

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

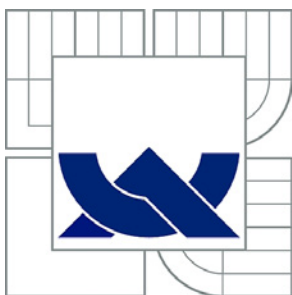
REALIZACE BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ S
MIKROKONTROLÉRY ATMEL AVR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

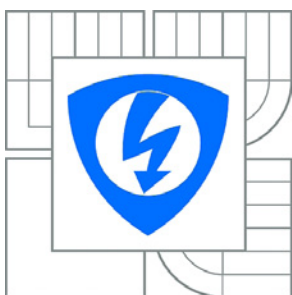
Bc. UBOMÍR MRÁZ

BRNO 2010



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

REALIZACE BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ S MIKROKONTROLÉRY ATMEL AVR

WIRELESS SENSOR NETWORK WITH ATMEL AVR MICROCONTROLLERS.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

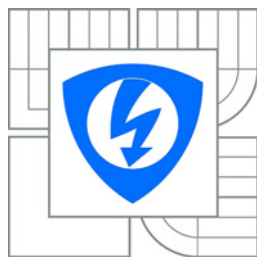
Bc. UBOMÍR MRÁZ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILAN ŠIMEK

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. ubomír Mráz

ID: 83444

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Realizace bezdrátové senzorové sítě s mikrokontroléry Atmel AVR

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student v práci prostuduje komunikační standard IEEE 802.15.4 a jeho nadstavbu Zigbee. Cíle práce: Navrhněte, popište a implementujte senzorickou platformu pro uzly bezdrátové senzorické sítě. Platforma bude zaměřená na bezdrátový sběr dat v oblasti inteligentních budov. Tato platforma bude obsahovat následující bloky: senzorickou a rádiovou část, obslužný mikrokontrolér a vhodné napájení z akumulátoru. Uzly sítě operující pod touto platformou budou řízené mikrokontrolérem AVR a vybavené vhodným rádiovým modulem. Při návrhu hardwarové platformy bude kladen důraz na nízkou energetickou spotřebu. Komunikace mezi uzly sítě bude realizovaná pomocí Zigbee standardu. Nakonec navrhněte vhodný aplikační protokol pro sběr dat ze senzorické platformy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Bakshi B. A., Prasanna K. V.: Architecture-Independent Programming for Wireless Sensor Networks, Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-0-471-77889-9

[2] Kohvakka M., Suhonen J., Kuorilehto M.: Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-0-470-05786-5

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Milan Šimek

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí ani vytvářením diplomové práce porušit autorská práva těchto 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.

Anotace

Táto diplomová práca pojednáva o norme IEEE 802.15.4 a Zigbee určenej pre bezdrátové senzorické siete. Tieto normy sú podrobne popísané v prvých dvoch kapitolách. Hlavnou prioritou bezdrátových senzorických sietí je minimálny príkon zariadení pri nízkej cene a maximálnej spoľahlivosti prenosu dát. Minimálna spotreba je umožnená vďaka výrazne zníženej zložitosti oproti štandardným bezdrátovým sieťam. V práci sa ďalej popisuje návrh hardvérovej platformy pre realizáciu bezdrátových senzorických sietí so zameraním na inteligentné budovy. V kapitolách 5 a 6 je diskutovaná softvérová implementácia štandardov do navrhutej hardvérovej platformy. V poslednej kapitole je v práci vypracované porovnanie navrhutej hardvérovej platformy a komerčne dostupných nástrojov.

Kľúčová slova : adhoc, mesh, WSN, bezdrátová senzorická sieť, Zigbee, IEEE 802.15.4, Meshnetics, Atmel, AVR , Bitcloud, OpenMAC, 6LoWPAN, Atmega, zigbit

Abstract

This diploma thesis describes the standard IEEE802.15.4 and Zigbee for wireless sensor networks. These norms are described in detail in the first two chapters. The main priority of the wireless sensor networks is to minimize the power of the devices and the price while maximizing the reliability of the data transfer. Minimum consumption is provided by the significantly lowered complexity in comparison to the standard wireless networks. Further, the design of the concept of the complex and universal hardware platform focused on intelligent building is described. Software implementation of those norms is described in the chapters five and six. Finally, comparison of the designed hardware platform and the other commercial platforms is described in the last chapter.

Keywords : adhoc, mesh, WSN, wireless sensor network, Zigbee, IEEE 802.15.4, Meshnetics, Atmel, AVR , Bitcloud, OpenMAC, 6LoWPAN, Atmega, zigbit

MRÁZ, L. *Realizace bezdrátové senzorové sítě s mikrokontroléry Atmel AVR: diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 74 stran, 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. M. Šimek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „*Realizace bezdrátové senzorové sítě s mikrokontroléry Atmel AVR*“ 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu práce Ing. Milanovi Šimekovi za užitočnú metodickú pomoc a cenné rady pri spracovaní diplomovej práce. Ďalej by som rád pod'akoval Ing. Ondřejovi Hynčicovi a Ing. Radomírovi Svobodovi, Ph.D za odbornú a materiálnu pomoc.

V Brne dňa

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod.....	3
1. Bezdrôtové senzorické siete	4
1.1 Aplikačné Využitie Bezdrôtových senzorických sietí.....	5
1.2 Charakteristické znaky wsn.....	6
1.3 Komponenty typického zariadenia vo WSN sieti	6
2 Štandardy pre bezdrôtové senzorické siete IEEE 802.15.4/Zigbee	7
2.1 Bezdrôtové siete podľa IEEE štandardy pre WLAN, WPAN, LR-WPAN.....	7
2.2 Štandard IEEE 802.15.4 pre LR-WPAN.....	9
2.2.1 Zariadenia a ich funkcionality v IEEE 802.15.4.....	9
2.2.2 Adresácia v IEEE 802.15.4.....	10
2.2.3 Sieťové topológie v IEEE 802.15.4.....	10
2.2.4 Fyzická vrstva (PHY) v IEEE 802.15.4.....	11
2.2.4.1 Služby fyzickej vrstvy (PHY) v IEEE 802.15.4	12
2.2.4.2 Formát paketu fyzickej vrstvy (PHY) v IEEE 802.15.4	15
2.2.5 Linková vrstva v IEEE 802.15.4	16
2.2.5.1 Linková vrstva IEEE 802.15.4 , PAN ID, beacon vs non-beacon.....	16
2.2.5.2 Linková vrstva IEEE 802.15.4 , beacon mód, superframe a GTS.....	17
2.2.5.3 Linková vrstva IEEE 802.15.4 , prenos dát.....	19
2.2.5.4 Služby linkovej vrstvy (MAC) v IEEE 802.15.4.....	20
2.2.5.5 MAC rámce v IEEE 802.15.4	23
2.2.5.6 Šifrovanie a autenticita dát v IEEE 802.15.4.....	24
2.2.6 Úvod do Zigbee	24
2.2.6.1 Štandard Zigbee.....	25
2.2.6.2 Zigbee , architektúra	26
2.2.6.3 Zigbee, sieťová vrstva	26
2.2.6.4 Aplikačná vrstva (APL) v Zigbee	28
2.2.6.4.1 Aplikačná podvrstva APS (Application Support Sublayer).....	28
2.2.6.4.2 Aplikačná vrstva , aplikačný framework.....	28
2.2.6.4.3 Zigbee Device Object (ZDO) , Zigbee Device Profile (ZDP), Deskriptory	31
2.2.6.5 Zigbee, Security Servis Provider.....	32
3 Inteligentné budovy a WSN	34
4 Hardvérová platforma pre uzly wsn.....	35
4.1 Napájanie.....	35
4.2 Senzory.....	37
4.3 Rádiový modul	38
4.4 Mikrokontrolér a rádiový modul Zigbit.....	39
4.5 Návrh hardvérovej platformy	40
4.5.1 Senzorická doska	40

4.5.2	Rádiová doska s Zigbit modulom ATZB 24-A2	44
4.5.3	Spotreba hardvérovej platformy	44
5	Vývojové nástroje pre Zigbit moduly	46
5.1	Programovanie v Zigbee	47
5.2	Bitcloud - Zigbee pro stack	48
5.3	Portovanie Bitcloudu pre navrhnutú harvérovú platformu Mininode	49
5.4	Vývojový cyklus a použité nástroje	51
6	Demonštračná aplikácia	52
6.1	Demonštračná aplikácia, veľkosť kódu	63
7	Návrh aplikačného protokolu pre hardvérovú platformu	64
8	Koexistencia Zigbee a ďalších bezdrátových technológií	64
9	Porovnanie hardvérových platforiem pre implementáciu wsn	65
	Záver	66

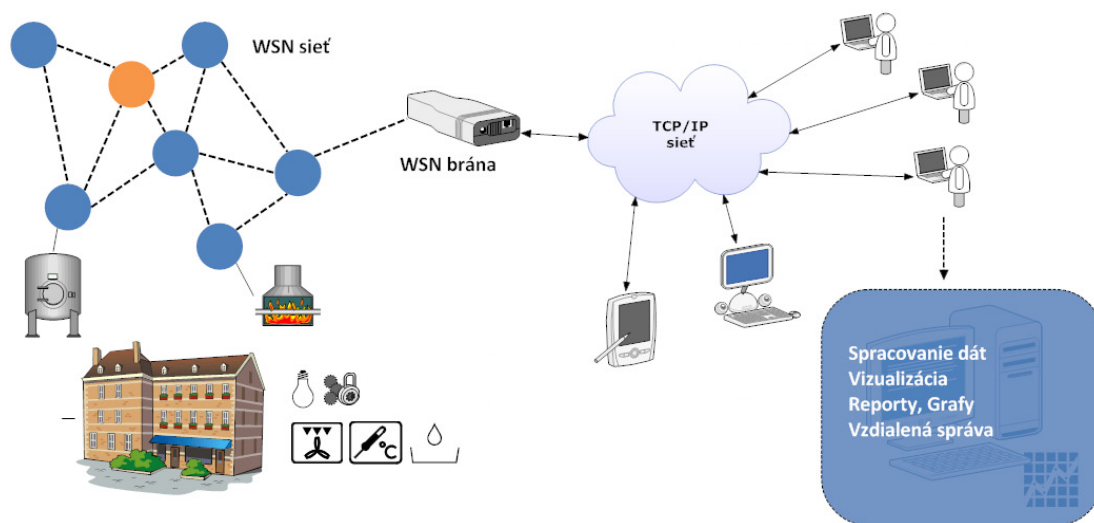
ÚVOD

Bezdrôtovým sensorickým sieťam marketingový odborníci pripisujú veľkú budúcnosť. Ide o malé, lacné a veľmi nízko príkonové zariadenia, ktoré môžu spolu bezdrôtovo komunikovať za účelom zberu dát a riadenia. Zatiaľ je to však technológia s veľkým potenciálom, jej reálne nasadenie v praxi nie je bežné. Až v nedávnej minulosti vznikli štandardy, ktoré definujú tento druh sietí. Veľká väčšina dnešných sensorických sietí je postavená na štandarde IEEE 802.15.4. Štandard definuje fyzický rádiový prenos a prístup na médium. Donedávna však chýbala nadstavba, ktorá by tento štandard využila a doplnila za účelom reálneho nasadenia bezdrôtových sensorických sietí v priemyselnej praxi. Existuje viacero proprietárnych protokolov nad štandardom IEEE 802.15.4, avšak tie sú často zbytočne zložité. Práve túto aplikačnú dieru sa snaží zaplatať Zigbee aliancia, ktorej členmi sú popredné svetové priemyselné firmy. Cieľom tejto aliance je tvorba štandardu, ktorý je dostatočne spoľahlivý, jednoduchý a použiteľný pri veľmi nízkej spotrebe uzlov siete. Tento štandard sa volá Zigbee a je vhodný pre priemyselné aplikácie, aplikácie v tzv. inteligentných budovách a spotrebnú elektroniku.

Cieľom tejto práce je prezentovať štandardy IEEE 802.15.4/Zigbee a navrhnúť hardvérovú platformu použiteľnú v oblasti inteligentných budov. Práca začína krátkym úvodom do problematiky bezdrôtových sietí. V prvých kapitolách práca informuje čitateľa o vyššie spomínaných štandardoch. Výklad je uskutočnený z pohľadu vývojára koncovej aplikácie a preto sa fyzickej vrstve nevenuje širší priestor. V nasledujúcich kapitolách sa popisuje návrh a realizácia hardvérovej platformy s dôrazom na nízku energetickú spotrebu. Ďalej práca diskutuje problematiku implementácie štandardov IEEE 802.15.4 a Zigbee do navrhutej hardvérovej platformy. V práci nie sú popísané implementačné detaily ako je komunikácia po zbernici I²C so senzormi alebo ovládanie rozhrania USART. Záujemcom sú dostupné zdrojové kódy a katalógové listy na priloženom DVD nosiči. Pre demonštračné účely je zostavená aplikácia, ktorá je v práci analyzovaná ako z pohľadu prenášaných dát vzduchom, tak z pohľadu ovládacieho programu, ktorý riadi jednotlivé uzly sensorickej siete. V závere práce je uvedené prehľadné porovnanie komerčných platforiem a hardvérovej platformy popisovanej v diplomovej práci.

1. BEZDRÔTOVÉ SENZORICKÉ SIETE

Bezdrôtová senzorická sieť (WSN – wireless sensor network) je skupina malých zariadení rozmiestnených v rámci určitého fyzického priestoru, ktoré môžu spolu bezdrôtovo komunikovať za účelom monitorovania alebo riadenia, prípadne oboch. Monitorovanie je v zmysle zberu dát zo senzorov (teplota, vlhkosť, tlak, intenzita svetla, detekciu pohybu atď.) a odoslanie nameraných dát nadradenému systému na spracovanie, analýzu a ďalšie vyhodnotenie. Riadenie je v zmysle kontroly určitého akčného členu (požiarny hlásič, spínanie osvetlenia). Aplikačný priestor pre WSN je široký. WSN môže priniesť výhody všade tam, kde je potreba monitorovať, riadiť a klasifikovať objekty, fyzikálne veličiny a deje a polozenie metalického prípadne optického vedenia nie je možné, alebo je finančne nevýhodné. Nasadenie senzorických sietí v bežnej praxi zatiaľ nie je bežné. Až v nedávnej minulosti vznikli štandardy, ktoré definujú tento druh sietí. Veľká väčšina dnešných senzorických sietí je postavená na otvorenom štandarde IEEE 802.15.4 [1][2]. Štandard definuje fyzický rádiový prenos a prístup na médium. Donedávna však chýbala nadstavba, ktorá by tento štandard využila a doplnila za účelom reálneho nasadenia senzorických sietí v priemyselnej praxi. Existuje viacero proprietárnych protokolov nad štandardom IEEE 802.15.4, avšak tie sú často príliš zložité vďaka synchronizácii zariadení, prepínaniu rádiových kanálov a komplexnosti smerovania. Práve túto aplikačnú diery sa snaží vyplniť Zigbee Aliancia [26], ktorej členmi sú popredné svetové priemyselné firmy. Cieľom tejto aliancie je tvorba štandardu, ktorý je reálne použiteľný v praxi. Tento štandard sa volá Zigbee [1-6] a je vhodný pre priemyselné aplikácie, aplikácie v tzv. "inteligentných budovách" a spotrebnú elektroniku. WSN v inteligentných domoch je napríklad sústava senzorov snímajúcich pohyb v objekte, detekciu rozbitia skla, otvorenia dverí, vzniku požiaru prípadne úniku plynu v kooperácii s inteligentným riadením vykurovania na základe pohybu v objekte, času a teploty okolia. WSN môže ďalej riadiť osvetlenie bez nutnosti zbytočných nákladov za úpravy a natiahnutie kabeľáže v stenách. Spomínaná inteligencia budov spočíva v širokých možnostiach výhodného riadenia celého objektu či už priamo lokálne alebo cez internet prostredníctvom brány a ekonomickejšej prevádzky ako pri riadení bez použitia WSN technológie. Obecne prvkami sensorovej siete by mali byť jednoduché, malé a lacné zariadenia s veľmi nízkou spotrebou. Pokiaľ je to možné, uzol siete sa okamžite po vykonaní úlohy prepne do úsporného režimu. Typický uzol wsn je v režime spánku viac ako 99% celkového času. Z tohoto dôvodu sú zariadenia vo wsn navrhnuté tak, aby mali veľmi nízku klúdovú spotrebu.



OBR. 1 WSN SIEŤ

1.1 APLIKAČNÉ VYUŽITIE BEZDRÔTOVÝCH SENZORICKÝCH SIETÍ

“Domáca automatizácia“ tzv. “Inteligentné budovy“

(Home, Building automation)

Bezpečnostné systémy v dome, ako sústava senzorov snímajúcich pohyb v objekte, detekciu rozbitia skla, otvorenia dverí, vznik požiaru prípadne únik plynu v kooperácii s inteligentným riadením vykurovania na základe pohybu v objekte, času a teploty okolia. WSN môže riadiť aj bezdrôtové ovládanie osvetlenia bez nutnosti zbytočných nákladov za úpravy a natiahnutie kabeľáže v stenách. Spomínaná inteligencia budov spočíva v širokých možnostiach výhodného riadenia celého objektu či už priamo lokálne alebo cez internet prostredníctvom brány.

Meracie systémy (Elektromery, plynomery, vodomery atď.)

(Automatic meter-reading AMR)

Pravidelné odpočty meracích prístrojov pomocou senzorickej siete umožňujú eliminovať chybu ľudského faktoru, sledovať presnú spotrebu, zistiť úniky, prípadne presnejšie lokalizovať nelegálny odber.

Monitorovanie prostredia

(Environmental monitoring)

Bezdrôtové senzory rozmiestnené v priestore za účelom prevencie a odhalenia prírodných živlov ako je požiar, zemetrasenie a povodeň .

Zavlažovacie systémy

(Irrigation systems)

Senzorická sieť v tejto oblasti umožňuje poskytnúť presné informácie o vlhkosti pôdy v danom fyzickom priestore a tým umožniť efektívne naplánovať (prípadne riadiť) zavlažovanie na základe informácií o vlhkosti pôdy, počasia a ročného obdobia bez nutnosti kabeľáže v rámci rozľahlých priestorov.

Ovládanie spotrebnej elektroniky

(Consumer Electronics)

Univerzálne diaľkové ovládanie televízneho prijímača, počítača, domáceho kina, hračiek atď.

Priemyselná automatizácia

(Industrial automation)

Náhrada drahých káblových spojení v monitorovacích a kontrolných systémoch vo fabrikách.

Lokalizácia a manažment tovaru

(Asset and inventory tracking)

Optimalizácia prepravy a skladovania tovaru na základe lokalizácie

Zdravotníctvo

(Health service)

Vzdialené monitorovanie stavu pacienta a odosielanie informácií z medicínskych prístrojov priamo k lekárovi.

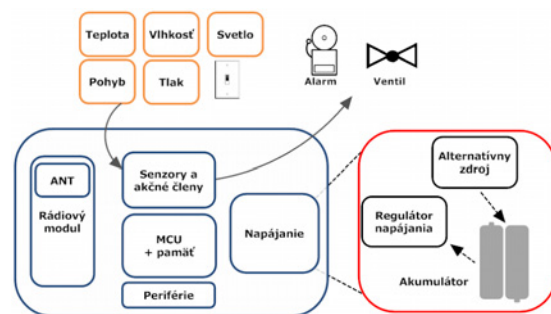
1.2 CHARAKTERISTICKÉ ZNAKY WSN

- Veľký počet uzlov v sieti (redundancia) oproti bežným WLAN (wireless local area network) sieťam. Táto redundancia je s výhodou využitá pri smerovaní paketov a zaručení robustnosti siete.
- Veľmi nízka spotreba a dlhá výdrž zariadenia: Uzly siete obvykle nemajú prístup k napájaniu, tieto zariadenia sú napájané z batérií alebo alternatívnych zdrojov energie
- Krátka aktívna doba uzlov siete
- Krátke dátové pakety (IEEE 802.15.4 max. 127 bajtov)
- Odolnosť voči chybám ako je výpadok napájania, prípadne zarušenie kanálu
- Nízka cena
- Malé rozmery zariadení: Sieťové prvky by mali byť pokiaľ možno „neviditeľné“
- Bezproblémová škálovateľnosť: Dynamický počet pripojených zariadení v sieti
- Schopnosť samo organizácie (selforganization) – sieť je schopná logického usporiadania svojich uzlov do definovanej topológie bez ľudského zásahu
- Schopnosť samo opravy siete (selfhealing) – sieť je schopná detekovať prípadne opraviť poruchu uzlov bez ľudského zásahu
- Spolahlivý, bezpečný a šifrovaný prenos
- Jednoduchá inštalácia, konfigurácia a obsluha siete
- Činnosť v bezlicenčnom pásme

1.3 KOMPONENTY TYPICKÉHO ZARIADENIA VO WSN SIETI

Typický uzol bezdrôtovej senzorickej siete pozostáva z nasledujúcich častí (Obr. 2) :

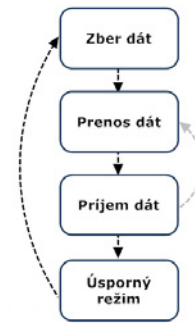
- **Mikrokontrolér** : Obvykle 8-bit, pracujúci na nízkom kmitočte (jednotky MHz) pri nízkom napätí. Obsahuje: I/O porty so všeobecným využitím, A/D prevodník, rozhranie UART [38] a potrebné komunikačné zbernice I²C [30], SPI [37], 1 wire [39].
- **Firmvér** : softvér vytvorený pre daný mikrokontrolér, definuje chovanie sieťového zariadenia.
- **Anténa a rádiový modul**: Tieto komponenty sú kľúčové z hľadiska dosahu, rozmerov a celkovej spotreby zariadenia.
- **Napájanie**: Zdroj energie, uskladnenie energie, regulátor napätia, akumulátory, batérie, alternatívne zdroje (solárna, vibračná, termodynamická energia).
- **Senzory**: Typicky integrované obvody s digitálnym výstupom, ktoré snímajú vybrané fyzikálne veličiny.
- **Akčné členy**: Vykonávajú obslužnú funkciu – spustenie alarmu, nastavenie klapky.
- **Periférie**: Doplnkové konektory a obvody.



OBR. 2 TYPICKÝ UZOL VO WSN

Pracovné režimy wsn uzlu (Obr. 3) [25] :

- **zber dát** – snímanie, prevod signálu z analógovej do digitálnej podoby (A/D prevodník), spracovanie, uloženie dát
- **prenos dát** – kódovanie, zapuzdrenie dát do rámcov, vysielanie
- **príjem dát** – filtrovanie, dekodovanie, extrahovanie dát, kontrola chýb
- **sleeping** – úsporný režim



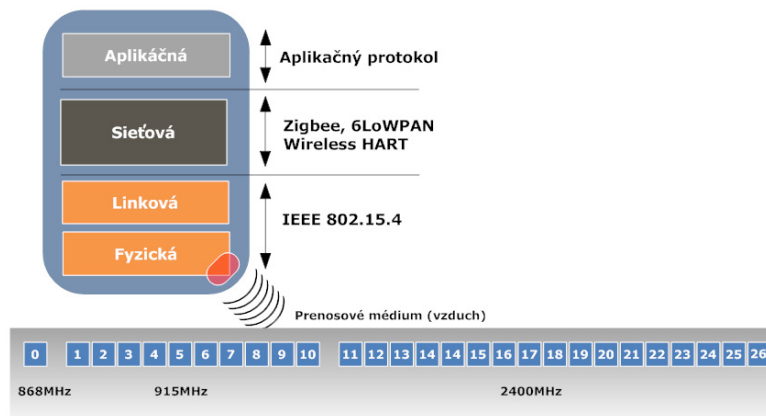
OBR. 3 REŽIMY WSN UZLU

2 ŠTANDARDY PRE BEZDRÔTOVÉ SENZORICKÉ SIETE IEEE 802.15.4/ZIGBEE

Štandard 802.15 WPAN™ je z dielne neziskovej organizácie IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) konkrétne pracovnej skupiny s číslom 4. Produktom tejto organizácie sú v súčasnosti najúspešnejšie štandardy na poli bezdrôtových technológií ako je wifi, wimax a bluetooth. IEEE poskytuje svoje štandardy voľne k dispozícii, čo len ďalej urýchľuje ich nasadenie v praxi. Nízko rýchlostný a nízko energetický štandard IEEE 802.15.4 je dnes základom väčšiny bezdrôtových senzorických sietí. Definuje spodné dve vrstvy, fyzickú a linkovú, v rámci OSI modelu.

Štandard Zigbee je produktom Zigbee aliancie. Táto asociácia je združením priemyselných spoločností ako je Honeywell, Emerson, Freescale, Texas Instruments, OKI, Pioneer atď. so zameraním na WSN technológie a jej nasadenie v reálnych podmienkach. Základom Zigbee je práve IEEE 802.15.4 resp. jeho časť. Zigbee dopĺňa jednopopovú komunikáciu z 802.15.4 multihopovou komunikáciou (routing), pridáva zabezpečenie, schopnosti ako sú samo oprava a samo organizácia siete. Ďalej definuje aplikačný framework, ktorý predurčuje, aby aplikácie pod Zigbee boli v rámci rôznych výrobcov vzájomne kompatibilné a aby jedno sieťové zariadenie mohlo obsluhovať niekoľko rôznych aplikácií.

Práve spojenie oboch otvorených štandardov 802.15.4 a Zigbee je najperspektívnejšou technológiou súčasnosti na poli bezdrôtových senzorických sietí.



OBR. 4 IEEE 802.15.4 A ZIGBEE Z POHLADU VRSTVOVÉHO MODELU

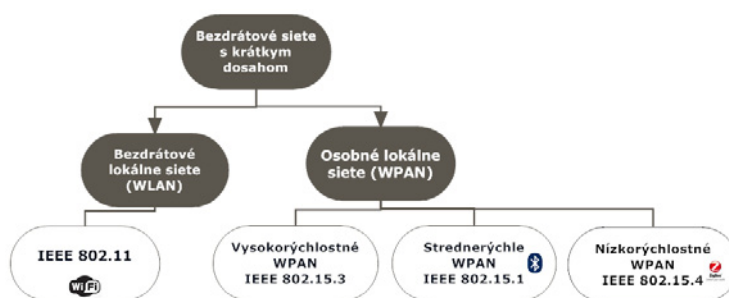
2.1 BEZDRÔTOVÉ SIETE PODĽA IEEE ŠTANDARDY PRE WLAN, WPAN, LR-WPAN

Prvotnou snahou WLAN je nahradiť existujúce káblové spojenie medzi uzlami siete v rámci lokálnej siete (LAN) flexibilnejším bezdrôtovým spojením. Vo WLAN je dôraz kladený na čo najväčší dosah, kapacitu možných spojení a prenosovú rýchlosť. Na rozdiel vo WPAN (wireless personal area network) a hlavne v LR-WPAN (low rate wpan) je hlavný dôraz kladený na extrémne nízku spotrebu, malé rozmery a cenu. Prenosová rýchlosť a dosah je v LR-WPAN je až druhoradé kritérium. Pre názornejšiu predstavu vid' Tab. 1 .

TAB. 1 POROVNANIE WLAN,WPAN,LR-WPAN

	802.11b WLAN wifi	802.15.1 WPAN bluetooth	802.15.4 LR-WPAN
Dosah	100m	10-100m	10m
Prenosová rýchlosť	2-11Mb/s	1Mb/s	<=250kbit/s
Spotreba	Stredná	Nízka	Veľmi nízka
Veľkosť	Veľká	Menšia	Najmenšia

Skupina IEEE 802.15 definuje tri kategórie bezdrôtových personálnych sietí WPAN. Každú vetvu má v kompetencii jedna pracovná skupina (TG, Task Group). Tieto pracovné skupiny TG1, TG3 a TG4 produkujú normy, ktoré majú zhodné pomenovanie ako samotná pracovná skupina.



OBR. 5 KATEGORIZÁCIA WPAN SIETÍ

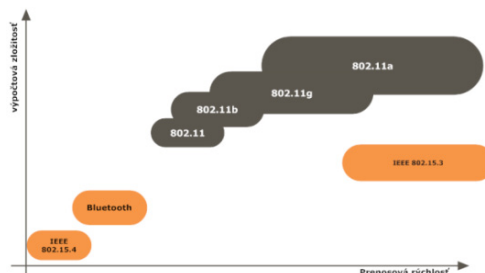
Norma IEEE 802.15.1 známa aj ako Bluetooth bola navrhnutá ako náhrada káblového spojenia pre spotrebnú elektroniku prevažne mobilné telefóny, kde úroveň QoS je postačujúca pre prenos hlasu.

Norma IEEE 802.15.3 je vhodná pre aplikácie s multimediálnym obsahom vyžadujúce vysokú úroveň QoS.

Norma IEEE 802.15.4 vyplňa priestor pre špecifické aplikácie, kde hlavným kritériom je extrémne nízka spotreba a cena. Latencia a QoS sú vedľajšie požiadavky. Práve táto norma je základom pre bezdrôtové senzorické siete.

V IEEE 802.15 figuruje ešte pracovná skupina 2 pod označením Coexistence Task Group, ktorá má za úlohu riešiť koexistenciu vyššie spomínaných štandardov.

Obrázok uvedený nižšie ilustruje umiestnenie IEEE 802.15.4 v priestore WLAN (šedá) a WPAN (oranžová) sietí. Ako už bolo spomenuté, norma 802.15.4 nemá za cieľ konkurovať prekrývajúcim sa vysokorýchlostným WLAN sieťovým technológiám. Práve naopak, jej cieľom je poskytnúť doplnkovú platformu pre aplikácie, ktoré ležia na druhej strane spektra ako dnes už všadeprítomné wifi siete. Jej hlavné zameranie je poskytnúť spoľahlivú, nízko príkonovú a bezpečnú platformu vhodnú aj do priemyselného prostredia a aplikácie priemyselnej automatizácie.



OBR. 6 POROVNANIE WLAN A WPAN

2.2 ŠTANDARD IEEE 802.15.4 PRE LR-WPAN

V tejto kapitole bude podrobnejšie popísaný štandard 802.15.4 pre nízko rýchlostné siete podľa najnovšej revízie z roku 2006, ktorý rozširuje, opravuje a je spätne kompatibilný (s určitými výnimkami) s normou IEEE 802.15.4 z roku 2003. Tento štandard definuje pravidlá pre bezdrôtovú komunikáciu medzi zariadeniami v rámci LR-WPAN. Štandard je voľne dostupný na internete [1].

Pozn.: V roku 2007 IEEE skupina vydala rozširujúci doplnok poslednej revízie z roku 2006. Tento doplnok definuje služby LRWPAN v nových kmitočtových pásmach. Jedná sa UWB pásmo s frekvenciami <1GHz, 3 GHz, 5 GHz, 6 GHz a 10GHz. Reálne však zatiaľ nie sú dostupné rádiové moduly, ktoré by podporovali tento dodatok. Preto tento doplnok diskutovaný nebude.

Z pohľadu OSI modelu štandard definuje fyzickú vrstvu (PHY) a linkovú vrstvu (MAC). Vyššie vrstvy nie sú definované. Tieto vrstvy dopĺňajú ďalšie protokoly ako 6LoWPAN [40], Wireless HART [41] a hlavne Zigbee [3]-[5], o ktorý je predmetom tejto práce. Pozíciu IEEE 802.15.4 medzi spomínanými protokolmi graficky znázorňuje Obr. 4.

Vlastnosti štandardu :

- Otvorený a voľne dostupný štandard
- Spojenie bod-bod
- Nízka zložitosť a cena uzlov siete
- Spoľahlivosť a robustnosť
- Topológia hviezda, peer-to-peer
- Prenosové rýchlosti max. 250kbit/s
- 16bitová alebo rozšírená 64bitová adresa zariadenia v sieti
- Synchronizácia zariadení v sieti beacon-enabled, nesynchronizovaná sieť bez beaconov
- Voliteľné použitie alokácie garantovaného časového slotu (GTS)
- Prístupová metóda CSMA-CA (slotovaná, neslotovaná)
- Potvrdzovanie ACK medzi uzlami siete
- Detekcia energie (ED) a obsadenosti (CCA) kanálu
- Indikácia kvality spojenia na základe merania sily signálu (LQI)
- Operácia v bezplatnom frekvenčnom pásme

2.2.1 ZARIADENIA A ICH FUNKCIONALITA V IEEE 802.15.4

Podľa hardvérového vybavenia wsn uzlu štandard definuje nasledujúce zariadenia :

- **Plne funkčné zariadenie (FFD – full-function device)** schopné vykonávať všetky režimy práce v rámci siete, obsluhuje kompletnú sadu MAC služieb a umožňuje komunikovať so všetkými zariadeniami v rámci siete.
- **Zariadenie s redukovanou funkčnosťou (RFD – reduced function device).** Môže figurovať iba pod režimom network device a komunikovať iba s FFD zariadením. Tento typ zariadenia je zamýšľaný ako veľmi jednoduchá jednotka, ktorá napríklad ovláda vypínač svetla, prípadne nahromadí dáta so senzorov, odošle nadradenému zariadeniu a prepne sa do úsporného režimu. Strieda aktívneho režimu je zvyčajne pod 1%. Dôraz pri implementácii je kladený na využitie čo možno najmenších prostriedkov či už pamäťových alebo obvodových a tým znížiť výslednú cenu oproti FFD zariadeniu. Finančný motív je dôležitý aspekt pri WSN, pretože sieť má obvykle až stovky uzlov.

Bezdrôtová sieť pozostáva z vyššie spomínaných zariadení, ktoré môžu figurovať pod nasledujúcou logickou funkcionalitou (device role) :

- **PAN koordinátor** – jedinečné zariadenie v sieti, ktoré môže založiť a manažovať sieť, iba zariadenie typu FFD
- **Koordinátor** – zariadenie v sieti, ktoré môže poskytovať služby ďalším zariadeniam, napr. môže slúžiť ako smerovač, koordinátorom môže byť iba zariadenie typu FFD
- **Network Device** – zariadenie, ktoré môže komunikovať iba s nadradeným koordinátorom, zariadenie môže byť typu FFD alebo RFD.

Najjednoduchšia sieť podľa 802.15.4 pozostáva z jedného PAN koordinátora a ďalšieho zariadenia Koordinátora alebo Network Device.

2.2.2 ADRESÁCIA V IEEE 802.15.4

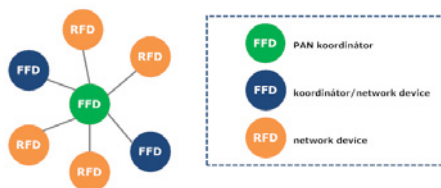
Podobne ako sú adresované zariadenia v IP sieťach (kombinácia unikátna MAC adresa na linkovej vrstve a logická IP adresa na sieťovej vrstve) podobne aj v IEEE 802.15.4 majú sieťové zariadenia dva typy adres :

- **64bitová MAC adresa** - nazývaná aj ako IEEE adresa, dlhá adresa (long address) alebo rozšírená adresa (extended address). Táto adresa musí byť celosvetovo unikátna v rámci každého zariadenia a je nemenná. Horných 24 bitov je tzv. Organizational Unique Identifier. Tento identifikátor prideluje IEEE za určitý finančný poplatok. Zvyšné bity poskytujú dostatočný (2^{64}) priestor pre každé vyrobené zariadenie. IEEE nedefinuje, akým spôsobom ma byť táto adresa implementovaná.
Pozn.: Rádiový modul fyzickú adresu neobsahuje. MAC adresa môže byť uložená v rámci firmvéru, špeciálneho integrovaného obvodu, prípadne v externej nonvolatilnej pamäti.
- **16bitová skrátená adresa** – táto adresa je logická a môže sa meniť pri každom pripojení zariadenia do siete. Zariadenie ju dostane buď v rámci asociačného procesu alebo naďalej používa svoju MAC adresu. Význam skrátenej adresy je zmenšiť dĺžku prenášaných rámcov. Systém, akým sa vyberie konkrétna adresa pre dané zariadenie, závisí od použitej sieťovej topológie a protokolu na vyššej vrstve (napr. Zigbee). V štandarde Zigbee: v topológii strom je logická adresa zviazaná s logickou polohou zariadenia v strome. Pri topológii mesh je to prakticky jedno či koordinátor pridelí logickú adresu určitým algoritmom, čisto náhodne alebo zariadenie si môže zvoliť vlastnú adresu a požiadať o pridelenie tejto adresy koordinátora.

