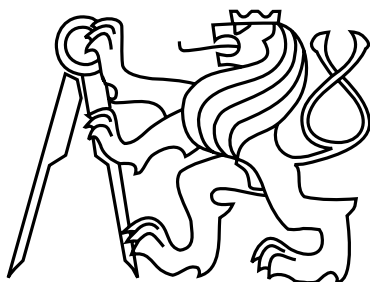


České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra počítačů



Diplomová práce  
**Model siete ZigBee**

*Bc. Bernard Halás*

Vedúci práce: doc. Ing. Jan Janeček, CSc

Študijný program: Elektrotechnika a informatika, štrukturovaný,  
Navazující magisterský

Obor: Výpočetní technika

22. mája 2009



## Pod'akovanie

Rád by som sa poďakoval pánu Janečkovi za konzultácie, pripomienky a návrhy, ktoré mi ochotne poskytol počas vypracovávania tejto práce. Takisto vďaka patrí aj mojej rodine za podporu počas celého obdobia môjho štúdia.



# Prehlásenie

Prehlasujem, že som prácu vypracoval samostatne a použil som len podklady uvedené v priloženom zozname.

Nemám závažný dôvod proti užitiu tohto školského diela v zmysle §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonů (autorský zákon).

V Prahe dňa 21. 5. 2009

.....



# Abstract

This work describes a design of a LR-WPAN network model based on the ZigBee standard using OMNeT++, a popular discrete-event simulating engine. The text covers and evaluates the possibilities given by the addons for wireless and mobile networks modeling. The aim is to present one of many approaches based on the exact translation of the internal processes defined by the standards into the thorough structure of the model. This offers a clear view inside the model and sets a solid starting point for the future work on the product.

# Abstrakt

Táto práca pojednáva o príprave modelu LR-WPAN siete postavenej na štandarde ZigBee v populárnom simulačnom nástroji OMNeT++. Spracováva a vyhodnocuje možnosti ponúkané doplnkovými rozšíreniami k danému simulátoru pre modelovanie bezdrôtových a mobilných sietí. Práca si dáva za cieľ ponúknuť jeden z možných prístupov založený na presnom premietnutí procesov definovaných v špecifikácii aj do vnútornej štruktúry produktu, čím sa snaží o prehľadnosť a o poskytnutie solídneho odrazového bodu pre prípadné rozširovanie, alebo aktualizáciu modelu.





# Obsah

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Špecifikácia požiadaviek na navrhovaný systém</b> | <b>3</b>  |
| 2.1      | Popis problému                                       | 3         |
| 2.2      | Požiadavky na model                                  | 3         |
| 2.2.1    | Vlastnosti sietí postavených na IEEE 802.15.4        | 4         |
| 2.2.1.1  | Mobilita   | 5         |
| 2.2.1.2  | Vlastnosti prenosového média                         | 5         |
| 2.2.2    | Modularita návrhu                                    | 5         |
| <b>3</b> | <b>Zigbee a IEEE 802.15.4</b>                        | <b>7</b>  |
| 3.1      | IEEE 802.15.4  | 7         |
| 3.1.1    | Topológia  | 8         |
| 3.1.1.1  | Hviezda (Star)                                       | 8         |
| 3.1.1.2  | Každý s každým (Peer-to-Peer)                        | 8         |
| 3.1.2    | Fyzická vrstva                                       | 11        |
| 3.1.3    | Linková vrstva                                       | 13        |
| 3.1.4    | Beaconing a non-beaconing módy                       | 14        |
| 3.1.5    | Superframe rámec                                     | 14        |
| 3.1.5.1  | Beacon rámec   | 15        |
| 3.2      | ZigBee   | 16        |
| 3.2.1    | Architektúra ZigBee                                  | 16        |
| 3.2.2    | Sieťová vrstva                                       | 17        |
| 3.2.3    | Aplikačná vrstva                                     | 17        |
| 3.2.3.1  | Podporná vrstva aplikačnej vrstve                    | 19        |
| 3.2.3.2  | Objekty typu ZigBee Device Objects                   | 19        |
| 3.2.4    | Väzba na IEEE 802.15.4                               | 19        |
| <b>4</b> | <b>Varianty simulačného modelu</b>                   | <b>21</b> |
| 4.1      | Rozšírenia pre simuláciu WSN sietí                   | 21        |
| 4.1.1    | PAWiS  | 21        |
| 4.1.2    | MiXiM  | 22        |
| 4.1.2.1  | Vlastnosti   | 22        |
| 4.1.2.2  | Štruktúra  | 22        |
| 4.1.3    | Mobility Framework                                   | 25        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1.3.1  | Architektúra . . . . .                                   | 25        |
| 4.2      | Existujúce modely sietí ZigBee a IEEE 802.15.4 . . . . . | 28        |
| <b>5</b> | <b>Popis simulačného modelu</b>                          | <b>31</b> |
| 5.1      | Aplikačná vrstva - APP . . . . .                         | 33        |
| 5.2      | Sieťová vrstva - NET . . . . .                           | 33        |
| 5.2.1    | Datová entita - NLDE . . . . .                           | 33        |
| 5.2.2    | Riadiaca entita - NLME . . . . .                         | 34        |
| 5.3      | Linková vrstva - MAC . . . . .                           | 35        |
| 5.3.1    | Datová entita - MCPS . . . . .                           | 37        |
| 5.3.2    | Riadiaca entita - MLME . . . . .                         | 40        |
| 5.4      | Fyzická vrstva - PHY . . . . .                           | 41        |
| 5.4.1    | Datová entita - PD . . . . .                             | 42        |
| 5.4.2    | Riadiaca entita - PLME . . . . .                         | 43        |
| 5.4.3    | Väzba na Mobility Framework . . . . .                    | 43        |
| 5.5      | Mobilita . . . . .                                       | 47        |
| 5.6      | IP over IEEE 802.15.4 . . . . .                          | 48        |
| <b>6</b> | <b>Funkčnosť, výsledky testovania</b>                    | <b>51</b> |
| <b>7</b> | <b>Záver</b>   | <b>59</b> |
|          | <b>Literatúra</b>  | <b>61</b> |
| <b>A</b> | <b>Zoznam použitých skratiek</b>                         | <b>63</b> |
| <b>B</b> | <b>Obsah priloženého CD</b>                              | <b>67</b> |

