



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## REALIZACE LABORATORNÍ ÚLOHY SE SYSTÉMEM ZIGBEE

REALIZATION OF LABORATORY EXERCISE USING THE ZIGBEE SYSTEM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr König

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Petr König

**ID:** 164308

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Realizace laboratorní úlohy se systémem ZigBee

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vrstvou architekturou systému ZigBee. Důkladně prostudujte zejména fyzickou a MAC vrstvu. Sestavte osnovu budoucí laboratorní úlohy demonstrující parametry a možnosti ZigBee. Využijte dostupné hardwarové a softwarové vybavení laboratoře mobilních komunikací UREL pro generování i analýzu signálu fyzické vrstvy ZigBee. Provéřte možnost zachytávání a dekodování ZigBee paketů na rádiovém rozhraní.

Sestavte laboratorní úlohu demonstrující vlastnosti a možnosti použití systému ZigBee. Pokuste se postihnout zajímavé vlastnosti fyzické vrstvy ZigBee. Vypracujte návod laboratorní úlohy a také vzorový protokol.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS). New York: IEEE, 314 s. ISBN 978-0-7381-6683-4.

[2] HERNANDEZ, O., JAIN, V., CHAKRAVARTY, S., BHARGAVA, P. Position Location Monitoring: Using IEEE 802.15.4/ZigBee technology [online]. Freescale Beyondbits. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <https://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/brochure/PositionLocationMonitoring.pdf>.

**Termín zadání:** 6. 2. 2017

**Termín odevzdání:** 30.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

**Konzultant:**

  
**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
předseda oborové rady



### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Bakalářská práce se věnuje vrstevné architektuře systému ZigBee, zejména potom jeho fyzické a MAC vrstvě a demonstruje jeho parametry v praktické realizaci. Hlavní částí bakalářské práce je vytvoření laboratorní úlohy za pomoci vývojového kitu Jennic a Atmel. Studenti se pomocí této laboratorní úlohy seznámí se standardem ZigBee.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

ZigBee, IEEE 802.15.4, laboratorní úloha, Jennic JN5139, ATAVRRZ200

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis includes ZigBee layer architecture mainly Physical Layer (PHY) and Media Access Control Layer (MAC). It demonstrates their parameters in practical realization. Main part of the thesis is a creation of laboratory measurement protocol using development kit of Jennic company. Students will be familiar with ZigBee standard due to this laboratory exercise.

## **KEYWORDS**

ZigBee, IEEE 802.15.4, laboratory exercise, Jennic JN5139, ATAVRRZ200

KÖNIG, P. *Realizace laboratorní úlohy se systémem ZigBee*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 39 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma *Realizace laboratorní úlohy se systémem ZigBee* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

Ve své práci bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Milošovi Ph.D. za pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ZigBee</b>	<b>10</b>
1.1	Aplikační vrstva (APL).....	11
1.2	Síťová vrstva (NWK).....	11
1.3	Linková vrstva (MAC).....	12
1.4	Fyzická vrstva (PHY) .....	12
1.4.1	Frekvenční pásmo .....	13
1.4.2	Číslování kanálů .....	13
<b>2</b>	<b>Standard IEEE 802.15.4</b>	<b>14</b>
2.1	Definice typu zařízení .....	14
2.2	Topologie sítě .....	14
2.3	Adresace zařízení .....	15
<b>3</b>	<b>Vývojový modul Jennic</b>	<b>16</b>
3.1	Hlavní modul .....	16
3.2	Senzorový modul .....	17
<b>4</b>	<b>Vyvojový kit ATmel</b>	<b>18</b>
4.1	Obsah kitu .....	18
4.2	Popis hardwaru .....	18
5.1	Popis.....	20
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografie</b>	<b>22</b>
<b>A.</b>	<b>Laboratorní úloha</b>	<b>25</b>
A.1	Zadání .....	25
A.2	Teoretický úvod .....	25
A.2.1.	Demonstrační program modulů RZ200 .....	27
A.2.2.	Utváření sítě.....	27
A.2.3.	Připojení koncového zařízení.....	27
A.2.4.	Výsledná funkce sítě.....	27
A.2.5.	Demonstrační program modulů JENNIC .....	28
A.2.6.	Utváření sítě.....	28

A.3	Postup měření .....	28
<b>B.</b>	<b>Vzorový protokol</b>	<b>34</b>
<b>C.</b>	<b>Obsah přiloženého DVD</b>	<b>39</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Vrstvy v architektuře ZigBee. ....	11
Obrázek 1.2: Zobrazení frekvenčního pásma 2,4GHz pro ZigBee, Wi-Fi a Bluetooth [3] .....	13
Obrázek 2.1: Topologie hvězda a Peer-to-Peer [1].....	14
Obrázek 3.1: Hlavní modul DR001047 [4]. ....	16
Obrázek 3.2: Senzorový modul DR1048 [5]. ....	17
Obrázek 4.1: Popis modulku s rádiem (RCB) [6].....	19
Obrázek 4.2: Popis modulku s displejem [6].....	19
Obrázek 4.3: USB Dongle firmy Texas Instruments [7] .....	20
Obrázek A.1: schéma PHY/MAC protokolu .....	26
Obrázek A.2: Topologie hvězda a Peer-to-Peer [1].....	26
Obrázek A.3: Obrazovka generátoru R&S SMU200A.....	29
Obrázek B.1: Zaznamenané hodnoty z programu TI Packet Sniffer .....	34
Obrázek B.2: Komunikace při sestavování sítě .....	37
Obrázek B.3: Zachycené pakety po stisknutí tlačítka SW1 .....	38

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: ZigBee - přehled vybraných technických údajů.	10
Tabulka 2: Zachycený paket	30
Tabulka 3: Měřené kanály Zigbee	31
Tabulka 4: Vybrané kanály ZigBee pro změření šířky pásma	31
Tabulka 5: Zachycené pakety komunikace	32
Tabulka 6: Zachycené pakety komunikace	32
Tabulka 7: Adresy zařízení v síti	32
Tabulka 8: Zachycené pakety komunikace	33
Tabulka 9: Zachycené pakety komunikace	33



# ÚVOD

System ZigBee poskytuje optimální řešení v oblasti senzorových sítí. Umožňuje přenos neperiodicky přenášených dat z nejrůznějších čidel, měřicích zařízení, a podobně. Taktéž se stará o jejich následné zpracování. Jedná se o robustní bezdrátový standard s nízkými přenosovými rychlostmi, vhodný i do prostředí s velkým množstvím interferencí. Využívá se v chytrých domácnostech a pro průmyslová zařízení. Jeho hlavní výhodou je nízká spotřeba. Výdrž zařízení se při napájení bateriemi pohybuje v řádu měsíců.

V laboratorní výuce předmětů *Rádiové a mobilní komunikace* a *Systémy mobilních komunikací* bohužel v současné době není realizována laboratorní úloha demonstrující tento přenosový standard.

Předkládaná bakalářská práce si klade za cíl popsat standard ZigBee, zejména vlastnosti jeho fyzické a MAC vrstvy. Hlavní náplní práce bude demonstrace hlavních parametrů pomocí laboratorní úlohy.

# 1 ZIGBEE

ZigBee je bezdrátová komunikační technologie postavená na standardu IEEE 802.15.4 5 [1]. Patří do skupiny personálních bezdrátových sítí - Personal Area Network (PAN) stejně jako například technologie Bluetooth.

Systém ZigBee je navržen jako jednoduchá a flexibilní technologie pro tvorbu i rozsáhlejších bezdrátových sítí, u nichž není požadován přenos velkých objemů dat. K jejím hlavním přednostem patří spolehlivost, jednoduchá a nenáročná implementace, velmi nízká spotřeba energie a nízká cena. Protokol je maximálně zjednodušen, aby se dal implementovat do osmibitových mikrokontrolerů [2].

