

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

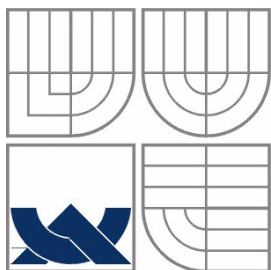
TECHNOLOGIE SENZOROVÝCH SÍTÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

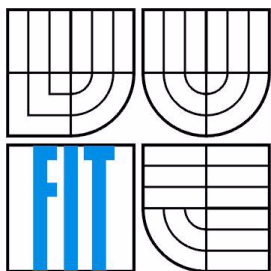
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV KOVAL

BRNO 2007



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

TECHNOLOGIE SENZOROVÝCH SÍTÍ

TECHNOLOGY OF SENSOR NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV KOVAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Mgr. ROMAN TRCHALÍK

BRNO 2007

Zadání diplomové práce

Řešitel: **Koval Miroslav, Bc.**

Obor: Informační systémy

Téma: **Technologie senzorových sítí**

Kategorie: Počítačové sítě

Pokyny:

1. Seznámte se s technologií senzorových sítí. Zaměřte se především na technologii ZigBee. Popište základní standardy a specifikace.
2. Návrhněte aplikační bránu pro sadu vývojových ZigBee kitů od Microchipu.
3. Implementujte Vámi navrženou aplikační bránu.
4. Ověřte správnou funkčnost pomocí demonstrační aplikace.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a možnosti dalšího rozšíření projektu.

Literatura:

- M. Ilyas and I. Mahgoub, (Eds.), Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA, 2004.
- National Institute of Standards and Technology, NIST IEEE 1451, <http://www.motion.aptd.nist.gov>
- ZigBee Alliance: ZigBee Specification v 1.0. ZigBee Alliance Board of Directors, 2004. <http://www.zigbee.org/>
- IEEE P1451.1 D1.83, Draft Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators -- Network Capable Application Processor (NCAP) Information Model. IEEE, New York, December 1996
- IEEE P1451.2 D3.05, Draft Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators -- Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEEDS) Formats, IEEE, New York, August 1997

Při obhajobě semestrální části diplomového projektu je požadováno:

- 1 a 2 bod zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci ročníkového a semestrálního projektu (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním paměťovém médiu (disketa, CD-ROM), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Trchalík Roman, Mgr., UIFS FIT VUT**

Datum zadání: 28. února 2006

Datum odevzdání: 22. května 2007

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav informačních systémů
602 00 Brno, Božetěchova 2

doc. Ing. Jaroslav Zendulka, CSc.
vedoucí ústavu

Licenční smlouva

Licenční smlouva je uložena v archivu Fakulty informačních technologií Vysokého učení technického v Brně.

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá technológiou bezdrôtových senzorových sietí, špeciálne ZigBee. Delí na dve časti – teoretickú a praktickú. Teoretickú časť tvoria kapitoly popisujúce protokoly, normy a štandardy, na ktorých je technológia ZigBee založená. Porovnávajú siete ZigBee s ostatnými dostupnými bezdrôtovými sieťami a pojednávajú o ich vlastnostiach. Praktická časť je založená na vlastnostiach dostupných ZigBee zariadení a zahŕňa komunikáciu medzi uzlami v sensorovej sieti, vlastnú aplikáciu ZigBee, návrh a implementáciu aplikačnej brány pre sprístupnenie siete ZigBee z internetu. Problémom, ktoré sa pri poznávaní tejto technológie vyskytli je vyhradená špeciálna kapitola, v ktorej sú uvedené možnosti ako ich odstrániť, či prípadne vylepšiť celý projekt.

Klíčová slova

Senzorové sítě, IEEE 1451, IEEE 802.15.4, ZigBee, PICDEM Z kit, aplikační brána, bezdrátové sítě.

Abstract

This diploma thesis deals with sensor networking technology, namely about ZigBee. This work consists of two parts – theoretical and practical. The theoretical part is created by some chapters which describe protocols and standards which compose a bases to ZigBee technology. Some parts of this chapter compare ZigBee network with the other wireless solutions and deals with their features. Practical parts is based on properties of available ZigBee devices and summarize communication among sensor network nodes, own ZigBee application, application gateway design and its implementation for ZigBee network monitoring and control from Internet. The last chapter is devoted to discussion about problems and their solutions alternatively about suggestions of next study and improvement this project.

Keywords

Sasor network, IEEE 1451, IEEE 802.15.4, ZigBee, PICDEM Z kit, application gateway, wireless networks.

Citace

Miroslav Koval: Technologie senzorových sítí, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2007

Technologie senzorových sítí

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Romana Trchalíka.

Další informace mi poskytli Ing. Václav Šimek.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Miroslav Koval
22.5.2007

© Miroslav Koval, 2007.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

OBSAH	1
1 ÚVOD	3
2 BEZDRÔTOVÉ TECHNOLOGIE, WPAN	4
2.1 BLUETOOTH	4
2.2 ZIGBEE.....	5
2.3 ULTRAWIDEBAND	5
2.4 WIRELESSUSB.....	5
2.5 WIBREE.....	5
2.6 WIRELESSHD.....	6
3 SENZOROVÉ SIETE ZIGBEE	7
3.1 IEEE 1451.....	8
3.2 IEEE 802.15.4.....	10
3.2.1 <i>Fyzická vrstva</i>	10
3.2.2 <i>Linková vrstva</i>	11
3.3 ZIGBEE.....	12
3.3.1 <i>ZigBee Alliance</i>	13
3.3.2 <i>Aplikácie ZigBee</i>	13
3.3.3 <i>Komunikačný model ZigBee</i>	13
3.3.4 <i>Typy uzlov</i>	14
3.3.5 <i>Topológie siete</i>	15
3.3.6 <i>Adresovanie</i>	15
3.3.7 <i>Typy správ</i>	16
3.3.8 <i>Sieťové deskriptory</i>	16
3.4 KOMUNIKÁCIA V SIETI ZIGBEE NA ÚROVNI APLIKAČNEJ VRSTVY	17
3.4.1 <i>Vytvorenie siete</i>	18
3.4.2 <i>Pripojenie uzla do siete</i>	18
3.4.3 <i>Voľba komunikácie</i>	19
3.4.4 <i>Zasielanie správ</i>	20
3.4.5 <i>Zasielanie správy na žiadosť RFD</i>	21
3.4.6 <i>Opustenie siete</i>	21
4 NÁVRH	22
4.1 APLIKAČNÁ BRÁNA.....	22

4.2	NÁVRH I.....	23
4.3	POPIS VÝVOJOVÉHO KITU FIRMY MICROCHIP.....	24
4.3.1	<i>Základná doska</i>	24
4.3.2	<i>Karta PICDEM Z 2,4 GHz RF</i>	25
4.4	NÁVRH II.....	25
5	IMPLEMENTÁCIA.....	28
5.1	FIRMWARE PRE VÝVOJOVÉ KITY.....	28
5.2	KOORDINÁTOR.....	29
5.2.1	<i>Zasielanie príkazov</i>	31
5.2.2	<i>Lighting profile</i>	31
5.2.3	<i>Temperature Profile</i>	31
5.2.4	<i>Prerušená a ich obsluha, buffer</i>	31
5.2.5	<i>Externé príkazy</i>	32
5.3	RFD.....	34
5.3.1	<i>Lighting Profile</i>	35
5.3.2	<i>Temperature Profile</i>	35
5.4	APLIKAČNÁ BRÁNA.....	35
5.5	WEBOVÉ UŽIVATELSKÉ ROZHRAVIE – GUI.....	37
6	PROBLÉMY A NÁVRHY NA ROZŠÍRENIE.....	38
7	ZÁVER.....	39
	LITERATURA.....	40
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV.....	42
	ZOZNAM PRÍLOH.....	44
	PRÍLOHY.....	45

1 Úvod

Počítače vtrhli do života každého z nás, a viac či menej ho ovplyvnili. Stali sa našimi každodennými spoločníkmi a niekedy si bez nich deň ani nevieme predstaviť. Pomáhajú nám uľahčovať náročnú alebo rutinnú činnosť, umožňujú odvádzať kvalitnejšiu prácu na profesionálnej úrovni, ale často nám aj spríjemňujú voľné chvíle a poskytujú zábavu. Časy, kedy pojem počítač zastával iba osobný počítač typu server alebo pracovná stanica (workstation) sú dávno preč. Medzičasom totiž počítače prešli revolučnou zmenou a aj napriek tomu, že vo svojej podstate ostali verní svojej činnosti, počítať dáta, si bežní užívatelia ani neuvedomujú, že ide rovnako o počítače. Reč je o vstavaných mobilných zariadeniach, ktoré zo sebou nosíme ako svoje osobné MP3 prehrávače, mobilné telefóny, fotoaparáty a množstvo inej elektroniky ako pračky, DVD prehrávače, televízory, mikrovlnky, chladničky... Áno, to všetko sú dnes počítače.

Ďalším veľkým krokom, ktorý sa pripísal na zmenu vo vývoji počítačov bol príchod sietí. Myšlienka možnosti ovládať a sprístupniť zariadenie takmer odkiaľkoľvek na svete, bola jednoducho úžasná. V súčasnosti si uplatnenie našla i bezdrôtová komunikácia, ktorá so sebou nesie opäť množstvo výhod a možností. Kamkoľvek sa pohnete, ste v sieti. Dnes už nie je výnimkou, že bezdrôtovým signálom sú pokryté nielen rôzne inštitúcie – firmy, univerzity, nákupné centrá, ale aj celé štvrte miest. Vďaka technologickému pokroku sa sieťam začali vylepšovať parametre a začali sa špecializovať podľa toho, akému účelu majú slúžiť. Tak vznikli širokopásmové siete, siete s vysokou prenosovou rýchlosťou, určené pre veľký alebo malý objem dát, s jednoduchou i zložitou hierarchickou štruktúrou. Každý technický pokrok však so sebou nesie aj množstvo problémov. Jedným z nich je aj bezpečnosť takýchto sietí. Často práve kvôli bezpečnosti sa musíme mnohých výhod a jednoduchosť riešenia vzdať. Dôvodmi je potreba autentifikácie, obmedzenie typu služieb v sieti či znižovanie rýchlosti vplyvom prenosu rôznych metadát.

Siete ZigBee, o ktorých pojednáva táto práca sú takzvané ad hoc bezdrôtové (wireless - wifi) senzorové siete, kde koncové uzly sú tvorené senzormi (resp. akčnými členmi) vybavenými ďalšími elektronickými obvodmi, ktoré sú schopné senzor v sieti jednoznačne identifikovať a byť nimi vzdialene riadené. Príkladom je bezkontaktná identifikácia a riadenie prístupu, ovládanie osvetlenia a ventilácie v dome, bezpečnostné a zabezpečovacie systémy, monitoring neprístupných oblastí a množstvo ďalších. Praktické použitie a masové nasadenie tejto technológie si vyžiadalo stanovenie štandardov a noriem, ktoré je potreba pre univerzálnosť a kompatibilitu pri návrhu a výrobe týchto zariadení dodržiavať. Práca sa zaoberá aj pokročilejšími znalosťami technológie ZigBee, ktorej pochopenie bolo nevyhnutné pre ďalšiu prácu.

Ďalšie kapitoly sa zaoberajú praktickými skúsenosťami v tejto oblasti. Ide o návrh a následnú realizáciu aplikačnej brány pre sprístupnenie siete ZigBee z internetu. Praktická časť bola realizovaná na základe dostupných technických prostriedkov. Samotná programová časť pozostáva z niekoľkých firmwarov pre komunikačné uzly siete ZigBee, aplikácie bežiacej na počítači, ktorá predstavuje pripojenie do vonkajšieho sveta a nakoniec samotnej webovej aplikácie. Tá nám umožňuje vďaka grafickému rozhraniu monitorovať a ovládať jednotlivé prvky siete.

V závere som zhrnul poznatky, ktoré som počas tvorby nadobudol, problémy, na ktoré som narazil a tak isto návrh pre ďalšie vylepšenia a štúdie.

2 Bezdrôtové technológie, WPAN

V súčasnosti bezdrôtové technológie tvoria vo svete takmer 50 percent obratu za telekomunikačné služby, čo svedčí o neutíchajúcom záujme ľudí túto technológiu využívať. Pokles si môžeme predstaviť len ťažko a môžeme predpokladať skôr opačný trend.

Bezdrôtovú komunikáciu rozdeľujeme na dva základné typy, WLAN a 3G. Ide o technológie, ktoré už majú položené svoje základy a ukazujú, ktorým smerom sa komerčná sféra bude uberať. Navyiac, každoročne pribúda množstvo nových aplikácií, založených na práve na týchto štandardoch.

Jedným z parametrov sietí, s ktorým prevádzkovatelia, ale aj sami tvorcovia štandardov bojujú, je priepustnosť siete - snaha získať čo najvyššiu prenosovú rýchlosť. Problémom býva však často mobilita užívateľa. U technológie UMTS bolo dosiahnutých 2 Mbit/s, čo je ale maximálna hodnota na fyzickej vrstve pre nepohybujúceho sa užívateľa. S pohybom, prípadne zvyšujúcou sa rýchlosťou priepustnosť prudko klesá. (Špecifikácie Release 99). V súčasnosti by však už mala byť u prevádzkovateľov nasadená technológia umožňujúca prenos 1,8 Mbit/s až 3,6 Mbit/s, špecifikácia 3GPP Release 5. O niečo ďalej sú Japonci (DoCoMo), ktorí predpokladajú v najbližších dobe nasadenie siete 4G, využívajúce antény systém MIMO (Multiple Input Multiple Output) s rýchlosťou až 1 Gbit/s. Snahu urýchliť komunikáciu majú aj výrobcovia WLAN, kde pripravovaná norma IEEE 802.11n má umožniť prenos 108 Mbit/s. Zaujímavé riešenia ponúkajú aj rôzne európske a svetové projekty. Napríklad, nemecký projekt WIGWAM (Wireless Gigabit with Advanced Multimedia Support) ponúka koncept pre siete s krátkym dosahom, rýchlosť 1 Gbit/s. Riešenie je určené podnikovým a domácim sieťam, vrátane mobilného prístupu. Predpokladá sa použitie pásma 5 GHz (kanály 20 MHz až 100 MHz) a 60 GHz (kanály 500 MHz).

Riešenie pre zvýšenie rýchlosti u osobných sietí WPAN (Wireless Personal Area Network) a to hlavne pre multimediálne použitie v domácich sieťach sa rysovalo založením normy na báze širopásmových sietí UWB (UltraWideBand). Žiaľ, pre nezhody a neschopnosť dohodnúť sa skupín v IEEE, bola skupina 802.15.3a pre rýchle WPAN, definitívne rozpustená. Na túto normu chcela nadviazať aj skupina 802.15.1, zaoberajúca sa technológiou Bluetooth, ktorá je v oblasti osobných sietí jednou z vedúcich na súčasnom trhu.

Napriek trendu „zrýchľovať“, najväčší a hlavne úspešný rozvoj v súčasnosti zaznamenávajú siete s malou prenosovou rýchlosťou a minimálnou spotrebou elektrickej energie – senzorové siete. Osobné siete alebo siete s krátkym dosahom WPAN sú charakteristické možnosťou väčšieho pokrytia, malou spotrebou elektrickej energie koncových zariadení a hlavne množstvom nových aplikácií. Tým všetkým si získavajú senzory a RFID popularitu v najrôznejších oblastiach komunikácie. Tak vznikajú aj nové odvetia ako pervasive a wearable computing. [16]

2.1 Bluetooth

BT je prvou z technológií, ktorá sa dočkala toho, že bola definovaná štandardom IEEE 802.15.1 (r. 1999 verzia BT 1.1) a vďaka tomu, došlo k rozšíreniu. Za vývojom stáli popredné firmy ako Ericsson, IBM, Nokia a Toshiba, čo bolo dostatočnou zárukou nasadenia na trh. BT sa teší obľube hlavne v oblasti mobilných zariadení a komunikácie medzi nimi a počítačmi. BT je určené pre komunikáciu do vzdialenosti 10m, pričom podľa normy spolu môže komunikovať v sieti maximálne 7 zariadení. Komunikácia prebieha spôsobom master-slave, a šifrovanie prebieha podobne ako vo WLAN pomocou 128-bit WEP kľúča. Prenosová rýchlosť je za ideálnych podmienok maximálne 1 Mbit/s,

ale praktické skúsenosti potvrdili, že ak sieť obsahuje viac ako 4 zariadenia, dochádza ku konfliktom a výrazne sa znižujú jej parametre. Využíva pásmo 2,4 GHz s 79 kanálmi o šírke 1 MHz. [15]

2.2 ZigBee

Komunikačný štandard vyvinutý IEEE (IEEE 802.15.4) a ďalej rozvíjaný a podporovaný ZigBee Alliance (ZBA), ktorej členovia sú poprední výrobcovia elektronických súčiastok. ZigBee predstavuje jednoduchú bezdrôtovú sieť s prenosom dát v pásme 2,4 GHz na vzdialenosť niekoľko sto metrov, s minimálnou spotrebou elektrickej energie a prenosovou rýchlosťou 20 – 250 kbit/s. Sieť môže obsahovať tisíce zariadení. Prenášané dáta sú obvykle jednoduché správy o stave zariadenia, prípadne hodnote nameranej senzormi. Vďaka možnosti mesh topologie je technológia pokryť aj veľké plochy.