# Zoznam obrázkov

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.1  | Topológia typu hviezda . . . . .   | 9  |
| 3.2  | Topológia typu každý s každým . . . . .  | 10 |
| 3.3  | Topológia typu zhuk stromov . . . . .  | 11 |
| 3.4  | 32-bitový identifikátor kanálov a stránky kanálov . . . . .  | 13 |
| 3.5  | Štruktúra superframe rámca (obrázok nie je v mierke) . . . . .   | 15 |
| 3.6  | Vzťah medzi ZigBee Alliance a IEEE 802.15.4 . . . . .  | 17 |
| 3.7  | Znázornenie vrstvovej architektúry siete ZigBee . . . . .  | 18 |
| 3.8  | Použitie dopĺňujúcich vrstiev v komunikácii medzi linkovou a sieťovou vrstvou . . . . .                                    | 20 |
| 4.1  | Práca so signálovou časťou simulácie vo frameworku MiXiM . . . . .   | 24 |
| 4.2  | Ignorovanie spojení medzi uzlami z kvadrantov, ktorých vzdialenosť presahuje hodnotu interferenčnej vzdialenosti . . . . . | 26 |
| 4.3  | Komunikácia medzi modulmi <i>Mobility</i> a <i>ChannelControl</i> . . . . .  | 27 |
| 5.1  | Základný pohľad na nami navrhovaný simulačný model . . . . .   | 32 |
| 5.2  | Referenčný model sieťovej vrstvy . . . . .   | 34 |
| 5.3  | Podoba implementovaného modelu sieťovej vrstvy . . . . .   | 36 |
| 5.4  | Referenčný model linkovej vrstvy . . . . .   | 38 |
| 5.5  | Spôsob enkapsulácie MPDU na linkovej vrstve . . . . .  | 39 |
| 5.6  | Minimálne časové odstupy medzi jednotlivými rámcami . . . . .  | 39 |
| 5.7  | Podoba implementovaného modelu linkovej vrstvy . . . . .   | 41 |
| 5.8  | Referenčný model fyzickej vrstvy . . . . .   | 42 |
| 5.9  | Spôsob enkapsulácie PSDU na fyzickej vrstve . . . . .  | 43 |
| 5.10 | Podoba implementovaného modelu fyzickej vrstvy . . . . .   | 44 |
| 5.11 | Modul rozhrania 802.15.4 a jeho štruktúra v kontexte s rozšírením <i>Mobility Framework</i> . . . . .                      | 46 |
| 5.12 | Architektúra modulu komunikujúceho IP protokolmi na LR-WPAN sieti . . . . .  | 49 |
| 6.1  | Inicializovaná simulácia, modul <i>routerHost[1]</i> vykonáva aktívny sken okolia . . . . .                                | 51 |
| 6.2  | Sieť vo svojej funkčnej konfigurácii, koordinátor vysiela beacon rámce zariadeniam v dosahu . . . . .                      | 52 |
| 6.3  | Inicializácia koordinátora, ED sken . . . . .  | 54 |
| 6.4  | Vysielanie a prijatie beacon rámcov . . . . .  | 55 |
| 6.5  | Spracovanie žiadosti o asociáciu . . . . .   | 56 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 6.6 | Žiadosť o zaslanie dát, CCA procedúra . . . . .           | 57 |
| 6.7 | Odpoveď na žiadosť o asociáciu, jej spracovanie . . . . . | 58 |
| B.1 | Obsah priloženého CD . . . . .                            | 67 |

# Zoznam tabuliek

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Používané frekvenčné pásma, modulácie a kódové symboly . . . . .   | 12 |
| 3.2 | Zoznam jednotlivých kombinácií kanálov, frekvenčných pásiem a použitých modulácií podľa nastavenia identifikátorov kanálov a stránky kanálov | 13 |



# Kapitola 1

## Úvod

Od napísania našej predchádzajúcej práce zaoberajúcej sa simuláciami senzorových sietí [6] uplynuli približne tri roky. Technológia sa posunula o malý krok vpred a zariadenia pre komunikáciu v senzorových sieťach nenáročných na šírku dátového prenosu sa stávajú cenovo dostupnejšie. Vynárajú sa otázky, či pri masívnejších nasadeniach sú tieto siete schopné vykonávať požadované úlohy pri zdieľaní prenosového média spolu s takisto čoraz rozšírenejšími technológiami bezdrôtových sietí ako Wi-Fi<sup>TM</sup>, alebo Bluetooth<sup>TM</sup>, s ktorými zdieľajú časti frekvenčného spektra pre svoju komunikáciu.

