

Bezdrátové propojení embedded systémů pomocí ZigBee modulů

Wireless connection of embedded systems using ZigBee
modules

Bc. Tomáš Sedlák

Diplomová práce
2012

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš SEDLÁK**
Osobní číslo: **A09428**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**

Téma práce: **Bezdrátové propojení embedded systémů pomocí ZigBee modulů**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na téma bezdrátová komunikace.
2. Prostudujte hardwarové vlastnosti 2,4 GHz bezdrátových komunikačních modulů Freescale MC13192U a navrhnete jejich propojení s vývojovými kity M68EVB908GB60.
3. Vytvořte programovou knihovnu pro podporu bezdrátové komunikace na vývojovém kitu M68EVB908GB60.
4. Vypracujte ukázkový program používající vytvořenou komunikační knihovnu pro demonstraci její funkce.
5. Zpracujte prezentaci pro podporu výuky cvičení předmětu Programování mikropočítačů pro seznámení studentů s funkcí bezdrátových modulů a vytvořené knihovny.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. AXIOM MANUFACTURING. MC13192U Application Module for the Freescale MC13192 2.4GHz RF Transceiver Hardware User Guide [online]. 2006. Dostupné z: www.axman.com
2. BERKA, Štěpán. Elektrotechnická schémata a zapojení 2: řídicí, ovládací a bezdrátové prvky. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2010, 240 s. ISBN 978-807-3002-541.
3. EREN, Halit. Wireless sensors and instruments: networks, design, and applications. 1. vyd. Boca Raton: CRC/Taylor, 2006, 297 s. ISBN 08-493-3674-0.
4. FREESCALE SEMICONDUCTOR. CPU08 Central Processor Unit Reference Manual [online]. 2001. Dostupné z: www.freescale.com
5. FREESCALE SEMICONDUCTOR. HCS08 Family Reference Manual, Rev.1. [online]. 2003. Dostupné z: www.freescale.com
6. FREESCALE SEMICONDUCTOR. MC9S08GB/GT Data Sheet, Rev.2.3. [online]. 2004. Dostupné z: www.freescale.com
7. FREESCALE SEMICONDUCTOR. MC13192/MC13193 2.4 GHz Low Power Transceiver for the IEEE 802.15.4 Standard Reference Manual [online]. 2006. Dostupné z: www.freescale.com
8. GOFTON, Peter W. Sériová komunikace. 1. vyd. Praha: Grada, 1994, 234 s. ISBN 80-716-9131-3.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Dostálek, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

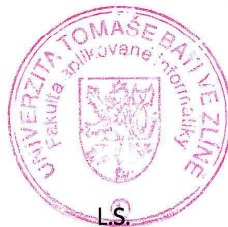
24. února 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

28. května 2012

Ve Zlíně dne 24. února 2012

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Karel Vlček, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

První část diplomové práce obsahuje stručnou rešerši na téma bezdrátová komunikace. Je zaměřena především na technologie Bluetooth a ZigBee a jejich porovnání. Závěrem první části je popsán vývojový kit M68EVB908GB60 a bezdrátový ZigBee komunikační modul AP13192USLK. Tyto jsou použity v druhé části této práce, v jejímž počátku je navržen způsob jejich propojení. Dále je vypracována programová knihovna. Ta obsahuje funkce, které řídí komunikační modul. Závěrem je vypracován ukázkový program využívající programovou knihovnu k demonstraci jejích funkcí. Výstupem této práce je také výuková prezentace, která studenty seznámí s funkcemi knihovny.

Klíčová slova: Bluetooth, ZigBee, M68EVB908GB60, AP13192USLK

ABSTRACT

First part of diploma thesis contains brief research about wireless communication. It is focused mainly on Bluetooth and ZigBee technology and their comparison. By the end of the first part the development kit M68EVB908GB60 and wireless ZigBee communication module AP13192USLK are listed. This hardware is used in the second part of the thesis. There the connection between those two parts is designed. The program library is developed right after. It contains functions which controls communication module. By the end of the thesis the sample program which uses the program library is elaborated to demonstrate its functions. The outcome of this work is also a educational presentation that introduces students to the library functions.

Keywords: Bluetooth, ZigBee, M68EVB908GB60, AP13192USLK

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Petrovi Dostálkovi, Ph.D., za jeho rady, podněty a celkově za odborné vedení mé diplomové práce.

Motto

“

Kdo chce pohnout světem, musí pohnout sám sebou.

”

Sokrates (469 př. n. l. – 399 př. n. l.)

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE | 12 |
| 1.1 POČÁTKY BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKACE..... | 12 |
| 1.2 VÝHODY BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKACE..... | 12 |
| 1.3 TYPY BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKACE | 12 |
| 1.4 MODULACE | 13 |
| 1.4.1 Typy modulací..... | 13 |
| 2 TECHNOLOGIE BLUETOOTH | 15 |
| 2.1 HISTORIE BLUETOOTH..... | 15 |
| 2.2 SPECIFIKACE BLUETOOTH | 15 |
| 2.3 VÝKONOVÉ TRÍDY | 16 |
| 2.4 TOPOLOGIE SÍTĚ | 16 |
| 2.5 KMITOČTOVÉ PÁSMO A RUŠENÍ..... | 17 |
| 2.6 ZABEZPEČENÍ | 17 |
| 2.7 BLUETOOTH HROZBY..... | 18 |
| 2.8 JEDNOTLIVÉ VERZE BLUETOOTH | 18 |
| 2.9 BLUETOOTH LOW ENERGY | 20 |
| 2.10 TECHNICKÉ PARAMETRY BLUETOOTH LOW ENERGY..... | 22 |
| 3 TECHNOLOGIE ZIGBEE | 23 |
| 3.1 HISTORIE ZIGBEE | 23 |
| 3.2 SPECIFIKACE ZIGBEE A REVIZE..... | 23 |
| 3.3 TOPOLOGIE SÍTĚ | 24 |
| 3.4 KMITOČTOVÉ PÁSMO..... | 25 |
| 3.5 ZABEZPEČENÍ | 25 |
| 3.6 ZIGBEE HROZBY | 26 |
| 3.7 TECHNICKÉ PARAMETRY ZIGBEE | 28 |
| 4 POROVNÁNÍ OBOU TECHNOLOGIÍ | 29 |
| 4.1 POROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ | 29 |
| 4.2 SYSTÉMOVÉ PARAMETRY | 30 |
| 4.3 SLOŽITOST PROTOKOLŮ | 32 |
| 4.4 SPOTŘEBA ENERGIE | 32 |
| 5 VÝVOJOVÝ KIT M68EVB908GB60 | 34 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.1 | MCU PORT..... | 36 |
| 6 | KOMUNIKAČNÍ MODUL AP13192USLK..... | 38 |
| 6.1 | PARAMETRY MODULU | 38 |
| 6.2 | STAVY MODULU | 38 |
| 6.3 | VYSÍLACÍ VÝKON | 39 |
| 6.4 | VYSÍLACÍ KANÁLY..... | 40 |
| 6.5 | SPOTŘEBA | 40 |
| 6.6 | PROPOJENÍ MODULU S MCU | 41 |
| 6.7 | TVAR PAKETU MODULU AP13192USLK..... | 43 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST | 44 |
| 7 | PROPOJENÍ AP13192USLK S M68EVB908GB60..... | 45 |
| 8 | VYTVOŘENÍ PROGRAMOVÉ KNIHOVNY | 47 |
| 8.1 | SMAC KNIHOVNA..... | 47 |
| 8.1.1 | Funkce fyzické vrstvy..... | 47 |
| 8.1.2 | Funkce MAC vrstvy | 51 |
| 8.1.3 | Inicializační funkce pro MCU port | 54 |
| 8.1.4 | Zdroje hodinového kmitočtu | 55 |
| 8.1.5 | Definice propojení modulu s MCU..... | 55 |
| 8.2 | PROGRAMOVÁ KNIHOVNA | 56 |
| 8.2.1 | Funkce Init_ZigBee..... | 57 |
| 8.2.2 | Funkce Send_Data..... | 58 |
| 8.2.2.1 | Funkce ext_main (Odesílání dat)..... | 60 |
| 8.2.3 | Funkce Read_Data | 63 |
| 8.2.3.1 | Funkce ext_main (Příjem dat)..... | 64 |
| 8.2.4 | Funkce Get_CRC_Errors | 66 |
| 8.2.5 | Funkce Get_CRC_Warnings..... | 67 |
| 8.2.6 | Funkce Init_Clock_Generator..... | 67 |
| 8.3 | KOLIZE, ŘÍZENÍ KOMUNIKACE A DOSAH ZIGBEE MODULU | 67 |
| 9 | UKÁZKOVÝ PROGRAM..... | 69 |
| 9.1 | ŘEŠENÍ – STANICE Č. 1..... | 70 |
| 9.2 | ŘEŠENÍ – STANICE Č. 2..... | 72 |
| 10 | PREZENTACE PRO PODPORU VÝUKY | 75 |
| | ZÁVĚR | 76 |
| | CONCLUSION | 78 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 80 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 82 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 85 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 86 |

| | |
|---------------------|----|
| SEZNAM ROVNIC | 87 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 88 |

ÚVOD

Bezdrátové komunikace jsou v současnosti používány v mnoha oblastech lidské činnosti. Jsou používány v průmyslovém, vědeckém, obchodním sektoru, domácnostech a jejich použití a potenciál se neustále rozrůstá. Stejně tak přibývá technologií, na jejichž principu bezdrátová komunikace funguje. Tyto technologie bývají často velmi podobné, ale mohou se lišit v oblasti použití. Například u mobilních telefonů umožňuje technologie Bluetooth odesílat velké objemy dat a přitom se už příliš nehledí na spotřebu a výdrž. Naopak, v průmyslu využívaná technologie ZigBee klade důraz na spotřebu a nepočítá s objemnými přenosy. Díky tomu může zůstat zařízení využívající technologie ZigBee funkční až několik let. Je proto velmi důležité vždy zvolit vhodnou technologii pro konkrétní použití.

Tato diplomová práce vás v samotném počátku seznámí s principy bezdrátové komunikace, dobře známou technologií Bluetooth a technologií ZigBee, které jsou následně porovnány.

Práce obsahuje návod, jak propojit ZigBee komunikační modul AP13192USLK s vývojovým kitem M68EVB908GB60 tak, aby nevznikaly konflikty a chyby při jejich vzájemné komunikaci a bylo stále možné použít všechny integrované obvody na vývojovém kitu.

Výstupem praktické části je programová knihovna, která umožňuje přijímat a odesílat pakety nebo měnit nastavení komunikačního modulu. Je možné měnit vysílací frekvenci, vysílací výkon a adresovat jednotlivé moduly. Data jsou odesílána v paketech a jsou zabezpečena CRC kontrolním součtem. Je myšleno i na situace, kdy data k příjemci nedorazí nebo jsou při přenosu poškozena (kolize, které vznikají při vysílání více modulů v jeden okamžik). Funkce knihovny zároveň informují, zda byla data odeslána, zda je příjemce přijal a také upozorňují na CRC chyby.

Součástí práce je také ukázkový program, který používá funkce programové knihovny. K demonstraci ukázkového programu byly použity dva vývojové kity a ZigBee moduly. Statistika přenosu dat mezi moduly je zobrazena na LCD displeji obou kitů, tedy bajty odeslané, přijaté a ztracené. Počet CRC chyb je také zobrazen.

Vytvořená programová knihovna a multimediální prezentace k této knihovně bude sloužit pro didaktické účely pro předmět Programování mikropočítačů, který je vyučován na FAI UTB ve Zlíně.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE

Jde o technologii, kdy jsou data přenášena prostorem bezdrátově. Tímto jsou ušetřeny náklady spojené s konstrukcí a montáží pevných spojů, materiály a čas. Používá se všude, kde je kabelové řešení nemožné, obtížné nebo je její implementace výhodnější.

1.1 Počátky bezdrátové komunikace

J. C. Maxwell v roce 1864 ve své teoretické práci přišel k závěru, že světlo, elektřina a magnetismus mají mnoho společného, a to, že je lze přenášet jako vlnové záření. Samotný důkaz přišel až o rok později, a to díky zubaři M. Loomisovi, který na dvou vzdálených místech vypustil papírové draky s kovovou kostrou. K jednomu připojil vysílací část telegrafu a k druhému galvanometr, který zaznamenával přijímaný signál. Takto dokázal bezdrátově přenést morseovu abecedu na vzdálenost 23km.[9]

1.2 Výhody bezdrátové komunikace

- Není potřeba kabelového spojení
- Mobilita – můžete se pohybovat na různé vzdálenosti bez omezení
- Snížení provozních a režijních nákladů na spojení

1.3 Typy bezdrátové komunikace

Existují tři typy bezdrátové komunikace:

- Radiová komunikace
Zde patří technologie Wifi, Bluetooth a ZigBee.
Informace se přenáší rádiovými vlnami.
- Sonická komunikace
Jde o zvukovou komunikaci
- Optická komunikace
Informace se přenáší světlem

Z výše uvedených typů bude práce věnována radiové komunikaci, a to technologiím Bluetooth a Zigbee, které jsou si v mnoha vlastnostech a použití velmi podobné.

Tyto technologie používají elektromagnetické rádiové vlnění v širokém spektru radiových frekvencí. Jednotlivé přenášené bity se moduluji na základní nosnou frekvenci, kterou jsou data přenášena. To znamená, že frekvence přenášených dat je menší než nosná frekvence.

1.4 Modulace

Pro přenos zpráv na různé vzdálenosti se používají vysokofrekvenční vlny různých frekvencí, nazývané nosné vlny. Přenášené zprávy musí vhodným způsobem ovlivňovat některou charakteristickou veličinu nosné vlny (amplitudu, frekvenci, fázi, sled impulsů apod.). Toto ovlivňování nosné vlny se nazývá modulace.

Než dojde k modulaci, je nutné změny různých fyzikálních veličin (zvuk, světlo, tlak, teplota aj.), které představují přenášené zprávy, přeměnit na jim odpovídající elektrické signály.

Těmito signály, které se nazývají modulační, se potom provádí modulace.

Jde tedy o proces, při kterém se mění charakteristika nosného signálu (amplituda, frekvence nebo fáze) v souladu s přenášeným signálem. Přenášený signál se při modulaci nanáší na nosný signál a výstupem je modulovaný signál.

1.4.1 Typy modulací

- 1) Spojité analogové
 - a. Amplitudová
 - b. Frekvenční
 - c. Fázová
- 2) Spojité digitální
 - a. ASK
 - b. FSK (GFSK)
 - c. PSK (BPSK, QPSK, O-QPSK)
- 3) Diskrétní
 - a. Nekvantované
 - PAM
 - PWM
 - PPM

b. Kvantované

- PCM
- DM
- ADM
- DPCM
- ADCPM

4) Složené modulace

a. QAM

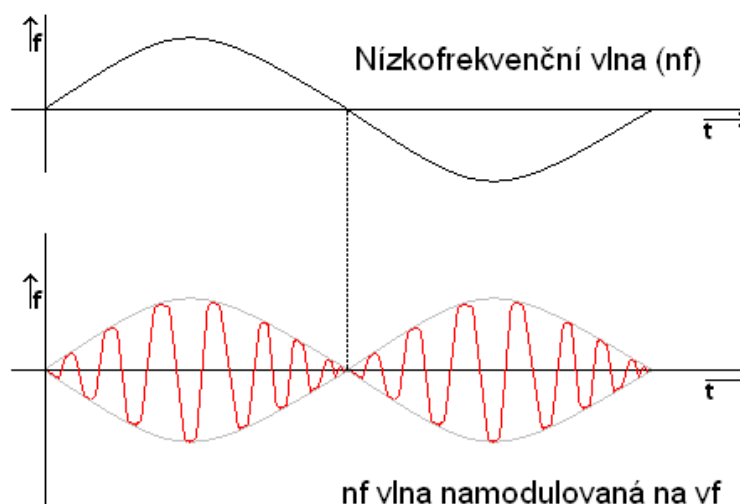
b. APSK

U spojitých analogových modulací je nosným signálem harmonický průběh v čase (sinusoida, cosinusoida) a modulačním signálem je analogový signál. U spojitých digitálních modulací je rozdíl pouze v tom, že modulačním signálem je digitální signál.

Nosný signál u diskrétní modulace má nespojitý průběh a modulační signál je buďto spojitý (nekvantovaný) nebo spojitý (kvantovaný).

Složené modulace zpracovávají několik modulačních signálů najednou.

Na obrázku č. 1 je zobrazeno, jak se při amplitudové modulaci vlivem přenášeného modulovaného signálu mění amplituda nosné vlny.



Obrázek 1: Amplitudová modulace

2 TECHNOLOGIE BLUETOOTH

Bluetooth je bezdrátová komunikační technologie, která slouží k bezdrátovému propojení dvou a více elektronických zařízení. Těmito zařízeními mohou být například mobilní telefony, osobní počítače, tiskárny, projektory, sluchátka a mnoho dalších. Dále se tato technologie používá v automobilovém, lékařském a dalších průmyslových odvětvích.

2.1 Historie Bluetooth

Za vznikem této technologie stojí švédská společnost Ericsson (návrh na technologii v roce 1994) a později konsorcium SIG (Special Interests Group), které vzniklo v roce 1998 a je spojením několika firem: Microsoft, Intel, IBM, Nokia, Ericsson, Lucent, Toshiba a Motorola. Dnes toto konsorcium zahrnuje 15000 společností. [11]

Samotná technologie ve verzi 1.0 vznikla v roce 1999. Od té doby vzniklo několik novějších verzí:

Tabulka 1: Verze Bluetooth

| Verze | Rok |
|-------|------|
| 1.1 | 2000 |
| 1.2 | 2003 |
| 2.0 | 2004 |
| 2.1 | 2007 |
| 3.0 | 2009 |
| 4.0 | 2010 |

2.2 Specifikace Bluetooth

Tato technologie je definovaná standardem IEEE 802.15.1 a patří do sítí PAN (Personal Area Network) a umožňuje tedy bezdrátový přenos informací do 100m, dle použité třídy zařízení.

Jednotlivá zařízení jsou identifikována pomocí své adresy BT_ADDR (BlueTooth Device Address), která je podobná jako je MAC (Media Access Control) adresa u Ethernetu.

2.3 Výkonové třídy

Je definováno několik výkonových úrovní (2,5 mW, 10 mW, 100 mW) s nimiž je umožněna komunikace do vzdálenosti cca 10 – 100 m, viz tabulka č. 2. Udávané hodnoty ovšem platí jen ve volném prostoru. Pokud jsou mezi komunikujícími zařízeními překážky (typicky například zdi), dosah rychle klesá. Většinou ovšem nedochází ke skokové ztrátě spojení, ale postupně se zvyšuje počet chybně přenesených paketů.

Standard dále definuje, že výkonová třída 1 nesmí být využita k přenosu paketů mezi stanicemi v případě, že přijímací stanice nepodporuje mechanismus zpětného řízení výkonu vysílací strany. Vysílací strana tedy smí odpovídat pouze výkonové třídě 2 a 3.