2.3 Ultrawideband

UWB je univerzálna technológia schopná slúžiť pre rýchle prenosi multimédií v domácich sieťach, aj pre pomalé senzorové siete. Ide o rádiovú technológiu s vysielaním v širokom frekvenčnom pásme. Vzhľadom k nízkemu výkonu vysielaného signálu nedochádza k rušeniu s ostatnými sieťami operujúcimi na frekvencii 2,4 GHz. Ponúka prenosové vlastnosti až 1 Gbit/s. Žiaľ, táto technológia sa nedočkala normalizácie napriek tomu, že sa o to usiloval podvýbor IEEE 802.15.3a. Skupina bola rozpustená po tom, čo sa dlho nevedeli dohodnúť na jednotnom riešení. Napriek tomu, UWB pokračuje vo forme rôznych projektov ako sú PULSERS, UCAN a ULTRAWAVES. [13]

2.4 WirelessUSB

Ide o vlastný protokol vyvinutý spoločnosťou Cypress Semiconductors (CS), ktorý predstavuje lacnejšie riešenie pre pripájanie periférnych zariadení HID (Human Interface Devices) k počítačom. Klávesnice a myši nepotrebujú viac ako 2 kbit/s, pričom wirelessUSB umožňuje až 64 kbit/s. Operuje sa v pásme 2,4 GHz na 79 kanáloch. Vzdialenosť medzi zariadeniami môže byť 10m, pričom je možné použiť zosilňovače, ktoré vzdialenosť zvýšia až na 100m. V tomto je veľmi podobná technológii Bluetooth. Sieť má podporu sleep módu, čo umožňuje šetriť batériu (1 μ A – sleep mode). Týmto sa technológia približuje ZigBee. Pre spomenuté štandardy predstavuje slušného konkurenta. Nevýhodou je, že za wireless USB stojí jediná firma a technológia nie je ustanovená v žiadnej norme. Zaujímavým kritériom môže byť to, že cena chipu pre wirelessUSB je polovičná s cenou chipu ZigBee. [6], [13]

2.5 WiBree

Jednou z najnovších technológií na trhu v oblasti bezdrôtových sietí s krátkym dosahom je WiBree. Funkčnými vlastnosťami sa takmer ničím nelíši od Bluetooth. Ponúka komunikáciu na vzdialenosť do 10 m, pásmo 2,4 GHz a prenosovú rýchlosť 1 Mbit/s. Výhody tohto riešenia sú skôr vo výrobných a prevádzkových nákladoch. Koncové zariadenia majú nižšiu spotrebu (80% spotreby BT), je možné ho implementovať na menšej ploche a cena integrovaného obvodu je menšia ako 1 dolár. Existuje tu aj možnosť implementovať technológiu na duálnom čipe spolu s BT. Budúcnosť WiBree nie je jasná, lebo ju podporuje len jej výrobca Nokia a prípadná norma je zatiaľ v nedohľadne. Samotné WiBree

by mohlo zastávať hlavne okrajový trh s najmenšími zariadeniami, prípadne siete pre monitoring zdravotného stavu človeka v oblasti lekárstva, tzv. BAN (Body Area Network). Do týchto oblastí zatiaľ BT nevstúpilo. [14]

2.6 WirelessHD

Posledná technológia je určená pre multimediálnu zábavu, vyžadujúcu gigabitové prenosové rýchlosti. Súčasná WiFi na prenos obrazu vysokého rozlíšenia HD (High Definition) a vôbec audio – video dát nestačí. Vážne sa uvažovalo o nadviazaní na technológiu UWB, ale žiaľ podpora v tejto oblasti skončila a výrazný posun nemožno očakávať. Snahou WirelessHD (WiHD) je konkurovať a prieniesť do bezdrôtovej oblasti rozhranie HDMI (High-Definition Multimedia Interface) používané v nových typoch TV, STB a DVD prehrávačov s vysokým rozlíšením. Rozhranie HDMI poskytuje až 10 Gbit/s. WiHD by malo byť náhradou za káble. WiHD má pracovať v pásme 60 GHz (pripravovaná norma IEEE 802.15.3c s priepustnosťou 2 – 3 Gbit/s). V budúcnosti sa predpokladá priepustnosť až 20 Gbit/s. Za novou špecifikáciou budú stáť popredné firmy spotrebnej elektroniky ako Sony, Samsung, LG Electronics, Matsushita (Panasonic), NEC, Toshiba a iné, čo dáva technológii sľubné vyhliadky do budúcnosti. [14]

	GPRS/GSM	Wi-Fi 802.11b	Bluetooth 802.15.1	ZigBee 802.15.4
Aplikácie	Hlasové a dátové služby	Web, Email, Video	Náhrada za kábel	Monitoring, riadenie
Systémové zdroje (pamäť)	16 MB +	1 MB +	250 kB +	4 kB – 32 kB
Životnosť batérie (dni)	1 – 7	0,5 – 5	1 – 7	100 – 1000+, rádovo roky
Počet uzlov (zariadení) v sieti	1	32	7	2 ⁶⁴
Prenosová rýchlosť (kb/s)	64 – 128	11 000	720	20 – 250
Komunikačný dosah (m)	1000 +	1 – 100 +	10	1 – 100 +
Výhody	Dostupnosť, kvalita	Rýchlosť, flexibilita	Cena, jednoduchosť	Spoľahlivosť, výkon/cena

Tab. 1 : Parametre niektorých typov sietí.

Tabuľka uvedená vyššie uvádza prehľad parametrov a vlastností rôznych typov bezdrôtových sietí. Líšia hlavne kvôli rozdielnosti ich aplikačného použitia. Na prvý pohľad sieť ZigBee je porovnateľná s GSM/GPRS sieťou, no žiaľ nedosahuje jej komunikačný dosah. Na druhej strane je neporovnateľne lacnejšia a menej náročná na prevádzku oproti všetkým ostatným typom sietí.

3 Senzorové siete ZigBee

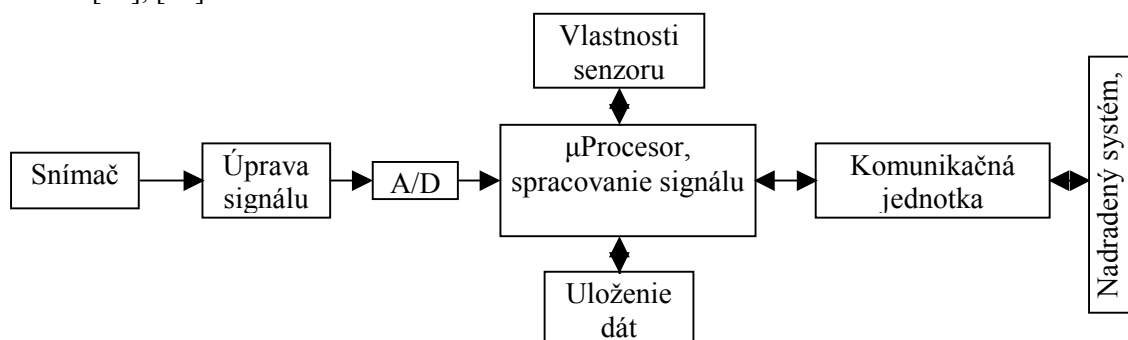
Pod senzorovými sieťami si väčšina ľudí predstaví sieť senzorov, ktoré sú schopné zmerať niektorú z fyzikálnych veličín a zaslať jej hodnotu centrálnej jednotke. Je to pravda, ale ani zďaleka nie všetko, čo tieto siete ponúkajú. Za pojmom senzorové siete sa toho skrýva oveľa viac.

Senzor je snímač, schopný zmerať fyzikálnu, chemickú alebo biologickú hodnotu veličiny a reprezentovať ju na výstupe, najlepšie ako elektrický signál. V tejto práci pojem senzor predstavuje aj akčný člen, ktorý práve naopak, na základe elektrického signálu generuje výstup. Výstupom môže byť zopnutie nejakého väčšieho zariadenia, prípadne jeho riadenie či regulácia.

Inteligentný snímač je rozšírenou verziou svojho jednoduchého predchodcu. Rovnako obsahuje obvody pre úpravu meranej veličiny a navyše A/D prevodník, mikroprocesor pre ďalšie spracovanie a vyhodnocovanie a jednotku pre komunikáciu s ostatnými senzorami v sieti. Vlastnosti inteligentného (SMART) senzoru by sa dali charakterizovať nasledovne:

- meranie vstupnej veličiny alebo viacerých veličín, spracovanie s ohľadom na skreslenie vonkajšími vplyvmi a prevod na digitálny signál,
- konfigurácia vlastných parametrov (rozsah, typ výstupného signálu, voľba filtrov),
- komunikácia s nadradeným systémom pomocou sieťovej jednotky (nezávislosť na typu prenosového média).

Senzor je možné považovať a za modulárny systém, kde jednotlivé bloky zastávajú niektorú z činností. [11], [21]



Obr. 1: Model inteligentného senzoru.

S príchodom nových technológií si často každý výrobca presadzuje práve svoje riešenie, ktoré nie je vždy kompatibilné s produktami iných výrobcov. Aby sa predišlo prípadným konfliktom pri vzájomnej komunikácii, organizácia IEEE vlastnosti inteligentného senzoru normovala štandardom IEEE 1451. Bližšie o ňom pojednáva jedna z nasledujúcich podkapitol.

Senzorové siete patria medzi WPAN siete s krátkym dosahom (rádovo 10 m). Uplatnenie tohto typu siete môžeme nájsť na najrozličnejších miestach:

- správa budov typu HVAC (kúrenie, ventilácia, klimatizácia), riadenie osvetlenia
- RFID čipy –bezdrôtová identifikácia pomocou bezkontaktných čidiel,
- zdravotníctvo – monitoring životných funkcií,
- ovládanie spotrebnej elektronika audio, video,
- periférne zariadenia – myš, klávesnica,
- a iné.

Typy a sféry nasadenia uvedených aplikácií prezrádzajú, že u sietí tohto typu nebude kritickým parametrom ani prenosová rýchlosť ani čas, preto je technológia nevhodná pre prenos multimediálnych dát. Dôraz sa kladie hlavne na dlhú výdrž batérie, ktorou je zariadenie napájané, kde sa funkčnosť požaduje rádovo v rokoch. To znamená, že koncové zariadenie musí mať minimálnu spotrebu a musí byť čo najjednoduchšie. Po väčšinu času je zariadenie v stave spánku, a len keď sa požaduje zaslať nameranú hodnotu je z tohto stavu zobudené. Po vykonaní požadovanej činnosti, obvykle veľmi jednoduchej, je zariadenie znovu uvedené do úsporného režimu. Oblasťou pomalých bezdrôtových WPAN sietí s malou prenosovou rýchlosťou (20 – 250 kbit/s) sa zaoberá IEEE 802.15.4. Štandard rieši ad hoc pripojenie ako mobilných tak i pevných zariadení. Popisuje fyzickú a linkovú vrstvu komunikačného modelu. Štandardu sa venuje niektorá z ďalších kapitol.

Na IEEE 802.15.4 priamo naväzuje štandard ZigBee. Oba sú spoločne úzko prepojené, lebo ZigBee ako jediný je podložený normou a štandard IEEE bol navrhovaný práve pre aplikácie ZigBee. Štandard ZigBee je založený a rozvíjaný inštitúciou ZigBee Alliance, ktorá pozostáva z popredných výrobcov elektronických súčiastok. Štandard zahŕňa skupinu protokolov vyšších vrstiev, vrátane časti aplikačnej vrstvy.

3.1 IEEE 1451

“A Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators”

“Inteligentné rozhranie pre prevodníky snímačov a akčných členov”

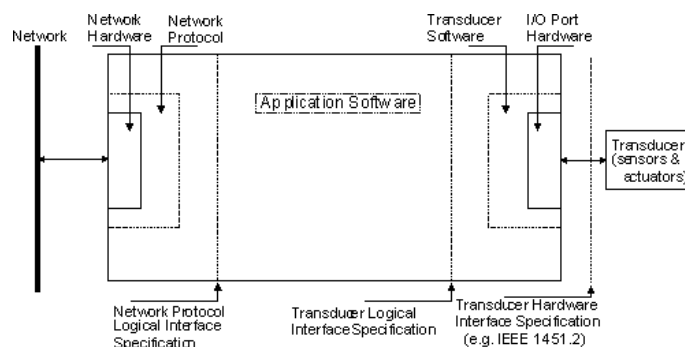
IEEE 1451 je skupina niekoľkých štandardov. Pojednáva o pripojení snímačov a akčných členov (senzorov) do nadradenej siete spôsobom *plug-and-play*. Štandardy sa zaoberajú návrhom senzora od základných pojmov, cez komunikáciu prevodníka s mikroprocesorom až po nezávislý objektový model a integráciou priemyslových sietí do intranetu. Kľúčovým pojmom je definícia TEDS. Ide o vstavaný elektronický katalógový list, ktorý identifikuje a charakterizuje samotný senzor. Obsahuje informácie ako typ, výrobcu, parametre, kalibračné konštanty a iné vlastnosti senzora. Pod IEEE 1451 spadá niekoľko nasledovných skupín.

IEEE P1451.0

Stanovuje základné množiny funkcií, nezávislých na komunikačných protokoloch a médiu. Zaoberá sa tiež koordinovaním činností ostatných skupín pre zachovanie vzájomnej kompatibility jednotlivých častí štandardu.

IEEE P1451.1

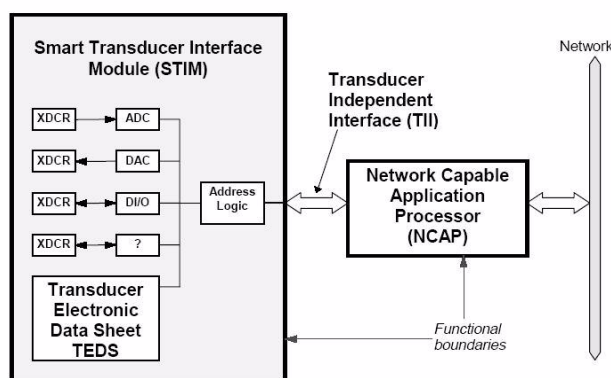
Popisuje možnosti jednoduchého pripojenia senzora k rôznym typom komunikačných sietí. Využíva k tomu objektový model pre senzor a pre tzv. *smart* senzor spolu s jeho špecifikáciami pre programovanie. Zároveň stanovuje základné metódy, dátové typy a prístup k nim. Základ tvorí modul NCAP (Network-Capable Application Processor). Štandardom sú podporované dva typy komunikácie, *klient-server* a *publish-subscribe*.



Obr. 2: Časti modelu senzoru tak, ako ho predstavuje IEEE 1451.1.

IEEE P1451.2

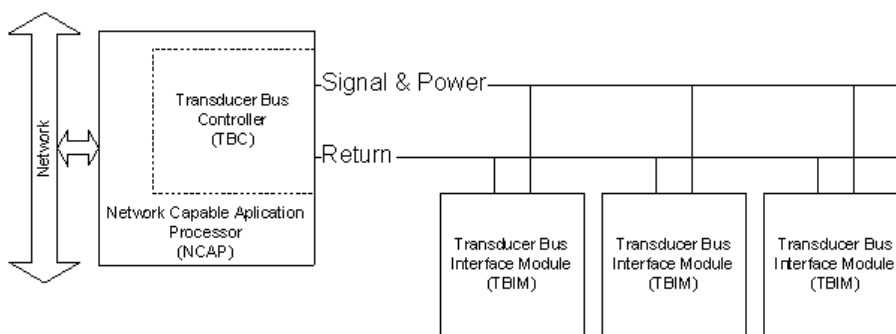
Popisuje prevodník (STIM - Smart Transducer Interface Module) a rozhranie TTI medzi prevodníkom a NCAP. Definuje TEDS pre *point-to-point* konfiguráciu. Pôvodný štandard popisuje komunikáciu založenú na sériovej linke SPI (Serial Peripheral Interface) s prídavným HW pre riadenie toku dát a časovanie, ale postupne do neho vnikajú aj modifikácie pre moderné sériové rozhrania UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) a USB (Universal Serial Bus).



Obr. 3: Model senzoru podľa IEEE 1451.2.

IEEE P1451.3

Definuje veľmi rýchlu digitálnu zbernicu s krátkym dosahom pre spojenie niekoľkých senzorov s modulom TBIM (*Transducer Bus Interface Module*). Ide o *multi-hop* verziu definovanú v IEEE P1441.2. Využíva k tomu komunikačný protokol HPNA (Home Phoneline Networking Alliance) a pár zdieľaných vodičov.



Obr. 4: Zbernicový systém IEEE 1451.3

IEEE P1451. 4

Definuje rozhranie MMI (Mixed-Module-Interface), umožňujúce použitie digitálnych aj analogových senzorov, ktoré je možné vybaviť TEDS. Rozhranie je tvorené dvojvodičovou analogovou linkou MicroLan (Dallas Semiconductors) s riadením *master-slave*.

IEEE P1451. 5

Dopĺňa do štandardu problematiku bezdrôtovej komunikácie v spojení so štandardami IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee), ktoré sú v norme zavedené ako typ fyzického rozhrania.

IEEE P1451. 6

Štandard pre bezpečnú funkčnosť v navrstvenej sieťovej štruktúre s riadiacimi jednotkami na každej vrstve. Transportná vrstva je tvorená CAN zbernicou, ktorá býva implementovaná v mikrokontroléroch.

[1], [8].

3.2 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 je jednou z piatich skupín podieľajúcich sa na stanovovaní štandardov v oblasti bezdrôtových sietí WPAN (Wireless Personal Area Network). Štandard sa zaoberá komunikáciou medzi zariadeniami s malou prenosovou rýchlosťou (vzhľadom k množstvu prenesených dát postačuje), nízkou zložitosťou a nízkym príkonom. Predpokladá sa napájanie batériou, ktorá má vydržať po dobu niekoľkých mesiacov, prípadne rokov. Význam takýchto prvkov je v spojení so senzormi, ktoré fungujú ako vzdialené riadiace a monitorovacie prvky v domácnosti či priemyselnej automatizácii. Po vydaní štandardu IEEE 802.15.4-2003 (Low Rate WPAN) skupina prerušila svoju činnosť. Namiesto nej vznikli ďalšie dve podskupiny, ktoré tento štandard analyzovali (15.4a), zlepšovali a inovovali (15.4b). Štandard sa dočkal revízie v podobe nového štandardu IEEE 802.15.4-2006.

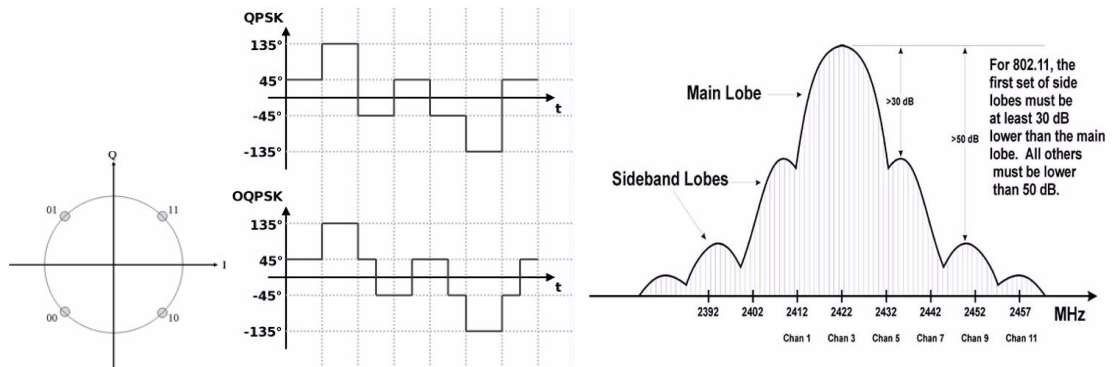
Štandard definuje fyzickú a linkovú MAC (Medium Access Control) vrstvu modelu ISO/OSI pre WPAN, na ktorých stavia štandard ZigBee.

3.2.1 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva určuje spôsob samotnej bezdrôtovej komunikácie na nasledovných rádiových pásmach:

- celosvetové použité - pásmo ISM, 2,4 GHz so 16 kanálmi a rýchlosťou 250 kb/s
- v Amerike a Austrálii – 915 MHz s 10 kanálmi a rýchlosťou 40kb/s
- v Európe – 868 MHz s 1 kanálom a prenosovou rýchlosťou 20 kb/s.