Na základe týchto skutočností sa ponúkalo zúročiť získané skúsenosti so simulačnými systémami a pripraviť aktuálnejší model siete ZigBee postavenej nad technológiou IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.15.4<sup>TM</sup>, ktorý by reflektoval zmeny štandardov z uplynulých mesiacov a rokov a ktorý by ponúkal bohatšie možnosti simulácii s výsledkami bližšími reálnemu svetu. Medzičasom sa objavili možnosti prenosu paketov z rodiny TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) v senzorových sieťach, bolo by preto zaujímavé zistiť, aké výsledky podáva takáto konfigurácia.





# Kapitola 2

## Špecifikácia požiadaviek na navrhovaný systém

### 2.1 Popis problému

Špecifikácia siete ZigBee [13] predstavuje uzavretý dokument popisujúci udalosti, procesy a obsah komunikácie medzi jednotlivými modulmi v rámci hierarchie definovanej takisto týmto dokumentom. Štandard ZigBee hovorí o vyšších sieťových vrstvách. Vynecháva fyzickú a linkovú vrstvu. V daných prípadoch sa spolieha na iný dokument, na špecifikáciu protokolu IEEE 802.15.4<sup>TM</sup> [8].

Informácie obsiahnuté v týchto dvoch dokumentoch je nutné premietnuť do vnútornej štruktúry modelov simulátora pre získanie čo najvernejších výsledkov. Od modelu sa takisto očakáva reflektovanie nárokov vkladanych do reálnych sietí, a to mobilita daných prvkov, ktorá nie je bezdrôtovým senzorových sietí cudzia a určite zakomponovanie javov sprevádzajúcich šírenie elektromagnetického signálu vzduchom. Z experimentálnej stránky veci nás zaujíma aj možnosť nasadenia technológie TCP/IP nad technológiami ZigBee/IEEE 802.15.4

### 2.2 Požiadavky na model

Požiadavky kladené na simulačný model by sa dali zhrnúť do nasledujúcich niekoľko bodov:

1. Obsiahnutie základných vlastností deklarovaných v štandardoch ZigBee a IEEE 802.15.4
2. Podpora mobility všetkých sieťových prvkov
3. Zahrnutie vplyvov prostredia (interferencia, šum, ...)
4. Pripraviť rozhranie umožňujúce prenos IP (Internet Protocol) paketov

5. Modularita pre ľahké aktualizácie modelu v prípade vydania nových verzii štandardov
6. Výpočtová náročnosť vykonávaných simulácií v rozumných medziach

### 2.2.1 Vlastnosti sietí postavených na IEEE 802.15.4

Štandard uvedený technickej verejnosti v roku 2003 špecifikuje fyzickú a linkovú vrstvu Low-Rate WPAN (Wireless Personal Area Network) sietí. Charakteristické vlastnosti týchto sietí sú nízka spotreba, nízka dátová priepustnosť, v prípade potreby garancia istého prenosového pásma a jednoduchosť jednotlivých procesov, z ktorej vyplývajú nevysoké požiadavky na riadiace procesory. Typická aktivita v čase zariadení tohoto typu je pod 0.1%. Elementy, ktoré sú pri takto nastavených požiadavkách na sieť potrebné pre jej efektívne fungovanie a bez ktorých sa náš simulačný model nezaobíde sú nasledovné:

**RFD/FFD prvky** (Full Functionality Device, Reduced Functionality Device) prvky siete IEEE sa podľa funkčnosti delia na dve hlavné skupiny. Konštrukčne jednoduchšie označujeme ako RFD. V teórii grafov by sme ich vďaka ich polohe v stromovej topológii označili listami. Odpoveď na to, prečo potrebujeme zložité (FFD) a jednoduché prvky (RFD) je v tom, že v rámci stromovej hierarchie len tie zariadenia nachádzajúce sa vyššie majú svoju úlohu doplnenú o posielanie beacon rámcov, smerovanie paketov, prijímanie žiadostí o asociáciu siete a pod.

**Beacon rámce** sú rámce vysielané v pravidelných intervaloch zariadením typu FFD a majú za úlohu informovať o plánovaných dátových prenosoch, topológii a o konfiguračných premenných danej siete. Tieto rámce sa objavujú pravidelne a vďaka tomu príjemca vie, kedy si môže dovoliť vypnúť prijímač mikrovlnného signálu s cieľom šetriť energiu s istotou nepremeškania žiadneho beacon rámca.

**CSMA-CA** (Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance) je metóda prístupu k zdieľanému médiu. V našom prípade je médiom vzduch a metóda nám pomáha vyvarovať sa kolízii rámcov pri ich vysielaní a prijímaní.

**GTS mechanizmus** (Guaranteed Time Slot) je systém periodického rezervovania časových slotov pre posielanie rámcov medzi prvkami v stromovej topológii. Môže byť v prípade potreby zárukou získania určitej šírky prenosového pásma pre jednotlivé sieťové prvky, a teda umožňovať komunikáciu s nízkou latenciou.

