. Cílem práce není nahradit komerční systémy. Vyvinuté moduly mají ukázat způsob realizace malých řídicích a monitorovacích zařízení. Úkolem těchto zařízení je monitorovat veličiny a předávat informace nadřazenému systému, který získané informace dále zpracovává.

Hlavní myšlenka této práce je již několikrát realizována pomocí různých řešení. Jediné v čem se ostatní projekty liší od sebe jsou použité bezdrátové moduly a způsob, jak se s nimi pracuje. V této práci jsem se rozhodl vyzkoušet nejlevnější bezdrátové moduly, které jsou k dostání.

Důležitou vlastností moderního ovládacího systému je jeho rychlost a pružnost. Ovládacím elementem v této práci je webová HTML5 stránka společně s oboustranným komunikačním kanálem WebSocket.

Vytvořené moduly slouží jako ukázka, že lze jednoduše ovládat jakoukoliv periférii mikrokontroléru z webového prohlížeče. Zároveň softwarové řešení ukazuje směr využití automatických

událostí, které jsou stejně důležité jako aktuální požadavky od uživatele.

Stanovení cílů projektu

- seznámit se s moduly nRF24L01+. Nalézt výhody a nevýhody těchto bezdrátových modulů.
- oživit komunikaci mezi moduly vytvářející komunikační síť - přenést knihovnu pro vytvoření senzorické sítě na miniPC. Nalézt vhodnou strukturu parametrů, které popisují základní vlastnosti každého zařízení.
- navrhnout moduly vhodné pro domácí automatizaci - vytvořit demonstrační zařízení, které svojí nabídkou připojených senzorů budou prezentovat aplikovatelnost senzorické sítě.
- navrhnout klientskou část pro správu modulů v síti - navrhnout moderní tenký klient, umožňující kontrolu nad senzorickou sítí.
- sestavit softwarovou knihovnu vhodnou pro implementace do stávajícího řídicího systému

3.2 Inspirace u podobných projektů

Inspirace byla čerpána u podobných projektů, které mají obdobné cíle jako je tento. Celkově vzato všechny projekty jsou brány jako komunikace mezi jedním zařízením typu master a více zařízeními typu slave. Zařízení typu master je zpravidla zařízení typu miniPC s vyvedenými sběrnice tak, aby se k němu mohl připojit komunikační modul. Zařízení typu slave je většinou spojení mikrokontroléru, vysílače/přijímače a připojených senzorů nebo aktorů.

Projekty pro inspiraci:

- **panStamp**¹ - projekt zahrnuje bezdrátové moduly se senzory a aktory, knihovny pro komunikaci, komunikační protokol, správa sítě a další. Jedná se o ucelené řešení založené na komunikačních modulech CC1101.
- **JeeLabs**² - hlavní zaměření projektu je vývoj bezdrátové Arduino platformy s modulem RFM12B, která může tvořit síť s 31 členy ve skupině. Celkem je možno vytvořit na 250 skupin. Součástí projektu je rozsáhlý blog, kde uvedeny různé zkušenosti okolo vývoje modulů pro domácí automatizaci.
- **OpenEnergyMonitor**³ - ucelený projekt pro monitoring spotřeby energie neinvazivní metodou. Moduly pro měření energie jsou založené na Arduino platformě s bezdrátovým modulem RFM12B.

¹<http://www.panstamp.com>

²<http://jeelabs.net>

³<http://openenergymonitor.org/emon/>

3.3 Výběr modulů vhodných pro bezdrátový přenos dat

Výběr modulu pro tuto práci je kompromis mezi cenou, vysílacím výkonem, mechanickým provedením a dostupností základních knihoven spolupracujících s modulem. Do porovnání se dostaly dvě skupiny modulů s několika vybranými realizacemi.

Mezi první skupinu patří moduly s přenosovou frekvencí pracující na 433, 868 nebo 915 MHz. Uvažovaly se moduly: RFM12B, RFM22, RFM23, RFM69, SI4432 a CC1101. Modul CC1101 komunikuje s mcu⁴ po sériové lince, ostatní moduly komunikují po SPI sběrnici. Komunikace po sériové lince je výhodná díky své jednoduchosti, ale zároveň nevýhodná kvůli znemožnění použití právě sériové linky k jinému použití. Sběrnice SPI je rychlejší a lze na ni připojit více periférií zároveň.

Druhý typ modulů pracuje na frekvenci 2,4GHz. Uvažovaly se moduly nRF24L01+, SI24R01, RF-2423 a RFM73P. Všechny moduly komunikují po SPI sběrnici.

Bezkonkurenčně nejlevnější jsou moduly nRF24L01+ startující na ceně \$0.90 za kus. Výstupní výkon však není veliký - pouze 0dBm. U výběru však tento modul vyhrál a dále práce se bude zabývat právě s tímto modulem. Navíc čip obsažený v tomto modulu existuje i v dalších variantách jako např.: nRF24LU1+, nRF24LE1+ (jedná se system-on-chip, kde součástí modulu je mikroprocesor, většinou z rodiny 8051) nebo modulu s zesilovačem a externí anténou. Další výhodou je možnost komunikace mezi moduly i jiných výrobců, jako např.: SI24R01 a RF-2423. Srovnání všech uvažovaných modulů z hlediska jejich základních vlastností je v tabulce 3.1.

3.4 Modul s Nordic Semiconductor nRF24L01+

Modul je destička, na které je osazen čip nRF24L01+ v doporučeném zapojení od výrobce s integrovanou anténou přímo na DPS. Komunikace s modulem probíhá pomocí sběrnice SPI. Popis jednotlivých pinů:

1. GND - zem
2. VCC - napájení modulu 1.9-3.6V
3. CE - chip enable - slouží k výběru čipu nastavením logické úrovně na "0" (používá se při načítání/nastavování dat v registrech, příjmu a vysílání zprávy)
4. CSN - chip select N - SPI pin pro výběr čipu, při komunikaci je "0", při ukončení komunikace "1"
5. CSK - SPI clock - master zařízení generuje hodinový signály sloužící k synchronizaci komunikace

⁴microcontroller

Tabulka 3.1: Srovnání bezdrátových modulů

	RFM12B	RFM22	RFM23	RFM69
frekvence	433,868,915MHz	240-930Mhz	240-930Mhz	315,433,868,915MHz
napájení	2.2-3.8V	1.8-3.6V	1.8-3.6V	1.8-3.6V
přenosová rychlost	115.2kbps	1-128Kbps	1-128Kbps	až 300kbps
výsílací výkon	+5 dBm	+8/+17dBm	-8 až +13dBm	-18 až +13dBm
citlivost	-105 dBm	-118 dBm	-118 dBm	-120dBm
spotřeba	22 mA	27/60mA	28mA	16mA
spotřeba ve spánku	0,3 μ A	až 10nA	až 10nA	100nA
cena	\$4.40	\$5.60	\$10.80	\$3.60
		RSSI	RSSI	RSSI
		8-bit adc	8-bit adc	66B FIFO
		temp	temp	AES-128
				temp
	CC1101	SI4432	nRF24L01+	SI24R01
frekvence	315,433,868,915MHz	240-930Mhz	2400-2525 MHz	2400-2525 MHz
napájení	1.8-3.6V	1.8-3.6V	1.9-3.6V	1.9-3.6V
přenosová rychlost	až 600kbps	1-128Kbps	250kbps - 2Mbps	250kbps - 2Mbps
výsílací výkon	až +27dBm	až +20dBm	až 0dB	až +7dB
citlivost	-116dBm	-118 dBm	-94dBm	-94dBm
spotřeba	35mA	80mA	11,5mA	11,5mA
spotřeba ve spánku	200nA	10nA	900nA	900nA
cena	\$4.84	\$3.63	\$0.90	\$1.60
	RSSI	RSSI	96B FIFO	96B FIFO
	64B FIFO	64B FIFO	ShockBurst TM	ShockBurst TM
		8-bit adc		
		temp		
	RF-2423	RFM73	RFM73P	
frekvence	2400-2525MHz	2400-2527MHz	2400-2525MHz	
napájení	1.9-3.6V	1.9-3.6V	3.3-4.2V	
přenosová rychlost	250kbps - 2Mbps	250kbps - 2Mbps	1Mbps-2Mbps	
výsílací výkon	-10dBm až +5 dBm	až 3dBm	-5dBm až +20dBm	
citlivost	-88dBm	-97dBm	-88dBm	
spotřeba	23mA	22mA	30mA	
spotřeba ve spánku	3 μ A	2.5 μ A	3 μ A	
cena	\$2.40	\$1.95	\$6.80	