Signál pre dátový prenos je modulovaný pomocou O-QPSK (Offset quadrature phase-shift keying) a prenášaný prostredníctvom DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Pre prístup ku kanálu sa používa metóda CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).



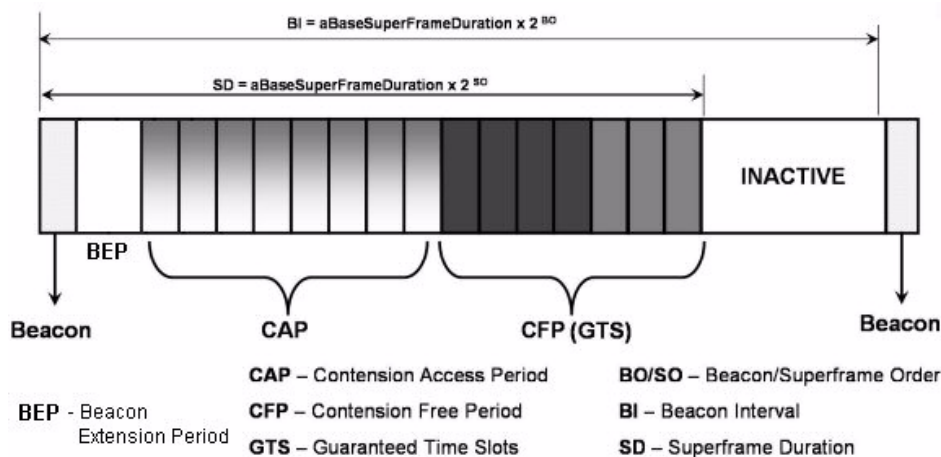
Obr. 5: Ukážka spôsobu kódovania O-QPSK a prenos signálu pomocou kanálov DSSS.

3.2.2 Linková vrstva

Na úrovni linkovej (MAC) vrstvy je definovaný potvrdzovaný protokol pre spoľahlivý prenos dátových rámcov, ktorými sa komunikuje medzi jednotlivými uzlami siete. Tie obsahujú buď užitočné dáta alebo informácie súvisiace so zostavovaním, správou a riadením siete. Poznáme štyri typy rámcov:

- **Data Frame** – slúži k prenosu užitočných dát
- **Acknowledgement Frame** – nesie informáciu o potvrdení, používa sa len na úrovni MAC vrstvy
- **MAC Command Frame** – používa sa pri centralizovanom konfigurovaní, nastavení a riadení zariadení v sieti
- **Beacon Frame** – synchronizácia zariadení a konfigurácia siete v čase, kedy sú body siete uvádzané do režimu spánku, kedy majú extrémne nízku spotrebu.

Komunikácia v sieti môže prebiehať aj pomocou takzvaných superrámcov. Ten je definovaný a zaslaný výlučne koordinátorom siete. Superrámec je rozdelený na 16 slotov, ktoré môžu byť niektorého z vyššie uvedených typov.

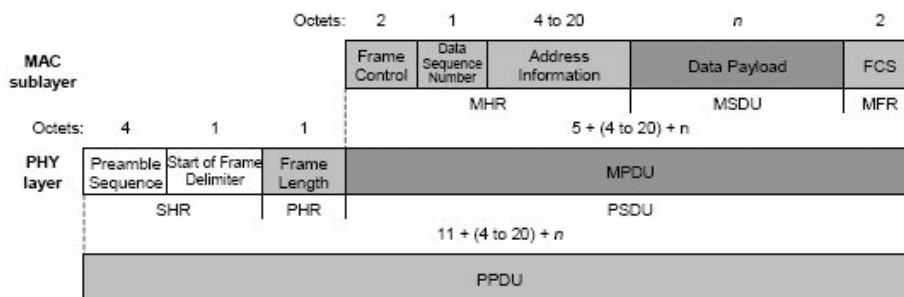


Obr. 6: Formát prenášaného superrámca.

Rámec začína Beacon Frame, ktorý zobúdzá účastníkov siete. BEP oblasť je vyhradená pre prípadné problémy s doručením/preposlaním Beacon Frame. V ďalšej oblasti (CAP) prvky siete súperia o časové sloty pomocou CSMA/CA. Zvyšné garantované časové sloty (GTS) sú priradené prvkom

pre komunikáciu. Ďalej sa prvky prepnú opäť do stavu spánku, v ktorom zotrávajú až do príchodu ďalšieho Beacon Frame.

Koncové stanice môžu byť v stavoch spánku 15 ms až 4 minúty. Tento stav im umožňuje zotrvať vo funkcii aj vďaka napájaniu batériou veľmi dlho.



Obr. 7: Dátová jednotka prenášaná na fyzickej a linkovej vrstve a ich časti.

Príklad dátového rámca na úrovni fyzickej vrstvy – PPDU (Physical Protocol Data Unit). Ostatné rámce sa líšia obsahom dátovej časti (MSDU) v MPDU.

Štandard IEEE 802.15.4 využíva dva binárne adresovacie módy 16bitov a 64 bitov. V prípade krátkeho 16 bitového je možné adresovať maximálne 65 535 zariadení v rámci jednej siete. Pre sieť je vyhradený 16 bitový identifikátor PAN ID, pre prípad, že dôjde k prekrytiu fyzického priestoru viacerých sietí.

V každej sieti je stanica, majúca úlohu centrálného koordinátora. Ostatné stanice sú koncovými stanicami a môžu mať dve rôzne funkcie. Buď sú konfigurované ako smerovač alebo koncové zariadenie. V tomto prípade môžeme koncové stanice rozdeliť ešte na úplne funkčné zariadenie (FFD), ktoré môžu plniť úlohu smerovača alebo koordinátora a redukované (RFD), plniace iba úlohu koncového zariadenia.

[2], [3], [18], [19], [20]

3.3 ZigBee

ZigBee je pomenovanie pre skupinu protokolov vyšších vrstiev sieťového modelu ktorý je postavený na štandarde IEEE 802.15.4 pre osobné bezdrôtové siete WPAN (Wireless Personal Area Network). Táto technológia patrí medzi pomerne nové a má predstavovať lacnejšiu a jednoduchšiu podobu, v súčasnosti už zabehnutého Bluetooth. Nepredpokladá sa, že bude pre technológiu Bluetooth výrazným konkurentom. Má skôr doplniť chýbajúci článok v bezdrôtovej komunikácii medzi WiFi sieťami a Bluetooth technológiou. Využitie ZigBee sa predpokladá v oblastiach, kde ani Wifi ani Bluetooth neposkytujú ideálne riešenia. Tie sú pre danú aplikáciu buď zbytočne zložitú, energeticky náročné alebo neprimerane drahé. ZigBee nie je navrhnuté pre prenos multimediálnych služieb ani veľkých dátových objemov, ale je určený pre prenos jednoduchých správ medzi senzormi na krátke vzdialenosti. Za protokol ZigBee zodpovedá ZigBee Aliancia.

3.3.1 ZigBee Alliance

Členovia ZigBee Alliance definujú celosvetový štandard pre spoľahlivé, cenovo prijateľné, bezdrôtové aplikácie s nízkym príkonom. Aliancia je rýchlo rastúcim neziskovým priemyselným združením vedeným firmami zaoberajúcimi sa výrobou polovodičov, poskytovateľmi najrôznejších technológií, OEMs a samotnými užívateľmi po celom svete.

Sústredujú sa na

- definovanie sieťovej, bezpečnostnej a aplikačnej vrstvy
- zabezpečuje interoperabilitu, testovanie, špecifikáciu
- oboznamuje svet s technológiou ZigBee a presadzuje ju na trhu
- spravuje vývoj technológie

3.3.2 Aplikácie ZigBee

Štandard ZigBee je určený pre bezdrôtové zariadenia, nenáročné na prenosovú rýchlosť, uľahčujúce prácu v najrôznejších oblastiach spoločnosti.

Správa budov – HVAC (heating, ventilation, air conditioning), riadenie osvetlenia, prístupových práv

Zdravotníctvo– vzdialený dohľad nad pacientom a kontrola jeho životných funkcií

Priemysel – riadenie a kontrola v neprístupnom prostredí, automatizácia, automobilový priemysel

Spotrebná elektronika – ovládanie TV, VCR, DVD-CD

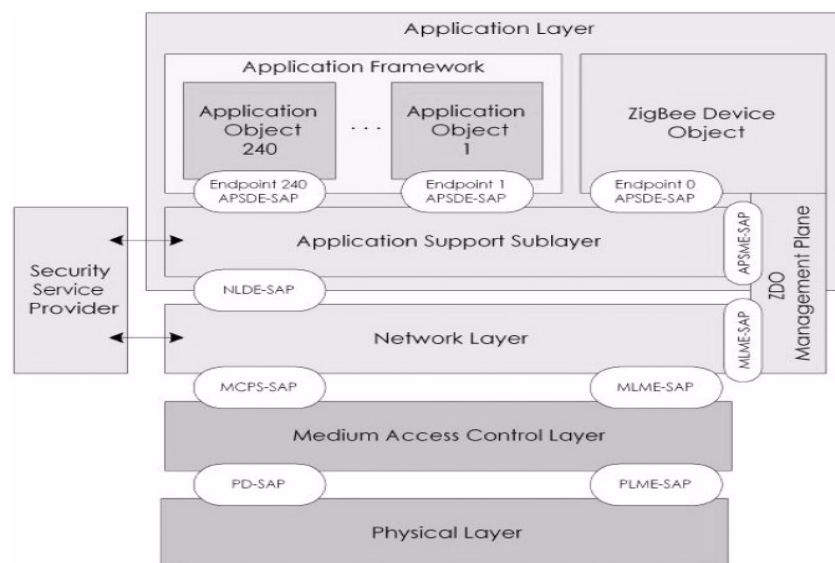
Periférne zariadenie PC – myš, klávesnica, senzory herných zariadení

Riadenie domácností – svetelná technika, HVAC, zavlažovanie

Telekomunikačné služby – komerčné služby, poskytovanie informácií, interakcia mobilných zariadení v prostredí ZigBee siete

Armáda a veda – prieskum a monitoring neznámych alebo neprístupných oblastí

3.3.3 Komunikačný model ZigBee



Obr. 8: Komunikačný model ZigBee.

Model protokolu ZigBee je podobne ako ISO/OSI alebo TCP/IP model zložený z vrstiev. Každá vrstva poskytuje svoje služby vrstve o úroveň vyššie a využíva služby nižšej vrstvy. Jednotlivé vrstvy majú svoje dátové jednotky, ktoré sú nositeľmi užitočných dát, služby, ktoré ich spracovávajú a tiež rozhranie pre prístup k službám vyšších vrstiev – SAP (Service Access Point). Fyzická a MAC vrstva sú definované štandardom IEEE 802.15.4 . ZigBee definuje sieťovú (NWK), aplikačnú vrstvu (APL) a rieši tiež otázku prípadnej bezpečnosti. Aplikačná vrstva v sebe zahŕňa podpornú aplikačnú vrstvu (APS), ZigBee objekty (ZDO) a framework.

Vrstva NWK komunikuje s APL vrstvou pomocou NLDE-SAP (Network Layer Data Entity Service Acces Point) a s ZDO prostredníctvom NLME-SAP (Network Layer Management Entity). V rámci aplikačnej vrstvy sú to rozhrania medzi APS a objektami vo framework APSDE-SAP a APSME-SAP medzi APS a ZDO. Poslednou vrstvou je bezpečnostná vrstva, ktorá nie je nevyhnutná pre samotnú funkčnosť, ale tvorí súčasť modelu ZigBee a aliancia sa ju snaží čím ďalej viac presadiť vzhľadom k požadovaniu spoľahlivého technologického riešenia.

3.3.4 Typy uzlov

ZigBee sieť pozná z funkčného hľadiska dva typy zariadení:

- **Úplne funkčné zariadenie** (FFD – Full function device)

Také zariadenie je prijímať a preposielať správy. Ovykle plní aj funkciu koordinátora alebo ju môže v prípade potreby na seba prevziať (ak by došlo k rozpadu siete). V sieti sa musí nachádzať minimálne jedno takéto zariadenie. Okrem toho môže plniť funkciu koncového zariadenia.

- **Redukované funkčné zariadenie** (RFD – Reduced function device)

Je koncové zariadenie realizované čo najjednoduchšie. Má iba jediný účel. Zmerať hodnotu fyzikálnej veličiny, pre ktorú je určený a na výzvu ju zaslať smerovaču alebo koordinátorovi siete dát. RFD dokáže komunikovať iba so zariadeniami typu FFD.

Z pohľadu logického rozdel'ujeme prvky siete na:

- **Koordinátor**

V každej sieti sa nachádza iba jeden. Jeho úlohou je spravovať a monitorovať sieť, zbierať od koncových zariadení dáta a prípadne ich preposielať ďalej. Ide o zariadenie FFD.

- **Smerovač**

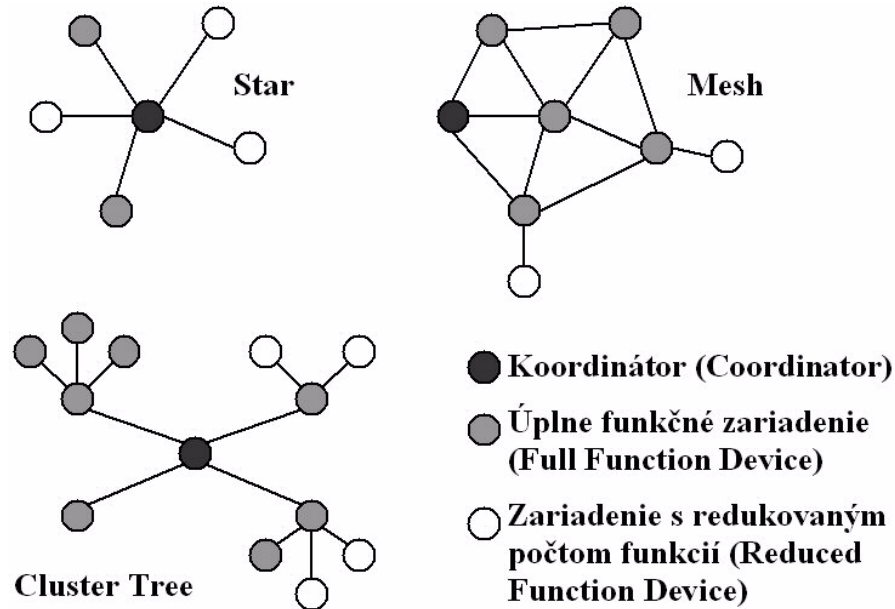
Ide o FFD zariadenie, ktoré slúži k tomu, aby sieť bola rozsiahlejšia. Preposiela správy od koordinátora a koncovým zariadeniam. Môže plniť aj funkciu koncového zariadenia. V sieti sa javí ako lokálny koordinátor pre koncové zariadenia.

- **Koncové zariadenie**

Zariadenie typu RFD. Plní iba úlohu koncového senzoru.

3.3.5 Topológie siete

Sieťová (NWK) vrstva definuje tri topológie siete, hviezdicovú (star), stromovú (cluster tree) a akýmsi hybridom je mesh topológia. Pre realizáciu a spravovanie siete sú prvé dve ľahko realizovateľné, ale tretia v našom vhodnejšie vystihuje možnosť náhodného rozloženia senzorov.



Obr. 9: Príklady topológií siete ZigBee.

[12], [2], [22]

3.3.6 Adresovanie

Je známe, že zariadenia v sieti môžu komunikovať len v tom prípade, že poznajú adresu svojho cieľa. ZigBee protokol nám však ponúka viacero riešení. Umožňuje nám využívať dva spôsoby pre zasielanie správ naprieč sieťou.

Priame adresovanie

Prvou možnosťou je použiť známe priame (direct) adresovanie, kde sa správa posiela na zariadenie, ktorého adresu poznáme. Nevýhodou však je, že túto adresu musíme najprv nejako zistiť. Rieši sa to zaslaním broadcastu do siete so žiadosťou o zaslanie adresy. Zariadenie tak obdrží adresy všetkých dostupných uzlov.

Nepriame adresovanie – binding

Zaujímavosťou ZigBee protokolu je, že umožňuje aj tzv. nepriame adresovanie, ktoré využíva naviazanie spojenia (binding) a zjednodušuje zasielanie správ. V koordinátorovi existuje „binding table“, v ktorej sú namapované clustre/endpointy (EP), ktoré spolu komunikujú. Každé z týchto spojení predstavuje obojstranný komunikačný kanál. Toto spojenie vzniká požiadaním a následne potvrdením vzniku spojenia. V takom prípade je možné zasielať správu aj viacerým zariadeniam naraz (nie broadcast).

3.3.6.1 Adresy

Každý uzol v sieti ZigBee má dve MAC adresy, 64-bit a skrátenu 16-bit adresu.

IEEE Extended Unique Identifiers – EUI-64

EUI predstavuje celosvetovo unikátnu 64-bit adresu zariadenia. Skladá sa z dvoch častí. 24 bitov definovaných Organizationally Unique Identifier (OUI), ktoré priraduje IEEE a 40 bitov definovaných z výroby. OUI je priradované firmám, zaoberajúcim sa komerčným vývojom ZigBee aplikácii a zabezpečuje tak jedinečnosť tejto adresy. V prípade skladanie väčších sietí od viacerých výrobcov sa používa práve táto adresa.

Sieťová adresa

Túto 16-bit sieťovú adresu získa zariadenie od koordinátora siete pri úspešnom pripojení. Je odvodená z IEEE adresy, ktorá je unikátna. Používa sa pre komunikáciu v lokálnej sieti. Na úrovni sieťovej adresy je možné použiť aj broadcast a to zaslaním správy na adresu 0xFFFF. Tak je správa doručená každému zariadeniu s povoleným prijímaním dát. Opakom je unicast, kedy správu dostane len zariadenie s touto adresou.

3.3.7 Typy správ

ZigBee protokol umožňuje zasielať dva typy dátových rámcov:

- KVP (Key Value Pair) rámec má presný formát a je určený pre zasielanie jednoduchých pokynov typu SET (nastav hodnotu), GET (zašli hodnotu), GETACK (zašli hodnotu a potvrd'), SET_RES (zašli odpoveď) a pod., pričom rámec môže byť doplnený hodnotami atribútov súvisiacich s príkazom.
- MSG (Message frame format) rámec má voľný formát, ale zariadenia musia jeho tvar a obsah poznať. Používa sa pri zisťovaní/zasielaní adres, naväzovaní spojenia a iných.

Oba typy majú svoje špecifické použitie, aj keď typ MSG umožňuje väčšiu variabilitu oproti KVP. A naopak, KVP formát je pre jednoduchosť výhodnejšie použiť pre zasielanie jednoznačných povelov.