O týchto vlastnostiach a o spôsobe ich prípadnej implementácie si povieme viac v neskorších kapitolách.

### 2.2.1.1 Mobilita

Na sieťové prvky bezdrôtových sietí je často kladený požiadavok mobility daného prvku v priestore, ktorý je v konečnom dôsledku premietaný do úprav pozície daného prvku v topológii siete. Pre simulátor teda vyplýva, že musí dynamicky v čase vedieť polohu prvku pre výpočet hodnôt fyzikálnych veličín charakterizujúcich prenos a následný príjem signálu.

Čo sa týka daného modelu, ten by mal mať schopnosť reagovať v prípade, že komunikačné cesty po zmene polohy už nie sú schopné dostatočne kvalitne prenášať rámce. Toto je vlastnosť prvkov, na ktorú sa v špecifikácii [8] myslí, a teda vo finálnom modeli bude zahrnutá.

### 2.2.1.2 Vlastnosti prenosového média

Siete, ktoré sú predmetom nášho záujmu, pristupujú k zdieľanému médiu - vzduchu. Tým, že médium je spoločné pre všetky prvky siete, stav, v ktorom sa nachádza, má rôznou mierou vplyv na všetky prijímače elektromagnetického signálu. Mnohé simulátory sa zameriavajú práve na verné spracovanie tejto skutočnosti. Ich metódy napríklad pre výpočet prijímaného výkonu, alebo odstupu signálu od šumu (SNR) sú výborne spracované a budú pre náš simulátor užitočné.

## 2.2.2 Modularita návrhu

Podobne ako v predchádzajúcej práci [6] sa nám overil diferencovaný prístup k jednotlivým vrstvám odvodený od OSI-ISO modelu, tiež teraz budú jednotlivé sieťové prvky zložené z viacerých modulov, ktoré budú medzi sebou komunikovať ideálne len predávaním správ.

Tento pohľad na komplexnú štruktúru sieťových prvkov nám zaručí jednoduchosť prípadných neskorších zásahov napríklad z dôvodu úprav v smerovacích mechanizmoch. V danom prípade bude nutné iba vykonať zmeny v module, ktorý zabezpečuje smerovanie paketov.



# Kapitola 3

## Zigbee a IEEE 802.15.4

S nástupom zariadení pre bezdrôtovú komunikáciu určených pre použitie v lokálnych (LAN - Local Area Network), alebo osobných (PAN - Personal Area Network) sieťach sa začala vynárať možnosť využiť bezdrôtovú technológiu aj pre inteligentné systémy, ktoré nevyžadujú vysoké prenosové rýchlosti. To bol popud pre vznik štandardu pre bezdrôtovú komunikáciu v LAN a PAN sieťach charakteristickú nízkymi prenosovými rýchlosťami, malými nárokmi na konfiguráciu a aj samotnú prevádzku.

### 3.1 IEEE 802.15.4

Tento štandard definujúci fyzickú (PHY - Physical) a linkovú (MAC - Media Access Control) vrstvu bol prvý krát predstavený v roku 2003 [7]. Od toho momentu je ďalej vyvíjaný dvoma smermi. Jeden bol predstavený v roku 2006 pod označením IEEE 802.15.4b [8], formálne aj označovaný ako IEEE 802.15.4b-2006 vďaka roku svojho publikovania. Rozšíril možnosti modulácie signálu, a teda aj zvýšil maximálne prenosové rýchlosti vo frekvenčných pásmach 868/915 MHz. Umožnenie viacerých druhov modulácie v týchto prenosových pásmach umožnilo zjednodušenie samotných zariadení, pretože na komunikáciu v 868/915 MHz a 2.4 GHz už stačil iba jeden modulačný čip. Druhú vetvu vývoja prestavoval štandard označovaný ako IEEE 802.15.4a prípadne formálne IEEE 802.15.4a-2007, ktorý operuje v pásme Ultra-Wideband (UWB). Týmto sa však nebudeme v tejto práci zaoberať. Všetky nasledovné informácie sa budú viazať k verzii IEEE 802.15.4b-2006, ak nebude uvedené inak.

Siete postavené podľa IEEE 802.15.4b-2006 sú charakteristické tým, že ponúkajú

- Prevádzku v bezlicencovaných frekvenčných pásmach
- Prenosové rýchlosti na úrovniach 250, 100, 40, alebo 20 kb/s
- Topológiu v tvare hviezda (star), alebo každý s každým (peer-to-peer)
- Komunikáciu pomocou 64-bitových, alebo 16-bitových adries

- Mechanizmus alokácie časových slotov (GTS)
- Prístup na médium vyhýbajúci sa kolíziám (CSMA-CA)
- Spoľahlivý prenos dát s mechanizmom kontroly integrity (FCS - Frame Check Sequence) a potvrdzovaním dát
- Aktivitu zariadení priemerne na úrovni 0.1% doby cyklu

Všeobecne, IEEE 802.15.4 predstavuje základ pre tzv. LR-WPAN (Low-Rate Wireless PAN) siete. Naň sa spoliehajú technológie ako WirelessHART, MiWi, alebo aj ZigBee.