6. **MOSI** - Master Out, Slave In - přenos dat ve směru master (Raspberry Pi nebo Arduino) do slave zařízení (RF24). Kontrolováno SPI periférií.
7. **MISO** - Master In, Slave Out - přenos dat ve směru slave zařízení (RF24) do master (Raspberry Pi nebo Arduino). Kontrolováno SPI periférií.
8. **IRQ** - přerušení - RF24 generuje přerušení při příjmu zprávy, vyslání zprávy nebo při chybě. Generování přerušení je nastavitelné v registrech RF24 čipu. Přerušení nastává při přechodu "1"→"0".

Napájení modulu musí být do 3.6V, ale jednotlivé datové piny jsou tolerantní vůči 5V logice, lze tedy je připojit bez nutnosti napěťových převodníků i k 5V Arduinu.

3.4.1 Popis nRF24L01+

Jedná se o vysílač a přijímač pracující v pásmu ISM 2.4GHz, přesněji umožňuje volit jedno z 125 kanálů po 1MHz v rozsahu 2400MHz až 2525MHz. Čip umožňuje volit jeden ze 4 operačních módů vysílače. Podle zvoleného módu může spotřeba modulu klesnout až na 900nA. Přenosové rychlosti lze volit mezi 250kbps, 1Mbps nebo 2Mbps. Vysílací výkon lze volit -18dBm, -12dBm, -6dBm nebo 0dBm. Spotřeba při vysílacím výkonu 0dBm je 11mA.

Čip obsahuje implementovaný **Enhanced ShockBurst™**. Jedná se o linkovou (spojovou) vrstvu, která je přímo hardwarově implementovaná v čipu. Tato vrstva obsahuje automatické sestavování, časování paketů, automatické potvrzování (ACK) a znovu zasílání paketů při neúspěšném doručení. Při vysílání Enhanced ShockBurst™ vytvoří paket s nastavenými patřičnými bity pro vysílání paketu. Příjmová strana Enhanced ShockBurst™ stále hledá v demodulovaném signálu platné adresy. Jestliže přijímač nalezne platnou adresu, společně s obsahem zprávy se spočítá kontrolní součet (CRC) a porovná se CRC ve zprávě. Při úspěšném přijetí paketu je zpráva umístěna do prázdného slotu RX FIFO a vyvolá se přerušení na pinu IRQ.

Velmi důležitou vlastností použitou v této práci je **MultiCeiver™**. Jedná se o vlastnost použitou v RX módu, kdy jeden PRX (posluchač) obsahuje až 6 paralelních posluchačských rour, každá roura má unikátní adresu. Tyto datové roury jsou logickými kanály na fyzickém přijímacím kanálu. Každá datová roura má vlastní fyzickou adresu, která je dekodována čipem nRF24L01+. Ve výsledku může spolu komunikovat 6 PTX (vysílač) a jedním PRX. Adresy jednotlivých datových rour tvoří 3, 4 nebo 5 bytů. Tento způsob komunikace je využit k sestavení sítě. Topologie sítě je typu strom. Způsob přenášení zpráv realizuje síťová vrstva, která je implementována v knihovně RF24Network⁵.

Registry nRF24L01+

Registry slouží ke konfiguraci nastavení a vlastností nRF24L01+. Následující registry jsou k

⁵<https://github.com/maniacbug/RF24Network>

dispozici[2]:

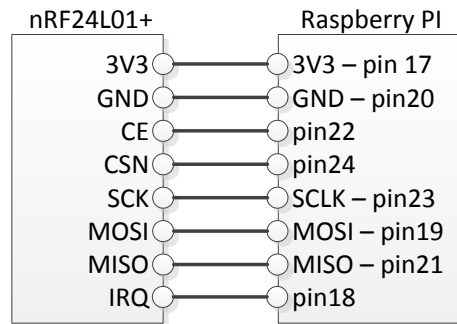
- CONFIG - Konfigurace přerušení na pinu IRQ umožňující generovat přerušení na tři události: příjem, odeslání, dosaženo maximálního opakování neúspěšného odeslání zprávy. Povolení CRC a nastavení jeho délky. Přechod do sleep režimu a naopak.
- EN_AA - povolení/zakázání Enhanced ShockBurstTM režimu na jednotlivých rourách
- EN_RXADDR - povolení/zakázání komunikaci na jednotlivých rourách
- SETUP_AW - nastavení délky adresy
- SETUP_RETR - nastavení délky intervalu mezi znovu odesláním zprávy a počet pokusů o odeslání zprávy bez přijetí ACK potvrzení
- RF_CH - nastavení kanálu. Číslo kanálu odpovídá frekvenci, na které se vysílá.
- RF_SETUP - nastavení rychlosti přenosu dat a vysílacího výkonu
- STATUS - obsahuje informace o vzniklém přerušení, počet rour obsahující příchozí zprávu v FIFO zásobníku a informace o obsazenosti vysílací FIFO frontě
- OBSERVE_TX - informace o počtu ztracených zpráv a počet neúspěšných pokusů o poslání zprávy. Neúspěšný pokus se rozumí, když je překročen počet vysílání o hodnotu nastavenou v registru SETUP_RETR
- RX_ADDR_Pn - nastavení 6-ti adres pro 6 přijímacích rour
- TX_ADDR - nastavení adresy pro vysílání
- RX_PW_Pn - nastavení délky zprávy pro každou přijímací rouru
- FIFO_STATUS - obsahuje informace zda-li je Tx nebo Rx FIFO fronta plná nebo prázdná a informaci o nepřetržitém vysílání z fronty Tx FIFO
- ACK_PLD - obsahuje 32 bajtů zprávy, která bude odeslána s potvrzovací zprávou
- TX_PLD - obsahuje 32 bajtů zprávy, která je na vrchu fronty Tx FIFO
- RX_PLD - obsahuje 32 bajtů zprávy, která je na vrchu fronty Rx FIFO
- DYNPD - povolení/zakázání dynamické délky zprávy na každé přijímací rouře
- FEATURE - povolení/zakázání potvrzovací zprávy a dynamické délky zprávy pro vysílání

3.4.2 Zapojení Raspberry Pi

Zapojení k oblíbenému miniPC Raspberry Pi je na obrázku 3.1.

Standardně není sběrnice SPI (u distribuce Raspbian) povolena a je jí nutno povolit. Povolení se provede vymazáním SPI řadiče z blacklistu ⁶. Jelikož se pracuje mimo SPI také s piny ve funkci GPIO, bude nutné je přímo ovládat z kódu aplikace. Aplikace bude taktéž využívat služeb generovaného přerušení na pinu IRQ a toto přerušení se bude v aplikaci obsluhovat k přijetí zprávy z modulu. Samozřejmě zapojení pinů CE, CSN a IRQ na konkrétní pin na Raspberry lze libovolně měnit. Rozložení na obrázku 3.1 bylo zvoleno kvůli tomu, že jsou piny umístěny

⁶<http://raspi.tv/how-to-enable-spi-on-the-raspberry-pi>

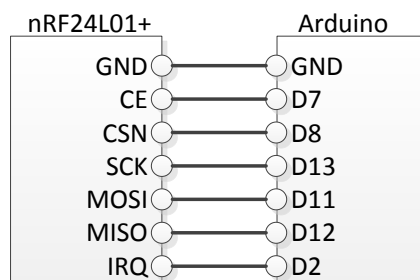


Obrázek 3.1: Zapojení nRF24L01+ s Raspberry Pi

těsně u sebe.