Nejčastějším typem komunikace jsou tzv. **unicast** (jeden k jednomu) a **broadcast** (jeden všem). Z hlediska fyzického propojení sítě jsou podporovány tři topologie:

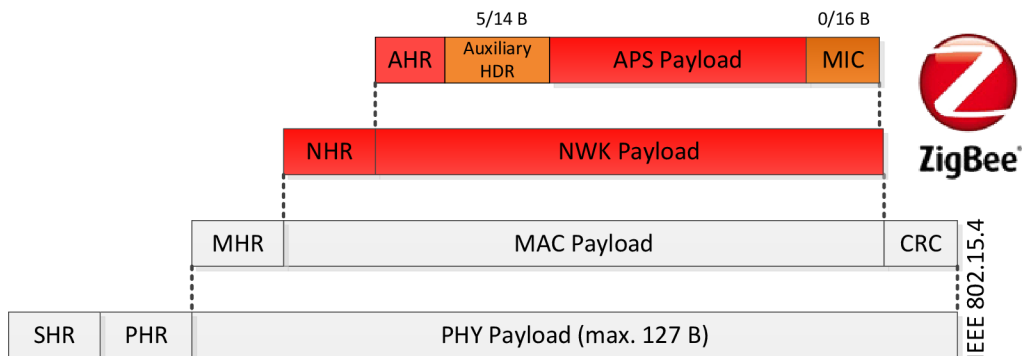
1. topologie typu hvězda,
2. topologie typu mesh,
3. stromová topologie.

Topologie sítě budou detailněji popsány níže. Tabulka 1 obsahuje některé vybrané parametry systému ZigBee a jeho výhody.

**Tabulka 1:** ZigBee - přehled vybraných technických údajů.

Frekvenční pásma	868/915 MHz (Evropa/Amerika) a 2,4 GHz (celosvětově)
Spotřeba zařízení v síti (odběr)	jednotky mA
Zabezpečení	Vysoká bezpečnost komunikace díky AES (Advanced Encryption Standard)
Cena	nízká (~100 Kč)
Dosah	10-300m
přenosová rychlost	až 250kb/s
Životnost baterie	týdny až roky

Vrstvová architektura ZigBee je definována standardem IEEE 802.15.4. Převážně pracuje na specifikaci pro průmyslová bezdrátová zařízení s krátkým dosahem.



**Obrázek 1.1:** Vrstvy v architektuře ZigBee [2].

Vrstvová architektura systému ZigBee je znázorněna na obrázku **Obrázek 1.1**. V dalších podkapitolách budou vrstvy ZigBee architektury popsány s důrazem na nejnižší vrstvy síťového protokolu.

## 1.1 Aplikační vrstva (APL)

Aplikační vrstva, Application Layer (APL) zajišťuje především síťová připojení z pohledu aplikace, skládá se z aplikační podvrstvy, ZigBee objektů a uživatelských aplikačních objektů.

Aplikační vrstva zajišťuje [2]:

- definice profilů aplikací,
- správu endpoints (8-bit identifikátor aplikace),
- zabezpečení komunikace,
- konfiguraci zařízení - ZC (Coordinator), ZR (Router), ZED (End Device).

## 1.2 Síťová vrstva (NWK)

Síťová vrstva, Network layer (NWK), zaručuje, že každé zařízení může komunikovat se všemi zařízeními v síti. Síťová vrstva také definuje typ komunikace. Nejčastějším typem komunikace je tzv. unicast (jeden k jednomu) a broadcast (jeden všem).

Při broadcast vysílání je adresa cílového uzlu definována jako 0xFFFF. Při přijmutí paketu s touto adresou je paket přijímacím uzlem uložen do paměti a po náhodně dlouhé době vyslán zpět do sítě. V paměti se uloží sekvenční číslo paketu. Pokud se přijme paket se stejným sekvenčním číslem, pak je tento paket zahozen. Broadcast komunikace se nepotvrzuje [2].

Síťová vrstva zajišťuje:

- konfiguraci nového zařízení (nově přidaná jednotka může v síti vystupovat jako router nebo jako koncové zařízení),
- spuštění sítě,
- připojení do sítě a odpojení od sítě,
- zabezpečení síťové vrstvy,
- směrování rámců v síti,
- udržování směrovacích tabulek (informace o vzniklých cestách mezi uzly),
- vytváření tabulek sousedních uzlů.

### 1.3 Linková vrstva (MAC)

Linková vrstva Media Access Control (MAC) zajišťuje [2]:

- definice typu zařízení RFD/FFD (Reduced/Fully Function Device),
- adresování zařízení,
- definice topologie hvězda a peer-to-peer,
- generování Beacon rámců v případě, že je zařízení koordinátorem sítě (slouží pro synchronizaci nebo k probuzení uživatelských zařízení)
- synchronizace zařízení podle hodnot v Beacon rámci,
- vyhrazení časových intervalů pro komunikaci - GTS (Guarantee Time Slots),
- vkládání mezirámcových intervalů,
- asociování zařízení se sítí a jejich odpojování.

### 1.4 Fyzická vrstva (PHY)

Fyzická vrstva, Physical Layer (PHY) specifikuje přístup k přenosovému médium. Kvůli nutnosti implementovat standard ZigBee i do málo výkonných 8 bitových mikrokontrolerů (HC08, x51) bylo dbáno na maximální jednoduchost implementace protokolů. Díky tomu struktura protokolů nezabere více než 30 kB programové paměti.

Fyzická vrstva definuje základní parametry, které musí čip splňovat, jako je minimální citlivost přijímače, maximální vysílací výkon, typ modulace, přenosová rychlost, frekvenční pásmo a podobně.

Fyzická vrstva zajišťuje [2]:

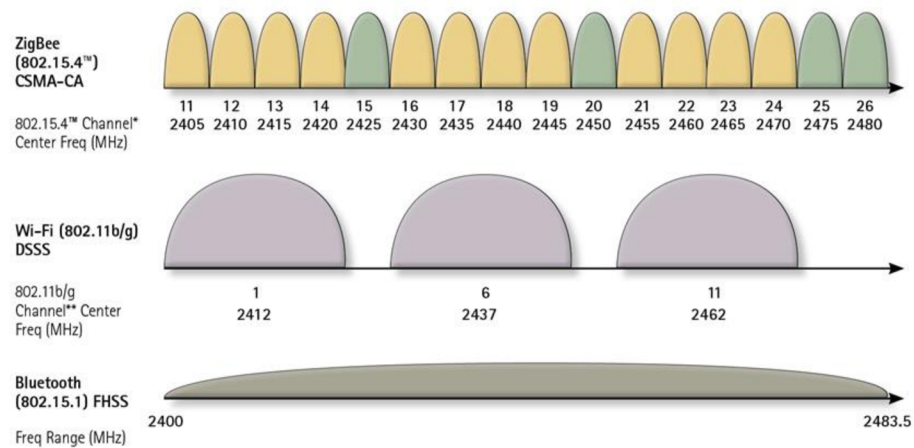
- vypnutí a zapnutí rádiového vysílače,
- přenos a příjem dat,
- výběr frekvenčního kanálu,

- detekci energie na kanálu (Energy Detection),
- zjištění volného kanálu (Clear Channel Assessment),
- zjištění kvality přijímaných dat pomocí Link Quality Indication (LQI) parametru.

### 1.4.1 Frekvenční pásmo

Fyzická vrstva podporuje tato frekvenční pásma [1]:

- 780- 787 MHz pro Čínu
- 950- 956 MHz pro Japonsko
- 868 – 868.6 MHz pro EU
- 902 – 928 MHz pro USA
- 2400 – 2483.5 MHz celosvětově



**Obrázek 1.2:** Zobrazení frekvenčního pásma 2,4GHz pro ZigBee, Wi-Fi a Bluetooth [3]

Podle obrázku **Obrázek 1.2** lze vidět, že v pásmu 2,4GHz jsou ZigBee kanály široké 2 MHz s odstupem 5 MHz. Střední frekvenci každého kanálu lze vypočítat pomocí vzorce (1).

$$f_c(k) = 2405 + 5 \times (k - 11), [\text{MHz}] \quad (1)$$

kde  $f_c(k)$  je střední frekvence kanálu  $k$  v MHz a  $k$  je číslo ZigBee kanálu.

