

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ANALYZÁTOR RÁDIOVÝCH KANÁLŮ IEEE 802.15.4

ANALYZER OF IEEE 802.15.4 RADIO CHANNELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR

Bc. JIŘÍ POKORNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR

Ing. MILAN ŠIMEK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Telekomunikační a informační technika

Student:Bc. Jiří PokornýRočník:2

*ID:* 106721 *Akademický rok:* 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

### Analyzátor rádiových kanálů IEEE 802.15.4

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je vývoj komunikačního modulu s LCD displejem pro analýzu rádiových parametrů bezdrátové sítě komunikující dle standardu IEEE 802.15.4. Student prostuduje problematiku standardu IEEE 802.15.4 a navrhne architekturu bezdrátového analyzátoru. Komunikační modul s LCD displejem od společnosti Atmel dostane student k dispozici. Výsledkem diplomové práce bude funkční bezdrátový analyzátor rádiových parametrů, který dokáže analyzovat obsazenost kanálů IEEE 802.15.4 a RSSI na jednotlivých kanálech. Zařízení bude obsahovat LCD displej a tlačítka pro ovládání a nastavování analýzy.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Stojmenovic I., Handbook of Sensor Networks, Wiley,ISBN:13 978-0-471-68472-5, 2005.
[2] FARAHANI, Shahin. Zigbee Wireless Networks and Transceivers. [s.l.] : Elsevier, 2008. 329 s. ISBN 978-0-7506-8393-7

*Termín zadání:* 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Milan Šimek, Ph.D. Konzultanti diplomové práce:

> prof. Ing. Kamil Vrba, CSc. Předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývá vývojem analyzátoru rádiových kanálů, který pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz dle standardu IEEE 802.15.4. Výsledný analyzátor bude obsahovat dvě základní funkce, a to detekci energie na kanálech a analýzu zvoleného kanálu. Detekce energie bude řešena výběrem mezi vykreslením jednoduchého grafu a textovým výpisem na displeji. Na základě získaných informací o obsazenosti kanálů se uživatel rozhodne, který kanál bude předvolen pro analýzu. Během konkrétní analýzy se z každého platně přijatého rámce uloží zdrojová adresa vysílajícího uzlu, výkonová úroveň a kvalita signálu během příjmu. Výsledné údaje procesor zobrazí na displeji. Pro ovládání zařízení budou použity dvě indikační LED a čtyři tlačítka.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Kanálový analyzátor, IEEE 802.15.4, Atmel MAC stack, MEMSIC IRIS, ATmega1281, AT86RF230, detekce energie, síla signálu.

## ABSTRACT

The master's thesis deals with development of the radio channel analyser operating in the unlicensed 2.4 GHz band according to IEEE 802.15.4 standard. The analyzer will contain two basic functions, namely energy detection of channels and analysation of selected channel. Detection of energy will be solved by selection between simple graph and text list on display. Based on information about the occupancy of channels the user can decide which channel would be set up. During the receiving of valid frame the source address, signal strength and signal quality will be stored. At the end the processor will show these data on display. For controlling the device will be installed two LEDs and four buttons.

## **KEYWORDS**

Channel Analyser, IEEE 802.15.4, Atmel MAC stack, MEMSIC IRIS, ATmega1281, AT86RF230, energy detection, signal strength.

POKORNÝ, J. *Analyzátor rádiových kanálů IEEE 802.15.4.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Šimek, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Analyzátor rádiových kanálů IEEE 802.15.4" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Milanu Šimkovi, Ph. D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce. Děkuji také rodině a přítelkyni za vytrvalou podporu, zvláště pak mému otci a dědovi za technickou pomoc.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Brno University of Technology Purkynova 118, CZ-61200 Brno, Czechia

http://www.six.feec.vutbr.cz

Výzkum popsaný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.





EVROPSKÁ UNIE EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



## OBSAH

Se	znam obrázků	11
Se	znam tabulek	12
Úv	vod	13
1	Bezdrátové senzorové sítě	14
	1.1 Popis bezdrátových senzorových sítí	
	1.2 Základní charakteristiky senzorové sítě	
2	Standard IEEE 802.15.4	16
	2.1 Zásady standardu IEEE 802.15.4	
	2.1.1 Podporovaná zařízení sítě LR-WPAN	
	2.1.2 Síťová topologie	
	2.2 Fyzická vrstva	
	2.2.1 Přenos dat ve fyzické vrstvě	
	2.2.2 Řízení fyzického spoje	
	2.3 Linková vrstva MAC	
	2.3.1 Rámec MAC vrstvy	
	2.3.2 Služby poskytované MAC vrstvou	
	2.3.3 Řízení přístupu na médium	
	2.3.4 Operační módy IEEE 802.15.4	
3	Vývoj analyzátoru IEEE 802.15.4	25
	3.1 Komerční analyzátory sítí 802.15.4	
	3.1.1 Nástroj pro analýzu bezdrátové senzorové sítě o Deeter Group	d společnosti The
	3.1.2 Paketové a rádiové analyzátory 802.15.4	
	3.2 Požadované funkce a parametry analyzátoru	

	3.3	Implementace IEEE 802.15.4 od společnosti Atmel	
	3.3.1	Základní architektura	
	3.3.2	2 Určení zdrojové adresy uzlu	
	3.3.3	<sup>3</sup> Úroveň signálu RSSI, detekce energie na kanále	
	3.3.4	Nastavení rádiového kanálu	
	3.3.5	5 Režim spánku	
	3.4	Programové vybavení	
4	Konstruk	ce analyzátoru	35
	4.1	Zařízení MEMSIC IRIS M2110	
	4.2	Desky plošných spojů	
	4.2.1	Hlavní DPS	
	4.2.2	2 DPS pro ovládání analyzátoru	
	4.3	Anténa	
	4.4	LCD displej	
	4.5	Akumulátory	
	4.6	Montáž/demontáž pro účely přeprogramování	
5	Ovládání	analyzátoru	42
	5.1	Start analyzátoru a úvodní menu	
	5.2	Automatické prohledávání kanálů	
	5.2.1	Grafický výstup	
	5.2.2	2 Textový výstup	
	5.3	Analýza komunikace na zvoleném kanále	45
6	Testování	í analyzátoru	47
	6.1	Vliv polohy antény	47
	6.2	Komunikační dosah analyzátoru	47
	6.3	Ověření přesnosti měření parametrů RSSI a LQI	
	6.4	Výdrž akumulátorů	

	6.4.1	Výpočet doby provozu analyzátoru	
	6.4.2	Změřená doba provozu na akumulátory	
7	ZÁVĚR		52
Li	teratura		53
Se	znam symbo	lů, veličin a zkratek	55
Se	znam příloh		57

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Jednotlivé vrstvy definované dle standardů IEEE 802.15.4 a ZigBee 1	6
Obr. 2.2: Topologie Hvězda 1	8
Obr. 2.3: Topologie Peer-to-Peer1	8
Obr. 2.4: Topologie Cluster-Tree 1	9
Obr. 2.5: Datová jednotka fyzické vrstvy PPDU2	20
Obr. 2.6: Datová jednotka MAC (MPDU)2	22
Obr. 2.7: Struktura super-rámce	23
Obr. 3.1: The Deeter Wireless Site Survey Tool. Převzato z [15]2	26
Obr. 3.2: a) Prostředí DaintreeNetworks přavzato z [15], b) BzWorks převzato z [16].2	26
Obr. 3.3: Vývojový diagram programu analyzátoru2	27
Obr. 3.4: Graf závislosti chybovosti PER na parametru LQI. Převzato z [1]	32
Obr. 3.5: Rozšiřující deska MIB-520 s připojeným konektorem JTAG	34
Obr. 4.1: Senzorová jednotka MEMSIC IRIS M2110	35
Obr. 4.2: a) Návrh hlavní DPS, b) osazená hlavní DPS	36
Obr. 4.3: a) Návrh DPS pro ovládání analyzátoru, b) osazená deska	38
Obr. 4.4: Všesměrová anténa λ/2 se ziskem 2–4 dB a základní λ/4 monopól jednotky IRIS	39
Obr. 4.5: a) Uchycení hlavní DPS, b) připevnění jednotky IRIS4	11
Obr. 4.6: Sestrojený analyzátor rádiových kanálů IEEE 802.15.4.	11
Obr. 5.1: a) Start analyzéru, b) hlavní nabídka4	12
Obr. 5.2: a) Nastavení času prohledávání kanálu, b) typ zobrazení výsledků během prohledávání	43
Obr. 5.3: Nastavení rozlišení grafu	14
Obr. 5.4: Textový výpis prohledávání kanálů4	14
Obr. 5.5: a) Výběr kanálu pro analýzu, b) volba řazení nalezených uzlů4	15
Obr. 5.6: Možnosti řazení nalezených uzlů: a) žádné, b) podle adresy, c) podle RSSI4	15
Obr. 5.7: Neaktivní uzel 0x000D	16

Obr. 6.1:	Vliv naklopení antény: a) anténa ohnuta v kloubu, b) anténa napřímena 4	7
Obr. 6.2:	Graf závislosti RSSI na vzdálenosti d od vysílače 4	8
Obr. 6.3:	Výstup analyzátoru DaintreeNetworks, kde třetí sloupec je číslo kanálu, čtvrt sloupec hodnota RSSI, pátý sloupec kvalita přenosu LQI, šestý sloupec zdrojová adresa uzlu a poslední sloupec cílová adresa	ý .9
Obr. 6.4:	Výstup vyvíjeného analyzátoru 4	9
Obr. 6.5:	Graf závislosti napětí Ni-MH akumulátorů na čase	1

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Používaná frekvenční pásma a typy modulace	. 19
Tab. 3.1: Registr PHY_RSSI	. 30
Tab. 3.2: Registr PHY_ED_LEVEL.	. 31
Tab. 3.3: Registr PHY_CC_CCA.	. 33
Tab. 3.4: Seznam kanálů registru 0x08	. 33
Tab. 4.1: Parametry modulu IRIS.	. 35
Tab. 4.2: Seznam součástek hlavní DPS	. 36
Tab. 4.3: Vývody rozšiřujícího konektoru	. 37
Tab. 5.1: Tabulka pro odečtení RSSI z grafu	. 44
Tab. 6.1: Naměřené hodnoty RSSI v otevřeném venkovním prostoru	. 48
Tab. 6.2: Vypočtená maximální spotřeba analyzátoru se zapnutým podsvícením	. 50

# ÚVOD

Bezdrátové senzorové sítě jsou považovány za jednu z nejmodernějších technologií 21. století. Existuje celá řada výzkumných aktivit, které se zaměřují na jejich rozvoj a rozšíření. Za jednu z největších příležitostí pro jejich využití jsou v současnosti považovány inteligentní města a budovy, pozitivní přínos lze spatřit také v průmyslové automatizaci, lékařství, vojenství a v mnoha dalších odvětvích lidské činnosti. Senzorové sítě mohou pomoci k zvýšení kvality života obyvatel a odstranit některé nedostatky drátových sítí. Tato technologie sebou přináší celou řadu výzev, které bude nutné řešit. Senzorové sítě budou v budoucnosti hrát nenahraditelnou roli a zcela ovlivní způsob našeho života.

Pro získání teoretických znalostí podávají první kapitoly vysvětlení týkající se senzorových sítí, charakterizuje jejich základní komponenty a parametry. Dále se diplomová práce zabývá souhrnným popisem standardu IEEE 802.15.4, který vytváří základní pravidla pro řízení a funkčnost bezdrátových senzorových sítí. Standard IEEE 802.15.4 definuje základní vrstvy komunikačního modelu, mezi které patří fyzická vrstva a podvrstva řízení přístupu na médium MAC. Tematicky zaměřené podkapitoly následně charakterizují proces přenosu dat v rámci senzorové sítě, požadavky na zajištění fungování spojení, operační módy standardu IEEE 802.15.4 a řadu dalších nezbytných charakteristik. Pozornost je věnována také podporovaným zařízením sítě LR-WPAN a druhům síťové topologie, které MAC vrstva podporuje.