3.4.3 Zapojení Arduino

Zapojení s Arduinem je velice podobné s Raspberry, viz obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Zapojení nRF24L01+ s Arduinem

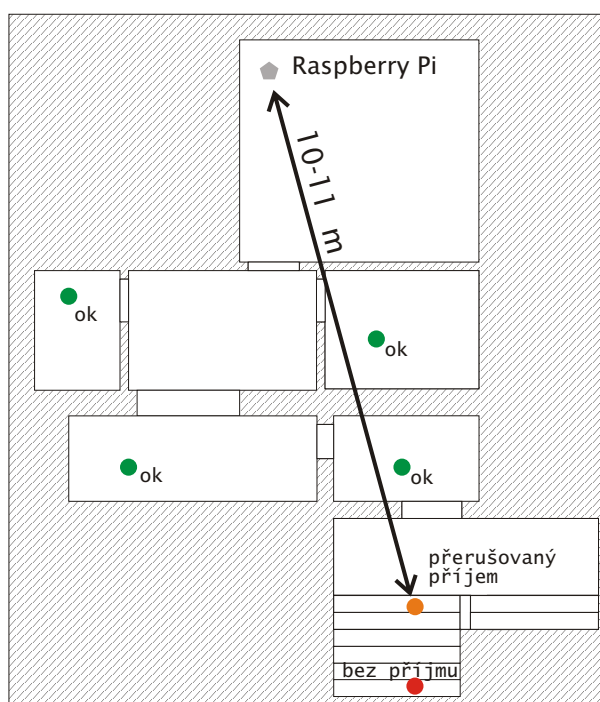
Jen je nutné dávat pozor na napájení modulu. V této práci se používala Arduino Mini Pro s 5V regulátorem. Proto byl na všech realizovaných deskách použit externí regulátor na 3.3V. Někdy může dojít k potížím při vysílání dat. To je způsobeno relativně velkým skokem odběru proudu např. z nečinnosti modulu do vysílacího módu. Proto je nutné umístit paralelně ke kontaktům napájení bezdrátového modulu kondenzátor. V opačném případě se může stát, že modul bude správně komunikovat při nastavování svých parametrů, ale při pokusu o vysílání se modul zresetuje.

3.4.4 Testování dosahu vysílače

Na internetu je k dostání několik variant modulů s čipem nRF24L01+. Nejlevnější varianta má integrovanou anténu přímo na desce DPS. Další varianta je s konektorem RP-SMA pro

připojení externí antény. Třetí varianta obsahuje navíc filtr a zesilovač s výstupním výkonem 20dB a konektorem RP-SMA, tato varianta vyjde přibližně na \$5. Poslední varianta slibuje nejdelší dosah.

V této práci se používá nejlevnější modul s integrovanou anténou. Test dosahu modulu byl vyzkoušen ve zděném bytě. Nákres bytu a míst, kde se provádělo testování je na obrázku 3.3. Na kratší vzdálenosti moduly komunikují bez problémů. Hraniční vzdálenost je přibližně 10 metrů. Test proběhl při maximálním počtu opakování 15-ti zpráv. Vzdálenost je postačující pro menší byty. Pro vzdálenější měření je nutno použít výkonnějšího modulu s vyvedenou externí anténou nebo vložit další zařízení sloužící jako propojovací most.



Obrázek 3.3: Testování dosahu vysílače

4 Aplikace s bezdrátovými moduly

Softwarová část práce se skládá celkem ze tří částí:

1. **Aplikace pro Arduino** obsluhuje vysílač nRF24L01+ a vykonává úkoly, které jsou po zařízení požadovány.
2. **Komunikační část** představuje C++ aplikaci zkompilevanou pro Raspberry Pi.
3. **Uživatelská aplikace** slouží jako monitor připojených zařízení, umožňuje měnit konfiguraci každého zařízení a posílá požadavky na zařízení. Tato část slouží jako tenký klient napsaný v HTML5 a JavaScriptu, který komunikuje s komunikační částí.

4.1 Aplikace pro Arduino

Arduino Mini Pro je open-source platforma založená na mikrokontroléru ATmega328 od firmy Atmel, která se programuje přes sériový port z Arduino IDE. V této práci se Arduino programuje pomocí Visual Studia od firmy Microsoft, další možná varianta pod operačním systémem Windows je Atmel Studio. Jak do Visual Studia tak i do Atmel Studia je nutné doinstalovat rozšíření VisualMicro ¹ umožňující programování Arduina. S tímto pluginem se programuje pohodlněji než ve standardním prostředí, protože umožňuje například lepší správu souborů v projektu nebo využívání výhod intellisense. Tato práce byla naprogramována ve VisualStudiu a Arduino IDE bylo použito jen na rychlé vyzkoušení funkcionality, protože založení projektu je v tomto prostředí rychlejší.

Paměť EEPROM V non-volatile paměti jsou uchovány základní informace o zařízení. Od adresy 0x0A je uložena struktura popisující vlastnosti zařízení, tyto vlastnosti jsou blíže rozepsány v kapitole 4.4. Od adresy 0x100 jsou uloženy funkce jednotlivých pinů. Pořadí pinů odpovídá pořadí na Arduinu (např. pin A7 má číslo 21 a v EEPROM je jeho funkce uložena na adrese $0x100 + 0x15 = 0x115$). Jednotlivé funkce na pinech jsou zaneseny v příloze v tabulce A.3.

Běh aplikace Po inicializaci front pro příjem a vysílání zpráv proběhne nastavení komunikace pro bezdrátové moduly. Spustí se watchdog, pokud se nejedná o typ zařízení, které

¹<http://www.visualmicro.com/>

se uvádí do režimu spánku (tj. typ zařízení leaf). Nastaví se přerušení na pinu, které je generováno bezdrátovým modulem. Poté se přechází do smyčky hlavního programu. Ve smyčce se vyhodnocují tyto body:

- režim spánku - jestliže zařízení je typu leaf, kontroluje se čas, po který je už zařízení vzhůru. Když tento čas překročí vteřinu, zařízení se samo opět uspí.
- zasílání zprávy `IListen` - zařízení se ohlásí zprávou `IListen`. Interval zaslání zprávy je nastaven v parametrech zařízení.
- zpracování zpráv v přijímací frontě
- zpracování zpráv ve vysílací frontě
- poslech seriové linky pro ruční konfiguraci zařízení (zařízení musí být typu relay). Po každém přijatém příkazu se údaj zapíše do EEPROM a zařízení se resetuje.