2.2.3 SIEŤOVÉ TOPOLÓGIE V IEEE 802.15.4

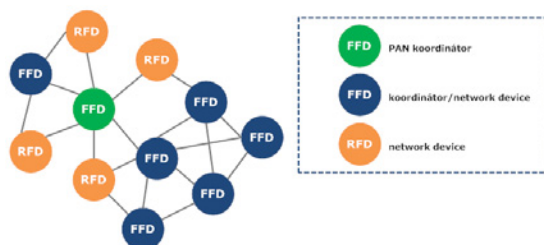
Štandard definuje dve topológie :

- **Hviezda** – Formovaná zariadením FFD v režime PAN koordinátor a komunikujúcim s ostatnými FFD alebo RFD zariadeniami. V tejto topológii iba PAN koordinátor komunikuje s viacerými účastníkmi. Ostatné zariadenia komunikujú iba prostredníctvom PAN koordinátora



OBR. 7 TOPOLÓGIA IEEE 802.15.4 HVIEZDA

- **Peer-to-Peer** – bez centrálnej koordinácie, PAN koordinátor sa však musí v sieti nachádzať. Každé FFD zariadenie môže komunikovať s ďalšími zariadeniami. Vznikajú tak redundantné cesty, čo podporuje spoľahlivosť siete ale zároveň zvyšuje náročnosť na smerovanie v sieti. Existuje viacero konceptov a implementácií tohto druhu topológie, štandard však žiadnu z nich nedefinuje. Deje sa tak na vyšších vrstvách, štandard však poskytuje dobrý základ pre ich realizáciu. V súčasnosti sa presadzuje hlavne topológia Mesh, ktorá je aj základom štandardu Zigbee.



OBR. 8 TOPOLOGIA IEEE 802.15.4 PEER-TO-PEER

2.2.4 FYZICKÁ VRSTVA (PHY) v IEEE 802.15.4

Fyzická vrstva definuje rozhranie medzi linkovou vrstvou a prenosovým médiom. V prípade wsn je týmto médiom vzduch. Rádiofrekvenčné pásmo ako súčasť prírodného bohatstva je prísne regulované. IEEE 802.15.4 využíva tri bezlicenčné pásma, ktoré sú regulované napríklad : výstupným výkonom, striedou vysielania, použitou moduláciou atď. Dostupné pásma v rámci štandardu sú nasledovné:

- **868 MHz** (868-868,6MHz) prístupné vo väčšine Európskych krajín
1 kanál
- **915 MHz** (902-928MHz) dostupné v Severnej Amerike, Austrálii, na Novom Zélande a v niektorých krajinách južnej Ameriky
10 kanálov
- **2.4GHz** (2.4-2.4835 GHz) dostupné vo väčšine krajín
16 kanálov

Kľúčové úlohy fyzickej vrstvy :

- Aktivácia a deaktivácia rádiového modulu
- Prenos dát
- Detekcia nosnej (Carrier sensing)
- Ladenie a prepínanie kanálov
- Vyhodnotenie kvality signálu
- Generovanie LQI (Link Quality Indicator) z prijatých paketov
- Kódovanie a modulácia dát
- Oprava chýb

Norma zavádza okrem dostupných kanálov pre jednotlivé kmitočtové pásma aj určitý koncept jemnejšieho delenia (vid' Tab. 2). V štandarde sa na to používa termín stránkovanie. Je to v dôsledku pestrosti použitých modulácií. V IEEE 802.15.4 (2006) sú definované modulácie: BPSK, O-QPSK, ASK ďalej rozprestieracie techniky spektra PSSS, DSSS to vedie k rôznym prenosovým rýchlostiam (20, 40, 250kbit/s) v danom pásme pre danú moduláciu. Štandard v súčasnosti definuje 3 stránky, zvyšných 27 je pre budúce použitie. Najnovšie doplnenie štandardu (2007) počíta aj s UWB pásmom. Stránky teda umožňujú presne definovať väzbu, moduláciu a frekvenčné pásmo. Pre lepšiu predstavu je možné uviesť nasledujúci príklad. Aplikačný vývojár má k dispozícii

rádiové moduly splňujúce normu IEEE 802.15.4. Skôr ako začne navrhovať sieťové protokoly, musí zvoliť frekvenčné pásmo podľa aplikačných potrieb (dosah, rušenie, fyzické rozmery, prenosové rýchlosti), kanály v ktorých bude možné operovať a teda vybrať aj vhodnú stránku.

TAB. 2 STRÁNKY V IEEE 802.15.4

Stránka	Číslo kanálu	Pásmo, modulácia	Bitová rýchlosť [kb/s]	Čipová rýchlosť
0	0	868 MHz band (BPSK)	20	300 kchip/s
	1-10	915 MHz band (BPSK)	40	600 kchip/s
	11-26	2.4 GHz band (O-QPSK)	250	2 Mchip/s
1	0	868 MHz band (ASK)	250	400 kchip/s
	1-10	915 MHz band (ASK)	250	1.6 Mchip/s
	11-26	Rezervované	-	-
2	0	868 MHz band (O-QPSK)	100	400 kchip/s
	1-10	915 MHz band (O-QPSK)	250	1 Mchip/s
	11-26	Rezervované	-	-
3-31	Rezervované	Rezervované	-	-

Pozn.: Na trhu sú dostupné rádiové moduly pre pásmo 868/915Mhz a 2.4Ghz. Každé frekvenčné pásmo však vyžaduje svoju vlastnú anténu (iná vlnová dĺžka). Preto obvykle sieťový uzol podporuje iba jedno frekvenčné pásmo. Na prvý pohľad sa ponúka ako najoptimálnejšia voľba 2.4GHz pásma, pretože je dostupné po celom svete. Toto pásmo je však využívané aj ďalšími bezdrôtovými technológiami. Kanály sa prevažne prekrývajú s wifi kanálmi. Niekedy je vhodnejšie zvoliť subgigahertzové pásmo, v Európe 868MHz. Bohužiaľ toto pásmo je úzke, takže je k dispozícii iba jeden kanál. V prípade silného rušenia kanálu, nie je možnosť zvoliť iný kanál. Na druhej strane impedančné prispôsobenie k anténe nie je tak kritické ako na vyšších frekvenciách v pásme 2.4GHz. Ďalej v tomto pásme je možné ťažiť z lepšej penetrácie rádiového signálu prekážkami a väčším dosahom. Problémom však môže byť väčšia vlnová dĺžka t.j. rozmernejšia anténa.

Ďalej rádiová vrstva (modulácie, rozprestieranie signálu, rádiové regulácie) štandardu popisovaná nebude. Z pohľadu vývojára aplikácie je potrebný prehľad a na samotný fyzický prenos dát je možné nazerať ako na blackbox. Záujemci o podrobnosti nájdu detaily v literatúre [1], kde sú všetky modulácie a techniky rozprestierania spektra, rozprestieracie postupnosti atď. podrobne vysvetlené.

2.2.4.1 SLUŽBY FYZICKEJ VRSTVY (PHY) V IEEE 802.15.4

Fyzická vrstva poskytuje bránu medzi rádiovým kanálom a linkovou vrstvou. Inými slovami, dáta z rádiového kanálu musia byť nejakým spôsobom spracované a musí byť zavedený mechanizmus, akým tieto dáta posunúť do vyššej vrstvy.

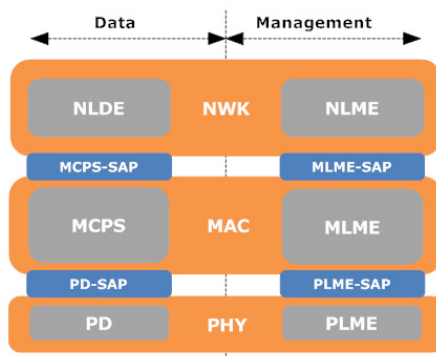
Štandard definuje služby fyzickej vrstvy :

- **Dátové služby fyzickej vrstvy (PHY data service, PD)** : umožňuje vykonávať obsluhu výmeny dát
- **Management fyzickej vrstvy (PHY management service, PLME)** : poskytuje prostriedky k nastaveniu komunikácie a rádiovkej časti

Tieto služby sú dostupné prostredníctvom prístupových bodov (SAP, service access point) :

- **PHY layer data service access point (PD-SAP)**
- **PHY layer management entity service access point (PLME-SAP)**

Prístupové body SAP sa vyskytujú medzi všetkými vrstvami. Je to umelo vytvorený abstraktný koncept pre zjednodušenie zapuzdrenia jednotlivých vrstiev a implementácie štandardu.



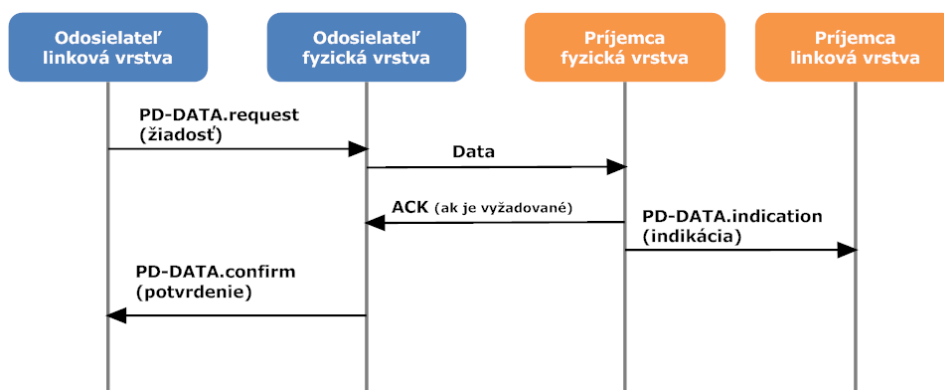
OBR. 9 VRSTVY A PRÍSTUPOVE BODY V IEEE 802.15.4

Ďalší koncept, ktorý využívajú oba štandardy (IEEE 802.14.5 / Zigbee) sa nazýva služby primitív (service primitives). Tieto služby sú jednotný systém pre prenos informácií medzi susednými vrstvami prostredníctvom prístupových bodov, pomocou tzv. primitív. Každá z vrstiev fyzická, linková aj sieťová posielajú informácie vyššej vrstve pomocou vhodnej primitívy (príkazu, funkcie, volania) a príslušnej služby.

K dispozícii sú 4 služby:

- <primitíva>.request (žiadosť)
- <primitíva>.confirmation (potvrdenie)
- <primitíva>.indication (indikácia)
- <primitíva>.response (odpoveď)

Nasledujúci obrázok ilustruje ako sa využíva mechanizmus primitív a služieb pri výmene dát medzi fyzickou a linkovou vrstvou, odosielateľom a prijímateľom. Odosielateľ vykoná žiadosť o zaslanie dát a dostane potvrdenie o vykonanej operácii. Na druhej strane prijímateľ dostane informáciu o prijímaní dát.



OBR. 10 UKÁŽKA PRENOSU DÁT MEDZI VRSTVAMI A PRIJÍMATEĽOM A ODOSIELATEĽOM

Manažment fyzickej vrstvy a jej služby :

Ako je uvedené vyššie, PLME poskytuje prostriedky k nastaveniu komunikácie a rádiovkej časti. Tieto prostriedky sú reálne množina primitív. Nasledujúca tabuľka popisuje dostupné primitívy fyzickej vrstvy.

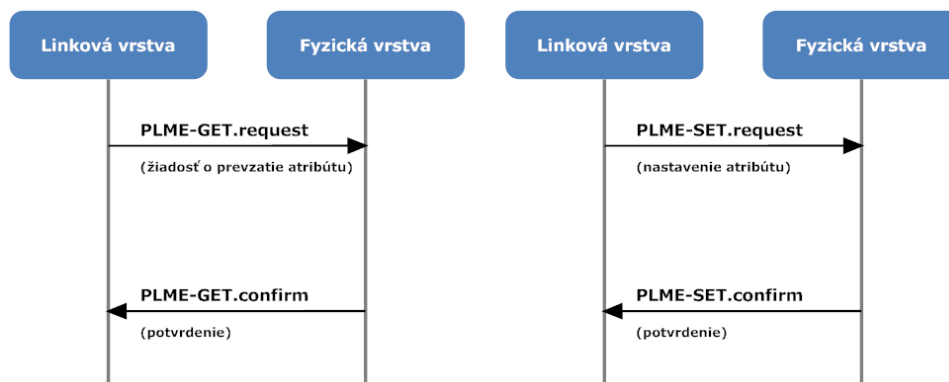
TAB. 3 PHY MANAŽMENT, PLME PRIMITÍVY

Primitíva	Účel	Popis
PLME-GET	Nastavenie komunikácie	PIB management
PLME-SET		
PLME-SET-TRX-STATE	Ovládanie rádia	ON/OFF RX, TX, TRX
PLME-ED	RF meranie	Meranie energie rádiového kanálu
PLME-CCA		

PAN Information Base a obsahuje (PIB) obsahuje konfigurovateľné parametre fyzickej vrstvy. To úzko súvisí s procesmi a prenosom dát na fyzickej vrstve. K jednotlivým parametrom sa opäť pristupuje pomocou služieb (PLME-GET/SET). Situáciu ilustruje Obr. 11.

PIB parametre (str.45 [1]) :

- používaný kanál (phyCurrentChannel)
- kanál (phyChannelsSupported)
- vysielač výkon (phyTransmitPower)
- mód energetického skenu (phyCCAMode)
- používaná stránka (phyCurrentPage)
- max. dĺžka rámcu (phyMaxFrameDuration)
- dĺžka synchronizačnej hlavičky (phySHRDuration)
- počet symbolov/oktet (phySymbolsPerOctet)



OBR. 11 PLME, SPÔSOB ZÁPISU A ČITANIA ATRIBÚTOV Z PIB

Ďalšia primitíva PLME-SET-TRX-STATE poskytuje obsluhu rádiového modulu (on/off TX, RX, TRX). Táto jednoduchá funkcionalita v kombinácii s dobrým plánovaním prináša veľmi výhodné vlastnosti z hľadiska efektívneho znižovania spotreby celého zariadenia (str.39 [1]).

Nasledujúca primitíva je Energy detection PLME-ED (PLME-ED.request, PLME-ED.confirm). V prípade, že zariadenie chce pristúpiť k zdieľanému rádiovému kanálu, musí vyhodnotiť či je kanál voľný resp. dostupný a až potom zahájiť vlastné vysielačie. Práve to je úlohou primitívy PLME-ED. Tento príkaz vykoná energetické meranie signálu na danom kanále a poskytne výsledky merania v rozsahu jedného bajtu (256 úrovní). Táto

primitíva nevyhodnocuje logicky zachytené dáta t.j. nezáleží či na kanále prebieha komunikácia podľa IEEE 802.15.4 alebo inej bezdrôtovej technológie.

Práve logické vyhodnotenie definuje primitíva PLME-CCA (Clear channel assesment). Na pozadí je toto vyhodnotenie spracované z výsledkov primitívy PLME-ED. Takže zariadenie pošle príkaz z linkovej vrstvy PLME-CCA.request na vykonanie merania, po určitom čase zariadenie prijme vyhodnotenie z fyzickej vrstvy o tom, či je kanál obsadený alebo nie.

Norma definuje 3 módy CCA :

- CCA mód 1 : Energy above threshold
Výsledok ED merania sa porovná s energetickým thresholdom. Ak je nameraná ED hodnota vyššia ako tento threshold, kanál je považovaný za obsadený
- CCA mód 2 : Carrier sense only
Kanál je považovaný za obsadený, ak prijatý signál po demodulovaní odpovedá (carrier sense) štandardu IEEE 802.15.4
- CCA mód 3 : Carrier sense with energy above threshold
Je logická kombinácia predošlých dvoch módov.

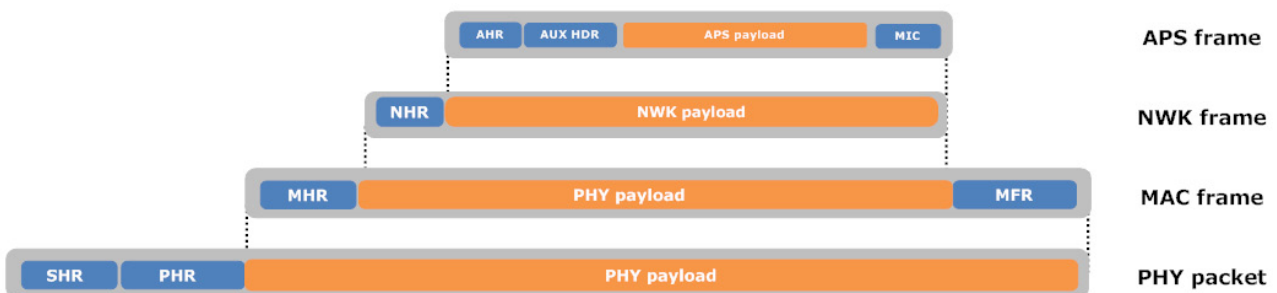
2.2.4.2 FORMÁT PAKETU FYZICKEJ VRSTVY (PHY) V IEEE 802.15.4

Pomenovanie paket na fyzickej vrstve zrejme nie je úplne správne z pohľadu OSI modelu. V anglickej literatúre je však výraz "packet" na fyzickej vrstve bežne zaužívaný, každopádne sa jedná o sekvenciu jednoznačne oddeliteľnú od ostatných. Podstatný je fakt, že tento paket v sebe obsahuje postupne zapuzdrené všetky dáta (rámce) z vyšších vrstiev (Obr. 13).

Štruktúra paketu (**PHY Protocol Data Unit, PPDU**) :



OBR. 12 ŠTRUKTÚRA PAKETU NA FYZICKEJ VRSTVE



OBR. 13 ZAPÚZDRENIE DÁT V RÁMCI VRSTIEV, IEEE 802.15.4 A ZIGBEE

2.2.5 LINKOVÁ VRSTVA V IEEE 802.15.4

Táto vrstva leží v sieťovej abstrakcii nad vrstvou fyzickou, popisovanou v predošlej kapitole. Linková vrstva (MAC) riadi prístup k médiu. Keďže norma definuje frekvenčné pásma, ktoré sú nelicencované, teda voľne dostupné, je zrejmé, že manažovanie prístupu na zdieľané médium, v ktorom sa vyskytuje n možných zariadení, pracujúcich na báze n možných štandardoch, je kľúčové.

Štandard je pri definícii MAC vrstvy značne obsiahly a preto budú ďalej uvedené hlavne prostriedky priamo naviazané na Zigbee špecifikáciu. Pre poskytnutie ucelenej predstavy o tom, čo norma IEEE 802.15.4 poskytuje, budú ostatné vlastnosti uvedené prehľadovo.

Kľúčové úlohy linkovej vrstvy :

- Prístup k zdieľanému médiu (CSMA-CA)
- Zapuzdrenie "holých" dát do MAC rámcov
- Kontrola správnosti prijatého rámcu (Kontrolný súčet v záhlaví rámca, MFR)
- Adresácia zariadení
- PAN asociácia a disasociácia
- Generovanie a správa beaconov
- Poskytnutie autenticity, integrity a šifrovania (AES)
- Manažovanie GTS

2.2.5.1 LINKOVÁ VRSTVA IEEE 802.15.4 , PAN ID, BEACON VS NON-BEACON

Každá sieť definovaná štandardom 802.15.4 vzniká tak, že sa zariadenie typu FFD ustanoví ako PAN koordinátor. Takto vytvorená sieť komunikuje nezávisle na ostatných, vďaka jednoznačnému 16-bitovému identifikátoru PAN ID (Personal area network identification). Z toho vyplýva, že teoreticky v rámci jedného fyzického priestoru (POS, personal operating space) môže byť $2^{16} = 65536$ sietí. To samozrejme nie je reálne. PAN ID ustanoví PAN koordinátor počas zostavovania siete. Unikátnosť môže byť dosiahnutá vďaka skenovaniu všetkých dostupných kanálov a získania PAN ID z okolitých sietí v rádiovom dosahu. Na základe týchto informácií je PAN koordinátor schopný zvoliť unikátne PAN ID. Zároveň to znamená, že v rámci jedného fyzického priestoru môžu existovať dve a viac rôznych sietí, operujúcich na tom istom kanále, vďaka odlišeniu pomocou spomínaného identifikátoru PAN ID.

Pozn. V štandarde Zigbee 2006 mohli byť rovnaké PAN ID na rôznych kanáloch aj v rámci jedného fyzického priestoru. V Zigbee PRO toto už nie je možné, lebo verzia PRO umožňuje preladenie na iný kanál v prípade rušenia bez nutnosti znovu vytvorenia siete. Táto možnosť sa nazýva Frequency Agility (nemá nič spoločné s Frequency Hopping moduláciou).

Späť však k štandardu 802.15.4. Po ustanovení PAN ID môže PAN koordinátor začať v pravidelných intervaloch emitovať beacon rámce a synchronizovať tak ostatné zariadenia v sieti. Tento typ siete s pravidelným vysielaním beaconov sa volá beacon-enabled PAN. Beacon je možné preložiť ako signálny oheň, prípadne maják. Pre vysvetlenie pojmu môže dobre poslúžiť predstava majáku, ktorý informuje všetky lode v jeho viditeľnom dosahu o svojej prítomnosti.

Beacon sa používa pri dvoch mechanizmoch :

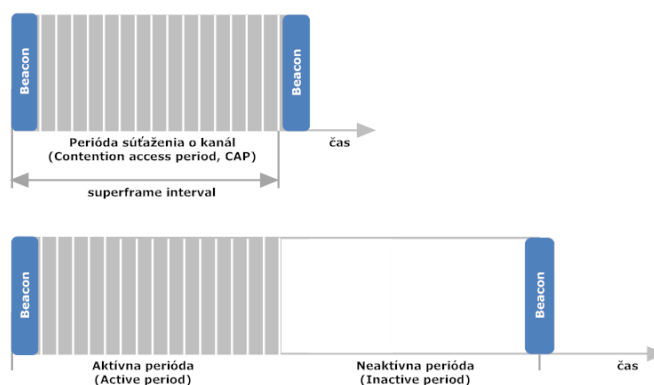
- Pre synchronizáciu v sieti typu beacon-enabled PAN. V sieti typu nonbeacon-enabled sa beacon nevyskytuje s výnimkou asociačného procesu
- Pri pripájaní sa zariadení do siete pomocou asociácie. Tento beacon sa v rámci asociácie vyskytuje v oboch typoch beacon-enabled PAN aj v non-beacon enabled PAN.

Vďaka beacon paketom sa môžu zariadenia RFD a FFD pripojiť k sieti prostredníctvom asociácie. Zariadenie, ktoré sa chce pripojiť do siete zachytáva beacon pakety na zvolených rádiových kanáloch. Po dokončení skenovania vyššie vrstvy daného zariadenia rozhodnú, či a do ktorej siete sa toto zariadenie pripojí prostredníctvom požiadavky na asociáciu. Na druhej strane taktiež PAN koordinátor rozhodne, či dané zariadenie asociuje alebo nie. Toto platí pre sieť typu **beacon-enabled**.

Norma 802.15.4 definuje aj typ siete bez využitia beaconov, tzv. sieť typu **non-beacon enabled**. To znamená, že PAN koordinátor nevysiela žiadne synchronizačné rámce. Komunikácia medzi zariadeniami je úplne asynchrónna. Ako bolo spomenuté vyššie, beacon pakety sa v tomto type siete používajú len v rámci asociácie (na vyžiadanie). To akým spôsobom sa vymieňajú dáta, bude uvedené v ďalšom texte.

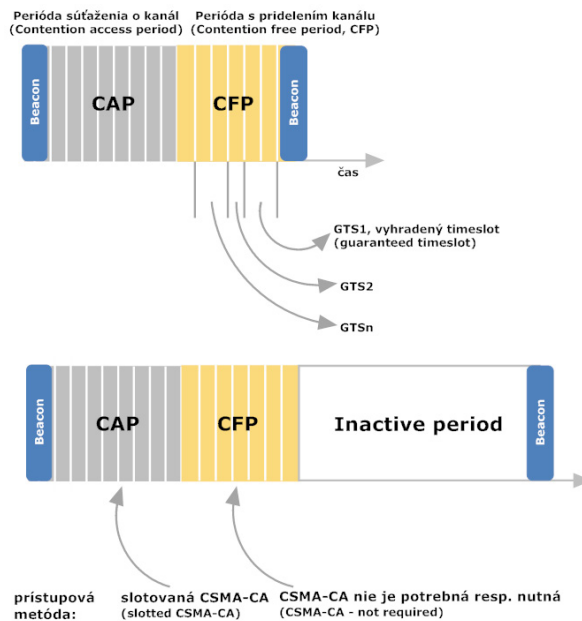
2.2.5.2 LINKOVÁ VRSTVA IEEE 802.15.4 , BEACON MÓD, SUPERFRAME A GTS

Ako bolo vysvetlené v predchádzajúcom texte, beacon paket umožňuje synchronizáciu a teda definovanie možnosti prístupu k zdieľanému kanálu medzi zariadeniami. Beacon paket je výhradne v rukách koordinátora. Beacons sú vysielané v pravidelných intervaloch PAN koordinátorom a koordinátormi v sieti. Priestor medzi dvoma po sebe idúcimi beacon paketmi sa označuje termínom superframe. Superframe je presne definovaný koordinátorom v beacon pakete. Implementácia superframe je v štandarde voliteľná. Superframe ohraničený beaconmi, je rozdelený na 16 časových intervalov tzv. timeslotov (viď Obr. 14). Voliteľne môže superframe obsahovať aktívnu a neaktívnu časť. Počas neaktívnej periódy môže koordinátor prejsť do úsporného režimu. Ako je vidieť z obrázky, beacon je prenášaný vždy v prvom timeslote superframe. Beacons slúžia k synchronizácii pripojených zariadení, k identifikovaniu PAN siete a k popisu vlastného obsahu superframe. Zariadenie, ktoré chce komunikovať počas CAP (Contention access period), súťaží o svoje "slovo" s ostatnými zariadeniami pomocou slotovanej verzie prístupovej metódy CSMA. Slotovaná verzia je to preto, že beacon presne určuje, kedy začne timeslot. Tým pádom zariadenie vie presne, kedy má previesť meranie nad kanálom a overiť tak jeho dostupnosť. Súťaž o pridelenie timeslotu končí nasledujúcim beaconom. Presná implementácia algoritmu CSMA-CA je popísaná v štandarde na str.170 [1]. Je vhodné poznamenať, že štandard 802.15.4 nevyužíva krátke CTS-RTS pakety známe z wifi technológie na predídenie problému skrytého uzlu [51].



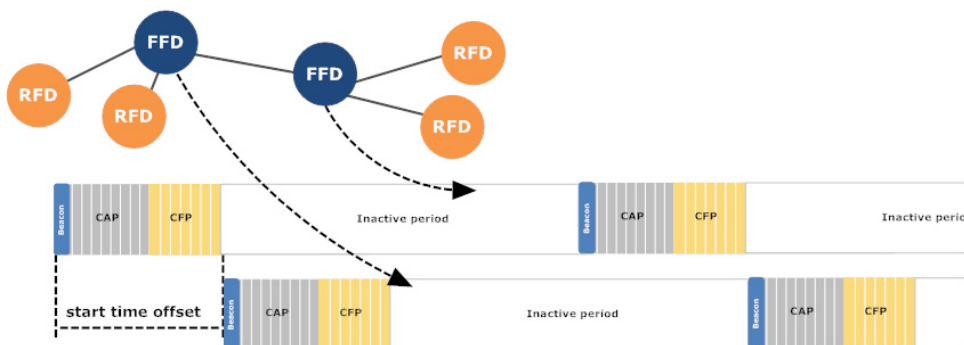
OBR. 14 ŠTRUKTÚRA SUPERFRAMU

Štandard IEEE 802.15.4 pre aplikácie vyžadujúce nízku latenciu, prípadne vyhradenú šírku pásma (samozrejme iba pri spoľahlivom rádiovom kanále) definuje tzv. superframe s garantovaným timeslotom. Koordinátor môže vyhradiť časť aktívnej periódy superframe pre timesloty s vyhradeným prístupom (Garanteed time slot, GTS). Tieto timesloty vytvárajú periódu, kde sa o timeslot nesúťaží, ale timeslot je vyhradený konkrétnym zariadeniam. Táto perióda sa nazýva perióda bez súťaže (contention-free period, CFP). Ak je táto perióda použitá, nachádza sa vždy na konci aktívnej periódy superframe. PAN koordinátor môže vyhradiť až sedem GTS a jeden GTS môže zaberat' viacej timeslotov, ako je vidieť na Obr. 15. Stále je však dostatočný priestor pre CAP periódu, v ktorej môžu súťažiť zvyšné zariadenia, ktoré nemajú pridelený GTS, prípadne nové zariadenia, ktoré sa chcú pripojiť k sieti. Všetky prenosy v rámci periódy súťaže o kanál musia byť dokončené pred začatím CFP. Taktiež zariadenia s vyhradeným timeslotom musia skončiť svoje aktívne prenosy najneskôr na konci CFP. Z obrázky je možné vydedukovať, že zatiaľ čo v CAP perióde sa o kanál súťaží tj. viacero zariadení prístupuje k spoločnému kanálu prostredníctvom metódy slotovanej CSMA-CA, tak vo vyhradenej perióde CFP prístupová metóda CSMA-CA nie je potrebná. Je totiž presne určené, kto má vysielat', takže určené zariadenie môže ihneď pristúpiť ku kanálu aj bez vyhodnotenia obsadenosti kanálu.



OBR. 15 ŠTRUKTÚRA SUPERFRAMU S GARANTOVANÝM TIMESLOTOM

Využívanie superframu a CAP, CFP periód je ľahko implementovateľné v jednoduchých topológiách ako je hviezda, kde vysiela beacony iba jedno zariadenie. V Peer-to-peer sieťach je situácia zložitejšia. Problém ilustruje situácia z Obr. 16. Vysielanie beaconov je v rukách oboch FFD zariadení, ktoré vysielať na tom istom kanále. Je dosť pravdepodobné, že v reálnych podmienkach sa budú rádiové dosahy oboch zariadení prekrývať. Tým pádom ak by oboje FFD zariadenia mali v rovnakom čase aktívnu periód, RFD zariadenia v rámci oboch koordinátorov by sa snažili prístupit' ku kanálu v tom istom čase. To by viedlo k viacerým kolíziám a automaticky k nižšej spoľahlivosti a priepustnosti siete. Keďže spoľahlivosť je základom úspechu akejkoľvek technológie, štandard definuje možnosť nastaviť časový offset a tým umožniť, aby sa aktívna periód jedného FFD koordinátora prekrývala s neaktívnou periódou iného koordinátora v rámci rádiového dosahu. V podstate sa týmto spôsobom implementuje časový multiplex. V ideálnom prípade je možné využiť aj frekvenčný multiplex tj. zariadenia budú operovať na rôznych kanáloch. Je to však vždy kompromis medzi funkcionalitou a energetickou spotrebou, zložitou protokolom a hardvérovými možnosťami.



OBR. 16 SUPERFRAME MANAGEMENT V PEER-TO-PEER SIETI

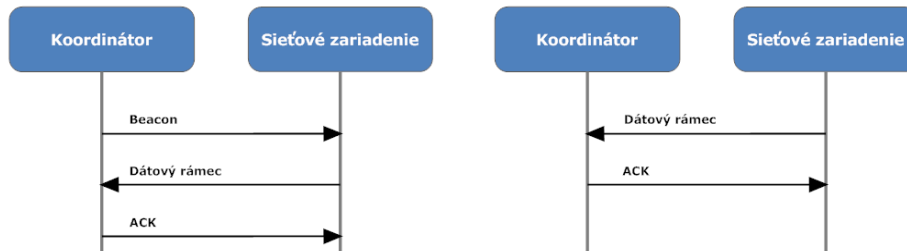
2.2.5.3 LINKOVÁ VRSTVA IEEE 802.15.4 , PRENOS DÁT

Štandard rozlišuje tri typy prenosov :

- **Zariadenie odosiela dáta ku koordinátorovi** (vid' Obr. 17) :

V beacon-enabled sieti zariadenie počká na synchronizačný beacon a vyčíta z neho štruktúru superframu. Následne odošle dáta pomocou slotovanej CSMA-CA ku koordinátorovi. Koordinátor môže voliteľne odoslať potvrdenie ACK.

V nonbeacon-enabled sieti zariadenie priamo odosiela dáta pomocou neslotovanej prístupovej metódy CSMA-CA. Koordinátor môže voliteľne odoslať potvrdenie ACK.

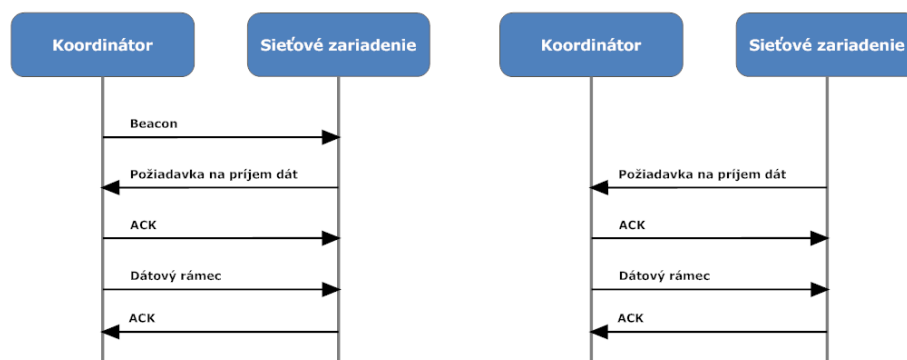


OBR. 17 ZARIADENIE POSIELA DÁTA KOORDINÁTOROVI, VLAVO BEACON-ENABLED, VPRAVO NON-BEACON-ENABLED

- **Koordinátor odosiela dáta ku zariadeniu** (vid' Obr. 18) :

V beacon-enabled sieti, ak chce koordinátor odoslať dáta, indikuje príjemcovi v rámci dátového obsahu beaconu, že má dáta určené jemu (message is pending). Zariadenie naslúcha beacony na kanále a keď v obsahu beaconu vyčíta, že koordinátor má dáta určené jemu, pošle koordinátorovi pomocou slotovanej CSMA-CA MAC príkaz, kde žiada o svoje dáta. Koordinátor potvrdí požiadavok ACK. Dáta sú odoslané pomocou slotovanej CSMA-CA, ak je to možné ihneď po odoslaní ACK. Zariadenie môže voliteľne indikovať úspešný príjem pomocou ACK. Následne koordinátor vymaže indikáciu dát pre príjemcu v beacone.

V nonbeacon-enabled sieti koordinátor čaká, pokiaľ koncové zariadenie pošle pomocou neslotovanej CSMA-CA MAC požiadavku, kde sa dotazuje či koordinátor uchováva nejaké dáta určené jemu (tzv. "Indirect transfer"). Koordinátor odošle ACK. Ak koordinátor nemá už žiadne dáta pre zariadenie indikuje tento stav v nasledujúcom ACK rámci alebo dátovým rámcom s veľkosťou dát 0. Voliteľne zariadenie pošle potvrdenie rámcom ACK.



OBR. 18 KOORDINÁTOR POSIELA DÁTA ZARIADENIU, VLAVO BEACON-ENABLED, VPRAVO NON-BEACON-ENABLED

- **Prenos dát medzi zariadeniami**

Je možný iba v topológii peer-to-peer. Zariadenie môže kedykoľvek odoslať dáta pomocou neslotovanej CSMA-CA. Z toho plynú samozrejme problémy, lebo prenos nie je vobec synchronizovaný, takže pri väčšom počte zariadení môžu vznikať časté kolízie na hrane únosnosti. Čiastočná synchronizácia môže byť implementovaná na vyšších vrstvách, napr. na základe meraní prenosového kanálu. V každom prípade norma v tomto smere neposkytuje žiadne riešenie.

Výmenu dát nezávisle na topológii výrazne ovplyvňuje, či je použitý synchronizovaný mód prenosu pomocou beaconov (beacon-enabled PAN) alebo asynchrónny mód bez beaconov (non-beacon-enabled PAN). Ako už bolo spomenuté, sieť typu beacon-enabled umožňuje nízku latenciu, implementáciu QoS vďaka GTS timeslotom. Nízka latencia a presná synchronizácia však nie je vždy vyžadovaná. Pre tieto aplikácie je možné použiť ľahšie implementovateľnú variantu siete non-beacon-enabled. Práve tento mód využíva aj štandard Zigbee.

Zhrnutie vlastností topológií a módov v štandarde 802.15.4 je v tabuľke nižšie.

TAB. 4 MOŽNOSTI IEEE 802.15.4 Z HLADISKA TOPOLOGIE A REŽIMU SIETE

	Beacon mód	Non-beacon mód
Hviezda	<ul style="list-style-type: none"> - Obmedzený počet zariadení, malé siete + jednoduché na implementáciu, pamäť + presná synchronizácia, všetky zariadenia môžu byť napájané z batérií a všetky zariadenia sa môžu prepnúť do režimu spánku + efektívne plánovanie režimu spánku + možnosť využitia QoS - Iba priama komunikácia 	<ul style="list-style-type: none"> - Obmedzený počet zariadení, malé siete + jednoduché na implementáciu, pamäť - Nesynchronne, PAN koordinátor musí byť nepretržite napájaný + koncové zariadenia (obvykle RFD) môžu byť v režime spánku prakticky neobmedzene dlho - zlé možnosti implementácie z hľadiska QoS - Iba priama komunikácia
Peer-to-peer	<ul style="list-style-type: none"> + Veľké siete + multihop komunikácia + možnosti implementácie z hľadiska QoS + Synchronne, všetky zariadenia sa môžu prepnúť do režimu spánku - veľmi náročné na implementáciu a pamäť - koncové zariadenia (obvykle RFD) nemôžu byť v režime spánku neobmedzene dlho 	<ul style="list-style-type: none"> + Až tisíce zariadení, veľmi veľké siete + multihop komunikácia - zlé možnosti z hľadiska QoS - Nesynchronne, PAN koordinátor a routre musia byť nepretržite napájané + stredne náročné na implementáciu a pamäť + koncové zariadenia (obvykle RFD) môžu byť v režime spánku prakticky neobmedzene dlho

2.2.5.4 SLUŽBY LINKOVEJ VRSTVY (MAC) V IEEE 802.15.4

Linková vrstva tvorí rozhranie medzi fyzickou a sieťovou vrstvou a poskytuje im služby. Podvrstva MAC poskytuje tieto služby :

- **MAC data service**
- **MAC management service** (MAC sublayer Management Entity, MLME)

Tieto služby sú prístupné prostredníctvom prístupových bodov :

- **MAC management service access point (MLME-SAP)**
Umožňuje ovládať komunikačné nastavenia, rádio, sieťovanie.
- **MAC common part sublayer service access point (MCPS-SAP)**
Má za úlohu poskytnúť výmenu dát v rámci vyšších vrstiev.