Na základě vlastního studia uvedené literatury a získaných zkušeností si tato diplomová práce klade za cíl vytvoření přenosného rádiového analyzátoru sítí IEEE 802.15.4. Popisem použitých komponent (senzorová jednotka, LCD displej, desky plošných spojů atd.) a potřebného softwaru (aplikační balík MAC stack a AVR Studio 5) dochází k vytvoření podkladu pro realizaci vlastního rádiového analyzátoru.

Cílem práce je tedy navržení funkčního přenosného analyzátoru bezdrátové sítě splňující standard IEEE 802.15.4, jež podává informace o základních rádiových parametrech komunikujících jednotek. Požadavkem je zobrazení 16 bitové adresy uzlu, výkonové úrovně přijímaného signálu RSSI a kvality přenosu, která je indikována parametrem LQI. Tyto základní charakteristiky budou zobrazeny na displeji analyzátoru. Navrhovaný analyzátor bude možné využít pro zjištění dosahu rádiové sítě a získání informací o stávajících sítích.

# 1 BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

### 1.1 Popis bezdrátových senzorových sítí

Bezdrátové senzorové sítě (Wireless Sensor Network - WSN) jsou považovány za jednu z nejdůležitějších technologií 21. století. V posledních letech zaznamenává tato technologie rychlý rozvoj, probíhá celá řada výzkumných aktivit zaměřených na rozvoj a rozšíření bezdrátových senzorových sítí. Díky pokroku ve vývoji MEMS technologií (Microelectromechanical systems) a bezdrátové komunikaci nabízí použití malých, levných a chytrých senzorů nebývalé možnosti pro nespočet civilních i vojenských způsobů využití. Je bezpochyby zřejmé, že senzorové sítě budou v budoucnosti používány v mnoha civilních oborech a zcela tak ovlivní způsob našeho života.

Pojem bezdrátová senzorová síť je v knize Wireless Sensor Network [4] definována jako infrastruktura, která se skládá z nejrůznějších měřících, výpočetních a komunikačních prvků, které správci dané sítě umožňují sledovat, dokumentovat a reagovat na vzniklé situace a jevy ve specifickém prostředí (fyzický nebo i internetový svět). Pojmem správce se rozumí osoba, administrátor, která sleduje své zájmy v oblasti civilní, vojenské, obchodní nebo průmyslové.

Každá senzorová síť se skládá ze čtyř základních složek:

- z komplexu rozptýlených nebo lokalizovaných senzorů,
- z propojovací komunikační sítě mezi senzory v převážné většině případů založená na bezdrátové komunikaci,
- z centrálního bodu tzv. koordinátoru, jenž zajišťuje shromažďování a komplementaci informací,
- a v neposlední řadě z množiny výpočetních zdrojů soustředěných v centrálním bodě, které zajišťují korelaci dat a získávají informace o stavu sítě a zjišťovaných datech.

## 1.2 Základní charakteristiky senzorové sítě

Typická WSN se skládá z velkého množství levných, multifunkčních a energeticky méně náročných uzlových senzorů. Tyto uzly jsou vybaveny senzory, vestavěnými mikroprocesory a rádiovou částí, které se vyznačují nejen schopností informace snímat, ale také data zpracovávat a dále je odesílat. Komunikují skrze bezdrátovou síť na krátkou vzdálenost a navzájem spolupracují, aby si dokázaly danou informaci předat.

Bezdrátové senzorové sítě mají následující unikátní charakteristiky a určení [5]:

- Topologie senzorové sítě. Jedná se o vlastní rozmístění senzorů a jejich vzájemné propojení. Může docházet k častým změnám v topologii v důsledku uzlových selhání, poškození, vyčerpání energie nebo slábnutí signálu.
- Propojenost sítě je klíčová pro určení, které uzly senzorové sítě jsou ve vzájemném kontaktu v průběhu komunikace a zda během procesu dochází k přerušení komunikace.
- Pokrytí a velikost sítě. Tyto charakteristiky definují vzájemné propojení a hustotu rozmístění senzorů uvnitř sítě v rámci jedné oblasti.
- Způsob komunikace. Senzorový uzel může komunikovat nejen rádiově, ale také pomocí světelných či zvukových signálů.

Senzorové sítě se od ostatních bezdrátových sítí liší v celé řadě charakteristik a parametrů [9]:

- Hustá síť komunikačních uzlů. Senzorová síť se vyznačuje vyšším počtem senzorových uzlů.
- Bateriové napájení. Senzorové uzly jsou velmi často napájeny elektrochemickými zdroji energie bateriemi.
- Omezení. Bezdrátová senzorová síť je velmi omezená, co se týče zdrojů energie, rychlosti výpočtních operací a paměťové kapacity. Vyznačuje se nižší rychlostí přenosu dat a rozdílnou velikostí komunikačních rámců. Je zaměřena především na sběr a vyhodnocování dat.
- Autentizační schopnost. Způsob začlenění senzorového uzlu do komunikační sítě může probíhat automaticky.
- Nespolehlivost. V mnoha případech tyto senzory pracují v nepříznivém prostředí bez obsluhy, kde hrozí fyzické poškození nebo i selhání.
- Klíčovou roli v senzorových sítích hraje kvalita použitých algoritmů, které slouží pro řízení při přenášení a získávání potencionálně velkého množství informací.
- Aplikační specifika. Senzorové sítě jsou navrhovány pro specifické aplikace, z tohoto důvodu i vlastní návrh sítě by měl být přizpůsoben vlastní aplikaci.

## 2 STANDARD IEEE 802.15.4

Bezdrátové senzorové sítě jsou založeny na standardu IEEE 802.15.4, který definuje parametry fyzické a linkové vrstvy. V případě stavby složitějších sítí mohou být implementovány protokoly vyšších vrstev, mezi které patří mimo jiné protokol ZigBee, definující síťovou a aplikační vrstvu [4]. Standard IEEE 802.15.4 specifikuje bezdrátové sítě s nízkou přenosovou rychlostí, malou spotřebou energie a celkově nízkými náklady. Všechna tato specifika vyhovují požadavkům senzorových sítí.

Protokol IEEE 802.15.4 definuje fyzickou vrstvu (PHY – Physical Layer) pro nízko-rychlostní bezdrátové sítě označované LR WPAN (LR-WPAN - Low-Rate Wireless Private Area Networks) a podvrstvu pro řízení přístupu na médium (MAC –Medium Access Control).

ZigBee protokol specifikuje vrstvy, které se nacházejí nad standardem IEEE 802.15.4. Jedná se o síťovou vrstvu (NWK – Network Layer) řešící směrování a bezpečnost a aplikační vrstvu (APL - Application Layer) určující konkrétní funkci zařízení. Protokol ZigBee ve spojení se standardem IEEE 802.15.4 vytváří plnohodnotný způsob bezdrátové komunikace s nízkými náklady a nízkými požadavky na energii, která může být využita po celém světě.

Následující obrázek přibližuje vztah standardu IEEE 802.15.4 a protokolu Zigbee [4].



Obr. 2.1: Jednotlivé vrstvy definované dle standardů IEEE 802.15.4 a ZigBee.

## 2.1 Zásady standardu IEEE 802.15.4

### 2.1.1 Podporovaná zařízení sítě LR-WPAN

Síť LR-WPAN dle standardu IEEE 802.15.4 podporuje dva typy zařízení [4]:

- Plně funkční zařízení (FFD Full Function Device), které implementuje celou linkovou vrstvu (MAC vrstva). FFD podporuje tři operační módy, ve kterých působí jako:
  - PAN koordinátor (PAN-C Personal Area Network Coodinator)
     označuje zařízení sloužící jako hlavní řídící prvek vlastní sítě PAN, do které mohou být připojena další zařízení.
  - Koordinátor (C Coordinator) sám o sobě vlastní síť netvoří, vždy musí být přiřazen k některé PAN síti. Jeho hlavním úkolem je směrování dat a organizace sítě.
- Zařízení s omezenou funkčností (RFD Reduced Function Device). Jedná se o zařízení, které pracuje za pomoci minimální implementace protokolu IEEE 802.15.4. RFD se ve své podstatě zaměřuje na aplikace s minimální paměťovou a výpočetní kapacitou, jako jsou například přepínače světel, pasivní senzory a další jednoduchá zařízení. RFD zařízení je nutné zapojit pouze k jednomu FFD.

Každá takováto síť LR-WPAN musí obsahovat přinejmenším jedno zařízení FFD, které plní úlohu PAN koordinátora, čímž se umožní synchronizace služeb v síti a zajistí řízení všech začleněných FFD a RFD zařízení uvnitř senzorové sítě.

## 2.1.2 Síťová topologie

Dle standardu IEEE 802.15.4 podporuje vrstva MAC dvě základní síťové topologie, a to topologii Hvězda (Star Topology) a obecnou Mesh síť (Peer-to-Peer Topology). Speciálním případem je také často se objevující topologie Strom (Cluster-Tree Topology), která je odvozená od topologie Mesh [4].

#### Topologie Hvězda

Tato topologie probíhá na základě centralizované komunikace, což znamená, že každé zařízení v síti posílá data centrálnímu uzlu PAN-C, který dále zajistí vlastní doručení příjemci. PAN koordinátor je během komunikace velmi vytížen, proto je nutné jeho stálé napájení. Dle standardu IEEE 802.15.4 je tato topologie nevhodná pro bezdrátové senzorové sítě z důvodu vysoké spotřeby elektrické energie.



Obr. 2.2: Topologie Hvězda.

#### **Topologie Peer-to-Peer**

Jedná se o síťovou topologii, která se vyznačuje svoji decentralizovaností. Každé zařízení může komunikovat s kterýmkoliv dalším přes mezilehlé uzly. Výhodou je lepší rozložení zátěže mezi jednotlivé uzly sítě. Na druhou stranu tato síť vyžaduje větší složitost směrovacích protokolů, které se týkají převážné síťové vrstvy (NWK).



Obr. 2.3: Topologie Peer-to-Peer.

#### **Topologie Cluster-Tree**

Cluster-Tree topologie je zvláštním případem obecné topologie Peer-to-Peer, ve které se nachází převážně FFD zařízení. Jednotlivé uzly představují RFD zařízení a funkci řídích center plní PAN koordinátor. Každý koordinátor je spojen hierarchicky s nadřazeným či podřazeným koordinátorem. Výhodou takového uspořádání je využití snadnějších směrovacích protokolů a možnost vytvoření velmi rozsáhlé senzorové sítě.



Obr. 2.4: Topologie Cluster-Tree

## 2.2 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva slouží ke dvěma základním činnostem – k přenosu dat a také k řízení fyzického spoje. Obě tyto služby jsou následně v přístupových bodech k síťové službě SAP (Service Access Point) poskytovány vyšším vrstvám.

#### 2.2.1 Přenos dat ve fyzické vrstvě

Podstata přenosu na fyzické vrstvě spočívá ve vysílání a příjmu datových rámců PPDU (PPDU - Physical Packet Data Unit). Standard IEEE 802.15.4 nabízí použití tří základních frekvenčních pásem [8]:

- 16 kanálů na frekvenci mezi 2,4 GHz až 2,4835 GHz při rychlosti přenosu dat 250 kbps,
- 10 kanálů na frekvenci 915 MHz až 928 MHz s rychlostí až 40 kbps,
- jeden samostatný kanál na frekvenci mezi 868 MHz a 868,6 MHz s přenosovou rychlostí 20 kbps.