Příkazy (čísla před písmenem určují nastavovanou hodnotu):

- 1 - změni typ uzlu na leaf
 - r - změni typ uzlu na relay
 - 125c - změni číslo vysílacího kanálu. Přípustné hodnoty 1 až 125.
 - 3p - změni vysílací výkon. Přípustné hodnoty: 0 pro -18dBm, 1 pro -12dBm, 2 pro -6dBm a 3 pro 0dBm.
 - 1t - změni typ čipu. Přípustné hodnoty: 0 až 255.
 - 2i - změni ID zařízení. Přípustné hodnoty: 0 až 255.
 - 60s - změni interval, po který bude zařízení v režimu spánku. Rovněž tento interval je platný pro zasílání `IListen` zpráv. Přípustné hodnoty: 5 až 65535.
 - 5n - změni adresu uzlu. Přípustné čísla vždy od 1 do 5 pro každou cifru. Přípustné hodnoty 1 až 55555.
- reset čítače watchdog, pokud je zařízení typu relay

Použité knihovny

- RF24² knihovna pro obsluhu modulu nRF24L01+ komunikující po sběrnici SPI s Arduinem.
- RF24Network³ knihovna implementující síťovou vrstvu OSI modelu
- JeeLib⁴ kolekce podpůrných tříd usnadňujících vývoj aplikace pro Arduino. V této práci je používána třída `Sleepy` pro režim spánku zařízení.
- další použité knihovny jsou pro komunikaci se senzory, aktory, čtení a zápis hodnot do EEPROM a čítač watchdog

²<http://maniacbug.github.io/RF24/>

³<http://maniacbug.github.io/RF24Network/>

⁴<http://jeelabs.net/pub/docs/jeelib/>

4.2 Komunikační část

Této části práce odpovídá aplikace, která slouží jako komunikační most mezi klientskou částí a zařízeními Arduino. Most je z jedné strany tvořen WebSocket⁵(WS) serverem poskytující možnost připojení vzdáleného tenkého klienta přes internet a z druhé strany komunikuje přímo s modulem nRF24L01+. Tuto stranu v síti tvoří uzel s adresou 0 a chová se jako master. Aplikace je napsána v jazyce C++ a běží na miniPC Raspberry Pi s distribucí Raspbian.

Kompilace programu by byla na Raspberry zdouhavá, proto byla aplikace kompilována na desktopové verzi systému Linux s distribucí Ubuntu. Zdrojové soubory byly připojeny do Ubuntu pomocí utility sshfs⁶. Tato utilita umožňuje pracovat se soubory umístěnými na Raspberry přímo z Ubuntu a ihned po kompilaci se aplikace mohla otestovat.

Aplikace se rozděluje do dvou částí. První slouží jako WebSocket server a primitivní kalendář. Druhá část je tvořena třemi třídami a společně tvoří komunikační prostředek s moduly RF24 pro část první. Aplikace používá knihovnu libwebsocket⁷. Pomocí této knihovny aplikace přijímá zprávy od uživatelské aplikace. Zprávy jsou ve tvaru JSON a k jejich rozparsování je použita knihovna Jansson⁸. Po rozparsování zprávy se provede patřičná akce, která odpovídá požadavku.

WebSocket knihovna neumožňuje provést asynchronní zaslání zprávy od WS serveru směrem k uživatelské aplikaci. Proto dochází ke shromažďování připravených zpráv do fronty. Uživatelská aplikace každých 100ms vygeneruje zprávu směrem k WS serveru, server na tuto zprávu odpoví odesláním všech zpráv, které jsou nashromážděné ve frontě.

Kalendář slouží k plánování odeslání předem připravených zpráv. Při spuštění programu se naplní kalendář událostmi. Každá událost uchovává obsah zprávy, která se má odeslat směrem k zařízení a časový interval určující periodu vykonávání události. Navíc je možno připojit údaj o API klíči sloužící k nahrání údaje na webovou službu ThinkSpeak⁹. Tato služba umožňuje shromažďovat data ze senzorů. Samotný záznam na tuto službu se provede pomocí GET požadavku HTTP protokolu. Ukládaná hodnota se vkládá jako parametr za adresu požadavku: <http://api.thingspeak.com/update?key=8FKIOGY3L35MGLE1&field1=15.5>

Použité knihovny

- RF24¹⁰ - knihovna pro obsluhu modulu nRF24L01+ komunikující po sběrnici SPI pro Raspberry Pi
- RF24Network - knihovna původně určena pro Arduino, upravena pro potřeby Raspberry Pi

⁵<https://tools.ietf.org/html/rfc6455>

⁶<http://www.nixtutor.com/linux/setting-up-sshfs/>

⁷<http://libwebsockets.org/trac/libwebsockets>

⁸<http://www.digip.org/jansson/>

⁹<https://thingspeak.com/>

¹⁰<https://github.com/stanleyseow/RF24>

- `WiringPi`¹¹ - umožňuje volat funkci při přerušení na pinu Raspberry při příchodu zprávy
- `Libwebsocket` - používá se k vytvoření websocket serveru
- `Jansson` - používá se k parsování a rozparsování zpráv z formátu JSON
- `HappyHTTP` - slouží ke generování GET požadavku HTTP protokolu na webovou službu ThinkSpeak pro archivaci hodnot

4.3 Uživatelská aplikace

Jedná se statickou stránku HTML se skripty v jazyce JavaScript. Samotné připojení s komunikační částí se provede ihned po vykreslení stránky. Jednotlivé prvky sloužící k obsluze zařízení se přidávají dynamicky a to s využitím javascriptové knihovny JQuery. K formování prvků na stránce je využito frontend frameworku Bootstrap¹². Jedná se o sadu nástrojů usnadňující práci s typografií, tvorbu layoutu, vytváření elementů uživatelského rozhraní a zároveň ošetřující zobrazování napříč platformami.

Funkčnost

Uživatel v seznamu přihlášených zařízení (náhled na aplikaci na obrázku A.6) si vybere konkrétní jedno zařízení. Na tomto zařízení může konfigurovat piny (měnit funkce, které jsou napojeny na jednotlivé piny) nebo ovládat jednotlivé piny podle druhu periferie, které jsou s tímto pinem spjaty (náhled na nastavení na obrázku A.7).

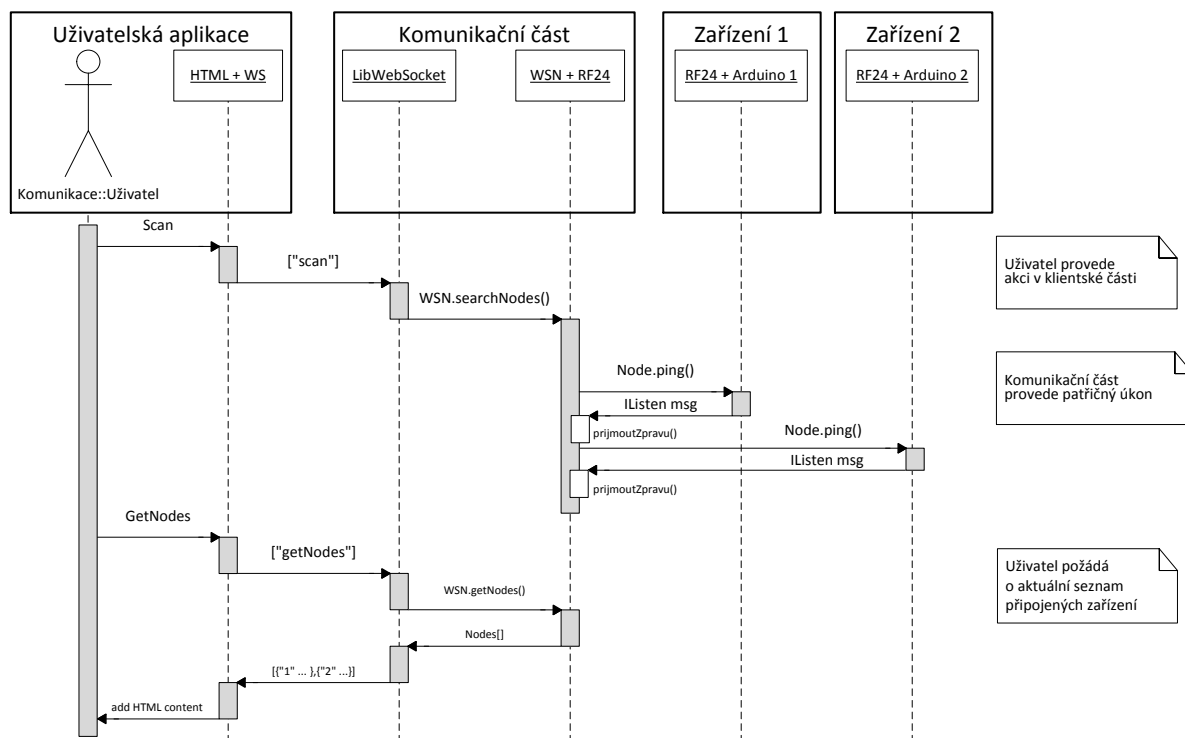
Jako ukázková aplikace konkrétního zařízení je příklad ovládání kamery. Kamera je umístěna na otočném rameni, toto rameno je ovládáno pomocí dvou modelářských RC serv. Tyto serva jsou ovládána z univerzálního testovacího modulu, který je bezdrátově spojen s Raspberry. Uživatelská aplikace rozpozná přihlášení zařízení podle ID zařízení a zobrazí aktuální zobrazovaný snímek. Kliknutí do obrázku je zpracováno jako událost a javascriptový kód z této události vytvoří zprávu pro zařízení, která se odešle WS serveru.