Podobne ako na fyzickej vrstve PD-SAP aj na linkovej vrstve je rozhranie MCPS-SAP, ktoré umožňuje výmenu dát. U fyzickej vrstvy to bolo rozhranie pre výmenu dát medzi linkovou vrstvou a fyzickým rádiovým kanálom. Na úrovni linkovej vrstvy je to práve výmena medzi fyzickou vrstvou a sieťovou vrstvou.

Obsluha linkovej podvrstvy MAC a jej služby :

MAC má vo svojom arzenáli väčšie množstvo obslužných primitív ako fyzická vrstva. Nasleduje ich stručný popis. Prístup k týmto príkazom poskytuje MLME-SAP :

TAB. 5 PRÍKAZY MLME *PREŠKRTNUTÉ PRIMITÍVY NIE SÚ VYUŽÍVANÉ ZIGBEE ŠPECIFIKÁCIOU

Príkaz	Popis
GET	Nastavenie parametrov MAC PAN
SET	
RESET	
RX-ENABLE	Rádio ON/OFF
SCAN	Skenovanie kanálov
ASSOCIATE	Obsluha asociačného procesu koordinátorom
DISASSOCIATE	
GTS	Obsluha GTS (alokácia timeslotov)
ORPHAN	Správa orphan
SYNC	Synchronizácia s koordinátorom
SYNC-LOSS	
START	Obsluha beaconingu
BEACON-NOTIFY	
POLL	Polling resp. Indirect transfer v nonbeacon enabled sieti
COMM-STATUS	Status

Nastavenie parametrov MAC PAN : funkcia je obdobná ako pri fyzickej vrstve, príkazy MLME-GET , MLME-SET , defaultné nastavenie sa získajú pomocou MLME-Reset

Kontrola rádia : zapnúť/vypnúť rádio pomocou MLME-RX-Enable. Zigbee túto možnosť nedefinuje a táto funkcionlita je implementovaná individuálne v rukách výrobcu Zigbee stacku.

Skenovanie kanálu : MAC poskytuje 4 druhy :

Energy detection scan – PAN koordinátor pred zostavením siete preskenuje obsadenosť v danej množine kanálov. Na fyzickej vrstve sa zavolá PLME-ED.request.

Active channel scan – Tento typ skenovania využíva zariadenie, ktoré hľadá koordinátorov vč. PAN koordinátorov vo svojom dosahu. Pre každý definovaný kanál zariadenie pošle beacon request. Koordinátor, ktorý túto požiadavku zachytí, odošle beacon. Toto plat ako pre beacon enabled sieť, tak aj pre typ siete non-beacon enabled. V prípade beacon-enabled pošle koordinátor beacon v nasledujúcom intervale pre odoslanie beaconu. V prípade nonbeacon-enabled pošle koordinátor tento beacon prostredníctvom neslotovanej CSMA-CA.

Passive channel scan – Tento typ skenovania je obdobný ako v predchádzajúcom prípade. Je možné ho však použiť iba v beacon-enabled sieti, pretože zariadenie neposiela beacon request ale iba pasívne naslúcha na rádiovom kanále prichádzajúce beacons.

Orphan channel scan – “Osirelé” zariadenie (zariadenie, ktoré stratilo spojenie s koordinátorom) týmto spôsobom hľadá koordinátora v definovanej množine logických kanálov.

Dôvody vzniku osirelého prvku v sieti. :

- Pohyb zariadení (zariadenia prestanú byť v rádiovom dosahu)
Pozn. V reálnom prostredí zdanlivý pohyb môže spôsobiť aj malá zmena vlastností okolitého prostredia, ako je napr. pohyb dverí alebo nová prekážka v šírení rádiového signálu. Tieto faktory sú aj jedným z problémov pri lokalizácii polohy zariadenia založenej na sile signálu v uzavretých priestoroch. Zdanlivá zmena polohy lokalizovaného zariadenia môže vzniknúť obyčajným posunutím stoličky alebo pohybom osôb.
- Interferencie a úniky signálu
- Koordinátor preladil na iný kanál v dôsledku preťaženia, resp. vysokého zarušenia kanálu. Štandard dáva možnosti k zmene kanálu ako súčasť stratégie pre spoľahlivý prenos. Za normálnych okolností by protokoly vyšších vrstiev mali zabezpečiť prenos informácie o zmene kanálu pred jej uskutočnením. Môže sa však stať, že táto informácia k zariadeniu nedorazí kvôli nespoľahlivosti kanálu alebo v prípade, že zariadenie je v dlhodobom spánku.

Asociácia a disasociácia [1]

Úloha tohto mechanizmu je pripojiť nový uzol siete k nadradenému zariadeniu parent (rodičovi). Predtým, ako je nový uzol pripustený do siete, musí prejsť asociačným procesom.

Asociácia v sieti beacon-enabled:

Zariadenie, ktoré nie je členom žiadnej siete, použije pasívne skenovanie pre vyhľadanie okolitých koordinátorov v dosahu. Výsledky z prijatých beaconov sa analyzujú vyššími vrstvami, ktoré rozhodnú či a ku ktorému koordinátorovi sa dané zariadenie pripojí. Zariadenie sa zosynchronizuje pomocou prijímaných beaconov (MLME-SYNC.request) a požiada o asociáciu koordinátora príkazom MLME-ASSOCIATE.request.

Asociácia v sieti nonbeacon-enabled:

Zariadenie, ktoré nie je členom žiadnej siete, použije aktívne skenovanie. Výsledky z prijatých beaconov sa posunú vyšším vrstvám, ktoré vyhodnotia či a ku ktorému koordinátorovi sa zariadenie pripojí. V tomto type siete sa nepoužívajú beacons (v zmysle synchronizačných beaconov), takže zariadenie nemá možnosť synchronizácie s vybraným koordinátorom a teda priamo môže vyslať žiadosť MLME-ASSOCIATE.request.

Koordinátor po obdržaní požiadavky na asociáciu odošle ACK (potvrdenie prijatia požiadavky, nie asociácie samotnej). Koordinátor rozhodne na základe dostupných kapacitných prostriedkov prípadne sieťovej stratégie o prijatí/neprijatí zariadenia do siete. Toto rozhodnutie musí urobiť v rámci definovaného času (macResponseWaitTime) príkazom MLME-ASSOCIATE.response. O stave asociácie informuje v rámci bajtu Association status (successful, PAN at capacity, PAN access denied). Spôsob odoslania odpovede sa odlišuje v beacon a nonbeacon sieti (vid' Obr. 18). Ak koordinátor zistí, že zariadenie už bolo asociované v minulosti, pôvodné asociačné záznamy sa premažú novými. V prípade, že je zariadenie pripustené do siete, koordinátor mu prideli v MLME-ASSOCIATE.response unikátnu 16-bitovú „krátku“ adresu (short address). V prípade, že zariadenie obdrží adresu 0xFFFFE, musí používať vlastnú 64-bitovú rozšírenú adresu (extended address).

Disasociáciu môže iniciovať sieťové zariadenie aj PAN koordinátor pomocou MLME-DISASSOCIATE primitív. Zigbee však túto možnosť nevyužíva, ale definuje vlastný príkaz NWK_Leave na sieťovej vrstve, ktorý je zabalený do dátového rámcu na MAC vrstve.

Obsluha osirelého zariadenia

V prípade straty spojenia s koordinátorom, zariadenie môže využiť primitívu MLME-SCAN. Ako súčasť skenovania zariadenie pošle správu orphan notification na zvolenú množinu kanálov. Ak koordinátor alebo PAN koordinátor zachytí túto notifikáciu, overí, či bolo zariadenie súčasťou siete. Ak áno, koordinátor pošle príkaz o znovu priradení do siete. V opačnom prípade neodpovie.

Start

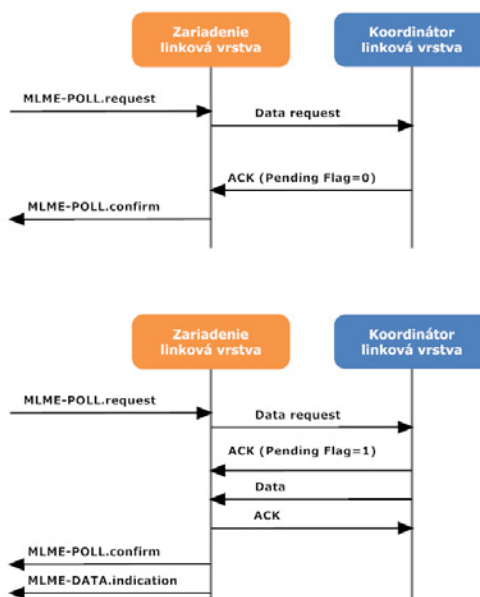
Táto primitíva sa používa pre spustenie obsluhy MAC vrstvy a inicializácie zariadenia prípadne nastavenie superframu. V Zigbee v podstate slúži iba na štart zariadenia po MAC resete.

Beacon-notify

Táto služba informuje o prijatí beacon rámcu , ktorý je pripravený na ďalšie spracovanie.

Poll „synchronizácia“ pre nonbeacon enabled siete

Keďže v sieti typu nonbeacon enabled nie sú synchronizačné beacons, prenos dát je implementovaný pomocou tzv. “pollingu” (viď Obr. 19). Napríklad sieťové zariadenie (RFD) je v úspornom režime po dobu, ktorá nie je známa nadradenému koordinátorovi (FFD). Ak teda koordinátorovi prídu dáta určené pre pre RFD zariadenie, nemôže ich priamo odoslať, lebo nevie, či zariadenie spí alebo nie. Preto tieto dáta nabufferuje. Keď sa zariadenie prebudí, pošle dotaz koordinátorovi, či má nejaké dáta určené jemu. Zariadenie k tomuto účelu môže využiť MLME-POLL.request. Na fyzickej vrstve sa odošle ku koordinátorovi príkazový rámec typu data request. Koordinátor odpovie ACK rámcem v ktorom nastaví flag FP (frame pending) v prípade, že má dáta určené pre zariadenie. Zariadenie obdrží na linkovej vrstve MLME-POLL.confirm s výsledkami dotazovania. Tomuto mechanizmu sa hovorí aj nepriamy prenos dát (Indirect transfer) .



OBR. 19 POLLING(DOTAZOVANIE), HORNÝ OBR. BEZ DÁT PRE ZARIADENIE, DOLNÝ OBR. S DÁTAMI PRE ZARIADENIE

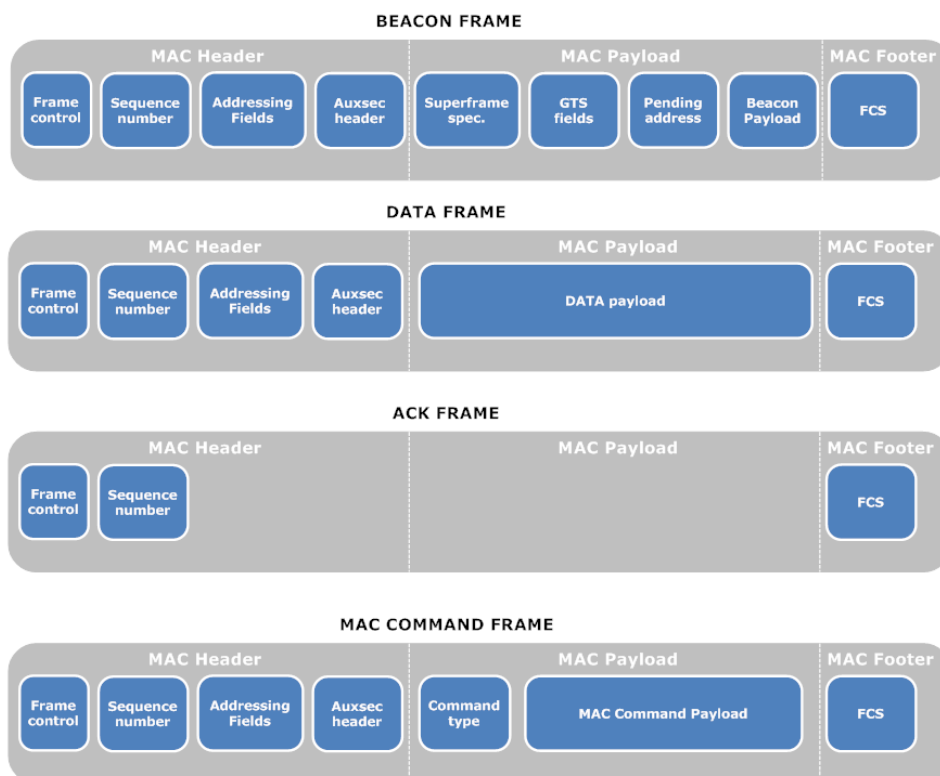
Komunikačný status

Primitívy MLME-COMM-STATUS sú generované po prenose generovanom primitívou response prípadne pri obdržaní rámcu, ktorý neprešiel úspešne zabezpečovacím mechanizmom.

2.2.5.5 MAC RÁMCE V IEEE 802.15.4

Obecná štruktúra MAC rámca pozostáva z MAC header (hlavičky), MAC data payload (vlastných dát) a MAC Footer (záhlavie – obsahuje, kontrolný súčet CRC). Linková vrstva používa 4 druhy rámcov (Obr. 20) a maximálna dĺžka rámcu je 127 bajtov:

- **Beacon rámec** je špeciálny rámec určený k prenosu informácii o sieti a synchronizácie účastníkov siete.
- **Dátový rámec** je typ rámcu určený k prenosu dát.
- **Príkazový rámec** jeho význam je pri manažovaní siete. Príkazy sa rozlišujú podľa položky Command type : 0x01 Association Request, 0x02 Association Response, ~~0x03 Disassociation Notify~~, 0x04 Data Reques, 0x05 PAN ID conflict Notify, 0x06 Orphan Notify, 0x07 Beacon Request, 0x08 Coordinator Realign, ~~0x09 CTS Request~~. *0x03 a 0x09 nie sú používané v Zigbee
- **ACK rámec** slúži na potvrdenie príjmu dát. ACK je voliteľné a má dĺžku 5 bajtov.



OBR. 20 MAC RÁMCE V IEEE 802.15.4

2.2.5.6 ŠIFROVANIE A AUTENTICITA DÁT V IEEE 802.15.4

Štandard definuje osem bezpečnostných úrovní založených na algoritme AES. Najnižšia úroveň je taká kde sa nepoužíva žiaden kryptovací algoritmus, bezpečnosť je v postate vypnutá. Najvyššia úroveň autentifikuje dáta s integritným kódom o dĺžke 128 bitov a dáta samotné sú šifrované rovnako 128 bitmi. Štandard Zigbee však bezpečnosť na úrovni linkovej vrstvy nepodporuje (bezpečnostná úroveň 0) a dáta sa šifrujú a autentifikujú na vyšších vrstvách.

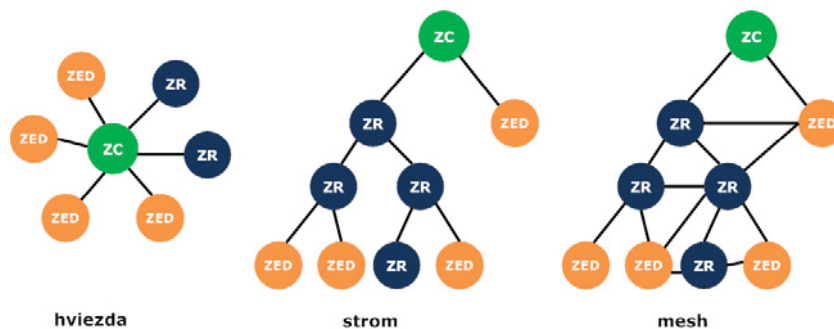
2.2.6 ÚVOD DO ZIGBEE

Štandard IEEE 802.15.4 definuje fyzickú a linkovú vrstvu. Zigbee z tohto štandardu využíva iba určitú časť, pridáva smerovanie, implementuje mesh topológiu a definuje aplikačný framework, ktorý unifikuje možnosti aplikačných protokolov. **V Zigbee všetky zariadenia v sieti vysielajú na rovnakom kanále a využíva sa plne asynchrónny prenos. V IEEE 802.15.4 je možné tento mód siete identifikovať pod označením non-beacon enabled.** Keďže prenos nie je synchronizovaný, zariadenia, ktoré smerujú pakety musia byť trvale napájané, aby nestratili žiadne dáta. Zigbee nepoužíva synchronizačné (beacon) rámce, to znamená, že router

(smerovač) neprechádza do režimu spánku, pretože dáta môžu prísť kedykoľvek. Z tohto je zrejmé, že Zigbee nie je všeliek na bezdrôtové senzorké siete a je možné ho použiť iba v aplikáciách, kde je dostupné aj trvalé napájanie. Ďalším koncepčným problémom vychádzajúcim z asynchrónnej povahy prenosu dát v Zigbee je implementácia QoS. Zigbee v podstate tento problém nijako nerieši. Apriórne sa predpokladá, že strieda vysielania zariadení v sieti je pod 1% a tým pádom je nepravdepodobné preťaženie siete prípadne dlhé odozvy.

Pozn.: Takýto predpoklad však môže byť veľkým problémom v zarušenom prostredí. Zigbee pri zostavení siete vyberá vhodný kanál iba na základe aktuálneho merania (niekoľko sekúnd) a na najmenej zarušenom kanále založí sieť. Problémom však je, že kvalita kanálu je premenná v čase. Preto nová verzia, Zigbee PRO ponúka riešenie v možnosti preladenia na iný kanál pomocou mechanizmu tzv. frequency agility. Jedná sa v podstate o informovanie ostatných zariadení, že sa sieť presúva na iný kanál. Toto "riešenie" má však jeden nedostatok, rádiový kanál vďaka multicestnému šíreniu signálu, odrazom a únikom nedegraduje spojitě ale skokovo. Preto Koordinátor siete pri zarušenom kanále môže len veľmi obtiažne informovať ostatné uzly siete o zmene kanálu, pretože rádiový kanál je už obvykle nepoužiteľný. Naozajstné riešenie spočíva napríklad v použití frekvenčného multiplexu, tento mechanizmus však Zigbee v súčasnej dobe nevyužíva.

V Zigbee sieti sa môžu vyskytovať nasledujúce zariadenia: Zigbee Koordinátor (ZC), Zigbee Router (ZR) a Zigbee koncové zariadenie (ZED). ZC vytvára, kontroluje sieť a smeruje pakety. ZR smeruje pakety a rozširuje tak pokrytie siete. Zariadenia ZC a ZR musia byť trvale napájané. ZED má najnižšie pamäťové a výpočtové nároky. Toto zariadenie je zamýšľané ako jednoduchý uzol siete, ktorý sa okamžite po vykonaní úlohy prepne do úsporného režimu. ZED sa nemôže podieľať na smerovaní paketov, ale môže byť napájané z akumulátorov. Zigbee definuje topológie: hviezda, strom a mesh (Obr. 21).



OBR. 21 TOPOLOGIE V ZIGBEE

2.2.6.1 ŠTANDARD ZIGBEE

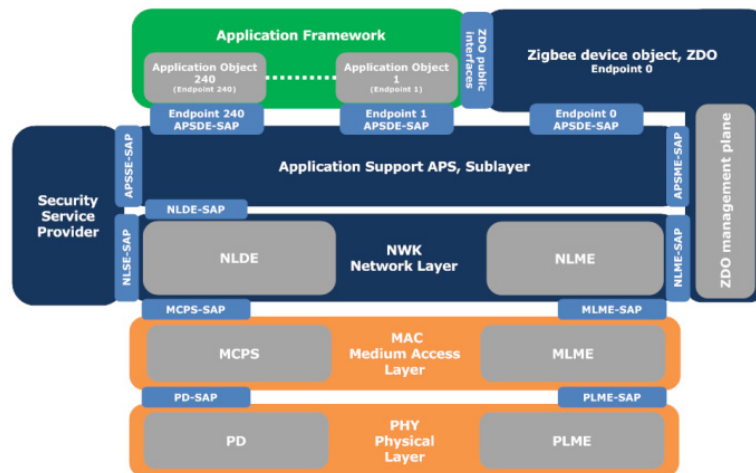
Prvá špecifikácia Zigbee vyšla v roku 2004 (Zigbee 2004) a odvtedy vyšli ďalšie dve verzie : Zigbee 2006 a Zigbee 2007/Pro . Práca pojednáva o norme Zigbee PRO [5], ktorá je spätne kompatibilná s verziou z roku 2006. Prvá verzia sa neodporúča pre nové designy sietí. Verzie Zigbee 2006, Zigbee 2007 sú plnohodnotné špecifikácie a sú vhodné tam, kde sa nepredpokladá sieť o stovkách až tisícoch uzloch. Ďalšia výhoda je v nižších nárokoch na hardvér a teda tam, kde je veľký dôraz na výslednú cenu danej siete. Hlavná výhoda Zigbee PRO je vo vylepšených nástrojoch týkajúcich sa bezpečnosti a robustnosti siete. Presné porovnanie Zigbee špecifikácií je možné nájsť v literatúre [42]. Ak nebude uvedené inak , popisovaná funkcionálna bude platná pre posledné dve verzie štandardu.

Charakteristické znaky Zigbee :

- Interoperabilita a koexistencia viacerých sietí v rámci spoločného fyzického priestoru
- Singlehop topológia hviezda a multihopová topológia mesh a strom
- Spol'ahlivá komunikácia v rámci celej siete pri veľmi nízkej spotrebe
- Flexibilná a rozšíriteľná sieť
- Prepracovaný koncept bezpečnosti založený na štandarde AES
- Jednotný interface pre koncové aplikácie
- Verejné aplikačné profily (interoperabilita medzi rôznymi výrobcami)

2.2.6.2 ZIGBEE , ARCHITEKTÚRA

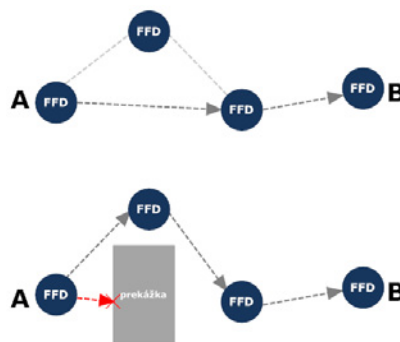
Kompozícia vrstiev Zigbee štandardu je ilustrovaná na obrázku nižšie. Vrstvy PHY a MAC sú definované štandardom IEEE 802.15.4 . Zigbee definuje sieťovú (NWK) , aplikačnú vrstvu (APL) a služby zabezpečenia.



OBR. 22 ARCHITEKTÚRA ZIGBEE

2.2.6.3 ZIGBEE, SIEŤOVÁ VRSTVA

Hlavná úloha sieťovej vrstvy je smerovanie rámcov a rozšírenie konektivity za hranice rádiového dosahu uzlu v sieti. To znamená rozšírenie singlehop komunikácie definovanej v IEEE 802.15.4 multihop komunikáciou v Zigbee. Zigbee používa takmer výhradne mesh topológiu a otvorený smerovací protokol AODV (Adhoc On-demand Distance Vector) [43],(str. 307 [3]). Bezdrôtová senzorická sieť je obecné ad-hoc sieť. Termín ad-hoc "pre tento konkrétny prípad", dobre vystihuje práve hlavnú vlastnosť a to je dynamická povaha bezdrôtovej senzorickej siete. Smerovací protokol AODV využíva redundantné spojenia (viď Obr. 23) a dáta sa posielajú cez najvýhodnejšiu cestu v zmysle ohodnotenia (spol'ahlivosť, kvalita signálu, počet uzlov) konkrétnych prenosových trás medzi uzlami siete. Obr. 23 zobrazuje výhodu mesh topológie, kde komunikačná trasa nie je statická a zariadenie môže komunikovať s ľubovoľným zariadením v dosahu. Využíva sa v podstate priestorová diverzita.



OBR. 23 VYUŽITIE REDUNDANTNÝCH SPOJENÍ

Kompetencia sieťovej vrstvy :

- Smerovanie rámcov, vyhľadávanie ciest, spojenie multihop spojenie bod-bod
- Spojenie a vyhľadanie susedných uzlov siete
- Založenie siete
- Pripojenie/Odpojenie sa do/zo siete
- Bezpečnosť na sieťovej vrstve
- Konfigurácie ZC, ZR alebo ZED

Služby sieťovej vrstvy :

- **Dátové služby sieťovej vrstvy (NWK Layer Data Entity, NLDE)**

- **Manažment sieťovej vrstvy (NWK Layer Management Entity, NLME)**

Tieto služby sú dostupné prostredníctvom prístupových bodov : **NLDE-SAP a NLME-SAP**

Manažment sieťovej vrstvy :

NLME-Network-Discovery – táto procedúra slúži na zistenie prítomnosti dostupných sietí v rámci fyzického dosahu zariadenia. Procedúra sa zavolá z APS vrstvy. Sieťová vrstva využije aktívny alebo pasívny scan na MAC vrstve prostredníctvom. Výsledkom spracovania týchto skenov sú nájdené siete, PAN ID, kanály, na ktorých tieto siete operujú a prípadne ďalšie parametre.

NLME-Network-Formation – ak je zaradenie typu FFD, môže založiť sieť ako Zigbee Koordinátor. Vyberie sa vhodný kanál, PAN ID a prideli sa Zigbee koordinátorovi logická adresa 0x000. Prvá úloha v rámci ZC je konfigurácia superframeu prostredníctvom MAC vrstvy.

NLME-Start-Router – umožňuje ustanoviť FFD zariadenie ako Zigbee router. Router taktiež generuje vlastný superframe a prijíma resp. vyhodnocuje požiadavky pri pripájaní sa zariadení do siete.

NLME-Permit-Joining – aktivuje pre zariadenia ZR a ZC prijímanie asociačného požiadavku a vracia výsledky

NLME-Join – umožňuje zariadeniu pripojiť sa do siete

NLME-Direct-Join – variant predošlej primitívy, zariadenie však nemusí prehľadávať dostupné kanály a vyhľadávať vhodnú sieť, ale priamo sa pripojí do definovanej siete. To však vyžaduje aby MAC adresa zariadenia bola dopredu predkonfigurovaná v ZC alebo ZR, na ktoré sa zariadenie pripája. Pre pripojenie musí zariadenie použiť Orphan procedúru.

NLME-Leave – umožňuje sa zariadeniu odpojiť zo siete a v prípade ZC alebo ZR odpojiť jedno z pripojených zariadení, táto primitíva je vykonávaná broadcastom, aby sa o odpojení zariadenia dozvedeli všetci účastníci siete

NLME-Reset – reset, vykonáva sa po pripojení napájania, pred pripojením do siete a po opustení siete

NLME-Sync – umožňuje získať dáta z ZC alebo ZR zariadenia

NLME-GET/SET – nastavenie atribútov sieťovej vrstvy NIB (network information base)

NLME-NWK-STATUS – táto primitíva informuje APS o chybách (nedoručené dáta atď.)

NLME-Route-Discovery – mechanizmus vyhľadania trasy pre účely routingu v Zigbee sieti

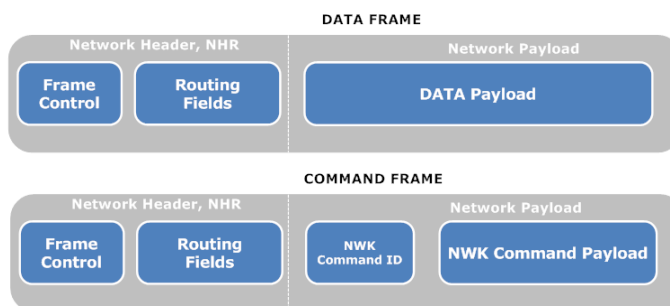
Formát rámcov na sieťovej vrstve :

Sieťová vrstva využíva 2 typy rámcov (Obr. 24) :

- Dátový
- Príkazový

TAB. 6 PRÍKAZY NA NWK VRSTVE

ID príkazu	Názov
0x01	Route Request, RREQ
0x02	Route Reply, RREP
0x03	Network status (Route Error)
0x04	Leave
0x05	Route Record
0x06	Rejoin request
0x07	Rejoin response
0x08	Link status
0x09	Network Report
0x0A	Network Update



OBR. 24 RÁMCE NA SIEŤOVEJ VRSTVE

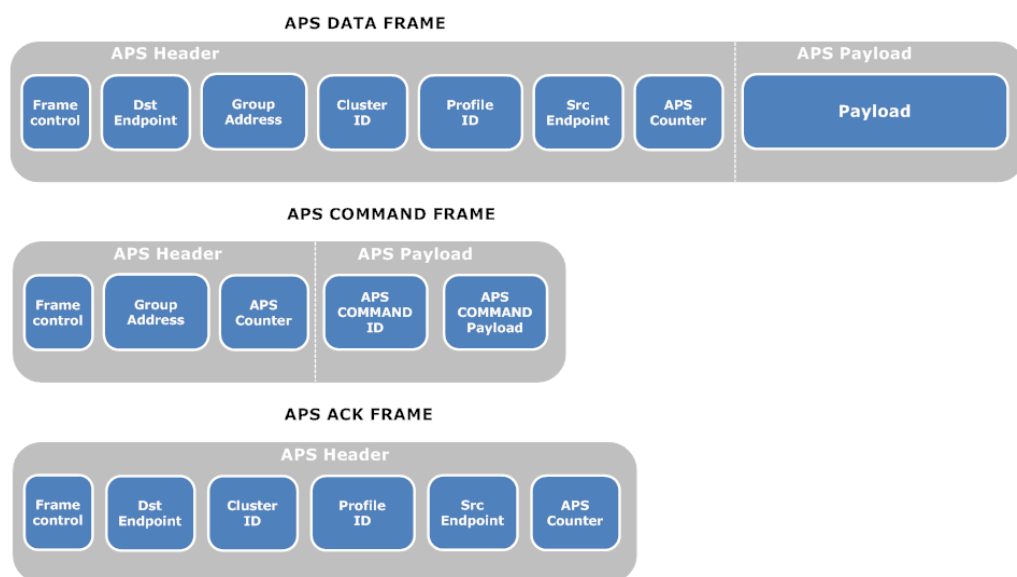
2.2.6.4 APLIKAČNÁ VRSTVA (APL) V ZIGBEE

Aplikačná vrstva pozostáva z troch častí :

- Aplikačnej podvrstvy APS
- Aplikačného frameworku
- Zigbee device object ZDO

2.2.6.4.1 APLIKAČNÁ PODVRSTVA APS (APPLICATION SUPPORT SUBLAYER)

APS poskytuje dátové služby pre aplikačné objekty a ZDO prostredníctvom **APS sublayer Data Entity (APSDE)**. APSDE preberie dáta z aplikačných objektov prípadne ZDO a zapuzdruje ich do Protocol Data Unit (PDU). APSDE pridáva hlavičku k PDU a vytvára APS data frame, ktorý sa predá sieťovej vrstve. Na APS vrstve sú 3 druhy rámcov (viď Obr. 25) : Dátový, Príkazový a aplikačný ACK.



OBR. 25 RÁMCE NA APS VRSTVE

Manažment APS podvrstvy (APS sublayer Management Entity, APSME) má v kompetencii :

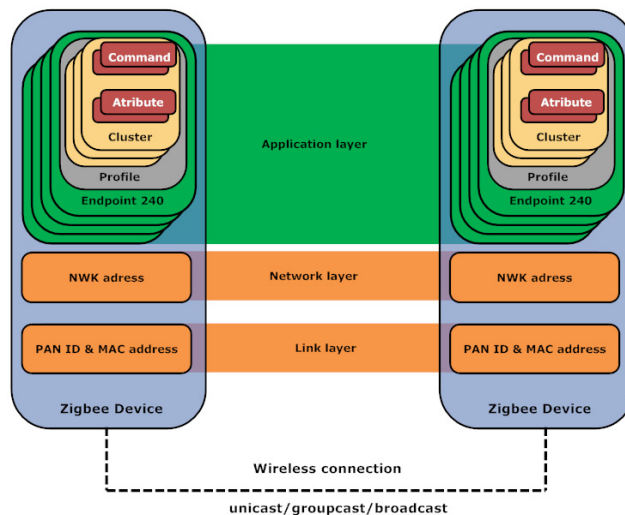
- Binding "spájanie zariadení" - APSME-BIND.request , APSME-UNBIND.request
- APS Information Base (AIB) management – APSME-GET.request , APSME-SET.request
- Group management – primitívy pre správu skupinového vysielania

2.2.6.4.2 APLIKAČNÁ VRSTVA , APLIKAČNÝ FRAMEWORK

Sieťové zariadenie má na linkovej vrstve svoju unikátnu MAC adresu. Po prihlásení do siete zariadenie obdrží sieťovú adresu a komunikuje so zariadeniami v rámci svojej siete, ktorá je identifikovaná PAN ID. Keďže v Zigbee je kľúčová interoperabilita, definícia Zigbee nekončí na sieťovej vrstve, ale štandard presne definuje aj aplikačnú vrstvu.

Na aplikačnej vrstve štandard definuje nasledujúcu terminológiu [3] (Obr. 26) :

- **Endpoint** – vytvára logické oddelenie aplikácií, aby v rámci jedného sieťového zariadenia mohli bežať viaceré koncové aplikácie (ovládanie svetla , meranie teploty atď.) a to na odlišných profiloch
- **Profil** - je množina clustrov s určitým aplikačným zameraním
- **Cluster** – je to objekt, ktorý obsahuje množinu atribútov a príkazov
- **Atribute** – nositeľ užitočnej informácie, dátová položka v rámci clusteru
- **Command** – vykonáva definovanú akciu nad clustrom



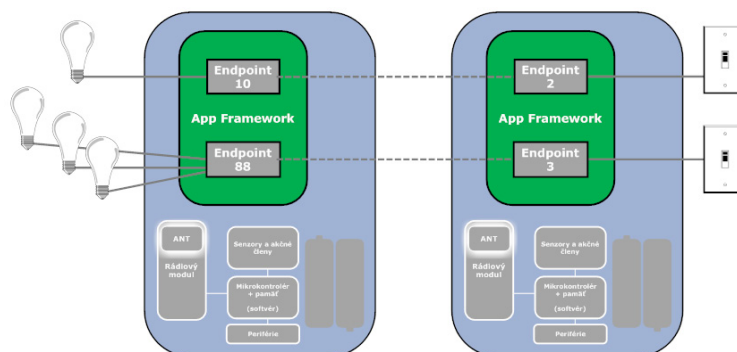
OBR. 26 ADRESÁCIA V RÁMCI ZARIADENIA

Endpoint :

V TCP/IP sieti má každé sieťové zariadenie svoju jednoznačnú IP adresu. Na danom zariadení (počítači) však môže bežať viacero aplikácií využívajúcich sieťovú konektivitu. Vďaka portom môžu byť adresované jednotlivé aplikácie. Takže IP adresa jednoznačne adresuje počítač a port konkrétnu aplikáciu. V Zigbee je situácia podobná. Na jedno sieťové zariadenie môže byť pripojené viacero aplikácií (senzorov, spínačov atď.) tzv. aplikačných objektov. Aby mohli byť adresované priamo jednotlivé aplikácie, využívajú sa Endpointy ("prípojné body"). Endpointy si je možné predstaviť aj ako virtuálne spojenie medzi sieťovými zariadeniami v rámci jednej aplikácie. Obrázok nižšie zobrazuje prepojenie vypínača a svetla. Na pravej strane sa nachádza zariadenie, ktoré kontroluje dva spínače. Na ľavej strane sú štyri ovládané svetlá. Z obrázku je zrejmé, ako sú prepojené endpointy. Takže ak zariadenia chcú medzi sebou komunikovať, nevyužívajú iba sieťovú adresu zariadenia, ale aj bližšie špecifikujú aplikačný objekt na danom zariadení prostredníctvom endpointu.

Vlastnosti Endpointov :

- Jedno sieťové zariadenie môže mať až 1-240 endpointov.
- Endpointy sa registrujú v rámci firmvéru a nie všetky musia byť nepretržite aktívne.
- Na číslach endpointu nezáleží .
- Endpoint 0 je vyhradený pre aplikačný objekt Zigbee Device Object, ZDO .
- Endpoint 255 je vše smerový. Ak zariadenie adresuje vše smerový endpoint , dáta sú doručené všetkým aktívnym endpointom.