Tabulka 2: Výkonové třídy Bluetooth

| Třída | Výstupní výkon | Dosah | Hlavní použití |
|-------|----------------|-------|--------------------------|
| 1 | 1mW - 100mW | 100m | Průmysl |
| 2 | 0,25mW - 2,5mW | 10m | Mobilní telefony, PDA... |
| 3 | do 1mW | 1m | Handsfree |

Nejvíce používaná je 2. třída, která má maximální výstupní výkon 2,5mW. Bluetooth technologie je navržena tak, aby měla velmi malou spotřebu energií. V samotném návrhu technologie se počítá s tím, že pokud je zařízení neaktivní, tj. nevysílá, je uvedeno do režimu se sníženou spotřebou.

Bluetooth low energy technologie, která je optimalizována pro zařízení, u kterých se požaduje více výdrž baterie než vysoká rychlost přenosu, spotřebovává něco mezi 1/2 a 1/100 energie oproti klasické Bluetooth technologii.[12]

2.4 Topologie sítě

Bluetooth umožňuje dva způsoby spojení. První spojuje dvě zařízení mezi sebou a označuje se jako „point to point“. Druhý způsob je „point to multipoint“, kde je spojeno více zařízení a přenosový kanál je tedy sdílený. Sestava dvou nebo více jednotek, které sdílejí stejný přenosový kanál, se nazývá piconet. V rámci piconet je jedno zařízení nadřazené, označené jako master a ostatní jsou podřazené - označené jako slave. Master řídí provoz ve sdíleném komunikačním kanálu.

Pikonety lze dále seskupovat do tzv. scatternetů. Dochází k vzájemnému překrývání funkcí a jedno zařízení může figurovat ve více pikonetech. Master jednotka v jednom pikonetu může mít funkci slave v jiném pikonetu a může se tak podílet na komunikaci ve více pikonetech.[13]

2.5 Kmitočtové pásmo a rušení

Technologie Bluetooth využívá rádiových kmitočtů v bezlicenčním pásmu 2,4 až 2,485 GHz. Provoz je plně duplexní a jak spojově tak i nespojově orientovaný.

Používá se AFH (adaptive Frequency Hopping), díky kterému je možné velmi rychle (až 1600 krát za sekundu) měnit nosné frekvence ve spektru 2,402 GHz až 2,480 GHz a přenášet tak data na frekvenci, která není nikým jiným použita. To se provádí tak, že se detekují všechna zařízení pracující ve výše uvedeném spektru a vynechají se všechny frekvence, které tato zařízení v daný moment používají. Frekvenční hodnoty pro skoky se volí generátorem náhodných čísel a mění se každých 625 mikrosekund. Změnou frekvencí je zajištěna bezpečnost proti odposlouchávání a zabraňuje se tak kolizím dvou zařízení, které pracují na stejné frekvenci. Mezi 79 frekvencemi o šířce 1 MHz se tímto dosáhne vysokého stupně odolnosti proti rušení a tedy i vyššího objemu přenesených dat za jednotku času. Dále se používá dopředná ochrana chyb Forward Error Correction (FEC).

2.6 Zabezpečení

Používá se množství mechanismů. V každé Bluetooth jednotce musí být realizovány procedury ověřování a šifrování stejným způsobem. Na spojové vrstvě jsou použity k dosažení bezpečnosti čtyři entity. První entitou je veřejné adresování, které je jedinečné pro každého uživatele (Bluetooth adresa má velikost 48 bitů). Druhým zabezpečením jsou dva tajné klíče (délky 128 bitů), dále náhodné číslo (délky 128 bitů), které je různé pro každou novou operaci. Poslední entitou je ověřování (autentikace), kdy se předejde nežádoucím přístupům k datům, například k připojení přenosného počítače k mobilnímu telefonu může být požadován číselný kód PIN. Šifrováním se předejde odposlechům a zachová se utajení dat.[14]

2.7 Bluetooth hrozby

1) Bluejacking

Jde o zasílání nevyžádaného obsahu, tj. obrázků nebo vizitek, kdy často starší telefony nenabízejí možnost odmítnutí přijetí. Nejčastější výskyt bývá v zalidněných oblastech. Bránit se lze jednoduše vypnutím Bluetooth nebo zamezením viditelnosti svého přístroje. Spíše než o hrozbu jde o spamovou službu.

2) Bluesnarfing

Jde o techniku neoprávněného získávání dat. Nejčastěji se jedná o útoky na přenosná zařízení, tj. mobilní telefony a notebooky. Princip útoku spočívá ve využití služby OBEX Push, která je nejčastěji využívána k příjmu a odesílání vizitek vCard. Pokud zařízení umožňuje vyžádání souboru přes službu OBEX Get, může útočník získat přístup k souborům a poslat si je. Některá zařízení podporují také přístup pro zápis souboru. Jako částečná obrana funguje vypnutí viditelnosti přístroje, čímž to útočníkovi dost znesnadníte. Bluetooth SIG je uvádí, že tento útok možné provádět pouze na starší telefony. Provádění této praktiky je považováno za zásah do soukromí a je v mnoha zemích nelegální.

3) Bluebugging

Tyto útoky provádí vždy zkušený hacker. Útočník přes napadený mobil může telefonovat, číst i psát zprávy nebo se i připojit na internet bez vědomí uživatele telefonu. Pro provedení útoku je potřeba větších znalostí a vybavení.[15]

2.8 Jednotlivé verze Bluetooth

Nové verze zaručují zpětnou kompatibilitu se staršími verzemi, a je tedy možné spárovat i nejnovější zařízení se starším.

Verze 1.0 a 1.0B

Měla mnoho problémů s vzájemnou kompatibilitou a funkčností různých zařízení.

Verze 1.1

Byly opraveny problémy z předchozích verzí a schváleno jako IEEE Standard 802.15.1.

Byla přidána podpora pro nešifrované kanály.

Verze 1.2

Přidána skoková změna nosných frekvencí (AFH).

Vyšší přenosová rychlost: 720kbit/s.

Kvalitnější přenos zvuku, přeposílání poškozených paketů.

Přidáno uživatelské rozhraní.

Verze 2.0 + EDR

Vyšší přenosové rychlosti (Enhanced Data Rate) - do 3Mbit/s díky použití GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying) a PSK (Phase Shift Keying) modulací.

Snížení spotřeby díky kratšímu pracovnímu cyklu.

Verze 2.1 + EDR

Zabezpečené párování zařízení (potvrzení, číselné...).

Vylepšené řízení spotřeby.

Verze 3.0 + HS

V kombinaci s 802.11 linkou přináší vyšší přenosové rychlosti (do 24Mbit/s).

Počáteční spojení je navázáno s použitím Bluetooth frekvencí a vysoce objemový datový přenos obstarává MAC PHY 802.11 linka.

Umožňuje odesílat malé množství (servisních) dat bez navázání spojení, což snižuje zpoždění a poskytuje rychlejší a spolehlivější odezvy.

Vylepšené řízení spotřeby zajišťuje nižší počet nechtěně odpojených spojení.

Verze 4.0

Obsahuje tři protokoly:

- 1) Classic Bluetooth
- 2) Bluetooth high speed
- 3) Bluetooth low energy (BLE)

Pro tuto práci je podstatná právě Bluetooth low energy – ostatní bude tedy záměrně vynecháno.

2.9 Bluetooth low energy

Oproti klasickému Bluetooth tato technologie spotřebovává pouze zlomek potřebné energie. Zařízení bývají napájena malými bateriemi (jako jsou v hodinkách) a v určitých případech fungují více než rok bez dobíjení.

Tato technologie se od uvedení verze 4.0 velmi rozšířila do různých průmyslových odvětví. S výhodou velmi nízkých pořizovacích nákladů a ceny ji používají automobilky, lékařské instituce a další průmysly.

Později byla pro tuto technologii použita loga:

- a) Bluetooth Smart Ready
- b) Bluetooth Smart

Zařízení nesoucí tato označení udávají kompatibilitu, respektive s jakými zařízeními můžou komunikovat. Zatímco zařízení s prvním logem lze připojit ke všem zařízením, u druhého typu zařízení (většinou snímače) se lze připojit pouze k zařízením Bluetooth Smart Ready.

Na následujícím obrázku je popsána kompatibilita zařízení z levého sloupce k zařízením v pravém sloupci.[16]

| Je-li na produktu toto logo | Pak je kompatibilní se zařízeními nesoucí tato loga |
|---|--|
|  |    |
|  |   |
|  |  |

Obrázek 2: Kompatibilita Bluetooth zařízení

Na následujícím obrázku je zobrazena protokolová vrstva.



Obrázek 3: Protokolová vrstva BLE (single-mode)

Klíčovým prvkem nízké spotřeby je linková vrstva Link Layer (LL), která poskytuje ultra nízkou spotřebu v nečinném stavu, při vyhledávání zařízení a spolehlivých point-to-multipoint datových přenosech, včetně šifrovacích funkcí. V následující tabulce je zobrazen formát LL paketu.

Tabulka 3: Formát BLE link layer paketu

| | | | |
|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------|
| Úvodní data (1 bajt) | Adresace (4 bajty) | Hlavička a data (2 až 39 bajtů) | CRC (3 bajty) |
|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------|

Link layer paket obsahuje:

- 1) Úvodní synchronizační data
- 2) Přístupovou adresu pro identifikaci fyzického spojení
- 3) Protokolovou datovou jednotku, obsahující hlavičku a data
- 4) CRC (Cyclic Redundancy Code) kontrolní data

Pokud je to možné, tak se pro nízkou spotřebu vynechávají (tj. neodesílají) nepotřebné informace, které přijímací strana již zná.

Příklady použití Bluetooth low energy:

- Hodinky Casio GB-6900
- Apple iPhone 4S

Tyto přístroje jsou zobrazeny na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Příklady použití Bluetooth low energy

2.10 Technické parametry Bluetooth Low Energy

Zde jsou vypsané technické parametry technologie Bluetooth Low Energy:

- Frekvenční rozsah: 2,4 GHz
- Dosah: 10m
- Rychlost spoje: 1Mb/s
- Praktická rychlost přenosu: 0,26Mb/s
- Rychlost odezvy: 3s
- Rychlost odezvy po probuzení: 3ms
- Počet vysílacích kanálů: 79
- Jmenovitý vysílací výkon: 10mW (0-10 dBm)
- Modulace: GFSK
- Metoda přenosu: FHSS
- Nejmenší článek sítě: Pikonet
- Rozsáhlejší síť: Scatternet
- Počet zařízení v síti: 8
- Kódování: E0 proudová šifra (128bit AES)
- Ověřování: Sdílené tajemství
- Ochrana dat: 16bit CRC
- Robustnost: Adaptive Frequency Hopping, 24 bit CRC
- Spotřeba: 100mW

3 TECHNOLOGIE ZIGBEE

Tato technologie je velmi podobná technologii BLE. Široké veřejnosti není tolik známá, protože se používá především v průmyslu a senzorových sítích, kde se klade důraz na energetickou spotřebu a výdrž.

3.1 Historie ZigBee

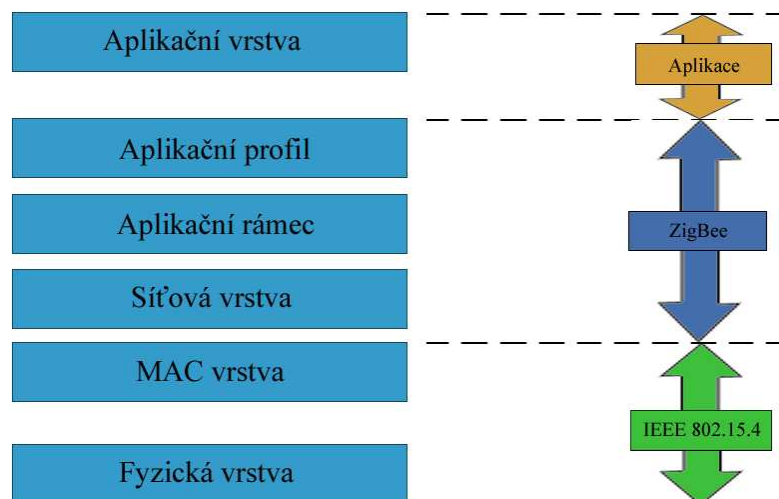
Název technologie pochází z analogie chování včel, které se vždy vrací zpět do úlu. Sítě typu ZigBee se začaly objevovat v roce 1998, kdy si mnoho aplikačních inženýrů uvědomilo, že Wi-Fi a Bluetooth nebudou pro některé aplikace vhodné.

ZigBee standard IEEE 802.15.4 byl definován v roce 2003 a ratifikován v roce 2004.

Za současnou podobou ZigBee stojí ZigBee Alliance, která vznikla v roce 2002 a dnes čítá nad 200 členů.

3.2 Specifikace ZigBee a revize

Hlavní oblastí této technologie jsou senzorové sítě a automatizovaná kontrola, jako jsou osobní lékařská pomoc, průmyslové řízení, domácí automatizace, dálkové ovládání a monitoring. Zvláště pak biotelemetrické aplikace kvůli velmi nízké energetické spotřebě, například osobní lékařský dohled pro starší generaci pacientů.



Obrázek 5: Protokolová vrstva ZigBee

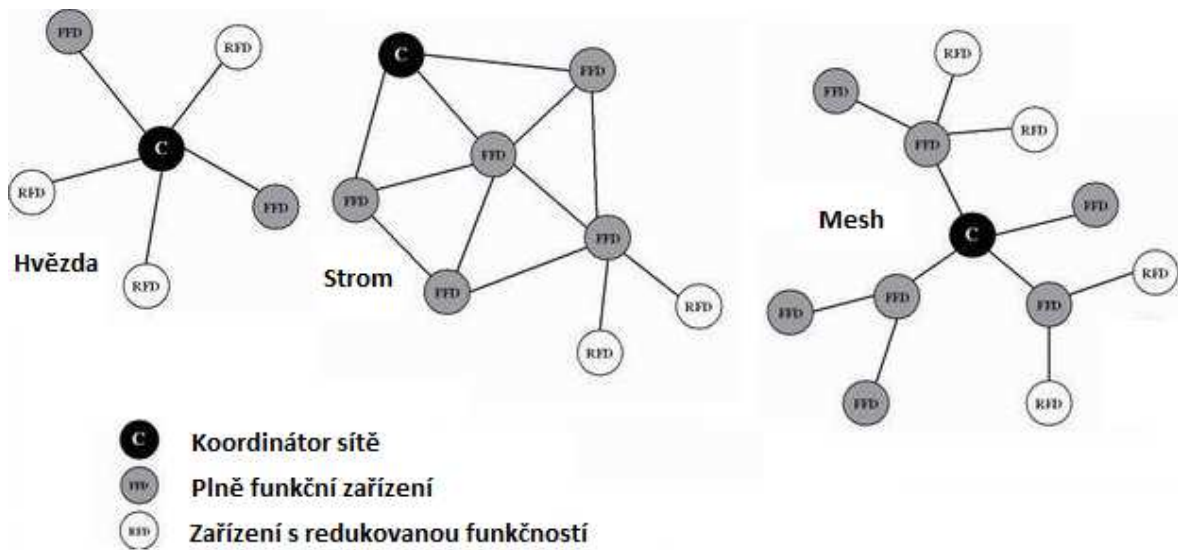
Protokolová vrstva je zčásti definována standardem IEEE 802.15.4 a zčásti přímo ZigBee standardem.

Vzniklo několik ZigBee revizí:

- a) ZigBee 2004
- b) ZigBee 2006
- c) ZigBee PRO
- d) ZigBee

3.3 Topologie sítě

Sítě typu ZigBee mají topologii hvězdy, stromovou strukturu nebo mesh topologii s redundantními spojeními, kde vzdálenosti mezi vysílači bývá do 10m. Tyto sítě patří do kategorie WPAN.



Obrázek 6: Topologie ZigBee

Tuto síť můžou tvořit dva typy zařízení:

- 1) Plně funkční zařízení
- 2) Zařízení s omezenými funkcemi (koncová zařízení)

Plně funkční zařízení může fungovat ve třech režimech:

- 1) PAN koordinátor
- 2) Koordinátor
- 3) Zařízení

Plně funkční zařízení může komunikovat s dalšími plně funkčními zařízeními nebo se zařízeními s omezenými funkcemi. Zařízení s omezenými funkcemi může komunikovat pouze s plně funkčními zařízeními.

Zařízení s omezenými funkcemi se používají na velmi jednoduché aplikace jako je světelný vypínač nebo infračervený senzor. Nemají potřebu odesílat velké objemy dat a můžou být v jeden okamžik připojeny pouze k jednomu plně funkčnímu zařízení.

Ve chvíli, kdy je plně funkční zařízení poprvé aktivováno, může založit svou vlastní síť a stát se tak PAN koordinátorem. Všechny hvězdicové sítě pracují nezávisle na všech dalších právě fungujících hvězdicových sítích. Toho je dosaženo tím, že koordinátor zvolí PAN identifikátor, který právě není používán jinou sítí v dosahu obou sítí. Ve chvíli, kdy je PAN identifikátor zvolen, PAN koordinátor může povolit ostatním zařízením připojit se do své sítě.[17]

3.4 Kmitočtové pásmo

Jsou používána tato tři frekvenční pásma:

- 1) 868 – 868,6 MHz
- 2) 902 – 928 MHz
- 3) 2400 – 2483,5 MHz

První pásmo je používáno v Evropě pro několik málo aplikací včetně bezdrátových spojů na krátké vzdálenosti. Druhé pásmo se používá především v Jižní Americe a třetí pásmo celosvětově, obě pak jsou používána pro průmyslové, vědecké a lékařské účely.

3.5 Zabezpečení

Základním zabezpečením ZigBee je 128bit AES (Advanced Encryption Standard). Pomocí tohoto zabezpečení je také realizována ochrana MAC rámce, beacon rámce a potvrzovacího rámce.

Bezpečnostní klíče jsou tři:

- 1) Síťový klíč (sdílený mezi všemi zařízeními)
- 2) Spojový klíč (unikátní mezi dvěma zařízeními)
- 3) Hlavní klíč (slouží k odvození síťového a spojového klíče)

Klíče jsou zařízením přidělovány několika způsoby:

- 1) Přímé vložení klíče do zařízení
- 2) Odeslání klíče Trust Centrem
- 3) Po navázání spojení s Trust Centrem

Trust Centrum je vždy koordinátorem a má tyto funkce:

- 1) Je úložištěm klíčů sítě
- 2) Používá bezpečnostní služby k nastavení a autorizaci zařízení

Při požadavku na ověření integrity se vytvoří MIC (Message Integrity Code) o délce 4, 8 nebo 16 oktetů a pošle se spolu s MAC rámcem. Pro zajištění důvěrnosti rámce je přidáno pořadí rámce a klíče, díky čemuž je při přijetí možné detekovat špatné číslo rámce a tedy narušení bezpečnosti.[18]

3.6 Zigbee hrozby

Protože je ZigBee technologie určena k ovládní domácností a nemocnic, tj. termostátů a jiných regulačních jednotek, je potřeba brát bezpečnostní rizika vážně. Prolomení bezpečnosti a získání přístupu k těmto jednotkám může mít, například ve zdravotnictví, fatální následky.