### 1.4.2 Číslování kanálů

V pásmu 868 MHz je k dispozici jeden kanál s modulací Binary Phase-shift Keying (BPSK), v pásmu 915 MHz je k dispozici 10 kanálů s modulací BPSK a v pásmu 2,4 GHz 16 kanálů s modulací Offset-Quadrature Phase-shift Keying (O-QPSK).

## 2 STANDARD IEEE 802.15.4

Bezdrátové osobní sítě WPAN se používají k přenosu informací na relativně krátké vzdálenosti. Spojení skutečné sítě WPAN vyžaduje malou nebo žádnou infrastrukturu na rozdíl od bezdrátové sítě WLAN (Wi-Fi). Tato vlastnost umožňuje malé, levné a energeticky úsporné řešení pro širokou škálu zařízení a aplikací.

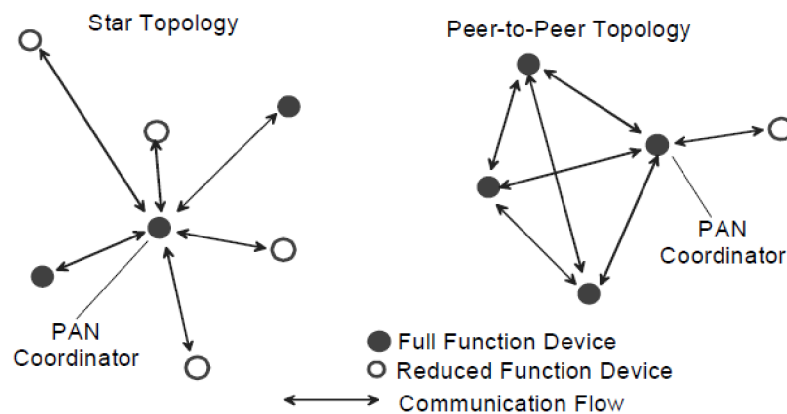
Standard IEEE 802.15.4 definuje fyzickou vrstvu PHY a linkovou vrstvu MAC pro přenosná a pohyblivá zařízení s malou rychlostí přenosu dat a pracujících obvykle na vzdálenosti menší než 10 m. Rychlost dat je až 250 kb/s s možností snížení podle potřeb zařízení (senzorů) [1].

### 2.1 Definice typu zařízení

Standard IEEE 802.15.4 definuje 2 typy síťových zařízení:

**FFD** zařízení může vykonávat roli koordinátora sítě (PAN-C), směrovače (R-Router) nebo koncového prvku (ED - End Device). Koordinátor sítě má vždy jedinečnou adresu 0x00, je v síti jen jeden a může komunikovat s jinou WPAN sítí.

**RFD** zařízení je komunikační a sensorické zařízení, které nedisponuje funkcí směrování dat. To znamená, že komunikace s jiným RFD musí být provedena přes FFD zařízení.



Obrázek 2.1: Topologie hvězda a Peer-to-Peer [1].

### 2.2 Topologie sítě

IEEE 802.15.4 LR-WPAN může pracovat v jedné ze dvou topologií, a to hvězda nebo peer-to-peer (rovný s rovným). V topologii hvězda komunikuje každé zařízení pouze s PAN koordinátorem, takže se v síti nachází pouze koncová zařízení. V topologii peer-to-peer nemusí jít komunikace přes PAN koordinátora, ale zařízení spolu mohou navzájem komunikovat pouze pokud jsou v dosahu, jak lze vidět na obrázku **Obrázek**

## 2.1.

Peer-to-peer topologie umožňuje implementovat složitější síťové útvary, jako je například mesh.

Standard definuje celkem tři modely přenosu dat:

- přenos dat od koncového zařízení ke koordinátorovi (pouze v topologii hvězda),
- přenos dat od koordinátora k zařízení (pouze v topologii hvězda),
- přenos dat mezi dvěma FFD zařízeními.

## 2.3 Adresace zařízení

Každé zařízení v protokolu 802.15.4 je identifikováno unikátní adresou, která bývá nakonfigurována manuálně nebo přidělena dynamicky koordinátorem sítě. Používá se základní 16-bitová adresa. Tento identifikátor umožňuje komunikaci mezi zařízeními v síti pomocí krátkých adres a umožňuje přenosy mezi zařízeními v rámci nezávislých sítí.

## 3 VÝVOJOVÝ MODUL JENNIC

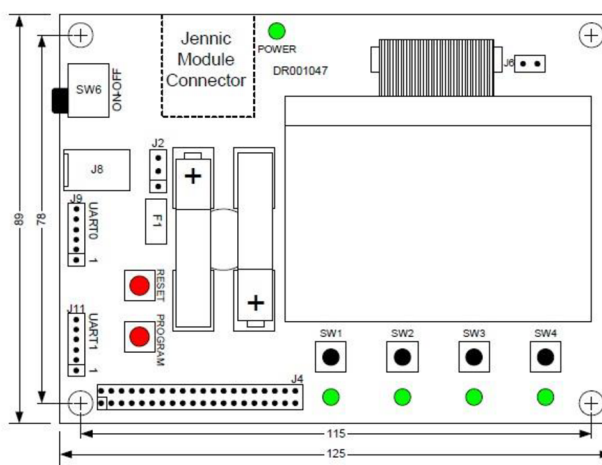
K fyzické realizaci jsem si vybral Development kit firmy Jennic JN5139-EK010 a kit firmy Atmel ATAVRRZ200, které jsou dostupné v laboratoři *Mobilních komunikací* ústavu radioelektroniky, FEKT, VUT v Brně.

Vývojový kit firmy Jennic JN5139-EK010 poskytuje prostředí pro realizaci ZigBee sítě. Umožňuje vytvořit sítě typu hvězda, strom nebo mesh. Pro naše účely postačí ukázkový program, který je v modulcích nahraný od firmy Jennic.

Souprava Jennic obsahuje:

- hlavní řídicí modul s displejem DR001047 V1.1,
- čtyři senzorové moduly DR1048 V1.1.

### 3.1 Hlavní modul

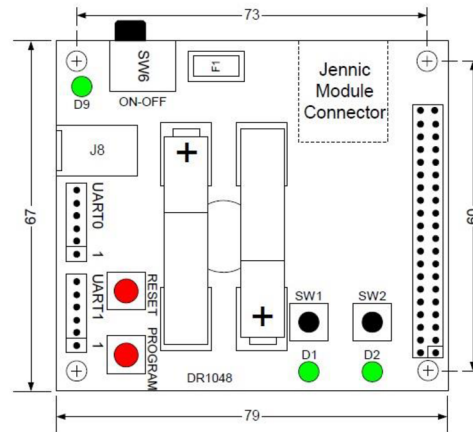


Obrázek 3.1: Hlavní modul DR001047 [4].

- hlavní modul, umožňující rychlý vývoj aplikací, ZigBee ve standardu IEEE 802.15.4 obsahuje tyto komponenty:
- LCD displej 128 x 64 pixelů,
- čidlo vlhkosti a teploty SHT11 s rozsahem od -40°C do 85°C,
- čidlo úrovně osvětlení TAOS TSL2550,
- 5 LED indikátorů a 4 tlačítka,
- sériovou EEPROM,
- UART rozhraní pro komunikaci a programování,
- Jennic konektor pro připojení vysílací části,
- 40 pinový port pro další rozšíření,
- tlačítka RESET a PROGRAMMING.



## 3.2 Senzorový modul



Obrázek 3.2: Senzorový modul DR1048 [5].