### 3.1.1 Topológia

Pre vytvorenie PAN siete je potrebné, aby minimálne jeden z prvkov bol typu FFD. Tieto zariadenia majú schopnosť vytvárať WPAN sieť (v prípade, že fungujú aj ako PAN koordinátor), okrem toho aj pridávajú sieťové adresy, asociujú nové prvky do siete a vysielajú tzv. beacon rámce.

Prvky FFD a RFD môžu tvoriť 2 druhy usporiadaní z pohľadu topológie siete - hviezdu a každý s každým.

#### 3.1.1.1 Hviezda (Star)

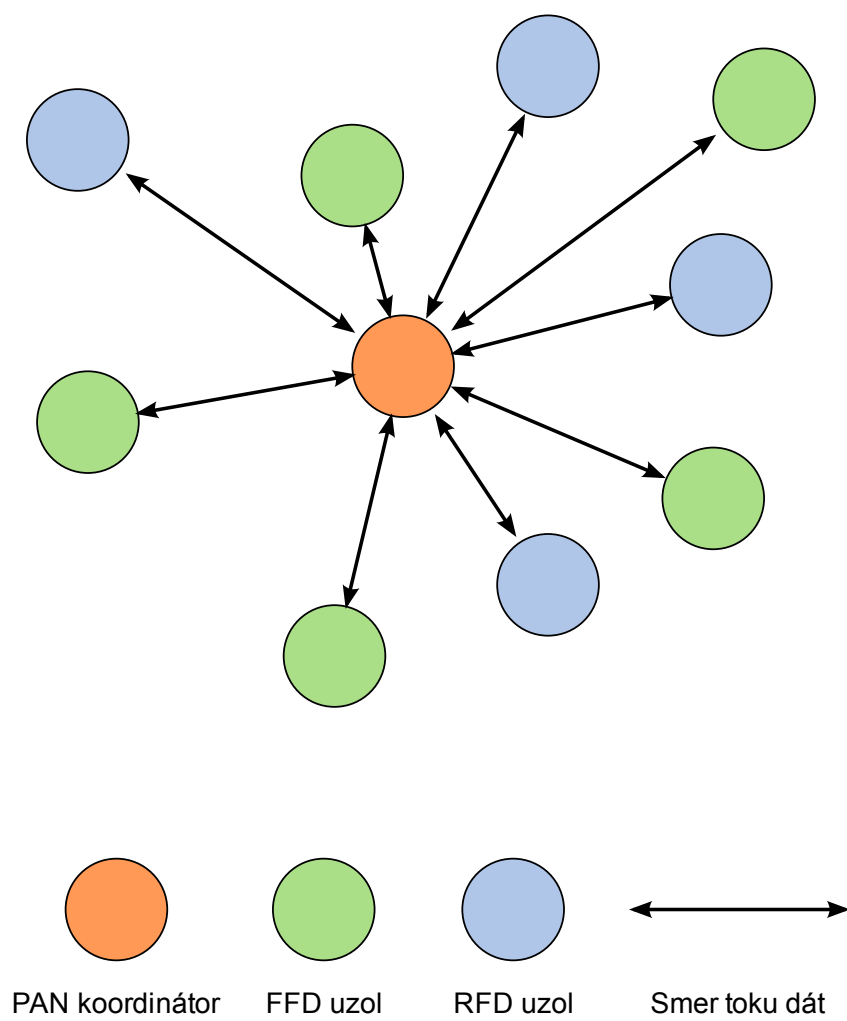
Siete typu Hviezda fungujú na sebe nezávisle a bez problémov ich môže operovať viac vo svojom vzájomnom dosahu. Každá z nich musí byť ale jednoznačne identifikovateľná svojím PAN identifikátorom. V centre siete je PAN koordinátor. Zariadenie, či už FFD, alebo RFD si pri pripájaní do siete môže vybrať ľubovoľný PAN koordinátor vo svojom dosahu a požiadať ho o asociáciu. Príklad takejto siete je zobrazený na obrázku [3.1](#).