Zmíněná frekvenční pásma a jejich základní použité modulace jsou uvedeny v následující tabulce.

РНҮ	Modulace	Frekvenční rozsah	Chip rate	Symbol rate	Přenosová rychlost	
[MHz]	-	-	[kchip/s]	[ksymb/s]	[kbps]	
969/01E	BPSK	868-868,6	300	20	20	
808/913		902-928	600	40	40	
2400	O-QPSK	2400-2483,5	2000	62,5	250	

Tab. 2.1: Používaná frekvenční pásma a typy modulace.

Každý datový rámec fyzické vrstvy PPDU je složen ze tří částí:

- SHR (Start of Header) první 4 B tzv. návěští slouží pro synchronizaci přijímače s vysílačem. SFD (Start of Frame Delimeter) značí konec návěští a indikuje začátek pole, který nese informace o délce rámce,
- PHR (PHY Header) obsahuje informace o délce rámce,
- PSDU (Physical Service Data Unit) jedná se o vlastní přenášená data obsažená v rámcích vyšších vrstev.



Obr. 2.5: Datová jednotka fyzické vrstvy PPDU.

## 2.2.2 Řízení fyzického spoje

Tato služba je zajištěna podvrstvou, která se značí jako entita správy fyzického spoje (PLME - Physical Layer Management Entity). PLME se stará o funkčnost rádiového přijímače, detekci energie na frekvenčním kanále, určení kvality přijatých paketů a zjištění obsazených kanálů.

Souhrnně tedy zodpovědnost fyzické vrstvy standardu IEEE 802.15.4 spočívá v následujících bodech [4][8]:

- Aktivaci a deaktivaci rádiového zařízení zařízení operuje ve třech stádiích, a to vysílání, příjem a spánek.
- Detekci energie aktivního signálu (ED Energy Detection) určení energie bývá využito k výběru přenosového kanálu a také k definici síly přijatého signálu RSSI. Doba měření energie na kanále se rovná době, která je nezbytná pro obdržení 8 symbolů. K identifikaci volného kanálu dochází v případě, kdy energie tohoto kanálu dosahuje hodnot nejméně o 40dBm větších než je naměřená citlivost přijímače.
- Vyhodnocení kvality přijatých paketů (LQI Link Quality Indicator) tento parametr je určen pomocí ED aktivního kanálu nebo pomocí odstupu signálu od šumu (SNR – Signal Noise Ratio), možná je také kombinace obou metod.
- Zjišťování volných kanálů (CCA Clear Channel Assessment) pro metodu

CSMA-CA probíhá ve třech operačních módech:

- CCA Mode 1 detekce energie (CCA informuje o překročení určité stanovené meze energetické úrovně na kanále (ED threshold),
- CCA Mode 2 detekce nosných vln (CCA informuje o nalezení signálu se shodnou modulací),
- CCA Mode 3 detekce nosné s energií nad stanovenou mez (jedná se o kombinaci dvou výše zmíněných metod).
- Výběr frekvenčních kanálů standard IEEE 802.15.4 definuje 27 bezdrátových kanálů.
- Příjem a vysílání dat.

Všechny tyto skupiny signálů jsou založeny na technice přímého rozprostření spektra pomocí techniky DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). K rozprostření signálu dochází pomocí redundance, z důvodu zvýšení spolehlivosti a zabezpečení spoje. Přenášená data se dělí na symboly doplněné o další bity a takto rozšířené symboly se označují jako čipy.

## 2.3 Linková vrstva MAC

Vrstva MAC vytváří rozhraní mezi fyzickou vrstvou a dalšími vyššími vrstvami nízko-rychlostních bezdrátových sítí LR-WPAN.

## 2.3.1 Rámec MAC vrstvy

Rámec linkové vrstvy se nazývá MPDU (Mac Protocol Data Unit) a skládá se z těchto částí [1]:

- Kontrola rámců (Frame Control) jedná se o kontrolní pole definující typ rámce, který může být:
  - o příkazový,
  - o potvrzovací,
  - o signalizační,
  - o datový.
- Sekvenční číslo rámce (Sequence Number) vzájemně od sebe odlišuje data.
- Adresa zdrojového a cílového uzlu (Address Info) uvádí informace o adrese zdrojového a cílového uzlu a PAN.
- Přenášená data včetně hlaviček z vyšších vrstev (MSDU Mac Service Data Unit).

• Kontrola rámce (Frame Check).

Získání zdrojové a cílové adresy uzlů je popsáno v kapitole 3.3.2.

	MAC Protocol Data Unit (MPDU)														
	MAC Header (MHR)								MAC Service Data Unit (MSDU)				DU)	MAC Footer (MFR)	
Frame Control Field	Sequen Numbe	ce r		Ad	Idressing	g Fields				MA	AC Payloa	ad		FCS	
$\square$	<1 B	$\rightarrow$													
		D	estination PANID	Desti add	nation Iress	Source PANID	e s	ource ddress							CRC-16
				4 - 20 B					<	r	max. 10	2 B	$\longrightarrow$	<	2 B
						Fra	ame Co	ntrol Fie	ld						
Frame Type			Sec. Enab.	Frame Pend.	ACK req.	PAN Compr.		Reserved Dest. Reserved address.mode		rved	Source	address. ode			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
←								2 B							$\rightarrow$

Obr. 2.6: Datová jednotka MAC (MPDU).

### 2.3.2 Služby poskytované MAC vrstvou

MAC vrstva poskytuje následující služby [8]:

- V komunikaci vytváří síťovou infrastrukturu a napomáhá vzájemnému efektivnímu sdílení rádiového kanálu mezi účastníky.
- Řídí přístup ke komunikačnímu kanálu.
- Validuje a potvrzuje datové rámce.
- Začleňuje uzly do sítě.
- Může také vytvářet správu garantovaných časových úseků GTS (Guaranteed Time Slots), což znamená možnost každého zařízení zarezervovat si určitý časový úsek pro přenos.

## 2.3.3 Řízení přístupu na médium

Standard IEEE 802.15.4 [4] definuje volitelné využití super-rámce. Struktura super-rámce je určena PAN-koordinátorem. Začátek a konec rámce je definován signalizačními zprávami a dělí se do aktivní a neaktivní periody.





Přenos dat v síti se uskutečňuje vždy po dobu aktivní periody. Tento aktivní časový úsek se dělí na [4][8]:

- Synchronizační kanály k jejich vyslání dojde vždy na počátku v časovém slotu
  0. Slouží k prvotní synchronizaci uzlů a k přenosu provozních informací.
- CAP (Contention Access Period) je doba prvních 16 slotů, v níž dochází k soupeření uzlů o přístup na kanál pomocí protokolu CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Contention Avoidance). Minimální doba trvání potřebná k odeslání příkazů pro přístup na médium musí být delší než doba potřebná k odeslání 440 symbolů. Pokud je tato doba kratší, dochází k přerušení přenosu a uzel čeká na příchod dalšího superrámce.
- CFP (Contention Free Period) část bez soupeření o přístup. Jedná se o časový úsek vyhrazený prioritně pro rezervované přenosy, které definuje PAN-koordinátor. Tyto garantované sloty se označují jako GTS (Guaranteed Time Slots) a k jejich vzniku dochází vyčleněním rezervovaných X slotů z původního CAP. Rezervaci provádí PAN-koordinátor pouze pro ED uzly. Každé zařízení může mít nejvíce jednu aktivní rezervaci v obou směrech a k jejímu zrušení dochází ihned po ukončení využívání časového úseku.

Neaktivní doba je definována dobrovolně, obsahuje sloty pro uzly, které jsou v režimu spánku.

Za každým datovým přenosem jsou dle standardu IEEE 802.15.4 definovány také tzv. mezirámcové intervaly (IFS – InterFrame Spacing). Důvodem je zohlednění prodlev způsobených fyzickou vrstvou a doba trvání intervalu je dána velikostí přenášeného rámce.

### 2.3.4 Operační módy IEEE 802.15.4

Obecně lze říci, že MAC protokol podporuje dva operační módy – s povoleným nebo nepovoleným beacon rámcem dle [4].

#### Beacon-enabled mód

V tomto módu je vynuceno použití super-rámcové struktury k řízení komunikace mezi zařízeními., které se nacházejí v PAN síti. Formát super-rámce definuje koordinátor sítě, který jej dále přeposílá v periodickém čase ostatním zařízením prostřednictvím beacon rámce. Super-rámec je rozdělen do 16 stejně velkých slotů, za nimiž následuje předdefinovaná neaktivní doba.

#### Non Beacon-enabled mód

Pokud koordinátor sítě zvolí takový režim, kdy se nevyužívají žádné beacon rámce, použije se pro řízení přístupu na médium tzv. bezeslotová (unslotted) CSMA/CA metoda. Pomocí této přístupové metody budou odeslány všechny odchozí rámce, vyjma potvrzovacích rámců a dat následujících hned za nimi.

## 3 VÝVOJ ANALYZÁTORU IEEE 802.15.4

V následujících kapitolách jsou popsány kroky, které byly realizovány k sestrojení prvního prototypu rádiového analyzátoru sítí dle standardu IEEE 802.15.4. V první části jsou uvedeny existující produkty různých společností, zabývající se tématikou analýzy sítí 802.15.4, ZigBee®, ZigBee® RF4CE a 6LoWPAN.

Dále se tato kapitola zabývá popisem základních funkcí a parametrů vyvíjeného analyzátoru, na které navazuje postup získávání měřených dat jednotkou MEMSIC IRIS.

## 3.1 Komerční analyzátory sítí 802.15.4

Bezdrátové senzorové sítě s nízkým vysílacím výkonem jsou momentálně pro řadu velkých společností velmi aktuálním tématem. Integrovaná jednočipová řešení vyvíjí a vyrábí společnosti Atmel, Texas Instruments, Freescale, Microchip a mnoho dalších. O mnoho více je potom společností, které na těchto čipech staví svoje vlastní produkty a analyzátory, jmenovitě Deeter Group, DaintreeNetworks, Perytons a další. V následujících kapitolách budou zmíněny jen některé z nich, především pak ty, které se nejvíce podobají tématu této diplomové práce.

## 3.1.1 Nástroj pro analýzu bezdrátové senzorové sítě od společnosti The Deeter Group

Zařízení od společnosti The Deeter Group se svými možnostmi použití jako jediné na trhu nejvíce podobá vyvíjenému rádiovému analyzátoru, protože se jedná taktéž o přenosné zařízení. Měřící sada obsahuje hlavní stanici a jeden vysílač. Podle dokumentace pracují obě zařízení v pásmu 2,4 GHz a plně vyhovují standardu 802.15.4.

Hlavní stanice slouží především pro měření kvality rádiové linky LQI a detekci stavu přenosu rámců v zamýšlené budoucí lokalitě bezdrátového senzoru. Proto je k hlavní stanici dodáván i vysílač, který je třeba umístit do počátečního bodu rádiové sítě. Pomocí hlavní stanice je potom možné určit přibližný dosah rádiové sítě a stanovit vlivy prostředí na šíření rádiového signálu. V popisu zařízení se dále uvádí, že je zkonstruováno pro použití s jakoukoliv bezdrátovou sítí pracující podle standardu 802.15.4 a v pásmu 2,4 GHz. Zařízení nevyžaduje žádný přídavný software a dosah je udáván až 1000 m.



Obr. 3.1: The Deeter Wireless Site Survey Tool. Převzato z [15].

### 3.1.2 Paketové a rádiové analyzátory 802.15.4

Většina analyzátorů senzorových sítí je řešena formou aplikace na PC, která přijímá data z přijímače připojeného přes USB port. Takové analyzátory vyrábějí mimo jiné společnosti DaintreeNetworks, BzWorks nebo Perytons.