4.4 Schéma komunikace

Pro pochopení komunikace následují sekvenční diagramy v UML jazyku. V prvním diagramu na obrázku 4.1 je rozebrána situace při příchodu požadavku prohledání sítě. Prohledává se do určité hloubky. Raspberry se snaží odeslat zprávu všem zařízením, které mohou být připojeny do patřičné úrovně stromu. Každé zařízení, které tuto zprávu přijme, na ní odpoví zprávou

¹¹<https://projects.drogon.net/raspberry-pi/wiringpi/functions/>

¹²<http://getbootstrap.com/>



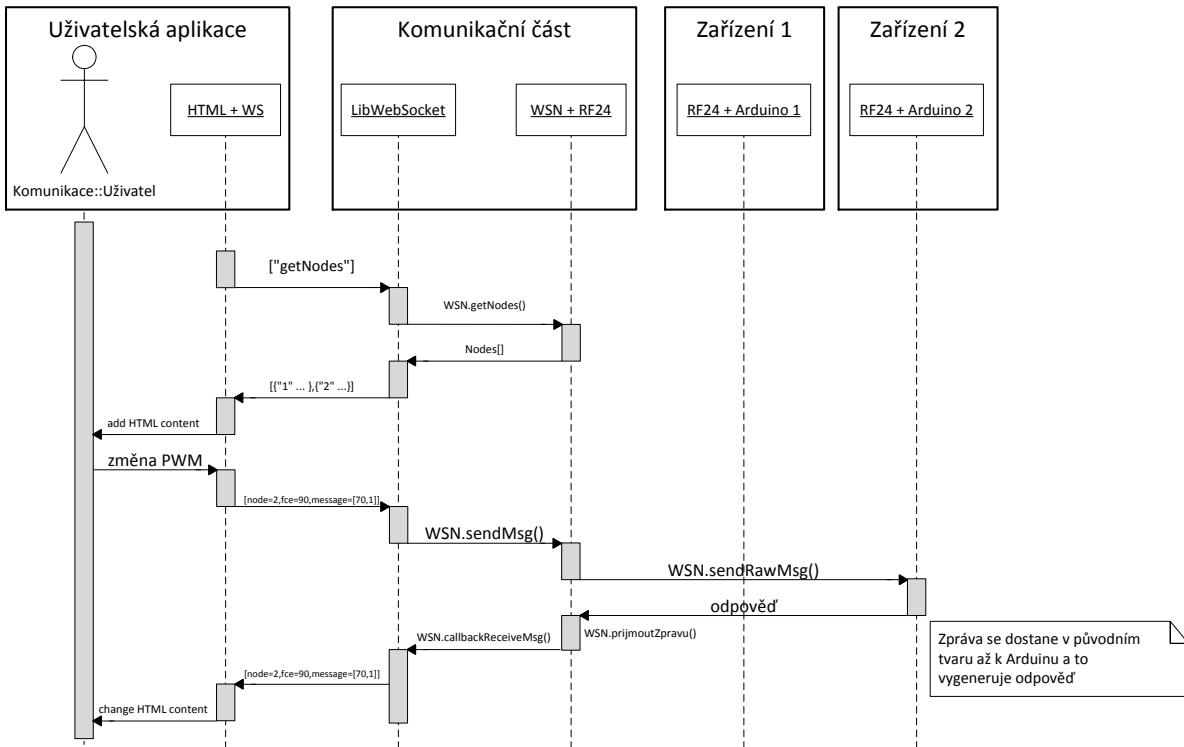
Obrázek 4.1: Sekvenční diagram - scan síť

`IListen` a Raspberry je zařadí mezi nalezené zařízení. Poté si uživatel vyžádá poslat všechny nalezené zařízení.

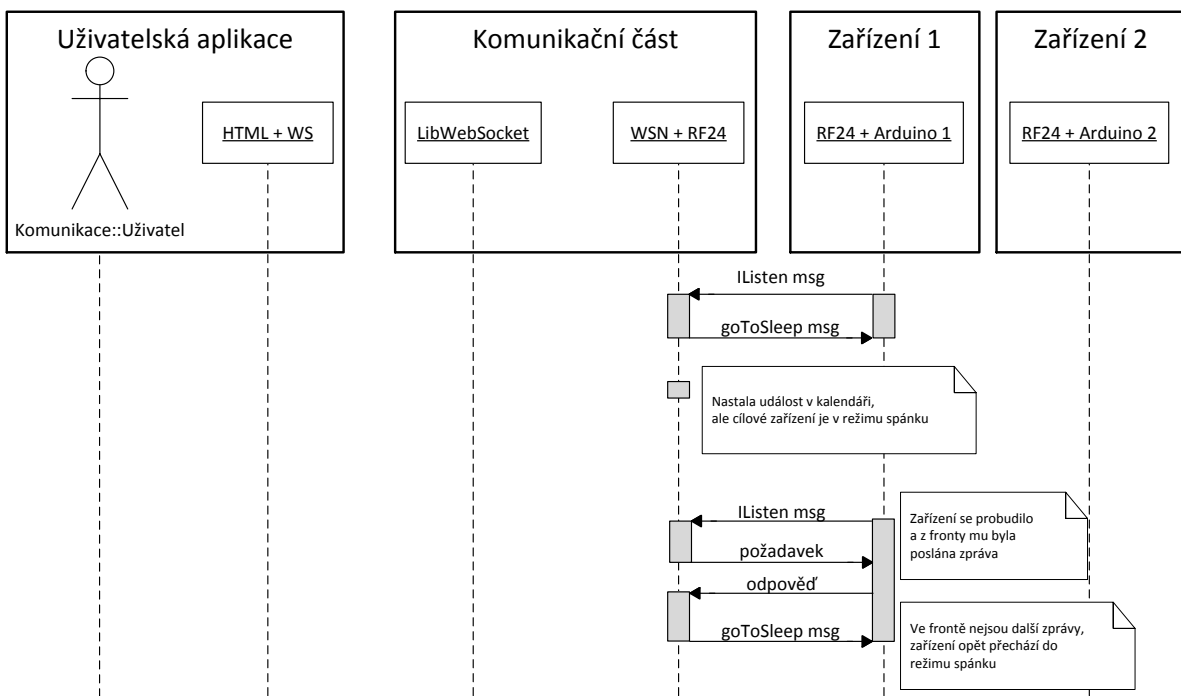
Zpráva `IListen` informuje Raspberry krom samotné přítomnosti i vlastnostmi, které má každé zařízení (tyto parametry lze nastavovat přes ovládací prvek v HTML stránce, viz obrázek A.8):

- adresa zařízení
- typ zařízení: Relay (1) stále napájený uzel, nebo Leaf (0) uzel, který je umístěn jako list ve stromu a je možný ho napájet z baterií
- vysílací kanál - možnost výběru 1 až 125
- vysílací výkon zařízení - možno volit podle specifikace nRF24L01+ od 0 do 3
- typ mikroprocesoru, který je umístěn v zařízení - v této práci se uvažuje jen případ s ATmega328
- ID zařízení - identifikátor zařízení, podle něhož lze v aplikaci rozlišovat možnosti zařízení
- interval spánku - pokud je zařízení v režimu spánku, tato hodnota udává interval probuzení zařízení

Druhý diagram 4.2 popisuje, kdy se uživatel připojí a chce vykonat určitý požadavek. Po připojení se automaticky zasílá požadavek na připojené zařízení, poté může uživatel již vykonávat operace se zařízeními. Podle zvolené akce zařízení pošle zpět odpověď.