#### 3.1.1.2 Každý s každým (Peer-to-Peer)

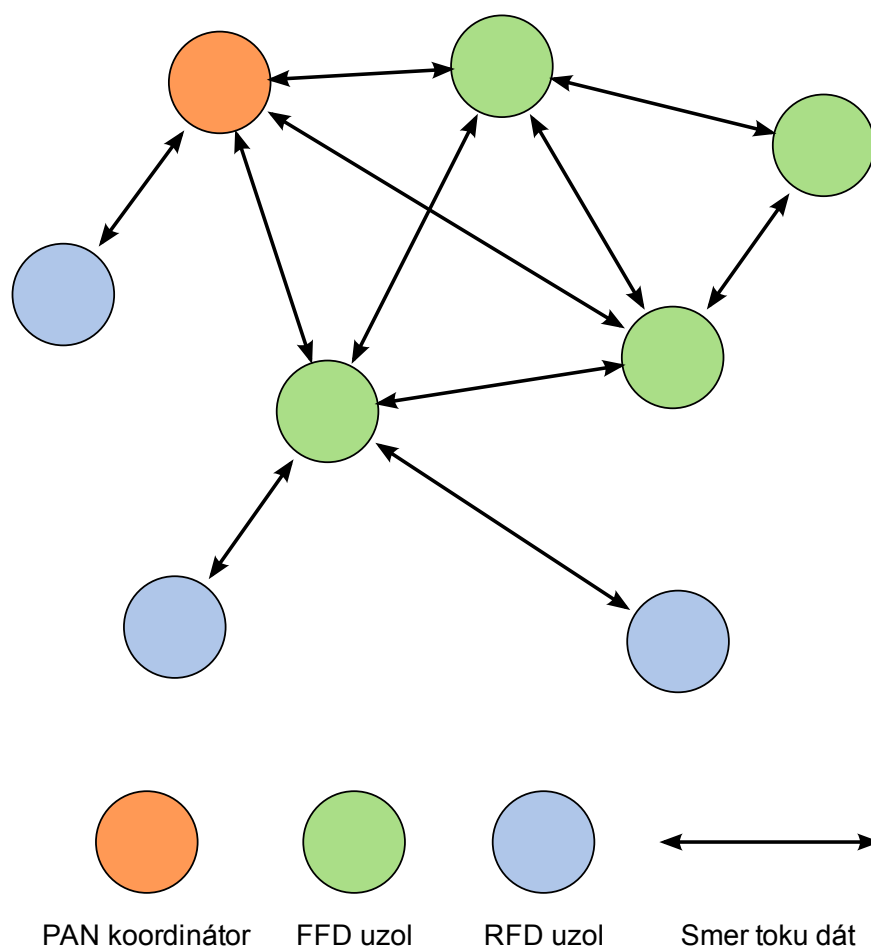
V tomto type topológie je implementovaná ide aby mohlo každé zariadenie komunikovať s ľubovoľným iným vo svojom dosahu. Takisto v takýchto sieťach existuje jeden FFD prvok v roli PAN koordinátora. Ukážka na obrázku [3.2](#).

Z tohoto typu sietí je odvodený variant Zhluk stromov (Cluster Tree). V takejto topológii je prevažná väčšina zariadení typu FFD. Zariadenia typu RFD sa pripájajú k stromu ako listy. Všetky FFD sú schopné vysielat' synchronizačné beacon rámce. Z nich môže byť však len jeden PAN koordinátor. Ak bude asociácia zariadenia do siete z nejakého dôvodu odmietnutá, prvok môže vyhľadať iné FFD zariadenie a skúsiť asociáciu u neho.

V prípade, že sú splnené určité podmienky, PAN koordinátor môže požiadať FFD prvok v rámci svojej siete, aby zformoval novú PAN sieť s novým identifikátorom. Ostatné



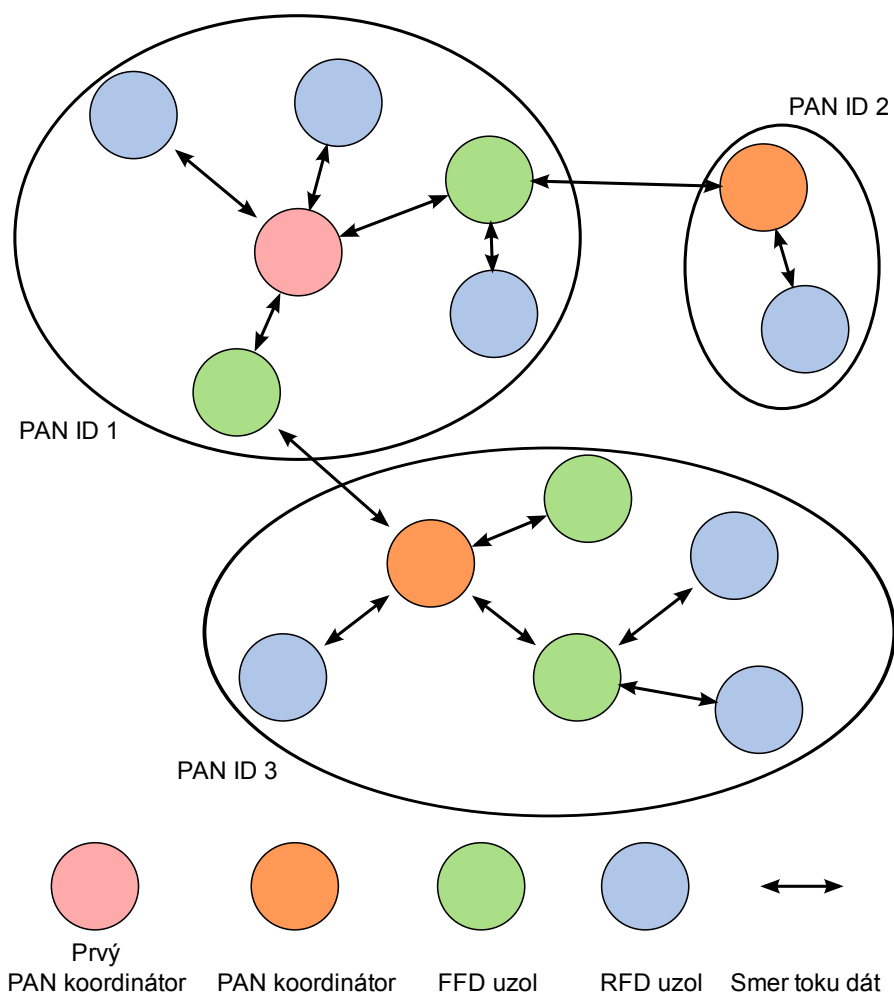
Obrázok 3.1: Topológia typu hviezda



Obrázok 3.2: Topológia typu každý s každým



zariadenia sa potom môžu pripájať až budú tvoriť podobné štruktúry, ako je tá na obr. 3.3. Volá sa zhuk stromov (Cluster Tree) Takáto konfigurácia ponúka plošne široké pokrytie, na druhú stranu však správy pri prechode cez viaceré PAN zvyšujú svoju latenciu.