Výhodou softwarových senzorových analyzátorů je bezesporu větší výpočetní výkon, možnost zobrazit topologii celé sítě a schopnost zachytit a uchovat všechny přijaté rámce pro pozdější analýzu. Bez rozdílu výrobce se všichni orientují na standard 802.15.4 verze 2003 i 2006, protokol ZigBee nebo 6LoWPAN [15][16][17]. V laboratořích VUT se využívá analyzátor DaintreeNetworks Sensor Networ Analyzer (SNA), který se již nevyrábí, ačkoliv je velmi dobře zpracován.



Obr. 3.2: a) Prostředí DaintreeNetworks přavzato z [15], b) BzWorks převzato z [16].

## 3.2 Požadované funkce a parametry analyzátoru

Navrhovaný rádiový analyzátor by měl pracovat v pásmu 2,4 GHz a především splňovat standard IEEE 802.15.4. V daném frekvenčním pásmu jsou definovány kanály 11 až 26. Analyzátor by měl být schopen tyto kanály postupně projít a zobrazit jejich obsazenost. Na základě výsledku skenování kanálů bude mít uživatel možnost zvolit kanál, na kterém bude zařízení naslouchat a sledovat provoz. Sledování provozu bude probíhat formou výpisu 16 bitových adres komunikujících uzlů, vypočtených hodnot výkonové úrovně přijímaných platných rámců 802.15.4 (RSSI) a kvality přenosu LQI. Základní princip obecného rádiového analyzátoru je možné vidět ve vývojovém diagramu na Obr. 3.3.

Aby mohly být tyto cíle splněny, program analyzátoru musí umět korektně přijmout rámec 802.15.4, z něj vyčíst pole adresy a stanovit hodnotu LQI a RSSI.



Obr. 3.3: Vývojový diagram programu analyzátoru.

## 3.3 Implementace IEEE 802.15.4 od společnosti Atmel

Aplikační balík MAC 802.15.4 [2] od společnosti Atmel je možné si představit jako základní funkční prostředí pro vývoj aplikací pro mikrokontroléry (MCU) Atmel. Balík poskytuje hotové funkce pro konfiguraci MCU, rádiového čipu, sestavení rádiové 802.15.4 sítě, příjem rámců, obsluhu V/V portů atd. Součástí balíku je také několik ukázkových aplikací pro celé portfolio produktů Atmel reprezentující jednotlivé možnosti využití bezdrátových sítí 802.15.4. Tyto aplikace se mohou dále upravovat

a přizpůsobovat pro různá řešení. Konkrétně pro vývoj vlastního programu rádiového analyzátoru byla využita aplikace "Promiscuous\_Mode\_Demo", jež pracuje v režimu příjmu a po sériové lince posílá do konzole přijaté rámce.

## 3.3.1 Základní architektura

Základní architektura balíku MAC se skládá ze tří hlavních vrstev:

- Platform Abstraction Layer (PAL),
- Transceiver Abstraction Layer (TAL),
- MAC Core Layer (MCL).

#### Platform Abstraction Layer (PAL)

PAL vrstva obstarává základní funkcionalitu pro podporované platformy a zároveň poskytuje rozhraní pro vyšší vrstvy. Pro každý mikrokontrolér existuje samostatná implementace PAL vrstvy, přičemž jednotlivé rádiové jednotky používající daný procesor potřebují být adaptovány pomocí konfiguračního souboru *pal\_config.h.* 

PAL vrstva poskytuje rozhrání pro následující komponenty:

- přístup k rádiovému modulu,
- kontrola přerušení,
- časovače,
- podpora vstupů a výstupů (I/O),
- přístup k trvalé paměti EEPROM,
- ovládání LED a tlačítek.

Jednotlivé funkce pro použití v aplikacích je možné nalézt v souboru *PAL/Inc/pal.h.* 

#### **Transceiver Abstraction Layer (TAL)**

Tato vrstva obsahuje specifické funkce pro přímou podporu standardu 802.15.4 MAC a poskytuje rozhraní pro vrstvu MAC Core Layer (MCL). Pro každý rádiový čip existuje jedna konkrétní implementace TAL.

#### TAL vrstva obsahuje komponenty:

- jednotku pro posílání rámců,
- jednotku pro příjem rámců,
- stavový automat,
- prostor pro ukládání různých parametrů (PIB),

- kolizní modul CSMA/CA,
- detekci energie na kanále,
- správu napájení,
- správu přerušení,
- inicializaci a restart zařízení.

Vrstva TAL pro svoji činnost využívá služeb vrstvy PAL, které jsou potřeba například pro posílání rámců. Jednotlivé funkce pro použití v aplikacích je možné nalézt v souboru *TAL/Inc/tal.h*.

#### MAC Core Layer (MCL)

Vrstva MCL vychází ze specifikace IEEE 802.15.4-2006, zajišťuje podporu pro nonbeacon-enabled a beacon-enabled sítě. Aplikační rozhraní MCL plně odpovídá tomuto standardu.

### 3.3.2 Určení zdrojové adresy uzlu

Zdrojová adresa uzlu se přenáší v adresním poli zdrojová adresa (Source address) datové jednotky MPDU. Adresní pole dále nese informaci o cílové síti (Destination PAN ID), cílové adrese (Destination address) a zdrojové síti (Source PAN ID). Podle struktury MAC rámce z Obr. 2.6 začíná adresní pole za třetím bajtem MPDU, přičemž velikost adresního pole je proměnná veličina závislá na několika faktorech. Pokud zařízení komunikují mezi sebou v rámci jedné sítě, mají možnost použít kompresi adresy sítě (PAN Compression) nastavením příslušného pole na hodnotu 1, čímž se ušetří 2 B dat adresního pole, protože adresa sítě bude přenášena jen v poli cílová adresa a zdrojová síť zůstane nulová. Dále záleží na velikosti zdrojové a cílové adresy, jelikož mohou nabývat hodnot 0, 64 nebo 128 bitů.

Ve vytvářeném programu pro mikrokontrolér ATmega1281 se předpokládá používání 64 bitových adres, které dostačují pro adresaci 256 zařízení. Zdrojová adresa přijatého rámce se získá zavolání funkce *app\_parse\_data.src\_addr.short\_address*, která vyhledá pole zdrojové adresy a vrátí jeho 64 bitovou hodnotu.

## 3.3.3 Úroveň signálu RSSI, detekce energie na kanále

Rádiový přijímač provede po přijetí rámce automatickou kontrolu FCS (Frame Check Sequence). Hlavními body kontroly FCS jsou [1]:

- indikace chyb během přenosu pomocí kontrolního součtu CRC délky 16 bitů,
- automatická kontrola během příjmu rámce.

Funkce FCS tedy spočívá v detekci poškozených rámců. Každý přijatý rámec je zkontrolován a výsledek kontroly se uloží do bitu RX\_CRC\_VALID registru 0x06 (PHY\_RSSI).

#### **Registr PHY\_RSSI**

Registr 0x06 slouží pro indikaci výkonové úrovně signálu přijatého rámce (RSSI) a kontrolu jeho validity. Registr má délku 8 bitů a je rozdělen do tří částí, viz. Tab. 3.1. V bitech 4 až 0 je uložena hodnota měření RSSI, která se každé 2  $\mu$ s obnovuje. Tato hodnota reprezentuje vstupní výkon na přijímači v dBm v rozmezí 0 až 28 s krokem 3 dB. RSSI s nulovou hodnotou znamená, že vstupní výkon je nižší než hodnota *RSSI\_BASE\_VAL*, která je typicky -91 dBm v případě rádiového čipu AT86RF230 [1]. Hodnota *RSSI\_BASE\_VAL* představuje hranici výkonu na vstupu přijímače pro stanovení hodnoty RSSI. Výkon na vstupu přijímače  $P_{RF}$  [dBm] je možné vypočítat pomocí vzorce:

$$P_{RF} = RSSI\_BASE\_VAL + 3 \cdot (RSSI - 1) \tag{3.1}$$

Tab. 3.1: Registr PHY\_RSSI.

Bit	7	6 5		4	3	2	1	0	
0x06	RX_CRC_VALID	rezervováno		RSSI					
Čtení/Zápis	Č	č č		č	č	č	č	Č	

#### Čtení z registru RSSI

Vyvíjená aplikace analyzátoru využívá registr PHY\_RSSI během prohledávání kanálů v režimu textového výpisu, kdy je potřeba stanovit nejvyšší detekovanou hodnotu energie aktuálně prohledávaného kanálu. Tuto hodnotu vypočte funkce *get\_ed\_level*.

Výpis kódu 3.1: main.c - funkce get\_ed\_level()

Funkce aplikačního balíku MAC stack *pal\_trx\_bit\_read* slouží pro čtení zvoleného rozsahu bitů z určeného registru. Pro přečtení spodních 5 bitů registru RSSI, ve kterých je uložena hodnota RSSI, byla použita bitová maska 0x1F, počátek byl zvolen 0 a samotným registrem je RG\_PHY\_RSSI. Zavoláním takto zapsané funkce se získá číselná hodnota 0 – 28, kterou je nutné podle vzorce 3.1 přepočíst na hodnotu výkonu v jednotkách *dBm*. Následuje podmínka, která porovnává, zda je nově získaná hodnota výkonu na vstupu přijímače vyšší než předchozí uložená hodnota a pokud ano, zapíše se nová hodnota do proměnné *max\_ed*. Po přepnutí rádiového čipu na další kanál se proměnná *max\_ed* vrací na počáteční hodnotu -92 dBm, která představuje signál s nižším výkonem než je hranice citlivosti přijímače. Funkce *get\_ed\_level* se během prohledávání kanálů volá tak často, jak rychle je procesor schopen procházet celý program.

Podmínka kontrolující hodnotu proměnné  $ed_val$  nerovnající se mínus jedné je v kódu proto, že v některých případech funkce  $pal_trx_bit_read$  vrací samé jedničky a získaná hodnota RSSI je potom mimo rozsah 0 - 28.

#### **Registr PHY\_ED\_LEVEL**

Registr 0x07 je obdobou registru PHY\_RSSI a i jeho funkce spočívá v měření výkonu na přijímači. Hodnota ED se automaticky počítá průměrováním hodnoty RSSI přes 8 symbolů, tedy po dobu 128 µs. Spustit výpočet hodnoty ED je možné dvěma způsoby:

- ručně zápisem do tohoto registru,
- automaticky tím, že je detekováno pole SFD fyzického rámce.

Platné SFD pole je indikováno vyvoláním přerušení a přepnutím rádiového čipu do stavu RX\_START. Vypočtená hodnota ED level se do registru uloží 140 µs po zavolání požadavku na výpočet a je platná po dobu 224 µs od ukončení příjmu rámce (přerušení TRX\_END).

Rozsah registru 0x07 je 84 dB s krokem 1 dB a absolutní přesností ±5 dB. Hodnota 0 znamená, že signál na vstupu přijímače je pod hranicí citlivosti -91 dBm [1].

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0				
0x06	ED_LEVEL											
Čtení/Zápis	č	č	č	Č	č	Č	Č	č				

Tab.	3.2:	Registr	PHY_	_ED_	LEVEL.
------	------	---------	------	------	--------

#### Kvalita přijatých rámců LQI

Standard IEEE 802.15.4 definuje parametr LQI (Link Quality Control) pro určení míry kvality přijatých dat. Parametr LQI je číselná hodnota v rozmezí 0 až 255, přičemž 0 znamená nejnižší kvalita příjmu a 255 nejvyšší kvalita příjmu rámců. Minimální délka rámce pro platné stanovení LQI rádiovým přijímačem jsou dva oktety PSDU. Z hodnoty LQI lze také podle Obr. 3.4 stanovit chybovost přijatých rámců PER (packet error rate), která je určena podílem chybových rámců a celkového počtu všech přijatých rámců. Oproti hodnotě RSSI/ED se parametr LQI odlišuje v tom, že nijak neurčuje vstupní výkonovou úroveň signálu. LQI pouze indikuje, zda byl přenos rámce médiem rušen okolními vlivy či nikoliv. Rámec přijatý s výkonem 6 dB nad hranicí citlivosti přijímače tedy může mít LQI 255 a rámec s hodnotou RSSI -30 dBm například LQI 10. U protokolu ZigBee se parametry RSSI/ED a LQI používají pro stanovení nejlepší cesty mezi uzly.