3.3.8 Sieťové deskriptory

Každý uzol v sieti je reprezentovaný niekoľkými typmi deskriptorov: power descriptor, node descriptor a simple descriptor. Jedná sa o aplikačne špecifické informácie, udávajúce schopnosti a parametre uzlu. Obsah týchto deskriptorov je možné získať pomocou príslušných žiadostí (príkaz *request*). Ich hodnoty sú definované v súbore *myZigBee.c*.

Power descriptor

Tento deskriptor je povinný pre každý uzol v sieti a musí byť práve jeden. Predstavuje dynamický spôsob popisu stavu napájania uzlu. Definuje hodnoty ako druh napájania, sleep/úsporný režim, dostupné zdroje v niekoľkých úrovniach a podobne.

Node descriptor

Popisuje vlastnosti a schopnosti ZigBee uzlu a je povinným. Obsahuje nasledovné položky: logický typ (RFD, Router, Coordinator), používané frekvenčné pásmo, kódy od výrobcu, prípadne rezervované pre komerčné účely a nastavenie veľkostí komunikačných bufferov.

Simple descriptor

Obsahuje informácie špecifické pre každý endpoint (EP) uzlu. Je povinný a jediný pre každý EP. Podáva informácie o čísle EP (1-240), identifikátor aplikačného profilu, zariadenia a jeho verziu, prípadnú dostupnosť komplexného alebo užívateľského deskriptoru. Nasleduje počet a zoznam vstupných a výstupných clusterov daného EP.

Ďalšou možnosťou špecifikácie zariadenia je popis pomocou nasledovných deskriptorov, ktoré som v práci nepoužíval a uvádzam ich iba pre úplnosť. Narozdiel od predchádzajúcich, ide o voliteľné descriptorov.

Complex descriptor

Nesie ďalšie informácie o zariadení, konkrétne o niektorom endpointe (EP). EP môže obsahovať maximálne 1 complex descriptor. Ide o informácie z výroby, ako sériové číslo alebo firemný názov zariadenia, odkazy URL pre bližší popis zariadenia ale i URL na ikonky.

User descriptor

Je voliteľnou položkou a je určený pre uloženie užívateľom definovaných informácií.

[4]

3.4 Komunikácia v sieti ZigBee na úrovni aplikačnej vrstvy

Táto podkapitola je úvodnou a popisuje základnú komunikáciu pomocou komunikačného modelu ZigBee stack (MpZBeeV1.0-3.6), ktorý sa mi stal základom pre ďalšiu prácu. Napriek tomu, že v čase začiatku práce čase už existovala verzia 1.0-3.8, rozhodol som sa zostať pri staršej. Jediným vylepšením bolo pridanie bezpečnostnej vrstvy (Security level), o ktorej moja práca nepojednáva. Kapitola popisuje dva typy programu: Coordinator a RFD, ktoré sú písané na úrovni aplikačnej vrstvy. Ide o demoaplikácie, ktoré sú súčasťou balíka ZigBee stack. Zdrojové kódy písané v jazyku C. Vďaka množstvu komentárov sú dobre čitateľné. K dispozícii bolo niekoľko verzií týchto programov. Tie sa líšili aplikačným profilom a ako neskôr uvidíme aj typom zasielaných správ. Nasledovné riadky poslúžia každému, kto v krátkosti chce pochopiť postupnosť krokov vzniku siete ZigBee, ale i spôsob samotnej komunikácie.

Existencia a komunikácia jednoduchej siete prebieha nasledovne:

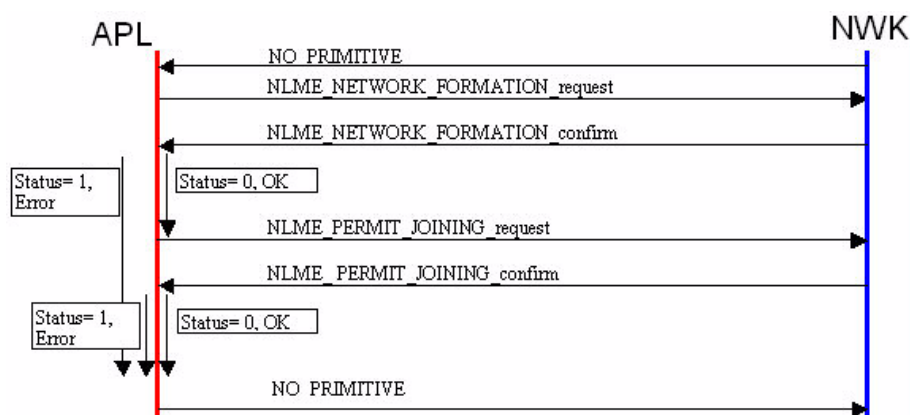
krok	Koordinátor	RFD
1.	Koordinátor vytvorí sieť.	RFD hľadá sieť.
2.	Koordinátor povolí pripájanie sa do siete.	
3.	Zaregistruje pripojenie nového uzla.	Po úspešnom nájdení siete sa pripojí.
4.	Nadviazanie spojenia a určenie spôsobu komunikácie: I. Direct messages, DEVICE_DISCOVERY alebo II. Indirect messages, END_DEVICE_BINDING	
5.	Prebieha zasielanie správ podľa zvoleného typu I./II.	
6.	Koordinátor zaregistruje opustenie uzla siete.	

Tab. 2 : Postup vzniku siete ZigBee na strane koordinátora i koncového uzla.

Uvedená komunikácia prebieha na aplikačnej úrovni. Rozhranie s nižšími vrstvami tvorí premenná typu *ZIGBEE_PRIMITIVE CurrentPrimitive*. Pomocou nej nižšia vrstva vie v akom stave komunikácie sa uzol siete nachádza a ktoré informácie zo svojej vrstvy jej má poskytnúť. Pozrime sa na jednotlivé kroky a zasielané správy podrobnejšie.

3.4.1 Vytvorenie siete

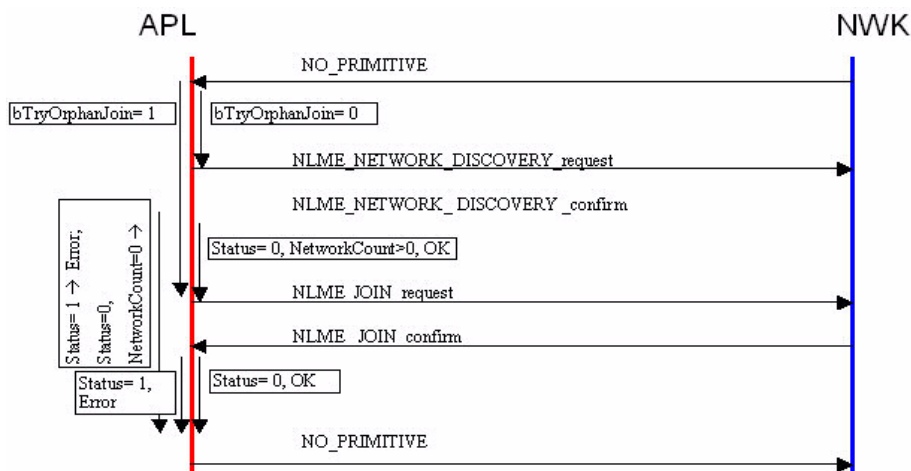
Sieť vytvára uzol, ktorý plní funkciu koordinátora. Deje sa tak krátko po jeho zapnutí a po prebehnutí príslušných inicializácií. O jej vytvorenie musí požiadať sieťovú vrstvu, ktorá mu dodá okrem potvrdenia aj jej identifikáciu – PAN ID (2 bajty). Po úspešnom vytvorení, koordinátor požiada o povolenie pripájať uzly do siete. On sám je prvkom siete automaticky. Jednoznačnou identifikáciou v rámci tejto siete je krátka MAC adresa (2 bajty), ktorá je odvodená od IEEE adresy (8 bajtov). Koordinátor má v sieti vždy MAC adresu 0x0000.



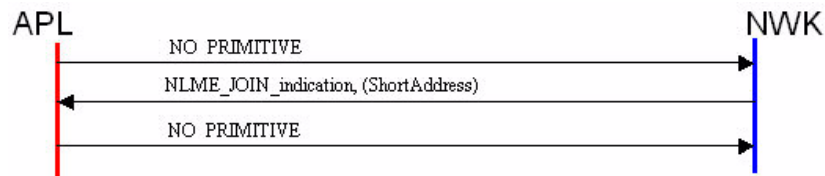
Obr. 10: Správy zasielané nižšej vrstve pri vzniku siete na strane koordinátora.

3.4.2 Pripojenie uzla do siete

Koncový uzol RFD po zapnutí a po prebehnutých inicializáciách (rovnako ako u každého uzla) sa snaží nájsť dostupnú sieť a pripojiť sa k nej. Ak neuspje, skúša to po krátkom okamžiku znova až kým sa mu to nepodarí. Na strane koordinátora dôjde k doručeniu správy o tom, že zariadenie s danou MAC adresou sa pripojilo do siete.



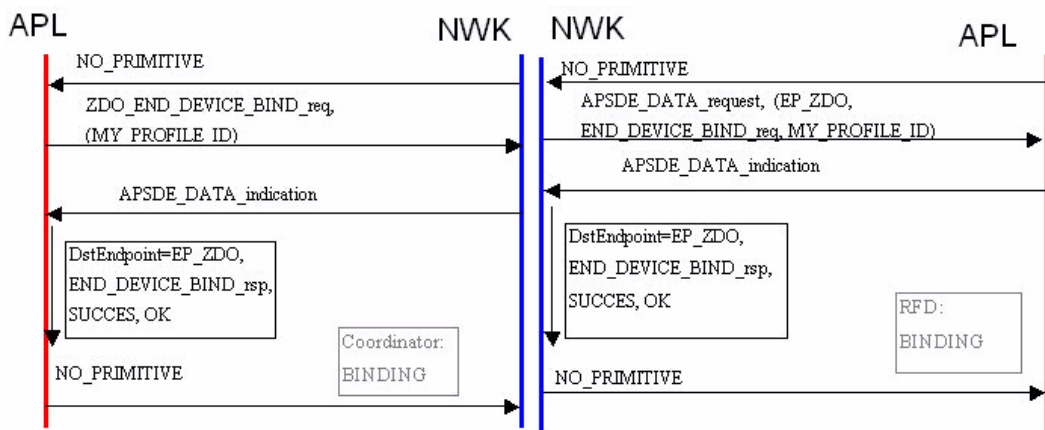
Obr. 11: RFD, komunikácia pri pripájaní sa do siete.



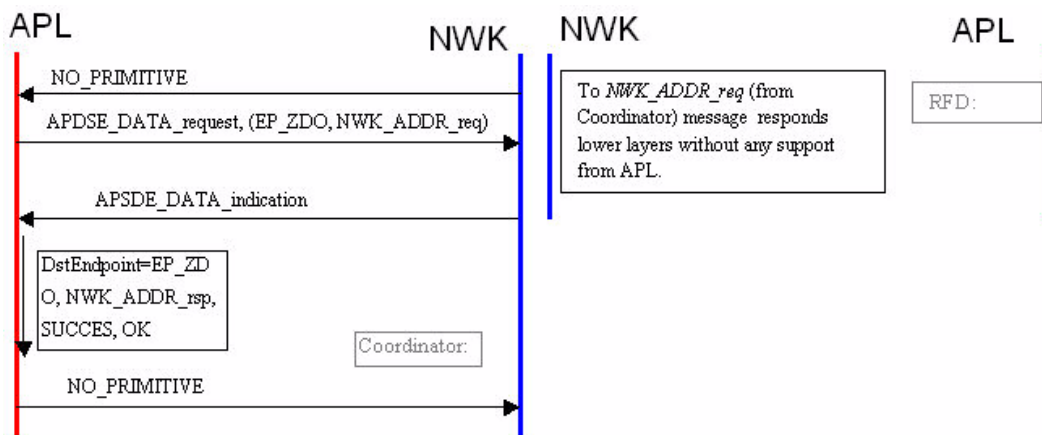
Obr. 12: Koordinátor, správa s oznámením o pripojení nového uzla.

3.4.3 Voľba komunikácie

Pri zasielaní správ máme na výber 2 spôsoby, buď to priame (direct) alebo nepriame (indirect) adresovanie. Pri každej z nich, musíme s cieľovým uzlom nadviazať kontakt. U priameho musíme poznať jeho adresu. Tá je známa buď z momentu prihlásenia alebo o jej hodnotu musíme požiadať vhodnou správou, kde cieľová adresa je broadcast, teda nám odpovedia všetky dostupné uzly. Tento spôsob sa nazýva *DEVICE_DISCOVERY*. Druhou možnosťou ako komunikovať je využiť tzv. *binding*. Metóda sa nazýva *END_DEVICE_BINDING*. Uzol, ktorý chce začať komunikovať vyšle žiadosť o spojenie. Na tú musí do časového intervalu druhé zariadenie odpovedať, inak iniciované a spojenie ruší a musí sa oň požiadať znova. Takto vytvorené spojenie predstavuje obojstranný komunikačný kanál bez potreby adresy.



Obr. 13: Koordinátor a RFD, správy pri navazovaní spojenia pomocou END_DEVICE_BINDING.



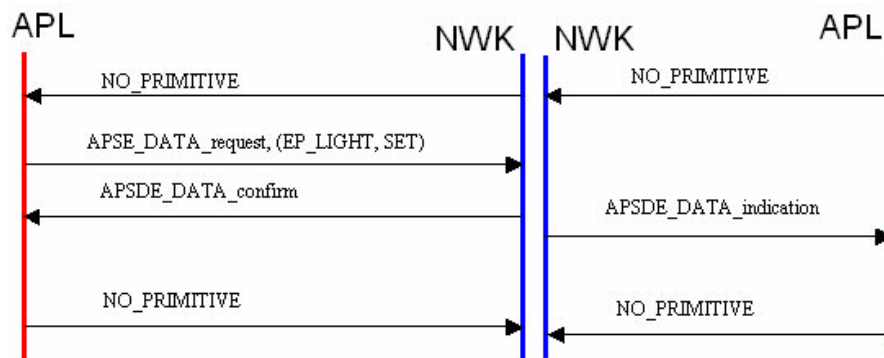
Obr. 14: Koordinátor a RFD, správy pri navazovaní spojenia pomocou DEVICE_DISCOVERY.

3.4.4 Zasielanie správ

Funkcia ZigBee zariadenia je daná jeho HW vybavením a príslušným aplikačným profilom. Aplikačný profil popisuje aplikáciu uzla. Ide o súhrn clusterov, formát príkazov a typov dát. Obvykle jeden aplikačný profil využíva viacero zariadení v sieti a fyzicky jeden uzol môže reprezentovať i viacero aplikačných profilov. Na ukážkových aplikáciách boli prezentované dva typické druhy. Pre Lighting profile (ovládanie osvetlenia pomocou tlačítok) a temperaure profile (meranie teploty vzdialeným senzorom).

Lighting profile

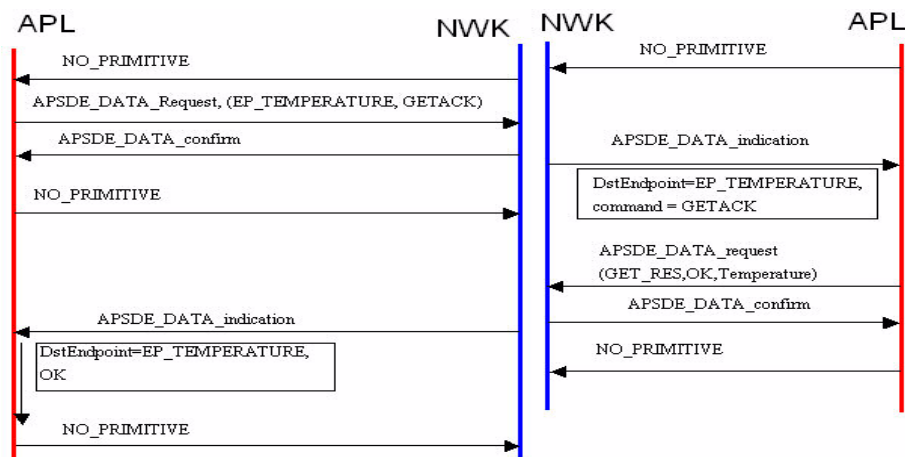
Predstavuje ovládanie akéhokoľvek vzdialeného zariadenia, ktoré nadobúda niekoľko hodnôt. Je treba podotknúť, že ide o aplikácie, kde čas nie je kritická veličina. Po nadviazaní spojenia jedným z horeuvedených spôsobov, jeden uzol pomocou tlačítka zasiela svetlu správu SET s jednou z nasledovných hodnôt atribútu ON, OFF , TOGGLE (prepnutie do opačného stavu). Druhý uzol túto správu prijme a nastaví hodnotu svetla na požadovanú. O doručení správy si môže nechať zaslať potvrdenie ACK tak, že príkaz SET nahradí SETACK.



Obr. 15: Prepínač a svetlo, správy pri zaslaní príkazu SET od prepínača k svetlu.

Temperature profile

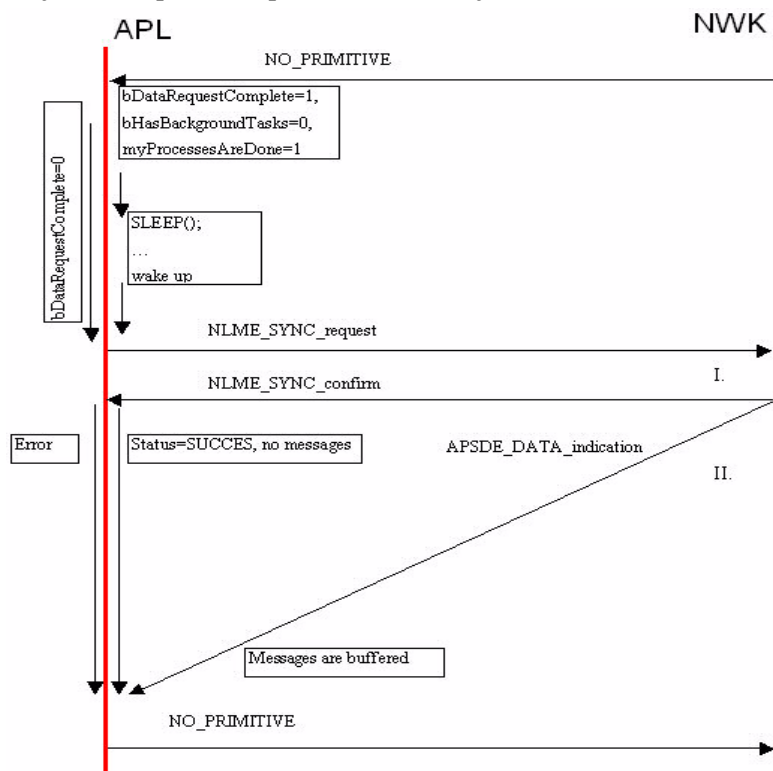
U týchto programov išlo o demonštráciu monitoringu zariadenia bez možnosti ovládať ho. Ide o snímanie hodnoty prostredia senzorom. V našom prípade je to senzor teploty. Vzdialený bod požiadava o zaslanie aktuálnej hodnoty. Druhý bod hodnotu zistí, upraví a zašle naspäť bodu, ktorý oň požiadaval.