Existuje několik hackerských zařízení. Nejrozšířenější z nich se používá k experimentování se zabezpečením ZigBee a nese označení „KillerBee“. Tyto nástroje odposlouchávají vzájemnou komunikaci, odesílají falešné pakety, dekodují pakety a manipulují s nimi.

Mezi tyto nástroje patří například AVR RZ Raven USB stick od firmy Atmel.



Obrázek 7: AVR RZ Raven USB stick

Jedním z jednoduchých útoků je opakovaný útok. Pokud se útočníkovi podaří zachytit paket s klíčem a daty, může tento paket opakovaně odesílat příjemci. Může tak například dávat pokyn ke snížení teploty v místnosti o jeden stupeň Celsia. To vše může opakovat až do doby, než se změní klíč.[19]

Příklady použití technologie ZigBee:

1) Termostat



Obrázek 8: Termostat využívající ZigBee

2) Řídící jednotka Siemens APOGEE



Obrázek 9: Řídící jednotky Siemens

Tyto řídicí jednotky se používají v průmyslu, nebo také v kancelářích, školách, univerzitách a nemocnicích.

3.7 Technické parametry ZigBee

Zde jsou vypsané technické parametry technologie ZigBee:

- Frekvenční rozsah: 2,4 GHz
- Dosah: 10 až 100 m
- Rychlost spoje: 20-250 kb/s
- Praktická rychlost přenosu: 0,26 Mb/s
- Rychlost odezvy: 15 ms
- Rychlost odezvy po probuzení: 15 ms
- Počet vysílacích kanálů: 1/10; 16
- Jmenovitý vysílací výkon: (-25) - 0 dBm
- Modulace: BPSK (+ASK), O-QPSK
- Metoda přenosu: DSSS
- Nejmenší článek sítě: Hvězda
- Rozsáhlejší síť: Stromová struktura, Mesh
- Počet zařízení v síti: > 65000
- Kódování: AES bloková šifra (CTR, counter mode)
- Ověřování: CBC-MAC (rozšíření CCM)
- Ochrana dat: 16-bit CRC
- Spotřeba: 30mW

4 POROVNÁNÍ OBOU TECHNOLOGIÍ

V této části budou porovnány technologie Bluetooth (BLE) a ZigBee. Budou porovnány technické parametry, systémové parametry, protokolová složitost a spotřeba energie.

4.1 Porovnání základních parametrů

Obě technologie využívají volné pásmo 2,4GHz, dosah sítí je v rámci PAN u obou technologií do 100m. Dále mají také obě mechanismus, který zajišťuje vysílání na zatím nepoužité frekvenci, což předchází vzájemnému rušení. Také šifrování a ochrana dat je v obou případech stejná, případně téměř stejná.

Jak je vidět z následující tabulky, rozdíly jsou patrné v rychlosti přenosu dat. ZigBee technologie, která je založena na nižší spotřebě a vyšší výdrži baterie, nemá jako nejdůležitější cíl rychlý přenos. Je tedy trochu pomalejší. Na druhou stranu v celkovém počtu jednotlivých článků jedné sítě, a tím pádem i ve velikosti celkové sítě, má navrch ZigBee. Navíc schopnost vytvářet ZigBee sítě typu mesh je velkou výhodou.

Tabulka 4: Základní porovnání Bluetooth a ZigBee

| Standard | Bluetooth | ZigBee |
|------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| IEEE Specifikace | 802.15.1 | 802.15.4 |
| Frekvenční pásmo | 2,4 GHz | 868/915 MHz ; 2,4 GHz |
| Max. rychlost | 1 Mb/s | 250 kb/s |
| Jmenovitý dosah | 10 - 100 m | 10 - 100 m |
| Jmenovitý Tx výkon | 0 - 10 dBm | (-25) - 0 dBm |
| Počet vysíl. Kanálů | 79 | 1/10 ; 16 |
| Šířka kanálu | 1 MHz | 0,3/0,6 MHz ; 2 MHz |
| Modulace | GFSK | BPSK (+ASK), O-QPSK |
| Mech. výběru frekvence | FHSS | DSSS |
| Koex. mechanismus | Adaptive freq. Hopping | Dynamic freq. selection |
| Nejmenší článek sítě | Pikonet | Hvězda |
| Rozšíření sítě | Scatternet | Strom, Mesh |
| Max. počet článků sítě | 8 | > 65000 |
| Šifrování | EO proudová šifra | AES bloková šifra (CTR, counter mode) |
| Ověřování | Sdílené tajemství | CBC-MAC (rozš. CCM) |
| Ochrana dat | 16-bit CRC | 16-bit CRC |

4.2 Systémové parametry

1) Vysílací čas

Jde o čas, který uplyne před skutečným odesláním dat. Jeho délka je závislá na velikosti zprávy a vzdálenosti mezi odesílatelem a příjemcem.

Tento čas můžeme vypočítat z následující rovnice:

$$T_{tx} = \left(N_{data} + \left(\frac{N_{data}}{N_{maxPld} * N_{ovhd}} \right) \right) * T_{bit} + T_{prop} \quad (1)$$

,kde:

N_{data} je skutečná velikost přenášených dat

N_{maxPld} je maximální velikost přenášených dat

N_{ovhd} je počet bajtů mezi odesílanými pakety (pauza + hlavička paketu)

T_{bit} je doba trvání (platnost) jednoho bitu

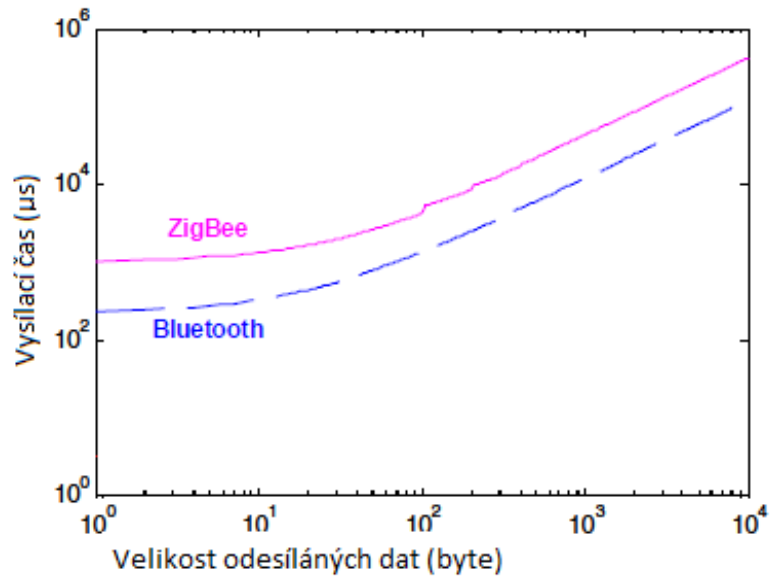
T_{prop} udává čas mezi odesláním a přijetím začátku (nikoliv celku) signálu od odesílatele k příjemci

Typické hodnoty pro Bluetooth a ZigBee jsou v následující tabulce.

Tabulka 5: Systémové parametry Bluetooth a ZigBee

| Standard | Bluetooth | ZigBee |
|--------------------------------|-----------|----------|
| IEEE Spec. | 802.15.1 | 802.15.4 |
| Max. rychlost přenosu [Mbit/s] | 0,72 | 0,25 |
| Tbit [μ s] | 1,39 | 4 |
| Max. NmaxPld [Byte] | 339 (DH5) | 102 |
| Max. Novhd [Byte] | 158/8 | 31 |
| Efektivita kódu [%] | 94,41 | 76,52 |

Po dosazení hodnot z tabulky č. 4 do výše uvedeného vzorce spolu s různými velikostmi přenášených dat, přičemž hodnota T_{prop} se zanedbá (rovna nule), zjistíme, že odesílací čas ZigBee je větší kvůli nižší hodnotě maximální rychlosti přenosu (250 Kbit/s). Dále pak, že potřebný odesílací čas obou technologií je přímo úměrný objemu odesílaných dat a nepřímo úměrný maximální rychlosti přenosu.[20]



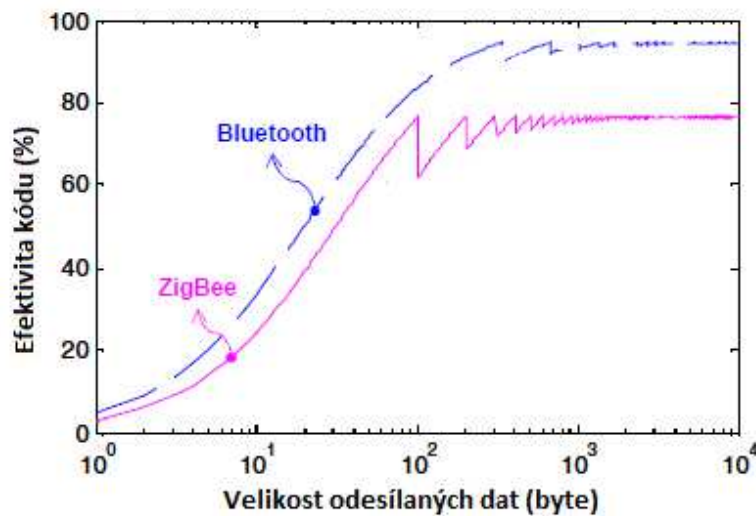
Obrázek 10: Závislost vysílacího času na velikosti odesílaných dat

2) Efektivita kódu

Jde o procentuální poměr mezi objemem odeslaných dat a objemem samotné zprávy. Pro výpočet tohoto poměru slouží tento vzorec:

$$T_{codEff} = \frac{N_{data}}{N_{data} + \frac{N_{data}}{N_{max Pld} * N_{ovhd}}} \quad (2)$$

,kdy pro výpočet se použijí hodnoty z tabulky č. 4.



Obrázek 11: Závislost efektivity kódu na velikosti odesílaných dat

Pokud tedy vezmeme v úvahu praktické využití v průmyslovém prostředí, kdy senzory odesílají velmi malé objemy dat (4B a podobně), je rozdíl efektivity kódu Bluetooth jen o něco málo vyšší než je tomu u ZigBee.[20]

4.3 Složitost protokolů

Pro možné porovnání se počítá počet primitivů a HCI (Host Controller Interface) událostí pro Bluetooth a počet MAC/PHY primitivů u ZigBee, tj. úkonů při odesílání a přijímání dat.

Tabulka 6: Počet primitiv a událostí

| Standard | Bluetooth | Standard | ZigBee |
|---------------|-----------|---------------|----------|
| IEEE Spec. | 802.15.1 | IEEE Spec. | 802.15.4 |
| Primitiva | 151 | MAC primitiva | 35 |
| HCI události | 37 | PHY primitiva | 13 |
| Celkem | 188 | | 48 |

Bluetooth je tedy velmi komplikovaný protokol s celkovým počtem 188 primitiv a událostí celkem. Na druhou stranu ZigBee je velmi jednoduchý a má čtyřikrát méně primitiv. Díky této jednoduchosti je ZigBee ideální pro senzorové sítě kvůli jejich omezené paměti a výpočetnímu výkonu. [20]

4.4 Spotřeba energie

Bluetooth i ZigBee jsou určeny pro přenosná zařízení, krátké vzdálenosti a napájení bateriemi s omezenou kapacitou. Proto tedy tyto technologie nabízí velmi nízkou spotřebu energie.

Pro porovnání spotřeby byly vybrány dva produkty:

- BlueCore2 od Cambridge Silicon Radio (CSR) pro Bluetooth
- CC2430 od Chipcon of Texas Instruments (TI) pro ZigBee

Přestože byly vybrány dva různé výrobky, jejich použití je stejné. Proto mají následující data vypovídající hodnotu.

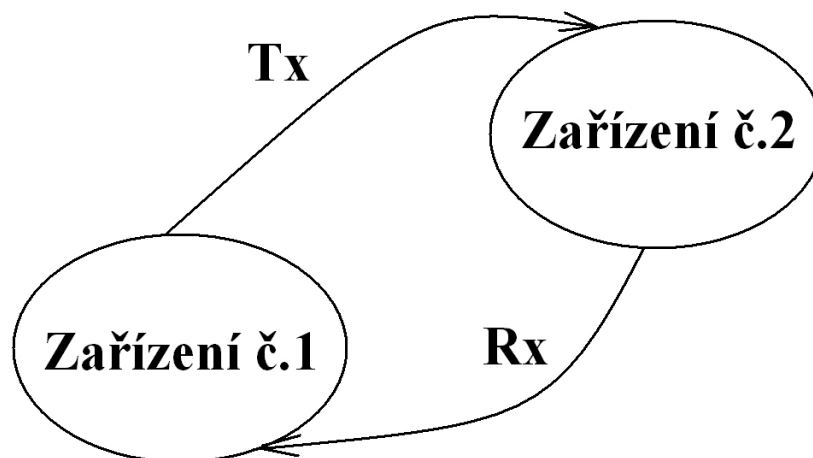
Tabulka 7: Spotřeba proudu

| Standard | Bluetooth | ZigBee |
|-----------------|------------------|---------------|
| Chipset | BlueCore2 | CC2430 |
| VDD [V] | 1,8 | 3,0 |
| TX [mA] | 57,0 | 24,7 |
| RX [mA] | 47 | 27 |
| Bit rate [Mb/s] | 0,72 | 0,25 |

Tabulka 8: Porovnání příkonu modulů

| Standard | Bluetooth | ZigBee |
|----------|------------------|---------------|
| Chipset | BlueCore2 | CC2430 |
| TX [mW] | 102,6 | 74,1 |
| RX [mW] | 84,6 | 81 |

Z hodnot uvedených v tabulce č. 8 je zřejmé, že ZigBee má díky jednoduššímu protokolu (viz kapitola 4.3) nižší spotřebu – přibližně 25% při vysílání a 5% při příjmu.



Obrázek 12: Odesílání a příjem dat

Technologie ZigBee má také tu výhodu, že na data může čekat v režimu spánku s výrazně nižší spotřebou a probudit se až při příjmu dat.

5 VÝVOJOVÝ KIT M68EVB908GB60

Vývojový kit M68EVB908GB60 je vývojová deska pro mikrokontroler - MCU (Microcontroller Unit) M9S08GB60. Tato deska bude použita v praktické části. Výrobce desky je firma Freescale.

Mikropočítač má integrovaný CPU řady HCS08, který má tyto parametry:

- Registry a vnitřní paměť jsou mapovány do jednotného adresového prostoru o velikosti 64kB
- 16 bitový ukazatel zásobníku SP (stack pointer) – může odkazovat na jakékoliv místo v paměti
- 16 bitový indexový registr (H:X)
- 8 bitový akumulátor
- Má sedm adresovacích módů:
 - 1) Implicitní (operandy jsou ukládány do vnitřních registrů)
 - 2) Relativní (8 bit offset udávající pozici další instrukce při skoku)
 - 3) Bezprostřední (operand je v dalším bajtu nebo bajtech)
 - 4) Přímý (operand je v paměti na adrese \$0000 až \$00FF)
 - 5) Rozšířený (operand může být kdekoliv v adresovatelném prostoru)
 - 6) Indexový odvozený od H:X (obsahuje pět sub-módů včetně auto-inkrementace)
 - 7) Indexový odvozený od SP (vylepšená podpora jazyka C)
- Instrukce umožňující zápis z paměti do paměti
- Umožňuje podmíněné skoky při příznaku přetečení, polovičního přetečení, testování zápornosti, nuly a přenosových stavů
- Efektivní instrukce s bity
- Rychlé násobení 8 bitových čísel 8 bitovými čísly a dělení 16 bitových čísel 8 bitovými čísly
- STOP a WAIT instrukce k vyvolání módů se sníženou spotřebou

Parametry kitu:

- M9S08GB60 MCU
 - 60 KB Flash paměti a 4KB RAM paměti
 - 56 vstupů/výstupů (64 pinů)
 - 5 kanálový TPM 2 časovač
 - 3 kanálový TPM 1 časovač
 - 8 kanálový 10 BIT A/D převodník
 - SPI a IIC Seriový port
 - Tlačítkové Wake-Up porty
 - BDM port
 - Generátor hodinových impulzů - PLL
 - Frekvence do 40 MHz
- 32kHz nebo 4MHz Crystal oscilátor a oscilátor hodin
- Regulované +3,3 V a 5 V napájení na desce
- COM1 seriový port - RS232 DB9-S konektor
 - SCI0 seriový port
- COM2 CAN seriový port w/ RS232 DB9-S konektor nebo RS422/485 konektor
 - SCI1 seriový port
- ON/OFF vypínač a LED indikace zapnutí
- Uživatelské komponenty
 - 4 LED diody (PTF0-3)
 - 4 přepínatelné DIP vypínače (PTB4-7)
 - 4 tlačítkové spínače (PTA4-7)
 - 2x16 znakový LCD modul (PTG3-7, PTE6-7)
 - Bzučák (PTD0)

- MCU port konektor poskytuje všechny digitální vstupy/výstupy
- Analogový port konektor poskytuje analogové vstupy nebo PTB výstupy
- Velká 2“x5“ prototypová oblast

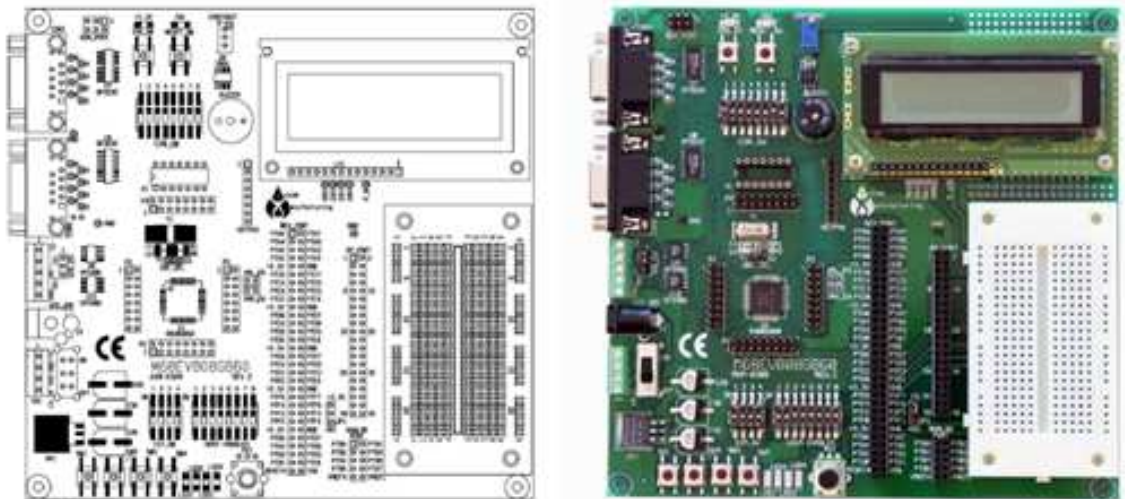
Specifikace:

Velikost desky 152 x 158 cm

Vstupní napětí: +6 až +20V DC (většinou +9V)

Spotřeba: 50mA při 9V

Software pro tento kit funguje pod operačními systémy Windows 95/98/NT/2000/XP/Win7.[6]



Obrázek 13: Vývojový kit M68EVB908GB60

5.1 MCU PORT

Tento port poskytuje přístup k 9S08GB60 vstupním a výstupním portům a napájení.