Obrázok 3.3: Topológia typu zhuk stromov

### 3.1.2 Fyzická vrstva

Ako už bolo spomenuté, jedná sa o technológiu pracujúcu so vzduchom ako zdieľaným médium. Frekvenčné pásma, v ktorých zariadenia operujú, sú uvedené v tabuľke 3.1. Je vhodné podotknúť, že sa jedná o tzv. bezlicencované (ISM - Industrial Scientific and Medical) pásma, avšak kým 2.4 GHz je s malými obmedzeniami k dispozícii takmer po celom svete, pásmo ISM 868 MHz je len v Európe a ISM 902-928 MHz je k dispozícii len v USA.

| PHY<br>(MHz) | Frekvencia<br>(MHz) | Modulácia | Prenosová<br>rýchlosť<br>(kbps) | Symbol<br>rate<br>(ksym/s) | Symbody             |
|--------------|---------------------|-----------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|
| 868/915      | 868–868.6           | BPSK      | 20                              | 40                         | Binárne             |
|              | 902–928             | BPSK      | 40                              | 40                         | Binárne             |
| 868/915      | 868–868.6           | ASK       | 250                             | 12.5                       | 20-bitové PSSS      |
|              | 902–928             | ASK       | 250                             | 50                         | 5-bitové PSSS       |
| 868/915      | 868–868.6           | O-QPSK    | 100                             | 25                         | 16-kové ortogonálne |
|              | 902–928             | O-QPSK    | 250                             | 62.5                       | 16-kové ortogonálne |
| 2450         | 2400–2483.5         | O-QPSK    | 250                             | 62.5                       | 16-kové ortogonálne |

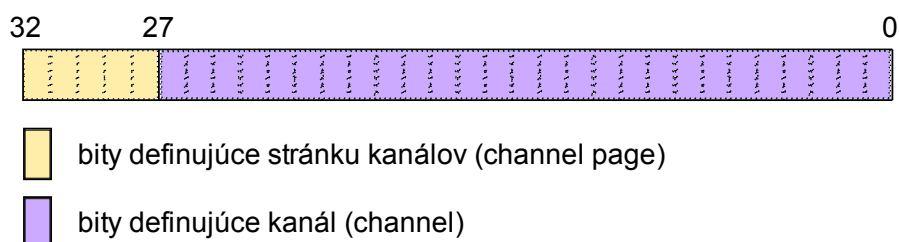
Tabuľka 3.1: Používané frekvenčné pásma, modulácie a kódové symbody

Pre komunikáciu je vyhradených 27 kanálov, ktoré sú združené do troch tzv. stránok kanálov. Takýto spôsob členenia je z historických dôvodov a z dôvodov spätnej kompatibility so zariadeniami fungujúcimi na IEEE 802.15.4-2003. Stránky sú očíslované v rozsahu 0–31, pričom v aktuálne sú stránky 3–31 rezervované do budúcnosti.

Na definovanie frekvencie, prenosovej rýchlosti a modulácie je nutné poznať kombináciu hodnoty stránky kanálu a označenie kanálu (z rozsahu 0–26). Pre určenie stránky kanálu je využitých horných 5 bitov (MSB - most significant bit). Pre označenie kanálu sa používa 27-bitová mapa. To znamená, že informácia definujúca potrebné parametre pre komunikáciu na úrovni fyzickej vrstvy sa kompletne obsiahne do 32-bitového identifikátora (viď obr. 3.4). Jednotlivé kombinácie hodnôt stránky kanálov a samotného kanálu sú bližšie rozpísané v tabuľke 3.2.

Štandard počíta s tromi základnými typmi modulácie, BPSK (Binary Phase Shift Keying), ASK (Amplitude Shift Keying) a O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying). PSK (Phase Shift Keying) je modulačná schéma, ktorá transportuje dáta pomocou zmeny fázy referenčného signálu. Jej základná varianta BPSK pracuje s dvoma fázami posunutými o 180 stupňov. To znamená, že jeden kódový symbol reprezentuje jeden bit informácie. Tento spôsob modulácie je relatívne odolný voči rušeniu, ale vyžaduje zložitejšie vysielačie a prijímacie obvody. Hustota informácií na prenesený symbol je nízka, teda je skôr vhodnejší na komunikáciu pri nízkych prenosových rýchlostiach (v prípade 802.15.4 hovoríme o hodnotách 20 a 40 kbps). Alternatívu na frekvenčných pásmach 868/915 MHz predstavil štandard IEEE 802.15.4b-2006, a to použitie ASK modulácie, kedy dáta sú reprezentované variáciami v amplitúde prenášaného signálu. Fáza a frekvencia zostávajú konštantné. Jej princíp je jednoduchý, avšak je citlivá na rušenie, odrazy a pod. ASK nepredstavuje veľmi efektívny spôsob modulácie. Tretí použitý spôsob modulácie datových bitov na nosnú v štandarde IEEE 802.15.4 predstavuje varianta O-QPSK. Pôvodne bol tento typ modulačnej schémy myslený len pre 2.4 GHz ISM pásmo, ale uvedenie tohoto typu modulácie aj pre ostatné frekvenčné pásma, predstavené so štandardom IEEE 802.15.4b-2006, znamenalo zjednodušenie pre koncové prvky, pretože pre prácu v pásmach 868 MHz, 915 MHz a 2.4 GHz potom stačí jeden modulačný