Obr. 16: Monitorovacia stanica a teplotné čidlo. Stanica žiada o zaslanie aktuálnej teploty a senzor následne odpovedá.

3.4.5 Zasielanie správy na žiadosť RFD

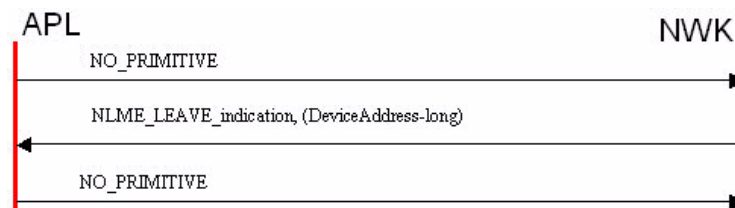
V čase, kedy RFD zariadenie zistí, že sa po ňom nepožaduje vykonanie žiadnej úlohy a všetky predchádzajúce boli realizované, zariadenie prepne svoj vysielač – transceiver do režimu spánku. Deje sa tak z dôvodu úspory elektrickej energie zdroja, ktorým je RFD napájané. Tento stav trvá istú dobu, počas ktorej RFD neprijíma žiadne úlohy od nadriadených zariadení. Pokiaľ nadriadené zariadenie, typicky smerovač, má vo svojej pamäti miesto pre dočasné uloženie správ pre RFD zariadenie, ukladá správy u seba, kým mu to miesto dovolí. Po prekročení sú správy zahadzované. Po vrátení sa do aktívneho stavu RFD zistí, či nadriadené zariadenie má pre neho nejaké správy. Ak áno, začne ich vykonávať. Po ich prevedení sa opäť prepne do režimu spánku. Zariadenie v tomto stave zotrúva väčšinu svojho času, pričom v pozadí môže ďalej monitorovať stav.



Obr. 17: Koncový uzol žiada pro prebudení sa z režimu spánku o nahromadené príkazy a dáta.

3.4.6 Opustenie siete

Ak niektoré zo zariadení opustí sieť, je o tom rozoslaná správa spolu s adresou zariadenia (8 bajtov), ktoré ju opustilo. Každé zariadenie v sieti tak má možnosť vyhodnotiť, o ktoré zariadenie šlo a či to nebolo práve ono samé.



Obr. 18: Správa pri indikácii o opustení uzla zo siete.

[4]

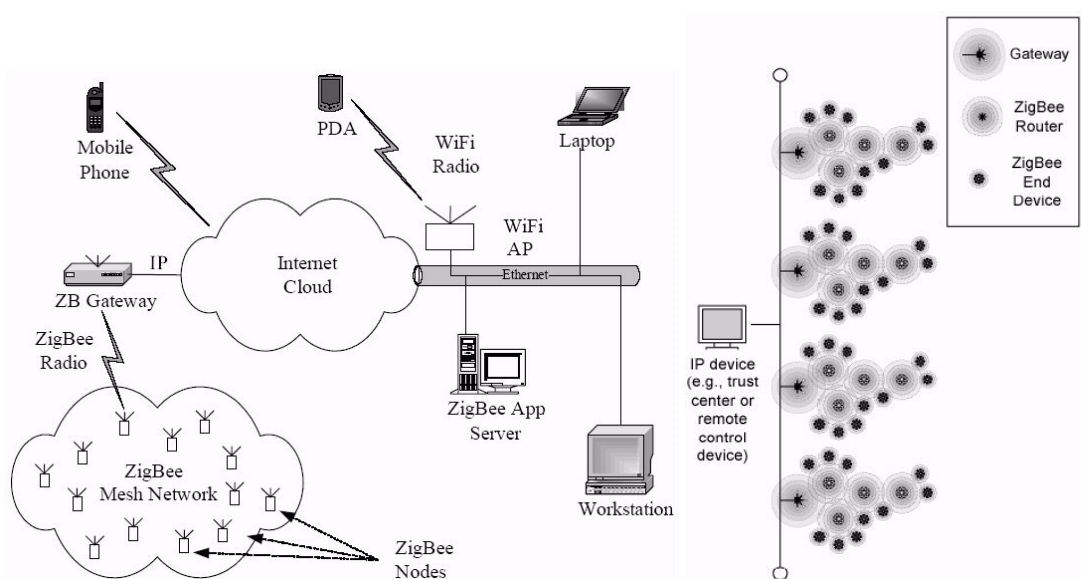
4 Návrh

4.1 Aplikačná brána

Trendom súčasnej doby a významom sietí vôbec, je ich konektivita, možnosť spájať ich do väčších sietí a byť súčasťou tej najväčšej – Internetu. Sieť sa tak stáva prístupnou z takmer ktoréhokolvek miesta na svete a každé miesto sa stáva prístupné pre ňu.

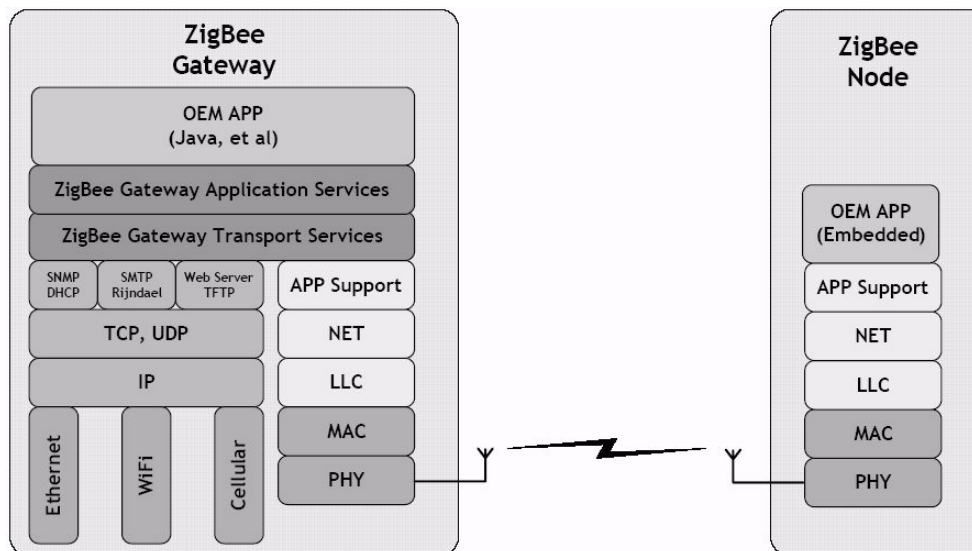
Podobný zámer je i u senzorových sietí ZigBee. Situáciu nám však komplikuje to, že sieť ZigBee využíva iný komunikačný protokol ako TCP/IP (v návrhu štandardu ZigBee sa nepočíta s komunikáciou cez sieť typu internet), ktorý tvorí prevažnú časť komunikácie v dnešných dátových sietiach. Preto je potreba informácie zo siete „prekladať“. Preklad správ tak rôznych protokolov je pomerne náročná služba a niesme ju schopný realizovať na nižších úrovniach sieťového modelu. Za vhodnú úroveň považujeme až vrstvu aplikačnú, preto zariadenie – program slúžiace pre prístup nazývame aplikačnou bránou (application gateway).

Aplikačná brána nám umožňuje konvertovať naše príkazy do siete ZigBee a protokol ZigBee na dáta v podobe, ktorú požadujeme. Výstup sa môže líšiť podľa potreby ďalšieho spracovania. Príkladom formátu sú BACnet a LonWorks pre systémy v stavebníctve, SCADA a Modbus v oblasti priemyselných sietí a samozrejme XML a HTML pre internetové aplikácie.



Obr. 19: Príklady prepojenia siete ZigBee a nadradenej siete pomocou aplikačnej brány (gateway).

Uvedené obrázky zobrazujú štruktúru siete a spôsob pripojenia aplikačnej brány ZigBee – TCP/IP . Tá je tvorená dvoma prvkami, ktoré majú spoločné rozhranie. Na jednej strane je to počítač a na druhej niektorý z uzlov siete ZigBee schopný a oprávnený komunikovať s PC. Často to býva práva koordinátor, ktorý je touto úlohou poverený. Ten má potom za úlohu jednotlivé správy ďalej rozosielať medzi uzly.



Obr. 20: Spôsob realizácie aplikačnej brány. Brána musí realizovať preklad správ medzi dvoma komunikačnými modelmi.

Aplikačná brána pozostáva z dvoch sieťových modelov a tvorí akýsi adaptér. Na jednej strane model ZigBee a druhej TCP/IP model. Dátové jednotky siete musia prejsť až na aplikačnú úroveň, kde sa analyzujú, upravajú, zmenia a v modely TCP/IP zase obalia potrebnými hlavičkami. Potom sú prístupné pre komunikáciu aj v sieti IP paketov. Obdobne to platí aj pre komunikáciu z druhej strany, kedy pokyny sú spracované pre jazyk koordinátora. [5], [9]

4.2 Návrh I.

Otázka, ktorú si bolo treba položiť hneď na začiatku bolo, čo sa od takej aplikačnej brány očakáva a k čomu má slúžiť.

Požiadavky na aplikačnú bránu:

- monitorovať stav siete. Myslí sa tým poznať vlastnosti jednotlivých uzlov, ich adresy, aké senzory či akčné členy obsahujú,
- jednotlivé uzly ovládať a zisťovať hodnoty z ich senzorov, ak to umožňujú.

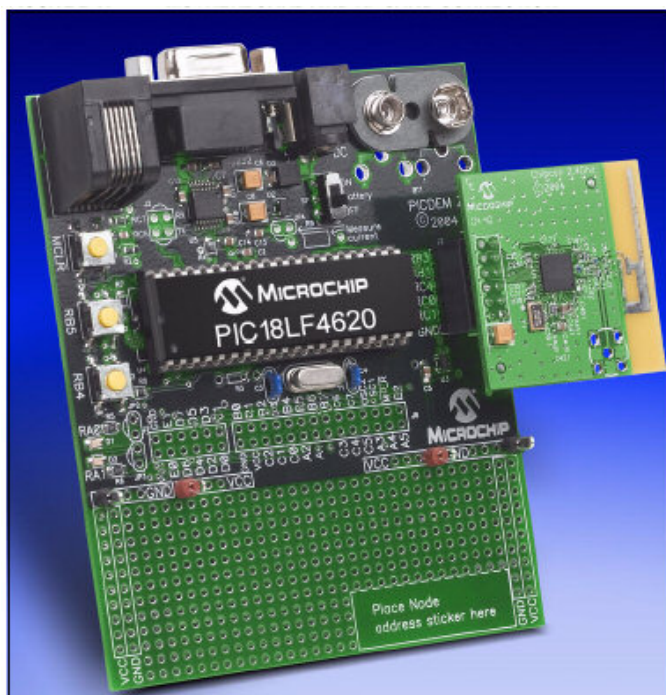
Medzi ďalšie vlastnosti patria:

- univerzálnosť rozhrania,
- možnosť použitia iných technológií (pri modernizácii),
- jednoduchosť (podľa pravidla: počet chýb systému je priamo úmerný jeho zložitosti).

Ďalšie kroky návrhu sú závislé na dostupnom technickom zariadení. Nasledujúca kapitola popisuje vývojový kit PICDEM Z. Ten predstavuje jeden uzol siete ZigBee. Z popisu kapitoly vyplýva, že kit obsahuje len jedno RF rozhranie a jedno sériové rozhranie RS232. RF rozhranie je určené pre komunikáciu v rámci ZigBee, preto naše komunikačné rozhranie bude tvoriť sériová linka.

Druhou stranou aplikačnej brány bude počítač, ktorý je sériovým portom vybavený. To, čo sa zdá byť samozrejmosťou sa neskôr ukázalo ako veľký problém. Množstvo počítačov už dnes nie je týmto rozhraním vybavené a obsahujú prevažne rozhranie USB. Spočiatku bola snaha riešiť to dostupnými redukciami, avšak ich neúplná kompatibilita znemožňovala možnosť použitia.

4.3 Popis vývojového kitu firmy Microchip



Obr. 21: Vývojový kit PICDEM od Microchip. Základná doska s RF kartou.

Aplikačná brána je navrhovaná pre sieť ZigBee, v ktorej budú ako zariadenia použité vývojové kity od firmy Microchip, vid'. Obr. 21. Pre vytvorenie siete ZigBee a experimentovanie potrebujeme aspoň dve takéto zariadenia. Jeden uzol musí byť naprogramovaný ako koordinátor a ostatné uzly sú koncovými RFD. Stránky firmy Microchip ponúkajú k stiahnutiu množstvo zdrojových kódov, ktoré je možné modifikovať a vytvárať svoje vlastné.

Kit PICDEM Z sa skladá z dvoch dosiek plošných spojov, základnej a tzv. karty RF (Radio-frequency) pre príjem a vysielanie. PICDEM Z kit je vyvíjaný nadčasovo a Microchip počíta s tým, že v budúcnosti sa vyskytnú aj novšie RF karty. V takom prípade sa jednoducho RF karta iba vymení za novú a zariadenie bude ďalej použiteľné.

4.3.1 Základná doska

PICDEM základná doska obsahuje nasledovné súčasti:

1. Microcontroller Socket: 40 a 28 pinový DIP socket pre niektorý z rady mikrokontrolérov Microchip PIC18. Kit je vybavený PIC18LF4620, ktorý beží na frekvencii 4 MHz a je predprogramovaný demo-aplikáciou.
2. Teplotný senzor: 5 pinový teplotný senzor s SPI rozhraním od Microchip
3. Uživateľské LED: 2 LED diódy riadené digitálnymi I/O pinmi kontroléra. Sú určené pre simuláciu riadenia vstavaného zariadenia. Je ich možné zakázať/povoliť pomocou príslušných prepojek (jumperov).
4. Uživateľské tlačítka: 2 tlačítka sú pripojené k I/O pinom kontroléra a ich úlohou je simulovať vstup od vstavaného zariadenia.

5. Reset tlačítko: je pripojené k MCLR a resetuje hlavnú dosku zariadenia. Uvádza tak zariadenie do štartovného stavu.
6. RJ-11: konektor umožňuje pripojiť zariadenie k programátoru, pomocou ktorého je možné zariadenie programovať a ladiť.
7. RS-232: umožňuje pripojiť zariadenie k PC pomocou štandardného sériového portu.
8. konektor RF karty: konektor pre pripojenie RF karty k základnej doske. Obsahuje napájanie 3,3V, SPI zbernicu a niekoľko riadiacich I/O signálov.
9. Prototype Area: plocha na základnej doske, kde je možné implementovať vlastné obvody. Po tejto ploche sú rozvedené vodiče s napájaním 3,3V, zem a všetky porty kontroléra.
10. On-Board Power: Obvody napájania. Zariadenie je napájané 9V batériou, ktorej napätie je využité na realizáciu zdroja 3,3 V/100 mA. Zariadenie je možné napájať aj externým zdrojom el. energie 9V DC. Zariadenie je vybavené obvodom s LED diódou, chrániacim pred prepólovaním. Pre napájanie batériou je potreba prepnúť príslušný prepínač, inak sa očakáva vstup z externého zdroja.
11. Meranie prúdu: zariadenie umožňuje merať odber prúdu zariadenia pomocou rozpojenia prepójky (jumpera) a zapojenie ampérmetra na jeho piny. Odporúča sa zapojiť aj predradný odpor.
12. Node ID: Toto unikátne číslo je identifikáciou zariadenia a je využívané predprogramovaným aplikačným firmwarom pre vytvorenie 64-bit MAC adresy zariadenia. MAC je možné meniť modifikáciou firmware.
13. Revízny štítok: text určuje úroveň technickej kontroly, ktorej sa zariadenie podrobilo.

4.3.2 Karta PICDEM Z 2,4 GHz RF

Vývojový kit PICDEM je pripravený používať RF karty od rôznych dodávateľov. A do budúcnosti aj sám predpokladá vývoj nových typov. Tá, ktorou je vybavený štandardne pracuje na frekvencii 2,4 GHz a plne zodpovedá štandardom pre aplikácie ZigBee. Je vybavená nasledujúcimi náležitosťami:

1. RF prijímač/vysielač: 48-bitový obvod pre RF komunikáciu. Implementuje fyzickú (PHY) a časť sieťovej (MAC) vrstvy komunikačného modelu.
2. RF Board Connector: konektor pre pripojenie k hlavnej doske.
3. voliteľný SMA konektor: slúži pre prípadnú potrebu pripojiť externú anténu.
4. PCB anténa: viď. Dokumentácia.
5. Revízny štítok: text určuje úroveň technickej kontroly, ktorej sa zariadenie podrobilo

[7]

4.4 Návrh II.

Pri návrhu firmwaru pre vývojové kity som sa nechal inšpirovať priloženými demoaplikáciami. Tie demonštrovali využitie všetkých možností, ktoré kit má. Umožňovali použiť oba spôsoby zasielania správ a osobitne bol použitý lighting i temperature profile. Z ponúkaných možností som si vybral len niektoré a tie sa stali súčasťou firmwarov. Využiť som chcel ako LED diódy a tlačítka, tak teplotný senzor. Z možných spôsobov komunikácie som si zvolil používanie priamych správ – *direct messages*.

Demo aplikácie umožňovali komunikovať po sériovej linke s terminálom na druhej strane linky (program v PC). Komunikácia však bola realizovaná jednostranne a slúžila k vypisovaniu informácii o aktuálne prebiehajúcim aktivitách toho ktorého uzla. To sa neskôr stalo veľmi užitočným pri ladení firmwaru. O tom, čo všetko umožňuje koordinátor alebo koncový uzol RFD sa dozvieme v kapitole o implementácii.

Následne by som sa chcel zmieniť o komunikácii *terminál – koordinátor*. Tú je potreba zabezpečiť obojstranne. Po sériovom rozhraní budú prenášané nasledovné typy správ.

Koordinátor – PC:

- pomocné komentáre tvoriace bežnými výpismi o hodnotách premenných a pohybe v programe,
- užitočné dáta určené pre ďalšie strojové spracovanie sú ohraničené „{ }“ + prípadné ďalšie značky, ktoré nám uľahčia analýzu dát.