V této práci bude použit pro připojení ZigBee modulu. Jeho popis je na obrázku č. 14.

| | | | |
|--------------|----|----|--------------|
| PTA6/KBD6 | 1 | 2 | PTA7/KBD7 |
| PTA4/KBD4 | 3 | 4 | PTA5/KBD5 |
| PTA2/KBD2 | 5 | 6 | PTA3/KBD3 |
| PTA0/KBD0 | 7 | 8 | PTA1/KBD1 |
| 3.3V | 9 | 10 | GND |
| PTC6 | 11 | 12 | PTC7 |
| PTC4/CLKOUT | 13 | 14 | PTC5 |
| PTC2/SDA | 15 | 16 | PTC3/SCL |
| PTC0/TXD2 | 17 | 18 | PTC1/RXD2 |
| 3.3V | 19 | 20 | GND |
| PTD6/TPM2CH3 | 21 | 22 | PTD7/TPM2CH4 |
| PTD4/TPM2CH1 | 23 | 24 | PTD5/TPM2CH2 |
| PTD2/TPM1CH2 | 25 | 26 | PTD3/TPM2CH0 |
| PTD0/TPM1CH0 | 27 | 28 | PTD1/TPM1CH1 |
| 3.3V | 29 | 30 | GND |
| PTE6 | 31 | 32 | PTE7 |
| PTE4/MOSI | 33 | 34 | PTE5/SPSCK |
| PTE2/SS* | 35 | 36 | PTE3/MISO |
| PTE0/TXD1 | 37 | 38 | PTE1/RXD1 |
| 3.3V | 39 | 40 | GND |
| PTF6 | 41 | 42 | PTF7 |
| PTF4 | 43 | 44 | PTF5 |
| PTF2 | 45 | 46 | PTF3 |
| PTF0 | 47 | 48 | PTF1 |
| 3.3V | 49 | 50 | GND |
| PTG6 | 51 | 52 | PTG7 |
| PTG4 | 53 | 54 | PTG5 |
| PTG2/EXTAL | 55 | 56 | PTG3 |
| PTG0/BGND/MS | 57 | 58 | PTG1/XTAL |
| RESET* | 59 | 60 | IRQ |

Obrázek 14: MCU port

Vývojový kit má mnoho dalších spínačů, vstupů a výstupů, pro tuto práci ale nebyly použity.

Připojení vývojového kitu k PC a reset kitu

Pro připojení kitu k PC slouží přiložený kabel a sériový port RS 232.

Pokud je potřeba, pro reset kitu stačí zmáčknout spínač RESET_SW umístěný na desce.

6 KOMUNIKAČNÍ MODUL AP13192USLK

Modul AP13192USLK od firmy Freescale patří do rodiny MC13192 vysílačů.

Vysílá na frekvenci 2,4 GHz a lze jej použít pro vytvoření peer-to-peer, stromových, hvězdicových a mesh sítí.



Obrázek 15: Komunikační modul AP13192USLK

6.1 Parametry modulu

Modul má integrovaný krystalový oscilátor, čtyři interní časovače a podporuje paketový mód nebo proudový mód. Další parametry jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Tabulka 9: Parametry modulu

| | |
|--------------------------|-------------------|
| Napájecí napětí | 2,0 - 3,4 V |
| Počet kanálů | 16 (1-15) |
| Rychlost přenosu | 250 kbps |
| Modulace | O-QPSK |
| Nominální vysílací výkon | 0dB |
| Rozsah vys. výkonu | (-28,7) až 3,4dBm |
| Pracovní teplota | (-40) až 85°C |

6.2 Stav modulu

Modul se může nacházet v několika stavech.[7] Díky těmto několika stavům je možné regulovat energetickou spotřebu – více v sekci 6.4.

Jednotlivé stavy modulu:

- 1) Vypnuto - OFF

Stav po resetu. Vše, co bylo v paměti RAM, je ztraceno.

2) Hibernace - HIBERNATE

Oscilátor vypnutý. Neaktivní SPI, čeká se na probuzení. Data jsou udržována.

3) Režim spánku – DOZE nebo ACOMA

Jde o jednodušší hibernaci. Oscilátor zapnutý. Neaktivní SPI, čeká se na probuzení.

ACOMA stav umožňuje ještě nižší energetickou spotřebu, časovače modulu jsou vypnuty.

4) Nečinný - IDLE

Oscilátor zapnutý, aktivní SPI, připraven k příjmu nebo odesílání dat.

5) Příjem - RECIEVE

Oscilátor zapnutý, přijímač je aktivní.

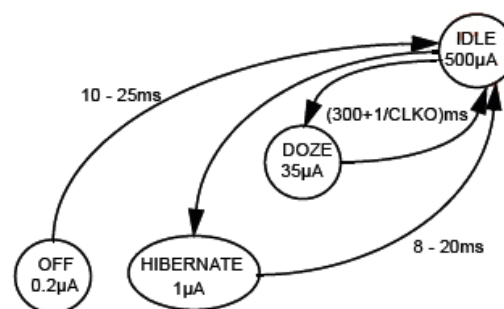
6) Vysílání - TRANSMIT

Oscilátor zapnutý, vysílač je aktivní.

7) Naslouchání - CCA/Energy Detect

Odposlouchává se, co se děje na kanále, přijímač je aktivní.

Modul může do RECIEVE, CCA a TRANSMIT stavu přejít vždy pouze ze stavu IDLE.



Obrázek 16: Změna stavů modulu

6.3 Vysílací výkon

Vysílací výkon je možné regulovat v rozsahu -28,7 dBm až 3,4 dBm a tím také regulovat spotřebu v rozsahu 20,9 mA až 35,0 mA při vysílání.

Defaultně je nastavena hodnota -0,66 dBm se spotřebou 28,8 mA.

6.4 Vysílací kanály

Modul umožňuje vysílat ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz na 16 frekvencích. Frekvence jsou dle IEEE 802.15.4, viz tabulka č. 10.

Tabulka 10: Vysílací kanály a frekvence

| Číslo kanálu | Číslo kanálu (podle 802.15.4) | Frekvence [MHz] |
|--------------|----------------------------------|--------------------|
| 1 | 11 | 2405 |
| 2 | 12 | 2410 |
| 3 | 13 | 2415 |
| 4 | 14 | 2420 |
| 5 | 15 | 2425 |
| 6 | 16 | 2430 |
| 7 | 17 | 2435 |
| 8 | 18 | 2440 |
| 9 | 19 | 2445 |
| 10 | 20 | 2450 |
| 11 | 21 | 2455 |
| 12 | 22 | 2460 |
| 13 | 23 | 2465 |
| 14 | 24 | 2470 |
| 15 | 25 | 2475 |
| 16 | 26 | 2480 |

6.5 Spotřeba

Spotřeba modulu se liší podle stavu, ve kterém se nachází – viz tabulka č. 11.

Tabulka 11: Spotřeba modulu dle stavu

| Stav | Spotřeba proudu |
|---------------------|-----------------|
| Nečinný, zapnutý | 500 μ A |
| Režim spánku | 35 μ A |
| Hibernace | 1 μ A |
| Vypnutý | < 1 μ A |

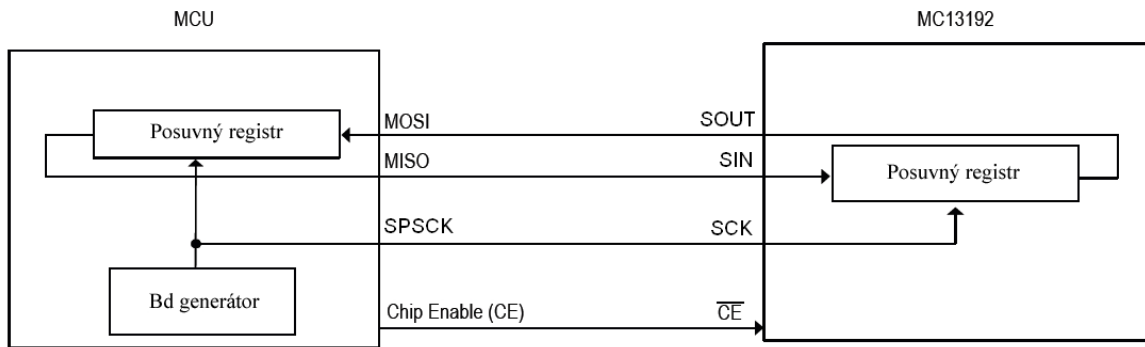
Spotřeba při odesílání a přijímání dat je uvedena v následující tabulce.

Tabulka 12: Spotřeba modulu dle činnosti

| Stav | Spotřeba proudu |
|--------------------------|-----------------|
| Nečinný | 500 μ A |
| Odesílání dat (při 0dBm) | 30 mA |
| Příjem dat (Rx) | 37 mA |

6.6 Propojení modulu s MCU

Aby modul byl schopen provozu, je potřeba jej použít v kombinaci s mikrokontrolerem (MCU). Způsob komunikace je uveden na obrázku č. 17.



Obrázek 17: Zjednodušené propojení modulu s MCU

Způsob pinového propojení se může lišit podle typu použitého vývojového kitu.

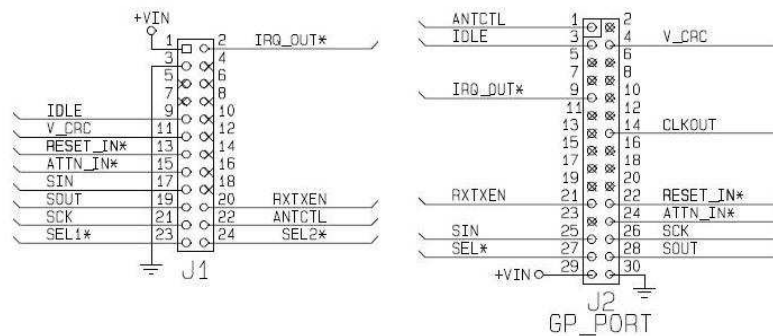
Způsoby propojení jsou uvedeny v dokumentu [21], včetně fotodokumentace pro tyto kity:

- 1) APS08QG8SLK
- 2) APS12D
- 3) APS12C32

Další návody jsou uvedeny v dokumentech [21] a [22], a to již bez fotodokumentace, přičemž je uvedeno pouze přiřazení pinů modulu k MCU portu.

Jak propojit kit modul s kitem M68EVB908GB60 není uvedeno.

Výrobce vyrábí modul AP13192USLK se dvěma typy konektorů - J1 a J2(GP) – viz obrázek č. 18.



Obrázek 18: Konektory modulu

V této práci je použit modul s konektorem J1.

Popis signálů na konektoru J1:

1) +VIN

Napájecí napětí, v rozmezí 2,0V až 3,4V.

2) IRQ_OUT*

Přerušení. Je vyvoláno vnitřními stavy modulu nebo přijetím dat.

3) GND

Pin kostry.

4) IDLE

Stavový signál. Aktivní pokud modul přechází z IDLE stavu.

5) V_CRC

Slouží pro kontrolu CRC.

6) RESET_IN*

Resetovací signál. Po resetu přejde modul do IDLE stavu do 25ms.

7) ATTN_IN*

Probouzí modul z hibernace nebo DOZE stavu.

8) SIN

Datový signál z MCU do modulu.

9) SOUT

Datový signál z modulu do MCU.

10) RXTXEN

Povoluje příjem, vysílání dat a vnitřní operace modulu.

11) SCK

Signál řídící SPI hodiny modulu.

12) ANTCTL

Signál sloužící k indikaci zkreslení signálů.

13) SEL1*

Použit jako Chip Enable signál. Řídí SPI komunikaci. Aby byl tento signál aktivní, musí být na desce modulu u konektoru JP1 propojeny piny 1 a 2.

14) SEL2*

Použit jako Chip Enable signál. Řídí SPI komunikaci. Aby byl tento signál aktivní, musí být na desce modulu u konektoru JP1 propojeny piny 2 a 3.

6.7 Tvar paketu modulu AP13192USLK

Paket může mít maximální délku 133 bajtů a skládá se z pěti částí:

1) Preamble

Obsahuje úvodní data, která definují strukturu paketu.

2) SFD

Odděluje preambuli od datového rámce.

3) FLI

Indikuje délku následujícího datového rámce.

4) Data

Prostor pro data. Může obsahovat maximálně 125 bajtů.

5) FCS

Kontrolní součet rámce.[7]

| | | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|------------------|
| Preamble (4 bajty) | SFD (1 bajt) | FLI (1 bajt) | Data (1 až 125 bajtů) | FCS (2 bajty) |
|-----------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|------------------|

Obrázek 19: Tvar paketu modulu AP13192USLK

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 PROPOJENÍ AP13192USLK S M68EVB908GB60

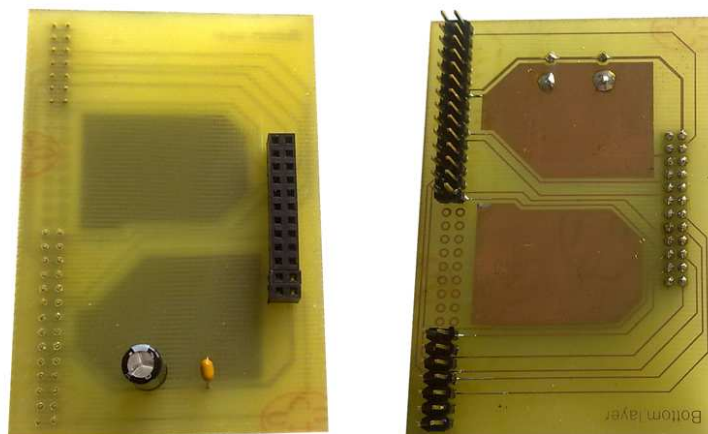
Aby modul mohl s MCU jednotkou komunikovat, bylo potřeba správně zapojit pinové konektory modulu do MCU portu vývojového kitu. Toho bylo dosaženo navržením redukce - plošného spoje v programu Eagle 6.0.0 s ohledem na výběr nekonfliktních vstupů MCU portu, přičemž základ je uveden v dokumentu [21]. Na redukci jsou umístěny také dva kondenzátory, které zabraňují možným oscilacím napájecího obvodu modulu.

Výsledné propojení je uvedeno v tabulce č. 13.

Tabulka 13: Propojení modulu a MCU

| Modul | pin | MCU | pin |
|---------------|-----|------------|-----|
| VIN | 1 | + 3V3 | 49 |
| IRQ_OUT | 2 | IRQ | 60 |
| GROUND | 3 | GND | 50 |
| IDLE | 9 | PTF5 | 44 |
| V_CRC (GPIO2) | 11 | PTF4 | 43 |
| RESET_IN | 13 | PTA3/KBD3 | 6 |
| ATTN_IN | 15 | PTA1/KBD1 | 8 |
| SIN | 17 | PTE4/MOSI | 33 |
| SOUT | 19 | PTE3/MISO | 36 |
| RXTXEN | 20 | PTC7 | 12 |
| SCK | 21 | PTE5/SPSCK | 34 |
| ANTCTL | 22 | PTC5 | 14 |
| SEL1 | 23 | PTE2/SS* | 35 |

Popis vstupů a výstupů uvedených v tabulce č. 13 je uveden v kapitole 6.6.

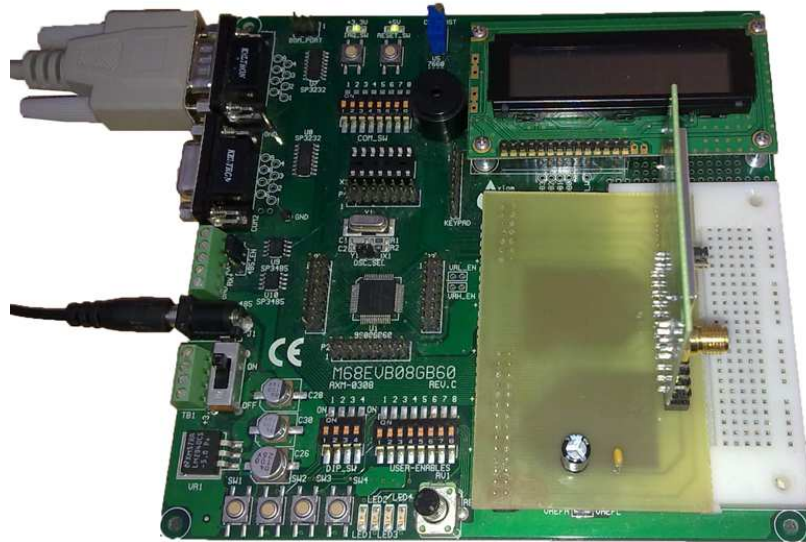


Obrázek 20: Plošný spoj - redukce

Schéma plošného spoje a osazovací plánec je součástí přílohy P III.

Zapojení modulu přes redukci do kitu je zobrazeno na obrázku č. 21.

Vždy je nutné dodržet správné zapojení modulu a redukce – viz obrázek č. 21.



Obrázek 21: Vývojový kit s redukcí a ZigBee modulem

Po zapnutí vývojového kitu se na modulu rozsvítí LED dioda.

8 VYTVOŘENÍ PROGRAMOVÉ KNIHOVNY

Základem programové knihovny je projekt SMAC ve verzi 4.1C, který je dostupný na internetových stránkách Freescale. Tento SMAC projekt obsahuje funkce, které poskytují obsluhu fyzické a MAC vrstvy komunikačního modulu. SMAC je do programové knihovny začleněn formou „lib“ souboru - knihovny.

Nad touto knihovnou je vytvořena programová knihovna, která umožňuje uživateli jednoduše měnit nastavení modulu, přijímat a odesílat data.

8.1 SMAC knihovna

Knihovna obsahuje funkce pro fyzickou vrstvu a MAC vrstvu.

Mimo obsluhy modulu obsahuje také:

- 1) Inicializační funkce MCU a GPIO
- 2) Funkce pro výběr zdroje impulzů (MCU clock a externí)
- 3) Definice registrů v paměti pro modul a MCU
- 4) Definice propojení vstupů a výstupů modulu s MCU portem

8.1.1 Funkce fyzické vrstvy

Tyto funkce slouží pro obsluhu modulu na základní fyzické úrovni.

Jednotlivé funkce:

- unsigned char PLMEPhyReset(void)
Nastaví defaultní hodnoty pro fyzickou vrstvu. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PDDataRequest(tTxPacket *psPacket)
Připraví předaný paket k odeslání a snaží se jej odeslat. Vrací hodnotu "SUCCESS" pokud byl modul v IDLE stavu nebo informuje, že není v IDLE stavu.
- void PDDataIndication(void)
Přečte validní přijatý paket, a předá jej funkci MCPSPDataIndication, která je umístěna v MAC vrstvě.