- čidlo vlhkosti a teploty SHT11 s rozsahem od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $85^{\circ}\text{C}$ ,
- čidlo úrovně osvětlení TAOS TSL2550,
- 3 LED indikátory a 2 tlačítka,
- sériovou EEPROM,
- UART rozhraní pro komunikaci a programování,
- Jennic konektor pro připojení vysílací části,
- 40ti pinový port pro další rozšíření,
- tlačítka RESET a PROGRAMMING.

## 4 VYVOJOVÝ KIT ATMEL

Vývojový kit ATAVRRZ200 od firmy Atmel slouží k demonstraci standardu ZigBee. Pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz.

### 4.1 Obsah kitu

Sada obsahuje dva druhy komponentů. Jsou jimi modulová deska s displejem (Display Board) a modul s rádiem - Radio Controller Boards (RCBs).

Balení obsahuje:

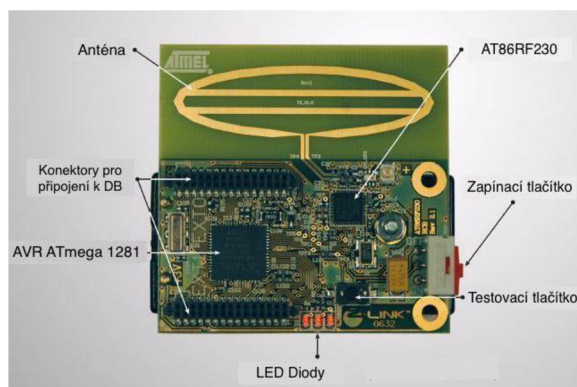
- deska s displejem (1ks)
- moduly s rádiovým vysílačem/přijímačem AT86RF230 (5ks)
- CDROM se softwarem AVR Studio, WinAVR, firmware k modulům a příručka
- AVRISP mkII In-System Programmer (k programování firmwaru)
- adaptér 3V k napájení desky s displejem

### 4.2 Popis hardwaru

Všech pět modulů RCB obsahuje mikrokontroler ATmega1281V a vysílač AT86FR230. Mikrokontroler má v sobě nahrán firmware pro spuštění demonstrační funkce. Tento program je propojen s vrstvou MAC, PHY a HAL a komunikuje s vysílacím čipem AT86FR230.

Modul RCB se skládá z:

- mikrokontroléru AVR ATmega 1281V
- rádiový vysílač/přijímač AT86FR230 s anténou na tištěném spoji
- dva konektory pro připojení k modulu s displejem
- držák na 2 baterie AAA
- vypínač
- testovací tlačítko
- tři LED diody

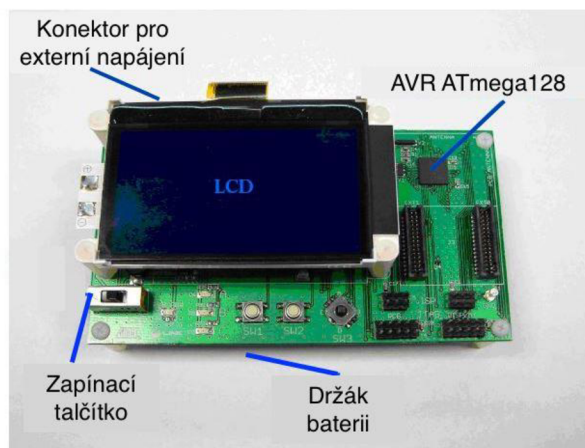


**Obrázek 4.1:** Popis modulu s rádiem (RCB) [6]

Modul s displejem slouží ke konfiguraci a monitorování zařízení v síti. Po připojení RCB modulu lze modulek naprogramovat pomocí ISP nebo JTAG

Modul s displejem se skládá z:

- mikroprocesoru AVR ATmega128L
- displeje LCD
- dva konektory pro připojení modulů RCB
- externí konektor na napájení
- držák na 2 baterie AA
- vypínač
- testovací tlačítka a joystick
- konektory na programování ISP a JTAG



**Obrázek 4.2:** Popis modulu s displejem [6]

## 5 USB DONGLE CC2531EMK

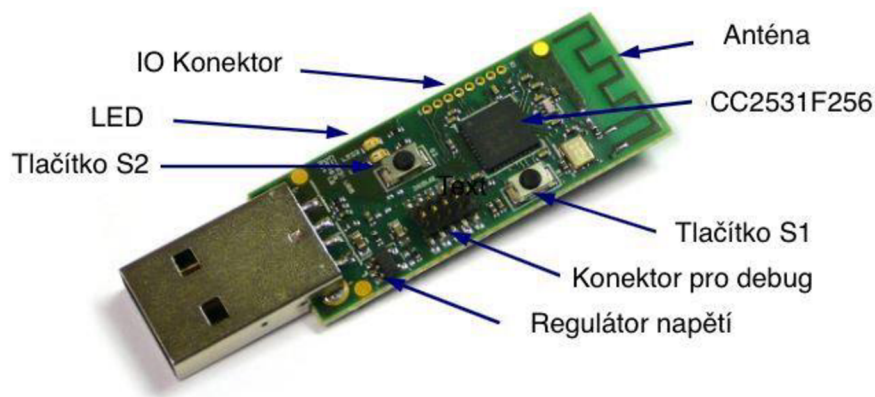
### 5.1 Popis

Tento USB dongle od firmy Texas Instruments obsahuje nezbytný hardware pro správné vyhodnocování, demonstraci, monitorování a vývoj softwaru pro aplikace v pásmu IEEE 802.15.4 nebo ZigBee. Čip CC2530 v sobě obsahuje optimalizovaný mikroprocesor 8051 a vysílací část na 2.4GHz. Zároveň podporuje rozhraní USB 2.0 a lze ho připojit k počítači. Pracuje a poskytuje rozsáhlou hardwarovou podporu pro manipulaci s pakety, ukládání dat, šifrování dat, ověřování dat, indikaci kvalitu spojení a časové informace o paketech [7].

Dongle je předem naprogramovaný jako paketový zachytávač, který budeme v laboratorní úloze používat k zachytávání ZigBee paketů.

USB dongl se skládá z:

- čipu CC2531 s anténou na tištěném spoji
- rozhraní USB
- dvě LED diody
- dvě malá tlačítka
- konektory pro připojení externích čidel nebo zařízení
- konektor pro programování a ladění řídicí jednotky



**Obrázek 4.3:** USB Dongle firmy Texas Instruments [7]

## 6 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo popsat jednotlivé vrstvy architektury ZigBee a seznámit se s jejich funkcemi. Druhá část bakalářské práce popisuje laboratorní úlohu. Úlohu má za cíl demonstrovat vybrané parametry a možnosti tohoto standardu.

Pro praktickou realizaci úloh jsem vybral vývojový kit firmy Jennic JN5139-EK010 a vývojový kit firmy Atmel ATAVRRZ200. Oba vývojové kity byly dostupné v laboratoři Mobilních komunikací ústavu radioelektroniky. Vývojový kit firmy Jennic obsahuje jeden hlavní modul a 4 senzorové programovatelné moduly. Senzorové moduly mohou měřit osvětlení, teplotu a vlhkost prostředí. Data ze senzorů se poté vysílají na displej hlavního modulu. Vývojový kit firmy Atmel obsahuje jeden hlavní modul s displejem a konektorem na programování a 5 programovatelných modulů. V ukázkovém programu od výrobce lze demonstrovat funkci vypínačů a světel (LED diod) v topologickém zapojení typu hvězda. V takovém zapojení prochází veškerá komunikace přes jediného PAN koordinátora sítě, který tuto komunikaci řídí.