Obr. 3.4: Graf závislosti chybovosti PER na parametru LQI. Převzato z [1].

#### 3.3.4 Nastavení rádiového kanálu

Frekvence aktuálního rádiového kanálu je uložena v registru 0x08 PHY\_CC\_CCA [1].

Změna kanálu se v MAC stacku provede pomocí konfiguračního příkazu:

Výpis kódu 3.2: main.c - přepnutí na jiný kanál

```
wpan mlme set req(phyCurrentChannel, &channel);
```

, kde proměnná channel je cílový frekvenční kanál.

Tab. 3.3: Registr PHY\_CC\_CCA.

Bit	7	6 5		4	3	2	1	0
0x06	CCA_REQUEST	CCA_I	MODE	CHANNEL				
Čtení/Zápis	č/z	č/z č/z		č/z	č/z	č/z	č/z	č/z

Rádiový analyzátor IEEE 802.15.4 pracující v pásmu 2,4 GHz může využívat kanály uvedené v Tab. 3.4. Není zde uveden kanál 0 rezervovaný pro pásmo 868 MHz a kanály 1–10 rezervované pro pásmo 915 MHz.

Tab. 3.4: Seznam kanálů registru 0x08.

Registr bit	Hodnota	Číslo kanálu	Střední frekvence [MHz]
	0x0B	11	2405
	0x0C	12	2410
	0x0D	13	2415
	0x0E	14	2420
	0x0F	15	2425
	0x10	16	2430
	0x11	17	2435
Kanál	0x12	18	2440
(CHANNEL)	0x13	19	2445
	0x14	20	2450
	0x15	21	2455
	0x16	22	2460
	0x17	23	2465
	0x18	24	2470
	0x19	25	2475
	0x1A	26	2480

#### 3.3.5 Režim spánku

Z důvodu úspory energie akumulátorů během nečinnosti je program analyzátoru doplněn o funkci, která přepne rádiový čip do režimu spánku v následujících případech:

- při návratu z analýzy zvoleného kanálu do hlavní nabídky analyzátoru,
- po skončení prohledávání kanálů v grafickém i textovém režimu.

Režim spánku byl doplněn na základě předpokladu, že po úspěšném dokončení prohledávání kanálů obsluha přístroje zkoumá výsledky obsazenosti těchto kanálů a k jejich posouzení potřebuje určitý čas. Během této doby by za normálních okolností rádiový čip odebíral proud až 16 mA. Proto se přijímač ihned po ukončení prohledávání

přepne do režimu spánku, aby byl jeho odběr proudu minimální. Podobný případ nastane při návratu z analýzy zvoleného kanálu do hlavní nabídky přístroje, proto se rádiový čip v hlavní nabídce také uvádí do režimu spánku.

Výpis kódu 3.3: main.c - přepnutí do režimu spánku

```
bool promiscuous_mode = false;
wpan_mlme_set_req(macPromiscuousMode, &promiscuous_mode);
bool rx_on_when_idle = false;
wpan_mlme_set_req(macRxOnWhenIdle, &rx_on_when_idle);
```

## 3.4 Programové vybavení

Pro vytváření aplikací a jejich nahrávání do modulu IRIS, ale i jiných MCU společnosti Atmel, slouží program AVR Studio 5. AVR Studio spolupracuje s širokou škálou podporovaných JTAG programátorů a vývojových kitů, přičemž přes některé typy umožňuje provádět i ladění programu, takže není potřeba nahrávat vyvíjenou aplikaci do flash paměti mikrokontroléru. Vlastní program analyzátoru byl do procesoru ATmega1281 nahráván přes vývojový kit Atmel STK600, který disponuje rozhraním JTAG. Samotná rádiová jednotka IRIS na sobě nemá vhodný konektor pro připojení programátoru, a proto je potřeba ji nejprve umístit do desky MEMSIC MIB-520, která již konektorem JTAG disponuje.

Velkou nevýhodou tohoto řešení je pouze absence režimu ladění (debug), takže veškeré provedené změny v aplikaci analyzátoru je možné testovat pouze kompletním přeprogramováním flash paměti IRIS.



Obr. 3.5: Rozšiřující deska MIB-520 s připojeným konektorem JTAG.

# **4 KONSTRUKCE ANALYZÁTORU**

## 4.1 Zařízení MEMSIC IRIS M2110

Senzorová jednotka IRIS od společnosti MEMSIC (dříve Crossbow) je řízena procesorem ATmega1281, který přes ISP sběrnici komunikuje s rádiovým čipem AT86RF230 kompatibilním se standardem IEEE 802.15.4. Zařízení je možné vidět na Obr. 4.1. Pro připojení periférií je k dispozici až 51 vstupně/výstupních portů s různou funkčností, sériová komunikace USART, I2C sběrnice a rozhraní JTAG pro programování MCU.

Tab. 4.1: Parametry modulu IRIS.

Flash paměť pro program	128 kB	
RAM	8 kB	
EEPROM	4 kB	
Sériová komunikace	UART	
AD převodník	10 bit	8 kanálů, 0–3V
Ostatní rozhraní	GPIO porty, I2C, SPI, JTAG	
Maximální odběr MCU	8 mA	
Maximální odběr AT86RF230	16 mA příjem	
Frekvenční rozsah	2405 až 2480 MHz	
Přenosová rychlost	250 kbps	
Vysílací výkon	Až 3 dBm	
Citlivost přijímače	-101 dBm	
Napájení	2,7–3,3 V	
Externí konektor	51-pin	

Výhodou této jednotky je přítomnost rozšiřujícího konektoru, na který je možné připojit LCD modul, indikační LED a mikrospínače pro ovládání programu. Vyvíjený analyzátor bude na LCD displeji zobrazovat data o nalezených rádiových modulech.



Obr. 4.1: Senzorová jednotka MEMSIC IRIS M2110.

## 4.2 Desky plošných spojů

Pro potřeby uchycení, napájení, zobrazování a ovládání analyzátoru byly vytvořeny dvě desky plošných spojů (DPS). Hlavní DPS obsahuje obvod pro stabilizaci napětí pro napájení jednotky IRIS, regulaci jasu displeje a ovládání podsvícení displeje. Dále je na ní umístěn konektor HIROSE pro uchycení jednotky IRIS a 16 pinová dutinková lišta pro připojení displeje.

Druhá DPS slouží pro ovládání programu analyzátoru a je osazena čtyřmi mikrospínači a dvěma LED.

### 4.2.1 Hlavní DPS

Tab. 4.2: Seznam součástek hlavní DPS.

Pro uchycení a napájení modulu IRIS a LCD displeje byla navržena hlavní DPS. DPS byla navržena v programu Eagle 6.1.0 a je zobrazena na Obr. 4.2.

Konektor	HIROSE DF9-51S-1V	C1, C2	Tantal 6,6 µF
T1	BC817-16	C3	10 µF
Stabilizátor	HT7130A-1	Trimr	lin. 10 kOhm



Obr. 4.2: a) Návrh hlavní DPS, b) osazená hlavní DPS.

#### Obvody napájení

Dle technické dokumentace potřebuje mikrokontrolér ATmega1281 při taktu 8 MHz napájecí napětí 2,7–5,5 V. Teoreticky by tedy bylo možné MCU dodávat energii přímo ze čtyř akumulátorů velikosti AA, které mají při zapojení do série a plném nabití celkové napětí přibližně 5,5 V. To ale není možné, protože komunikační jednotka IRIS

obsahuje i rádiový modul AT86RF230, který pro provoz potřebuje napětí 1,8–3,6 V. Z tohoto důvodu byl na DPS přidán stabilizační obvod HT7130A-1 s výstupním napětím 3 V s tolerancí ±5 %. Skutečné změřené výstupní napětí použitého stabilizátoru je 2,91 V a je přivedeno na padesátý pin konektoru. Pro správnou funkci stabilizátoru vyžaduje obvod HT7130A-1 vstupní napětí v rozmezí  $4 \le U_{IN} \le 24$  V. Plně tedy vyhovuje provozu ze čtyř akumulátorů AA, jejichž napětí je vyšší než 4 V. Aby se stabilizátor napětí nerozkmital a zároveň aby byla zajištěna nízká výstupní impedance stabilizovaného zdroje, jsou na vstupu a výstupu (v souladu s doporučeným zapojením) umístěny tantalové kondenzátory 6,6 µF s nízkou vlastní impedancí i pro vysoké kmitočty (tzv. blokovací kondenzátory).

Displej je připojen na přímo na svorkové napětí, protože vyžaduje minimální napětí 4,7 V a maximální napětí 5,5 V. Displej tedy bude zároveň fungovat jako indikace vybití akumulátorů, kdy při poklesu napětí pod 4,7 V bude hůře čitelný. Tato vlastnost je ověřena testem akumulátorů v kapitole 6.4. Pro nastavení kontrastu je na vstup V0 přivedeno napětí z lineárního proměnného odporu 10 kOhm. Podsvětlení displeje je realizováno přes tranzistor BC817-16, který je spínán proudem přes odpor 4k3 z pinu 26 přídavného konektoru. Obvod napájení podsvícení displeje je z důvodu omezení rušivých vlivů vyšších harmonických kmitočtů při zapnutí respektive vypnutí ošetřen blokovacím elektrolytickým kondenzátorem 10 µF.

#### Vývody konektoru

Konektor HIROSE DF9-51S-1V má k dispozici celkem 51 pinů. Pro potřeby analyzátoru jsou použity piny podle schématu v Tab. 4.3.

Pin	Funkce	ATmega1281	Pin	Funkce	ATmega1281
1	GND	GND	30	RS	PC1
3	Tlačítko 1	PE7	31	R/W	PC2
6	Tlačítko 2	PE4	32	Е	PC3
8	Zelená LED	PA0	33	DB4	PC4
9	Žlutá LED	PA1	34	DB5	PC5
24	Tlačítko 3	PB5	35	DB6	PC6
25	Tlačítko 4	PE2	14	DB7	PC7
26	Podsvětlení	PE3	50	Napájení	Vcc

Tab. 4.3: Vývody rozšiřujícího konektoru.

#### 4.2.2 DPS pro ovládání analyzátoru

Obslužný program analyzátoru je navržen tak, aby jej bylo možné ovládat pomocí tří tlačítek. První dvě tlačítka jsou uvažována ve funkci šipek nahoru a dolů a třetí tlačítko potvrzovací nebo pro návrat zpět do hlavní nabídky. Čtvrté tlačítko zapíná a vypíná podsvětlení displeje. Návrh desky je vidět na Obr. 4.3



Obr. 4.3: a) Návrh DPS pro ovládání analyzátoru, b) osazená deska.

Jako tlačítka jsou použity jednopólové SMD mikrospínače s délkou hmatníku 3,5 mm. LED jsou kulaté o průměru 3 mm, se svítivostí 3,5 mcd, při úbytku napětí 1,8 V a proudu 2 mA. Jednotlivé přívody označené GND, PE2, PB5, PE4, PE7, PA1 a PA0 jsou přes vodiče připojeny k odpovídajícím vývodům na hlavní DPS.