PC – koordinátor:

- len užitočné dáta, zaslané programom. Ide o príkazy a správy adresované niektorému z uzlov siete. Ide o jednotlivé príkazy v binárnej podobe. Nepredpokladá sa zahlienie komunikácie práve nimi. Ide o úvodnú značku typu príkazu nasledovanú potrebnými parametrami. Šlo by maximálne o 10 bajtov (typ príkazu, adresa uzlu, EP, číslo clustra a prípadných pár bajtov dát).

Komunikácia od kitu k PC je vyriešená zasielaním reťazca konzole – terminálu. Riešiť bolo potreba prijímanie dát. To sa robí obsluhou signalizovaného prerušenia od sériového rozhrania. Obsluha zabezpečí prijatie bytu a vloženie do buffru. Až bude príkaz kompletne prijatý a koordinátor práve nebude vykonávať žiadnu činnosť, vykoná prijatý príkaz. Koordinátor väčšinu času nevykonáva nijakú činnosť a čaká na vonkajšie podnety.

Program SERIAL

Ide o program, ktorý zabezpečuje komunikáciu medzi koordinátorom a sieťou TCP/IP. Jeho najpodstatnejšou činnosťou je zvládnuť komunikáciu po sériovej linke oboma smermi. Rozhodol som sa neprogramovať vlastnú aplikáciu, ale vyhľad aspoň knižnicu alebo jednoduchý terminál, ktorý by som mohol modifikovať pre moje účely. Odpadlo by mi tak veľa práce s návrhom nejakého vlastného. Dostupných ich bolo niekoľko. Nakoniec som sa rozhodol pre jeden napísaný v jazyku C++ ako projekt pre Borland C++ Builder. Po malých úpravách nastavenia (číslo portu, rýchlosť, ...) fungoval bez problémov. Vstupom pre zadávanie príkazu na port bola klávesnica, čo mi pre testovanie postačilo. Výstupom bol štandardný výstup na obrazovku. [10]

Sériová linka môže byť obsadená iba jediným programom, preto bude tento jediný, ktorý po dobu komunikácie k nej bude mať prístup. Bude mať posledné slovo pri modifikácii príkazu pred odoslaním do ZigBee siete a bude prvý, kto dáta z nej bude analyzovať a upravovať.

Úvahou bolo, kedy bude možné PC pripojiť k sieti ZigBee.

1. Sieť bude vypnutá a jednotlivé uzly odpojené od napájania. Následne bude sieť spustená a program v PC získa postupne znalosti o sieti. Tie budú uložené výhradne v PC.
2. PC sa pripojí kedykoľvek a na požiadanie získa informácie o aktuálnom stave siete. V tomto prípade bude musieť príkaz „žiadosť o informácie o sieti“ pozostávať z množstva malých

príkazov, ktoré budú popisovať niektorú z informácií. Príkazy môže zasielať program SERIAL v PC alebo koordinátor.

Navrhnuté riešenie:

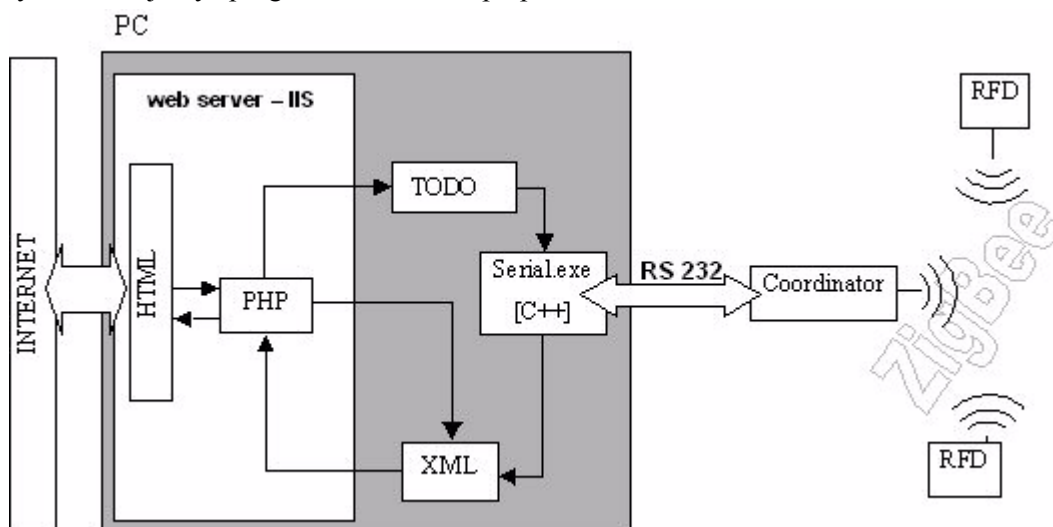
Pri vzniku siete, koordinátor registruje jednotlivé body a žiada informácie o nich. Tie sú uložené v dátovej štruktúre u koordinátora a sú dostupné kedykoľvek na požiadanie. Po pripojení PC k ZigBee sieti nám koordinátor informácie zašle až na žiadosť. Informácie sú v stručnej podobe s ohraničujúcimi značkami (tagmi). Bola tu možnosť preposielať ich rovno naformátované v žiadanej podobe, ale dátový tok po sériovej linke by stúpol rádo 10-násobne. Význam čísel a znakov nie je nezainteresovanému človeku nijak čitateľný. PC program tieto dáta analyzuje a vytvorí z nich súbor XML, ktorý bude následne podľa potrieb upravovaný. Podobne bude prebiehať i komunikácia pri ostatných príkazoch typu: *rozsviet_request – svieta_response*.

XML

Dôvodom použitia jazyka XML je to, že ide o jednoduchý, rozšírený značkovací jazyk, ktorý je odvodený od SGML. Bol vytvorený a štandardizovaný konzorciom W3C. Jeho sila spočíva v možnosti hierarchicky zanorovať ľubovoľné dáta. Má textovú podobu a je pomerne dobre čitateľný. Je akceptovaný mnohými technológiami a predstavuje rozhranie pre zdieľanie dát medzi rôznymi informačnými systémami.

Súbor XML bude spracovaný a formátovaný pomocou jazyka PHP. Dôvodom jeho použitia je hlavne jeho znalosť. Bola tu i možnosť použiť CSS(2), XSL alebo Java Applet. Pri formátovaní bude treba brať zreteľ na typ aplikácie na základe čísla id EP, čísla a typu clustra (in/out). Na základe toho programátor vie, aký príkaz a dáta môže zaslať naspäť do uzla tak, aby mu zariadenia rozumeli.

Výsledný súbor HTML, prístupný klientovi bude obsahovať množstvo generovaných skrytých formulárov (1 tlačítko = 1 formulár = 1 príkaz). Pôvodne som uvažoval príkazy formovať a zasielať pomocou skriptov CGI, ale nakoniec som sa rozhodol zostať pri PHP, ktoré mi daný príkaz spracuje a zapíše do fronty. Frontu predstavuje súbor *todo.zgw*, do ktorého sú v binárnej podobe zapisované príkazy, ktoré majú byť programom SERIAL preposlané do siete.



Obr. 22: Prepojenie komponent systému a aplikačnej brány.

5 Implementácia

Testovacie prostredie

V mojom prípade je ZigBee sieť tvorená tromi vývojovými kitmi PICDEM Z od firmy Microchip. Každý z nich má k dispozícii pre vlastnú aplikáciu dve tlačítka, dve LED diódy a teplotný senzor. V práci som však pre demonštračné účely použil len niektoré. Jediným spôsobom ako s kitmi komunikovať je pomocou sériového portu RS-232, preto som pre realizáciu aplikačnej brány potreboval osobný počítač vybavený sériovým portom.

5.1 Firmware pre vývojové kity

Pri písaní programu som vychádzal z dodaných demoaplikácií, ktoré som podrobne naštudoval a následne ich kombinoval a vhodne modifikoval. Zdrojové kódy sú písané v jazyku C, ktoré sú preložené kompilátorom C18 (Microchip). Firmware je založený na ZigBee protokole MpZBeeV1.0-3.6. Ako vývojové prostredie bol použitý MPLAB.

Pri komunikácii som použil priame adresovanie pomocou MAC adresy. Vytvoreným firmwarom som sa snažil demonštrovať možnosti kitu a preto som využil tlačítka, LED diódy i teplotný senzor. Vznikli tak dve verzie firmwaru. Jeden pre koordinátor a druhý pre koncové RFD zariadenie.

Koordinátor

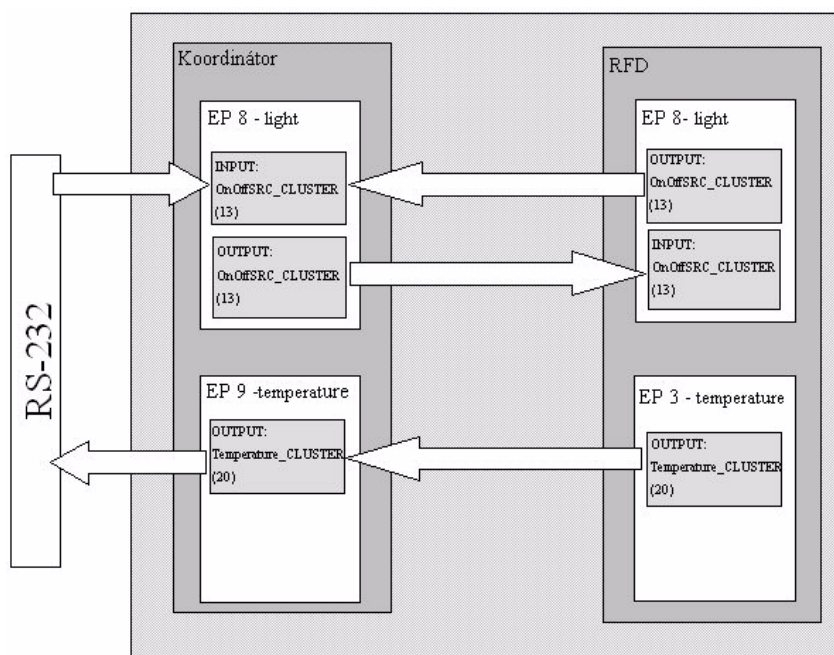
Obsahuje endpoint (EP 9) poskytujúci informáciu z teplotného senzora koordinátora a taktiež zabezpečuje komunikáciu pre získanie hodnoty teploty z ostatných RFD EP 3.

Ďalší EP (EP 8) pracuje s osvetľovacím profilom. Pri stlačení tlačítka R4 vyšle všetkým uzlom (MAC=0xFFFF) pre EP 8 príkaz SETACK hodnotu TOGGLE na prepnutie LED2 do opačného stavu. Následne obdrží potvrdenie GETACK s aktuálnou hodnotou danej LED diódy. Taktiež ovláda LED 2 koordinátora na základe prichádzajúcich pokynov.

RFD

EP 3 poskytuje hodnotu teplotného senzora.

EP 8 pracuje podobne ako koordinátor s osvetľovacím profilom. Spracúvava príkazy pre LED 2, zasiela pomocou SETACK jej aktuálny stav a tlačítkom R4 zasiela príkaz SET s hodnotou TOGGLE koordinátorovi (MAC=0000). Okrem toho má tiež aktívny teplotný senzor.

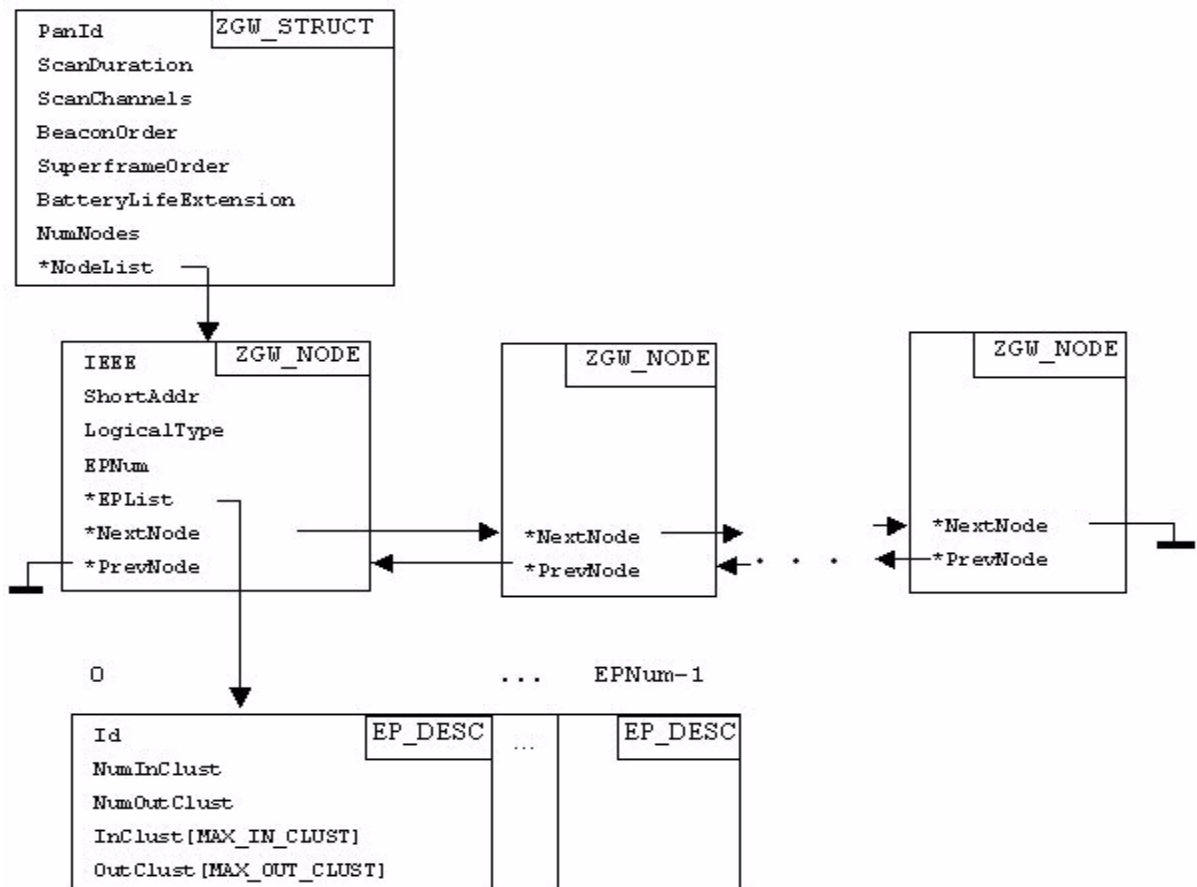


Obr. 23: Sieť Zigbee podľa endpointov EP a clusterov.

5.2 Koordinátor

Firmware pre uzol plniaci úlohu koordinátora bol navrhovaný a realizovaný tak, aby dokázal podať o ZigBee sieti informácie kedykoľvek. Vzhľadom k tomu, že práve on je pripojený pomocou RS-232 k počítaču, využil som jeho výpisy ako pri ladení, tak pri ďalšej práci na aplikačnej bráne. Koordinátor v sebe uschováva dátovú štruktúru, ktorá popisuje súčasný stav siete a poskytuje tak jej celkový aplikačný profil.

Koordinátor po zapnutí inicializuje ako HW, tak SW časť – ZigBee protokol. Následne vytvorí sieť s identifikáciou PAN ID a umožní pripojiť sa ostatným uzlom. Počas týchto prvých úkonov vznikne spomínaná štruktúra, vložia sa do nej základné informácie o sieti a taktiež do nej koordinátor zaznamená seba ako prvý uzol – prvok siete. Dátová štruktúra obsahuje údaje ako typ uzla, IEEE adresu, MAC adresu, zoznam EP a ich príslušných vstupných a výstupných clusterov (viac informácií o štruktúre nájdete na obrázku Obr. 24).



Obr. 24: Sieť Zigbee podľa endpointov EP a clusterov.

V ďalšom kroku koordinátor čaká na pripojenie ostatných prvkov.

Do siete sa pripojí sa nový uzol. Jeho identifikáciou je MAC adresa, ktorú mu priradi koordinátor. V štruktúre sa pre neho vytvorí nová položka a následne sú pomocou príkazov ŽIADOSŤ – ODPOVEĎ (REQUEST – RESPONSE) o uzle zistené požadované informácie tak, aby sa s ním mohlo vzdialene pracovať. Sled a názvy žiadostí sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Request	Parametre	Response	Získané údaje
		NLME_JOIN_INDICATION	MAC adresa
IEEE_ADDR_req	MAC adresa	IEEE_ADDR_rsp	IEEE adresa
NODE_DESC_req	MAC adresa	NODE_DESC_rsp	Log. Typ uzlu
ACTIVE_EP_req	MAC adresa	ACTIVE_EP_rsp	Počet a zoznam ID endpointov.
SIMPLE_DESC_req	MAC adresa, ID endpointu	SIMPLE_DESC_rsp	Počet a zoznam vstupných a výstupných clusterov.

Tab. 3 : Sled a vlastnosti žiadostí a odpovedí pri zisťovaní informácii o uzloch v sieti.

5.2.1 Zasielanie príkazov

V tomto momente už v štruktúre existuje záznam o novom uzle a na základe jeho aplikačného profilu je tak možné zistiť, aké príkazy mu je možné zasielať. Počas fázy zisťovania informácií o uzle boli použité prevažne správy typu MSG, ale pri ovládaní a monitoringu uzlu sa využívajú iba správy typu KVP. Tento typ správ je určený pre zasielanie jednoduchých pokynov ako SET, SETACK, GET, GETACK, GET_RES, ... Správa sa zasiela konkrétnemu EP a clusteru, preto sú na jeho jednoznačnú adresáciu v sieti potrebné nasledovné parametre:

- MAC adresa uzla,
- cieľový EP,
- Cluster ID,
- príkaz, prípadne dáta.
- Posledným úkonom je potreba nastaviť požadovaný príznak (bZGWToggleLight / bZGWGetTemperature). Nastavenie parametrov a príznaku zabezpečí zaslanie správy požadovanému uzlu.

5.2.2 Lighting profile

Táto časť aplikácie pozná zaslanie 4 typov dát pomocou príkazu SETACK. Endpoint (EP=8) a cluster (ID=13) sú v tomto prípade stále rovnaké.

Hodnota zaslaná pomocou SETACK, (TaskData)	Popis
0x00 LIGHT_ON	Zhasne svetlo, príde ACK=0x00, resp. 0xF0
0xFF LIGHT_OFF	Zasvieti svetlo, príde ACK=0xFF, resp. 0xFF
0xF0 LIGHT_TOGGLE	Prepne svetlo, ACK=nový stav
0x04 LIGHT_STATUS_REQ	Nemení stav, ACK=súčasný stav svetla

Tab. 4 : Možné hodnoty príkazu SETACK a očakávané potvrdenie stavu pri lighting profile .

5.2.3 Temperature Profile

U tejto časti aplikácie môžeme iba žiadať o teplotu. Zasielame GETACK príkaz a očakávame teplotu vo formáte Temperature_DegCStr (string).