V laboratorní úloze seznamují studenty s tímto standardem a s vývojovými kity firmy Atmel a Jennic. V první části laboratorní úlohy si student vyzkouší generování paketu ZigBee pomocí generátoru Rohde&Schwarz SMU200A. Paket poté zachytí pomocí USB Donglu od firmy Texas Instruments a jejich programem SmartRF Packet Sniffer. Druhá část laboratorní úlohy se zabývá fyzickou vrstvou standardu ZigBee. Student má za úkol proměřit pomocí spektrálního analyzátoru Rohde&Schwarz FSP všech 16 kanálů ZigBee, jejich středový kmitočet a výkon. U dvou vybraných poté i jejich šířku pásma. V třetí část má student za úkol zachytit komunikaci modulů firmy Atmel při zakládání a provozu sítě. Zachytávání paketů zajišťuje USB Dongle a program SmartRF Packet Sniffer. V tomto programu student v reálném čase vidí zachytávání paketů a také jejich obsah.

## 7 BIBLIOGRAFIE

- [1] IEEE STANDARD FOR LOCAL AND METROPOLITAN AREA NETWORKS. *Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. New York: IEEE, 314 s. ISBN 978-0-7381-6683-4..
- [2] ING. MILAN ŠIMEK, Ph.D. *Bezdrátové senzorové sítě*. První. Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav telekomunikací Purkyňova 118, 612 00 Brno, 2013, **978-80-214-4638-0**.
- [3] DAINTREE NETWORKS INC. *Getting Started with ZigBee and IEEE 802.15.4*. 2004–2010.
- [4] JENNIC. *DR1047 Controller Board Reference Manual*. Revision 1.1. 2007.
- [5] JENNIC. *DR1048 Sensor Board Reference Manual*. Revision 1.1. 2007.
- [6] ATAVRRZ200 Demonstration Kit - AT86RF230 (2450 MHz band) Radio Transceiver. *Atmel.com* [online]. 2006 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/tools/ATAVRRZ201AVRZ-LINK5-PACK2\\_4GHZRCB.aspx?tab=documents](http://www.atmel.com/tools/ATAVRRZ201AVRZ-LINK5-PACK2_4GHZRCB.aspx?tab=documents)
- [7] USB Dongle: CC2531 USB Hardware User's Guide. *TI*. b.r. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/ug/swru221a/swru221a.pdf>
- [8] *ROHDE & SCHWARZ. Generation of IEEE 802.15.4 Signals. Application Note*. b.r. b.r.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$f_c(k)$  střední frekvence ZigBee kanálu.

APL	Application Layer
ACK	Acknowledgement
BI	Beacon Interval
BO	Beacon Order
BPSK	Binary Phase-shift Keying
DB	Display Board
ED	End Device
EMC	Electromagnetic Compatibility,
FFD	Full Function Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISP	In System Programming
IFS	Inter Frame Spacing
JTAG	Joint Test Actoin Group
LED	Light-Emitting Diode
TI	Texas Instruments
MAC	Media Access Control
NWK	Network
O-QPSK	Offset-Quadrature Phase-shift Keying
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical Layer
R&S	Rohde&Schwarz
RCB	Radio Controller Boards
RFD	Reduced Function Device
SD	Superframe Duration
WPAN	Wireless Personal Area Network

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A. Laboratorní úloha</b>	<b>25</b>
A.1    Zadání .....	25
A.2    Teoretický úvod .....	25
A.3    Postup měření .....	28
<b>B. Vzorový protokol</b>	<b>34</b>
<b>C. Obsah přiloženého DVD</b>	<b>39</b>



# A. LABORATORNÍ ÚLOHA

## A.1 Zadání

1. Seznamte se systémem ZigBee
2. Seznamte se s obsluhou spektrálního analyzátoru Rohde&Schwarz FSP a generátoru Rohde&Schwarz SMU200A, moduly ZigBee JN5139-EK010 a ATAVRRZ200, programem TI SmartRF Packet Sniffer a se zapojením pracoviště.
3. Vytvořte pomocí programu Excel ZigBee paket a vysílejte ho generátorem Rohde&Schwarz SMU200A, poté ho zachyťte pomocí USB Donglu.
4. S použitím spektrálního analyzátoru zobrazte a proměřte všech 16 rádiových kanálů pro ZigBee, zobrazte šířku vybraného kanálu ZigBee změřte úroveň výkonu a přepočítejte na mW.
5. Zachyťte a popište komunikaci mezi PAN koordinátorem s modulky Atmel při vytváření sítě a při fungování tlačítko – světlo (LED dioda).

## A.2 Teoretický úvod

ZigBee je bezdrátová komunikační technologie postavená na standardu IEEE 802.15.4.5. Patří do skupiny personálních bezdrátových sítí Personal Area Network (PAN) například stejně jako technologie Bluetooth.

Zigbee pracuje ve těchto pásmech:

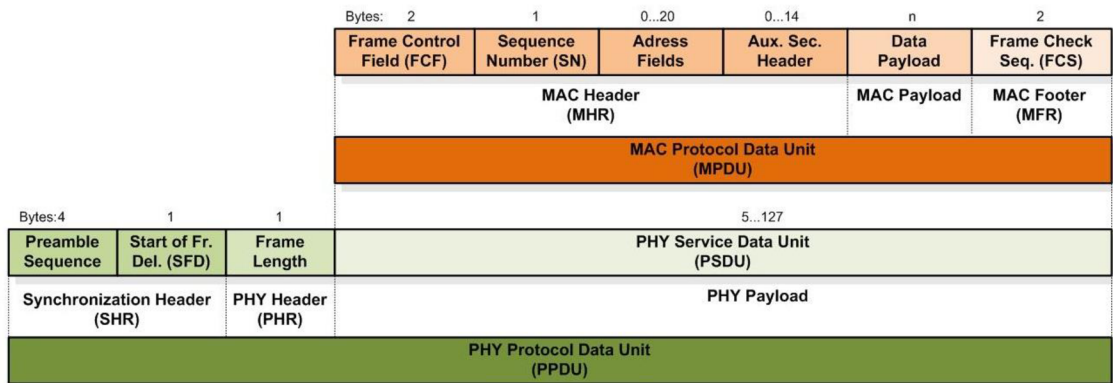
- 780- 787 MHz pro Čínu
- 950- 956 MHz pro Japonsko
- 868 – 868.6 MHz pro EU
- 902 – 928 MHz pro USA
- 2400 – 2483.5 MHz celosvětově

V pásmu 868 MHz je k dispozici jeden kanál s modulací Binary Phase-shift Keying (BPSK), v pásmu 915 MHz je k dispozici 10 kanálů s modulací BPSK. a v pásmu 2,4 GHz 16 kanálů s modulací Offset-Quadrature Phase-shift Keying (O-QPSK).

$$f_c(k) = 2405 + 5 \times (k - 11), [\text{MHz}] \quad (1)$$

Zigbee využívá při komunikaci komunikační protokol, který se skládá ze tří částí:

- fyzická a MAC vrstva
- síťová vrstva (NWK)
- aplikační vrstva (APL)



Obrázek A.1: schéma PHY/MAC protokolu

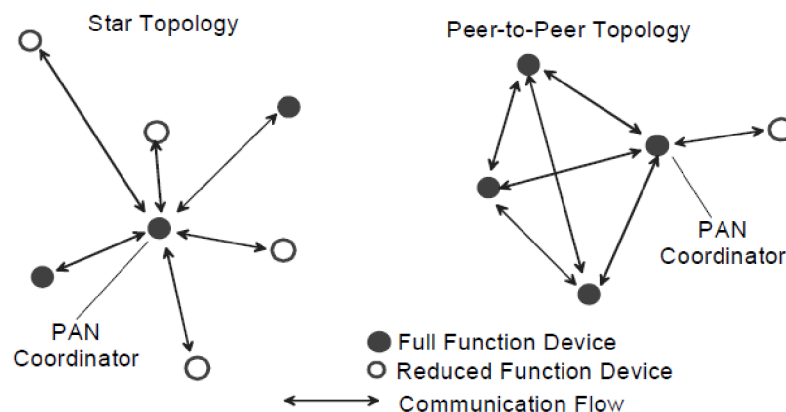
Zigbee využívá při komunikaci čtyř typů rámců. Ty jsou řídicí nebo datové:

- beacon Frame
- data Frame
- acknowledgment Frame
- MAC Command Frame

Standard IEEE 802.15.4 definuje 2 typy síťových zařízení:

**FFD** zařízení může vykonávat roli koordinátora sítě (PAN-C), směrovače (R-Router) nebo koncového prvku (ED - End Device). Koordinátor sítě má vždy jedinečnou adresu 0x00, je v síti jen jeden a může komunikovat s jinou WPAN sítí.