OBR. 27 ENDPOINTY

Profil :

Význam aplikačných profilov spočíva v zjednotení prenosu dát (spoločný jazyk) a zaručení interoperability na aplikačnej vrstve. Profily sú navrhnuté podľa konkrétneho aplikačného nasadenia. Každý profil definuje množinu zariadení a povelov, ktoré je možné na dané zariadenia aplikovať. Ďalej definuje presný formát aplikačných správ a ďalšie potrebné vlastnosti v rámci aplikačného priestoru. Cieľom je čo najviac zjednodušiť

a unifikovať vývoj aplikácie. Inými slovami napríklad pri navrhovaní aplikácie pre spínanie osvetlenia v určitom objekte je asi zbytočné, aby každý aplikačný vývojár tohto riešenia si navrhoval vlastný aplikačný protokol. Je zrejmé, že na ovládanie svetla budú využívané príkazy On, Off, prípadne nastavenie intenzity osvetlenia. A práve toto zjednotenie zariadení a príkazov majú za úlohu aplikačné profily.

Aplikačné profily je možné rozdeliť do dvoch kategórií :

- **Verejné profily** (Public Profiles)

Tieto profily sú produktom Zigbee Aliancie, za účelom kompatibility medzi rôznymi výrobcami. Po dokončení sú aplikačné profily postupne uvoľnené k voľnému použitiu. Tento proces má určité fázy, pri ktorých je možné zasahovať, prípadne mať prístup k jednotlivým profilom v časovom predstihu. Záleží na postavení v Zigbee Aliancii.

Momentálne Zigbee aliancia pracuje na nasledujúcich profiloch :

Advanced Metering Infrastructure (AMI), Commercial Building Automation (CBA)

Personal, Home and Hospital Care (PHHC), Telecom Applications (TA)

Wireless Sensor Applications (WSA)

Voľne dostupné sú profily (december 2009):

Home Automation (HA)

Smart Energy

- **Privátne profily** (Private, Non-public alebo Manufacturer specific profiles)

Sú realizované aplikačnými vývojármi, ktorí pracujú na aplikácii mimo rozsah zverejnených profilov prípadne z nejakého dôvodu chcú mať svoj vlastný proprietárny profil.

Viac o aplikačných profiloch a ich životnom cykle je možné sa dozvedieť z prezentácie [44].

Cluster:

Je množina obsahujúca príkazy a atribúty, konkrétny význam dostáva až v rámci aplikačného profilu. Napríklad cluster On/OFF je všeobecný, v jednom profile cluster odomyká dvere a v inom môže zapínať svetlo. Každý cluster má navyše smer : vstupný/výstupný. Smer clusteru je využívaný iba pri mechanizme **service discovery**, ktorý slúži na vyhľadávanie kompatibilných zariadení v sieti. Napríklad zámok od dverí má **vstupný cluster** (on/off) a riadiaci vypínač ten istý **výstupný cluster**. Je to logické : dvere môžu byť ovládané výstupom z vypínača, ale opačne to nie je úplne možné.

Vo verejných profiloch sa používajú clustre definované v ZCL (Zigbee Cluster Library) [45] . Myšlienka ZCL spočíva v tom, že vo viacerých profiloch sa môže vyskytovať ten istý cluster. ZCL ich definuje veľké množstvo a tým znižuje zbytočné kopírovanie zhodných clusterov medzi profilmi. Využitie ZCL nie je ničím vynútené . Designér aplikácie môže vytvoriť svoje vlastné clustre. Ak ide však o kompatibilitu medzi viacerými výrobcami je využitie ZCL jedným zo spôsobov, ako ju docieľiť.

Attribute:

Je dátová položka v rámci clusteru. Je nositeľom užitočných dát a stavov. Napríklad atribút môže obsahovať informáciu o tom, či je svetlo zapnuté alebo vypnuté.

Command:

Označuje jeden príkaz v rámci clusteru, ktorý vykoná definovanú operáciu. Napríklad príkaz na vypnutie svetla.

2.2.6.4.3 ZIGBEE DEVICE OBJECT (ZDO) , ZIGBEE DEVICE PROFILE (ZDP), DESKRIPTORY

Zigbee Device Object je aplikácia Zigbee stacku, ktorá beží pod endpointom číslo 0. Ako je vidieť z Obr. 22, ZDO komunikuje priamo s aplikačnými objektami, sieťovou vrstvou a aplikačnou podvrstvou. V kompetencii ZDO sú nasledujúce služby :

- **Device Discovery** – Vyhľadávanie vzdialeného zariadenia v sieti pomocou špecializovaného aplikačného profilu Zigbee Device Profile (ZDP). ZDP umožňuje vyhľadávanie, údržbu a konfiguráciu zariadení a služieb v sieti. Služby ZDP sú rozdelené na klientské a serverové. Klientské služby resp. požiadavky (requests) sú v Zigbee voliteľné, kvôli úspore pamäti. Aplikačný designér implementuje iba tie, ktoré daná aplikácia vyžaduje. Serverové služby resp. odpovede (responses) sú z veľkej časti povinné, pretože zariadenie musí byť schopné odpovedať na requesty definované v norme. Príklady najpoužívanejších request volaní (str.98 [5]) :

NWK_addr_req – zariadenie chce zistiť pomocou unicastu sieťovú adresu vzdialeného zariadenia na základe MAC adresy, pritom je jedno či zariadenie je 1 alebo 5 hopov ďaleko.

IEEE_addr_req – zariadenie chce zistiť pomocou unicastu MAC adresu vzdialeného zariadenia na základe sieťovej adresy

Simple_desc_req - zariadenie chce zistiť pomocou unicastu informácie o endpointe na vzdialenom zariadení na základe sieťovej adresy a čísla endpointu

Active_EP_req – zariadenie chce zistiť endpointy a simple descriptors na vzdialenom zariadení na základe sieťovej adresy

- **Service Discovery** – táto služba je doplnkom ku službe device discovery. Umožňuje vyhľadávať aplikačné služby bežiacie na vzdialenom zariadení. Service discovery nápodobne obsahuje klientskú a serverovú časť. Klientská časť je plne voliteľná z hľadiska implementácie. Zo serverovej časti (responses / odpovede) sú povinné nasledujúce služby :

Simple_Desc_req – Je to unicast požiadavka na zaslanie informácií o vzdialenom endpointe. Parametre sú : číslo endpointu a cieľová nwk adresa zariadenia

Active_Endpoint_req - Je to unicast požiadavka na zaslanie informácií o aktívnych endpointoch na vzdialenom zariadení. Parametrom je nwk adresa zariadenia.

Match_Desc_req – Je to broadcast požiadavka na zistenie zariadení , ktoré sú aplikačne kompatibilné s endpointom dotazujúceho sa zariadenia. Napríklad zariadenie používa na danom endpointe profil, v ktorom využíva **výstupný** cluster z vypínača. A ak sa niekde v sieti nachádza zariadenie, ktoré používa ten istý profil a zhodný **vstupný** cluster napr. na ovládanie svetla, odpovie na túto požiadavku. Porovnávanie prebieha na základe ID profilu a ID clustrov.

- **Binding (“párovanie”)** – je voliteľná možnosť v Zigbee. Umožňuje tzv. nepriame adresovanie. Zariadenia si vymieňajú dáta na základe tabuľky, ktorá obsahuje zdrojový a cieľový endpoint , cieľovú adresu IEEE aj MAC a cluster. Táto tabuľka môže byť v ZC prípadne rozdistribúovaná v rámci siete. Nepriame adresovanie je výhodné z pohľadu tvorca aplikácie, kde odpadá nutnosť adresácie odosielaných dát. Adresáciu na pozadí zabezpečuje binding mechanizmus.

- **Sieťová konfigurácia, údržba a správa (Network management)**

Start, Reset, Leave network, nastavenie vysielacieho výkonu, povolenie asociácie

Získanie informácií susedných zariadení a siete

- **Správa napájania a úsporných režimov (Power management)**

Pri inštalácii a konfigurácii Zigbee siete je nutné zariadenia určitým logickým spôsobom prepojiť. Zigbee k tomuto účelu definuje pomocné informačné popisovače, tzv. descriptor. Zariadenia si vďaka descriptorom môžu medzi sebou vymeniť podporované funkcie a na základe týchto informácií sa spárovať (svetlo-vypínač, senzor pohybu - alarm) a tým zjednodušiť proces konfigurácie siete. Výmenu descriptorov má v réžii ZDO.

- **Simple descriptor**

Asi výstižnejší názov je Endpoint descriptor, lebo tento deskriptor plne popisuje možnosti Endpointu. Simple descriptor spája identifikatory Endpoint ID, Profile ID, list vstupných a výstupných ID clusterov a device ID do jedného descriptoru. Samotný descriptor neobsahuje žiadny cluster, ale iba Identifikátory použitých clusterov. Apriornne sa predpokladá, že zariadenie, ktoré zisťuje popis daného endpointu vie podľa identifikátorov, o ktoré clustre sa jedná. Výmena informácií o endpointe pomocou identifikátorov je výhodná, posielajú sa iba Cluster ID a nie clustre samotné. Descriptor sa získava na základe žiadosti Simple_Desc_req [3].

- **Node descriptor**

Obsahuje typ zariadenia ZC, ZR, ZED. Ďalej prítomnosť Complex a user descriptoru, použité frekvenčné pásmo, napájanie zariadenia, veľkosť NSDU a ďalšie možnosti zariadenia

Zigbee ďalej definuje Power, User a Complex descriptor ich použitie nie je časté, je možné ich nahradiť použitím Basic clusteru zo Zigbee Cluster Library.

2.2.6.5 ZIGBEE, SECURITY SERVIS PROVIDER

Zigbee využíva v záhlaví linkovej vrstvy zabezpečenie rámcu proti chýbam pomocou CRC (cyclic redundancy check). To umožňuje jednoduchú, ale za to veľmi spoľahlivú detekciu chýb. CRC však nerieši zabezpečenie ako také, podáva len informáciu o tom, či rámec nebol pri prenose poškodený. Samotný obsah rámcu a CRC záhlavie však môžu byť modifikované podľa vôle útočníka. Zigbee z tohto dôvodu definuje zabezpečenie na sieťovej (NWK) a aplikačnej podvrstve (APS). To zahŕňa metódy pre ustanovenie kľúčov, výmenu kľúčov, ochranu rámcov a manažment celého bezpečnostného systému. Bezpečnosť je poskytnutá v zmysle výmeny dát medzi zariadeniami siete, nie však v rámci jedného zariadenia medzi jednotlivými aplikáciami na aplikačnej vrstve. V obmedzených hardvérových podmienkach WSN zariadenia sa predpokladá, že v rámci jedného zariadenia sú všetky aplikácie dôveryhodné a neuplatňuje sa na ne žiadna bezpečnosť. Zigbee používa otvorený kryptografický systém Advanced Encryption Standart (AES) od National Institute of Standarts and Technology (NIST). Názorná animácia ako tento algoritmus funguje [46] a norma AES je voľne k stiahnutiu na webových stránkach NIST [47]. Tento štandard je v súčasnosti vrcholom blokovej symetrickej kryptografie a zatiaľ sa ho nepodarilo prelomiť. Blokovaná šifra znamená, že sa šifruje po blokoch a symetrická, že kľúč odosielateľa a príjemcu sú vzájomne odvoditeľné resp. zhodné. Výhodou AES je relatívna jednoduchosť a možná implementácia aj v 8-bitových mikrokontroléroch, nevýhoda ako pri každej symetrickej šifre je distribúcia kľúčov. Zigbee používa AES s blokmi o veľkosti 128bitov. Norma IEEE 802.15.4 síce umožňuje využiť AES už na linkovej vrstve, túto možnosť však Zigbee nevyužíva a zabezpečenie na linkovej vrstve nie je implementované.

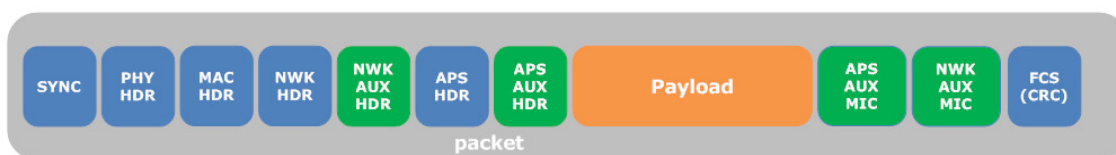
Zigbee poskytuje :

- **Dôvernosť (Security)**

Všetky dáta prenášané medzi zariadeniami v rámci NWK a APS vrstvy môžu byť zašifrované. Sú teda dôverné a bez znalosti kľúča nerozlúštiteľné.

- **Autentickosť (Authenticity)**

Dáta sú autentizované vďaka MIC (Message Integrity Code) voliteľne na NWK vrstve, APS vrstve, prípadne oboch. Odosielateľ MIC vypočíta z kľúča a dátovej časti a vloží ho do rámcu. Príjemca vypočíta MIC pomocou kľúča a prijatých dát a porovná s prijatým MIC. To znamená, že príjemca rámcu si vždy overí, či nebol paket pozmenený, prípadne či nejde o tzv. replay attack tj. odchytenie paketu a následné preposlanie bit po bite. V prípade, že paket nie je autentizovaný, príjemca ho okamžite zahodí.



OBR. 28 PAKET SO ZABEZPEČENÍM

Zigbee v AUX hlavičke definuje nasledujúce možnosti zabezpečenia :

- úplne nezabezpečené
- iba autentizované
- autentizované a zabezpečené

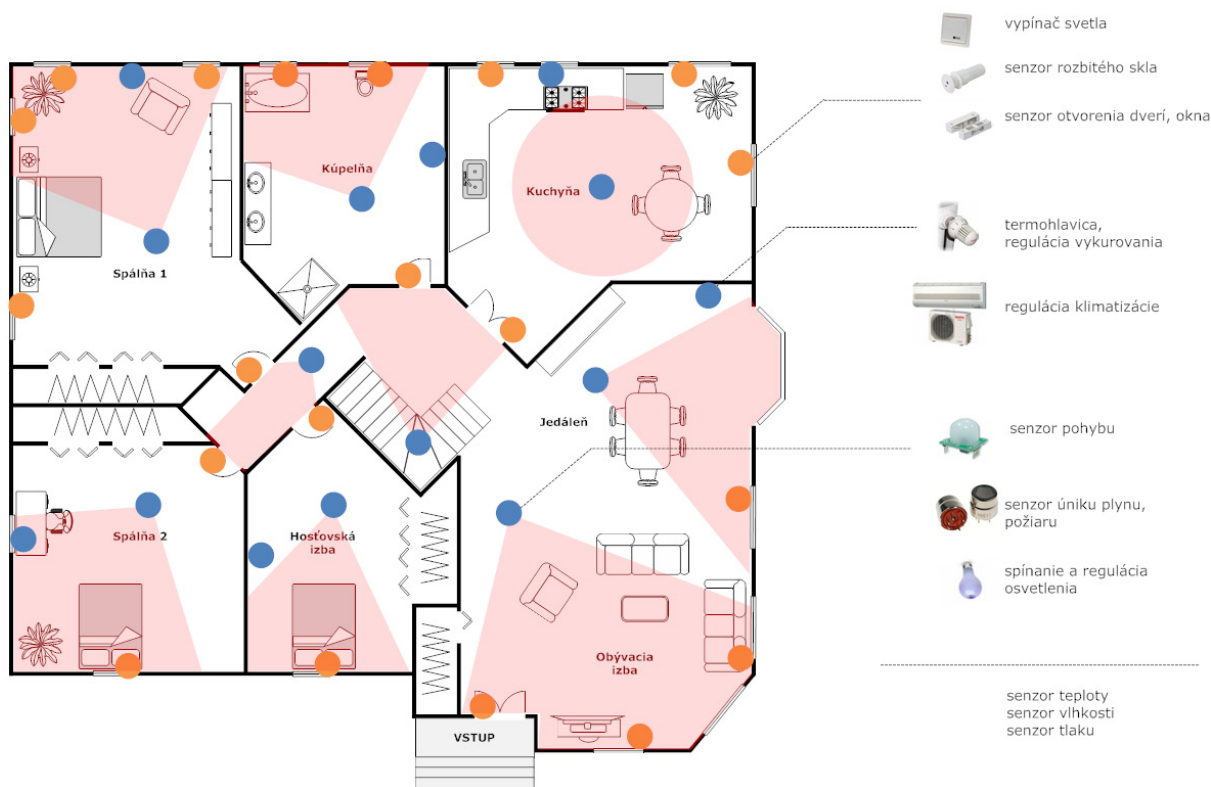
Pre autentizáciu je možné použiť 32, 64, 128 bitov. Dáta sú zašifrované vždy 128. bitmi.

Pozn.: Význam dôvernosti dát je jasný. Je vhodné si ukázať aj význam autentičnosti. Napríklad v jednoduchej aplikácii, kde je spínané svetlo nezáleží, či potencionálny útočník odchytil dáta a zistí, že bol odoslaný príkaz na zapnutie svetla. Preto dáta nemusia byť šifrované. Avšak problém môže nastať, keď útočník preposiela odchytené rámce a bliká s osvetlením. Práve ako ochrana proti modifikácii a preposielaniu dát slúži autentifikácia, ktorá je implementovaná do rámcu v položke MIC. Proti obrane voči replay útokom slúži sekvenčné číslo, ktoré sa pri každom pakete inkrementuje. Útočník toto číslo môže odchytiť a modifikovať podobne ako hociktorý iný bit vrátane MIC. Problém je, že útočník bez znalosti kľúča nie je (teoreticky) schopný vypočítať korektné MIC pre ním modifikované dáta. Prijímateľ podľa nekorektného MIC odhalí neautentifikovaný paket a zahodí ho.

Keďže na zariadenia v rámci WSN je kladený veľký dôraz na nízku cenu, tieto zariadenia nemajú dostatočné hardvérové kapacity schopné trvale odolávať útokom typu DoS (Denial of Service). Ak napríklad útočník vysielá nepretržite dáta, zariadenia nie sú schopné pristúpiť k zdieľanému médiu. Je to, ako keby útočník v LAN sieti odstrihol kábel [3]. Čo je možné urobiť, je lokalizovať problematické zariadenie pomocou LQI a prestať dočasne používať zahľtený segment siete. Tento problém je aj celkovo problémom všetkých bezdrôtových sietí, lebo médium je dostupné všetkým v dosahu. Ďalším problémom je filtrovanie paketov. Tento podstatný bezpečnostný prvok v pevných sieťach v podstate vo WSN nie je možné implementovať. Ak by aj pomyselný bezdrôtový firewall mal dosah v rámci celej siete, nejde efektívne všetky pakety prenášať alebo filtrovať prostredníctvom neho. Implementovať firewall v každom zariadení v súčasnosti nie je možné kvôli hardvérovým obmedzeniam zariadení vo WSN. Bezdrôtové siete nebudú nikdy vhodné v kriticky bezpečnostných aplikáciách, pretože na rozdiel od pevných a optických sietí, médium je dostupné všetkým a teda jeho úplná kontrola je nemožná. Hlavným cieľom WSN aplikácií je zvýšenie komfortu pri primeranej miere zabezpečenia.

3 INTELIGENTNÉ BUDOVY A WSN

V súčasnosti ešte neexistuje všeobecne akceptovaná definícia, čo vlastne sú inteligentné budovy. V Českej a Slovenskej republike sa pod týmto pojmom popisujú „šikovne“ automatizované budovy za účelom zvýšenia komfortu a zníženia nákladov. Na poli zberu dát a riadenia sú v oblasti automatizácii budov dominantné dva implementačné smery. Prvý prístup je priamočiary a to za použitia kabeľáže ako pre napájanie spotrebičov, senzorov a akčných členov, tak pre komunikačné vodiče. Komunikácia v týchto systémoch prebieha po štandardizovaných zberniciach ako sú EIB, KNX a Feldbus. Riadiace centrum býva obvykle realizované prostredníctvom špecializovanej centrálnej jednotky s grafickým výstupom a pripojením do globálnej siete prostredníctvom mobilného operátora alebo pevného internetového spojenia. Myšlienka druhého spôsobu implementácie je náhrada komunikačných vodičov bezdrôtovým spojením, tj. bezdrôtová senzorová sieť. Výhodou nasadenia wsn je podstatné zníženie objemu kabeľáže v objekte, úspora na inštalačných prácach, možnosť nasadenia aj v stávajúcich objektoch, jednoduché rozšírenie alebo zmena a celkové zvýšenie komfortu. Aplikácia wsn na báze IEEE 802.15.4 a Zigbee je vhodná práve do oblasti inteligentných budov. Cieľom tejto práce je návrh hardvérovej platformy pre realizáciu wsn siete v inteligentných budovách. Obr. 29 ukazuje použitie wsn siete v demonštračnom objekte, rodinnom dome. Modré kruhy reprezentujú wsn uzol, ktorý je napájaný z elektrickej siete. Tieto uzly môžu byť umiestené napríklad v osvetlení. Žlté kruhy reprezentujú wsn uzly, ktoré sú napájané z batérií resp. z alternatívnych zdrojov elektrickej energie. V pravej časti obrázku sú popísané príklady použitia senzorov a akčných členov.



OBR. 29 APLIKÁCIA WSN V INTELIGENTNÝCH BUDOVÁCH

Možnosti inteligentných budov :

- **Riadenie a regulácia** : klimatizácie, vykurovania, osvetlenia, žalúzií
- **Bezpečnosť** : snímanie pohybu v objekte, otvorenia dverí, rozbitia okien, úniku plynu, požiaru
- **Profily** : Dovolenka – teplota objektu 15°C, osvetlenie vypnuté, bezpečnostné funkcie zapnuté
Doma – teplota podľa nastavenia v miestnosti, žalúzie regulované podľa intenzity vonkajšieho osvetlenia
Osvetlenie regulované podľa pohybu v objekte
- **Vizualizácia** : kompletná vizualizácia objektu, prehľad o pohybe, teplote, spotrebe atď.
- **Vzdialená správa** : prostredníctvom internetu alebo mobilného operátora

4 HARDVÉROVÁ PLATFORMA PRE UZLY WSN

Pod pojmom platforma sa rozumie hardvérový design riadený mikrokontrolérom. Vlastná funkcionálnosť platformy je definovaná prostredníctvom ovládacieho firmvéru. Typické zobrazenie uzlu siete je na Obr. 2.

Pri návrhu hardvéru boli stanovené nasledujúce kritériá :

- Využitie Opensource riešení v maximálne možnej miere
- Komunikácia na báze IEEE 802.15.4 a Zigbee
- Nízka spotreba
- Minimálne rozmery
- Napájanie z akumulátorov
- Univerzálnosť
- Operácia na 2.4GHz, 915MHz a 868MHz
- Nízka cena oproti komerčným riešeniam

4.1 NAPÁJANIE

Efektívne napájanie je jedným z kľúčových parametrov pre zariadenie v rámci WSN a dôležitým aspektom z hľadiska celkovej výdrže sieťového uzlu. Hardvérová platforma bude napájaná z bežne dostupných akumulátorov, preto je vhodné popísať ich vlastnosti. V súčasnosti sú bežne dostupné nasledujúce typy akumulátorov: Li-ion, NiMH a NiCD. Z pohľadu WSN nie sú zaujímavé nasledovné parametre akumulátorov: počet nabíjacieho cyklu, rýchlosť nabíjania a max. vybijací prúd. Naopak podstatné parametre z hľadiska wsn sú: kapacita, nominálne napätie, samo vybíjanie a závislosť na teplote okolia. Vynikajúce vlastnosti má akumulátor Li-ion. Tento typ akumulátoru má vysoké nominálne napätie, najlepší pomer kapacita/rozmery a najnižšie samo vybíjanie. Pre interiérové aplikácie je to zrejme najlepšia voľba. Problémom môže byť vyššia cena a aplikácie, kde teplota klesá hlboko pod 0°C. Pri týchto podmienkach Li-ion akumulátor rýchlo stráca svoje napätie a nie je schopný dodať celú svoju kapacitu (viď Obr. 30). Pokles napätia závisí aj od záťaže, tj. od veľkosti odoberaného prúdu. Vo wsn aplikáciách však veľkosť odoberaného prúdu je zanedbateľný parameter. Pre prostredie, kde teplota klesá až k -15°C, môže byť dobrá voľba akumulátor typu NiCD, ktorý má stabilné napätie v širokom teplotnom rozsahu. Akumulátory NiCD a NiMH majú štandardné rozmery a sú zameniteľné, naproti tomu Li-ion akumulátory sú rôznorodého tvaru. V literatúre o WSN sa obvykle robia odhady, koľko mesiacov prípadne rokov dané zariadenie môže byť napájané zo štandardného akumulátoru. Často krát sa však zabúda na problém, ktorý je u všetkých typoch akumulátorov, a to je samo vybíjanie. Bohužiaľ samo vybíjanie (self-discharge) je u akumulátorov tak veľké, že sa nedá zanedbať. Akumulátory NiMH a NiCD sa prakticky samovoľne vybijú v priebehu jedného roka. Nové typy NiMH akumulátorov majú samo vybíjanie na hranici približne 6% za mesiac. U typu Li-ion je samo vybíjanie relatívne nízke, pohybuje sa okolo 3% za mesiac. Samo vybíjanie nie je lineárne a vybíjaním akumulátoru sa znižuje. Li-ion akumulátory však trpia jedným neduhom, o ktorom sa výrobcovia nezmieňujú, a tým je problém starnutia. U Li-ion akumulátorov sú badateľné straty kapacity už po roku nezávisle na tom, či je daný akumulátor používaný alebo nie. Po druhom a treťom roku majú Li-ion články pravidelné výpadky. Podobné problémy vykazuje aj NiMH akumulátor, ale až pri vysokých teplotách. [13]

Zhrnutie vlastností akumulátorov z pohľadu WSN :

NiCD akumulátor

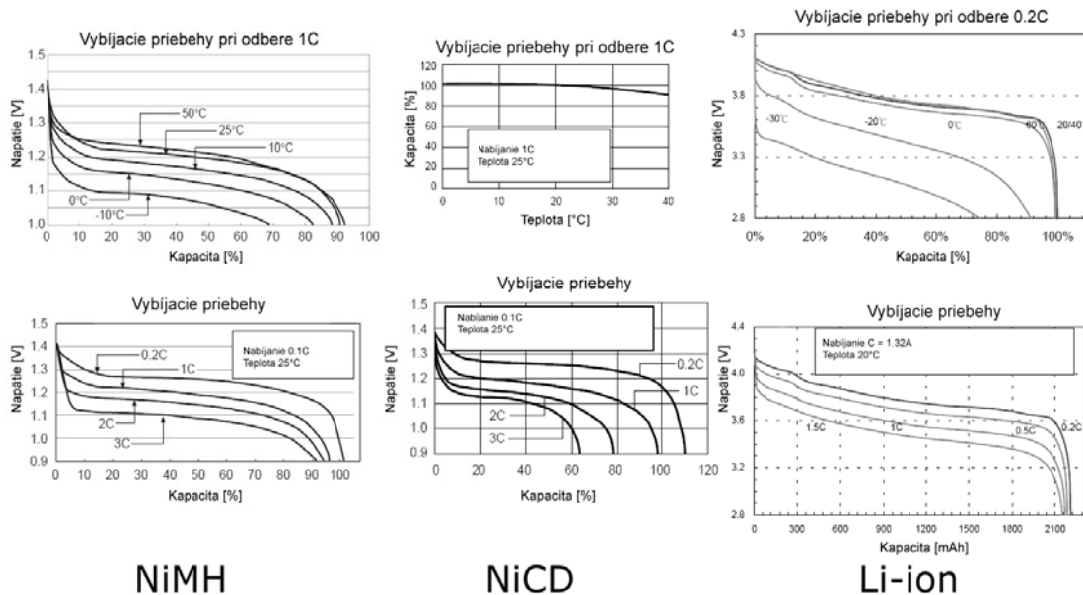
- Nominálne napätie 1.2V (pri záťaži 0.2C, izbová teplota)
- Pomer kapacita/rozmery: nízky
- Prakticky nezávislý na teplote
- Trpí pamäťovým efektom
- Vykazuje samovybíjanie 15-20% / mes.
- Veľmi neekologický
- Nízka cena

NiMH akumulátor

- Nominálne napätie 1.2V (pri záťaži 0.2C, izbová teplota)
- Pomer kapacita/rozmary: stredný
- Zavislý na teplote
- Menší vplyv pamäťového efektu
- Vykazuje samovybíjanie 30% / mes.
- Špeciálne typy majú samovybíjanie 6% / mes.
- Ekologicky prijateľný
- Nízka cena

Li-ion akumulátor

- Nominálne napätie 3.6-3.7V (pri záťaži 0.2C, izbová teplota)
- Pomer kapacita/rozmary: vysoký
- Zavislý na teplote
- Nevykazuje pamäťový efekt
- Podstatný vplyv starnutia
- Vykazuje samovybíjanie 3% / mes.
- Vysoká cena



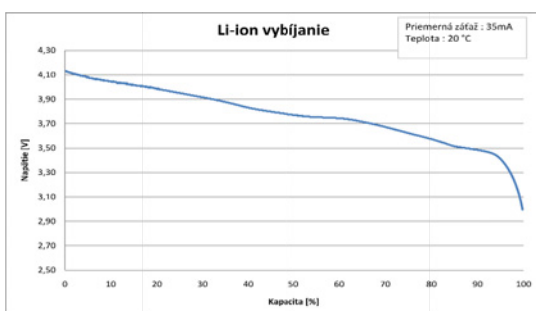
NiMH

NiCD

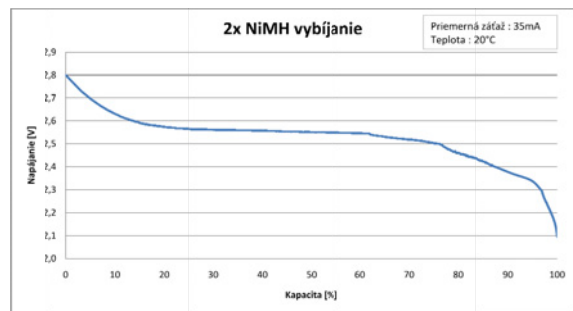
Li-ion

OBR. 30 POROVNANIE AKUMULÁTOROV, PREVZATÉ Z [8-11]

Hardvérová platforma je zameraná na zber dát v inteligentných budovách, je možné teda očakávať pracovnú teplotu okolo 20°C. Špičkový odoberaný prúd bude približne 35mA. Tento prúd je daný maximálnou spotrebou: mikrokontroléru Atmega1281[20] 10mA, RF modulu AT86RF230[27] 17mA, senzorov 5mA a periférií 3mA. Tieto komponenty budú popísané v ďalšom texte. Pre pracovné podmienky 20°C a odber 35mA bol zmeraný kontinuálny vybijací priebeh na Li-ion (Obr. 32) a 2x NiMH (Obr. 31) akumulátoroch. Z týchto priebehov je možné určiť napäťový rozsah, ktorý poskytujú dané akumulátory. Pri Li-ion je teda k dispozícii rozsah 4.15 - 3.0V a pri 2x NiMH rozsah napätia od 2.8 do 2.1V.

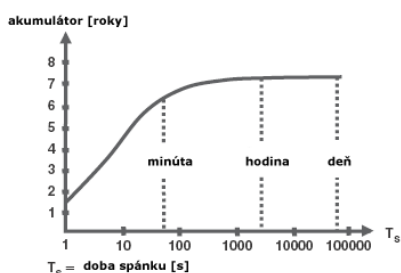


OBR. 32 VYBÍJACÍ PRIEBEH, LI-ION AKUMULÁTOR

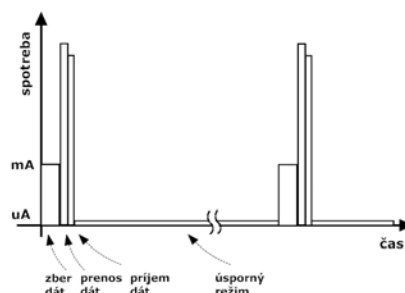


OBR. 31 VYBÍJACÍ PRIEBEH, 2X NIMH AKUMULÁTOR

Ďalej je vhodné analyzovať reálnu kapacitu akumulátoru. Výrobcovia udávajú nominálnu kapacitu akumulátoru. Reálna kapacita však závisí na spôsobe akým sa náboj z akumulátoru odoberá. Niekedy výrobca udáva "battery efficiency factor". Tento faktor udáva pomer medzi reálnou a nominálnou kapacitou akumulátoru. Pri pohľade späť na Obr. 3, ktorý ilustruje typické stavy wsn uzlu, je vhodné pretransformovať jednotlivé pracovné režimy wsn uzlu na kvatifikovateľný prúdový odber. Obr. 3 je možné teda interpretovať v čase ako impulzný odber vid' Obr. 33. Z obrázku je vidieť, že špičková spotreba wsn uzlu môže byť až desiatky mA a kludová spotreba je na úrovni jednotiek uA. Priemerná spotreba sa teda pohybuje niekde v jednotkách až desiatkách uA, záleží na presnej dobe aktívneho režimu. Práve špičková spotreba pri vysielaní a prijíme má nepriaznivý vplyv na celkovú kapacitu akumulátoru, ak medzi prúdovými špičkami nie je dostatok času na zotavenie akumulátoru (recovery effect). Ak je akumulátor vybíjaný kontinuálnym priebehom s vysokým odberom, akumulátor prestane dodávať náboj, aj keď má ešte k dispozícii chemicky aktívny materiál. Ak však je akumulátor vybíjaný rovnako vysokým odberom, ale impulzne a medzi impulzami sú dostatočne dlhé prestávky, chemický materiál v akumulátore môže získať späť svoju stratenú kapacitu pri špičkovom odbere.



OBR. 34 IMPULZNÝ ODBER Z AKUMULÁTORU PREVZATÉ Z [4]



OBR. 33 ZAVISLOSŤ ENERGETICKEJ SPOTREBY WSN UZLU NA ČASE

Obr. 34 ilustruje závislosť životnosti akumulátoru na impulznom odbere. Z obrázku je podstatná informácia, že ak medzi prúdovými špičkami je čas väčší ako jedna minúta, začína byť potlačený negatívny vplyv špičkového odboru [4]. Pre maximálne využitie kapacity akumulátoru je teda vhodné aby wsn uzol strávil v úspornom režime minimálne jednu minútu.

4.2 SENZORY

Oblasť senzory je veľmi obsiahla. Samotné senzory je možné analyzovať a hodnotiť podľa desiatok kritérií, statických a dynamických vlastností. Pre potreby wsn však túto problematiku zdecimujeme a zaujímať nás bude iba prijateľná presnosť, spoľahlivosť a nízka spotreba. Pre meranie intenzity osvetlenia by mohol byť použitý fotorezistor. Je jednoduchý a ľahko použiteľný, avšak museli by byť vykonané ďalšie operácie nad analógovým signálom, ako je: A/D konverzia, spracovanie a vyhodnotenie. Tieto operácie predlžujú aktívnu dobu wsn uzlu, čo vedie k zvýšenej energetickej spotrebe. Ďalším problémom pri analógových obvodoch je problematické odpojenie meraného senzoru od napájania. Na vypnutie a komunikáciu s takýmto senzorom je potrebné vyhradiť určitý počet pinov mikrokontroléru. Preto v aplikáciách WSN je výhodné využiť čo možno najviac digitálne obvody a obvody typu MEMS [29]. Ideálne sú malé inteligentné digitálne senzory fyzikálnych veličín, komunikujúce pomocou zberníc s nízkou spotrebou a úsporným režimom. Z dostupných obvodov na trhu boli vybraté senzory uvedené v Tab. 7. Všetky obvody disponujú úsporným režimom, postačujúcou presnosťou, nízkym napájacím napätím, nízkou kludovou spotrebou a sú riadené dvojvodičovou komunikačnou zbernicou I²C [30], ktorú je možné identifikovať aj pod označením TWI alebo SMBus.