Obrázek 4.2: Sekvenční diagram - požadavek na zařízení



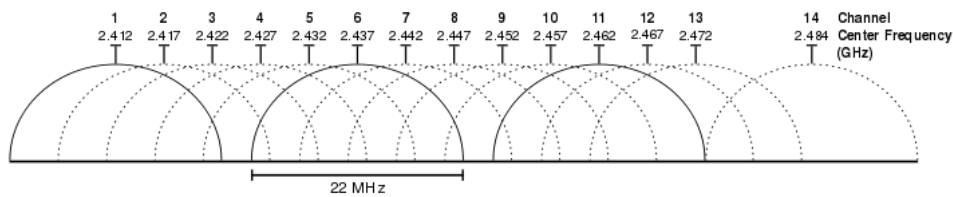
Obrázek 4.3: Sekvenční diagram - událost v kalendáři

Třetí diagram 4.3 znázorňuje situaci události v kalendáři. Zařízení, které je v režimu spánku,

se probudí a ohlásí se masteru. Ten zkontroluje zda-li je ve frontě pro zařízení zpráva. Ve frontě zatím není a proto pošle zprávu, která reprezentuje příkaz ke spánku. Zařízení po přijetí zprávy se uspí. Nastane-li událost v kalendáři, aplikace rozpozná, že dané zařízení je typu leaf a přesune zprávu do fronty pro odeslání. Jakmile se zařízení opět probudí a ohlásí se zprávou, aplikace mu pošle zprávu z fronty. Zařízení zpracuje zprávu a pošle odpověď masteru. Protože ve frontě již není další zpráva pro zařízení, pošle příkaz k opětovnému uspání.

4.5 Výběr kanálu pro vysílání

Bezdrátové moduly vysílají v pásmu 2.4GHz stejně jako signál WiFi. Tudíž v tomto pásmu může nastat rušení komunikace. Během zkoušek komunikace se výpadky v komunikaci neobjevily, ale i tak je vhodné, aby jednotný kanál pro komunikaci byl zvolen mimo používané kanály WiFi, viz obrázek 4.4. Aby se splnily požadavky ČTÚ¹³ a zároveň, aby se vysílací kanál vyhnul WiFi signálu, je vhodné volit kanál 100. Tento kanál odpovídá přesně vysílací frekvenci 2500MHz.



Obrázek 4.4: Překrytí kanálů signálu WiFi

¹³Český telekomunikační úřad

5 Navržené moduly s Arduinem

V dnešní době je velice snadné koupit řadu levných modulů, které se mohou různě kombinovat a skládat z nich zařízení. Proto byly desky navrženy v duchu, aby sloužily jako propojení mezi jednotlivými moduly. Celkem byly navrženy čtyři varianty desek s využitím nRF24L01+ a Arduino Mini Pro.

Programování Arduino Mini Pro

Arduino Mini Pro obsahuje mikroprocesor ATmega328p. V něm je nahrán standardní bootloader Arduino, který umožňuje naprogramování pomocí sériové linky. Deska Arduino Mini Pro se od ostatních Arduin liší v absenci převodníku USB-USART. Tudíž je nutno použít externí převodník. Programování Arduina probíhá pomocí bootloadera, který se spouští při startu nebo resetu mikroprocesoru. Bootloader po spuštění nebo resetu mikrikontroléru chvilku vyčkává a poslouchá komunikaci na usart. Pokud během této doby přijde daná sekvence bytů, mikroprocesor se přepne do režimu programování, v opačném případě se spustí předem nahraný program. Reset mikroprocesoru se může vyvolat buď ručně tlačítkem reset na desce nebo softwarově pomocí pinu RST na mikroprocesoru. Právě druhý způsob je použit při programování z prostředí Arduino IDE.

Standartní bootloader, který je umístěn v každém Arduinu nebo jeho klonech, má chybu při obsluze watchdog čítače a neresetuje mikroprocesor tak, jak by se očekávalo. Proto bylo nutné přeprogramovat Arduino jiným bootloaderem, který má watchdog vyřešen lépe. Byl vybrán Optiboot¹ bootloader, jednak umožňuje nahrávat program vyšší rychlostí a zabírá méně paměti, ale hlavně má správně implementovanou funkci watchdog čítače. Přehrání bootloadera vyžaduje FTDI programátor nebo lze nahrát bootloader i pomocí jiného Arduina², který v plní funkci programátoru. Watchdog čítač může sloužit jako kontrola, zda-li kód v mikroprocesoru není zamrznutý, ale rovněž je watchdog použit při probuzení zařízení, když je v režimu spánku (například při napájení z baterie).

5.1 Univerzální testovací modul

Deska umožňuje připojit různé senzory pro měření veličin a připojení aktorů. Fotografie desky s připojenými senzory, viz obrázek v příloze A.1. Tato deska má být demonstrační. Mo-

¹<https://code.google.com/p/optiboot/>

²<http://www.instructables.com/id/Burning-the-Bootloader-on-ATMega328-using-Arduino-/>

dul disponuje konektory pro senzory: 2x digitální teploměr DS18x20, 2x odpor citlivý na světlo, 1x Hallův senzor na detekci magnetického materiálu, 1x vlhkoměr DHT11 nebo DHT22, 1x měření atmosférického tlaku se senzorem BMP085, 3x ampérmetr pro stejnosměrný proud ACS712. Napájení desky je pomocí 5V, je přítomen regulátor 3.3V pro napájení nRF24L01+.

5.2 Modul pro spínání zásuvek

Tento modul je velice jednoduchý (fotografie viz A.2). Jako napájecí obvod využívá zdroj stejnosměrného napětí 5V ze střídavého síťového napájení. Dále obsahuje jen Arduino, nRF24L01+, 3.3V regulátor pro napájení komunikačního modulu a v neposlední řadě dvě relé, které spínají síťový přívod do zásuvek. Relé spíná maximálně 10A při 240VAC. Celý obvod je uzavřen do krabice, na víku krabice jsou připevněny standardní zásuvky (fotografie viz A.3).

5.3 Modul vhodný pro bateriový provoz

Tento modul (foto viz příloha A.4) je vhodný pro měření teploty. Jsou zde kontakty na připojení teploměru DS18x20. Rovněž umožňuje připojení vlhkoměru. Moduly vlhkoměru DHT11 i DHT22, ale vyžadují napájecí napětí od 3V do 5V. Tento požadavek by nebyl splněn s klesajícím napětím na bateriích. Proto je umístěna nábojová pumpa v podobě střídavě nabíjených kondenzátorů. Toto zapojení vyžaduje jeden PWM signál. Nábojová pumpa umožňuje získat až dvojnásobek referenčního napájení. Toto zapojení se nazývá Dicksonova nábojová pumpa [5]. K omezení napětí na 5V je připojena Zenerova dioda ve funkci stabilizátoru. Jako napájení se počítá s připojením pouzdra na dvě tužkové baterie. Dohromady dají dvě baterie přibližně 3.2V při plné kapacitě. Toto napětí je vhodné jak pro napájení Arduina, tak i bezdrátového modulu.

Arduino díky knihovně JeeLib³ dokáže modul fungovat v nízkopříkonovém režimu a po určité době se vzbudit, provést úkon a opět se uspat. Celý modul Arduino odebírá v tomto režimu přibližně 16 μ A.