Mikrospínače jsou připojeny z výstupního portu MCU přímo na společnou zem, tedy při stisku tlačítka dojde ke změně stavu z Log 1 na Log 0 a v programu se provede příslušná akce.

Levá LED má zelenou barvu a slouží pro indikaci zapnutého stavu analyzátoru. Pravá LED je žlutá a signalizuje aktivitu přístroje během hledání obsazenosti kanálů nebo naslouchání na zvoleném kanále. Každá LED je připojena přes rezistor 820 Ohm, který nastavuje požadovaný pracovní bod diody.

## 4.3 Anténa

Nedílnou součástí rádiového analyzátoru je anténa, která by měla být přizpůsobena pro použité frekvenční pásmo 2,4 GHz. Aby výkon dodávaný anténou na vstup přijímače byl co největší, byl základní čtvrtvlnný monopól nahrazen všesměrovou anténou MIKROTIK pro pásmo 2,4/5,8 GHz se ziskem 2–4 dBi podle zdrojů [10] a [11].



Obr. 4.4: Všesměrová anténa  $\lambda/2$  se ziskem 2–4 dB a základní  $\lambda/4$  monopól jednotky IRIS.

Vliv použité antény na komunikační dosah analyzátoru je uveden v kapitole 6.2.

## 4.4 LCD displej

Všechny provozní informace jsou zobrazovány na LCD displeji MIDAS MC41605B6W-SPTLY [13] se čtyřmi řádky po šestnácti znacích. Přestože se jedná pouze o alfanumerický displej, umožňuje zobrazit jednoduché grafy a také nahrát až 8 vlastních znaků. Tento displej byl zvolen především kvůli příznivé pořizovací ceně 276 Kč a z důvodu přítomnosti řadiče SUNPLUS SPLC780D, který je kompatibilní s nejrozšířenějším řadičem znakových LCD displejů HD47780.

Pro komunikaci mezi procesorem a LCD displejem byl zvolen 4-bitový mód, který vyžaduje pouze čtyři datové vodiče z osmi, čímž se významně šetří místo na DPS a zároveň zůstane k dispozici více volných portů na konektoru HIROSE. Pro datovou komunikaci se tedy využívají datové vstupy DB4–7, přičemž řídící signály se přenášejí na vstupy RS, R/W a E. Nevyužité datové vstupy DB0–3 jsou připojeny na společnou zem, aby nezůstaly volné, tzv. ve vzduchu a nemohly náhodně způsobit nestabilní stav procesoru.

Plné svorkové napětí z akumulátorů je přivedeno mezi kladný vstup Vcc a společnou zem Vss. Kontrast displeje se nastavuje pomocí vstupu V0 přes dodávané napětí z lineárního trimru 10 kOhm.

LED podsvícení displeje má samostatné piny pro přivedení proudu, který je dodáván přes obvod s tranzistorem T1 na základě stisku tlačítka 4. Ve vlastním programu analyzátoru je nastaveno, aby po zapnutí analyzátoru nebylo podsvícení displeje aktivní z důvodu úspory kapacity akumulátorů, protože proudový odběr podsvícení  $I_f = 150$  mA [13] je zhruba desetkrát vyšší než odběr samotného zařízení.

Podsvícení displeje není vzhledem k jeho konstrukci při dostatečném okolním osvětlení potřeba. Displej je konstruován tak, aby mohl pracovat jako tzv. pasivní displej (s reflexní plochou pro přímé osvětlení zepředu) a zároveň jako aktivní displej (s podsvícením zezadu). Při režimu pasivního displeje se zhruba desetkrát prodlouží doba měření na jedno nabití akumulátorů. Maximální provozní době analyzátoru se věnuje kapitola 6.4.

## 4.5 Akumulátory

Provoz analyzátoru zajišťují čtyři nabíjecí akumulátory NiMH velikosti AA s nominálním napětím 1,2V o kapacitě 2100 mAh.

#### <u>UPOZORNĚNÍ:</u>

Při výměně akumulátorů se musí dát velký pozor na to, aby nebyly použity baterie s nominálním napětím 1,5V na článek! Klasické baterie (uhlíkové, alkalické) s napětím jednoho článku, které může dosahovat až 1,6 V, by při zapojení do série dodávaly napětí až 6,4 V, což je hodnota nepřípustná pro LCD displej. Maximální povolená hodnota napájecího napětí pro obvod LCD displeje je 5,8 V. Hlavní vypínač zdroje elektrické energie se nachází na pravé straně přístroje.

## 4.6 Montáž/demontáž pro účely přeprogramování

Celé zařízení je zkonstruováno tak, aby se dalo jednoduše složit i rozebrat. Pouze anténu odejmout nelze, protože je ke krabičce připevněna lepením. V následující části je uveden postup pro složení analyzátoru, jeho demontáž bude probíhat v opačném pořadí.

#### Upevnění jednotky IRIS k hlavní DPS

Jednotka IRIS se opatrně zasune do konektoru hlavní DPS (konektor obsahuje drobné zámky, které musí zapadnout) a zafixuje se šroubem přes distanční sloupek. Poté se může připojit konektor antény viz. Obr. 4.5.

#### Upevnění hlavní DPS

Hlavní deska se umístí na pozice úchytů v krabičce a připevní se čtyřmi šrouby (1 viz Obr. 4.5). S hlavní deskou je již pevně propojena ovládací deska, proto se jedním šroubem (2 viz Obr. 4.5) ze strany akumulátorového prostoru přichytí i tato deska.



Obr. 4.5: a) Uchycení hlavní DPS, b) připevnění jednotky IRIS.

### LCD displej a horní díl

Pokud jsou správně připevněné DPS, zasune se konektor displeje do dutinkové lišty, přičemž spodní část displeje bude pouze opřena o distanční šroubky. Nasadí se horní plastový díl tak, aby se volně nasunul na displej i tlačítka ovládací desky a ze zadní strany se celá krabička smontuje čtyřmi samořeznými šrouby do plastu.



Obr. 4.6: Sestrojený analyzátor rádiových kanálů IEEE 802.15.4.

# 5 OVLÁDÁNÍ ANALYZÁTORU

Následující kapitola se zabývá popisem uživatelského rozhraní analyzátoru a významem měřených hodnot.

## 5.1 Start analyzátoru a úvodní menu

Analyzátor se zapíná kolébkovým vypínačem umístěným na pravé straně zařízení. Zapnutí rádiového analyzátoru indikuje rozsvícení zelené LED a úvodní nápis na displeji "Channel Analyser is starting …".



Obr. 5.1: a) Start analyzéru, b) hlavní nabídka.

Tento text se po 2 sekundách smaže a uživateli se objeví hlavní nabídka s položkami "Channels scan" pro zvolení prohledávání kanálů a "Channel select" pro přímý výběr kanálu, na kterém bude analyzátor naslouchat.

## 5.2 Automatické prohledávání kanálů

V rozsáhlých senzorových sítích pracujících na MAC vrstvě 802.15.4 může nastat situace, kdy obsluha přístroje neví, na kterém kanále jednotlivé uzly vysílají. Může tedy zkusit prohledat jednotlivé kanály ručně tím, že zvolí "Channel select" a po jednom kanále budou analyzátor přelaďovat. Takové měření by bylo časově velmi zdlouhavé, a proto byla naprogramována funkce "Channels scan", neboli automatické prohledávání kanálů.

Obsluha tedy zvolí automatické prohledávání a analyzátor přejde do režimu nastavení času, který určuje, po jakou dobu bude naslouchat na jednom kanále během procházení kanálů 11 až 26. V programu jsou definovány časy v sekundách, přičemž hodnoty vyšší jak 60 s se uživateli zobrazují jako minuty. Maximálně lze nastavit čas 60 minut, což znamená, že analyzátor bude na jednom kanále naslouchat 1 hodinu. Celková doba prohledávání všech šestnácti kanálů by v tomto režimu trvala 16 hodin.

Výpis kódu 5.1: main.c – definice časů měření v sekundách

```
static uint16_t scan_channel_duration[11] =
{1,2,5,10,30,60,120,300,600,1800,3600};
```





Jakmile je vybrán požadovaný čas, volba se potvrdí tlačítkem OK a program přejde k výběru typu zobrazení výsledků vyhledávání.

### 5.2.1 Grafický výstup

V režimu grafického výstupu jsou kanály 11 až 26 reprezentovány sloupci displeje, kterých je shodně 16. Displej tedy poskytuje prostor pro zobrazení 16 kanálů a šest úrovní pro indikaci síly přijímaného signálu. Grafické prohledávání funguje jako rychlý ukazatel kanálů, na kterých se komunikuje podle standardu IEEE 802.15.4. Výkon měřený na přijímači, který pochází od jiných zdrojů pracujících blízko frekvence 2,4 GHz (okolní WiFi sítě, mikrovlnka), do grafického výstupu nijak nevstupuje a není zobrazen. Pro měření energie detekované na přijímači a pocházející z libovolného zdroje pracujícího na frekvenci 2,4 GHz (včetně okolních WiFi sítí, mikrovlnné trouby apod.), je určen textový výpis "Text list", který funguje jako jednoduchý spektrální analyzátor. Více v kapitole 5.2.2.

Pro spuštění grafického prohledávání je nutné nastavenit rozlišení grafu v krocích 5, 10, 15 a 20 dBm/dílek, přičemž hodnota 20 se použije, pokud je hledaná rádiová síť blízko a 5 pokud se jedná o vzdálenější síť. Nižší hodnota rozlišení znamená přesnější odečet výkonové úrovně u slabých signálů. Přehled zobrazených hodnot RSSI pro různá rozlišení je v Tab. 5.1.

Set re 20 dBr	950 970	hulc vik	tio	n
Press	Ť	or	4.,	OK

Obr. 5.3: Nastavení rozlišení grafu.

Tab. 5.1: Tabulka pro odečtení RSSI z grafu.

							*
		[dBm]	[dBm]	[dBm]	[dBm]	[dBm]	[dBm]
<li></li>	5	<-91	< -86	<-81	<-76	< -71	>=-71
išení znal	10	<-91	<-81	<-71	<-61	< -51	>=-41
kozli Bm/	15	<-91	<-76	<-61	<-46	< -31	>=-31
p] I	20	<-91	<-71	<-51	<-31	< -11	>=-11

## 5.2.2 Textový výstup

Tento typ prohledávání funguje obdobně jako grafický mód s tím rozdílem, že výsledky vypisuje po řádcích na displej a u každého kanálu zobrazí změřenou nejvyšší energii na přijímači v dBm. Zobrazuje tedy všechny kanály, přestože v nich nejsou detekovány rámce 802.15.4. Do výsledků musela být doplněna indikace platného rámce, a proto pokud je takový rámec nalezen, zobrazí se u něj text 15.4. Jedná se o zkrácený název 802.15.4, který by se na displej nevešel.

Obr. 5.4: Textový výpis prohledávání kanálů.

## 5.3 Analýza komunikace na zvoleném kanále

Pokud je znám komunikační kanál, který se má analyzovat, zvolí se tento kanál v hlavní nabídce položka "Channel select". Uživatel pomocí šipek vybere kanál 11 až 26 a potvrdí jej stiskem tlačítka OK.



Obr. 5.5: a) Výběr kanálu pro analýzu, b) volba řazení nalezených uzlů.

V dalším kroku má uživatel možnost nastavit řazení nalezených uzlů podle MAC adres uzlů nebo hodnot RSSI. Řazení podle výkonové úrovně přijatého signálu je užitečné pokud se hledá fyzické umístění vysílací jednotky.



Obr. 5.6: Možnosti řazení nalezených uzlů: a) žádné, b) podle adresy, c) podle RSSI.