TAB. 7 SENZORY PRE HARDVÉROVÚ WSN PLATFORMU

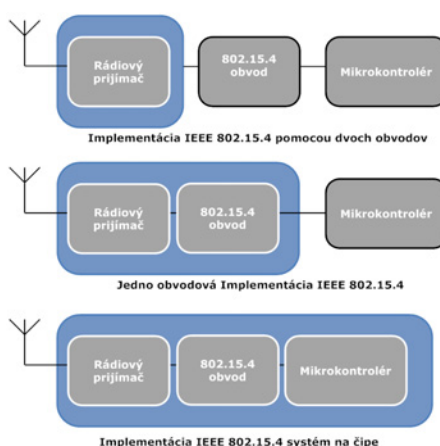
Názov obvodu	Meraná veličina	I _{aktivny} [uA]	I _{spánok} [uA]	U _{napájacie} [V]
MMA7660FC s[14]	Akcelerácia	47 - 294	0.4	2.4 - 3.6
BH1715FVC [15]	Intenzita svetla	120 - 190	0.01 - 1	2.4 - 3.6
MPL115A2 [16]	Atmosferický tlak	6	1	2.4 - 5.5
SHT21 [17]	Relatívna vlhkosť	270 - 330	0.15-0.4	2.1 - 3.6
TMP102 [18]	Teplota	10	1	1.4 - 3.6
MS-360LP [19]	PIR senzor + CDS	N/A	10 (standby)	3.1 - 4.1

4.3 RÁDIOVÝ MODUL

V súčasnosti už v podstate každý výrobca mikrokontrolérov vyrába aj rádiové moduly (RF transceiver) pre štandard IEEE 802.15.4. Možnosti implementácie rádiového modulu sú ilustrované na Obr. 35. Modrá plocha reprezentuje jeden integrovaný obvod. Výrobcovia obvykle vyrábajú druhú a tretiu variantu uvedenú na obrázku. Napríklad Texas Instruments vyrába RF moduly : CC2520 (druhý variant), CC24xx (tretí variant). K týmto obvodom dodáva Texas Instruments Zigbee softvér s názvom Z-Stack. Spoločnosť Freescale má obdobne svoje obvody a variantu BeeStack. Nevýhoda týchto riešení je, že tento softvér je zviazaný s použitím konkrétneho vývojového nástroja, ktorý je pomerne nákladnou záležitosťou. Podobná situácia je aj pri ďalších výrobcov. Prehľad vhodných rádiových modulov je v [7]. Z pohľadu kritérií (str. 35) boli vybraté produkty od firmy ATMEL. Firma ATMEL poskytuje ako mikrokontroléry a rádiové moduly, tak aj Zigbee moduly a Zigbee stack (softvérová implementácia) s názvom Bitcloud [23]. Tento stack je taktiež zviazaný s vývojovým nástrojom AVR Studio [22] a opensource prekladačom AVRGCC. AVR Studio je kvalitný nástroj, ktorý na rozdiel od ostatných výrobcov nie je limitovaný a je voľne dostupný k stiahnutiu. Samotný Bitcloud je taktiež zadarmo a je čiastočne opensource. Pre implementáciu hardvérovej platformy boli zvolené rádiové moduly uvedené v Tab. 8, ktoré vykazujú vysokú citlivosť prijímača a nízku spotrebu.

TAB. 8 RÁDIOVÉ MODULY PRE IEEE 802.15.4, ATMEL

Obvod $V_{DD} 1.8-3.6V$	Citlivosť [dBm]	Tx [mA]	Rx [mA]	Úsporný režim	Kmitočtové Pásmo
AT86RF230	-101	17 (3dBm)	15	20nA	2.4GHz
AT86RF212	-110	18 (5dBm)	9	200nA	868/915MHz



OBR. 35 IMPLEMENTÁCIA IEEE 802.15.4

Citlivosť prijímača AT86RF230

Pre predstavu o citlivosti rádiového modulu je uvedený nasledujúci príklad. Obvod AT86RF230 má citlivosť prijímača -101dBm. Ďalej je možné napísať :

$$x = 10 \log\left(1000 \frac{P_2}{P_1}\right) = 10 \log(1000 P) \text{ [dBm]} \quad (1.1).$$

, kde jednotka x udáva bezrozmerný pomer výkonov P v [dB] vzťahnutý k miliwattu

Z rovnice vyššie vyjadríme výkon P :

$$P = \frac{10^{\left(\frac{x}{10}\right)}}{1000} \text{ [W]} \quad (1.2).$$

Potom výkon signálu pri citlivosti -101dBm je :

$$P = \frac{10^{\left(\frac{-101}{10}\right)}}{1000} = 7.94 * 10^{-14} = 0.0794 \text{ pW} \quad (1.3).$$

Efektívna hodnota napätia je pri anténe o impedancii 50Ω (typická anténa) potom :

$$U_{rms} = \sqrt{P * R_{ant}} = \sqrt{0.0794 * 10^{-12} * 50} = 2 \text{ uV} \quad (1.4).$$

Štandard IEEE 802.15.4 definuje citlivosť prijímača ako najnižšiu prijatú výkonovú hodnotu, pri ktorej vie prijímač extrahovať dáta s paketovou chybovosťou (PER) nižšou ako 1%. Pre pásmo 2.4Ghz norma požaduje citlivosť -85dBm. Modul AT86RF230 má citlivosť prijímača až -101dBm. To znamená, že akýkoľvek prijatý signál s efektívnou hodnotou 2 uV je prijímač schopný rozlíšiť s paketovou chybovosťou (PER) menej ako 1%. Praktické meranie a výsledky s rádiovým modulom AT86RF230 sú spracované v literatúre [54].

4.4 MIKROKONTROLÉR A RÁDIOVÝ MODUL ZIGBIT

Pri CMOS obvodoch platí približne vzťah [12] :

$$P \propto f * V_{DD}^2 [W] \quad (1.5).$$

, kde P je výkon, f [Hz] kmitočet a V_{DD} [V] je napájacie napätie. Z toho vyplýva, že znižovaním frekvencie a napätia znižujeme energetickú spotrebu. Tento fakt platí obecné a je možné ho intuitívne interpretovať tak, že digitálne integrované obvody sú zložené z tranzistorov pracujúcich v spínacom režime. Tranzistor musí pre prechod medzi vypnutím a zopnutím vykonať prácu. Čím častejšie musí tranzistor prekonávať tieto stavy, tým viac práce vykoná. Práca je závislá aj na napätí, ktoré musí tranzistor prekonať. Riadiaci mikrokontrolér by mal preto pracovať na nízkom kmitočte pri nízkom napätí. Na trhu je dostupných mnoho mikrokontrolérov zameraných práve na nízku energetickú spotrebu. Pre typický uzol wsn výpočtovo postačuje 8 bitový mikrokontrolér. Pri výbere vhodného adepta boli zhodnotené: vývojové nástroje, dostupné knižnice pre 802.15.4/Zigbee, spotreba a cena. Vynikajúce parametre majú mikrokontroléry z rodiny MSP430 (16bit RISC) od Texas Instruments. Tieto obvody majú v aktívnom režime spotrebu iba 1,2mW v hlbokom spánku iba 0,3μW. Problémom však je dostupnosť neľmitovaného vývojového prostredia. Podľa stanovených priorit vyhovujú Zigbee moduly od spoločnosti Atmel. Tieto moduly majú označenie Zigbit (Obr. 37).

Zigbit je v podstate kombinácia rádiového modulu z Tab. 8 a mikrokontroléru ATmega1281 [20]. Tieto dva integrované obvody sú spoločne s nutnými pasívnymi súčiastkami umiestnené na DPS a tienené kovovým krytom. Výhodné je, že moduly sú vzájomne pinovo kompatibilné, takže ich zamieňanie je bezproblémové. Kompletný prehľad Zigbit modulov a ich vlastností je uvedený v Tab. 9. Vnútorne zapojenie modulu je uvedený v prílohe č. 1.

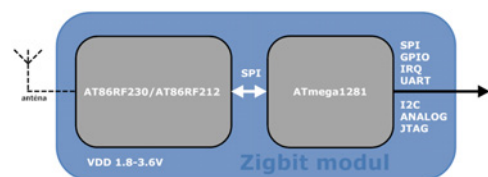
TAB. 9 ZIGBIT MODULY, ATMEL

Zigbit	Rádiový čip	Poznámka, VDD = 1.8-3.6V
ATZB-24-B0	AT86RF230	Balancovaný výstup
ATZB-24-A2	AT86RF230	Integrovaná dual čipová anténa
ATZB-A24-UFL	AT86RF230	UFL konektor (miniatúrny koaxiálny konektor), Integrovaný zosilovač, nebalancovaný výstup, VDD = 3.0-3.6V
ATZB-A24-U0	AT86RF230	Integrovaný zosilovač, nebalancovaný RF výstup, VDD = 3.0-3.6V
ATZB-900-B0	AT86RF212	Balancovaný výstup

*Rozdiel medzi balancovaným a nebalancovaným výstupom je uvedený v lit, [31]



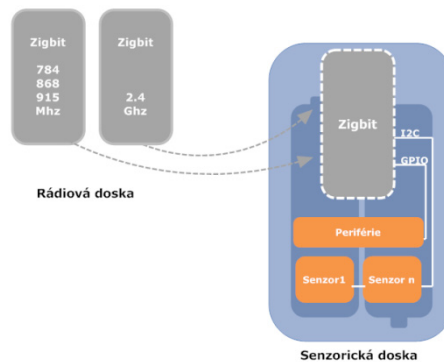
OBR. 36 ZIGBIT MODULY, ATMEL



OBR. 37 ZIGBIT MODUL, VNÚTORNÁ ŠTRUKTÚRA

4.5 NÁVRH HARDVÉROVEJ PLATFORMY

Keďže Zigbit moduly sú pinovo kompatibilné, vzniká možnosť vytvoriť dve dosky. Na jednej bude Zigbit modul (Rádio + mikrokontrolér) a na druhej bude napájacia časť, senzory atď. Toto oddelenie rádiovkej časti od sensorovej časti zvýši univerzálnosť v tom zmysle, že sensorická doska bude navrhnutá pre konkrétnu aplikáciu a doska s rádiovým modulom sa zvolí podľa potreby. Obe dosky budú prepojené pomocou konektoru. Napríklad pri zarušení 2.4Ghz pásma sa použije doska so subgigahertzovým Zigbit modulom, prípadne pri potrebe vyššieho výkonu sa použije doska so Zigbit modulom, ktorý obsahuje zosilňovač. Táto koncepcia je znázornená na nasledujúcom obrázku. Zigbit moduly majú dostatočné hardvérové kapacity, takže zariadenie môže figurovať v Zigbee sieti ako Zigbee koncové zariadenie, Zigbee router aj Zigbee koordinátor.



OBR. 38 KONCEPCIA WSN PLATFORMY

4.5.1 SENZORICKÁ DOSKA

Napájacia časť (Obr. 39):

Pre napájanie sensorickej dosky je možné použiť 1x Li-ion (4.15 - 3.0V) akumulátor alebo dva NiMH/NiCD (2.8 - 2.1V) články. Keďže napätie Li-ion akumulátoru (Obr. 32) je príliš veľké pre Zigbit modul a senzory, je nutné napätie znížiť. Naopak pri NiMH/NiCD článkoch by bolo vhodné napätie zvýšiť napr. pre prípad pripojenia PIR čidla (3.1-4.1V, Tab. 7). Z týchto dôvodov bola analyzovaná koncepcia napájania s meničom napätia. Keďže uzol siete je väčšinu času v úspornom režime, efektívnosť meniča nie je smerodajná. Rozhodujúca je jeho kľudová spotreba. Boli analyzované varianty dostupných DC/DC meničov v rôznych konfiguráciách [32] (buck, boost, buck-boost, sepic, boost+LDO). Aj v najlepšom prípade sa však kľudová spotreba pohybovala relatívne vysoko, na úrovni 10 uA. Kvôli vysokej kľudovej spotrebe bolo použitie meniča pre potreby interiérových aplikácií zavrhnuté. Ak bude nutné využiť senzor, ktorý vyžaduje vyššie napájacie napätie, ako sú schopné poskytnúť NiMH/NiCD články, použije sa Li-ion akumulátor. Menič napätia sa uplatní v aplikáciách pracujúcich pri nízkej teplote, kde napätie na akumulátoroch rýchlo klesá (vid' 4.1).

Vybraný akumulátor sa pripája do konektoru POWER. Prepojka MEAS slúži na odpojenie dosky od napájania, ďalej môže slúžiť na meranie prúdového odberu dosky. Po pripojení akumulátoru je nutné správne prepojiť JMP prepojku. Pri Li-ion akumulátore prepojiť piny 1 a 3. Pri NiMH/NiCD akumulátore prepojiť piny 2 a 3. Ak je doska napájaná z Li-ion akumulátoru, je použitý špecializovaný LDO (Low Dropout, stabilizátor s nízkym úbytkom napätia) stabilizátor TPS780 [33] s veľmi nízkou kľudovou spotrebou. Pri maximálnej záťaži wsn uzlu (cca 35mA) má TPS780 úbytok na napätí iba 25mV. Výstup stabilizátoru je 3.3V alebo 3V podľa konkrétneho typu. V prípade, že doska je napájaná z NiMH/NiCD článkov, napätie z akumulátorov sa kopíruje na výstup, LDO je nezaťažovaný a jeho kľudový odber je iba 500nA. Napájacie napätia (Obr. 39, Obr. 41, Obr. 42) :

VBAT – napájanie z akumulátoru

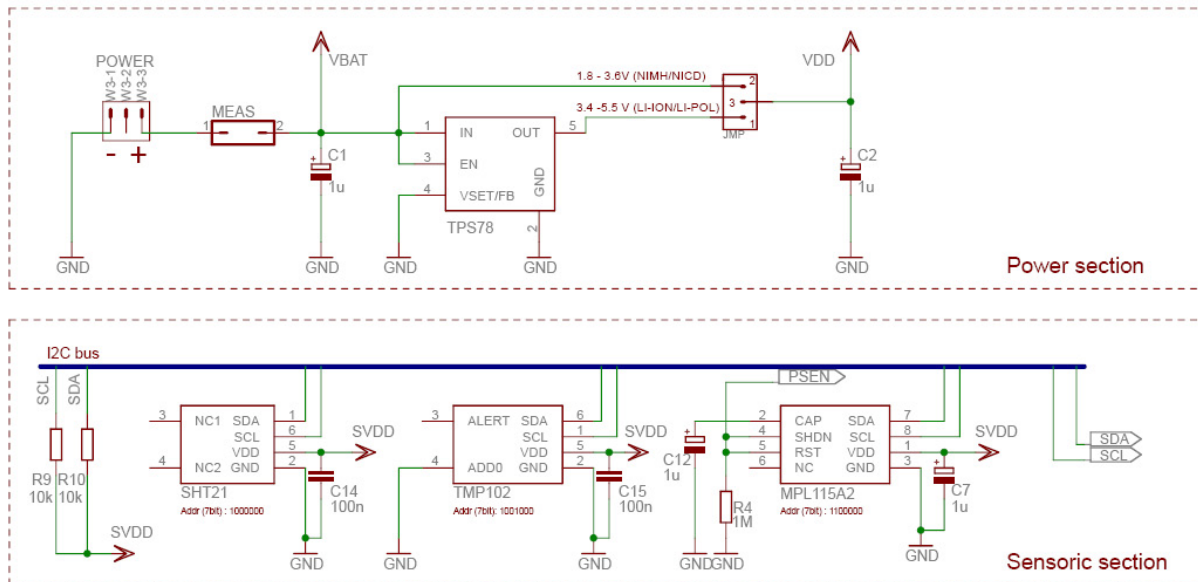
VDD – v prípade Li-ion stabilizované napätie, inak VDD=VBAT

SVDD – digitálne odpáateľné napájanie pre senzory na sensorickej doske

EVDD – digitálne odpáateľné napájanie vyvedené na konektor

Senzorická časť (Obr. 39):

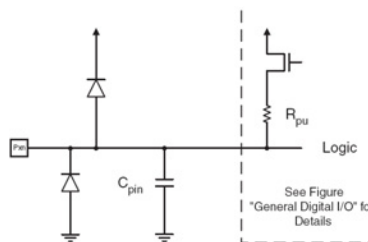
Pre zber dát v oblasti inteligentných budov boli vybrané senzory pre meranie teploty (TMP102), tlaku (MPL115A2), vlhkosti (SHT21). Tieto senzory sú umiestnené priamo na doske a ďalšie senzory je možné pripájať pomocou štandardného konektoru MAIN (Obr. 42). Senzory komunikujú po I²C zbernici. Rezistory R9, R10 sú zdvíhacie rezistory pre linky SCL a SDA I²C zbernice. Senzory teploty a vlhkosti sa krátko po privedení napájacieho napätia automaticky prepnú do úsporného režimu. Senzor tlaku sa prepína medzi aktívnym a úsporným režimom pomocou pinu PSEN. Implicitný stav úsporného režimu je určený pull-down rezistorom R4.



OBR. 39 SCHÉMA SENZORICKEJ DOSKY : NAPÁJACIA A SENZORICKÁ ČASŤ

Periférna časť (Obr. 41)

Tlačidlá S1 a S2 sú aktívne v nule a sú privedené na externé prerušenia IRQ4 a IRQ6 mikrokontroléru Atmega1281. Tieto prerušenia sú konfigurovateľné v aktívnom režime na hranu a v hlbokom spánku iba na zmenu úrovne [20]. Doska ďalej obsahuje 4-polohový DIP prepínač, ktorý je taktiež aktívny v logickej 0. Vyhodnocovacie linky z tlačidiel a DIP prepínača sú privedené na I/O piny mikrokontroléru. **Tieto piny musia byť nakonfigurované do stavu Hi-Z alebo Input!** Pre prípad poruchy softvéru sú sériovo pripojené obmedzovacie rezistory. Veľkosť týchto rezistorov je zvolená tak, aby boli dostatočne veľké na prúdové obmedzenie a zároveň dostatočne malé, aby spoločne s R_{pu} (Interný pull-up mikrokontroléru, Obr. 40) netvorili delič napätia. Keďže tlačidlá aj DIP switch sú zapojené ako spínacie prvky je nutné definovať implicitnú logickú úroveň. Kvôli úspore nákladov a miesta nie sú vyvedené externé pull-up rezistory. Využívajú sa integrované zdvíhacie rezistory mikrokontroléru, ktoré sú programovo ovládateľné Mosfetom, znázorneným na Obr. 40. Hodnota R_{pu} je relatívne malá iba 20-50kΩ [20], preto snímanie a vyhodnocovanie stavu spínačov by malo prebiehať čo možno najrýchlejšie. Po vyhodnotení je vhodné interný pullup (zdvíhací rezistor) okamžite odpojiť, aby zbytočne nevyčerpával kapacitu batérie.



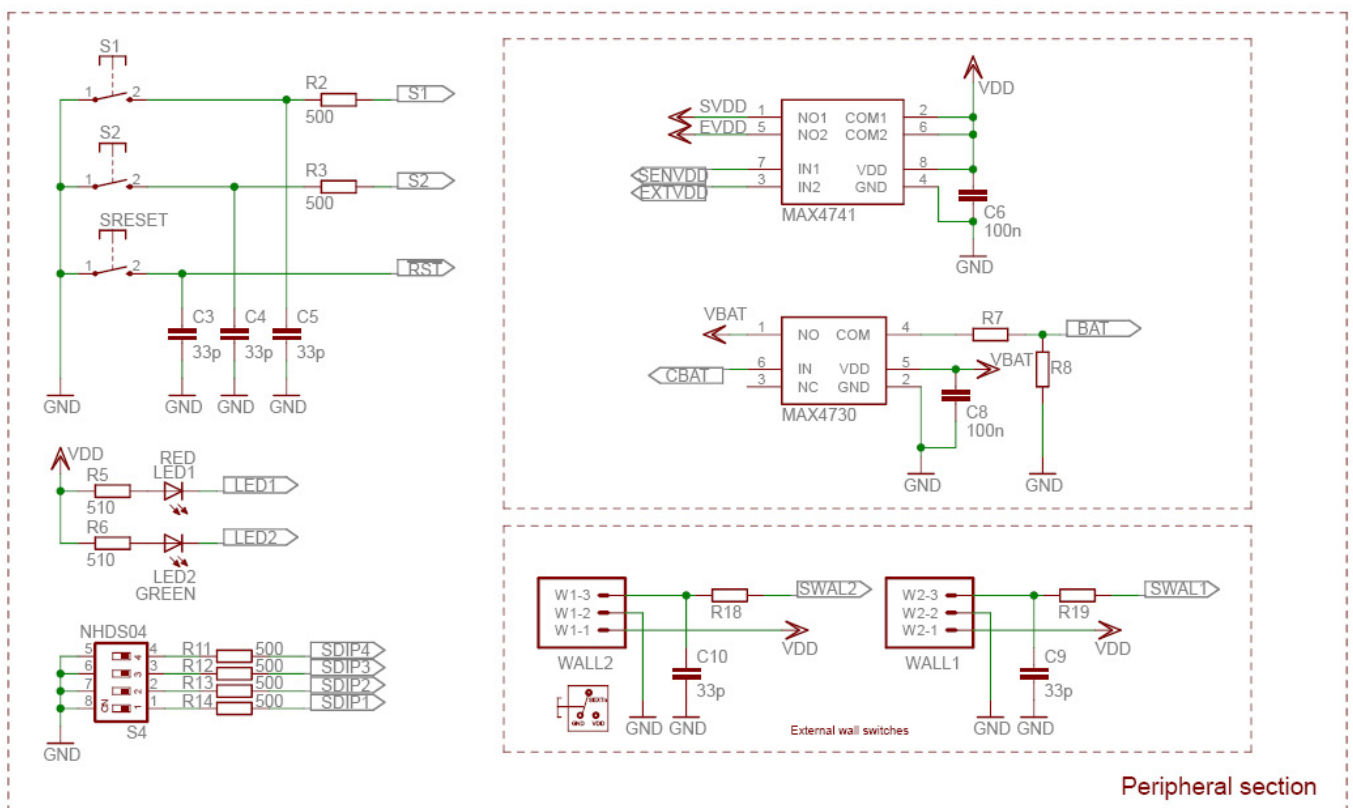
OBR. 40 I/O PIN, ATMEGA1281 [20]

Periférna časť ďalej obsahuje indikačné LED diódy. Červená dióda má úbytok napätia 2.0V a zelená dióda 2.2V. Pri napájaní Li-ion článkom budú diódy svietiť celú dobu rovnakou intenzitou. Naopak pri napájaní z NiMH/NiCD článkov bude intenzita diód klesať s vybitím akumulátorov (viď Obr. 31)

Konektory WALL1 a WALL2 sú zamýšľané pre vstup z klasických nástenných vypínačov (spínanie osvetlenia). Sú to v podstate prepínacie kontakty privedené na prerušenie mikrokontroléru PCINT5, PCINT6, ktoré reagujú na zmenu úrovne logického signálu. Keďže sa jedná o prepínacie kontakty, nie je nutné využívať zdvíhací/znižujúci rezistor, tým pádom sa eliminuje energetická spotreba. To umožňuje nepretržité snímanie týchto vstupov.

Obvod MAX4741 [49] je analógový duálny SPST (Single-pole / Single-Throw) spínač. Je využitý ako spínač napájania pre senzory na doske SVDD a externého napájania EVDD. Prechodový odpor má 0.8 Ω a pracovné napätie od 1.6-3.6V. Vlastná spotreba obvodu sa pohybuje v desiatkach nA. Maximálny spínaný prúd dovoľuje až 150mA.

Rezistory R7 a R8 tvoria delič napätia, ktorým sa lineárne znižuje napätie na akumulátore a privádza sa na vstup A/D prevodníku mikrokontroléru. Tento delič je navrhnutý tak, aby ním prechádzajúci prúd bol dostatočne veľký a odolný voči okolitému rušeniu. To však logicky vedie k zvýšenej spotrebe, preto je vhodné tento delič po načítaní hodnoty napätia odpojiť. Práve k tomuto účelu slúži obvod MAX4730 [50]. Je to analógový SPDT (Single-pole / Double-Throw) spínač. Prechodový odpor má 3.5 Ω a pracovné napätie od 1.8-5.5V. Vlastná spotreba obvodu sa pohybuje v jednotkách nA.



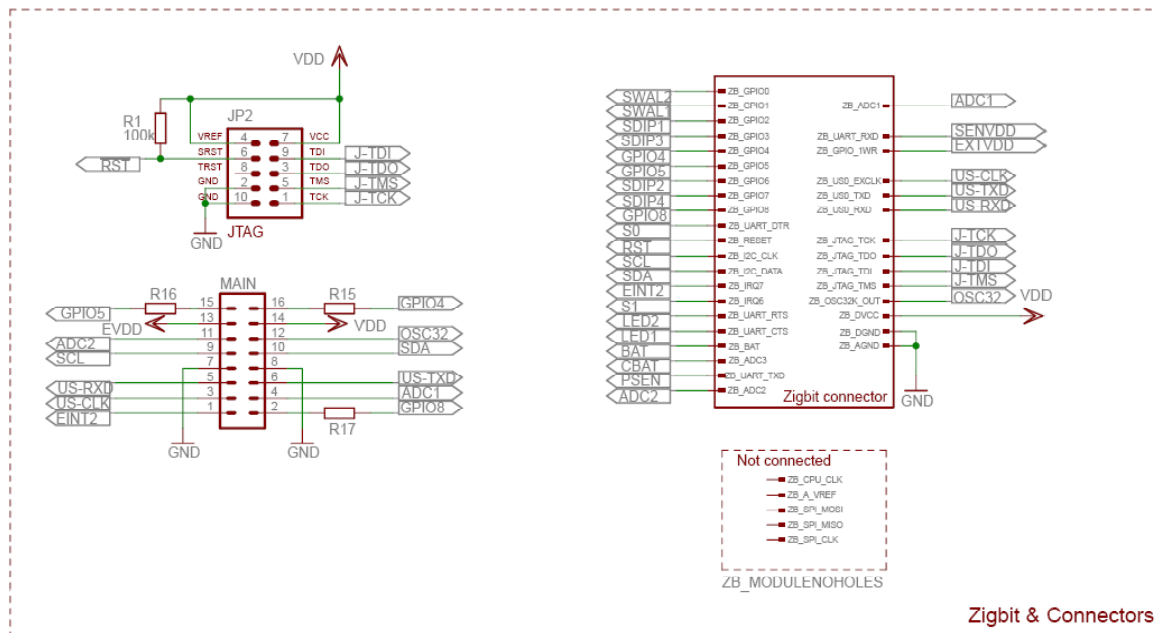
OBR. 41 SCHÉMA SENZORICKEJ DOSKY : PERIFÉRIE

Zigbit a konektory (Obr. 42)

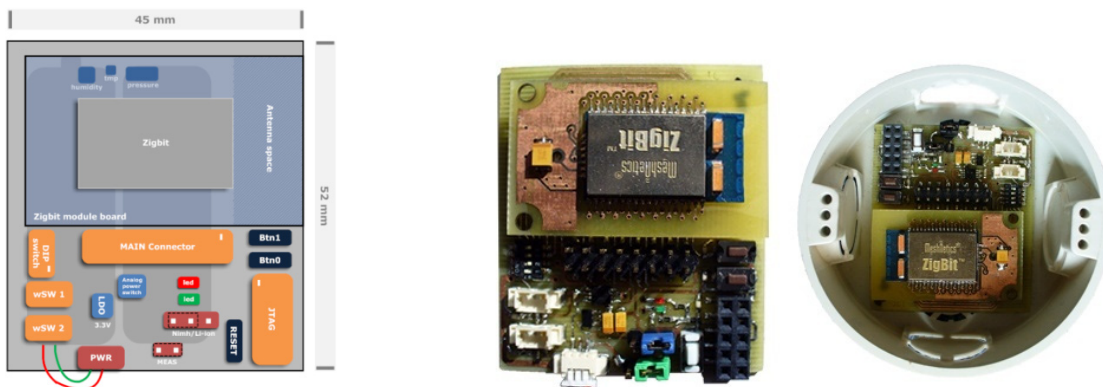
Na JTAG konektor je možné pripojiť JTAG rozhranie programátora, ktorý vykonáva všetky potrebné operácie (upload/download firmvéru do Flash pamäte, EEPROM, nastavenie lock bitov, poistiek a krokovanie programu) s mikrokontrolérom Atmega1281. V prípade, že firmvér je odladený, je možné pomocou poistiek vyradiť JTAG rozhranie a tieto piny ďalej ľubovoľne využívať. Update firmvéru je potom možné vykonávať prostredníctvom bootloderu. Na internete je dostupných viacero opensource bootloderov pre mikrokontroléry AVR.

MAIN konektor obsahuje vyvedené dve GPIO linky, dva A/D kanály (prevodník pracuje na princípe postupnej aproximácie, využíva sa napäťová referencia integrovaná v MCU), I²C zbernica, USART0 / SPI zbernica v master móde, pomalý oscilátor 32.768 kHz, externé prerušenie. Všetky tieto piny je možné využiť aj ako GPIO piny. Na konektore je vyvedené ďalej napájanie VDD a odpájatelné napájanie EVDD (vhodné pre externé senzory bez úsporného módu). Kompletná schéma senzorickej dosky a DPS je uvedená v prílohe č. 2, 3.

Doska plošných spojov pre hardvérovú platformu, bola navrhnutá tak, aby sa táto platforma dala umiestniť do štandardnej inštaláčnej krabice (viď Obr. 43). Všetky použité súčiastky sú výhradne vo forme SMD (surface mount device). Je to z dôvodu, aby zo spodnej časti mohol byť upevnený ľubovoľný akumulátor.



OBR. 42 SCHÉMA SENZORICKEJ DOSKY : ZIGBIT A KONEKTORY

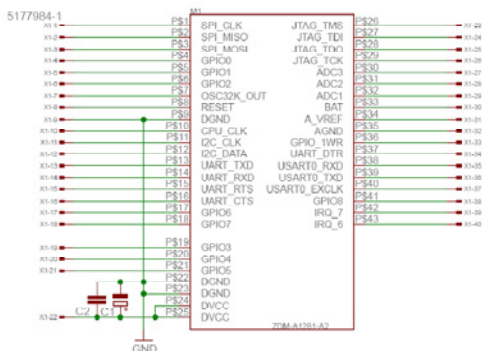


OBR. 43 VĽAVO NÁKRES SENZORICKEJ DOSKY, VPRAVO OSADENÁ HW PLATFORMA

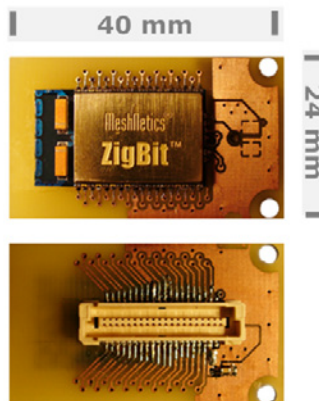
Pre účely nabíjania Li-ion článkov a komunikačného pripojenia hardvérovej platformy k usb portu počítača bola vytvorená špecializovaná doska. Schéma a DPS je uvedená v prílohe č. 4.

4.5.2 RÁDIOVÁ DOSKA S ZIGBIT MODULOM ATZB 24-A2

Modul ATZB-24-A2 obsahuje integrovanú dual čipovú anténu, z toho dôvodu odpadá náročný proces návrhu antény a impedančného prispôsobenia. Zapojenie rádiovkej dosky je na Obr. 45 , realizácia na Obr. 44 a návrh v literatúre [36].



OBR. 45 SCHÉMA RÁDIOVEJ DOSKY



OBR. 44 RÁDIOVÁ DOSKA, REALIZÁCIA

4.5.3 SPOTREBA HARDVÉROVEJ PLATFORMY

V Tab. 10 je uvedený odhad spotreby hardvérovej platformy. Do odhadu je zahrnutý hardvér platformy, ktorý sa významne podieľa na celkovej spotrebe. Najväčší podiel na spotrebe má rádiový modul a mikrokontrolér. Tento výpočet je platný za nasledujúcich podmienok: Napájanie je z Li-ion akumulátora. Napätie Li-ion akumulátora je stabilizované (LDO TPS780) na 3.3V. Potom je potrebné k celkovej spotrebe uvedenej v Tab. 10, pripočítať stratu na stabilizátore, ktorá je vyčísliteľná nasledovne :

$$P = (V_{in} - V_{out}) * I_{out} \quad [W] \quad (1.6)$$

kde P je stratový výkon LDO, V_{out} je pevne nastavené na 3.3V, V_{in} klesajúce napätie na Li-ion článku (vid' Obr. 32) a I_{out} je odoberaný prúd. Ako taktovací signál mikrokontroléru je použitý interný RC oscilátor s kmitočtom 8MHz. Integrovaný Watchdog (dohliadací obvod), tlačítka, DIP prepínač a led diódy sú odpojené.

TAB. 10 ODHAD SPOTREBY HARDVÉROVEJ PLATFORMY NA ZÁKLADE INFORMÁCIÍ Z KATALÓGOVÝCH LISTOV

	zber dát [mA]	vysielanie [mA]	príjem [mA]	úsporný režim 1, power-down[uA]	úsporný režim 2, power-save [uA]
Atmega1281 [20]	7	7	7	0,3	2,5
rádio TX [27]	0	17*	0	0,02	0,02
rádio RX [27]	0	0	16		
senzor teploty [18]	0,01	0	0	0	0
senzor vlhkosti [17]	0,3	0	0	0	0
senzor tlaku [16]	0,06	0	0	0	0
MAX4741 a 4730 [49][50]	0	0	0	0,2	0,2
spolu	7,37 mA	24 mA	23 mA	0,52 uA	2,72 uA

* Pri maximálnom vysielačom výkone 3dBm (2mW)

** Okrem zberu dát sú senzory odpojené od napájania, SVDD

Atmega1281 disponuje väčším počtom periférií. Spotreba týchto periférií je zanedbateľná pri aktívnom režime. Naopak, v úspornom režime je spotreba týchto periférií významná, viac informácií je na str. 393, v katalógovom liste [20]. Mikrokontrolér je schopný operovať v šiestich úsporných módoch (Obr. 46). To umožňuje

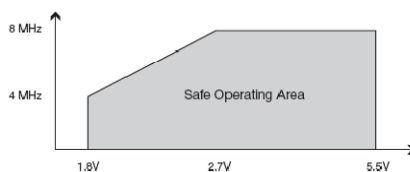
detailnejšie vyladenie spotreby podľa aplikačných potrieb. V Tab. 10 sú uvedené dva úsporné módy. Power-down je režim s najnižšou spotrebou, mikrokontrolér sa môže z neho dostať do aktívneho režimu iba externým prerušením, watchdog resetom a prerušením na I²C zbernici. V Power-save móde môže navyše bežať nízko kmitočtový oscilátor, ktorý umožňuje prebrať mikrokontrolér v pravidelných časových intervaloch.

Sleep Mode	Active Clock Domains					Oscillators			Wake-up Sources					
	clk_cpu	clk_periph	clk_io	clk_uart	clk_ser	Main Clock Source Enabled	Timer Osc Enabled	INT7:0 and Pin Change	TWI Address Match	Timer2	SPM/EEPROM Ready	ADC	WDT Interrupt	Other I/O
Idle		X	X	X	X	X	X ⁽²⁾	X	X	X	X	X	X	X
ADCNRM				X	X	X	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	X	X ⁽²⁾	X	X	X	X
Power-down								X ⁽²⁾	X				X	
Power-save					X		X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	X	X			X	
Standby ⁽¹⁾						X		X ⁽²⁾	X				X	
Extended Standby					X ⁽²⁾	X	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	X	X			X	

Notes: 1. Only recommended with external crystal or resonator selected as clock source.
2. If Timer/Counter2 is running in asynchronous mode.
3. For INT7:4, only level interrupt.

OBR. 46 ÚSPORNÉ REŽIMY ATMEGA1281, PREVZATÉ Z [20](STR.52).

Pri napájaní z NiMH/NiCD článkov je spotreba ešte nižšia ako uvádza Tab. 10. Stabilizátor TPS780 sa nepoužíva a jeho kludová spotreba je iba 500nA. Mikrokontrolér však musí bežať na kmitočte ≤ 4 MHz., kvôli nízkemu vstupnému napätiu z akumulátorov.



OBR. 47 ATMEGA1281, MAX. KMITOČET VS. NAPÁJACIE NAPÄTIE, PREVZATÉ Z [20] (STR.372)

Ako bolo spomenuté vyššie, v úspornom režime je významná aj spotreba tých obvodov, ktorých spotrebu v aktívnom režime môžeme zanedbať. Nasleduje zoznam krokov, ktorými môžeme minimalizovať výslednú spotrebu v úspornom režime:

- **Mikrokontrolér Atmega1281**
Deaktivovať poistku OCDEN – táto poistka umožňuje debugovanie priamo na čipe, spotreba až 1mA
Odpojiť integrované pullup rezistory (MCUCR register)
Deaktivovať detektor poklesu napätia (Brownout detector)
Deaktivovať dohliadač obvodu (Watchdog)
Odpojiť napájanie periférií registre PRR0, PRR1 (PRR-Power Reduction Register)
- **Napájanie**
Ak je to možné, napájať dosku z NiMH akumulátorov (minimálna strata na LDO)
Odpojiť napájanie senzorov SENVDD a delič napätia CBAT
Definovať implicitnú úroveň pre vstupy MAX4741, MAX4730

Redukcia celkovej spotreby, teda aj v aktívnom režime, je sofistikovaný problém. Je nutné sklbiť inteligentné plánovanie zberu dát zo senzorov s vhodnou voľbou úsporného módu. Zariadenia musia byť v aktívnom režime čo najkratšiu dobu, preto smerovací protokol a topológia siete sú ďalšími z kľúčových hľadísk pri znižovaní spotreby. Nie je jedno, či zariadenie vysiela s maximálnym výkonom a dosiahne na adresáta priamo alebo zníži výkon a dáta pošle cez viacero uzlov. Celkovo, problém efektívnej bezdrôtovej senzorickej siete je značne obsiahly. Je to balansovanie medzi primeranou zložitou, hardvérovými možnosťami a výslednou spotrebou. V tomto smere prebieha intenzívny výskum, ktorý zahŕňa nové hardvérové a softvérové prístupy, špecializované operačné systémy atď. Vhodným zdrojom pre získania povedomia a prehľadu o tejto problematike je on-line technická knižnica ieeexplore.ieee.org.