5.4 Modul pro měření solárního panelu

Modul (fotografie viz příloha A.5) slouží jako monitor výkonu solárního panelu. Modul je vybaven konektory pro připojení čtyř ampérmetrů ACS712 a čtyř napěťových děličů pro měření

³<https://github.com/jcw/jeeelib>

napětí. Napěťové děliče jsou realizovány $0,5\text{M}\Omega$ trimry. Na desku lze přidat regulátor KIM-055L s 5A zatížitelností. Na tento regulátor se připojuje napětí z baterie (12V) a slouží jako stabilizovaný zdroj energie pro Arduino, vysílač i pro USB napájení např. Raspberry Pi.

6 Závěr

Výsledkem této práce se podařilo vytvořit demonstrační ukázkou malé bezdrátové senzorické sítě. Jednotlivé uzly v síti jsou poskládány z levných a dostupných modulů. Případnému zájemci má tato práce ukázat cestu, že lze sestavit senzorickou síť i bez hlubokých znalostí o této problematice.

Jednotlivé dílčí úkoly řešené v této práci jsou z různých odvětví. Návrh desek plošných spojů, oživení zařízení, navázání komunikace mezi zařízeními, cross kompilace aplikace, vytvoření websocket serveru a tenkého klienta pro uživatele.

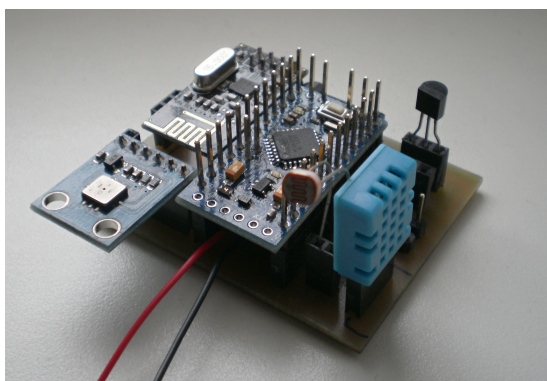
Moduly nRF24L01+ jsou vhodné pro menší aplikace, kdy je v síti do 30-ti zařízení, tj. do úrovně dva komunikačního stromu. Při hlubším zanoření může docházet k výpadkům komunikace i když se přijme zpráva o doručení. Umístění sítě je vhodné do bytů a do menších budov, kdy lze využít rozmístění zařízení do stromu.

Jednotlivé části práce lze dále rozšiřovat. Tenký klient lze přepracovat na úroveň robustnější aplikace, kdy klient bude ve funkci vizualizace a veškerá logika ovládání bude v komunikační části. Komunikační část lze rozšířit o správu událostí v kalendáři a přidat ukládání veškerých parametrů nastavení aplikace do souboru pro jejich snadnou editaci přes uživatelskou aplikaci. Jako bonus by bylo vhodné celou aplikaci více napojit na volně dostupné datové úložiště, které se starají o ukládání hodnot ve smyslu fenoménu "internet of things".

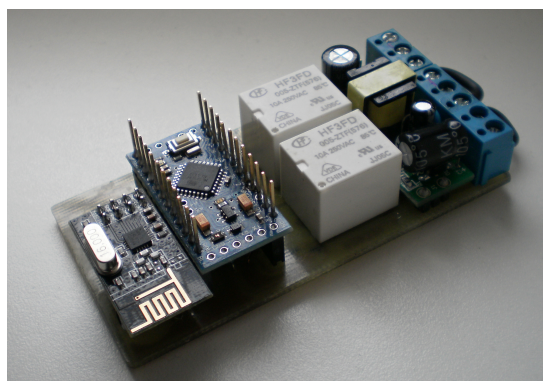
Literatura

- [1] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). 2011.
- [2] Semiconductor, N.: nRF24L01+ Product Specification v1.0. 2008, single Chip 2.4GHz Transceiver.
URL <http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2730/34105/file/nRF24L01_Product_Specification_v2_0.pdf>
- [3] HYNČICA, O.; PAVLATA, K.: Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v procesní automatizaci (3 části). *časopis Automa*, duben, květen, červen 2011.
- [4] KOTON, J.; ČÍKA, P.; KŘIVÁNEK, V.: Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee. [online], Naposledy navštíveno 27. 12. 2013.
URL <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>>
- [5] MATOUŠEK, D.: Nábojové pumpy. *Logos Polytechnikos*, duben 2011.
- [6] MURTHY, C. SIVA RAM; MANOJ, B. S.: *Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols*. Prentice Hall PTR, 2004, ISBN 978-0133007060.
- [7] PATKA, L.: Bezdrátové sítě. 2007, [Online; cit. 21.12.2013].
URL <http://www.fi.muni.cz/usr/brandejs/PV005/Bezdratove_site_patka.pdf>
- [8] POKORNÝ, J.: Analyzátor rádiových kanálů IEEE 802.15.4. Brno, 2011, diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [9] SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T.: *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2007, ISBN 978-0471743002.
- [10] WIKIPEDIA: Bezdrátová síť — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2013, [Online; cit. 21.12.2013].
URL <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bezdrátová_sit>
- [11] ZHENG, J.; JAMALIPOUR, A.: *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. Prentice Hall PTR, 2004, ISBN 978-0133007060.

A Fotografie



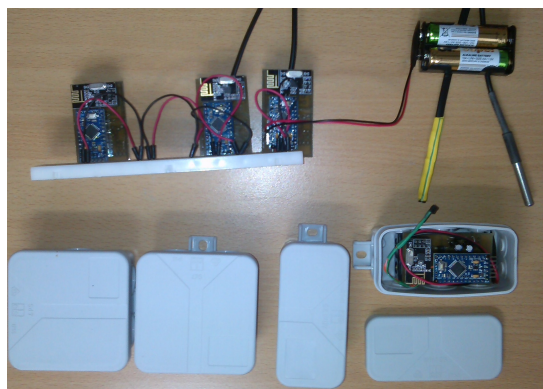
Obrázek A.1: Univerzální testovací modul