GETACK (TaskData)	Popis
0x04	Vzhľadom k tomu, že od Temperature Profile nemôžeme požadovať nič iné ako teplotu, nemá hodnota na žiadosť vplyv. ACK = teplota v podobe reťazca (string).

Tab. 5 : Možné hodnoty príkazu GETACK a očakávané potvrdenie stavu pri temperature profile .

5.2.4 Prerušená a ich obsluha, buffer

Koordinátor reaguje na 2 prerušenia. Jedno je vyvolané po stlačení tlačítka R4 (prípade niektorého z nich) a druhé reaguje na prichádzajúce dáta zo sériového rozhrania. Pri stlačení tlačítka je vyvolané prerušenie, počas ktorého obsluhy sú nastavené hodnoty pre zaslanie príkazu (MAC, EP, cluster + príznak pre príkaz). Nastavením príznaku sa príkaz vykoná akonáhle na neho príde rada.

Prerušenie od sériového portu slúži k čítaniu príkazu zadaného externým zdrojom(PC). Po vyvolaní prerušenia je znak(byte) okamžite prijatý a zapísaný do pracovného bufferu. Ten má definovanú maximálnu kapacitu a ukazatele na čítaciu a zapisovaciu pozíciu. Po prečítaní znaku z portu sa zapíše na pozíciu udanú hodnotou `recbufwr` a tá je následne inkrementovaná. Príkaz v buffere je spracovaný funkciou `ZGWTasks()` až sú prijaté všetky jeho súčasti, čo je definované prvým znakom externého príkazu (I/N/L/T) a jemu odpovedajúcemu počtu parametrov (bytov). Funkcia `ZGWTasks()` tak vlastne plní úlohu obsluhy tohto buffra. Ak bol príkaz kompletne prijatý, sú naplnené parametre a nastavený príznak.

5.2.5 Externé príkazy

Táto časť koordinátora tvorí prvú časť aplikačnej brány. Koordinátor je jediným prostredníkom pre komunikáciu externého zdroja (PC) so sieťou ZigBee. Spracúvava príkazy prichádzajúce po sériovej linke a vykonáva ich tak, ako by to robil on sám. Rovnako tak prijaté dáta zo siete posielajú po sériovom rozhraní naspäť. Pre komunikáciu bol navrhnutý jednoduchý protokol. Vzhľadom k jednoduchosti ovládania siete bolo realizovaných niekoľko nasledovných príkazov:

- zašli kompletne informácie o sieti
- zašli informácie o niektorom uzle
- zašli správu svetlu niektorého uzla a prijmi potvrdenie s jeho aktuálnou hodnotou – SETACK.
- zašli žiadosť o teplotu niektorého uzla a prijmi hodnotu – GETACK.

Odpovede od koordinátora sú zámerne vložené medzi zložené zátvorky „{}“. Pri neskoršej analýze a parsovaní prenášaných dát mi to uľahčilo prácu. Komunikácia so sériovou linkou bola použitá totiž aj pri ladení, preto obsahovala aj množstvo iného textu a pomocných výpisov.

5.2.5.1 Informácie o sieti

Po obdržaní príkazu **I** o dĺžke 1B je na sériový port zaslaný kompletný výpis dátovej štruktúry reprezentujúcej sieť ZigBee, kde údaje v `<I ...>` predstavujú informácie o sieti, `<N ...>` informácie o bode a `<E ...>` informácie o koncovom EP.

Príkaz	Odpoveď
I	{ <code><I A B C D E F G></code> <code><N H I J K></code> <code><E L M N O P></code> <code><E></code> ... <code><N></code> ... }

Tab. 6 : Formát príkazu a odpovede pre zistenie informácií o sieti.

Parameter	Popis	Veľkosť [B]
A	PanID	2
B	ScanDuration	1
C	ScanChannels	2
D	BeaconOrder	1
E	SuperframeOrder	1
F	BatteryLifeExtension	1
G	NumNodes	1
H	IEEE	8
I	ShortAddr (MAC)	2
J	LogicalType	1
K	EPNum	1
L	Id	1
M	NumInClust	1
N	InClust	NumInClus
O	NumOutClust	1
P	OutClust	NumOutClust

Tab. 7 : Vysvetlivky jednotlivých bytov pri príkazoch a odpovediach pri komunikácii medzi PC a koordinátorom pri zisťovaní informácií o sieti.

5.2.5.2 Informácie o uzle

Príkaz je tvorený prvým znakom N, ktorý je nasledovaný MAC adresou koncového uzlu o veľkosti 2B. Dokopy je príkaz tvorený 3B.

Príkaz	Odpoveď
N I I – MAC adresa požadovaného uzla	{<N H I J K> <E L M N O P> <E> ... }

Tab. 8 : Formát príkazu a odpovede pre zistenie informácií o jednom uzle. Význam jednotlivých znakov je vysvetlený v tabuľke Tab.7.

5.2.5.3 Lighting profile

Príkaz pre ovládanie (a kontrolu) svetla. V našom prípade je svetlo demonštrované LED diódou. Je možné použiť nasledujúci príkaz, začínajúci písmenom L.

Príkaz	Odpoveď
L A E C V	{L A S}

Tab. 9 : Formát príkazu a odpovede pri ovládaní lighting profile.

Parameter	Popis	Veľkosť [B]
A	MAC adresa uzlu	2
E	EP ID, EP_LIGHT=0x08	1
C	Cluster, OnOffCluster=0x13	1
V	Value, hodnota pre nastavenie svetla. 00 – OFF, FF – ON, F0 – TOGGLE, 04 – bez zmeny = request	1
S	Status, vrátená hodnota. F0 – nesvieti, F1 – svieti.	1

Tab. 10 : Vysvetlivky jednotlivých bytov pri príkazoch a odpovediach pri komunikácii medzi PC a koordinátorom. pri ovládaní lighting profile.

5.2.5.4 Temperature Profile

Aplikačná časť uzlu pre obsluhu teplotného senzoru nám umožňuje požiadať o zaslanie aktuálnej hodnoty. Tento príkaz začína písmenom **T**.

Príkaz	Odpoveď
T A E C V	{T A S}

Tab. 11 : Formát príkazu a odpovede pri ovládaní lighting profile.

Parameter	Popis	Veľkosť [B]
A	MAC adresa uzlu	2
E	EP ID, EP_TEMPERATURE=0x03	1
C	Cluster, Temperature_CLUSTER=0x20	1
V	Value, nezáleží 0x00-0xFF, 0x04 – request	1
S	Status, vrátená hodnota. F0 – nesvieti, F1 – svieti.	1

Tab. 12 : Vysvetlivky jednotlivých bytov pri príkazoch a odpovediach pri komunikácii medzi PC a koordinátorom. pri ovládaní temperature profile.

5.3 RFD

Program pre koncový bod RFD je oproti koordinátorovi značne jednoduchší. Rovnako ako koordinátor má implementovaný Lighting profile aj Temperature profile.

RFD po zapnutí spustí inicializáciu HW i SW časti – ZigBee Stack. Následne sa snaží zistiť dostupné siete a pripojiť sa k nim vysielaním beacon rámcami. V prípade neúspechu, toto volanie opakuje. V prípade úspechu sa do nej pripojí. Od koordinátora následne obdrží niekoľko žiadostí o descriptor (Node_descriptor, Active_EP, Simple_Descriptor, ...), na ktoré mu odpovie automaticky vrstva ZDO.

Vzhľadom k tomu, že ZigBee je technológiou s nízkou spotrebou elektrickej energie, všetka jeho komunikácia prebieha tak, že sa v pravidelných intervaloch uvedie do režimu spánku (SLEEP).

Po uplynutí času sa dotazuje nadradeného zariadenia (v našom prípade koordinátor), či pre neho nemá nejakú správu. Ak nie, opäť sa uspí. V prípade že pre neho nejakú správu má, tak ju prijme, vykoná a pošle naspäť požadovanú odpoveď.

5.3.1 Lighting Profile

RFD zariadenie má aktívnu LED2, ktorú je možné zo siete príkazom SETACK nastaviť podľa potreby hodnotami ON, OFF, TOGGLE, STATUS_REQ. V potvrdení ACK mu RFD vráti aktuálne nastavenú hodnotu. Hodnota STATUS_REQ hodnotu svetla nemení a tak slúži iba ako žiadosť o aktuálnu hodnotu. Súčasťou profilu je aj tlačítko R4, ktoré zasiela na MAC adresu koordinátora(0x0000) príkazom SET hodnotu TOGGLE. Dôjde tak k prepnutiu hodnoty LED2 na kite koordinátora na hodnotu opačnú. Aktivácia príznaku sa aj tu deje ako obsluha prerušenia.

5.3.2 Temperature Profile

Aj u tohto zariadenia je aktívny teplotný senzor. Príkazom GETACK je možné získať hodnotu teploty v okolí tohto uzla. Tá je prenesená v tvare reťazca. Napr. „18.625 C“.

5.4 Aplikačná brána

Ďalšou časťou celého systému je druhá časť aplikačnej brány. Tvorí ju program SERIAL.EXE, ktorý je nahraný v počítači a komunikuje so sieťou ZigBee (koordinátorom) prostredníctvom sériového portu, ktorým je PC vybavený. Je napísaný v jazyku C++ ako projekt pre Borland C++ Builder.

Plní nasledujúce úlohy, ktorými je realizovaný monitoring a ovládanie prvkov siete:

- prijíma a spracúvava informácie od koordinátora. Môžu byť dvojeho typu. Buď ide o kompletnú informáciu, ktorá popisuje sieť, alebo je to odpoveď na žiadosť o hodnotu – stav niektorého zariadenia. V našom prípade to môže byť hodnota svetla alebo teploty.
- Informácie zo strany koordinátora sú analyzované a zapísané do výstupného súboru XML, ktorý sieť popisuje.
- Prijíma pokyny, ktoré sú určené pre ZigBee sieť zo súboru a preposiela ich koordinátorovi.

Autorom pôvodného programu je Thierry Schneider. Naprogramoval základný terminál pre prácu so sériovým portom. Odchyťaval znaky zo sériovej linky, ktoré vypisoval ich na štandardný výstup a odchyťaval stlačené klávesy, ktoré posielal na sériový port. Ja som tento projekt upravil pre svoje potreby nasledovne.

[10]

Monitoring

Pojem monitoring predstavuje sledovanie siete a udržiavanie prehľadu o aktuálnom stave jednotlivých uzlov. Ide o tok dát zo siete k užívateľovi, v našom prípade do súboru XML. A je realizovaný nasledovne.

Dáta zo sériovej linky prijímam a analyzujem. Obyčajný text a výpisy program buď ignoruje alebo prepisuje na výstup, ale nespracúvava. Ak príde zložená zátvorka „{“, znaky sú zapisované do bufferu až kým nepríde jej zatváracia podoba „}“. Nato je buffer zaslaný funkciou *voidAnalyzeBuffer(void.)*. Ak pôjde o prvotný kompletný výpis, buffer je postupne čítaný a na výstup sú informácie zapisované vo formáte súboru XML. Ten predstavuje univerzálne rozhranie pre ďalšie spracovanie a technológie.

Ak pôjde o odpoveď na žiadosť, ktorá obsahuje hodnotu zariadenia uzla, je situácia o niečo komplikovanejšia. Vo vytvorenom súbore je potreba nájsť príslušné tagy `<value> hodnota uzla </value>`. Medzi nich sa stav zariadenia vloží a následne znovu zapíše do XML súboru. Tak je zabezpečená komunikácia od koordinátora.

Súbor XML je textový, iba údaje predstavujúce počet sú prevedené na hodnoty čísla (04=4, 1A=26, ...). Ďalšie údaje sú síce v šestnástkovej sústave, ale pre naše potreby identifikácie vystačíme aj s ich textovou podobou.

Pre predstavu uvádzam jednoduché DTD súboru XML:

```
<!ELEMENT
network(PAN, ScanDur, BeaconOrd, SuperFrameOrd, BatteryLifeExt, NumNodes, node+) >
    <!ELEMENT PAN ( #PCDATA ) >
    <!ELEMENT ScanDur ( #PCDATA ) >
    <!ELEMENT BeaconOrd ( #PCDATA ) >
    <!ELEMENT SuperFrameOrd ( #PCDATA ) >
    <!ELEMENT BatteryLifeExt ( #PCDATA ) >
    <!ELEMENT NumNodes ( #PCDATA ) >
    <!ELEMENT node ( ieee, mac, logtype, epnum, eplist ) >
        <!ELEMENT ieee ( #PCDATA ) >
        <!ELEMENT mac ( #PCDATA ) >
        <!ELEMENT logtype ( #PCDATA ) >
        <!ELEMENT epnum ( #PCDATA ) >
        <!ELEMENT eplist ( EP+ ) >
            <!ELEMENT EP ( id, name, value, inclustcount, inclusters,
outclustcount, outclusters ) >
                <!ELEMENT id ( #PCDATA ) >
                <!ELEMENT name ( #PCDATA ) >
                <!ELEMENT value ( #PCDATA ) >
                <!ELEMENT inclustcount ( #PCDATA ) >
                <!ELEMENT inclusters ( incluster? ) >
                    <!ELEMENT incluster ( #PCDATA ) >
                <!ELEMENT outclustcount ( #PCDATA ) >
                <!ELEMENT outclusters ( outcluster? ) >
                    <!ELEMENT outcluster ( #PCDATA ) >
```

Ovládanie

Možnosti ovládania prvkov siete ZigBee sú obmedzené a sú dané ich možnosťami. Ide o pomerne jednoduché zariadenia, v našom prípade s diódou LED a teplotným senzorom. V súbore *todo.zgw* sú uložené dáta už v binárnej podobe a reprezentujú príkazy pre sieť. Dáta boli pred zápisom upravené tak, aby mohli byť zaslané priamo na port. Súbor *todo.zgw* je binárny a predstavuje frontu a komunikačné rozhranie medzi užívateľom a našou aplikačnou bránou pri komunikácii od koncového užívateľa k sieti.

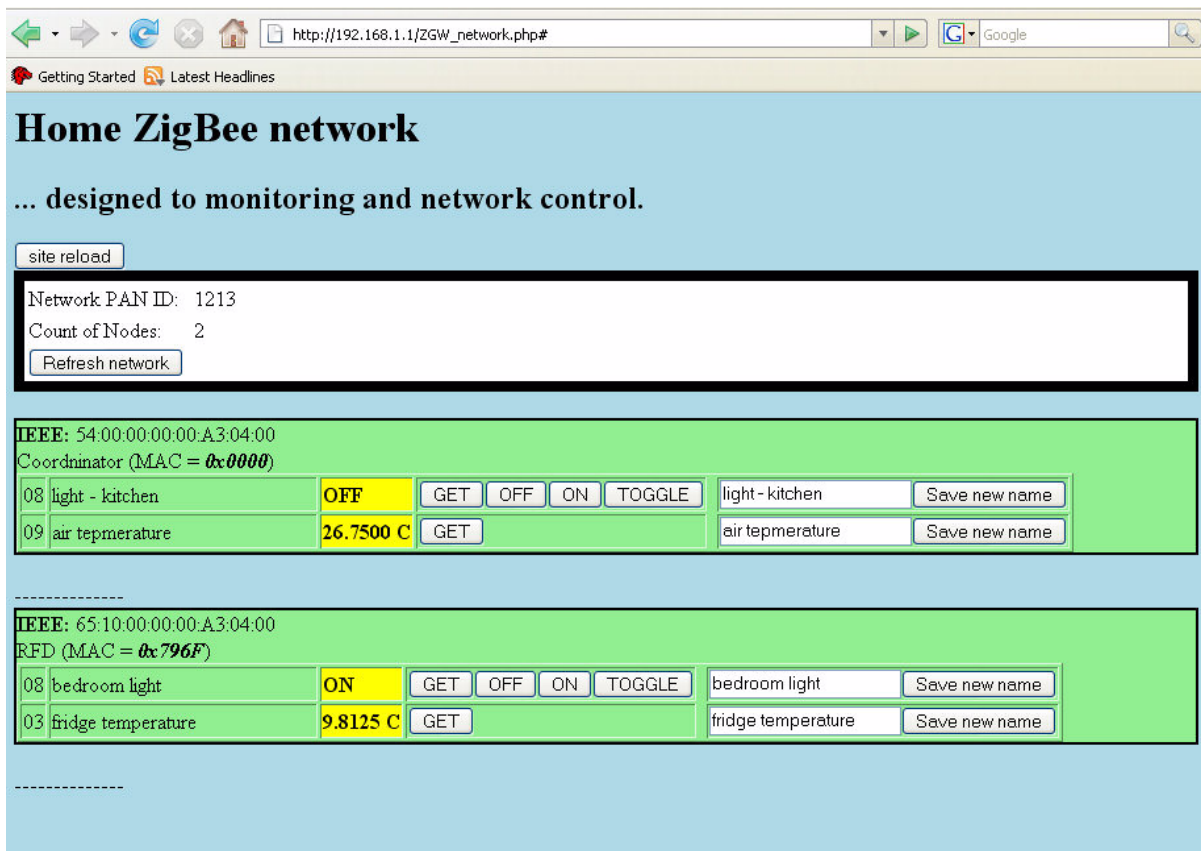
5.5 Webové užívateľské rozhranie – GUI

Počítačové systémy sú pomerne zložitou technickou oblasťou. Ich zavedenie do života a rozšírenie však má jednu zásadnú podmienku. Okrem toho, že musia prinášať úžitok alebo zábavu, musia byť pre koncového užívateľa príjemné a jednoduché pre ovládanie. Skupinu týchto vlastností systému skrýva v sebe skratka GUI. Možností realizácie grafického užívateľského rozhrania je obrovské množstvo. Pri jeho návrhu je potreba využiť vhodnú mieru abstrakcie a zabezpečiť tak možnosť intuitívneho ovládania.

V našom prípade som nadviazal na rozhranie aplikačnej brány (XML + *todo.zgw*) a užívateľské prostredie som realizoval ako webovú stránku HTML, vytvorenú pomocou technológie PHP. Výber som zvolil na základe znalostí týchto technológií. Službu internetového web servera IIS som prevádzkoval na systéme WINDOWS XP, na ktorom bol nainštalovaný aj server PHP.

Za webové rozhranie je zodpovedný jediný súbor *ZGW_Network.php*, ktorý realizuje nasledovné činnosti:

- formátuje súbor XML a dáva tak prehľad užívateľovi o parametroch siete ZigBee a vlastnostiach uzlov,
- umožňuje priradiť jednotlivým EP nejaké popisné, užívateľské meno, napr. „svetlo v izbe“, „teplota na balkóne“ a pod.
- umožňuje zaslať do siete príkaz. Zaslanie je realizované skrytým formulárom. Stlačením tlačítka je zapísaný do súboru *todo.zgw* samotný príkaz a jeho niekoľko parametrov v binárnej podobe.