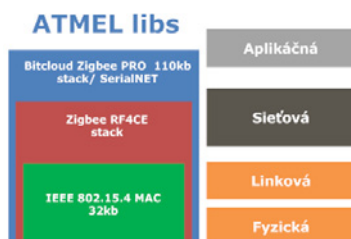
Reálna spotreba : Keďže navrhnutá platforma využíva moduly Zigbit, bez porušenia modulu nie je možné odmerať samostatne spotrebu mikrokontroléru Atmega1281 a rádiového modulu AT86RF230. Z tohto dôvodu bola spotreba odmeraná spoločne pre celú platformu, viď Tab. 11. Spotreba mikrokontroléru je značne závislá od toho, aký výpočet vykonáva a ktoré periférie používa. Spotreba aktívnej hardvérovej platformy bola teda zvolená ako špičková hodnota pri skenovaní siete, kedy je aktívny mikrokontrolér a rádiový modul vyšle krátky paket (beacon request) a následne sa prepne do prijímacieho režimu. Spotreba v úspornom režime nebola presne zmeraná, pretože v čase písania diplomovej práce neboli dostupné všetky obvody, ktoré majú na túto spotrebu vplyv. Z približných meraní je možné očakávať reálnu spotrebu v úsporných režimoch 1-6 uA.

TAB. 11 REÁLNA SPOTREBA, $U_{cc}= 2.52V$

	$F_{osc} = 8 \text{ MHz}$	$F_{osc} = 4 \text{ MHz}$
MCU aktívne	7,9 mA	5,3 mA
MCU, RX+TX (3dBm)	20,8 mA	18,3 mA

5 VÝVOJOVÉ NÁSTROJE PRE ZIGBIT MODULY

Spoločnosť Atmel poskytuje bezplatne bohatú softvérovú výbavu pre ZigBit moduly a mikrokontroléry. Základným nástrojom pre vývoj na procesoroch AVR je AVR Studio [22] spolu s toolchainom (kolekcia nástrojov) WinAVR [23]. Softvér je možné písať v assembléri prípadne jazyku C. Architektúra mikrokontrolérov AVR je priamo optimalizovaná pre jazyky vyššej úrovne a teda písať v jazyku symbolických inštrukcií nie je nutné. Samozrejme tam kde je nutný maximálny výkon, je vhodné napísať rutinu v assembléri. Problematika IEEE 802.15.4 a Zigbee je však relatívne obsiahla a naprogramovať stack je časovo náročný proces. Atmel poskytuje priamu podporu týchto štandardov prostredníctvom softvérových knižníc (Obr. 48), ktoré sú napísané v jazyku C. Mikrokontroléry AVR je možné programovať pomocou rozhrania ISP (In System Programming) alebo cez UART (sériový port / usb) prostredníctvom bootloaderu. Debugovanie priamo na čipe a upload firmvéru umožňuje rozhranie JTAG (Joint Test Action Group).



OBR. 48 SOFTVÉROVÉ KNIŽNICE, ATMEL

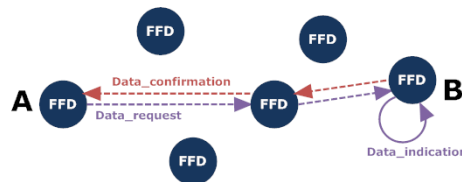
Prehľad dostupných knižníc od spoločnosti ATMEL :

- **IEEE 802.15.4 MAC** – implementácia fyzickej a linkovej vrstvy, štandard IEEE 802.15.4, opensource
Táto knižnica môže výrazne znížiť vývojový čas v prípade vlastnej implementácie protokolu nad štandardom 802.15.4. Knižnica obsahuje veľa príkladov pre rôzne platformy, takže môže slúžiť aj ako výukový nástroj.
- **Zigbee RF4CE** – implementácia modifikácie Zigbee štandardu pre jednoduché zariadenia ako sú diaľkové ovládače spotrebnej elektroniky
- **Bitcloud** – implementácia Zigbee PRO štandardu, je zdarma a čiastočne opensource
Bitcloud je základným stavebným kameňom pri implementácii Zigbee na mikrokontroléroch a RF moduloch ATMEL. Bitcloud samotný obsahuje iba povinný základ Zigbee PRO štandardu. Nie je implementovaná základná skupina clustrov (Zigbee Cluster Library) ani žiadny z verejne dostupných aplikačných profilov. Na jednej strane to znižuje výslednú veľkosť kódu, na strane druhej ak aplikačný vývojár potrebuje spomínanú funkcionality, musí ju implementovať sám.
- **SerialNET** – nadstavba Bitcloud stacku, ktorá umožňuje ovládať sieťový uzol pomocou AT príkazov

Ovládanie uzlu wsn siete AT príkazmi je jednoduché a môže byť použité napríklad pri testovaní. Pri reálnom nasadení uzlov s nízkou spotrebou takéto riadenie výhodné nie je, pretože je nutný nadbytočný hardvér, ktorý AT príkazy generuje a spracováva výsledky.

5.1 PROGRAMOVANIE V ZIGBEE

Štandard Zigbee nedefinuje API (programové rozhranie) pre konkrétny programovací jazyk. Oproti tomu definuje presné názvoslovie primitív a konštánt. To vedie k tomu, že prechod od Zigbee stacku jedného výrobcu k inému by malo byť teoreticky bezproblémové. Pre názornú ukážku je uvedený príklad odoslania dát z uzlu A do B za použitia Bitcloud Zigbee stacku. Celú situáciu ilustruje Obr. 49.



OBR. 49 PRENOS DÁT V ZIGBEE

- Uzol A má dáta určené pre zariadenie B. Uzol A zavolá funkciu definovanú v Zigbee : **APS_DataReq(APS_DataReq_t *req).**

APS_DataReq_t je štruktúra obsahujúca dáta a ďalšie potrebné parametre :

```
typedef struct
{
    // typ adresácie NWK, MAC, binding
    APS_AddrMode_t dstAddrMode;
    // adresa uzlu B
    APS_Address_t dstAddress;
    // endpoint uzlu B (obdoba aplikačného portu v TCP)
    Endpoint_t dstEndpoint;
    // aplikačný profil
    ProfileId_t profileId;
    // id clustru
    ClusterId_t clusterId;
    // zdrojový endpoint
    Endpoint_t srcEndpoint;
    // dĺžka dátového bufferu
    uint16_t asduLength;
    // pointer na dátový buffer
    uint8_t *asdu;
    // security, ACK, fragmentácia
    APS_TxOptions_t txOptions;
    // max. počet hopov (obdoba TTL v TCP)
    uint8_t radius;
    //Callback and Confirm
    void (*APS_DataConf)(APS_DataConf_t *conf);
    APS_DataConf_t confirm;
} APS_DataReq_t;
```

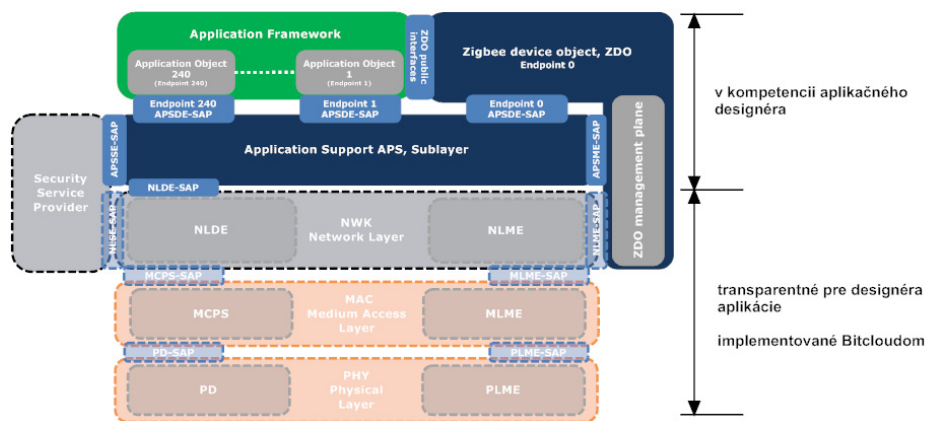
- Po určitom čase resp. asynchrónne sa vyvolá v uzle A udalosť **Data_Confirmation**, ktorá nesie informáciu o doručení dát do bodu B. Keďže vopred nie je jasné, kedy sa táto udalosť vykoná, rieši sa tento problém prostredníctvom callback funkcie. Programátor si zdefinuje vlastnú funkciu, v ktorej si zdefinuje ďalšie správanie po vyvolaní Data_Confirmation. Odkaz na túto funkciu sa predá prostredníctvom ukazateľa (pointer na funkciu) v štruktúre **APS_DataReq_t**.

Pozn.: Mechanizmus callback funkcií umožňuje vyhnúť sa neprehľadne vetvenému programu a programovaciemu štýlu dotazov v slučke. Na pozadí sú callback funkcie vyvolávané prerušením časovača, prípadne externých prerušení z rádiového modulu a periférií. Princíp callback funkcie sa využíva napr. aj pri programovaní grafického rozhrania v operačnom systéme Windows / Linux.

- V uzle B sa po obdržaní dát vyvolá callback funkcia Data_Indication.

5.2 BITCLOUD - ZIGBEE PRO STACK

Pre programovanie popisovanej hardvérovej platformy je vhodné použiť Bitcloud stack [24]. Bitcloud je implementácia Zigbee PRO štandardu. Samotné ovládanie uzlu v Zigbee sieti prebieha pomocou funkcií z aplikačnej podvrstvy (APS) a ZDO (Zigbee device object, aplikačný objekt). Návrátové hodnoty volaných funkcií sú buď získané asynchrónne prostredníctvom callback funkcií, prípadne dotazovaním. Z pohľadu aplikačného designéra je vďaka Bitcloudu transparentná fyzická, linková a sieťová vrstva. To znamená, že pre odoslanie dát z bodu A a do bodu B, aplikačný designér nemusí riešiť ovládanie rádiového modulu, vytvorenie komunikačnej trasy prípadne výpadok niektorého z uzlov na tejto trase. Tieto veci robí na pozadí Bitcloud. Na jednej strane je to výhoda v značnom zjednodušení pri programovaní aplikačnej konektivity, na strane druhej má aplikačný designér v určitom zmysle zviazané ruky, ak chce ovládať alebo modifikovať dianie aj na nižších vrstvách.



OBR. 50 BITCLOUD Z POHLADU IMPLEMENTÁCIE ZIGBEE

Bitcloud poskytuje primitívy uvedené v nižšie. Význam niektorých primitív je jasný v súvislosti s predchádzajúcim výkladom štandardov IEEE 802.15.4 a Zigbee. Pre úplný prehľad je dobré nahliadnuť do dokumentácie k Bitcloudu [24] :

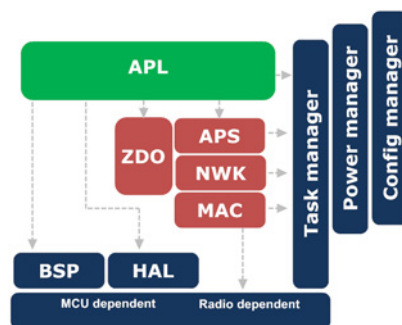
<p>APS vrstva :</p> <ul style="list-style-type: none"> APS_BindReq APS_UnbindReq APS_GetReq APS_SetReq APS_RegisterEndpointReq APS_UnregisterEndpointReq APS_GetEndpointList APS_StopEndpointIndication APS_ResumeEndpointIndication APS_DataReq APS_AddGroupReq APS_RemoveGroupReq APS_RemoveAllGroupsReq APS_IsOwnGroup APS_CalculateTimes APS_ResetKeyPairSet 	<p>Zigbee Device Object :</p> <ul style="list-style-type: none"> ZDO_StartNetworkReq ZDO_ResetNetworkReq ZDO_MgmtNwkUpdateNotf ZDO_SleepReq ZDO_SleepInd ZDO_WakeUpInd ZDO_WakeUpReq ZDO_ZdpReq ZDO_GetLqiRssi ZDO_GetParentAddr ZDO_GetChildrenAddr ZDO_SetTxPowerReq ZDO_GetNwkStatus ZDO_GetNeibAmount ZDO_GetNeibTable ZDO_StartSyncReq ZDO_StopSyncReq ZDO_BindIndication
--	--

Architektúra Bitcloudu :

Bitcloud z pohľadu zdrojového kódu je dômyselne navrhnutý adresárový strom, kde každá vetva reprezentuje jednu vrstvu na Obr. 51. V každej vetve stromu sú umiestené zdrojové, hlavičkové súbory a makefile, prípadne konfiguračný súbor. Takýto návrh výrazne zvyšuje univerzálnosť a rozšíriteľnosť celého stacku.

Vrstvy Bitcloudu :

- **Aplikačné objekty** definované užívateľom
- **ZDO, APS, NWK a MAC** implementácia Zigbee, tieto vrstvy tvoria jadro Bitcloudu
- **BSP (Board Support Package)** definuje hardvérovú platformu (ovládače senzorov, tlačidlá, DIP switche)
- **HAL (Hardware abstraction layer)** je sada nízkoúrovňových ovládačov, ktoré obsluhujú mikrokontrolér (časovače, watchdog, úsporné režimy) a jeho periférie (I2C, USART, IRQ, SPI). Rádiový modul je riadený pomocou rozhrania SPI.
- **Task manager** je jednoduchý preemtívny plánovač úloh, jednotlivé úlohy sú obsluhované podľa priority. Viac o konceptoch jednoduchých operačných systémov pre embedded systémy je v [52].
- **Power manager** je sada volaní pre využívanie úsporných režimov
- **Config manager** je sada funkcií pre nastavenie parametrov (vysielač výkon, veľkosť routovacej tabuľky atď.) sieťového uzlu. Dáta sa voliteľne môžu ukladať do non-volatilej pamäti (EEPROM) mikrokontroléru. Takže tieto nastavenia zostávajú uchované aj po odpojení napájania



OBR. 51 BITCLOUD ARCHITEKTÚRA

5.3 PORTOVANIE BITCLOUDU PRE NAVRHNUTÚ HARVÉROVÚ PLATFORMU MININODE

Dôvod portovania hardvérovej platformy je možnosť plne využívať Zigbee stack z aplikáčnej vrstvy. Potom programátor aplikácie môže využívať komfortné volania Bitcloudu typu : zapni led, načítaj teplotu bez ďalšej znalosti hardvéru. Ďalšou výhodou je kompatibilita so vzorovými aplikáciami, čo je výhodné pre výukové účely. Pridanie hardvérovej platformy je popisované pre verziu **BitCloud_ZIGBIT_1_8_0** dostupnú na stránkach spoločnosti Atmel [24]. Keďže kvôli implementácii je nutné platformu pomenovať, bol zvolený názov **Mininode**. Portovanie vychádza z implementácie platformy Meshbean[35], ktorá slúžila ako vzor a je súčasťou BSP vrstvy Bitcloudu. Bitcloud podporuje dva vývojové nástroje WinAVR (avr-gcc) a IAR workbench. Port platformy je platný pre prvý menovaný produkt.

Po stiahnutí a dekomprimovaní stacku vznikne nasledujúca adresárová štruktúra :

\ BitCloud_ZIGBIT_1_8_0 :

\Bitcloud – samotný stack

\Bootloader – bootloader : hex subor pre Atmega1281 a aplikácia pre PC (Windows)

Ukážka modifikácie zdrojového súboru halInit.c (BitCloud_ZIGBIT_1_8_0\BitCloud\Components\HAL\avr\atmega1281\common\src\)

```
// halInit.c pôvodný

void HAL_Init(void)
{
    /* Init first diagnostic timer */
#ifdef MEASURE
    TCCR5B = (1 << CS50);
#endif

    HAL_InitRfSpi();
    /* start sleep time */
    halStartSleepTimerClock();
    /* initialization work frequency &
     * start calibration */
    halInitFreq();
    /* initialization and start application timer
     */
    halInitAppClock();
    /* initialization dtr interrupt */
    halSetIrqConfig(IRQ_4, IRQ_LOW_LEVEL);
    /* global enable interrupt*/
    HAL_EnableInterrupts();
}

```

```
// halInit.c upravený pre platformu Mininode

void HAL_Init(void)
{
    /* Init first diagnostic timer */
#ifdef MEASURE
    TCCR5B = (1 << CS50);
#endif

    HAL_InitRfSpi();
    /* start sleep time */
    halStartSleepTimerClock();
    /* initialization work frequency &
     * start calibration */
    halInitFreq();
    /* initialization and start application timer
     */
    halInitAppClock();
#ifdef BOARD_MININODE
    /* switch off power of sensors, SVDD */
    GPIO_USART1_RXD_make_out();
    GPIO_USART1_RXD_clr();
    /* switch off external power, EXTVDD */
    GPIO_LWR_make_out();
    GPIO_LWR_clr();
    /* switch off BAT voltage divider */
    GPIO_ADC_INPUT_3_make_out();
    GPIO_ADC_INPUT_3_clr();
#else
    /* Mininode board do NOT use USART1 */
    /* initialization dtr interrupt */
    halSetIrqConfig(IRQ_4, IRQ_LOW_LEVEL);
#endif
}

```

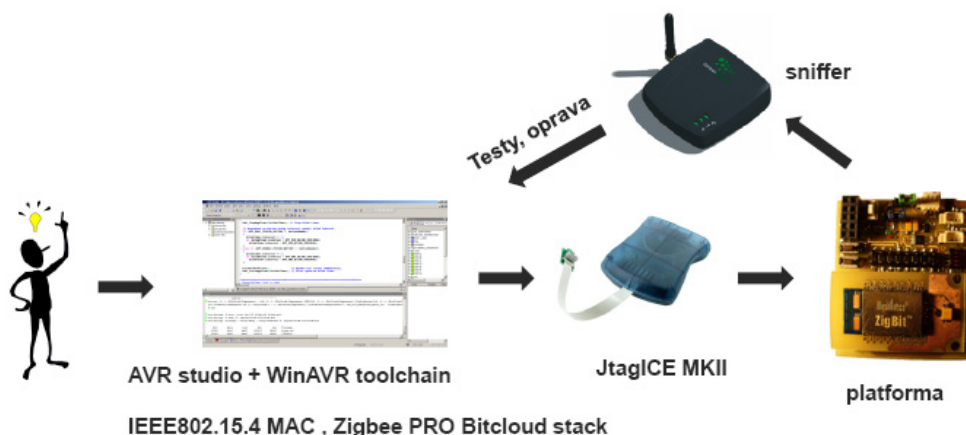
Podobných úprav je v HAL vrstve viacero. Ďalšie úpravy sa dotýkajú spracovania prerušení a USART kanálov.

Pre úplnosť treba zmieniť fakt, že implicitné nastavenie makefilov je také, že na rozdiel od BSP vrstvy, ktorá sa kompiluje spoločne s vytvorenou aplikáciou, **HAL vrstva sa kompiluje separátne** a výstupný binárny súbor sa prilinkuje k aplikácii. To znamená že po každej úprave zdrojového kódu HAL vrstvy prípadne jej konfigurácie treba spustiť Makefile náležiaci tejto vrstve ! (BitCloud_ZIGBIT_1_8_0\BitCloud\Components\HAL\Makefile)

5.4 VÝVOJOVÝ CYKLUS A POUŽITÉ NÁSTROJE

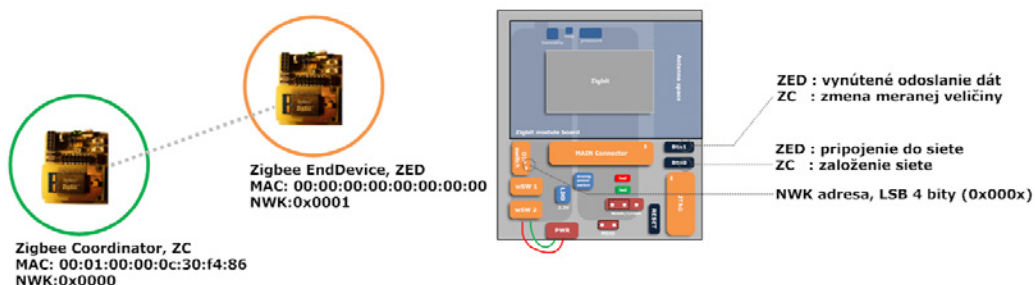
Pre vývoj softvéru pre hardvérovú platformu a následnú kontrolu boli použité nasledujúce nástroje :

- AVR studio + WinAVR – programovanie mikrokontrolérov AVR (Zigbit modul)
- JtagICE MKII – programátor a debugger mikrokontrolérov AVR
- Daintree Sensor Network Analyser + 2400E sensor network adapter – analýza siete



OBR. 53 VÝVOJOVÝ CYKLUS

6 DEMONŠTRAČNÁ APLIKÁCIA



OBR. 54 DEMONŠTRAČNÝ PRÍKLAD JEDNODUCHEJ ZIGBEE SIETE, VĽAVO TOPOLOGIA, VPRAVO OBSLUHA HARDVÉRU

Pre jednoduchú demonštráciu Zigbee technológie a senzorickej platformy je uvedený príklad Zigbee siete vid' Obr. 54. WSN sieť je maximálne zjednodušená a pre prehľadnosť sa nevyužíva smerovanie resp. všetky zariadenia v sieti sú vo vzájomnom dosahu. Sieť pozostáva z dvoch zariadení, Zigbee koordinátora (ZC) a Zigbee koncového zariadenia (ZED).

Proces zostavenie siete a výmenu dát presne popisuje odchytená komunikácia :

num	chn	Time	Time Delta	seq num	MAC Src	MAC Dest	NWK Src	NWK Dest	Protocol	Packet Type
1	15	10:43:24.640		0		Broadcast (0xffff)			IEEE 802.15.4	Command: Beacon Request
2	15	10:43:39.644	+00:00:15.004	1	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0000	0xffff	ZigBee NWK	NWK Command: Link Status
3	15	10:43:54.773	+00:00:15.129	2	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0000	0xffff	ZigBee NWK	NWK Command: Link Status
4	15	10:44:09.897	+00:00:15.124	3	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0000	0xffff	ZigBee NWK	NWK Command: Link Status
5	15	10:44:25.019	+00:00:15.122	4	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0000	0xffff	ZigBee NWK	NWK Command: Link Status
6	15	10:44:40.059	+00:00:15.040	5	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0000	0xffff	ZigBee NWK	NWK Command: Link Status
7	15	10:44:55.098	+00:00:15.039	6	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0000	0xffff	ZigBee NWK	NWK Command: Link Status
8	15	10:45:04.312	+00:00:09.214	0		Broadcast (0xffff)			IEEE 802.15.4	Command: Beacon Request
9	15	10:45:04.315	+00:00:00.004	0	0x0000				ZigBee NWK	Beacon: B0: 15, S0: 15, PC: 1, AP: 1
10	15	10:45:04.819	+00:00:00.503	1	0x0001	0x0000	0x0001	0x0000	ZigBee NWK	NWK Command: Rejoin Request
11	15	10:45:04.820	+00:00:00.001	1					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
12	15	10:45:05.314	+00:00:00.494	2	0x0001	0x0000			IEEE 802.15.4	Command: Data Request
13	15	10:45:05.315	+00:00:00.001	2					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
14	15	10:45:05.317	+00:00:00.003	7	0x0000	0x0001	0x0000	0x0001	ZigBee NWK	NWK Command: Rejoin Response
15	15	10:45:05.319	+00:00:00.002	7					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
16	15	10:45:05.323	+00:00:00.003	3	0x0001	0x0000	0x0001	0xffff	ZigBee ZDP	ZDP: EndDeviceAnnce
17	15	10:45:05.324	+00:00:00.002	3					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
18	15	10:45:05.326	+00:00:00.002	4	0x0001	0x0000			IEEE 802.15.4	Command: Data Request
19	15	10:45:05.327	+00:00:00.001	4					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
20	15	10:45:05.365	+00:00:00.038	5	0x0001	0x0000	0x0001	0x0000	ZigBee APS	0x0001: 0x0001
21	15	10:45:05.366	+00:00:00.001	5					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
22	15	10:45:05.399	+00:00:00.033	8	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0001	0xffff	ZigBee ZDP	ZDP: EndDeviceAnnce
23	15	10:45:05.479	+00:00:00.080	9	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0001	0xffff	ZigBee ZDP	ZDP: EndDeviceAnnce
24	15	10:45:05.559	+00:00:00.080	10	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0001	0xffff	ZigBee ZDP	ZDP: EndDeviceAnnce
25	15	10:45:06.361	+00:00:00.803	6	0x0001	0x0000			IEEE 802.15.4	Command: Data Request
26	15	10:45:06.362	+00:00:00.001	6					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
27	15	10:45:06.365	+00:00:00.003	11	0x0000	0x0001	0x0000	0x0001	ZigBee APS	APS Acknowledgment: 0x0001: 0x0001
28	15	10:45:06.366	+00:00:00.001	11					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
29	15	10:45:06.368	+00:00:00.002	7	0x0001	0x0000			IEEE 802.15.4	Command: Data Request
30	15	10:45:06.369	+00:00:00.001	7					IEEE 802.15.4	Acknowledgment
31	15	10:45:10.217	+00:00:03.848	12	0x0000	Broadcast (0xffff)	0x0000	0xffff	ZigBee NWK	NWK Command: Link Status

OBR. 55 KOMUNIKÁCIA "OVER-THE-AIR" NA KANÁLE Č.15 (2425MHZ), DAIN TREE SENSOR NETWORK ANALYSER

Zapuzdrenie rámcov : [Zigbee ZDP] -> [Zigbee APS] -> [Zigbee NWK] -> [IEEE 802.15.4]-> rádiový prenos

- Po stlačení tlačidla 0 na ZC, Zigbee koordinátor (NWK 0x0000) vykoná aktívne skenovanie na definovaných kanáloch. V tomto prípade je definovaný iba kanál č.15. Situáciu znázorňuje obrázok vyššie. Zariadenie odošle všesmerovo Beacon request, **rámec č.1**. Voľby, ktoré obsahuje Beacon request sú podrobne popísané a ich význam je zrejмый z predchádzajúceho výkladu štandardu 802.15.4

```

Frame 1
IEEE 802.15.4
Frame Control: 0x0803
.... .011 = Frame Type: Command (0x03)
.... .0... = Security Enabled: Disabled (0x00)
.... .0... = Frame Pending: No data pending (0x00)
.... .0... = Acknowledgment Request: No ACK required (0x00)
.... .0... = PAN ID Compression: No PAN ID compression (0x00)
.... .00 0... = Reserved: 0x00
.... .10... = Destination Addressing Mode: Address field contains a 16-bit short address. (0x02)
.00... = Frame Version: IEEE Std 802.15.4-2003 (0x00)
00... = Source Addressing Mode: PAN identifier and address fields are not present. (0x00)
Sequence Number: 0
Destination PAN Identifier: Broadcast (0xffff)
Destination Address: Broadcast (0xffff)
Command Frame Identifier: Beacon Request (0x07)
FCS: 0xffff
Beacon request
    
```

- Zigbee koordinátor prijme odpovede od koordinátorov v jeho dosahu. Ako je vidieť z Obr. 55, na Beacon request neodpovedalo žiadne zariadenie, pretože v dosahu nie je žiadna sieť. Zigbee koordinátor preto môže zvoliť náhodné PAN ID (0x3A11). Na modro vyznačených **rámcoch s číslom 2-7,14,31** je vidieť ako ZC informuje najbližšie (radius: 1) zigbee smerovače o svojej prítomnosti pomocou NWK rámcu Linkstatus. Je treba si uvedomiť, že na linkovej vrstve sú tieto rámce adresované všetkým zariadeniam v dosahu (broadcast pre všetkých, 0xFFFF). Na sieťovej vrstve však tieto rámce spracujú a preposielajú iba zariadenia ZC a ZR (broadcast pre routu, 0xFFFC). Z rozboru rámcu nižšie je vidieť, že táto zigbee sieť nepoužíva šifrovanie a používa skrátené adresovanie. Link status rámce sa vysielajú v pravidelných 15 sekundových intervaloch.

Frame 2 (Length = 29 octets)

IEEE 802.15.4

Frame Control: 0x8841

```

.....001 = Frame Type: Data (0x01)
.....0... = Security Enabled: Disabled (0x00)
.....0... = Frame Pending: No data pending (0x00)
.....0. .... = Acknowledgment Request: No ACK required (0x00)
.....1... = PAN ID Compression: PAN ID compression (0x01)
.....00 0... = Reserved: 0x00
....10.. .... = Destination Addressing Mode: 16-bit short address. (0x02)
..00 ..... = Frame Version: IEEE Std 802.15.4-2003 (0x00)
10.. ..... = Source Addressing Mode: 16-bit short address. (0x02)

```

Sequence Number: 1

Destination PAN Identifier: 0x3a11

Destination Address: Broadcast (0xffff)

Source Address: 0x0000

FCS: 0xffff

ZigBee NWK

Frame Control: 0x1009

```

.....01 = Frame Type: NWK Command (0x01)
....00 10.. = Protocol Version: ZigBee 2006/2007 (0x02)
....00.. .... = Discover Route: Suppress route discovery (0x00)
....0.0 ..... = Multicast Flag: Unicast or Broadcast (0x00)
....0. .... = Security: Disabled (0x00)
....0.. .... = Source Route: Not Present (0x00)
....0... .... = Destination IEEE Address: Not Included (0x00)
...1 ..... = Source IEEE Address: Included (0x01)
000. .... = Reserved: 0x00

```

Destination Address: 0xfffc

Source Address: 0x0000

Radius: 1

Sequence Number: 158

Source IEEE Address: 00:01:00:00:0c:30:f4:86

Command

Command Frame Identifier: Link Status (0x08)

- Po stisnutí tlačidla 0 na ZED, zariadenie aktívne skenuje zvolené kanály odoslaním Beacon request rámcu. V tomto demonštračnom príklade zariadenie skenuje iba kanál č.15, **rámec č.8**.
- ZC odpovie **rámcom č.9** a tak ZED obdrží informácie o sieti. Beacon order 15 znamená, že sa jedná o non-beaconenabled sieť. Informácie o verzii Zigbee stacku sú odoslané v NWK beacon rámcu.

Frame 9 (Length = 28 octets)

IEEE 802.15.4

Frame Control: 0x8000

```

.....000 = Frame Type: Beacon (0x00)
.....0... = Security Enabled: Disabled (0x00)
.....0... = Frame Pending: No data pending (0x00)
.....0. .... = Acknowledgment Request: No ACK required (0x00)
.....0... = PAN ID Compression: No PAN ID compression (0x00)
.....00 0... = Reserved: 0x00
....00.. .... = PAN identifier and address fields are not present. (0x00)
..00 ..... = Frame Version: IEEE Std 802.15.4-2003 (0x00)
10.. ..... = Source Addressing Mode: Address field contains a 16-bit short address. (0x02)

```

Sequence Number: 0

Source PAN Identifier: 0x3a11

Source Address: 0x0000

FCS: 0xffff

Beacon

Superframe Specification: 0xcfff

```

.....1111 = Beacon Order: 15
....1111 .... = Superframe Order: 15

```

```

.... 1111 .... = Final CAP Slot: 15
...0 .... = Battery Life Extension: Disabled (0)
..0. .... = Reserved: 0x00
.1. .... = PAN Coordinator: Device is PAN coordinator (1)
1... .... = Association Permit: Association permitted (1)
GTS Specification: 0x00
.... .000 = GTS Descriptor Count: 0x00
.000 0... = Reserved: 0x00
0... .... = GTS Permit: False (0x00)
Pending Address Specification: 0x00
.... .000 = Number of Short Addresses Pending: 0x00
.... 0... = Reserved: 0x00
.000 .... = Number of Extended Addresses Pending: 0x00
0... .... = Reserved: 0x00
ZigBee NWK Beacon
Protocol ID: ZigBee NWK (0x00)
Flags: 0x8022
.... .... 0010 = Stack Profile: 0x02
.... .... 0010 .... = nwkProtocolVersion: ZigBee 2006/2007 (0x02)
.... .000 .... = Reserved: 0x00
.... .0.. .... = Router Capacity: False (0)
.000 0... .... = Device Depth: 0x00
1... .... = End Device Capacity: True (1)
nwkExtendedPANId: aa:aa:aa:aa:aa:aa:aa:aa
Tx Offset: 0x00ffffff symbols
nwkUpdateId: 0x00

```

5. ZED sa podľa získaných informácií rozhodne či sa pripojí k danej sieti alebo nie. V prípade že sa chce pripojiť odošle v NWK Rejoin Request, **rámec č.10**. V tomto rámci sa nachádzajú informácie o zariadení: typ RFD, zariadenie nemá trvalé napájanie, rádiový modul nie je nepretržite v prijímacom režime atď. V kapitole 2.2.5.4 bol vysvetlený mechanizmus pripojenia zariadenie do siete príkazovým rámcem MLME-ASSOCIATE.request na linkovej vrstve. Zigbee však umožňuje aj pripojenie pomocou NWK rámcu RejoinRequest, ktorý je zabalený do dátového rámcu na linkovej vrstve. Takéto pripojenie umožňuje pripojenie bez autentifikácie pripájajúceho, keďže dáta na NWK vrstve môžu byť v Zigbee zašifrované.

```

Frame 10 (Length = 29 octets)
IEEE 802.15.4
  Frame Control: 0x8861
    .... .... 0001 = Frame Type: Data (0x01)
    .... .... 0... = Security Enabled: Disabled (0x00)
    .... .... .0 .... = Frame Pending: No data pending (0x00)
    .... .... .1. .... = Acknowledgment Request: ACK required (0x01)
    .... .... .1.. .... = PAN ID Compression: PAN ID compression (0x01)
    .... .00 0... .... = Reserved: 0x00
    .... 10.. .... = Destination Addressing Mode: Address field contains a 16-bit short address. (0x02)
    .00 .... .... = Frame Version: IEEE Std 802.15.4-2003 (0x00)
    10.. .... .... = Source Addressing Mode: Address field contains a 16-bit short address. (0x02)
  Sequence Number: 1
  Destination PAN Identifier: 0x3a11
  Destination Address: 0x0000
  Source Address: 0x0001
  FCS: 0xffff
ZigBee NWK
  Frame Control: 0x1009
    .... .... .01 = Frame Type: NWK Command (0x01)
    .... .... 00 10.. = Protocol Version: ZigBee 2006/2007 (0x02)
    .... .... 00.. .... = Discover Route: Suppress route discovery (0x00)
    .... .0 .... = Multicast Flag: Unicast or Broadcast (0x00)
    .... .0. .... = Security: Disabled (0x00)
    .... .0.. .... = Source Route: Not Present (0x00)
    .... 0... .... = Destination IEEE Address: Not Included (0x00)
    .... .1 .... = Source IEEE Address: Included (0x01)
    000. .... .... = Reserved: 0x00
  Destination Address: 0x0000
  Source Address: 0x0001
  Radius: 1
  Sequence Number: 143
  Source IEEE Address: 00:00:00:00:00:00:00:00
Command
  Command Frame Identifier: Rejoin Request (0x06)
Rejoin Request Command
  Capability Information: 0x80
    .... .0 = Alternate PAN Coordinator: False (0x00)

```

```

.... ..0. = Device Type: RFD (0x00)
.... ..0.. = Power Source: Not Mains Powered (0x00)
.... 0... = Receiver On When Idle: False (0x00)
..00 .... = Reserved: 0x00
.0... .... = Security: ZigBee - False, ZigBee Pro - Not capable of High Security operation (0x00)
1... .... = Allocate Address: True (0x01)

```

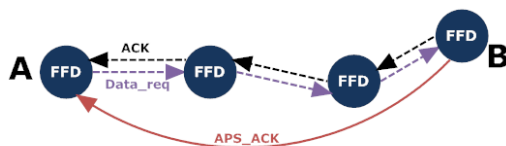
6. Potvrdenie ACK od ZC o prijatí Rejoin Request, **rámec č.11**. ACK rámec má dĺžku iba 5 bajtov. Krátka dĺžka rámcu je zvolená úmyselne, lebo sa vyskytuje v komunikácii veľmi často. Rámec však neobsahuje ani zdrojovú ani cieľovú adresu. Preto **prijímateľ v podstate nevie od koho potvrdzovací rámec prišiel** a či je vlastne určený jemu. Z tohto dôvodu sa pri všesmerovom vysielaní ACK potvrdenie nepoužíva vôbec. Pri vysielaní bod-bod musí prísť ACK do presne stanovenej doby. Identifikácia rámcu, ktorý sa potvrdzuje je daná sekvenčným číslom.

```

Frame 11 (Length = 5 octets)
IEEE 802.15.4
  Frame Control: 0x0002
    .... ..010 = Frame Type: Acknowledgment (0x02)
    .... ..0... = Security Enabled: Disabled (0x00)
    .... ..0... = Frame Pending: No data pending (0x00)
    .... ..0... = Acknowledgment Request: No ACK required (0x00)
    .... ..0... = PAN ID Compression: No PAN ID compression (0x00)
    .... ..000... = Reserved: 0x00
    .... 00... = Destination Addressing Mode: PAN identifier and address fields are not present. (0x00)
    ..00 .... = Frame Version: IEEE Std 802.15.4-2003 (0x00)
    00... .... = Source Addressing Mode: PAN identifier and address fields are not present. (0x00)
  Sequence Number: 1
  FCS: 0xffff
Acknowledgement

```

V IEEE 802.15.4 je ACK rámec voliteľný, v Zigbee je však ACK na Linkovej vrstve povinný a na aplikačnej podvrstve je ACK voliteľné.