**RFD** zařízení je komunikační a senzorické zařízení, které nedisponuje funkcí směrování dat, to znamená, že komunikace s jiným RFD musí být přes FFD.



Obrázek A.2: Topologie hvězda a Peer-to-Peer [1].

### **A.2.1. Demonstrační program modulů RZ200**

Vývojové moduly od firmy Atmel jsou výrobcem naprogramovány tak, aby demonstrovaly praktické využití Zigbee v praxi. Znárodnují modelovou situaci kdy hlavní modul s displejem se chová jako PAN koordinátor a moduly RCB mají funkci vypínače nebo LED diody [6].

### **A.2.2. Utváření sítě**

Síť je sestavená do typu hvězda, to znamená, že veškerá komunikace probíhá přes PAN koordinátora takže přímá komunikace mezi koncovými zařízeními není povolena. PAN koordinátor také celou síť vytváří a po zapnutí vybírá volný kanál, na kterém bude vysílat. Na každém z kanálů 11 až 26 proto vyšle *Beacon Request*. Při tomto kroku se na displeji zobrazí *Scanning channels*, při kterém můžeme vidět, který kanál se aktuálně prohledává. Pokud už je na kanálu vytvořená jiná síť, PAN koordinátor této sítě na něj zareaguje odpovědí. Pokud je kanál volný, zůstane *Beacon Request* bez odpovědi. Síť se poté vytvoří na nejnižším volném kanále [6].

### **A.2.3. Připojení koncového zařízení**

Po zapnutí každého koncového zařízení se spustí funkce, která na každém z kanálů 11 až 26 vyšle *Beacon Request* a zaznamená si všechny odpovědi od PAN koordinátorů, kteří jsou v dosahu. Koncové zařízení potom vybere kanál na kterém vysílá PAN koordinátor, kterého podle PAN ID hledal. Poté se koncové zařízení pokusí připojit a při úspěšném připojení teprve obdrží adresu.

První připojené koncové zařízení dostane přiřazenou funkci výstupu LEDs zajištěnou LED diodami. Dalším zařízením bude přiřazena funkce vstupu-přepínače(switch) zajištěného tlačítkem T1. Druhé zařízení bude do sítě přidáno jako Switch 1, třetí jako Switch 2 a čtvrté jako Switch 3.

Tlačítkem SW1 pod displejem na PAN koordinátoru dokončíte konfiguraci sítě a koncová zařízení budou pracovat podle toho jak byla nedefinována [6].

### **A.2.4. Výsledná funkce sítě**

Poté, co jsme dokončili konfiguraci sítě budou koncová zařízení pracovat tak, že při stisku tlačítka T1 na koncovém zařízení se pošle zpráva PAN koordinátorovi aby oznámil výstupnímu koncovému zařízení s LED diodami přepnutí stavu. Koncové zařízení, které má v síti přidělenou Switch 1 bude přepínat LED diodu D1, zařízení Switch 2 bude přepínat LED diodu D2 a zařízení Switch 3 bude přepínat LED diodu D3.

Během provozu sítě jsou na displeji zaznamenávány informace o koncových zařízeních jako je počet stisknutí tlačítka, úroveň výkonu přijatého signálu PAN koordinátorem v dBm a aktuální stav každé LED diody [6].

## A.2.5. Demonstrační program modulků JENNIC

Modulky Jennic jsou od výrobce naprogramovány programem ZigBee Home Sensor demo. Tento program zobrazuje na hlavním modulku s displejem údaje, které naměří ze svých čidel připojené sensorové modulky. Na displeji tak můžeme vidět hodnotu z čidla vlhkosti, čidla teplo a čidla úrovně osvětlení v místnosti.

## A.2.6. Utváření sítě

Po zapnutí hlavního modulku s displejem se zobrazí logo JENNIC. Pod tímto logem můžeme vidět funkci tlačítek, které se najdeme pod displejem. Pomocí tlačítek **+/-** vybereme kanál, na kterém chceme vysílat. Poté stisknete tlačítko **Done**, tím se vytvoří síť a modul čeká na připojení modulků se senzory do sítě. Po připojení modulků se senzory do sítě můžeme vidět hodnoty, které naměří. Pomocí tlačítek lze přepínat zobrazení z jednotlivých čidel.

## A.3 Postup měření

**ad.3** Zapněte počítač a přihlaste se. Na ploše najdete soubor v excelu s názvem IEEE-802.15.4-Frame-Builder a otevřete jej. Je to vzorový dokument excel pro tvorbu paketů do Rohde&Schwarz SMU200A. Nejprve je potřeba povolit makra a ovládací prvky ActiveX. To provedeme tak, že v upozornění o zabezpečení klikneme na **povolit obsah**. V listu General je popsán standard IEEE-802.15.4, frekvenční pásma, PHY a MAC datový protokol a O-QPSK modulaci. Přepněte se do listu O-QPSK. Zde najdete obrázek s popisem celého PHY protokolu a možnost vygenerování si takového paketu.

Začneme stisknutím tlačítkem **Reset**, kterým dáme celý dokument do původní podoby. V první odstavci nastavíme:

- PAN ID Comp.: NO
- Frame Type: Data

Po zadání všech polí parametrů pro MAC vrstvu stiskneme tlačítko **update MHR**, tím hodnoty potvrdíme. Při správném zadání tlačítko zezelená. Na řádku *Data Payload* zadejte data, která budete přenášet. Zadat lze pouze hodnoty 00 až FF.

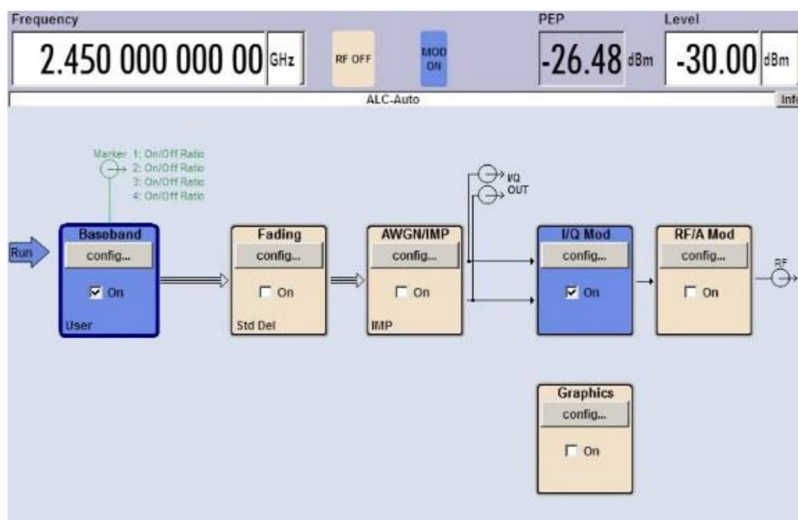
Pokračujte stisknutím tlačítka **Calc. FCS a Update MPDU**, tím jsme uzavřeli celý MAC protokol.