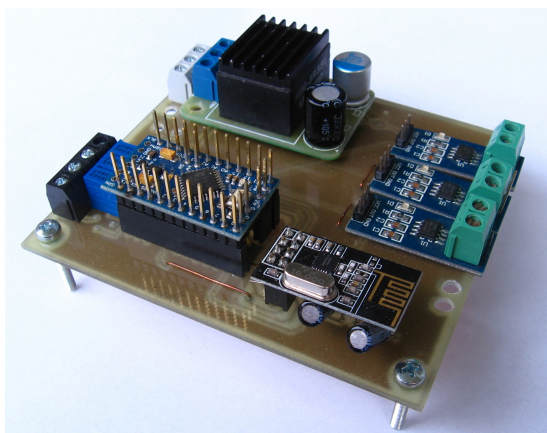
Obrázek A.2: Modul pro spínání zásuvek



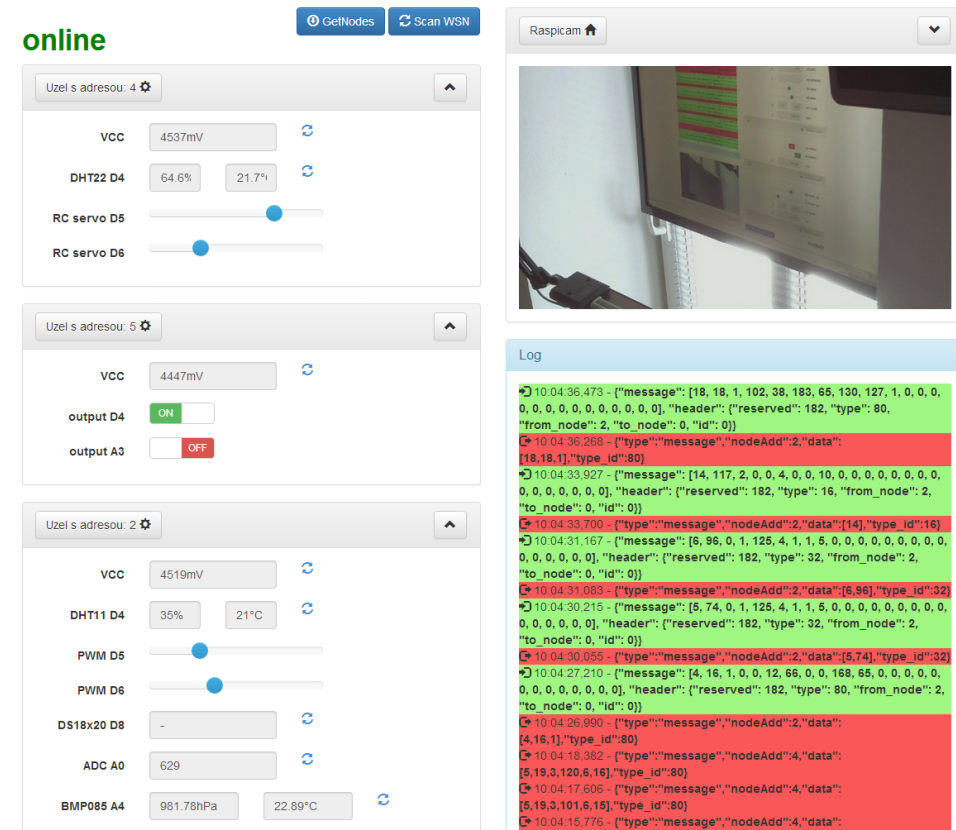
Obrázek A.3: Modul pro spínání zásuvek



Obrázek A.4: Moduly vhodné pro bateriový provoz



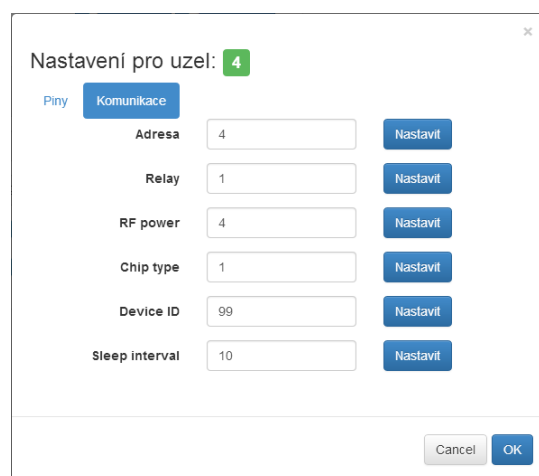
Obrázek A.5: Modul pro měření solárního panelu



Obrázek A.6: Pohled na webovou stránku pro ovládání senzorské sítě



Obrázek A.7: Nastavení funkce pinů na zařízení



Obrázek A.8: Nastavení parametrů zařízení

Tabulka A.1: Připojené periferie na mikroprocesoru ATmega328

pin číslo	označení na DPS	fce pinu	GPIO	PWM	ADC	poznámka
0	0	RXD				usart
1	1	TXD				usart
2	2	IRQ				RF24
3	3		ano	ano		
4	4		ano			
5	5		ano	ano		
6	6		ano	ano		
7	7	CE				RF24
8	8	CS				RF24
9	9		ano	ano		
10	10		ano	ano		
11	11	MOSI				RF24
12	12	MISO				RF24
13	13	CSK				RF24
14	A0		ano		ano	
15	A1		ano		ano	
16	A2		ano		ano	
17	A3		ano		ano	
18	A4		ano		ano	
19	A5		ano		ano	
20	A6		ano		ano	pouze vstup
21	A7		ano		ano	pouze vstup
Σ	22		14	5	8	

Tabulka A.2: Připojené periferie na mikroprocesoru ATmega328

header.type	1.B zpravy	2.B zpravy	3.B zpravy	4.B zpravy	5.B	6.B	7.B	8.B
Tabulka funkcí								
Nastavení - komunikace								
Kód funkce	Podfunkce	Popis						
0x60	zerezvováno							
0x61	Práce s piny							
	0x00	nedefinováno - none						
	0x01	Nastavení funkce pinu						
	pin	0x00	nedefinováno - none					
	pin	0x01	GPIO - vstup					
	pin	0x02	GPIO - vstup s interním pull-up rezistorem					
	pin	0x03	GPIO - výstup					
	pin	0x04	ADC - analog reference - default					
	pin	0x05	ADC - analog reference - INTERNAL 1V1					
	pin	0x06	ADC - analog reference - External (AREF pin)					
	pin	0x07	PWM					
	pin	0x08	čítač					
	pin	0x09	čítání pulsů za jednotku času					
	pin	0x0A	připojený sensor					
	0x02	Čtení funkce pinu						
	pin	0x0x	... viz výše					
	0x04	přečíst fce všech pinů						
0x63	Nastavení komunikace							
	0x00	nedefinováno - none						
	0x01	Vrať adresu						
	0x02	Nastav adresu uzlu						
	0x03	Čti vysílací výkon						
	0x04	Nastav vysílací výkon						
	0x05	Čti číslo kanálu						
	0x06	Zapiš číslo kanálu						
	0x07	Odpověď přesto to, co jsi dostal						
	0x08	Nastav RELAY/LEAF uzlu (0=leaf;1=relay)						
	0x09	Čti RELAY/LEAF uzlu (0=leaf;1=relay)						
	0x0A	Pošli I Listen						
	0x0B	go to sleep						
0x64	Ostatní							
	0x00							
	0x01	čtení teploty čipu						
	0x02	čtení napájecího napětí						
0x6A	Zapiš 1byte do EEPROM							
	adresa L	adresa H	data					
0x6B	Čti 1byte z EEPROM							
	adresa L	adresa H						

Tabulka A.3: Připojené periferie na mikroprocesoru ATmega328

header.type	1.B zpravy	2.B zpravy	3.B zpravy	4.B zpravy	5.B	6.B	7.B	8.B
Práce s GPIO								
Kód funkce	Podfunkce			Popis				
0x01				Čti GPIO				
	pin							
0x02				Nastav GPIO				
	pin	hodnota						
ADC								
Kód funkce	Podfunkce			Popis				
0x10	pin			Čtení ADC registru 10bit				
0x11	pin			Čtení ADC registru 10bit (1V1)				
PWM								
Kód funkce	Podfunkce			Popis				
0x20	pin			Nastavení středy PWM				
Připojený sensor								
Kód funkce	Podfunkce			Popis				
0x50	Sensory							
	pin	0x00						
	pin	0x0C			DS18x20			
			0x01	čísť teplotu (12bit)				
	pin	0x10			DHT11			
			0x01	čísť teplotu I vlhkost				
			0x02	čísť vlhkost				
			0x03	čísť teplotu				
	pin	0x11			DHT22			
			0x01	čísť teplotu I vlhkost				
			0x02	čísť vlhkost				
			0x03	čísť teplotu				
	pin	0x12			BMP085			
			0x01	čísť teplotu, tlak				
			0x02	čísť tlak				
			0x03	čísť teplotu				
	pin	0x13			RC servo			
			0x01	úhel	nastav úhel			
			0x02		čti úhel			

B Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy a podklady pro výrobu DPS.

- Hardware - soubory z návrhového programu Eagle:
 - Univerzální testovací modul
 - Modul pro spínání zásuvek
 - Modul vhodný pro bateriový provoz
 - Modul pro měření solárního panelu
- Software:
 - Uživatelská aplikace - aplikace napsaná v HTML5 s komunikačním protokolem websocket
 - Komunikační aplikace - zdrojové kódy v C++ pro aplikaci běžící na miniPC
 - Aplikace pro Arduino
- Fotografie a snímky obrazovky
- Excel tabulka s podklady pro vytváření zpráv, tabulkou s využitými piny, výpočet výdrže na baterii.