IEEE 802.15.4 ACK - bod-bod , povinné v Zigbee
 Zigbee APS_ACK - zdroj-cieľ, voliteľné v Zigbee

OBR. 56 POTVRDENIE ACK

Pozn.: V rámci kvantifikovania rozdielu medzi ACK na linkovej a APS vrstve bol vykonaný test, v ktorom sa merala aplikačná priepustnosť siete bod-bod , pri maximálnej dĺžke dát 84B (nešifrovaný prenos, APS vrstva). Výsledky sú nasledovné : 86kbps bez ACK na APS vrstve, 56kbps s ACK na APS vrstve .

7. ZC odpovie ZED , pripojenie do siete, NWK Rejoin Response, **rámec č.14**.

```

Frame 14 (Length = 39 octets)
IEEE 802.15.4
  Frame Control: 0x8861
    .... ..001 = Frame Type: Data (0x01)
    .... ..0... = Security Enabled: Disabled (0x00)
    .... ..0... = Frame Pending: No data pending (0x00)
    .... ..1... = Acknowledgment Request: ACK required (0x01)
    .... ..1... = PAN ID Compression: PAN ID compression (0x01)
    .... ..000... = Reserved: 0x00
    .... 10... = Destination Addressing Mode 16-bit short address. (0x02)
    ..00 .... = Frame Version: IEEE Std 802.15.4-2003 (0x00)
    10... .... = Source Addressing Mode: 16-bit short address. (0x02)
  Sequence Number: 7
  Destination PAN Identifier: 0x3a11
  Destination Address: 0x0001
  Source Address: 0x0000
  FCS: 0xffff
ZigBee NWK
  Frame Control: 0x1809
    .... ..01 = Frame Type: NWK Command (0x01)
    .... ..00 10.. = Protocol Version: ZigBee 2006/2007 (0x02)
    .... ..00.. = Discover Route: Suppress route discovery (0x00)

```

```

.... ..0 .... = Multicast Flag: Unicast or Broadcast (0x00)
.... ..0. .... = Security: Disabled (0x00)
.... ..0.. .... = Source Route: Not Present (0x00)
.... ..1... .... = Destination IEEE Address: Included (0x01)
.... ..1 .... = Source IEEE Address: Included (0x01)
000. .... = Reserved: 0x00
Destination Address: 0x0001
Source Address: 0x0000
Radius: 1
Sequence Number: 164
Destination IEEE Address: 00:00:00:00:00:00:00
Source IEEE Address: 00:01:00:00:0c:30:f4:86
Command
Command Frame Identifier: Rejoin Response (0x07)
Rejoin Response Command
Network Address: 0x0001
Rejoin Status: Association successful. (0x00)

```

8. ZED po pripojení do siete informuje všetkých členov o svojom pripojení správou ZDO EndDevice Announce, **rámec č.16**. Keďže sa jedná o ZED, zariadenie nekomunikuje s ostatnými priamo ale prostredníctvom nadradeného koordinátora, v tomto prípade ZC. ZED teda pošle správu správu ZC a ten následne rozpošle ZDO EndDevice Announce ďalej do siete **rámce č. 22,23,24**. Radius 10 znamená odoslanie správy cez max. 10 smerovačov. Hodnota 10 je definovaná Zigbee stackom ako maximálna veľkosť siete. Správa sa posielá na endpoint 0, ktorý prináleží ZDO. Pod ZDO beží aplikačný profil ZDP (Profile ID 0x0000) a správa je identifikovaná clustrom (Cluster ID 0x0013). Pomocou týchto identifikátorov cieľové zariadenie vie, že sa jedná o správy, ktoré manažujú sieť, nie o správy aplikačného charakteru.

```

Frame 16 (Length = 39 octets)
IEEE 802.15.4
Frame Control: 0x8861
Sequence Number: 3
Destination PAN Identifier: 0x3a11
Destination Address: 0x0000
Source Address: 0x0001
FCS: 0xffff
ZigBee NWK
Frame Control: 0x0048
Destination Address: 0xffffd
Source Address: 0x0001
Radius: 10
Sequence Number: 144
ZigBee APS
Frame Control: 0x08
.... ..00 = Frame Type: APS Data (0x00)
.... ..10.. = Delivery Mode: Broadcast (0x02)
.... ..0 .... = Ack Format: Do not include destination endpoint, cluster identifier, profile identifier and
source endpoint in the acknowledgement (0x00)
.... ..0. .... = Security: Disabled (0x00)
.... ..0.. .... = Ack Request: Acknowledgement not required (0x00)
.... ..0... .... = Extended Header Present: Not present (0x00)
Destination Endpoint: ZDO (0)
Cluster Identifier: EndDeviceAnnce (0x0013)
Profile Identifier: ZDP (0x0000)
Source Endpoint: ZDO (0)
APS Counter: 0x00
ZigBee ZDO
Transaction Seq Number: 0
End Device Announce
NWK Address For Local Device: 0x0001
IEEE Address For Local Device: 00:00:00:00:00:00:00:00
Capability: 0x80

```

9. ZED načíta teplotu z teplotného senzoru a pošle správu Data Request, **rámec č. 18**.

```

Frame 18 (Length = 12 octets)
Packet Type: Command: Data Request
IEEE 802.15.4
Frame Control: 0x8863
.... ..011 = Frame Type: Command (0x03)
.... ..0... = Security Enabled: Disabled (0x00)
.... ..0 .... = Frame Pending: No data pending (0x00)

```

```

.... ..1. .... = Acknowledgment Request: ACK required (0x01)
.... ..1.. .... = PAN ID Compression: PAN ID compression (0x01)
.... ..00 0... .... = Reserved: 0x00
.... 10.. .... .... = Destination Addressing Mode: 16-bit short address. (0x02)
..00 .... .... .... = Frame Version: IEEE Std 802.15.4-2003 (0x00)
10.. .... .... .... = Source Addressing Mode: Address field contains a 16-bit short address. (0x02)
Sequence Number: 4
Destination PAN Identifier: 0x3a11
Destination Address: 0x0000
Source Address: 0x0001
Command Frame Identifier: Data Request (0x04)
FCS: 0xffff
Data Request

```

Po potvrdení ACK, ZED odošle dáta ku ZC, **rámec č. 20**. Aplikačný endpoint 2, profil 1 a cluster 1 sú zvolené pre prenos teploty. Samotné dáta sú 3 bajty. Prvý bajt je typ senzoru (teplomer, vlhkomer, tlakomer), 2. a 3. bajt je teplota $0x19_{(\text{hex})} = 25^{\circ}\text{C}_{(\text{dec})}$. Z APS vrstvy je vidieť, že je vyžiadané potvrdenie aj na aplikačnej vrstve.

```

Frame 20 (Length = 30 octets)
IEEE 802.15.4
Sequence Number: 5
Destination PAN Identifier: 0x3a11
Destination Address: 0x0000
Source Address: 0x0001
FCS: 0xffff
ZigBee NWK
Frame Control: 0x0048
Destination Address: 0x0000
Source Address: 0x0001
Radius: 10
Sequence Number: 145
ZigBee APS
Frame Control: 0x40
.... ..00 = Frame Type: APS Data (0x00)
.... 00.. = Delivery Mode: Normal unicast delivery (0x00)
...0 .... = Ack Format: Do not include destination endpoint, cluster identifier, profile identifier and
source endpoint in the acknowledgement (0x00)
..0. .... = Security: Disabled (0x00)
..1. .... = Ack Request: Acknowledgement required (0x01)
0... .... = Extended Header Present: Not present (0x00)
Destination Endpoint: 2
Cluster Identifier: 0x0001
Profile Identifier: 0x0001
Source Endpoint: 2
APS Counter: 0x01
ZigBee APS Payload
Payload: 00:19:00

```

10. Aplikačné potvrdenie od ZC pre ZED, **rámec č.27**. Potvrdenie na linkovej vrstve je prakticky okamžité v rámci 1ms. Aplikačné potvrdenie môže trvať až sekundy. Preto je vhodné zvážiť prepnutie ZED do úsporného módu a po zobudení sa dotázať či APS ACK bolo doručené.

```

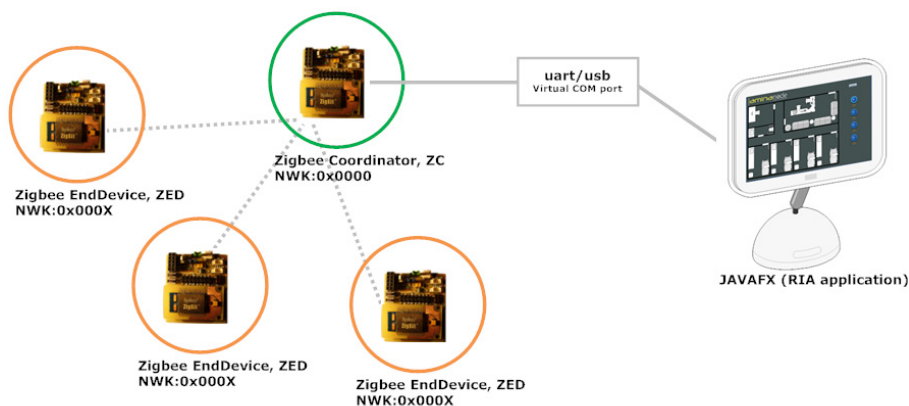
Frame 27 (Length = 27 octets)
IEEE 802.15.4
Frame Control: 0x8861
Sequence Number: 11
Destination PAN Identifier: 0x3a11
Destination Address: 0x0001
Source Address: 0x0000
FCS: 0xffff
ZigBee NWK
Destination Address: 0x0001
Source Address: 0x0000
Radius: 10
Sequence Number: 165
ZigBee APS
Frame Control: 0x02
.... ..10 = Frame Type: APS Acknowledgement (0x02)
.... 00.. = Delivery Mode: Normal unicast delivery (0x00)
...0 .... = Ack Format: Do not include destination endpoint, cluster identifier, profile identifier...
..0. .... = Security: Disabled (0x00)
..0. .... = Ack Request: Acknowledgement not required (0x00)
0... .... = Extended Header Present: Not present (0x00)
Destination Endpoint: 2

```


Cluster Identifier: 0x0001
Profile Identifier: 0x0001
Source Endpoint: 2
APS Counter: 0x01

Nasleduje výklad demonštračného príkladu :

Distribúcia Bitcloudu obsahuje ukážkové Zigbee aplikácie a zdrojové kódy, ktoré sú písané univerzálnym programovacím štýlom, preto je vhodné vychádzať z týchto aplikácií. Opisovaná aplikácia má názov Lowpower a bola modifikovaná pre potreby demonštračného príkladu zberu dát z teplotných senzorov. Sensorická sieť pozostáva zo zariadení ZED a ZC. Zariadenia ZED v definovanom intervale odosielajú nameranú teplotu Zigbee koordinátorovi, prípadne odosielanie teploty je vynútené stlačením tlačítka 0. Po odoslaní teploty sa ZED prepne do úsporného režimu. ZC namerané teploty odošle na USART0, kde je pripojený uart/usb konvertor a dáta sa ďalej posielajú do PC, kde sú vizualizované. Odosielanie dát môže byť zo strany ZED zariadenia vynútené stlačením tlačidla 1. Pre vizualizáciu bola navyše vytvorená vizualizačná aplikácia v programovacom jazyku JAVA FX [53]. Výhodou technológie JavaFX je, že obsahuje komfortné nástroje pre tvorbu obsahovo "bohatých" aplikácií a vytvorené aplikácie môžu bežať pod desktopom rovnako ako vo webovom prehliadači. Vizualizačná aplikácia ďalej popisovaná nebude, lebo úzko nesúvisí s témou diplomovej práce.



OBR. 57 DEMONŠTRAČNÁ APLIKÁCIA

Pozn. : Aplikácia umožňuje aj spätnú komunikáciu. ZC po stlačení tlačidla 1 odošle požiadavku ZED zariadeniam na zmenu meraného senzoru (teplota->tlak->vlhkosť). Keďže v čase písania diplomovej práce bolo dostupné iba teplotné čidlo, v HAL vrstve neboli vytvorené ovládače pre tlakový a vlhkosťný senzor. Táto funkcionality teda implementovaná nebola.

Firmvér pre mikrokontrolér pozostáva z nasledujúcich zdrojových súborov :

Configuration - súbor obsahuje implicitné nastavenia Bitcloud stacku a jeho parametrov pre danú aplikáciu

boardabstraction.c - definícia obsluhy hardvéru na senzorickej doske

coordinator.c - definícia správania ZC

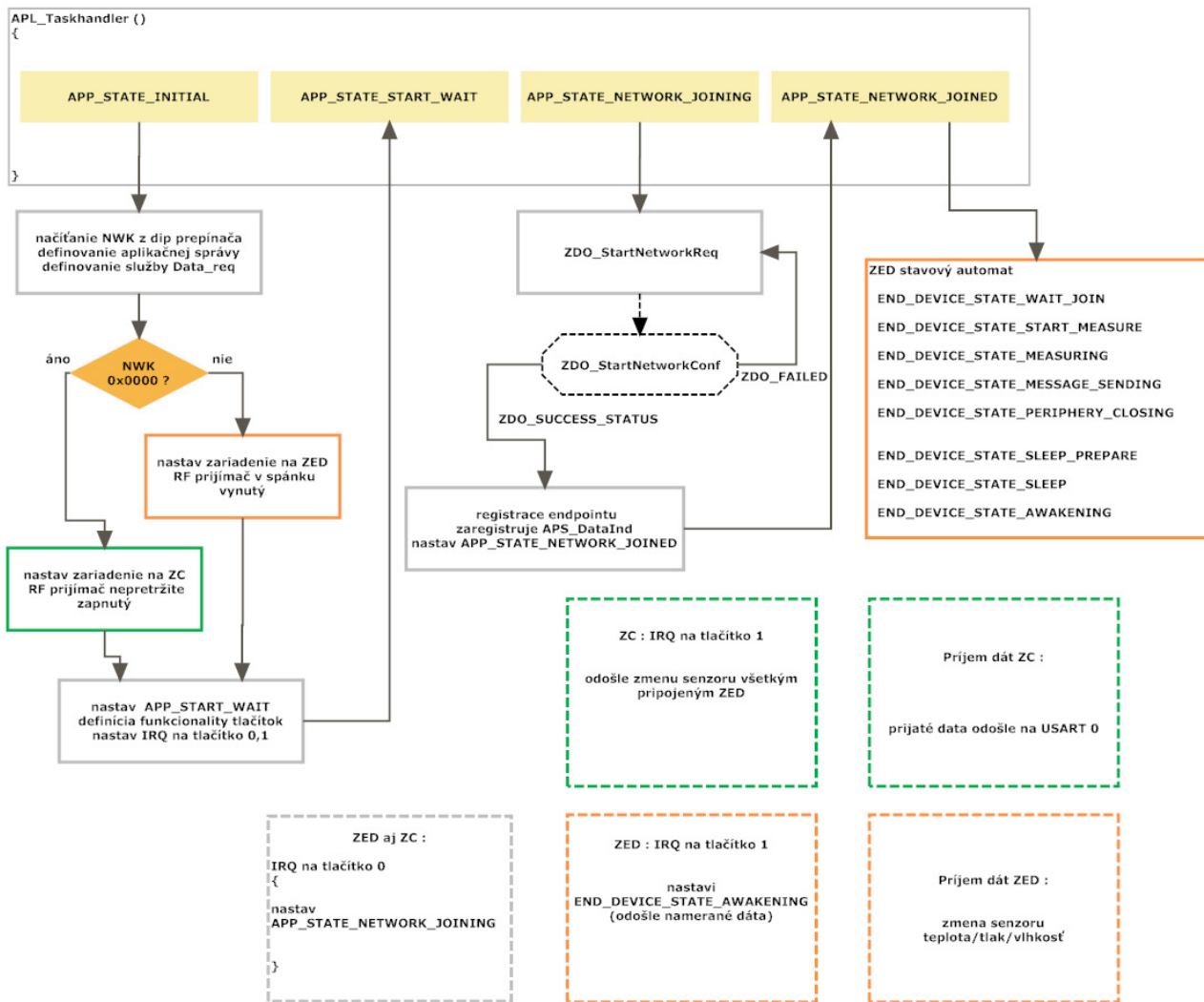
enddevice.c - definícia správania ZED

lowpower.c - výber typu zariadenia zariadenia, vstupný bod aplikácie

boardabstraction.h, boardstubs.h, lowpower.h - hlavičkové súbory, obsahujúce konfiguračné makrá a výčtové typy

Makefile - predpripravený makefile, ktorý spracuje konfiguračné parametre z Configuration súboru a zkompiluje zdrojové kódy umiestnené v adresári /src a /include a priložuje k nim ostatné vrstvy Bitcloud stacku. Makefile je napísaný všeobecne a je ho možné využiť pre ľubovlnú aplikáciu Bitcloudu

Na obrázku nižšie je stručný popis aplikácie pre mikrokontrolér. Firmvér je spoločný pre ZC a ZED zariadenia. Čiarkované rámce znázorňujú asynchrónne udalosti : callbacky Bitcloud stacku a prerušenia z hardvérových periférií.



OBR. 58 DEMONŠTRAČNÁ APLIKÁCIA, FIRMVÉR

Pozn. : Komentáre v zdrojovom kóde sú znázornené zelenou farbou. Hrubo vyznačené štruktúry a volania sú definované Bitcloudom. Tieto funkcie sú zdokumentované v distribúcii Bitcloudu [24]

Aplikácia je koncipovaná ako stavový automat. Stavý automatu sú definované výčtovým typom :

```
// lowpower.h
typedef enum
{
    APP_STATE_INITIAL,           // Application initial state (after Power On or Reset)
    APP_STATE_START_WAIT,       // Waiting while the Button0 was not pressed
    APP_STATE_NETWORK_JOINING,  // Joining network state
    APP_STATE_NETWORK_JOINED,   // Network available
} AppState_t;
```

Aplikácia začína vstupom do funkcie APL_taskhandler (obdoba void main(void)), implicitný stav je nastavený na APP_STATE_INITIAL.

```
// lowpower.c
void APL_TaskHandler(void)
{
    switch (appState)
    {
        // node is in initial state
        case APP_STATE_INITIAL:           // Initial (after RESET) state
            initApp();                   // Init application
            break;
        case APP_STATE_START_WAIT:       // Do nothing, waiting for 'start network' key press
            break;
        case APP_STATE_NETWORK_JOINING:  // Network is in the joining stage
```

```

startNetwork(); // Start/joining network
break;

case APP_STATE_NETWORK_JOINED: // Network was successfully started
if (ops && ops->taskHandler) // Route events to device specific layers
ops->taskHandler();
break;
}
}

```

Pokračuje sa vstupom do funkcie initAPP(), kde sa nastaví stav automatu na APP_STATE_START_WAIT.

```

// lowpower.c
// Pointer to device type specific functions.
// Can be either coordinator or end device.
static AppClientOps_t *ops = NULL

static void initApp(void)
{
    ShortAddr_t nwkAddr;
    setAppState(APP_STATE_START_WAIT);

    // Open periphery and read NWK address as dipswitch's state.
    boardAbstractionOpen();
    nwkAddr = boardAbstractionReadSliders();

    if (0 == nwkAddr)
    {
        #ifndef _COORDINATOR_
        #ifndef _SECURITY_
            ExtAddr_t addr;
            CS_ReadParameter(CS_APS_TRUST_CENTER_ADDRESS_ID, &addr);
            CS_WriteParameter(CS_UID_ID, &addr);
        #endif // _SECURITY_
            ops = appGetCoordinatorOps();
        #else
            return; // This device can not be coordinator
        #endif // _COORDINATOR_
    }
    else
    {
        #ifndef _ENDDEVICE_
            ops = appGetEndDeviceOps();
        #else
            return; // This device can not be end device
        #endif // _ENDDEVICE_
    }

    // Set device NWK address
    CS_WriteParameter(CS_NWK_ADDR_ID, &nwkAddr);
    // Set address mode to static (not stochastic)
    CS_WriteParameter(CS_NWK_UNIQUE_ADDR_ID, &(bool){true});
    //init common
    apsDataReq.dstEndpoint = APP_ENDPOINT; // Destination endpoint
    apsDataReq.profileId = APP_PROFILE_ID; // Profile ID
    apsDataReq.clusterId = APP_CLUSTER_ID; // Destination cluster ID
    apsDataReq.srcEndpoint = APP_ENDPOINT; // Source endpoint
    apsDataReq.txOptions.acknowledgedTransmission = 1; // Acknowledged transmission enabled
    apsDataReq.radius = 0; // Default radius
    apsDataReq.asduLength = sizeof (appMessageBuffer.msg); // ASDU size
    apsDataReq.asdu = (uint8_t*) &appMessageBuffer.msg; // ASDU pointer as an application message
    apsDataReq.dstAddrMode = APS_SHORT_ADDRESS; // Short addressing mode

    // Set device type specific options
    if (ops && ops->init)
        ops->init();
}

```

```

// lowpower.h
typedef struct _ClientOps_t
{
    void (*init)(void);
    void (*taskHandler)(void);
    void (*dataInd)(APS_DataInd_t* ind);
    void (*buttonHandler)(AppButton_t b);
    void (*networkStateChanged)(AppState_t newState);
} AppClientOps_t;

```

```

// coordinator.c
AppClientOps_t* appGetCoordinatorOps(void)
{
    static AppClientOps_t ClientOps =
    {
        .init = init,
        .dataInd = dataInd,
        .buttonHandler = buttonHandler,
        .networkStateChanged = networkStateChanged,
    };
    return &ClientOps;
}

```

```

// enddevice.c
AppClientOps_t* appGetEndDeviceOps(void)
{
    static AppClientOps_t ClientOps =
    {
        .init = init,
        .taskHandler = taskHandler,
        .buttonHandler = buttonHandler,
        .networkStateChanged = networkStateChanged,
        .dataInd = dataInd,
    };
}

```

```

// enddevice.c
static void init(void)
{
    // turn off radio receiver when device sleep
    bool rxOnWhenIdle = false;
    DeviceType_t appDeviceType = DEVICE_TYPE_END_DEVICE;

    CS_WriteParameter(CS_DEVICE_TYPE_ID, &appDeviceType);
    CS_WriteParameter(CS_RX_ON_WHEN_IDLE_ID, &rxOnWhenIdle);
    // Prepare APS Data Request
    apsDataReq.dstAddress.shortAddress = 0;
    // Destination node short address
    apsDataReq.APS_DataConf = APS_DataConf;
    // Confirm handler
}

```

```

// coordinator.c
static void init(void)
{
    // don't turn off radio receiver
    bool rxOnWhenIdle = true;
    DeviceType_t appDeviceType = DEVICE_TYPE_COORDINATOR;

    //set device type specific params to config server
    CS_WriteParameter(CS_DEVICE_TYPE_ID, &appDeviceType);
    CS_WriteParameter(CS_RX_ON_WHEN_IDLE_ID, &rxOnWhenIdle);

    // Prepare APS Data Request
    apsDataReq.APS_DataConf = APS_DataConf;
    // Confirm handler
}

```

```
boardAbstractionRegisterKeyCallback(buttonCallback); // register button's handlers
```

```
Funkcia boardAbstractionRegisterKeyCallback registruje callback na hardvérové prerušenie od tlačítok na doske, z dôvodu skráteného výkladu túto hardvérovú obsluhu preskočíme.

Po stisku tlačítka0 sa zmení stav aplikačného automatu na APP_STATE_NETWORK_JOINING
Po stisku tlačítka1 ZED device : odošlú namerané data zo senzoru
ZC : odošle požiadavka na zmenu senzoru

static void buttonCallback(AppButton_t button)
{
    switch (button)
    {
        case APP_BUTTON_0: // Network start button
            if (APP_STATE_START_WAIT == appState) // If application waits for this event
                setAppState(APP_STATE_NETWORK_JOINING);
            break;

        default:
            if (ops && ops->buttonHandler)
                ops->buttonHandler(button);
            break;
    }
}
```

```
    SYS_PostTask(APL_TASK_ID); // back to main loop APL_TaskHandler()
}
```

Keďže hardvérová platforma umožňuje figurovať zariadeniu ako ZC, ZR aj ZED je konfigurácia zariadenia implementovaná nasledovne: Užívateľ zvolí na DIP prepínači (4-polohy) posledné 4 bity NWK adresy : 0x000X. V prípade, že užívateľ zvolí na dip prepínači samé nuly, zariadenie bude vystupovať ako Zigbee koordinátor s NWK adresou 0x0000, v opačnom prípade ako zariadenie ZED. Ukážka kódu vyššie naznačuje, akým spôsobom je implementovaná konfigurácia sieťovej adresy.

Ďalej sa využije pointer ops na štruktúru AppClientOps_. V štruktúre sú definované ukazovatele na funkcie. ZC využíva funkcie pre : inicializáciu zariadenia, príjem dát, obsluhu tlačidiel a funkciu pre zmenu stavu aplikačného automatu. ZED využíva funkcie pre : inicializáciu zariadenia, príjem dát vstup do vlastného ZED stavového automatu, obsluhu tlačidiel a zmenu stavu aplikačného automatu

Aplikácia potom zaregistruje callback funkciu na stlačenie tlačítka, kde sa zadefinuje, že po stlačení tlačidla 0 sa aplikačný automat prepne do stavu APP_STATE_NETWORK_JOINING. Po stlačení tlačidla 1 sa ZED zobudí a odošle namerané dáta ku ZC. U zariadenia ZC sa po stlačení tlačidla 1 odošle k pripojeným zariadeniam požiadavku na zmenu meranej veličiny. Ako bolo spomenuté, táto funkcionálna nebola overená, pretože bol k dispozícii iba jeden senzor (teploty). Aplikácia tak pracuje iba jednosmerne, dáta sa posielajú od ZED zariadení k ZC.

Nasleduje volanie SYS_PostTask(APL_TASK_ID) , ktoré vráti beh programu do aplikačného automatu do stavu APP_STATE_NETWORK_JOINING, kde sa zavolá funkcia startNetwork() .

```
static void startNetwork(void)
{
    boardAbstractionShowIndication(APP_INDICATION_NETWORK_SEARCH);
    zdoStartNetworkReq.ZDO_StartNetworkConf = ZDO_StartNetworkConf; // Network started confirm handler
    ZDO_StartNetworkReq(&zdoStartNetworkReq); // start network
}

// callback function
static void ZDO_StartNetworkConf(ZDO_StartNetworkConf_t *confInfo)
{
    // Joined network successfully
    if (ZDO_SUCCESS_STATUS == confInfo->status) // Network was started successfully
    {
        setAppState(APP_STATE_NETWORK_JOINED);

        boardAbstractionShowIndication(APP_INDICATION_NETWORK_STARTED);

        // Set application endpoint properties and register endpoint
        apsRegisterEndpointReq.simpleDescriptor = &simpleDescriptor;
        apsRegisterEndpointReq.APS_DataInd = APS_DataInd;
        APS_RegisterEndpointReq(&apsRegisterEndpointReq);
    }

    SYS_PostTask(APL_TASK_ID);
}
```

Funkcia start network indikuje túto udalosť blikaním zelenej diódy. Po vytvorení novej siete (ZC) alebo po pripojení do siete (ZED) sa zaregistruje simpleDescriptor, ktorý popisuje aplikáciu na zvolenom endpointe. Led dióda indikuje tento stav zastavením blikania. Aplikačný automat prejde do stavu APP_STATE_NETWORK_JOINED. V tomto stave sa pri ZED z aplikačného automatu prejde do subautomatu. Stavový automat ZED z úsporných dôvodov nebude popísaný. Pri zariadení ZC sa čaká na príjem dát pomocou callbacku DataInd.

```
// enddevice.c
static void taskHandler(void)
{
    switch (endDeviceState)
    // Actual device state when one joined network
    {
        // Device ready to temperature measuring
        case END_DEVICE_STATE_START_MEASURE:
        // . . .
        case END_DEVICE_STATE_MESSAGE_SENDING:
        // . . .
        case END_DEVICE_STATE_PERIPHERY_CLOSING:
        // . . .
        case END_DEVICE_STATE_SLEEP_PREPARE:
        // . . .
        case END_DEVICE_STATE_AWAKENING:
        // . . .
        case END_DEVICE_STATE_MEASURING:
        case END_DEVICE_STATE_SLEEP:
        case END_DEVICE_STATE_WAIT_JOIN:
        // . . .
    }
}
```

```
//coordinator.c
static void dataInd(APS_DataInd_t* ind)
{
    AppSensorMessage_t *msg = (AppSensorMessage_t*)ind->asdu;
    boardAbstractionShowMessage(ind->srcAddress.shortAddress,
    msg->type, msg->value);
}

// boardabstraction.c
void boardAbstractionShowMessage(ShortAddr_t sender,
AppSensorType_t type, int16_t value)
{
    char str[100];
    ZDO_GetLqiRssi_t lqiRssi;
    lqiRssi.nodeAddr = sender;
    ZDO_GetLqiRssi(&lqiRssi);

    //write to usart
    snprintf(str, sizeof(str), "0x%2X;%3d;%3d\r\n",
    sender, (uint8_t) lqiRssi.rssi, value);
    USART_Write(&usartDescriptor, (uint8_t*)str, strlen(str));
}
```

Pre presný a podrobný popis toho, sú k dispozícii zdrojové kódy aplikácie pre mikrokontrolér, ktoré sú uložené na priloženom DVD nosiči.

Nasledujúce obrázky slúžia ako demo vizualizačná aplikácia, ktorá zobrazuje získanú teplotu z čidiel. Ako už bolo spomenuté, vizualizačný program bol napísaný v jazyku JavaFX.





OBR. 59 VIZUALIZAČNÁ APLIKÁCIA, Z HORA : PRED PRIPOJENÍM UZLOV SIETE, PO PRIPOJENÍ WSN UZLOV

6.1 DEMONŠTRAČNÁ APLIKÁCIA, VEĽKOSŤ KÓDU

Veľkosť výsledného kódu je podstatný parameter pri vývoji aplikácie pre wsn uzol, ktorý má kriticky limitované hardvérové zdroje. Použitý mikrokontrolér Atmega1281 disponuje 128K FLASH pamäť a 8K operačnej pamäť. Pre predstavu, vyššie prezentovaná demonštračná aplikácia (nie vizualizačná) zaberá niečo cez 100kb Flash pamäť. Táto aplikácia bola použitá bez šifrovania prenosu. Pri použití šifrovania sa veľkosť aplikácie pohybuje už na hranici 125kb. Redukovanie výsledného kódu aplikácie je problematické. Keďže Bitcloud stack nie je kompletne opensource, tak napríklad pre šifrovanie sa prilinkuje predkompilovaná knižnica a to bez ohľadu na to, ktorý level zabezpečenia sa používa, táto knižnica sa nahrá celá. To vedie k nie úplne optimálnemu využitiu dostupnej pamäte.

Pozn.: Pri použití rádiového modulu AT86RF230 (2.4GHz Zigbit moduly) je šifrovanie celé v režii mikrokontroléru. To je samozrejme náročné na pamäť a výkon. Nová verzia obvodu AT86RF231, už má hardvérovú akcelerovanú AES šifrovanie. Subgigahertzový čip AT86RF212 má taktiež hardvérovú podporu AES šifrovania.

Veľkosť výsledného kódu je možné zmenšiť špecifikovaním zariadenia vopred (viď Tab. 13). Ak sa typ zariadenia môže zvoliť za behu programu, je veľkosť najväčšia, naopak ak sa typ zariadenia špecifikuje apriórne, výsledná veľkosť sa zníži. Veľkosť kódu je teda kompromis medzi aplikačnou funkcionalitou a veľkosťou kódu.

TAB. 13 VEĽKOSŤ DEMONŠTRANEJ APLIKÁCIE

	Všetky zariadenia	Koordinátor	Router	Enddevice
Šifrovanie neaktívne	105k	95k	94k	82k
Šifrovanie aktívne	124k	114k	114k	99k

Podobné úvahy je možné aplikovať aj na operačnú pamäť. Bitcloud však v tomto smere poskytuje väčšiu flexibilitu ako pri pamäti programu Flash. Je možné zvoliť presnú veľkosť jednotlivých položiek ako je routovacia tabuľka, veľkosť bufferov atď. Týmto spôsobom je teda možné dopredu určiť veľkosť obsadenia pamäte, ktoré Bitcloud používa. Typicky Bitcloud využíva cca 6kB operačnej pamäte. Viac o optimalizácii a

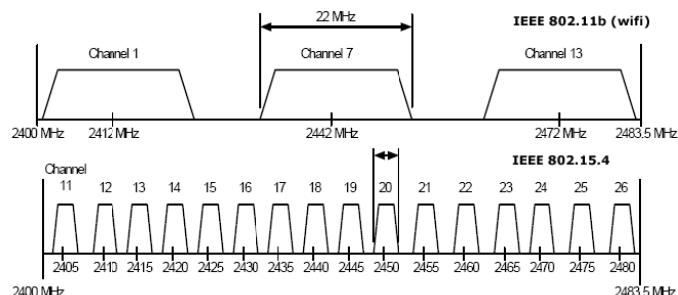
využití pamäte je v dokumentácii o Bitcloudu [24]. Z predchádzajúcich zistení je zrejmé, že designér aplikácie pod Zigbee sa pohybuje vo veľmi limitovanom hardvérovom prostredí. Je teda nevyhnutné, aby si programátor bol vedomí určitých zásad a odlišností od klasického programovania, ako sú napríklad : nepoužívať rekurziu, dynamicky alokovanú pamäť a podobne. Veľmi dobrým zdrojom týchto cenných znalostí je literatúra [55].

7 NÁVRH APLIKAČNÉHO PROTOKOLU PRE HARDVÉROVÚ PLATFORMU

Pre zber dát zo senzorov hardvérovej platformy bol v demonštračnej aplikácii použitý jednoduchý systém resp. protokol. Sieť pozostáva z koordinátora a koncových zariadení, ktoré merajú fyzikálne veličiny. Koordinátor figuruje zároveň ako zberné miesto nameraných dát. V sieti sa implicitne komunikuje iba smerom od ZED ku ZC. Opačná komunikácia je možná, ak chce koordinátor zmeniť typ meranej veličiny, a to tak, že odošle všetkým pripojeným ZED na základe NeighbourTable (viď Zigbee špecifikácia) príkaz na zmenu meranej veličiny. Namerané dáta odošle koncové zariadenie ako 3 bajty : typ senzoru (1B) + samotné dáta (2B) a to na adresu 0x0000. Keďže adresa 0x0000 je vždy adresa koordinátora v Zigbee sieti, zostáva už len zvoliť ID profilu, clustru a endpoint. Týmto jednoduchým spôsobom môže byť realizovaný zber dát v bezdrôtovej senzorovej sieti. Pri reálnom nasadení je v záujme kompatibility vhodné držať sa pred pripravených clustrov definovaných v Zigbee Cluster Library a vhodného aplikačného profilu. V prípade inteligentných budov sú to profily Zigbee Home Automation a Zigbee Building Automation. Bitcloud ako taký podporuje iba nutné súčasti Zigbee PRO štandardu a neobsahuje ZCL ani aplikačné profily. Tie si musí aplikačný designér implementovať sám. Problémom však môže byť obmedzená pamäť mikrokontroléru (viď 6.1). Takže opäť je to kompromis medzi funkcionalitou a hardvérovými možnosťami. Ďalej sa situácia komplikuje ako náhle je vyžadovaný nielen samotný zber dát, ale aj riadenie, tým pádom komunikácia prebieha rôzne medzi zariadeniami. Tým sa dostávajú na povrch ďalšie problémy typu : Ako vlastne zostaviť sieť ? Ktoré zariadenie sníma vypínač svetla ? Ktoré zariadenie ovláda lampu ? Ako prideliť adresy a ako identifikovať jednotlivé zariadenia ? Tieto otázky sa nemusia zdať na prvý pohľad komplikované, ale ako náhle je požadovaná univerzalita, ľubovoľná veľkosť siete a inštalácia s minimálnym zásahom človeka, jedná sa už o veľmi komplikovaný problém. Pri väčších sieťach sa používajú gateway zariadenia, ktoré uľahčujú inštaláciu a konfiguráciu siete. Zigbee špecifikácia v súčasnosti ohľadom zostavenia, konfigurácie a správy siete neponúka žiadne riešenie. Určité odporúčenia sú však definované v jednotlivých aplikačných profiloch.

8 KOEXISTENCIA ZIGBEE A ĎALŠÍCH BEZDRÁTOVÝCH TECHNOLOGIÍ

V bezlicenčnom ISM pásme súperia o svoj priestor viaceré bezdrôtové technológie. Koexistencia a teda schopnosť operovať v blízkosti iného bezdrôtového zariadenia je veľmi dôležitá. Zatiaľ čo v subgigahertzovom ISM pásme v súčasnosti neoperuje mnoho technológií, v pásme 2.4GHz operujú najrozšírenejšie bezdrôtové technológie ako sú wifi, bluetooth, bezdrôtové telefóny a mikrovlnné rúry. Existujú dva prístupy riešenia tohto problému: spolupracujúci prístup – kde rôzne technológie navzájom komunikujú a spolupracujú, a logicky prístup opačný, kde rôzne technológie v podstate o sebe nevedia. Zigbee je zo svojej podstaty navrhnuté operovať aj v zarušenom prostredí. Je to vďaka : rozprestieraniu signálu, nízkemu vysielaciemu výkonu, krátkej aktívnej dobe, prístupovej metóde a spôsobu smerovania. Najjednoduchší prístup k zamedzeniu kolízií s wifi sieťami je operácia na neprekrývajúcich kanáloch (viď Obr. 60) a skrátenie veľkosti paketov. Zo štúdie Schneider electric [56] vyplýva, že v súčasnosti koexistencia Zigbee a Wifi nie je problematická. Viac o probléme koexistencie a jeho riešení je v literatúre [4].