Obr. 25: Rozhranie pre ovládanie a sledovanie prvkov siete ZigBee. Klientská časť komunikácie.

6 Problémy a návrhy na rozšírenie

Počas písania práce som bol nútený riešiť problémy, ktorých riešenie nebolo vždy zrejmé na prvý pohľad. Často chýbala nejaká drobná informácia alebo bola príčinou nepozornosť. Niektoré z nich uvádzam v tejto kapitole. Kapitola by mala pomôcť záujemcom o prácu na podobnom projekte, aby sa podobným chybám vyvarovali. Samotnú implementáciu sprevádzalo aj ďalšie štúdium. Informácie zistené v tejto fázi projektu som už však nemohol využiť, preto ich uvádzam ako motiváciu pre prípadné ďalšie rozšírenie a zlepšenie práce.

- Jediným spôsobom ako s kitmi komunikovať je pomocou sériového portu RS-232. Neočakávaným problémom bolo, že množstvo počítačov (vrátane notebookov) už dnes sériový port neobsahuje. Ako riešenie som sa rozhodol použiť USB-RS232 adaptér. Vznikali tu problémy pri komunikácii, ktorých zdroje sa mi dlhšiu dobu nepodarilo odhaliť. Nakoniec bola chyba práve v tejto redukcii, prípadne výrobcom dodanom ovládači. Ďalšiu prácu s redukciou som zavrhol a radšej si zaobstaral počítač vybavený sériovým portom.
- V jednom momente sa mi prestalo dariť, firmware nedokázal naštartovať a výpisy na terminále prestali dávať zmysel. Akákoľvek snaha o zlepšenie bola márna. Chybou bola nedostatočná kapacita napájacieho zdroja: 9V batéria.
- Občas nepríjemnosti spôsobovalo poradie LSB (Least Significant Byte) a MSB (Most Significant Byte) bytu MAC adresy. Ide o poradie dvoch bajtov.
- Je dobre vedieť, že koordinátor má vždy MAC adresu 0x0000 a že každý uzol má vždy EP 0, ktorý je ZPO a pre vonkajšieho užívateľa je neprístupný. Je možné využívať čísla 1 – 240.

Návrhy na zlepšenie a ďalšie štúdium

- Doimplementovať i prácu s ostatnými descriptorami, ak sú dostupné. Práca s power descriptorom za účelom odhalenia dostatočne dopredu straty kapacity napájacieho zdroja. Využiť user descriptor v užívateľskom rozhraní.
- Preniknúť do úrovne atribútov a ďalších vlastností clustrov.
- Dáta zasielané terminálu po sériovom rozhraní sú v textovej podobe, ale ich význam je v binárny. Často sú data považované za textové a až v záverečnej fáze sú opäť konvertované do binárnej hodnoty. Napr.: uzol má adresu 0x796F, čo sú 2 bajty, ale v textovej podobe „796F“ zaberajú 4 bajty. Možno by to šlo zjednodušiť a konvertovať v niektorej inej fáze. Pozor je potreba dávať u dát, ktoré predstavujú počet. Tam je koneverzia nevyhnutná. Napríklad 0x0A, je potreba to konvertovať na hodnotu 10. Dáta sú do binárnej podoby prevedené až pred zápisom do súboru *todo.zgw*. Pri zasielaní do siete ich už programom SERIAL iba preposielam na sériové rozhranie.

7 Záver

Sieť ZigBee je stále pomerne mladou technológiou, ktorá je v neustálom vývoji. Vzhľadom k jej návrhu a vlastnostiam je priam predurčená pre široký záber použitia v najrozličnejších oblastiach života. Počnúc domácnosťami, priemyslom cez vedu a výskum až po uplatnenie v armádnych zložkách. Oproti ostatným technológiám, o ktorých pojednáva kapitola 2, prenikajúcim na trh má však výhody, ktoré jej dávajú šancu na úspech.

Práca bola podnetom pre preskúmanie tejto technológie a oboznámenie sa s jej vnútornou štruktúrou a princípom fungovania. Priamo nadviazala na základné znalosti problematiky zo semestrálneho projektu. Prvé kapitoly pojednávajú o teoretických základoch tejto technológie a porovnávajú ju s inými dostupnými bezdrôtovými sieťami. Okrem teoretického štúdia mi dala možnosť preskúmať technológiu ZigBee aj z praktickej stránky. Táto časť bola obzvlášť prínosná, ale nezaobišla sa bez tej prvej, teoretickej. Šlo o prácu s vývojovými ZigBee kitmi od firmy Microchip. Práca bola sprevádzaná niekoľkými komplikáciami, s ktorými som si nakoniec poradil. Okrem samotného štúdia technológie je súčasťou práce i návrh aplikačnej brány pre sieť ZigBee. Tu som nakoniec zvolil cestu jednoduchého riešenia, ktoré by sa mohlo zdať nie úplne ideálnym. Uvedené riešenie sa však ponúklo akosi samo vzhľadom k požiadavkam na takúto bránu, ktoré vyplynuli z možnosti sensorovej siete. Jednou z častí aplikačnej brány je komunikácia pc aplikácie a uzla siete po sériovom rozhraní, pre ktorú som navrhol jednoduchý komunikačný protokol. Okrem teoretických poznatkov a praktických skúseností so sieťou Zigbee som bol nútený ďalej a hlbšie sa oboznamovať i s ostatnými technológiami použitými v práci, čo považujem tiež za veľmi prínosné. Táto práca obsahuje určité množstvo nedokonalostí a tak ponúka miesto pre ďalšie štúdium a zlepšenia.

Literatura

- [1] Beneš, P.: Standard IEEE 1451 – budoucnost inteligentních snímačů?, Automa, júl 2004. Dokument dostupný na URL <http://www.odbornecasopisy.cz/automa/2004/au070407.htm> (január 2007).
- [2] Bradáč, Z.: Bezdrátový komunikační standard ZigBee, Automatizace, ročník 48, číslo 4, apríl 2005. Dokument dostupný na URL <http://www.automatizace.cz/article.php?a=638> (január 2007).
- [3] IEEE: IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4), september 2006, Webová stránka <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- [4] Flowers, D.: AN965 AN965 - Microchip Stack for ZigBee Protocol[datasheet], Microchip Technology Inc., 2006, USA. Dokument dostupný na URL <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00965c.pdf> (marec 2007).
- [5] Kinney, P.: Gateways: Beyond the sensors networks. Zigbee Alliance, Dokument dostupný na URL www.zigbee.org/en/documents/SensorsExpo/7-Sensors-Expo-kinney.pdf (január 2007).
- [6] Kysilka, R.: WirelessUSB. www.lupa.cz, 23. septembra 2006. Dokument dostupný na URL <http://www.lupa.cz/clanky/wirelessusb/> (január 2007).
- [7] Microchip Technology: PICDEM™ Z Demonstration Kit User's Guide, 2004.
- [8] NIST: Brief Description of the Family of IEEE 1451 Standards. IEEE 1451Website, 8. mája 2002. <http://ieee1451.nist.gov/>.
- [9] Očenášek, P., Trchalík, R.: ZigBee Gateways, Fakulta informačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Brno.
- [10] Schneider, T.: Serial Communication for Win32, 16. máj 2005. Dokument dostupný na URL <http://www.tetraedre.com/advanced/serial2.php> (apríl 2007).
- [11] Šimek, V.: Wireless Sensor Communication Network [MSc. Thesis], Fakulta informačních technologií Vysokého učení technického v Brně, 2006, Brno.
- [12] Trchalík, R.: Návrh IEEE 802.15.4 sítě, Fakulta informačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Brno.
- [13] Pužmanová, R.: Budoucnost Ultrawidebandu ohrožena?. www.lupa.cz, 26. januára 2006. Dokument dostupný na URL <http://www.lupa.cz/clanky/budoucnost-uwbb/> (január 2007).
- [14] Pužmanová, R.: Nová bezdrátová řešení mají zahýbat světem. www.lupa.cz, 30. novembra 2006. Dokument dostupný na URL <http://www.lupa.cz/clanky/nova-bezdratova-reseni-maji-zahybat-svetem-1/> (január 2007).
- [15] Pužmanová, R.: Osobní síť -- Bluetooth a IEEE 802.15. www.lupa.cz, 14. mája 2002. Dokument dostupný na URL <http://www.lupa.cz/clanky/osobni-site-bluetooth-a-ieee-802-15/> (január 2007).
- [16] Pužmanová, R.: Quo vadis, bezdrátová komunikace?. www.lupa.cz, 2.marca 2006. Dokument dostupný na URL <http://www.lupa.cz/clanky/quo-vadis-bezdratova-komunikace-1/> (január 2007).
- [17] Veselý, M.: Bezdrátové ovládání domácích spotřebičů s technologií ZigBee [Bc. Thesis], Fakulta elektrotechnická Českého učení technického v Praze, 2006, Praha.
- [18] Wikipedia, The Free Encyclopedia.: IEEE 802.15, 30. November 2006, Dokument dostupný na http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15 (január 2007).

- [19] Wikipedia, The Free Encyclopedia.: Phase-shift keying, 29. December 2006, Dokument dostupný na http://en.wikipedia.org/wiki/Offset_quadrature_phase-shift_keying (január 2007).
- [20] Wikipedia, The Free Encyclopedia.: Direct-sequence spread spectrum, 29. December 2006, Dokument dostupný na http://en.wikipedia.org/wiki/Direct-sequence_spread_spectrum (január 2007).
- [21] Wojciaszyk, P.: Inteligentní senzory a bezdrátové sítě. XXX. ASR 2005 Seminar, Instrument and Control, Ostrava, 29. apríla 2005. Dokument dostupný na URL <http://www.fs.vsb.cz/akce/2005/ASR2005/Proceedings/papers/519.pdf> (január 2007).
- [22] ZigBee Alliance: ZigBee Specification v 1.0. ZigBee Alliance Board of Directors, 2004. Webová stránka <http://www.zigbee.org>.

Zoznam použitých skratiek a symbolov

APL	Application Layer
APS	Application Support Sublayer
APSDE-SAP	Application Support Sublayer Data Entity SAP
APSME-SAP	Application Support Sublayer Management Entity SAP
BAN	Body Area Network
BT	Bluetooth
CAN	Controller Area Network
CGI	Common Gateway Interface
CS	Cypress Semiconductors
CSS	Cascading Style Sheet
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTD	Document Type Definition
EP	End Point
EUI	Extended Unique Identifiers
FFD	Full Function Device
HD	High Definition
HID	Human Interface Devices
HPNA	Home Phonenumber Networking Alliance
HTML	Hyper Text Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning (Climate Control)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISO/OSI	International Standards Organization/Open Systems Interconnection
KVP	Key Value Pair
LED	Light Emitting Device
LSB	Least Significant Bit/Byte
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMI	Mixed Module Interface
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSB	Most Significant Bit/Byte
MSG	Message(frame format)
MSDU	MAC Sublayer Data Unit
NCAP	Network Capable Application Processor
NLDE-SAP	Network Layer Data Entity SAP
NLME-SAP	Network Layer Management Entity SAP
NWK	Network Layer
O-QPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying
OUI	Organizationally Unique Identifier
PAN ID	Personal Area Network Identification

PHP	PHP: Hypertext Preprocessor
PPDU	Physical Protocol Data Unit
PULSERS	Pervasive Ultra-wideband Low Spectral Energy Radio Systems
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Devices
RFID	Radio Frequency Identification
RS-232	Recommended Standard 232(computer serial interface)
SAP	Service Access Point
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
STB	Set Top Box
STIM	Smart Transducer Interface Module
TBIM	Transducer Bus Interface Module
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TEDS	Transducer Electronic Data Sheet
TTI	Transducer Independent Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UCAN	Ultra-wideband Concepts for Ad-hoc Networks
ULTRAWAVES	Ultra WideBand Audio Video Entertainment System
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wide Band
WIGWAM	Wireless Gigabit with Advanced Multimedia Support
WiHD	Wireless High Definition
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
XML	Extensible Markup Language
ZBA	ZigBee Alliance
ZDO	ZigBee DeviceObject

Zoznam príloh

Príloha 1. XML súbor

Príloha 2. Inštalácia systému

Príloha 3. CD/DVD

Prílohy

Príloha 1. XML súbor

Tento XML súbor je príkladom konkrétnej siete ZigBee. Tvorí rozhranie pre monitoring siete. Pre prípadné porovnanie s konečným výsledkom GUI zodpovedá Obr. 25.

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>

<network>
  <PAN>1213</PAN>
  <ScanDur>00</ScanDur>
  <BeaconOrd>15</BeaconOrd>
  <SuperFrameOrd>04</SuperFrameOrd>
  <BatteryLifeExt>10</BatteryLifeExt>
  <NumNodes>2</NumNodes>
  <node>
    <ieee>54:00:00:00:00:A3:04:00</ieee>
    <mac>0000</mac>
    <logtype>00</logtype>
    <epnum>3</epnum>
    <eplist>
      <EP>
        <id>00</id>
        <name>alias_name_00</name>
        <value>value=XX</value>
        <includcount>0</includcount>
        <inclusters>
          </inclusters>
        <outcludcount>0</outcludcount>
        <outclusters>
          </outclusters>
        </EP>
      <EP>
        <id>08</id>
        <name>light - kitchen</name>
        <value>F0</value>
        <includcount>1</includcount>
        <inclusters>
          <incluster>13</incluster>
        </inclusters>
        <outcludcount>0</outcludcount>
        <outclusters>
          </outclusters>
        </EP>
      <EP>
        <id>09</id>
        <name>air tepmerature</name>
        <value>26.7500 C</value>
        <includcount>0</includcount>
        <inclusters>
          </inclusters>
        <outcludcount>1</outcludcount>
        <outclusters>
          <outcluster>20</outcluster>
        </outclusters>
      </EP>
    </eplist>
  </node>
</network>
```

```

</node>
<node>
  <ieee>65:10:00:00:00:A3:04:00</ieee>
  <mac>796F</mac>
  <logtype>02</logtype>
  <epnum>3</epnum>
  <eplist>
    <EP>
      <id>00</id>
      <name>alias_name_00</name>
      <value>value=XX</value>
      <inlustcount>0</inlustcount>
      <inclusters>
      </inclusters>
      <outclustcount>0</outclustcount>
      <outclusters>
      </outclusters>
    </EP>
    <EP>
      <id>08</id>
      <name>bedroom light</name>
      <value>F1</value>
      <inlustcount>1</inlustcount>
      <inclusters>
        <incluster>13</incluster>
      </inclusters>
      <outclustcount>0</outclustcount>
      <outclusters>
      </outclusters>
    </EP>
    <EP>
      <id>03</id>
      <name>fridge temperature</name>
      <value>9.6250 C</value>
      <inlustcount>0</inlustcount>
      <inclusters>
      </inclusters>
      <outclustcount>1</outclustcount>
      <outclusters>
        <outcluster>20</outcluster>
      </outclusters>
    </EP>
  </eplist>
</node>
</network>

```

Príloha 2. Inštalácia

Požiadavky na systém:

- aspoň 2 vývojové kity PICDEM Z od firmy Microchip (prípadne i vývojové prostredie a programátor)
- osobný počítač vybavený sériovým rozhraním (9 pin) s OS Windows XP, webovým serverom a serverom PHP.
- sériové rozhranie, kábel RS-232

Naprogramovanie kitov ZigBee firmwarom

Podľa priložených materiálov naprogramujte kity. Práve jeden kit musí obsahovať program Coordinator. Ostatné kity obsahujú program RFD, pričom je potreba dať pozor na to, aby každý kit mal inú IEEE adresu. Tá je uložená v súbore *zigbee.def*. Po jej zmene je potreba program znovu skompilovať.

Príprava a spustenie aplikačnej brány

V adresári, odkiaľ sa nám zobrazujú webové stránky, si vytvoríme svoj adresár a skopírujeme doňho nasledovné súbory: *ZGW_network.xml*, *ZGW_network.php*, *serial.exe*, *todo.zgw* a *configcom*. Zabezpečte, aby bolo možné do súborov *todo.zgw* a *ZGW_network.xml* možné zapisovať procesmi spustenými z internetu. Prípadne nepridelenia správnych práv bude odhalené až pri spustení stránky príslušnými hláškami.

Prepojíme počítač pomocou sériového kábelu s kitom Coordinator. V prípade potreby upravte podľa inštrukcií (*confighp*) súbor *configcom*. Ide o nastavenie parametrov pre komunikáciu po sériovom porte.

Spustite súbor *serial.exe*. Jeho samovoľné neukončenie znamená, že sériový port je dostupný.

Spustenie siete ZigBee

Ako prvý zapneme uzol Coordinator. Čitateľné výpisy na obrazovke (v okne programu *serial.exe*) s informáciami o štarte uzlu a prebiehanej inicializácii sú znamením, že nastavenie je v poriadku. Po niekoľkých sekundách výpisy ustanú a sieť ZigBee je tak naštartovaná.

Teraz môžete zapnúť ďalší uzol (RFD). Pre istotu stlačte ešte tlačítko RESET. Niekedy sa uzol po zapnutí automaticky neprihlási, ale po resetovaní vždy. Počkáme opäť 5 sekúnd, než Coordinator pridá uzol do štruktúry. Rovnako zapneme postupne i ďalšie uzly.

Načítanie informácií o sieti, monitoring a ovládanie

Spustíme internetový prehliadač do príkazového riadku vpišeme adresu k súboru *ZGW_network.php*. Napr. http://localhost/zigbee/ZGW_network.php. Na začiatku nemáme o sieti žiadne informácie, preto sa nám zobrazí takmer prázdna stránka s tlačítkom „refresh network“. Stránka sa pravidelne automaticky obnovuje. Použite tlačítko k získaniu informácií o sieti. Po uplynutí niekoľkých sekúnd sa nám stránka zmení. Uvidíme tu jednotlivé uzly siete a ich možnosti. Políčka s popisom VALUE (hodnota), však ostávajú prázdne. Použitím ostatných tlačítok tak zadáte príkaz pre uzol v sieti ZigBee a políčko VALUE sa následne (po uplynutí niekoľkých sekúnd) naplní aktuálnou hodnotou. Úplne vpravo máte možnosť danému endpointu – senzoru zadať popisné meno.

Príloha 3. CD/DVD ...

Priložené médium obsahuje všetky zdrojové i binárne kódy vytvorenej aplikácie:

- firmware pre uzly Coordinator i RFD (vrátane ZigBee Stack)
- zdrojové kódy programu SERIAL.EXE
- webovú aplikáciu PHP
- súbory tvoriace komunikačné rozhranie medzi aplikačnou bránou a webovou aplikáciou
- ostatné konfiguračné súbory

Súčasťou je aj táto textová dokumentácia.