- unsigned char PLMEHibernateRequest(void)
Uvede komunikační modul do stavu hibernace. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMEDozeRequest(unsigned long u32Timeout)
Uvede komunikační modul do režimu spánku DOZE na dobu, která je dána hodnotou parametru, který byl předán této funkci. Pokud je hodnota rovna nule, převede modul do stavu ACOMA. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMEWakeRequest(void)
Probudí modul z režimu spánku nebo hibernace a uvede jej do IDLE stavu. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMESetChannelRequest(unsigned char u8Channel)
Nastaví hodnotu kanálu dle hodnoty předané této funkci. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMESetTrxStateRequest(unsigned char u8ReqMode)
Uvede modul do požadovaného stavu, který je předán jako parametr této funkce. Pokud předaný parametr odpovídá stavům definovaným uvnitř této funkce (IDLE,RX a TX stavy), vrací hodnotu "SUCCESS", pokud je předaná hodnota jiná, vrací hodnotu "ERROR".
- unsigned char PLMEEnergyDetect(void)
Uvede modul do režimu CCA a měří výkon na kanále přijetím jakéhokoliv paketu. Vrací hodnotu, kterou je pro získání skutečného výkonu potřeba vydělit dvěma a převést do záporných hodnot. Získaný výkon je udáván v dBm.
- unsigned char PLMELinkQuality(void)
Funkce provádí to co předchozí funkce, pouze s tím rozdílem, že neuvede modul do CCA režimu a nečeká na přijetí jakéhokoliv paketu. Tato funkce by měla být volána vždy až poté, co byl přijat paket určený této stanici. Tímto je určena kvalita přenosu mezi tímto modulem a odesilatelem.

- unsigned long PLMEGetTimeRequest(void)
Vrací aktuální hodnotu času modulu.
- unsigned char PLMSetMC13192ClockRate(unsigned char u8Freq)
Nastaví frekvenci hodin modulu dle hodnoty předané této funkci. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMSetMC13192TmrPrescale(unsigned char freq)
Nastaví frekvenci časovače modulu dle hodnoty předané této funkci. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- void PLMSetTimeRequest(unsigned long u32RequestedTime)
Nastaví hodnotu časovače modulu dle hodnoty předané této funkci.
- unsigned char PLMEnableMC13192Timer1(unsigned long u32CounterValue)
Nastaví hodnotu časovače modulu dle hodnoty předané této funkci a spustí časovač. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMDisableMC13192Timer1(void)
Zastaví časovač modulu. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- void PLMEMC13192ResetIndication(void)
Indikuje resetování modulu přes vstup RESET_IN a zavolá funkci PLMEMC13192ResetIndication, která je umístěna v MAC vrstvě.
- unsigned char PLMEMC13192SoftReset(void)
Resetuje modul. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMEMC13192XtalAdjust(unsigned char u8TrimValue)
Upravuje hodnotu oscilátoru dle hodnoty předané této funkci. Tímto je možné snížit frekvenci oscilátoru až o 830Hz. Vrací hodnotu "SUCCESS".
- unsigned char PLMEMC13192FEGainAdjust(unsigned char i8GainValue)
Upraví citlivost antény dle hodnoty předané této funkci. Vrací hodnotu "SUCCESS".

- unsigned char PLMEMC13192PAOutputAdjust(unsigned char u8RequestedPAValue)

Nastaví vysílací výkon dle hodnoty předané této funkci. Vrací hodnotu "SUCCESS".

- unsigned char PLMEGetRficVersion(void)

Vrací verzi integrovaného obvodu modulu.

- void PLMELoadPRBS9 (tTxPacket *psPacket)

Připraví RAM paměť modulu a zapíše do ní paket předaný této funkci.

Následující funkce jsou používány uvnitř výše uvedených funkcí a slouží k čtení/zápisu modemových registrů, inicializaci, čtení stavů a řízení modulu.

Jednotlivé funkce:

- void MC13192Init(void)

Inicializuje registry modulu a uvede modul do IDLE stavu.

- void MC13192Wake (void)

Nastaví signál ATTN_IN na hodnotu 1, čímž vyvolá přerušení IRQIsr a probudí modul z režimu spánku, stavu ACOMA nebo hibernace.

- void MC13192DisableInterrupts(void)

Zakáže přerušení od modulu.

- void MC13192RestoreInterrupts(void)

Povolí přerušení od modulu.

- void interrupt IRQIsr(void)

Přerušovací rutina, která je vyvolána na základě změny stavu modulu. Funkce zjistí zdroj přerušení a zajistí následující postup. Například při vyvolání přerušení přijetím dat tato data zkontroluje a zavolá funkci PDDataIndication.

- void RTXENDeAssert(void)

Nastaví signál RXTXEN na hodnotu 0, čímž uvede modul do stavu IDLE.

- void RTXENAssert(void)
Nastaví signál RXTXEN na hodnotu 1 a umožní tak příjem nebo odeslání dat.
- void SPIDrvWrite(unsigned char u8Addr, unsigned int u16Content)
Na adresu SPI (první předaný parametr) odešle hodnotu, která je předána jako druhý parametr této funkci. Slouží k nastavení vnitřních registrů modulu. Slouží k zápisu do vnitřních registrů modulu.
- unsigned int SPIDrvRead(unsigned char u8Addr)
Přečte dva bajty dat z adresy předané této funkci. Slouží ke čtení vnitřních registrů modulu. Vrací přečtená data.
- unsigned int SPIDrvRead2(unsigned char u8Addr)
Přečte dvakrát dva bajty dat z adresy předané této funkci. Slouží pro detekci vadných paketů. Vrací přečtená data.
- void RAMDrvWriteTx(tTxPacket *psTxPkt)
Zapíše blok dat (paket) předaný této funkci do vysílací RAM paměti.
- unsigned char RAMDrvReadRx(tRxPacket *psRxPkt)
Přečte blok dat (paket) z RAM paměti modulu určené pro příjem a uloží jej do paketu, který byl předán této funkci. Pokud je délka paketu větší, než je povoleno, vrací hodnotu "OVERFLOW", jinak vrací hodnotu "SUCCESS".

8.1.2 Funkce MAC vrstvy

Tyto funkce jsou o řád vyšší než funkce fyzické vrstvy. Využívají funkcí fyzické vrstvy, přičemž pouze předávají a kontrolují jejich výsledky formou statusů.

Jednotlivé funkce:

- unsigned char MCPSDataRequest(tTxPacket *psTxPacket)
Odešle předaný paket. Vrací status "SUCCESS" po odeslání nebo "RX_ON", pokud stav modulu odeslání právě neumožňuje.

- unsigned char MLMEHibernateRequest(void)
Uvede modul do stavu hibernace. Vrací status “SUCCESS“.
- unsigned char MLMEDOzeRequest(UINT32 u32Timeout)
Uvede modul do stavu DOZE na dobu, která je dána hodnotou parametru předaného této funkci. Pokud byla předána funkci hodnota 0, uvede modul do stavu ACOMA. Vrací status “SUCCESS“.
- unsigned char MLMEWakeRequest(void)
Probudí modul z režimu spánku nebo hibernace a uvede jej do IDLE stavu. Vrací status “SUCCESS“ pokud byl modul probuzen nebo status “ERROR“, pokud modul není v žádném z režimů snížené spotřeby a není potřeba jej probouzet.
- unsigned char MLMESetChannelRequest(unsigned char u8Channel)
Nastaví hodnotu kanálu dle hodnoty předané této funkci. Vrací status “SUCCESS“.
- unsigned char MLMERXEnableRequest(tRxPacket *psRxPacket, unsigned long u32Timeout)
Uvede modul do RECIEVER stavu a spustí časovač modulu na dobu, která je dána hodnotou předanou této funkci. Pokud je předaná hodnota 0, časovač se nespustí. Po danou dobu se čeká na přijetí paketu. Vrací status „SUCCESS“.
- unsigned char MLMERXDisableRequest(void)
Zastaví časovač modulu a pokusí se o uvedení modulu do IDLE stavu. Vrací status “SUCCESS“ nebo “ERROR“, pokud se nepodařilo uvést modul do stavu IDLE.
- unsigned char MLMESetMC13192ClockRate(unsigned char u8Freq)
Nastaví frekvenci hodin modulu dle hodnoty předané této funkci. Vrací status “SUCCESS“.

- unsigned char MLMESetMC13192TmrPrescale (unsigned char u8Freq)
Nastaví frekvenci časovače modulu dle hodnoty předané této funkci. Vrací status "SUCCESS".
- unsigned char MLMEEnergyDetect(void)
Uvede modul do režimu CCA a měří výkon na kanále přijetím jakéhokoliv paketu. Vrací hodnotu, kterou je pro získání skutečného výkonu potřeba vydělit dvěma a převést do záporných hodnot. Získaný výkon je udáván v dBm.
- unsigned char MLMELinkQuality(void)
Funkce provádí to co předchozí funkce, pouze s tím rozdílem, že neuvede modul do CCA režimu a nečeká na přijetí jakéhokoliv paketu. Tato funkce by měla být volána vždy až poté, co byl přijat paket určený této stanici. Tímto je určena kvalita přenosu mezi tímto modulem a odesilatelem.
- unsigned char MLMEMC13192SoftReset(void)
Resetuje modul. Vrací status "SUCCESS".
- unsigned char MLMEMC13192XtalAdjust(unsigned char u8ReqValue)
Upravuje hodnotu oscilátoru dle hodnoty předané této funkci. Tímto je možné snížit frekvenci oscilátoru až o 830Hz. Vrací status "SUCCESS".
- unsigned char MLMEMC13192FEGainAdjust(unsigned char u8GainValue)
Nastaví senzitivitu antény při příjmu dle hodnoty předané této funkci. Vrací status "SUCCESS".
- unsigned char MLMEMC13192PAOutputAdjust(unsigned char u8PaValue)
Nastaví vysílací výkon dle hodnoty předané této funkci. Vrací stav "SUCCESS".
- unsigned char MLMEGetRficVersion(void)
Vrací verzi integrovaného obvodu modulu.

- void MLMETestMode (tTxPacket *psPacket, unsigned char u8mode)

Testovací funkce. Umožňuje jednoduché testování modulu. Je možné testovat příjem a odesílání dat.

8.1.3 Inicializační funkce pro MCU port

Tyto funkce přivedou MCU jednotku do stavu, ve kterém je poté schopna komunikovat s modulem.

Jednotlivé funkce:

- GPIOInit

Provede inicializaci GPIO registrů. Způsob nastavení je uveden v tabulce č. 14.

Tabulka 14: Nastavení univerzálních vstupů a výstupů

| Modul | MCU | Hodnota |
|----------------------|--------------|---------|
| MC13192_RESET_PULLUP | PTAPE_PTAPE3 | 0 |
| MC13192_CE | PTED_PTED2 | 1 |
| MC13192_ATTEN | PTAD_PTAD1 | 1 |
| MC13192_RTXEN | PTCD_PTCD7 | 0 |
| MC13192_RESET | PTAD_PTAD3 | 0 |
| MC13192_CE_PORT | PTEDD_PTEDD2 | 1 |
| MC13192_ATTEN_PORT | PTADD_PTADD1 | 1 |
| MC13192_RTXEN_PORT | PTCDD_PTCDD7 | 1 |
| MC13192_RESET_PORT | PTADD_PTADD3 | 1 |
| MC13192_CE | PTED_PTED2 | 1 |
| MC13192_ATTEN | PTAD_PTAD1 | 1 |
| MC13192_RTXEN | PTCD_PTCD7 | 0 |
| MC13192_RESET | PTAD_PTAD3 | 0 |

- SPIInit

Inicializace sériového periferního rozhraní:

Registr SPIIC1:

- SPI přerušení je zakázáno
- SPI systém je povolen
- Přerušení při prázdném bufferu je zakázáno

- SPI je nastaveno jako „Master“ rozhraní
- Časovač SPI počítá směrem k nule
- Náběžná hrana v SPSCK registru nastává uprostřed prvního cyklu přenosu
- SS1 pin MCU portu je nastaven jako univerzální vstup/výstup
- Sériově odesílaná data začínají nejvyšším bitem

Registr SPI1C2:

- SS1 pin MCU portu je povolen jako univerzální vstup/výstup
- SPI datový pin je nastaven jako vstup
- SPI časovač se nezastaví, když MCU přejde do čekacího módu
- SPI datový pin je rozdělen na vstup a výstup (MISO a MOSI)

Registr SPI1BR:

- Dělitele mají nulové hodnoty, rychlost přenosu je dána rychlostí sběrnice.

- MCUInit

Hlavní inicializace MCU. Obsahuje volání funkce GPIOInit a SPIInit.

8.1.4 Zdroje hodinového kmitočtu

Je možné zvolit ze dvou zdrojů hodinového kmitočtu:

- a) Interní zdroj - oscilátor na kitu
- b) Externí zdroj - oscilátor na modulu

8.1.5 Definice propojení modulu s MCU

V projektu bylo hardwarové propojení softwarově ošetřeno dle tabulky č. 15.

Tabulka 15: Softwarové přiřazení vstupů a výstupů

| Modul | MCU |
|--------------|--------------|
| CE | PTED_PTED2 |
| CE_PORT | PTEDD_PTEDD2 |
| ATTN | PTAD_PTAD1 |
| ATTN_PORT | PTADD_PTADD1 |
| RTXEN | PTCD_PTCD7 |
| RTXEN_PORT | PTCDD_PTCDD7 |
| RESET | PTAD_PTAD3 |
| RESET_PORT | PTADD_PTADD3 |
| RESET_PULLUP | PTAPE_PTAPE3 |
| IRQ_SOURCE | IRQSC |
| IRQ_IE_BIT | IRQSC_IRQIE |

Tyto definice jsou uvedeny v souboru „port_config_GB60EVB.h“ v příloženém SMAC projektu, viz příloha P I.

8.2 Programová knihovna

Programová knihovna umožňuje měnit vysílací frekvenci, vysílací výkon, přijímat a odesílat data.

Po každém přijetí nebo odeslání dat je také možné získat počet odeslaných nebo přijatých CRC varování. Tato varování jsou odeslána, pokud při čekání na data byl přijat paket, jehož CRC součet nesouhlasí, a naopak přijata, pokud při čekání na potvrzení přijetí příjemcem byl přijat paket indikující, že k příjemci dorazila poškozená data.

Knihovna má také funkci pro nastavení vlastního interního hodinového generátoru o frekvenci 20MHz. Není tedy nutné mít vývojový kit neustále připojený ke COM portu počítače z důvodu odlišné hodinové frekvence při startu programu z debuggeru. Je tedy možné jednoduše a rychle testovat, na jaké vzdálenosti jsou moduly schopny spolu komunikovat.

Maximálně je možné odeslat nebo přijmout 125 bajtů, z toho 118 bajtů je uživatelských a 7 bajtů servisních (adresace, délka dat, ukazatel na začátek dat, CRC, celková délka).

Součástí programové knihovny je také:

- 1) Adresace modulů
- 2) Informování odesilatele o přijetí paketu příjemcem
- 3) Opakování přenosu paketu, pokud odesílatel neobdrží potvrzení přijetí příjemcem
- 4) Kontrola přijatých dat CRC součtem (8bit CRC - CCITT)
- 5) Opakování přenosu paketu pokud CRC nesouhlasí
- 6) Řešení možné kolize (více odesílatelů a jeden příjemce)

Knihovna obsahuje tyto funkce:

- 1) Init_ZigBee
- 2) Send_Data
- 3) Read_Data
- 4) Get_CRC_Errors
- 5) Get_CRC_Warnings
- 6) Init_Clock_Generator

Tyto funkce jsou podrobně popsány v dalších podkapitolách.

8.2.1 Funkce Init_ZigBee

Tato funkce inicializuje ZigBee modul.

Prototyp funkce:

```
unsigned char Init_ZigBee(unsigned char c_kanal, unsigned char Nr_teto_stanice,  
unsigned char vys_vykon)
```

Funkci jsou předány tři parametry:

- 1) Číslo kanálu (1 až 15)
- 2) Číslo modulu (1 až 255)
- 3) Vysílací výkon (0 až 15)

Vysílací výkon lze nastavit dle následující tabulky.

Tabulka 16: Nastavení zesílení na výstupu

| Hodnota | Vysílací výkon [dBm] | Spotřeba proudu [mA] |
|---------|----------------------|----------------------|
| 0 | -16,2 | 25,0 |
| 1 | -15,9 | 25,1 |
| 2 | -15,3 | 25,1 |
| 3 | -14,8 | 25,1 |
| 4 | -8,5 | 25,9 |
| 5 | -7,6 | 26,0 |
| 6 | -7,2 | 26,1 |
| 7 | -7,0 | 26,2 |
| 8 | -1,7 | 28,0 |
| 9 | -1,6 | 28,3 |
| 10 | -0,8 | 28,6 |
| 11 | -0,7 | 28,8 |
| 12 | 0,6 | 30,6 |
| 13 | 1,2 | 31,9 |
| 14 | 1,2 | 34,9 |
| 15 | 1,4 | 35,3 |

Funkce nejdříve inicializuje MCU a vnitřní registry modulu. Teprve poté je nastavena frekvence modulu (defaultně 16 MHz), vysílací výkon a kanál.

Funkce vrací hodnotu 0, pokud nebyly dodrženy povolené rozsahy hodnot jednotlivých parametrů. Pokud byly dodrženy, vrací hodnotu 1, přičemž parametry jsou uloženy a modul je připraven na odeslání nebo přijetí paketů.

8.2.2 Funkce Send_Data

Funkce odesílá z předaného bufferu několik bajtů, jejichž počet je dán hodnotou druhého předaného parametru, a to modulu, jehož číslo bylo předáno třetím parametrem.

Prototyp funkce:

```
unsigned char Send_Data(unsigned char *data, unsigned char Qtiny_Tx_B, unsigned char
prijemce)
```

Funkci jsou předány tři parametry:

- 1) Data (ukazatel na datový typ char)
- 2) Počet bajtů, které se mají odeslat (1 až 118)

Pokud je hodnota tohoto parametru větší, než je počet bajtů alokovaných bufferem (první parametr), odešlou se i data, která jsou v paměti za alokovaným prostorem. Tento stav nelze nijak ošetřit, proto jej uživatel musí mít na paměti a s tímto při předávání tohoto parametru počítat.

- 3) Číslo modulu příjemce (1 až 255)

Pokud je zadáno číslo příjemce stejné, jako je číslo vašeho modulu, vrátí funkce hodnotu 0.

Pokud nejsou dodrženy povolené rozsahy parametrů, vrací funkce hodnotu 0.

V opačném případě jsou do bufferu přidána servisní data (viz obrázek č. 22), vypočten CRC součet a také přidán do bufferu (viz obrázek č. 23).

| | | | |
|----------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Příjemce (1 bajt) | Odesílatel (1 bajt) | Délka dat. části (1 bajt) | Datová část (1 až 121 bajtů) |
|----------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|

Obrázek 22: Obsah bufferu před výpočtem CRC součtu

Pro výpočet CRC součtu je použit kontrolní součet CRC8 – CCITT.

| | | | | |
|----------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Příjemce (1 bajt) | Odesílatel (1 bajt) | Délka dat. části (1 bajt) | Datová část (1 až 121 bajtů) | CRC (1 bajt) |
|----------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|

Obrázek 23: Obsah bufferu po výpočtu CRC součtu

Poté je volána funkce `ext_main`.