Poté je potřeba přidat data pro PHY vrstvu. Patří sem synchronizační hlavička SHR a informace *Frame Lenght* o délce protokolu MPDU. Synchronizační hlavička vychází ze standardu IEEE 802.15.4 a pro zachování kompatibility se ZigBee nesmí být změněna. Délka protokolu MAC rámce je zobrazena jako jedno-bytové číslo pod zkratkou Len a závisí na objemu přenášených dat. Tlačítkem **PPDU** uzavřeme celý PHY protokol.

Aby měl USB dongl dostatek času na zpracování přijatých dat, je potřeba na řádku IFS (Inter Frame Spacing) doplnit **6 bytes**.

Tlačítka **Create Data List** a **Create Ctr List** vygenerujeme data pro generátor a uložíme je na flash disk.

Zapněte Rohde&Schwarz SMU200A, kterým budeme generovat paket ZigBee. Po zapnutí můžete vidět celý vysílací kanál.



**Obrázek A.3:** Obrazovka generátoru R&S SMU200A

Vyjměte flash disk z počítače a zapojte jej do Rohde&Schwarz SMU200A. V okénku Baseband je potřeba nastavit jako zdroj dat náš soubor v excelu. To uděláme tak, že klikneme na **config- Custom Digital Mod**. Jako Data source zvolíme Data list. Tlačítka **Select Data List** a **Select Control List** zvolíme naše data vygenerované z excelového souboru. Potvrdíme tlačítkem Select. Dále zkontrolujte a případně opravte další nastavení:



- Set acc to standard na User
- Symbol Rate – 1Msym/s,
- Coding – OFF
- Modulation type user
- Load user Mapping 15.4-OQPSK
- Filter Root cosine
- Roll Off Factor - 0.35
- Power Ramp cont. - On/cosine/1.00sym.

Okno zavřeme a stiskneme **On** na kartě **Baseband**.

Na kartě I/Q Mod zvolíme **Internal Baseband I/Q**

Tlačítkem **FREQ** zvolte frekvenci kanálu na kterém ZigBee bude vysílat

Tlačítkem **LEVEL** nastavte velikost signálu na -30dBm. Modulaci spustíme tlačítkem I/Q Mod poté zapneme vysílání tlačítkem RF/A Mod.

Na ploše otevřete program Packet Sniffer. Program je od firmy Texas Instrument. A slouží k zachytávání paketů přes USB Dongle připojený k počítači. Zvolte možnost IEEE 802.15.4/ZigBee, poté stiskněte tlačítko **Start**. V kolonce Capture device uvidíte připojený USB Dongle CC2531. V kolonce Radio configuration zvolíme kanál nebo frekvenci zařízení. Poté můžeme program spustit klávesou F5 nebo tlačítkem  ve vrchní liště. Můžete sledovat průběh zachytávání paketů. Po několika vteřinách úspěšného přijímání paketů můžeme zachytávání vypnout pomocí tlačítka  nebo klávesou F6. Prohlédněte se zachycené pakety a zapište je do tabulky Tabulka 2:

Tabulka 2: Zachycený paket

Len.	Type	Sec	PnD	Ack	PAN	Seq	Dest PAN	Dest. Addr	Source PAN	Source Addr	MAC payload	LQI	FCS

Napište ve které části paketu se nachází vámi vysílaná data:.....

**ad.4** Zapněte spektrální analyzátor a nastavte:

- tlačítkem **FREQ** – start **FREQ** – Start 2400 MHz Stop 2485 MHz;
- **AMPT** – RF ATTEN MANUAL 50 dB,
- **REF LEVEL** - 10 dBm,
- **RANGE LOG** 70 dB,
- **UNIT** dBm;
- tlačítkem **SWEEP** – **SWEEPTIME** MANUAL 2,5 ms;
- tlačítkem **BW** – **RES BW** MANUAL 1 MHz
- **VIDEO BW** MANUAL 1 MHz.

Ověřte, zda je Jennic modul zapnutý a připojený ke spektrálnímu analyzátoru. Zapněte i druhý modulek, který bude přenášet informace na displej. Modulek ovládejte pomocí tlačítek. Tlačítkem **Reset** se vrátíte na úvodní obrazovku Jennic. Pomocí tlačítek **+/-** vyberte kanál, který chcete měřit a potvrďte tlačítkem **Done**. Kanál se poté zobrazí na spektrálním analyzátoru.

Nyní spusťte paměťový mód pomocí:

- **TRACE** – **DETECTOR** – **DETECTOR MAX PEAK**,
- **TRACE** – **SELECT TRACE** – 1,
- **CLEAR/WRITE**, **MAX HOLD**

Tlačítkem **MKR** a tlačítka **MAKER 1** a **MAKER 2** změřte centrální kmitočet, šířku pásma a výkon, který přepočítejte na mW. Pomocí vzorce (1) spočítejte kmitočty standardu ZigBee. Naměřené hodnoty zapište do tabulky Tabulka 3:



Tabulka 3: Měřené kanály Zigbee

Č. kanálu	Kmitočet (vypočtený)	Kmitočet (změřený)	Výkon nosné	Výkon nosné
	[MHz]	[MHz]	[dBm]	[mW]
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				

Změřte šířku dvou vybraných kanálů ZigBee, zapište jejich úroveň výkonu a poté ji přepočítejte na mW. Naměřené hodnoty zapište do tabulky Tabulka 4:

Tabulka 4: Vybrané kanály ZigBee pro změření šířky pásma

Č. kanálu	Šířka pásma	Kmitočet (vypočtený)	Kmitočet (změřený)	Výkon nosné	Výkon nosné
	[MHz]	[MHz]	[MHz]	[dBm]	[mW]

**ad.5** V programu Packet Sniffer klikněte na koš  a zastavte zachytávání. Při opětovném spuštění zachytávání tlačítkem  budou vymazány předchozí záznamy. Zapněte PAN koordinátora přepnutím přepínače do polohy BAT. Zapojený modulek je potřeba také zapnout a to tažením červeným vypínačem směrem k displeji. Zachycenou komunikaci запиšte do tabulky Tabulka 5:

Tabulka 5: Zachycené pakety komunikace

	<b>Typ paketu</b>	<b>Popis informace</b>	<b>Vysílá</b>	<b>Příjemce</b>
1				
2				

PAN koordinátor vytvořil síť, nyní můžeme zapnout modulek, který se pokusí přihlásit do sítě. Zachycenou komunikaci запиšte do tabulky Tabulka 6:

Tabulka 6: Zachycené pakety komunikace

	<b>Typ paketu</b>	<b>Popis informace</b>	<b>Vysílá</b>	<b>Příjemce</b>
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Zapněte další modulky a připojte je do sítě jako Switch. Přidělené adresy všech zařízení v síti potom запиšte do tabulky Tabulka 7:

Tabulka 7: Adresy zařízení v síti

<b>Zařízení</b>	<b>PAN koordinátor</b>	<b>LED</b>	<b>Switch 1</b>	<b>Switch 2</b>	<b>Switch 3</b>
Přidělená Adresa					



Po připojení všech zařízení zmáčkněte tlačítkem SW1 pod displejem na PAN koordinátoru, tím dokončíte konfiguraci sítě. Zapište komunikaci do tabulky Tabulka 8:

Tabulka 8: Zachycené pakety komunikace

	<b>Typ paketu</b>	<b>Popis informace</b>	<b>Vysílá</b>	<b>Příjemce</b>
1				
2				
3				
4				

Nyní již je síť hotová. Po stisknutí tlačítka T1 na některém z modulů Switch. Tím zapneme LED diodu na modulu, který jsme si nakonfigurovali jako LED. Komunikaci po stisknutí tlačítka zapište do tabulky Tabulka 9:

Tabulka 9: Zachycené pakety komunikace

	<b>Typ paketu</b>	<b>Popis informace</b>	<b>Vysílá</b>	<b>Příjemce</b>
1				
2				
3				
4				