#### Vliv aktivity uzlů a zobrazení na displeji

Při větším množství uzlů nastal problém s rozeznáním aktivních uzlů. Pokud se s analyzátorem ani s komunikujícími jednotkami nehýbe, hodnoty RSSI a LQI zůstávají po delší dobu stejné a jen náhodně se některá změní. Tento stav je ošetřen funkcí, která sleduje dobu, která uplynula od poslední aktualizace hodnot.

Při spuštění analýzy se provede i spuštění pomocného časovače, který čítá sekundy. Počet sekund se ukládá do 16 bitové proměnné, který se naplní až po 18,2 h soustavné analýzy. Pokud dojde k takové situaci, čítač se vynuluje a spolu s ním se přepíší i hodnoty času uložené v datovém poli, které uchovává informace o vysílajících uzlech. Po každém přijetí rámce se do pole *node[]* uloží adresa uzlu, RSSI, LQI a vlastní časové razítko podle aktuálního stavu čítače. Časové razítko se kontroluje každou vteřinu a pokud je jeho hodnota starší než 60 s, označí se takový uzel jako neaktivní a vpravo od jeho adresy se zobrazí symbol X. Při opětovném připojení uzlu se zapíše nové časové razítko a hodnota X se smaže.

Addr	RSSI	LQI
0x0000	-62	238
0×000B	-70	172
0×000D	X -49	255

Obr. 5.7: Neaktivní uzel 0x000D.

Výpis kódu 5.2: main.c - práce s uzly a přidání časového razítka

```
// kontrola přijatého ramce, zda pochazi z jiz ulozeneho uzlu
     for(i = 0;i<node size;i++) {</pre>
           if(node[i][0]==an srcaddr) {
                 existing_node = true;
                 node[i][1] = an_rssi;
                 node[i][2] = an_lqi;
                 node[i][3] = time; // casove razitko
                 break;
           }
     }
     // uzel jeste nebyl ulozen, proto se prida do pole node
     if(existing node == false && node size<MAX NODES){
          node[node size][0] = an srcaddr;
           node[node size][1] = an rssi;
           node[node size][2] = an lqi;
          node[node size][3] = time; // casove razitko
          node size++;
     }
```

## 6 TESTOVÁNÍ ANALYZÁTORU

V rámci testování analyzátoru byla analyzována základní funkčnost rádiového analyzátoru z uživatelského hlediska a také vliv antény na výsledky měření.

## 6.1 Vliv polohy antény

Pro zjištění vlivu polohy antény byl proveden test místnosti se třemi jednotkami IRIS, které byly umístěny na podlaze 3 m od analyzátoru. Analyzátor byl držen v ruce ve výšce 110 cm nad podlahou. V prvním případě měl anténu svisle (ohnutou v kloubu), tedy stejně orientovanou jako jednotky IRIS. Ve druhém případě měl anténu rovnoběžně s podlahou (napřímenou), přičemž vrchol antény byl orientován směrem k vysílajícím jednotkám.



Obr. 6.1: Vliv naklopení antény: a) anténa ohnuta v kloubu, b) anténa napřímena.

Z naměřených hodnot lze vidět, že poloha antény má podle očekávání významný vliv na detekovanou energii a změny RSSI dosahují rozdílu až 14 dB.

## 6.2 Komunikační dosah analyzátoru

Nezanedbatelným parametrem rádiového analyzátoru je jeho měřící dosah. Aby bylo dokázáno, že instalovaná anténa dosahuje většího zisku než původní čtvrtvlnný monopól, bylo provedeno venkovní měření v otevřené krajině. Venkovní teplota během měření byla t = 9°C a maximální dosah s instalovanou anténou byl 220 m. Ve větší vzdálenosti nebylo možné přijmout platný rámec.

Z naměřených hodnot do 160m je možné stanovit, že instalovaná anténa má průměrně o 4 dB lepší příjem. Nemá zde smysl uvádět přesnější hodnoty vzhledem k tomu, že hodnoty energie uložené v registru PHY\_ED\_LEVEL jsou vypočteny s přesností ±5 dB. Na naměřené hodnoty má významný vliv okolní prostředí, především teplota, napájecí napětí, aktuální parametry součástek atd. [1]

	d	[m]	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
Anténa λ/2	RSSI	[dDm]	-22	-70	-73	-76	-82	-85	-88	-91	-91	-91	-91	-91
Anténa λ/4		[asm]	-22	-80	-82	-82	-85	-91	-91	-91	-91	-	-	-

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty RSSI v otevřeném venkovním prostoru



Obr. 6.2: Graf závislosti RSSI na vzdálenosti d od vysílače.

#### 6.3 Ověření přesnosti měření parametrů RSSI a LQI

Přesnost stanovení hodnoty RSSI vysílajícího uzlu byla posouzena na základě souběžného měření analyzátorem DaintreeNetworks [12].

Pro měření byla ustanovena síť s jedním koordinátorem 0x0000 a koncovým zařízením s adresou 0x000D, přičemž obě zařízení ležela na stole vedle sebe. Analyzátor DaintreeNetworks a vlastní vyvíjený analyzátor byly umístěny v těsné blízkosti vedle sebe ve vzdálenosti přibližně 1 m od komunikujících jednotek. Na Obr. 6.3 je uveden výstup z programu analyzátoru Daintree a na Obr. 6.4 hodnoty z vyvíjeného analyzátoru.

Ve výsledcích měření analyzátoru DaintreeNetworks je možné pozorovat vliv pravidelného rušení vysílaného signálu z jednotky 0x000d neznámým zdrojem, což má za následek zhoršení kvality přenosu LQI a měřené úrovně RSSI. Proto byly při porovnání analyzátorů uvažovány pouze hodnoty RSSI, u kterých byla kvalita přenosu LQI = 255. Po vyřazení rámců s nízkým LQI a zahrnutí přesnosti výpočtu energie na kanále vyvíjeného analyzátoru ±5 dB je možné konstatovat, že výsledky analyzátorů jsou porovnatelné.

239	+00:00:01.995	13	-40 dBm	255	0x000d	0x0000
239	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255		
240	+00:00:01.995	13	-68 dBm	180	0x000d	0x0000
240	+00:00:00.003	13	-40 dBm	255		
240	+00:00:01.992	13	-39 dBm	255	0x000d	0x0000
240	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255		
241	+00:00:01.994	13	-68 dBm	180	0x000d	0x0000
241	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255		
241	+00:00:01.992	13	-39 dBm	255	0x000d	0x0000
241	+00:00:00.003	13	-40 dBm	255		

Obr. 6.3: Výstup analyzátoru DaintreeNetworks, kde třetí sloupec je číslo kanálu, čtvrtý sloupec hodnota RSSI, pátý sloupec kvalita přenosu LQI, šestý sloupec zdrojová adresa uzlu a poslední sloupec cílová adresa.

Addr	RSSI	LQI
0×000D	-40	255
0×0000	-46	255

Obr. 6.4: Výstup vyvíjeného analyzátoru.

Přestože prostorové podmínky pro měření byly poměrně stísněné a jednotlivá zařízení se mohla vzájemně ovlivňovat, a také proto, že v měřeném prostoru nebylo zajištěno homogenní prostředí pro šíření rádiových vln, je možné považovat výsledek porovnání přístrojů za velmi dobrý.

## 6.4 Výdrž akumulátorů

Hlavním zdrojem energie u mobilních zařízení jsou ve většině případů akumulátory nebo baterie. Proto je kladen velký důraz na minimalizaci spotřeby takových zařízení. Síťové analyzátory mají tu vlastnost, že po většinu času naslouchají provozu v sítí a tudíž i jejích přijímací obvod musí být neustále v režimu příjmu, čímž je spotřebováváno velké množství energie. Rádiový čip AT86RF230 odebírá ze zdroje v režimu příjmu až 16 mA [1]. Vlastní analyzátor má instalován displej s LED podsvícením, které dle dokumentace [13] odebírá v zapnutém stavu zde zdroje proud 150 mA.

#### 6.4.1 Výpočet doby provozu analyzátoru

Vyvíjenému analyzátoru dodávají energii čtyři akumulátory NiMH velikosti AA, které jsou zapojeny do série. Nominální napětí Ni-MH akumulátorů se udává 1,2 V z čehož vyplývá, že celkové napětí zdroje při zapojení akumulátorů do série bude 4,8 V a kapacita celého zdroje zůstane stejná jako kapacita jednoho akumulátoru. Během testu doby provozu vlastního analyzátoru byly použity akumulátory Sony s kapacitou 2100 mAh, a proto bude tato hodnota použita i v teoretickém výpočtu doby provozu.

Na základě předchozích informací má zdroj analyzátoru celkové napětí 4,8 V s nominální kapacitu 2100 mAh, celková energie zdroje je tedy 10,08 Wh. Pokud se při výpočtu příkonu analyzátoru zanedbají malé změny proudu, které souvisí s různými stavy analyzátoru a zahrnou-li se jen základní proudové odběry, je možné vypočíst příkon analyzátoru během příjmu a se zapnutým LED podsvícením. Hodnoty proudového odběru jsou uvedeny v Tab. 6.2. Celkový příkon analyzátoru činí 849,12 mW. Maximální doba provozu s plně nabitými akumulátory je potom rovna podílu 10,08 Wh / 0,84912 W = 11,87 h.

	Proudový odběr	Napětí	Příkon
	[mA]	[U]	[mW]
Displej	151,4	4,8	726,72
IRIS (ATmega1281 + AT86RF230)	24,0	3,0	72,00
Zelená LED + rezistor	1,5	3,0	4,50
Stabilizátor	25,5	1,8	45,9
		Součet	849,12

Tab. 6.2: Vypočtená maximální spotřeba analyzátoru se zapnutým podsvícením.

#### 6.4.2 Změřená doba provozu na akumulátory

Skutečná doba provozu se od teoretického výpočtu může značně lišit, a proto byl vykonán test, který měl stanovit, po jakou maximální dobu je možné analyzátor používat, aniž by došlo ke zhoršení čitelnosti LCD displeje.

Před započetím tohoto testu byla vytvořena síť na 20. kanále, ve které probíhala každé 2 s komunikace mezi koordinátorem a koncovým bodem. V blízkosti této sítě byl následně zapnut i vlastní rádiový analyzátor, který se nastavil na stejný rádiový kanál a pro maximalizaci proudového odběru bylo aktivováno podsvětlení displeje.

Napětí na akumulátorech bylo měřeno v časech 0, 180, 360, 480 a 810 min tak, že

akumulátory byly vyjmuty ze zařízení a napětí bylo změřeno bez zatížení. V čase 480 minut byl test z časových důvodu přerušen a obnoven byl až druhý den, kdy proběhlo také měření stavu napětí jednotlivých nabíjecích článků. Z tohoto důvodu lze také na vybíjecí křivce (Obr. 6.5) sledovat mírný vzestup hodnot napětí u všech článků, což bylo pravděpodobně způsobeno částečnou regenerací článků za dobu, kdy byly mimo provoz (bez zatížení).





V čase 810 min byl test ukončen, protože čitelnost LCD displeje klesla na takovou úroveň, že jej bylo možné číst jen s obtížemi. Naměřená maximální doba provozu vlastního analyzátoru s aktivním podsvícením displeje dosáhla hodnoty 13,5h.

Z Obr. 6.5 si lze povšimnout, že u prostředních akumulátorů č.2 a č.3 kleslo napětí rychleji než u krajních článků. Vzniklý rozdíl byl způsoben rozdílnou kapacitou akumulátorů způsobenou běžnými výrobními odchylkami. Takový rozdíl je běžný a nebyl dále zkoumán.