Funkce vrací hodnotu 1, pokud bylo přijetí dat potvrzeno příjemcem, nebo vrací hodnotu 2, pokud příjemce přijetí dat nepotvrdil.

8.2.2.1 Funkce `ext_main` (Odesílání dat)

Funkce vloží `TxDatBuffer` do paketu, odešle jej a čeká na potvrzení přijetí od příjemce.

Prototyp funkce:

```
unsigned char ext_main(unsigned char *TxBuffer, unsigned char BytesInTxBuffer,
unsigned char *NrOfNACKresponses, unsigned char *RxBuffer, unsigned char
*BytesInRxBuffer, unsigned char *NrOfSentNACKs)
```

Funkci je předáno 6 parametrů:

- 1) Ukazatel na buffer, který se má odeslat (dále jen `TxDatBuffer`)
- 2) Počet bajtů, které se mají z bufferu `TxDatBuffer` odeslat
- 3) Ukazatel na buffer, do kterého se bude zapisovat počet přijatých varování, kterými příjemce informuje o přijetí vadných dat (dále jen `NACK_Rx_Qtity_Buffer`)
- 4) NULL - parametr použit při přijímání dat
- 5) NULL - parametr použit při přijímání dat
- 6) NULL - parametr použit při přijímání dat

Modul se nachází v IDLE stavu, ze kterého je možné jej převést do RECIEVE nebo TRANSMIT stavu. V tomto případě je modul převeden do TRANSMIT stavu, protože druhý parametr je větší než hodnota 0, což indikuje, že `TxDatBuffer` byl naplněn.

`TxDatBuffer` je poté načten do paketového bufferu (dále jen `TxBufferu`) a konec řetězce je ukončen znakem „/0“, který indikuje konec řetězce. Tímto je datový rámeček paketu připraven a je naplněna také FLI hodnota paketu, tedy délka datového rámce.

Následuje kontrola modulu (porovnává se výsledek funkce `MLMERXDisableRequest`), zda se ještě nenachází v RECIEVE stavu. To se může stát po velmi rychlém návratu z TIMEOUT stavu, ve kterém modul čeká na potvrzení přijetí příjemcem. Pokud je modul stále v RECIEVE stavu, čeká se na jeho návrat do IDLE.

Funkci `MCPSDataRequest` je předán celý paket a čeká se na potvrzení odeslání. Pokud byla data odeslána, čeká se na potvrzení přijetí paketu příjemcem.

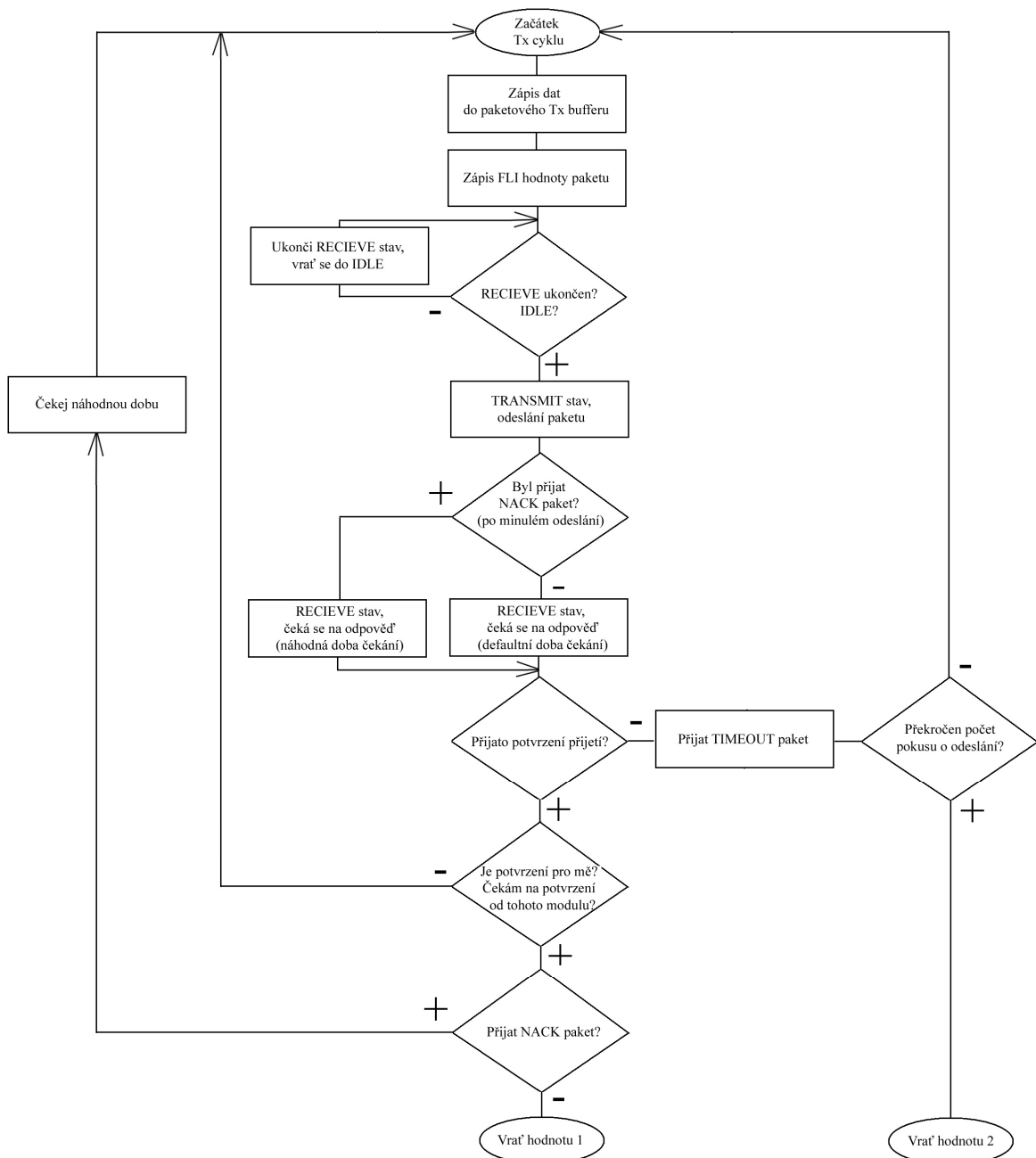
Paket odezvy (potvrzení přijetí) může mít několik podob:

- 1) [ACK][Odesilatel][Příjemce] (dále jen ACK paket)

- 2) Bez odezvy (dále jen TIMEOUT paket)
- 3) NACK[Příjemce] (dále jen NACK paket)

Jestliže odesílatel nezískal žádnou odezvu od příjemce, jsou data automaticky přeoslána, maximálně však čtyřikrát.

Princip funkce ext_main při odesílání dat znázorňuje zjednodušený vývojový diagram – viz obrázek č. 21.



Obrázek 24: Zjednodušený vývojový diagram pro odesílací cyklus

Defaultně se čeká na přijetí ACK paketu – tj. pokud je paket přijat příjemcem a data jsou v pořádku. Pokud paket k příjemci nedorazí nebo jej příjemce nepřevzme, odesílatel reaguje na TIMEOUT paket, který je generován odesílatelem. Pokud data k příjemci dorazí poškozená, například z důvodu rušení nebo kolize (CRC součet nesouhlasí), odešle příjemce zpět NACK paket.

Proto, aby odesílatel byl schopen přijmout potvrzení, je volána funkce `MLMERXEnableRequest`, která na dobu, jež je dána hodnotou předaného parametru, uvede modul do `RECIEVE` stavu a čeká pouze na ACK, NACK nebo TIMEOUT paket.

Při přijetí paketu je vyvoláno přerušení a je volána funkce `MCPSPDataIndication`, ve které je ošetřen postup při obdržení těchto typů potvrzujících paketů:

a) ACK paket

- Funkce `ext_main` je ukončena a je vrácena hodnota 1.

b) TIMEOUT paket

- Proveďte se další pokus o odeslání, maximálně však čtyřikrát.
- Po čtvrtém TIMEOUT paketu je odesílaný paket zahozen a odesílání ukončeno – funkce `ext_main` vrací hodnotu 2.

Tento paket jako jediný není odesílán příjemcem, ale je generován přímo odesílatelem po uplynutí dané doby.

c) NACK paket

- Je generována náhodná délka doby pro odmlku odesílatele před dalším odesláním - z důvodu předešlé kolize nebo rušení. Modul po tuto náhodně dlouhou dobu čeká.
- Je generována náhodná délka doby určená pro přijetí paketu (tedy pro funkci `MLMERXEnableRequest`).
- Data jsou zaslána znovu, doba čekání na potvrzení přijetí je nyní náhodná, čímž se také předchází možné kolizi.

Náhodné doby jsou generovány pomocí CRC součtu, který je použit při odeslání dat.

Aby byly vygenerovány stejné doby čekání na více modulech, tedy aby kolize znovu nastala, musely by být splněny obě tyto podmínky:

- a) Odesílatelé mají totožné číslo modulu
- b) Odesílatelé odesílají totožná data

Před tím, než funkce vrátí hodnotu 1 nebo 2, je ještě zapsán do bufferu `NACK_Rx_Qtity_Buffer` počet přijatých NACK paketů, které odesílatel obdržel jako odpověď na odeslaná data.

8.2.3 Funkce `Read_Data`

Funkce čeká na přijetí paketu od modulu, jehož číslo je předáno třetím parametrem, a to po dobu, která je dána čtvrtým parametrem této funkce. Pokud je paket od daného modulu očekáván a je přijat, zapíše počet bajtů daný druhým parametrem do bufferu předaného prvním parametrem.

Prototyp funkce:

```
unsigned char Read_Data(unsigned char *st_buffer, unsigned char l_buffer, unsigned char odesílatel, unsigned int doba_cekani)
```

Funkci jsou předány čtyři parametry:

- 1) Ukazatel na buffer

Do tohoto bufferu budou zapsána přijatá data. Počet bajtů alokovaných v bufferu není omezen, maximálně je však možné v této funkci do něj zapsat 118 bajtů.

Buffer může být definovaný například takto:

```
unsigned char my_buffer[118];
```

Pokud definujete pro buffer méně bajtů, než je hodnota druhého parametru, budou data zapsána mimo alokovaný prostor.

- 2) Počet bajtů, které se mají do bufferu zapsat (1 až 118)

Jestliže předem neznáte velikost paketu, tedy počet bajtů, které budete přijímat, použijte maximální velikost: 118 bajtů. Do bufferu budou zapsány všechny přijaté bajty.

3) Číslo modulu odesílatele (1 až 255)

Pokud je zadáno číslo odesílatele stejné, jako je číslo vašeho modulu, vrátí funkce hodnotu 0.

4) Doba čekání na přijetí paketu (0 až 0xFFFFFFFF)

Pokud je hodnota rovna nule, je doba čekání neomezená a ukončí ji až přijetí paketu. Výše uvedená maximální hodnota (0xFFFFFFFF) je dána 24 bitovým časovačem modulu.

Doba čekání je 0 až 67,109 sekund při frekvenci časovače modulu 250kHz.

Pokud nejsou dodrženy povolené rozsahy parametrů, vrací funkce hodnotu 0.

Pokud jsou rozsahy v pořádku, volá funkci `ext_main`.

Funkce vrací hodnotu udávající počet bajtů zapsaných do bufferu. Pokud v dané době nebyl přijat paket, vrací hodnotu 255.

8.2.3.1 *Funkce ext_main (Příjem dat)*

Funkce čeká po danou dobu na přijetí paketu od daného odesílatele. Pokud paket přijme, zapíše jej do bufferu `RxDataBuffer`.

Funkci je předáno 6 parametrů:

- 1) NULL - parametr použit při odesílání dat
- 2) NULL - parametr použit při odesílání dat
- 3) NULL - parametr použit při odesílání dat
- 4) Ukazatel na buffer, do kterého se budou zapisovat přijatá data (dále jen `RxDataBuffer`)
- 5) Ukazatel na buffer, do kterého se zapíše počet přijatých bajtů (dále jen `Rx_Data_Length`)
- 6) Ukazatel na buffer, do kterého se bude zapisovat počet přijatých vadných paketů (dále jen `NACK_Tx_Qtity_Buffer`)

Modul se nachází v IDLE stavu, ze kterého je možné jej převést do RECIEVE nebo TRANSMIT stavu. Protože je třetí parametr funkce roven hodnotě 0, je v tomto případě modul převeden do RECIEVE stavu funkcí MLMERXEnableRequest.

Jestliže je čtvrtý parametr funkce Read_Data nulový, čeká funkce na přijetí paketu po neomezenou dobu. Pokud parametr nebyl nulový, čeká funkce po danou dobu.

Při přijetí paketu je vyvoláno přerušení a funkce MCPSDataIndication, které je předán přijatý paket.

Pokud je preamble paketu v pořádku, data jsou určena danému modulu (druhý parametr funkce Init_ZigBee), souhlasí jejich CRC součet a zároveň se čeká na přijetí dat od daného příjemce (třetí parametr funkce Read_Data), odešle se odesílateli ACK paket.

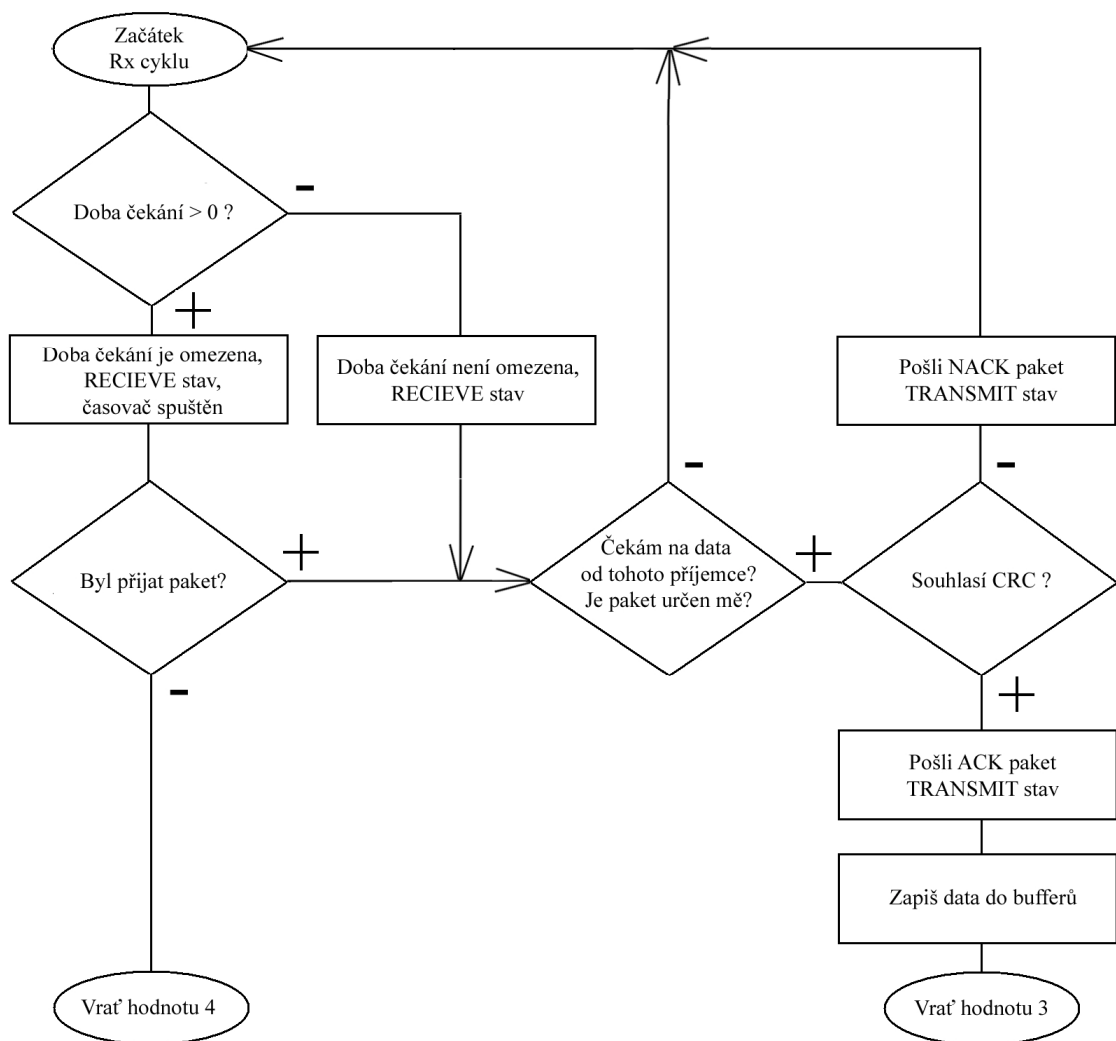
Pokud paket nebyl určen danému modulu, je paket zahozen a čeká se dál.

Po přijetí paketu, který je určen danému modulu, je proveden kontrolní CRC součet. Jestliže CRC součet u přijatého paketu nesouhlasí, je odeslán NACK paket a dále se čeká na přijetí paketu.

Datová část paketu je zapsána do RxDataBuffer bufferu a počet zapsaných bajtů je zapsán do bufferu Rx_Data_Length. Funkce vrací hodnotu 3.

Nebyl-li v dané době přijat paket, je generován TIMEOUT paket a funkce vrací hodnotu 4.

Princip funkce ext_main při přijímání dat znázorňuje zjednodušený vývojový diagram, viz obrázek č. 25.



Obrázek 25: Zjednodušený vývojový diagram pro příjmací cyklus

Před tím, než funkce vrátí hodnotu 3 nebo 4, je ještě zapsán do bufferu NACK_Tx_Qtity_Buffer počet odeslaných NACK paketů, kterými příjemce informuje odesilatele, že přijal poškozená data.

8.2.4 Funkce Get_CRC_Errors

Funkce vrací počet odeslaných NACK paketů, tj. kolikrát modul v RECIEVE stavu přijal data, jež následně vyhodnotil jako poškozená.

Prototyp funkce:

```
unsigned char Get_CRC_Errors(void)
```

8.2.5 Funkce Get_CRC_Warnings

Funkce vrací počet přijatých NACK paketů, tj. kolikrát tento modul v TRANSMIT stavu odeslal data, jež příjemce vyhodnotil jako poškozená.

Prototyp funkce:

```
unsigned char Get_CRC_Warnings(void)
```

8.2.6 Funkce Init_Clock_Generator

Funkce nastaví frekvenci interního hodinového generátoru na 20MHz.

Prototyp funkce:

```
void Init_Clock_Generator(void)
```

8.3 Kolize, řízení komunikace a dosah ZigBee modulu

Protože v této práci není použit celý ZigBee protokol, ale pouze jeho část (fyzická, MAC a aplikační vrstva), a protože v síti není žádný koordinátor, který by řídil komunikaci, je možné, že nastanou kolize ve chvíli, kdy dva nebo více modulů bude v TRANSMIT stavu a budou odesílat pakety ve stejný okamžik.