### **Použité přístroje a pomůcky:**

Generátor Rohde&Schwarz SMU200A

Spektrální analyzátor Rohde&Schwarz FSP

Vývojový kit ZigBee JN5139-EK010

Vývojový kit ZigBee ATAVRRZ200

USB Dongle CC2531EMK

## B. VZOROVÝ PROTOKOL

Tabulka 10: Zachycený paket

Len.	Type	Sec	PnD	Ack	PAN	Seq	Dest PAN	Dest. Addr	Source PAN	Source Addr	MAC payload	LQI	FCS
	data	0	0	1	0	0x01	0x2222	0x1234	0x4444	0xABCD	Zaslaná data	0-255	OK

Napiště ve které části paketu se nachází vámi vysílaná data: MAC Payload  
Zaznamenané hodnoty z programu TI Packet Sniffer

Pnbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source PAN	Source Address	MAC payload	LQI	FCS	
			Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr								
RX 1	+0	15	DATA	0	0	1	0	0x01	0x2222	0x1234	0x4444	0xABCD	11	36	OK
RX 2	+1728	15	DATA	0	0	1	0	0x01	0x2222	0x1234	0x4444	0xABCD	22	36	OK
RX 3	+864	15	DATA	0	0	1	0	0x01	0x2222	0x1234	0x4444	0xABCD	22	36	OK
RX 4	+864	15	DATA	0	0	1	0	0x01	0x2222	0x1234	0x4444	0xABCD	11	36	OK
RX 5	+864	15	DATA	0	0	1	0	0x01	0x2222	0x1234	0x4444	0xABCD	11	36	OK

Packet count: 753    Error count: 1    Filter off    RF device: CC2531    Channel: 20 [0x14]

Obrázek B.1: Zaznamenané hodnoty z programu TI Packet Sniffer

Tabulka 11: Měřené kanály Zigbee

Č. kanálu	Kmitočet (vypočtený)	Kmitočet (změřený)	Výkon nosné	Výkon nosné
	[MHz]	[MHz]	[dBm]	[mW]
11	2405	2405±0,5	1~3	1,2~2
12	2410	2410±0,5	1~3	1,2~2
13	2415	2415±0,5	1~3	1,2~2
14	2420	2420±0,5	1~3	1,2~2
15	2425	2425±0,5	1~3	1,2~2
16	2430	2430±0,5	1~3	1,2~2
17	2435	2435±0,5	1~3	1,2~2
18	2440	2440±0,5	1~3	1,2~2
19	2445	2445±0,5	1~3	1,2~2
20	2450	2450±0,5	1~3	1,2~2
21	2455	2455±0,5	1~3	1,2~2
22	2460	2460±0,5	1~3	1,2~2
23	2465	2465±0,5	1~3	1,2~2
24	2470	2470±0,5	1~3	1,2~2
25	2475	2475±0,5	1~3	1,2~2
26	2480	2480±0,5	1~3	1,2~2

Změřte šířku dvou vybraných kanálů ZigBee, zapište jejich úroveň výkonu a poté ji přepočítejte na mW. Naměřené hodnoty zapište do tabulky Tabulka 4:

Tabulka 12: Vybrané kanály ZigBee pro změřeni šířky pásma

Č. kanálu	Šířka pásma	Kmitočet (vypočtený)	Kmitočet (změřený)	Výkon nosné	Výkon nosné
	[MHz]	[MHz]	[MHz]	[dBm]	[mW]
24	2,2	2470	2470,1	2,3	1,698
26	2,1	2480	2480,1	2,1	1,622

Tabulka 13: Zachycené pakety komunikace

	<b>Typ paketu</b>	<b>Popis informace</b>	<b>Vysílá</b>	<b>Příjemce</b>
1	Beacon Request	Prohledá všechny kanály	PAN	Jiný PAN
2	MAC payload	Poslání dat o založení sítě	PAN	Jiný PAN

PAN koordinátor vytvořil síť, nyní můžeme zapnout modulek, který se pokusí přihlásit do sítě. Zachycenou komunikaci zapište do tabulky:

Tabulka 14: Zachycené pakety komunikace

	<b>Typ paketu</b>	<b>Popis informace</b>	<b>Vysílá</b>	<b>Příjemce</b>
1	Beacon Reques	Vyhledávání PAN	modulek	PAN
2	Superframe specification	Odpověď s údaji	PAN	modulek
3	Asociation request	Žádost o připojení	modulek	PAN
4	ACK	Potvrzení příjmu	PAN	modulek
5	Data request	Žádost o adresu	modulek	PAN
6	ACK	Potvrzení příjmu	PAN	modulek
7	Short adress	Přidělení adresy	PAN	modulek
8	ACK	Potvrzení příjmu	modulek	PAN

Zapněte další modulky a připojte je do sítě jako Switch. Přidělené adresy všech zařízení v síti potom zapište do tabulky Tabulka 7:

Tabulka 15: Adresy zařízení v síti

<b>Zařízení</b>	<b>PAN koordinátor</b>	<b>LED</b>	<b>Switch 1</b>	<b>Switch 2</b>	<b>Switch 3</b>
<b>Přidělená Adresa</b>	Pokaždé jiné	Pokaždé jiné	Pokaždé jiné	Pokaždé jiné	Pokaždé jiné

Obrázek B.2: Komunikace při sestavování sítě

Po připojení všech zařízení zmáčkněte tlačítkem SW1 pod displejem na PAN koordinátoru, tím dokončíte konfiguraci sítě. Zapište komunikaci do tabulky:

Tabulka 16: Zachycené pakety komunikace

	Typ paketu	Popis informace	Vysílá	Příjemce
1	MAC payload	Informace o funkci	PAN	LED
2	ACK	Potvrzení příjmu	LED	PAN
3	MAC payload	Informace o funkci	PAN	Switch 1
4	ACK	Potvrzení příjmu	Switch 1	PAN

Nyní již je síť hotová. Po stisknutí tlačítka T1 na některém z modulů Switch. Tím zapneme LED diodu na modulku, který jsme si nakonfigurovali jako LED. Komunikaci po stisknutí tlačítka zapište do tabulky:

Tabulka 17: Zachycené pakety komunikace

	Typ paketu	Popis informace	Vysílá	Příjemce
1	MAC payload	Stisk tlačítka	Switch 1	PAN
2	ACK	Potvrzení příjmu	PAN	Switch1
3	MAC payload	Zapnutí LED 1	PAN	LED
4	ACK	Potvrzení příjmu	LED	PAN

Zachycené pakety po stisknutí tlačítka SW1 jsou na obrázku **Obrázek B.3: Zachycené pakety po stisknutí tlačítka SW1** **Obrázek B.3** **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (končí modrým označením) a po stisknutí tlačítka na modulku Switch

Pnbr.	Time (us)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX			Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr							
20	+30903042 =233908764	12	DATA	0	0	1	1	0x66	0x2112	0x6B13	0xBAAD	00	110	OK
21	+768 =233909532	5	ACK	0	0	0	0	0x66						
22	+3055 =233912587	12	DATA	0	0	1	1	0x67	0x2112	0x26BE	0xBAAD	01	110	OK
23	+769 =233913356	5	ACK	0	0	0	0	0x67						
24	+21168303 =255081659	12	DATA	0	0	1	1	0xAE	0x2112	0xBAAD	0x26BE	01	113	OK
25	+768 =255082427	5	ACK	0	0	0	0	0xAE						
26	+3404 =255085831	12	DATA	0	0	1	1	0x68	0x2112	0x6B13	0xBAAD	10	110	OK

Packet count: 31    Error count: 1    Filter off    RF device: CC2531    Channel: 11 [0x0B]    Packet broadcast OFF

**Obrázek B.3: Zachycené pakety po stisknutí tlačítka SW1**

## **C. OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD**

Na přiloženém DVD se nachází text bakalářské práce ve formátu PDF, instalační program Packet Sniffer (Setup\_SmartRF\_Packet\_Sniffer\_2.18.1) a soubor formátu excel pro generátor Rohde&Schwarz SMU200A.