## 7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo sestrojit funkční model přenosného rádiového analyzátoru kanálů standardu IEEE 802.15.4, jehož jádro bude postavené na jednotce MEMSIC IRIS M2110 a aplikačním balíku MAC stack od společnosti Atmel. Tohoto cíle bylo dosaženo a funkčnost vytvořeného rádiového analyzátoru sítí s nízkým vysílacím výkonem dle IEEE 802.15.4 byla laboratorně ověřena. Výsledky měření rádiových parametrů senzorové sítě zhotoveným analyzátorem ve školní laboratoři byly porovnány s analyzátorem senzorových sítí Daintree Networks a bylo konstatováno, že výsledky naměřených hodnot jsou porovnatelné, při zahrnutí známých chyb měření dokonce stejné.

Dále byl testován rádiový dosah vlastního analyzátoru, který v otevřeném prostranství dosahuje hodnoty až 220 m při měření vůči jednotce IRIS se základní konfigurací. Maximální změřená doba provozu zařízení s plně nabitými akumulátory a aktivním podsvícením displeje činí až 13,5 h. Teoretická doba provozu bez podsvícení se může pohybovat okolo 90 hodin.

Práce by mohla být do budoucna rozšířena o funkci pro sledování svorkového napětí akumulátorů pomocí jednoho z osmi AD převodníků, čímž by se značně zvýšil komfort používání přístroje z hlediska předpokládané doby provozu. Dále by bylo možné doplnit zařízení konektorem JTAG, který by usnadnil nahrávání nového programu (změnu funkčnosti přístroje) do řídící jednotky bez nutnosti demontáže.

## **LITERATURA**

- [1] AT86RF230 [online]. [s.l.]: Atmel Corporation, 2009 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z: <a href="http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\_documents/doc5131.pdf">http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\_documents/doc5131.pdf</a>>
- [2] Atmel AVR2025: IEEE 802.15.4 MAC Software Package User Guide [online]. [s.l.]: Atmel Corporation, 2011 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z: <a href="http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\_documents/doc8412.pdf">http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\_documents/doc8412.pdf</a>>
- [3] IRIS [online]. [s.l.]: MEMSIC Inc., 2011 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z: <a href="http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis">http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis"/>
- KOUBAA, Anis; ALVES, Mário; TOVAR, Eduardo. IEEE 802.15.4 for Wireless Sensor Networks : A Technical Overview [online]. Portugal: Polytechnic Institute of Porto, July 2005 [cit. 2011-12-05]. Dostupné z: <http://www.hurray.isep.ipp.pt/docs/ieee+802.15.4+for+wireless+sensor+networks:+a+tec hnical+overview/222/>
- [5] MURTHY, Ram Siva C.; MANOJ, S.B. Ad Hoc Wireless Networks Architectures and Protocols. Prentice Hall : Pearson Education, 2004. 880 s. ISBN 978-0-13-147023-1.
- [6] SOHRABY, Kazem; MINOLI, Daniel; ZNATI, Taieb. Wireless Sensor Networks : echnology, Protocols, and Applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 328 s. ISBN 978-0471743002.
- [7] STK600 User Guide [online]. 2009 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z: <a href="http://support.atmel.no/knowledgebase/avrstudiohelp/mergedProjects/STK600/index.html">http://support.atmel.no/knowledgebase/avrstudiohelp/mergedProjects/STK600/index.html</a> >
- [8] ŠIMEK, Milan. Přednáška č.2 : Standard IEEE 802.15.4. In Přednáškový cyklus Senzorové systémy (MSSY)) [online]. Brno : VUT, 27.9.2010 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=110012>
- [9] ZHENG, Jun; JAMALIPOUR, Abbas. Wireless sensor networks: A networking perspective. United States of America : Wiley-IEEE Press, 2009. 489 s. ISBN 978-0-470-16763-2.
- [10] Routerboard. MIKROTIK. *RouterBoard.com* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <a href="http://routerboard.com/ACSWIM">http://routerboard.com/ACSWIM</a>
- [11] Wifi.aspa. ASPA, a.s. *Wifi.aspa* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <a href="http://wifi.aspa.cz/antena-2dbi-s-mmcx-konektorem-z102810/">http://wifi.aspa.cz/antena-2dbi-s-mmcx-konektorem-z102810/</a>
- [12] DaintreeNetworks. Sensor Network Analyzer (SNA) [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <a href="http://www.daintree.net/sna/sna.php">http://www.daintree.net/sna/sna.php</a>

- [13] *MC41605B6W-SPTLY LCD*. England: Midas Components Ltd., 2011. Dostupné z: <a href="http://www.farnell.com/datasheets/1485512.pdf">http://www.farnell.com/datasheets/1485512.pdf</a>>
- [14] The Deeter Group. *Wireless Site Survey Tool* [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <a href="http://www.deeter.co.uk/products/wireless-site-survey-tool">http://www.deeter.co.uk/products/wireless-site-survey-tool</a>
- [15] DaintreeNetworks. *Senzor Networks Analyzer* [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <a href="http://backup.daintree.net/products/sna.php">http://backup.daintree.net/products/sna.php</a>
- [16] BzWorks. *WiSens Classic* [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <a href="http://bzworks.com/wisenssoftware.htm">http://bzworks.com/wisenssoftware.htm</a>>
- [17] Peryton. Single Channel 802.15.4, ZigBee, RF4CE, 6LoWPAN Protocol Analyzer [online].
   [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <a href="http://www.perytons.com/products\_perytonS.php?p=1">http://www.perytons.com/products\_perytonS.php?p=1</a>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ACK	Acknowledgement
AES	Advanced Encryption Standard
APL	Application Layer
CAN	Controller Area Network
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention Free Period
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Contention Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DSUB	D-subminiature
ED	Energy Detection
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
GTS	Guaranteed Time Slots
IFS	InterFrame Spacing
JTAG	Joint Test Action Group),
kbps	kilobits per second
KZ	koncové zařízení
LED	Light-Emitting Diode
LQI	Link Quality Indicator
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Private Area Networks
MAC	Medium Access Control
MCU	Microcontroller Unit
MEMS	Microelectromechanical systems
MPDU	Mac Protocol Data Unit

NWK	Network Layer
PAL	Platform Abstraction Layer
PAN	Personal Area Network
PAN-C	Personal Area Network Coordinator
PHR	PHY Header
PHY	Physical Layer
PLME	Physical Layer Management Entity
PPDU	Physical Packet Data Unit
PSDU	Physical Service Data Unit
RFD	Reduced Function Device
RS232	Recommended Standard 232
RSSI	Received Signal Strength Indication
SFD	Start of Frame Delimeter
SHR	Start of Header
SNR	Signal Noise Ratio
TAL	Transceiver Abstraction Layer
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
USB	Universal Serial Bus
WSN	Wireless Sensor Network

# SEZNAM PŘÍLOH

A	Naměřené hodnoty RSSI pomocí analyzátoru Daintree Networks	58
B	Obsah přiloženého DVD	59

# A NAMĚŘENÉ HODNOTY RSSI POMOCÍ ANALYZÁTORU DAINTREE NETWORKS

S.	nsor Network Analyz	ter <au02007< th=""><th>015 - 2400E&gt;</th><th>- [Packet List]</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>× B -</th></au02007<>	015 - 2400E>	- [Packet List]						× B -
۱۲ ۱	ile View Capture Pr	otocols Filters	Settings Win	dow Help						× B -
<u>7</u>	🖤 📘 🃎   Source:	🖨 AU0200701	5 - 2400E		🚽 🔎   Channel:	13 (0×0D) - 2415 MHz			Replay: 1 🚽	**
Filter:	All Packets		- -	2 🗐 📑 🖸	Auto Scroll Packe	ts 🔰 🔂 <u>A</u> 💡				
s/	Time Delta	Channel	Receive P	ower Link	. MAC Src	MAC Dest	NUK Src	NUK Dest	Source Endpoint	Destination Endpo:
236	+00:00:00.003	13	-39 dBm	255						
236 236	+00:00:00.440	13 13	-41 dBm -41 ABm	255 255	0×000d	0x0000	0x000d	0×0000	100	2
0.52	+00.00.00.00	2 <mark>-</mark>	-68 dBm	0 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	0×0004	04000	0×0004	0×000	100	~
237	+00:00:00.003	13	-37 dBm	255		00000		0	0	1
237	+00:00:01.996	13	-40 dBm	255	0x000d	0×0000	0x000d	0×0000	100	0
237	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255						
238 238	+00:00:01.993	n 5	-72 dBm -42 ABm	136 265	0x000d	0x0000	0x000d	0000x0	100	~1
338	+00:00:01.995	13	-40 dBm	255	0×000d	0×0000	0×0004	0×0000	100	63
238	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255						
239	+00:00:01.993	13	-69 dBm	168	0x000d	0×0000	0x000d	0x0000	100	63
239	+00:00:00.003	13	-42 dBm	255						
239	966'TD:DD:DD:	<u>n</u> 2	-40 dBm	255	nxuuud	nnnnxn	UXUUUQ	nnnnxn	DOT	N
240	+00:00:00:00:445	2 <mark>6</mark>	-68 dBm	0.4	0×000	UNDUD	0×0004	0×000	100	~
240	+00:00:00.003	13	-40 dBm	255						1
240	+00:00:01.992	13	-39 dBm	255	0x000d	0×0000	0x000d	0×0000	100	0
240	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255						
241	+00:00:01.994	13	-68 dBm	180	0x000d	0×0000	0x000d	0×0000	100	01
241	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255	000000	00000	000010	000000	100	c
241	+00:00:00:00	2 6	-40 dBm	255	DUUUXU	nnnnxn	DODOXO	nnnnxn	DOT	7
242	+00:00:01.995	13	-67 dBm	192	0×000d	0×0000	0×0004	0×0000	100	0
242	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255						
242	+00:00:01.992	13	-40 dBm	255	0×0004	0x0000	0×0004	0×0000	100	10
242	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255	00000	Durdance 20166	00000	0.000		
<b>1</b>	+00: 10:00:00+	3 5	-39 dBm	255	DV0004	DYDDDD V UND	DOUDAD NO	UNDING	100	~
243	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255					0	1
244	+00:00:00.431	13	-81 dBm	40	0x000d	0×0000	0x000d	0×0000	100	63
244	+00:00:00.003	13	-41 dBm	255						
545 245	+00:00:00.394	1 5	-77 ABW	C 7 8	DUUUXU DUUUAU	Droadcast (UXII	DUUUXU		100	0
245	+00:00:00.003	13	-38 dBm	255	100000	000000	1	0000	0.04	3
245	+00:00:01.399	13	-40 dBm	255	0×0004	0×0000	0×0004	0×0000	100	0
245	+00:00:00.003	13	-40 dBm	255						
246	+00:00:01.994	13	-68 dBm	180	0x000d	0×0000	0x000d	0x0000	100	~
246	+00:00:00.003	13	-37 dBm	255	0000110	00000	000000	0000000		1
246	+00:00:00:00	1 1	-40 00m -41 dBm	255	DUUUXU	nnnnxn	DODOXO	nnnnxn	TOOT	4
247	+00:00:01.995	13	-68 dBm	180	0×0004	0×0000	0×0004	0×0000	100	•
-										•
Hall	In prace F1						Saccion Fi	le. Drotocol	Stack: ZinBee DDO	vice: 2 Frame: 1310
2	th, press r t								DIGLE AUDIC FOR THE	

# **B** OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

MAC_v_2_7_0/	složka IEEE 802.15.4 MAC stack
/Applications/Analyzator	složka se zdrojovými kódy aplikace vyvíjeného analyzátoru
akumulátory.xlsx	soubor Excel obsahující vybíjecí charakteristiku akumulátorů a výpočty maximální doby provozu analyzátoru
dosah.xlsx	soubor Excel obsahující hodnoty změřené při testu dosahu analyzátoru a graf vytvořený z těchto hodnot
Pokorny_DP.pdf	soubor s vlastní diplomovou prací v elektronické podobě