Programová knihovna toto ošetřuje kontrolním CRC součtem. Jestliže odesílá několik modulů najednou jednomu příjemci, je patrné, že přijatá data budou poškozena z důvodu rušení. CRC součet nebude souhlasit s přijatými daty a odešle se NACK paket, čímž je požádáno o opakované vysílání paketu od všech modulů. Přijetím NACK paketu se odesílatel odmlčí na náhodnou dobu a poté odešlou data znovu. Toto se opakuje, dokud data nejsou potvrzena, případně dokud není generován TIMEOUT paket.

Může se stát, že některý z modulů (odesílatelů) pošle data a příjemce přitom čeká na potvrzující paket (ACK nebo NACK paket) od jiného odesílatele. Příjemce paket zahodí a dále čeká na přijetí potvrzujícího paketu. Pokud nebyl přijat, pak funkce Send_Data indikuje, že paket odeslaný příjemcem nebyl potvrzen a je tak možné odesílat paket znovu až do jeho potvrzení (v cyklu).

Také je možná situace, kdy příjemce čeká na data a místo dat obdrží potvrzující paket díky zpožděné odpovědi některého z modulů. Potvrzující paket je zahozen a dál se čeká na data.

Dosah ZigBee modulu

Při nastavení maximálního výkonu (vysílací výkon 1,4 dBm) na obou modulech bylo zjištěno, že moduly:

- komunikují přes tři sousední sádrokartonové stěny bez problémů
- komunikují přes dvě zděné stěny bez problémů
- nekomunikují, stojí-li jim v cestě živý předmět (člověk, ruka...)
- nekomunikují přes patro domu (cca 3m výškový rozdíl)

Při měření byly moduly od sebe vzdáleny maximálně 20m a neměly na sebe přímou viditelnost.

Při nastavení minimálního výkonu (vysílací výkon -16,2dBm) na obou modulech bylo zjištěno, že moduly:

- nekomunikují přes sádrokartonovou stěnu
- nekomunikují přes zděnou stěnu
- nekomunikují, pokud nemají na sebe přímou viditelnost
- nekomunikují, pokud jsou od sebe vzdálené více než 3m.

Testování proběhlo ve dvoupatrovém rodinném domě o rozloze 20x25 metrů.

9 UKÁZKOVÝ PROGRAM

Ukázkový program slouží pro demonstraci funkcí programové knihovny s použitím dvou vývojových kitů a modulů AP13192USLK. Moduly spolu komunikují a podle obsahu přijaté informace je provedena změna stavu na vývojovém kitu. Ukázkový program využívá ovladače pro LCD displej.

Zadání – stanice č. 1:

- Modul vysílá stav tlačítek SW1 až SW4 (umístěny na vývojovém kitu).
- Modul vysílá 10 bitovou hodnotu z A/D převodníku.
- Modul přijímá informaci, zda má vysílat hodnoty z A/D převodníku.
Přijmutím hodnoty 1 vysílá, přijmutím hodnoty 0 nevysílá.
- Na LCD displeji vývojového kitu je zobrazena informace udávající:
 - a) Počet odeslaných bajtů
 - b) Počet přijatých bajtů
 - c) Počet přijatých žádostí o opakované vysílání paketu
 - d) Počet ztracených bajtů
 - e) Počet odeslaných žádostí o opakované vysílání paketu

Zadání – stanice č. 2:

- Modul přijímá stav tlačítek a rozsvěcuje nebo zhasíná LED diody 1 až 4 (umístěny na vývojovém kitu).
- Modul zobrazí přijatý údaj z A/D převodníku na displeji, převede jej na teplotu v rozsahu 0 až 100 °C a také zobrazí.
- Na LCD displeji vývojového kitu je zobrazena informace udávající:
 - a) Počet odeslaných bajtů
 - b) Počet přijatých bajtů
 - c) Počet přijatých žádostí o opakované vysílání paketu
 - d) Počet ztracených bajtů

- Modul odesílá informaci pro stanici č. 1, zda má nebo nemá odesílat informaci o teplotě (hodnotu AD převodníku). Tato změna je ovládána tlačítkem SW1.

9.1 Řešení – stanice č. 1

Modul je inicializován, nic nevysílá a neustále čeká na přijetí paketu od druhé stanice, zda má vysílat hodnotu z A/D převodníku. Jestliže je na stanici č. 1 stisknuto tlačítko, je vyvoláno přerušení, které zjistí, které tlačítko bylo stisknuto a po návratu z přerušení je tato hodnota (1 bajt) odeslána stanici č. 2.

Pokud modul přijme paket s žádostí o odeslání hodnoty A/D převodníku od stanice č. 2, je povoleno jednorázové přerušení od A/D převodníku. Toto přerušení je následně vyvoláno dokončením převodu. Na dokončení převodu je potřeba počkat v krátké čekací smyčce. Doba převodu je 14 μ s. Hodnota A/D převodníku (2 bajty) je poté odeslána.

Jestliže je v průběhu čekání na dokončení převodu nebo při odeslání hodnoty A/D převodníku na vývojovém kitu stisknuto nějaké tlačítko, je jeho hodnota uložena a odešle se až po odeslání hodnoty A/D převodníku.

Hodnota A/D převodníku je odesílána neustále (až do přijetí paketu s hodnotou 1 od druhé stanice), případně je možné jednoduše v kódu změnit odeslání na jednorázové. Pro jednorázové odeslání je potřeba v kódu přepsat řádek:

```
vysilat_AD = vysilat_AD ^ 1;
```

tímto řádkem:

```
vysilat_AD = 1;
```

a také zrušit poznámku na řádku č. 189:

```
vysilat_AD = 0;
```

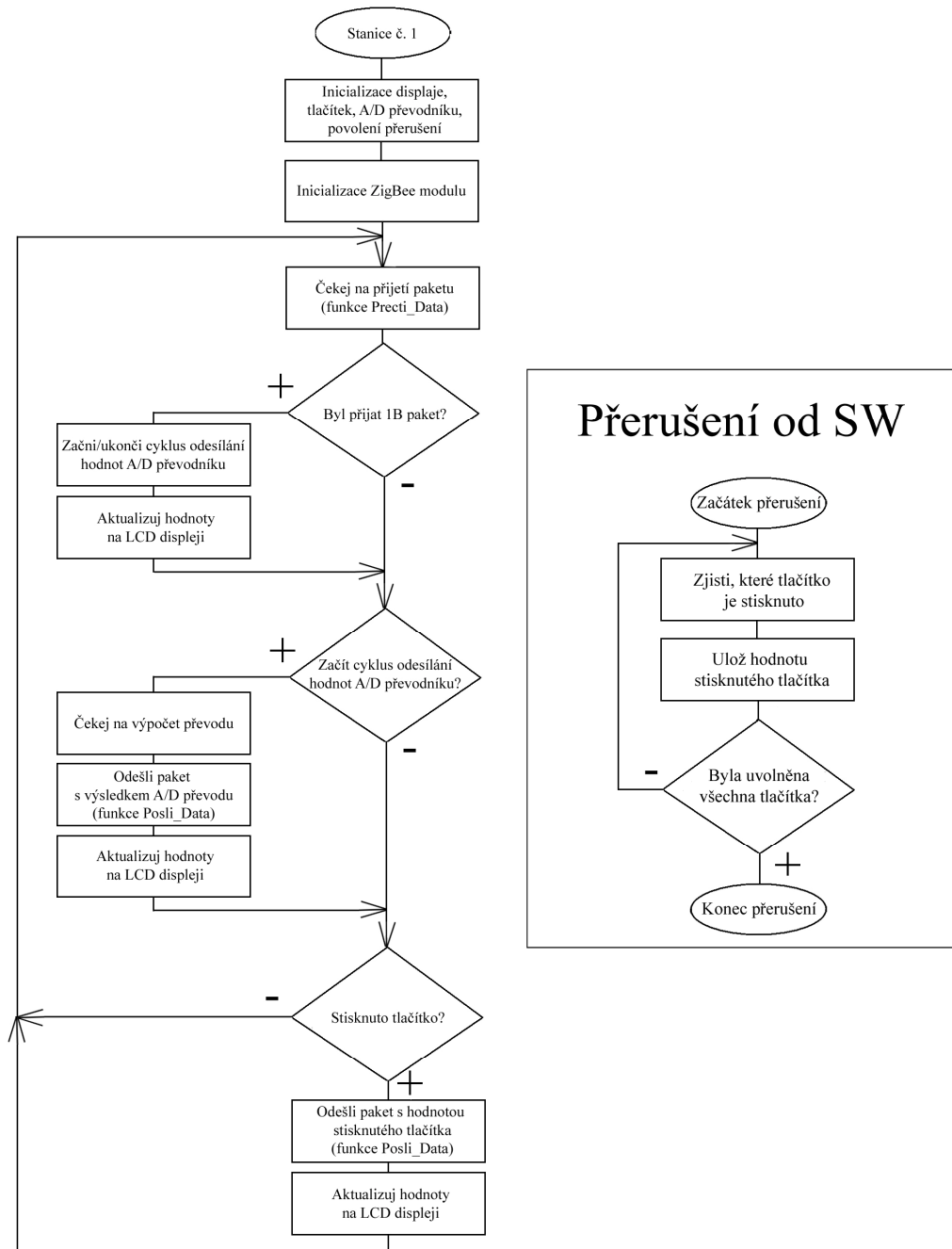
Tyto řádky jsou v kódu zapsány formou poznámky.

Po každém odeslání nebo přijetí paketu jsou hodnoty na LCD displeji aktualizovány.

Pro zobrazení čísel na displeji je použita funkce `dtext`, která odešle ASCII hodnoty z předaného bufferu zobrazovací jednotce.

Pro převod čísel do ASCII je použita funkce `i_to_a`, které stačí předat číselnou hodnotu a následně se tato hodnota zapíše v ASCII formátu do globálně definovaného bufferu.

Princip funkce stanice č. 1 znázorňuje zjednodušený vývojový diagram – viz obrázek č. 26.



Obrázek 26: Zjednodušený vývojový diagram pro funkci stanice č. 1

Ve zjednodušeném vývojovém diagramu není uvedena inicializace interního zdroje hodinového kmitočtu (uvažuje se stav, kdy je modul připojen k PC přes COM port).

Funkce `Get_CRC_Errors` a `Get_CRC_Warnings` jsou volány po každém přijetí nebo odeslání paketu. Ve vývojovém diagramu jsou zahrnuty do bloku „Aktualizuj hodnoty na LCD displeji“.

Při překročení hodnot, které jsou průběžně zobrazovány na LCD displeji, jsou tyto hodnoty nulovány. Tyto meze jsou dány následovně:

- Počet odeslaných bajtů (Tx) : 0 až 9999
- Počet přijatých bajtů (Rx) : 0 až 9999
- Počet přijatých žádostí o přeoslání paketu (Tx_Again): 0 až 999
- Počet ztracených bajtů (Tx_Lost): 0 až 9999
- Počet odeslaných žádostí o přeoslání paketu (CRC_ERROR): 0 až 999

Hodnoty jsou na LCD displeji zobrazovány v následujícím tvaru:

Tabulka 17: Zobrazení hodnot na LCD displeji – stanice č. 1

| | |
|----------|------------------------|
| 1. řádek | B: Tx * Rx * Tx_Again |
| 2. řádek | N: Tx_Lost * CRC_ERROR |

9.2 Řešení – stanice č. 2

Modul je inicializován, nic nevysílá a neustále čeká na přijetí paketu od první stanice, zda má rozsvítit některou z LED diod nebo zobrazit hodnotu A/D převodníku na LCD displeji. Zároveň se kontroluje, zda nebylo stisknuto tlačítko SW1.

Pokud bylo stisknuto tlačítko SW1, je vyvoláno přerušení, které toto stisknutí zaznamená a ve chvíli, kdy modul přestane čekat na paket od první stanice, odešle paket s informací, že se má začít nebo přestat s vysíláním výsledku A/D převodu. Toto se opakuje až do chvíle, dokud není potvrzeno přijetí tohoto paketu první stanicí, a to z důvodu, že první stanice může v danou chvíli vysílat a není tedy schopna v daný moment paket přijmout.

Při čekání na paket se kontroluje, zda byl přijat jeden nebo dva bajty. Podle toho je:

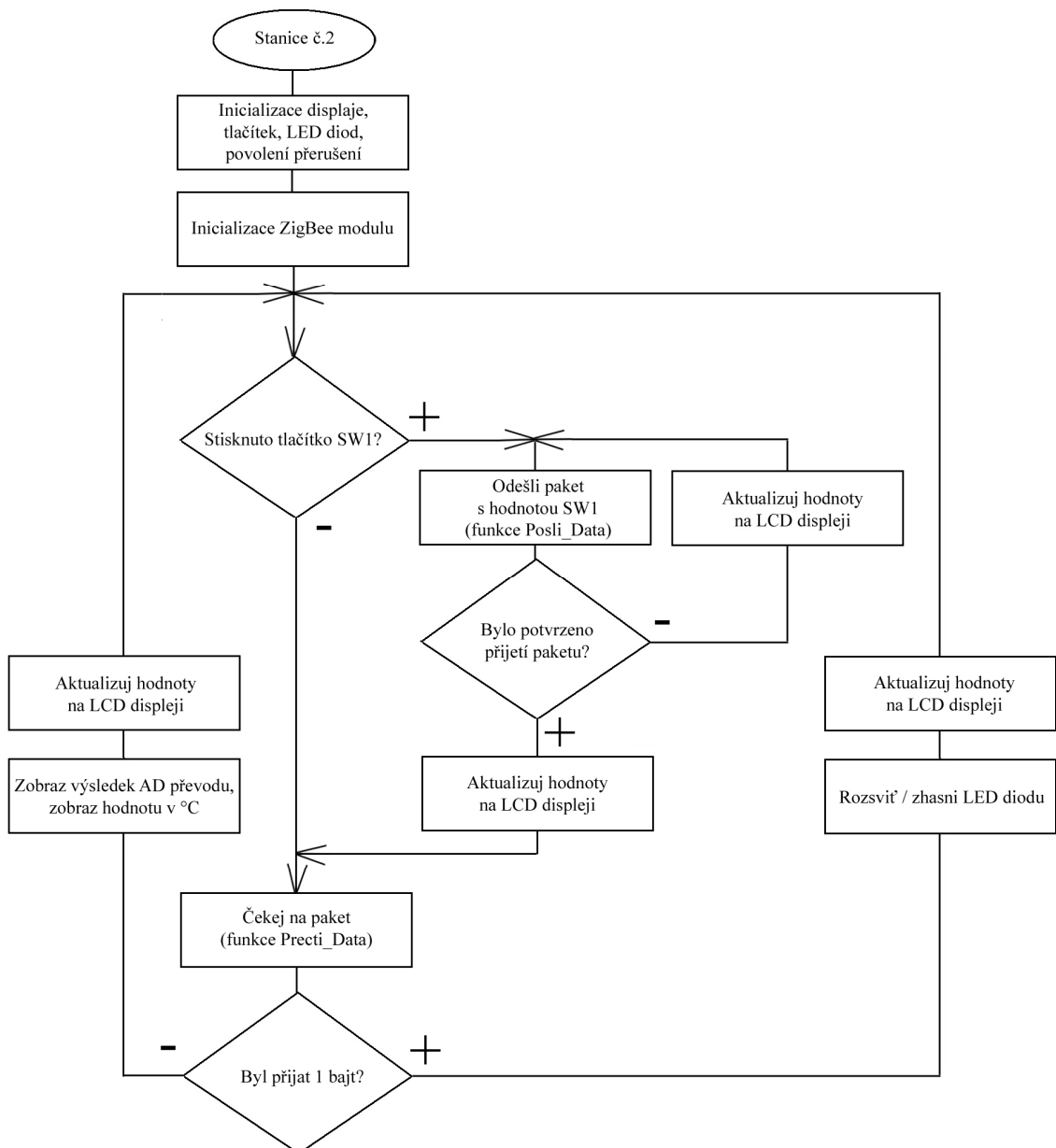
- a) rozsvícena příslušná LED dioda (1 bajt)
- b) zobrazen výsledek A/D převodu, zároveň i v °C (2 bajty)

Po každém odeslání nebo přijetí paketu jsou hodnoty na LCD displeji aktualizovány.

Pro zobrazení čísel na displeji je použita funkce dtext, která odešle ASCII hodnoty z předaného bufferu zobrazovací jednotce.

Pro převod čísel do ASCII je použita funkce i_to_a, které stačí předat číselnou hodnotu a následně se tato hodnota zapíše v ASCII formátu do globálně alokovaného bufferu.

Princip funkce stanice č. 2 znázorňuje zjednodušený vývojový diagram – viz obrázek č. 27.



Obrázek 27: Zjednodušený vývojový diagram pro funkci stanice č. 2

Ve zjednodušeném vývojovém diagramu není uvedena inicializace interního zdroje hodinového kmitočtu (uvažuje se stav, kdy je modul připojen k PC přes COM port).

Funkce `Get_CRC_Warnings` je volána po každém odeslání paketu. Ve vývojovém diagramu je zahrnuta do bloku „Aktualizuj hodnoty na LCD displeji“.

Přerušení od tlačítka je zde stejné jako na obrázku č. 26, pouze s tím rozdílem, že se čeká na uvolnění pouze jednoho tlačítka – SW1.