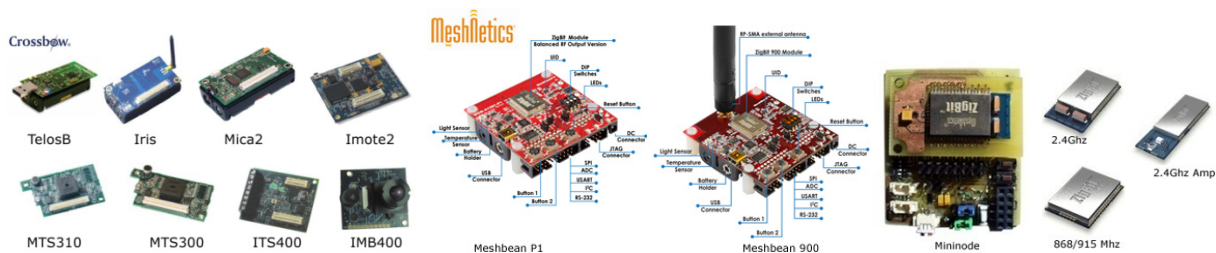
OBR. 60 WIFI KANÁLY, IEEE 802.15.4 KANÁLY

9 POROVNANIE HARDVÉROVÝCH PLATFORMIEM PRE IMPLEMENTÁCIU WSN

Na trhu sú dostupné viaceré platformy pre implementáciu bezdrôtových senzorických sietí. Do porovnávacej tabuľky uvedenej nižšie boli vybraté najznámejšie moduly od spoločnosti Crossbow a Meshnetics. Moduly Iris, Mica2 a Imote2 sú koncipované ako rádiové moduly s napájaním. Sensory sa pripájajú k týmto doskám externe pomocou konektoru. K dispozícii sú senzorické dosky MTS, ITS a IMB. Moduly Meshbean sú koncipované ako vývojové dosky (všetko v jednom), obsahujú rádiový modul, senzory, prevodník úrovni, usb/uart konvertor atď. Navrhnutá hardvérová platforma Mininode je koncipovaná opačným spôsobom ako moduly od spoločnosti Crossbow. Napájanie je umiestnené na senzorickej doske a rádiový modul sa pripája externe. Má to svoje opodstatnenie, keďže táto platforma je zameraná na zber dát v budovách, merané fyzikálne veličiny sa často meniť nebudú. Naopak tam, kde je dôležitý dosah, je možnosť zvoliť iný rádiový modul. V každom prípade všetky uvedené platformy majú vyvedený konektor, na ktorý sa dajú pripojiť ďalšie senzory, takže je zachovaná aj variabilita v tomto smere.

TAB. 14 POROVNANIE HARDVÉROVÝCH PLATFORMIEM

	Iris	TelosB	Mica2	Imote2	Meshbean P1	Meshbean 900	Mininode
Kmitočet	2.4GHz	2.4GHz	868/915MHz	2.4GHz	2.4GHz	868/915MHz	2.4GHz 868/915MHz
MCU	Atmega1281	MSP430	Atmega128L	Intel XSCALE	Atmega1281	Atmega1281	Atmega1281
Parametre	128k Flash	48k Flash	128k Flash	32MB Flash	128k Flash	128k Flash	128k Flash
	8k RAM	10k RAM	8k RAM	256kb SRAM, 32MB SDRAM	8k RAM	8k RAM	8k RAM
	4K EEPROM	16K EPROM	4K EEPROM	-	4K EEPROM	4K EEPROM	4K EEPROM
RF modul	AT86RF230	CC2420	CC1000	CC2420	AT86RF230	AT86RF212	RF230/212
RF TX_{max}	3dBm, 17mA	0dbm	5dBm, 27mA	0dBm	3dBm, 17mA	5dBm, 20mA	Ako meshbean P1/900
RF RX_{max}	-101dBm, 16mA	-94dBm, 23mA	-98dBm, 10mA	-94dBm 23mA	-101dBm, 16mA	-110dBm, 15mA	Ako meshbean P1/900
Napájanie	2x AA, Ext 2.7-3.3V	2x AA USB	2x AA Ext 2.7-3.3V	3xAAA USB	2xAA, USB, Ext	2xAA, USB, Ext	2xNiMH/Li-ion Ext. 1.8-6V
Senzory	Bez senzorov Ext MTS, ITS	Lux, vlhkosť, teplota	Bez senzorov Ext MTS, ITS	Bez senzorov Ext MTS, ITS	lux, teplota	lux, teplota	teplota, tlak, vlhkosť
Špeciálne	Serial Flash 512K	Serial Flash 1024K, USB	Serial Flash 512K	-	Uid čip, RS232 level, Uart/usb	Uid čip, RS232 level, Uart/usb	Konektor pre prepínacie kontakty
Rozmery	58x32	65x31	58x32	36x48	63x60	63x60	52x44
Orientačná cena	130\$+sezoro vá doska	130\$	130\$+senzorová doska	?	250\$	250\$	42\$ + senzory (ATZB-24-A2)



OBR. 61 HARDVÉROVÉ PLATFORMY PRE WSN : Z LAVA CROSSBOW, MESHNETICS, MININODE

ZÁVER

Práca pojednáva o aktuálnej problematike bezdrátových senzorických sietí. Úvodná časť je orientovaná na prehľad hlavných štandardov v tejto oblasti. Ďalej sa v práci popisujú podrobne štandardy IEEE 802.15.4 a Zigbee, ktoré sú základným stavebným kameňom väčšiny súčasných bezdrátových senzorických sietí. Cieľom práce bol návrh hardvérovej platformy pre realizáciu bezdrátovej senzorickej siete, ktorá je zameraná na bezdrátový zber dát v oblasti inteligentných budov. Práca popisuje návrh hardvérovej platformy po jednotlivých krokoch a snaží sa podať ucelený prehľad získaných znalostí a odkazov na kvalitnú literatúru. Výsledkom je realizovaná hardvérová platforma, použiteľná v inteligentných budovách. Základom platformy sú moduly Zigbit od spoločnosti ATMEL, ktoré obsahujú mikrokontrolér AVR Atmega1281 a rádiový modul AT86RF2xx. Hlavná priorita pri návrhu platformy bola nízka spotreba. Energetická spotreba celej platformy v aktívnom režime je približne 5mA, pri vysielaní a prijíma 19mA a v režime spánku 1- 6uA. Ďalej sa v práci diskutuje implementácia štandardov IEEE 802.15.4 / Zigbee. Po teoretickom úvode je využitý Zigbee stack Bitcloud od spoločnosti ATMEL. V práci sa na konkrétnom príklade popisuje modifikácia Bitcloudu pre navrhnutú hardvérovú platformu. Samotný Bitcloud obsahuje ukážkové aplikácie, jedna z nich je modifikovaná a výsledkom je realizovaná demonštračná bezdrátová senzorická sieť, ktorá zberá dáta z teplotných čidiel. Pre získanie predstavy, bola zameraná aplikačná priepustnosť siete. Pri spojení bod-bod to bola hodnota 86kbps bez potvrdzovania. Ďalej platforma počíta aj so senzormi vlhkosti a tlaku, spínačmi osvetlenia a ďalšími senzormi pripojiteľnými pomocou vyvedeného konektora. Keďže problematika bezdrátových senzorických sietí nie je bežná, zostavená demonštračná sieť je analyzovaná z pohľadu komunikácie, ktorá prebieha vzduchom a následne z pohľadu ovládacieho programu uloženom v riadiacom mikrokontroléri v jednotlivých uzloch siete. Na záver sa v práci diskutuje návrh aplikačného protokolu pod Zigbee, koexistencia Zigbee a ďalších bezdrátových technológií a porovnanie hardvérovej platformy s dostupnými komerčnými produktami. Cena platformy v porovnaní s komerčnými riešeniami je približne tretinová.

V úvode práce bolo uvedené, že štandardy IEEE 802.15.4 a Zigbee sú najperspektívnejšie technológie na poli bezdrátových senzorických sietí. Na konci práce by bolo vhodné toto tvrdenie pozmeniť iba na prvý štandard. Štandard 802.15.4 vyvíja organizácia IEEE, podľa nadobudnutých vedomostí je štandard kvalitná technológia. Zigbee je sieťová a aplikačná nadstavba 802.15.4 tvorená alianciou popredných celosvetových priemyselných firiem. Ako ukázala história, na tvorcov štandardu Zigbee je vyvíjaný obrovský tlak. V roku 2004 bola dokončená prvá verzia Zigbee. Tento štandard bol však zle navrhnutý a prakticky nepoužiteľný. V roku 2006 vyšla nová verzia Zigbee, ktorá nebola kompatibilná s predošlým štandardom. To však nikomu nevadilo, pretože ani v priebehu dvoch rokov nevznikli zariadenia, ktoré by pod Zigbee pracovali. Dnes je na trhu štandard Zigbee PRO (2007), ktorý odstránil niektoré problémy. Na trhu je mnoho Zigbee stackov, naozajstný boom predpovedaný exponenciálnymi krivkami marketingového oddelenia Zigbee aliancie však stále neprišiel. Ak chcú byť bezdrátové senzorové siete úspešné, musia byť aspoň zrovnatelne spoľahlivé ako klasické káblové siete. Konceptuálnym problémom, nad ktorým Zigbee aliancia zatvára oči od roku 2004, je práve spoľahlivosť. Je jedno, že sú zariadenia malé a majú nízku spotrebu, ak nebude prenos spoľahlivý, nikto tieto siete nebude používať. V Zigbee všetky zariadenia operujú na jednom rádiovom kanále a prenos dát medzi zariadeniami je úplne asynchrónny. Keďže sa jedná o ISM pásmo, ktoré je dostupné všetkým, je trúfalosť predpokladať, že dátový prenos v sieti je nízko objemný a teda chybovosť minimálna. Pokiaľ bude v Zigbee implementovaná iba priestorová diverzita (mesh topológia) bez časovej synchronizácie a prepínania kanálov, Zigbee nebude úspešné a nezaplní trhy tak, ako predpokladá Zigbee aliancia. Každopádne aplikačnú vrstvu má Zigbee dokonale prepracovanú, ak sa teda zmení komunikačné pozadie, Zigbee má veľký potenciál byť všadeprítomné. Použiteľný hardvér je dostupný, teraz je na ťahu inteligentný softvér!

Skratky

A/D	Analog / Digital
AES	Advanced Encryption Standard
AF	Application Framework
AIB	Application Support Layer Information Base
AODV	Adhoc On Demand Vector protocol
APDU	Application Support Sublayer Protocol Data Unit
APL	Application Layer
APS	Application Support Sublayer
APSDE	Application Support Sublayer Data Entity
APSDE-SAP	APSDE-Service Access Point
APSME	Application Support Sublayer Management Entity
APSME-SAP	APSME-Service Access Point
ASDU	APS Service Data Unit
ASK	Amplitude Shift Keying
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BRT	Broadcast Retry Timer
BSN	Beacon Sequence Number
BTR	Broadcast Transaction Record
BTT	Broadcast Transaction Table
CAP	Contention Access Period
CBC-MAC	Cipher Block Chaining Message Authentication Code
CCA	Clear Channel Assessment
CCM	Counter with CBC-MAC
CFP	Contention-Free Period
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance
DSN	Data Sequence Number
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ERP	Effective Radiated Power
EVM	Error Vector Magnitude
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full-Function Device
FH	Frequency Hopping
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GPIO	General Purpose Input/Output
GTS	Guaranteed Time Slot
HDR	Header
I2C	Inter Intergrated Circuit
IB	Information Base
IFS	Interframe Spacing
ISM	Industrial Scientific and Medical
LAN	Local Area Network
LIFS	Long Interframe Spacing
LQI	Link Quality Indicator
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network

LSB	Least Significant Bit
MAC	Medium Access Control
MCPS	MAC Common Part Sublayer
MCPS-SAP	MAC Common Part Sublayer Service Access Point
MFR	MAC Footer
MHR	MAC Header
MIC	Message Integrity Code
MLME	MAC Layer Management Entity
MLME-SAP	MLME Service Access Point
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSB	Most Significant Bit
MSDU	MAC Service Data Unit
NF	Noise Figure
NHLE	Next Higher Layer Entity
NIB	Network Layer Information Base
NLDE	Network Layer Data Entity
NLDE-SAP	Network Layer Data Entity Service Access Point
NLME	Network Layer Management Entity
NLME-SAP	Network Layer Management Entity Service Access Point
NPDU	Network Layer Protocol Data Unit
NSDU	Network Service Data Unit
NWK	Network Layer
OCDM	Orthogonal Code Division Multiplexing
O-QPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PC	Personal Computer
PD	PHY Data
PD-SAP	PD Service Access Point
PER	Packet Error Rate
PHR	PHY Header
PHY	Physical Layer
PIB	PAN Information Base
PLME	Physical Layer Management Entity
PLME-SAP	PLME Service Access Point
PN	Pseudorandom Noise
POS	Personal Operating Space
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PSD	Power Spectral Density
PSDU	PHY Service Data Unit
PSSS	Parallel Sequence Spread Spectrum
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RX	Receiver
SAP	Service Access Point
SFD	Start-of-Frame Delimiter
SHR	Synchronization Header

SIFS	Short Interframe Spacing
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SKKE	Symmetric-Key Key Establishment
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
SSP	Security Services Provider
TRX	Transceiver
TX	Transmitter
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
ZDO	ZigBee Device Object

Literatura

- [1] IEEE Computer Society, et al. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2nd rev. edition. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006. 323 s. Dostupný z WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>>. ISBN SS95552.
- [2] GUTIÉRREZ, José A., CALLAWAY, JR., Edgar H., BARRETT, JR., Raymond L. Low-rate Wireless Personal Area Networks : Enabling Wireless Sensors with 802.15.4™. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.. 2nd edition. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA : IEEE Press, 2007. 169 s. ISBN SP1150.
- [3] GISLASON, Drew. Zigbee Wireless Networking. [s.l.] : Newnes, 2008. 448 s. ISBN 0750685972.
- [4] FARAHANI, Shahin. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. [s.l.] : Newnes, 2008. 360 s. ISBN 0750683937.
- [5] ZigBee Alliance, ZIGBEE SPECIFICATION, ZigBee Document 053474r17, 2008. 604 s. Dostupný z WWW: <<http://www.zigbee.org/ZigBeeSpecificationDownloadRequest/tabid/311/Default.aspx>>.
- [6] Tutoriál z pohľadu aplikačného vývojára o štandardoch IEEE 802.15.4 a Zigbee pre bezdrátové senzorické siete. Dostupný z WWW: < <http://www.aminawsn.org/cs/ieee802154-zigbee.html>>
- [7] 802.15.4 Chip Comparison Sheet. Dostupný z WWW: <http://freaklabs.org/images/stories/blog/zigbee_chip_comparison.pdf>
- [8] GPbatteries Li-ion technical handbook, Dostupný z WWW: http://www.gpbatteries.com/html/pdf/Li-ion_handbook.pdf
- [9] GPbatteries NiMH technical handbook, Dostupný z WWW: http://www.gpbatteries.com/html/pdf/NiMH_technical.pdf
- [10] GPbatteries NiCD technical handbook, Dostupný z WWW: <http://www.gpbatteries.com/html/pdf/NiCd.pdf>
- [11] GPbatteries datasheet, model GP1865L220, Dostupný z WWW : <http://www.gpbatteries.com/pic/GP1865L220%20TDS1.pdf>
- [12] Holger Karl and Andreas Willig ,Protocols and architectures for wireless sensor networks, John Wiley & Sons Ltd. 2005, 507 str., ISBN: 0-470-09510-5
- [13] Isidor Buchmann, Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers, Cadex Electronics Inc. 2001. 292 str. , ISBN 0968211828
- [14] MMA7660FC: 3-axis Digital Output Accelerometer, Dostupný z WWW: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7660FC.pdf?pspll=1>
- [15] Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC, Dostupný z WWW: <<http://www.rohm.com/products/databook/sensor/pdf/bh1715fvc-e.pdf>>
- [16] MPL115A Digital Barometer, Dostupný z WWW: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPL115A2.pdf?fpsp=1&WT_TYPE=Data%20Sheets&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation>
- [17] SHT21 - NEW Digital Humidity Sensor, Dostupný z WWW: <http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT21.pdf>
- [18] TMP102 Low Power Digital Temperature Sensor Dostupný z WWW: <<http://www.ti.com/lit/gpn/tmp102>>
- [19] Low Power PIR Motion Sensor Module MS-360LP Dostupný z WWW: < <http://www.irtec.com/manual/MS-360LP%20Technical%20Datasheet.pdf>>
- [20] ATmega1281, Dostupný z WWW: < http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2549.pdf>

- [21] ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works, Dostupný z WWW: <http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=5162>
- [22] AVR Studio, Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=2725>
- [23] WinAVR, Dostupný z WWW: <<http://winavr.sourceforge.net/>>
- [24] Bitcloud , Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card_mcu.asp?tool_id=4495&source=redirect>
- [25] Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, CRC Press 2004, 864 str., ISBN: 0849319684
- [26] Zigbee Alliance, Dostupný z WWW: <<http://www.zigbee.org/>>
- [27] AT86RF230, Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc5131.pdf>
- [28] AT86RF212, Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8168.pdf>
- [29] MEMS, Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS>>
- [30] I²C bus, Dostupný z WWW: <<http://www.i2c-bus.org/>>
- [31] Balun Theory, Dostupný z WWW : <<http://www.dxzone.com/cgi-bin/dir/jump2.cgi?ID=11038>>
- [32] DC/DC converter, Dostupný z WWW : <http://en.wikipedia.org/wiki/DC-to-DC_converter>
- [33] TPS780 series, Dostupný z WWW : <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps78001.pdf>>
- [34] Zigbee Specification Comparison Matrix, Dostupný z WWW : <<http://www.daintree.net/resources/spec-matrix.php>>
- [35] Meshbean development board, Dostupný z WWW : <<http://www.meshnetics.com/dev-tools/meshbean/>>
- [36] Pavlata, Karel Interconnection of IEEE 802.15.4 and Ethernet Networks: semestral project. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical engineering and Communication, Department of Control and Instrumentation, 2009/2010. 23 p. Supervised by Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
- [37] Introduction to Serial Peripheral Interface, Dostupný z WWW: <http://embedded.com/columns/beginnerscorner/9900483?_requestid=106088>
- [38] USART , Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/USART>>
- [39] Sběrnice 1-Wire, Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/rozhrani/art1215-sbernice-1-wire.html>>
- [40] 6LoWPAN, Dostupný z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/6LoWPAN>>
- [41] Hart communication foundation, Dostupný z WWW: <<http://www.hartcomm.org/>>
- [42] Zigbee comparison, Dostupný z WWW: <<http://www.daintree.net/resources/spec-matrix.php>>
- [43] AODV, Dostupný z WWW: <<http://moment.cs.ucsb.edu/AODV/>>
- [44] Zigbee Application Profiles, Dostupný z WWW: <http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=13712>
- [45] Zigbee Cluster Library, Dostupný z WWW: <<http://www.zigbee.org/ZigBeeClusterLibrary/tabid/314/Default.aspx>>
- [46] AES flash, Dostupný z WWW: <http://www.ccna-security.net/wp-content/uploads/2008/10/rijndael_ingles2004.swf>
- [47] AES standard, Dostupný z WWW: <<http://www.csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>>

- [48] Sériová linka RS-232 , Dostupný z WWW : <http://hw.cz/rs-232>
- [49] MAX4741, Dostupný z WWW : <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4741-MAX4743.pdf>
- [50] MAX4730, Dostupný z WWW : <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4729-MAX4730.pdf>
- [51] Hidden terminal problem, Dostupný z WWW : http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden_terminal_problem
- [52] Qing Li, Real-Time Concepts for Embedded Systems, CMP books, 2003. 217 s. ISBN: 1-57820-124-1
- [53] JavaFX , Dostupný z WWW : <http://javafx.com/learn/>
- [54] AVR2014: AT86RF230 Receiver sensitivity measurements , Dostupný z WWW : http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8115.pdf
- [55] Mann Burkhard C pro mikrokontroléry, BEN - technická literatura. 2003, 280 s. ISBN 80-7300-077-6.
- [56] Schneider electric - Zigbee Wifi Coexistence Dostupný z WWW : http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=13184

Zoznam príloh

Príloha č. 1	Zapojenie modulu Zigbit
Príloha č. 2	Schéma hardvérovej platformy Mininode
Príloha č. 3	DPS hardvérovej platformy
Príloha č. 4	DPS Nabíjačka Li-ion článkov a komunikačný prevodník USB/UART

Obsah DVD nosiča

\Bitcloud	Bitcloud stack pre Mininode hardvérovú platformu
\Lowpower	Demonštračná aplikácia
\Datasheets	katalógové listy k hardvérovej platforme
\DPS	DPS harvérovej platformy a doplnkovej dosky (nabíjačka+usb)

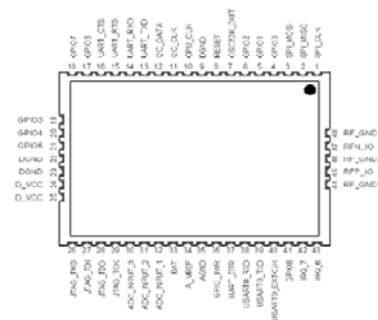
Príloha č.1

Zapojenie Zigbit modulu

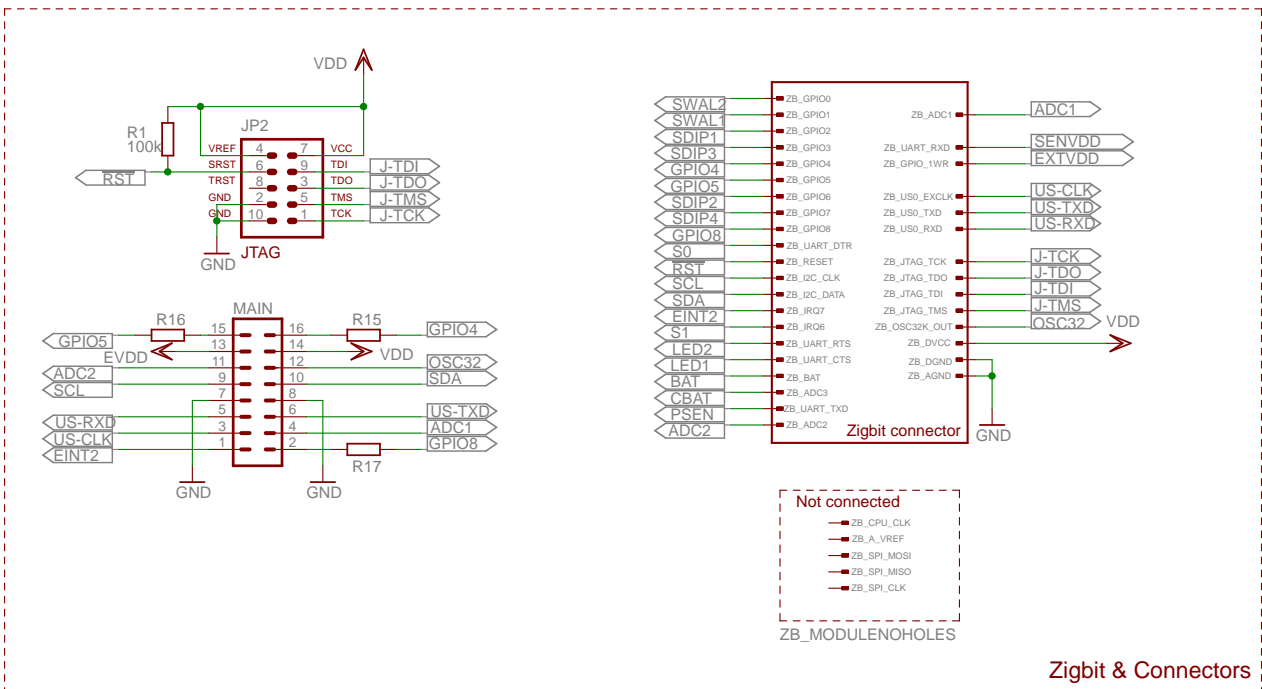
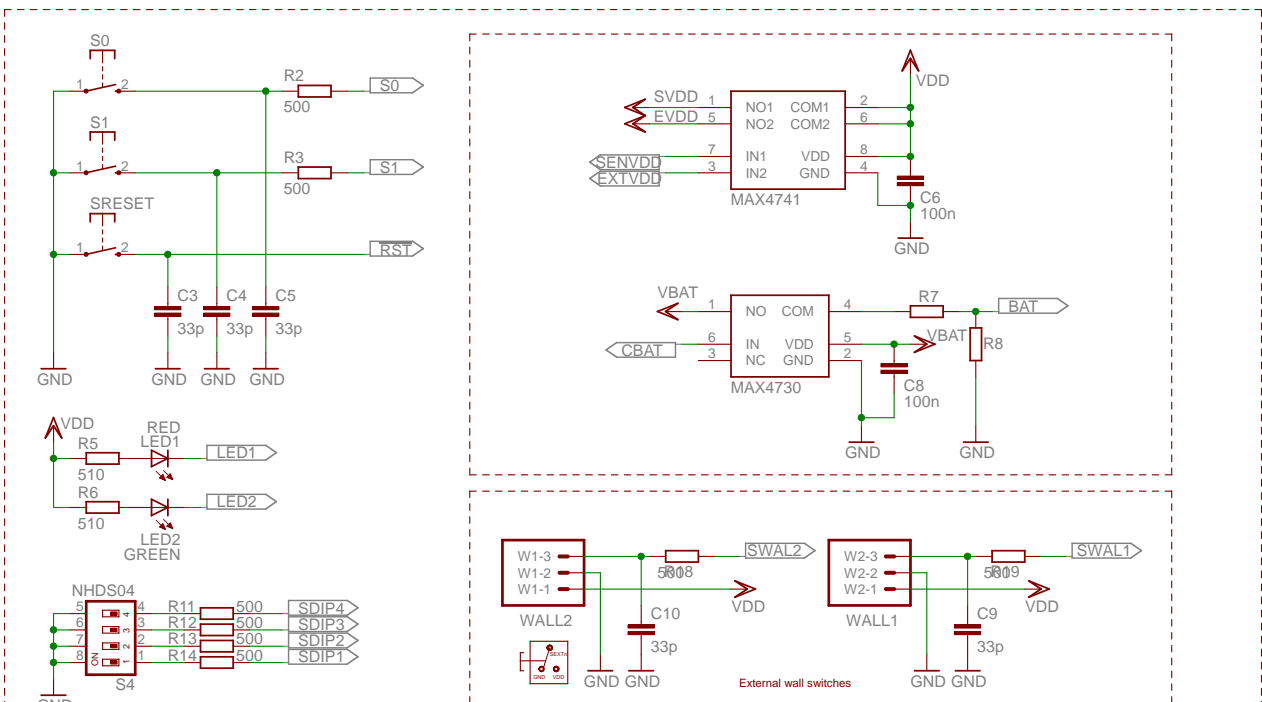
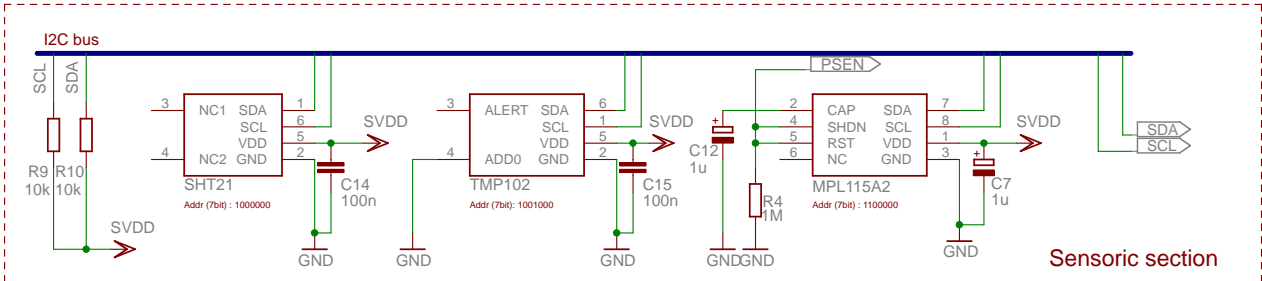
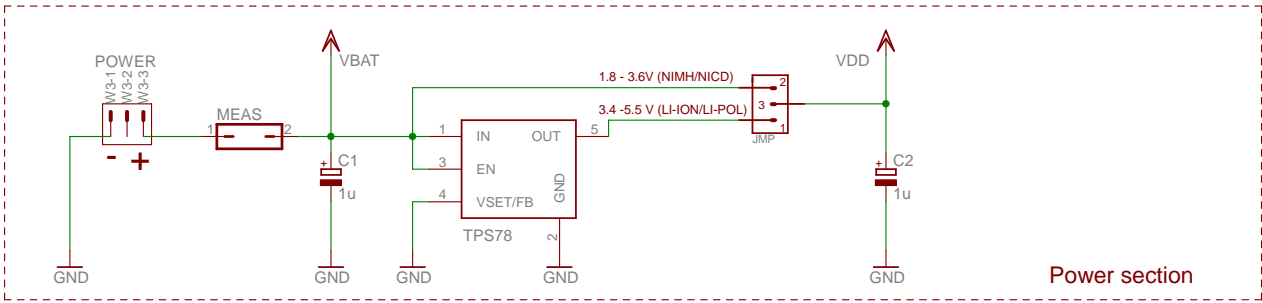
Zigbit PIN	Zigbit Name	Atmega1281 PIN	ATmega1281 Name	Atmega1281 description
1	SPI_CLK	11	PB1	SCK/PCINT1
2	SPI_MISO	13	PB3	MISO/PCINT3
3	SPI_MOSI	12	PB2	MOSI/PCINT2
4	GPIO0	15	PB5	OC1A/PCINT5
5	GPIO1	16	PB6	OC1B/PCINT6
6	GPIO2	17	PB7	OC0A/OC1C/PCINT7
7	OSC32K_OUT	18	PG3	TOSC2
8	RESET	20	RESET	!RESET
9,22,23	DGND	22	GND	-
10	CPU_CLK	24	XTAL1	-
11	I2C_CLK	25	PD0	SCL/INT0
12	I2C_DATA	26	PD1	SDA/INT1
13	USART1_TXD	27	PD2	RXD1/INT2
14	USART1_RXD	28	PD3	TXD1/INT3
15	USART1_RTS	29	PD4	ICP1
16	USART1_EXTCLK, USART1_CTS	30	PD5	XCK1
17	GPIO6	31	PD6	T1
18	GPIO7	32	PD7	T0
19	GPIO3	33	PG0	!WR
20	GPIO4	34	PG1	!RD
21	GPIO5	43	PG2	ALE
24,25	D_VCC	21	VCC	-
26	JTAG_TMS	56	PF5	ADC5/TMS
27	JTAG_TDI	54	PF7	ADC7/TDI
28	JTAG_TDO	55	PF6	ADC6/TDO
29	JTAG_TCK	57	PF4	ADC4/TCK
30	ADC_INPUT3	58	PF3	ADC3
31	ADC_INPUT2	59	PF2	ADC2
32	ADC_INPUT1	60	PF1	ADC1
33	BAT	61	PF0	ADC0
34	A_VREF	62	AREF	AREF
35	AGND	63	GND	-
36	GPIO_1WR	1	PG5	OC0B
37	USART1_DTR	6	PE4	OC3B/INT4
38	USART0_RXD	2	PE0	RXD0/PCINT8/PDI
39	USART0_TXD	3	PE1	TXD0/PDO
40	USART0_EXTCLK	4	PE2	XCK0/AIN0
41	GPIO8	5	PE3	OC3A/AIN1
42	IRQ_7	9	PE7	ICP3/CLKO/INT7
43	IRQ_6	8	PE6	T3/INT6

ISP pinout :	
ISP_MISO	USART0_TXD
ISP_MOSI	USART0_RXD
ISP_SCK	SPI_CLK
RESET, GND, VCC	RESET, GND, VCC

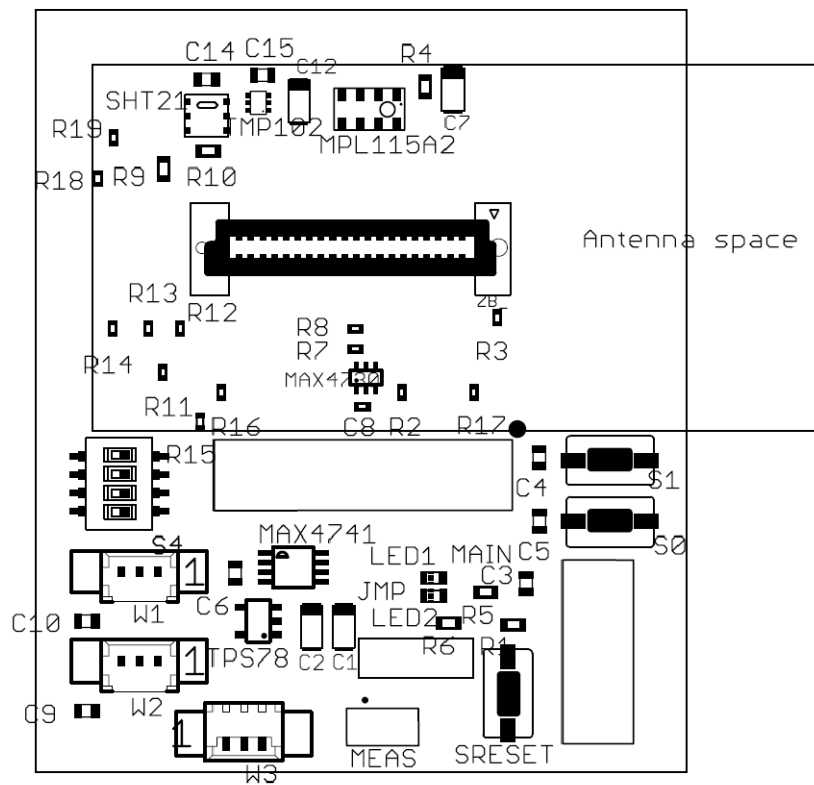
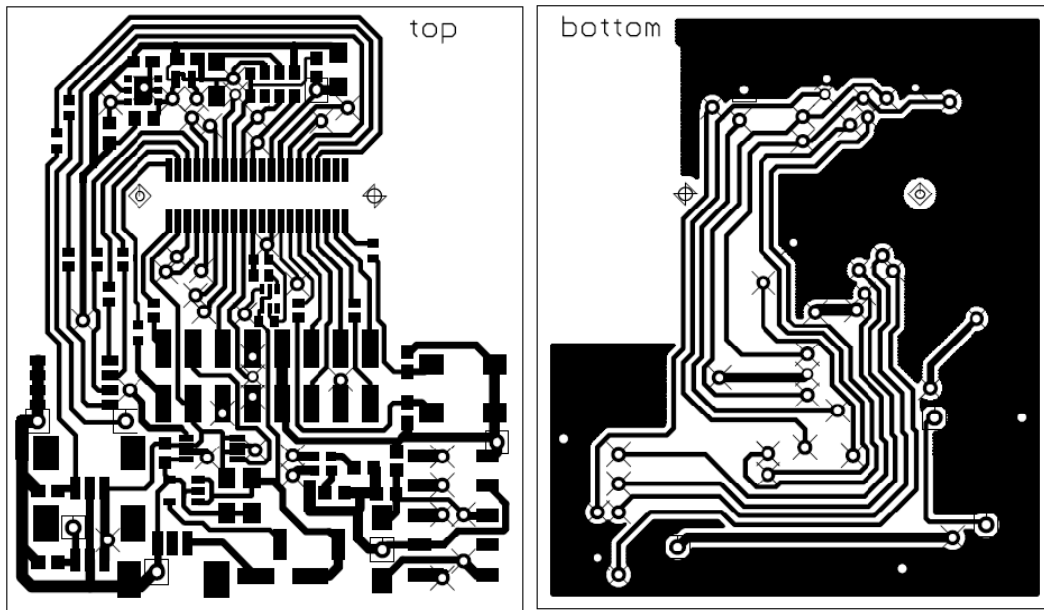
Pin	AT86RF230	Pin	ATmega1281
7	TST	-	GND
8	RST	44	PA7 (AD7)
11	SLP_TR	14	PB4 (OC2A/PCINT4)
17	CLKM	24	XTAL1
19	SCLK	11	PB1 (SCK/PCINT1)
20	MISO	13	PB3 (MISO/PCINT3)
22	MOSI	12	PB2 (MOSI/PCINT2)
23	SEL	10	PB0 (SS/PCINT0)
24	IRQ	7	PE5 (OC3C/INT5)



Príloha c.2 , schéma hardvérovej platformy



Príloha č. 3 , DPS a osadzovací plán hardvérovej platformy



Príloha č.4 : Nabíjačka Li-ion akumulátorov + konvertor UART/USB, schéma , DPS, osadzovací plán