Při překročení meze hodnot, které jsou průběžně zobrazovány na LCD displeji, jsou tyto hodnoty nulovány. Tyto meze jsou dány následovně:

- Počet odeslaných bajtů (Tx) : 0 až 9999
- Počet přijatých bajtů (Rx) : 0 až 9999
- Počet přijatých žádostí o přeposlání paketu (Tx_Again): 0 až 999
- Počet ztracených bajtů (Tx_Lost): 0 až 9999

Hodnoty jsou na LCD displeji zobrazovány v následujícím tvaru:

Tabulka 18: Zobrazení hodnot na LCD displeji – stanice č. 2

| | |
|----------|-----------------------------|
| 1. řádek | B: Tx * Rx * Tx_Again |
| 2. řádek | N: Tx_Lost * AD_PREVOD * °C |

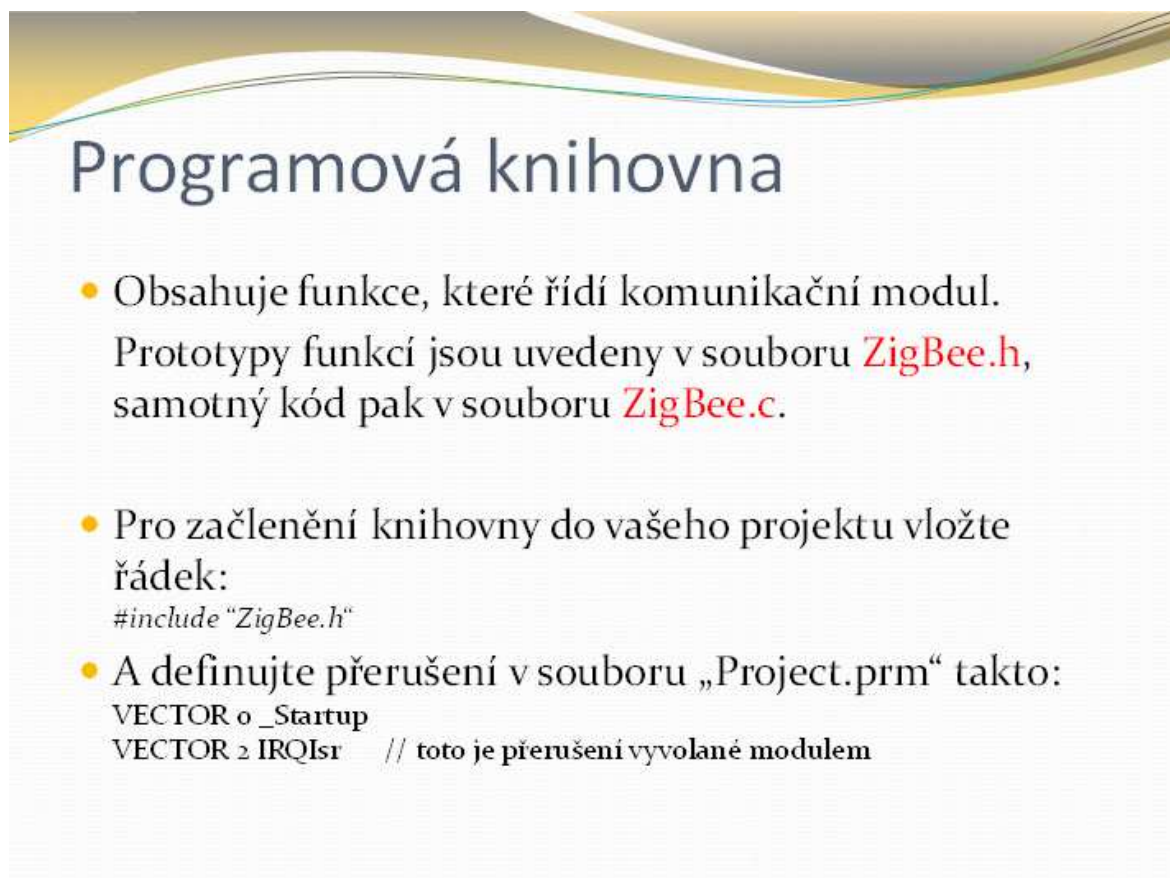
, kde `AD_PREVOD` je výsledek A/D převodu a `°C` je hodnota výsledku A/D převodu zobrazená ve stupních Celsia v rozsahu 0 až 100.

10 PREZENTACE PRO PODPORU VÝUKY

Prezentace v příloze P II obsahuje:

- 1) Návod, jak začlenit programovou knihovnu do nového projektu
- 2) Seznam funkcí knihovny
- 3) Popis jednotlivých funkcí (předávané parametry, návratové hodnoty)
- 4) Příklad použití jednotlivých funkcí
- 5) Příklad použití programové knihovny (stejný jako v kapitole 9)
- 6) Řešení příkladu včetně vývojových diagramů

Prezentace byla vytvořena pro didaktické účely, bude využívána studenty, obsahuje celkem 21 snímků a byla vytvořena v programu Microsoft Office PowerPoint 2007. Ukázkový snímek prezentace je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 28: Ukázkový snímek prezentace

ZÁVĚR

Teoretická část této diplomové práce obsahuje stručný úvod do bezdrátové komunikace, v níž je rozebrána technologie Bluetooth a ZigBee. Tyto technologie jsou také vzájemně porovnány. Na konci teoretické části je představen vývojový kit M68EVB908GB60 a komunikační ZigBee modul AP13192USLK, jež jsou použity v praktické části práce.

První část praktické části obsahuje návrh propojení vývojového kitu a ZigBee modulu, po níž byla vyrobena redukce v podobě plošného spoje. S pomocí této redukce spolu kit i modul bez problémů komunikují, přičemž bylo ošetřeno, aby bylo možné současně využívat všechny integrované obvody vývojového kitu. To vše bylo dosaženo díky vhodnému výběru vstupů a výstupů MCU portu vývojového kitu.

Dalším cílem této práce bylo vytvoření programové komunikační knihovny, která bude svými funkcemi řídit komunikační modul, konkrétněji odesílat, přijímat data a měnit nastavení modulu. Vytvořená programová knihovna využívá funkcí upravené SMAC knihovny (verze 4.1c), která je volně dostupná na stránkách výrobce modulu. Neupravená SMAC knihovna kit M68EVB908GB60 přímo nepodporuje, proto bylo potřeba ji upravit pro použití s výše uvedeným vývojovým kitem.

Programová knihovna umí navíc informovat uživatele o tom, zda byla data odeslána a příjemcem potvrzena, zda ve zvolené době byla nebo nebyla data přijata nebo také indikovat CRC chyby, které mohou vzniknout při kolizích. Kolize mohou nastat v případě, že dva nebo více modulů odesílá data ve stejný okamžik.

Součástí knihovny je také funkce, která umožňuje nastavit frekvenci interního hodinového generátoru kitu na 20MHz. Tu je vhodné použít ve chvíli, kdy není programové vybavení spuštěno z prostředí debuggeru. Zabrání se tak příliš pomalému chodu programu, pokud by tato funkce nebyla použita.

V praktické části práce byly použity pouze dva komunikační moduly, bylo však myšleno i na situace, kdy je modulů více a je tedy větší pravděpodobnost vzájemného rušení či konfliktů.

Ukázkový program je schopen toto rušení a konflikty zaznamenat a zobrazit přímo na LCD displeji vývojového kitu (uvažuje se, že při rušení nebude souhlasit CRC součet přijatého

paketu). Součástí ukázkového programu je také statistika odeslaných, přijatých a ztracených (tj. odeslaných a nepotvrzených) bajtů, která je zobrazena na LCD displeji.

Po nahrání ukázkového programu do vývojových kitů přes COM port počítače je možné propojovací kabel odpojit, kit s modulem přenášet a testovat na jaké vzdálenosti jsou moduly schopny komunikovat. Práce také obsahuje stručný popis přenosu v rodinném domě a na jaké vzdálenosti je modul schopen komunikovat.

Pro nahrání ukázkových programů byl použit program CodeWarrior verze 5.7.0.

Závěrem je vypracována multimediální prezentace v programu Microsoft Office Powerpoint 2007 pro podporu výuky předmětu Programování mikropočítačů na FAI UTB ve Zlíně. Tato prezentace bude sloužit k seznámení studentů s funkcemi programové knihovny.

CONCLUSION

The theoretical part of this diploma thesis includes a brief introduction to wireless communication, in which the Bluetooth and ZigBee technologies are analyzed. These technologies are mutually compared. At the end of the theoretical part the development kit M68EVB908GB60 and communication ZigBee module AP13192USLK are introduced. These are, used in the practical part of the thesis.

The first section of practical part includes the connection design of the development kit and ZigBee module. After that the PCB reduction connecting those two were made. By this reduction the kit and module can communicate without problems. It was ensured, that all integrated circuits of the development board can be used simultaneously. This was achieved by choosing suitable inputs and outputs of the MCU port which is on the development board.

Another objective of this thesis was to develop a communication program library, which will control the communication module by its functions. Specifically send, receive data and change the module settings. The program library uses functions of modified SMAC library (version 4.1c), which is freely available on the manufacturer's website. The unmodified SMAC library does not support the M68EVB908GB60 kit directly; therefore it was necessary to modify it for the use with above mentioned development kit.

The program library can also inform the user whether the data was sent and confirmed by recipient; whether the data was received or not in given time, or it can indicate CRC faults, that may occur in collisions. Collisions can occur when two or more modules send data at the same time.

The library also has a function that allows setting the internal clock frequency to 20MHz. That should be used when the program equipment is not launched from the debugger. This prevents the very slow program run-time if this feature was not used.

Two communication modules were used in the practical part, however, situations when there are more modules and greater probability of mutual interference or conflicts, were not omitted.

The sample program is capable to register and display these interferences and conflicts directly to the LCD display of development kit (it is believed that because of the

interference the CRC sum will not correspond to the received packet). Part of the sample program is also statistics of sent, received and lost (ie, sent and unconfirmed) bytes, which is displayed on the LCD.

After the sample project has been uploaded to the development kit via PC COM port, it is possible to disconnect the data cable, move the kit and test how far the modules can communicate from each other. The thesis also contains a brief description of the transmission in a family house and at what distance is a module able to communicate.

The upload of sample programs was made at software program Codewarrior, version 5.7.0.

At the end of the thesis a multimedia presentation is created in Microsoft Office Powerpoint 2007. It will be used for the course “Programování mikropočítačů” on FAI UTB in Zlín. This presentation will be used to familiarize students with the functions of the program library.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AXIOM MANUFACTURING. MC13192U Application Module for the Freescale MC13192 2.4GHz RF Transceiver Hardware User Guide [online]. 2006. Dostupné z: www.axman.com
- [2] BERKA, Štěpán. Elektrotechnická schémata a zapojení 2: řídicí, ovládací a bezdrátové prvky. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 240 s. ISBN 978-807-3002-541.
- [3] EREN, Halit. Wireless sensors and instruments: networks, design, and applications. 1. vyd. Boca Raton: CRC/Taylor, 2006, 297 s. ISBN 08-493-3674-0.
- [4] FREESCALE SEMICONDUCTOR. CPU08 Central Processor Unit Reference Manual [online]. 2001. Dostupné z: www.freescale.com
- [5] FREESCALE SEMICONDUCTOR. HCS08 Family Reference Manual, Rev.1. [online]. 2003. Dostupné z: www.freescale.com
- [6] FREESCALE SEMICONDUCTOR. MC9S08GB/GT Data Sheet, Rev.2.3. [online]. 2004. Dostupné z: www.freescale.com
- [7] FREESCALE SEMICONDUCTOR. MC13192/MC13193 2.4 GHz Low Power Transceiver for the IEEE 802.15.4 Standard Reference Manual [online]. 2006. Dostupné z: www.freescale.com
- [8] GOFTON, Peter W. Sériová komunikace. 1. vyd. Praha: Grada, 1994, 234 s. ISBN 80-716-9131-3.
- [9] BEN-MENACHEM, Ari. Historical Encyclopedia of Natural and Mathematical Sciences: VOLUME 1. 1. vyd. New York: Springer, 2009, 5988 s. ISBN 978-3-540-68831-0.
- [10] Bluetooth SIG. About the Bluetooth SIG: Overview [online]. 2012. Dostupné z: www.bluetooth.org
- [11] Bluetooth SIG. Bluetooth Basics [online]. 2012. Dostupné z: www.bluetooth.com
- [12] Bluetooth SIG. Bluetooth Baseband [online]. 2012. Dostupné z: www.bluetooth.org
- [13] SP Commerce LLC. How Bluetooth Works – Signal Strength, Frequency, and Profiles [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.bluetomorrow.com>

- [14] SP Commerce LLC. Bluetooth Security – Bluejacking, Bluesnarfing, and Bluebugging [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.bluetomorrow.com>
- [15] Bluetooth SIG. Bluetooth Smart Marks – How to Use [online]. 2012. Dostupné z: www.bluetooth.org
- [16] KINNEY, Patrick. ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works [online]. 2003 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=5162
- [17] CRAGIE, Robert. ZigBee Security [online]. 2009 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/09-5378.pdf>
- [18] WRIGHT, Joshua. KillerBee: Practical ZigBee Exploitation [online]. 2009 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: www.willhackforsushi.com/presentations/toorcon11-wright.pdf
- [19] JIN-SHYAN, L., S. YU-WEI a S. CHUNG-CHOU. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi [online]. 2007 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://eee.guc.edu.eg/Announcements/Comparaitive_Wireless_standards.pdf
- [20] CZARES, Chuan Blanco. Interfacing AP13192USLK with Microcontroller Student Learning Kits [online]. 2007 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/student_learning_kits/doc/app_note/SLK0106AN.pdf
- [21] AXIOM MANUFACTURING. MC13192U [online]. 2006 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://www.axman.com/files/MC13192U_UG_B.pdf
- [22] FREESCALE. Student Learning Kit Product Pinouts [online]. 2010 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/student_learning_kits/doc/support_info/SLKProductPinouts.xls

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|--------|---|
| ASK | Amplitude Shift Keying |
| FSK | Frequency Shift Keying |
| GFSK | Gaussian Frequency Shift Keying |
| PSK | Phase Shift Keying |
| BPSK | Binary Phase Shift Keying |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| O-QPSK | Offset QPSK |
| PAM | Pulse-Amplitude Modulation |
| PWM | Pulse-Width Modulation |
| PPM | Pulse-Position Modulation |
| PCM | Pulse-Code Modulation |
| DM | Delta Modulation |
| ADM | Adaptive DM |
| DPCM | Differential PCM |
| ADPCM | Adaptive DPCM |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| APSK | Amplitude-Phase Shift Keying |
| SIG | Special Interest Group |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| PAN | Personal Area Network |
| MAC | Medium Access Control |
| PDA | Personal Digital Assistant |
| AFH | Adaptive Frequency Hopping |
| FEC | Forward Error Correction |

| | |
|---------|---|
| PIN | Personal Identification Number |
| OBEX | OBject EXchange |
| EDR | Enhanced Data Rate |
| HS | High Speed |
| PHY | PHYSical layer |
| BLE | Bluetooth Low Energy |
| LLC | Link Layer Control |
| LL | Link Layer |
| CRC | Cyclic Redundancy Code |
| FHSS | Frequency Hopping Spread Spectrum |
| AES | Advanced Encryption Standard |
| WPAN | Wireless Personal Area Network |
| MIC | Message Integrity Code |
| CBC-MAC | Cipher Block Chaining Message Authentication Code |
| CCM | Cryptographic Ciphers Mode |
| DSSS | Direct-Sequence Spread Spectrum |
| HCI | Host Controller Interface |
| CSR | Cambridge Silicon Radio |
| TI | Texas Instruments |
| MCU | MicroController Unit |
| CPU | Central Processing Unit |
| RAM | Random Access Memory |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| PLL | Phase-Locked Loop |
| COM | Communication Port |

| | |
|-------|---|
| SCI | Serial Communications Interface |
| LED | Light Emmiting Diode |
| DIP | Dual In-line Package |
| LCD | Liquid Crystal Display |
| DC | Direct Current |
| PC | Personal Computer |
| CCA | Clear Channel Assessment |
| GP | General Purpose |
| IRQ | Interrupt ReQuest |
| GND | GrouND |
| SFD | Start of Frame Delimiter |
| FLI | Frame Length Indicator |
| FCS | Frame Check Sequence |
| GPIO | General Purpose Input Output |
| CCITT | Comite Consultatif International de Telegraphique et Telephonique |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| SP | Stack Pointer |
| PCB | Printed Circuit Board |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Amplitudová modulace | 14 |
| Obrázek 2: Kompatibilita Bluetooth zařízení | 20 |
| Obrázek 3: Protokolová vrstva BLE (single-mode)..... | 21 |
| Obrázek 4: Příklady použití Bluetooth low energy..... | 22 |
| Obrázek 5: Protokolová vrstva ZigBee | 23 |
| Obrázek 6: Topologie ZigBee..... | 24 |
| Obrázek 7: AVR RZ Raven USB stick..... | 26 |
| Obrázek 8: Termostat využívající ZigBee | 27 |
| Obrázek 9: Řídící jednotky Siemens..... | 27 |
| Obrázek 10: Závislost vysílacího času na velikosti odesílaných dat | 31 |
| Obrázek 11: Závislost efektivity kódu na velikosti odesílaných dat..... | 31 |
| Obrázek 12: Odesílání a příjem dat | 33 |
| Obrázek 13: Vývojový kit M68EVB908GB60..... | 36 |
| Obrázek 14: MCU port | 37 |
| Obrázek 15: Komunikační modul AP13192USLK | 38 |
| Obrázek 16: Změna stavů modulu | 39 |
| Obrázek 17: Zjednodušené propojení modulu s MCU | 41 |
| Obrázek 18: Konektory modulu..... | 41 |
| Obrázek 19: Tvar paketu modulu AP13192USLK..... | 43 |
| Obrázek 20: Plošný spoj - redukce | 45 |
| Obrázek 21: Vývojový kit s redukcí a ZigBee modulem..... | 46 |
| Obrázek 22: Obsah bufferu před výpočtem CRC součtu..... | 59 |
| Obrázek 23: Obsah bufferu po výpočtu CRC součtu..... | 59 |
| Obrázek 24: Zjednodušený vývojový diagram pro odesílací cyklus..... | 61 |
| Obrázek 25: Zjednodušený vývojový diagram pro přijímací cyklus | 66 |
| Obrázek 26: Zjednodušený vývojový diagram pro funkci stanice č. 1 | 71 |
| Obrázek 27: Zjednodušený vývojový diagram pro funkci stanice č. 2..... | 73 |
| Obrázek 28: Ukázkový snímek prezentace | 75 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Verze Bluetooth..... | 15 |
| Tabulka 2: Výkonové třídy Bluetooth..... | 16 |
| Tabulka 3: Formát BLE link layer paketu..... | 21 |
| Tabulka 4: Základní porovnání Bluetooth a ZigBee..... | 29 |
| Tabulka 5: Systémové parametry Bluetooth a ZigBee..... | 30 |
| Tabulka 6: Počet primitiv a událostí..... | 32 |
| Tabulka 7: Spotřeba proudu..... | 33 |
| Tabulka 8: Porovnání příkonu modulů..... | 33 |
| Tabulka 9: Parametry modulu..... | 38 |
| Tabulka 10: Vysílací kanály a frekvence..... | 40 |
| Tabulka 11: Spotřeba modulu dle stavu..... | 40 |
| Tabulka 12: Spotřeba modulu dle činnosti..... | 40 |
| Tabulka 13: Propojení modulu a MCU..... | 45 |
| Tabulka 14: Nastavení univerzálních vstupů a výstupů..... | 54 |
| Tabulka 15: Softwarové přiřazení vstupů a výstupů..... | 56 |
| Tabulka 16: Nastavení zesílení na výstupu..... | 58 |
| Tabulka 17: Zobrazení hodnot na LCD displeji – stanice č. 1..... | 72 |
| Tabulka 18: Zobrazení hodnot na LCD displeji – stanice č. 2..... | 74 |

SEZNAM ROVNIC

| | |
|---|----|
| Rovnice 1 : Výpočet vysílacího času | 30 |
| Rovnice 2 : Výpočet efektivity kódu | 31 |

SEZNAM PŘÍLOH

- P I: CD-ROM** Obsahuje SMAC projekt, programovou knihovnu, ukázkový program a prezentaci pro podporu výuky předmětu Programování mikropočítačů
- P II:** Prezentace pro výuku předmětu Programování mikropočítačů
- P III:** Motiv plošného spoje desky redukce a osazovací plánek