a demodulačný obvod. Schéma O-QPSK teda pracuje so štyrmi variáciami posunu fázy (4 stavy), to znamená, že vie na jeden symbol modulovať 2 bity ( $2^2 = 4$ ). Identifikátor *offset* v názve charakterizuje posun pri modulovaní párných a nepárnych bitov. Tento posun má veľkosť, ktorá predstavuje polovicu dĺžky vysielania jedného symbolu. Dochádza k posunu fázy vždy len o 90 stupňov, čo zabráňuje skokovým zmenám amplitúdy. Táto *offset* varianta kvadrátúrnej fázovej modulácie je často preferovaná.



Obrázok 3.4: 32-bitový identifikátor kanálov a stránky kanálov

| Stránka kanálu<br>(dekadicky) | Stránka kanálu<br>(binárne) | Číslo kanálu<br>(dekadicky) | Frekvenčné<br>pásmo | Modulácia |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------|
| 0                             | 0 0 0 0 0                   | 0                           | 868 MHz             | BPSK      |
|                               |                             | 1–10                        | 915 MHz             | BPSK      |
|                               |                             | 11–26                       | 2.4 GHz             | O-QPSK    |
| 1                             | 0 0 0 0 1                   | 0                           | 868 MHz             | ASK       |
|                               |                             | 1–10                        | 915 MHz             | ASK       |
|                               |                             | 11–26                       | Rezervované         |           |
| 2                             | 0 0 0 1 0                   | 0                           | 868 MHz             | O-QPSK    |
|                               |                             | 1–10                        | 915 MHz             | O-QPSK    |
|                               |                             | 11–26                       | Rezervované         |           |
| 3–31                          | 0 0 0 1 1 – 1 1 1 1 1       | Rezervované                 |                     |           |

Tabuľka 3.2: Zoznam jednotlivých kombinácií kanálov, frekvenčných pásiem a použitých modulácií podľa nastavenia identifikátorov kanálov a stránky kanálov

### 3.1.3 Linková vrstva

Linková vrstva IEEE 802.15.4b podľa [8] je jednoduchá, ale flexibilná. Riadi a kontroluje prístup k zdieľanému médiu. K tomuto využíva nasledovné mechanizmy:

- Vysielanie beacon rámcov (periodicky, alebo neperiodicky v závislosti od aktuálnej konfigurácie siete)

- Synchronizácia podľa beacon rámcov vysielaných svojimi susedmi
- Podieľanie sa na procesoch asociácie a disasociácie v PAN sieti
- V prípade požiadavku, podpora zabezpečenia
- Prístup k médiu pomocou CSMA-CA algoritmu
- Riadi a prideluje GTS časové sloty

### 3.1.4 Beacons a non-beacons módy

Linková vrstva môže pracovať v dvoch základných režimoch - tzv. beaconing mód a non-beaconing mód. Rozdiel medzi týmito módmi nie je v tom, či sú beacon rámce v sieti posielané, ale v tom, či sú tieto rámce posielané pravidelne. V prípade, že je hodnota atribútu u koordinátora siete  $macSuperframeOrder < macBeaconOrder$ , to znamená, že sieť pracuje v beaconing móde a beacon rámce sú posielané pravidelne v intervale vypočítanom podľa vzťahu

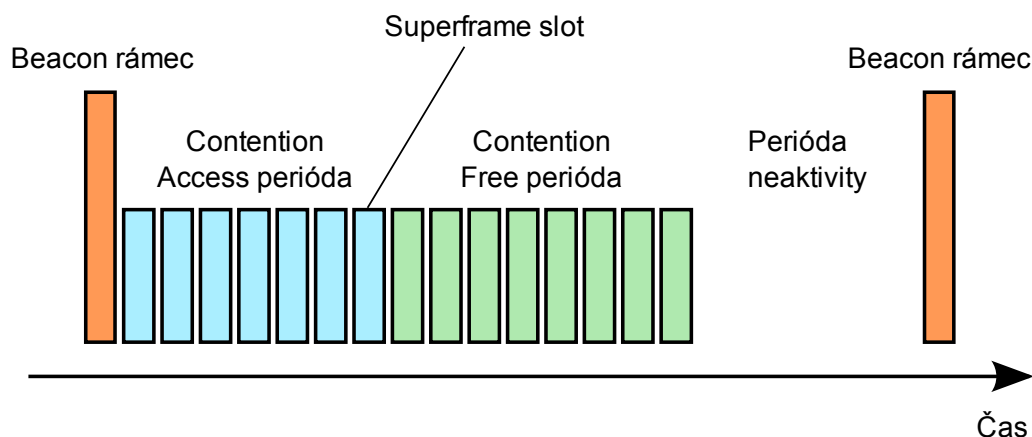
$$beaconPeriod = aBaseSuperframeDuration * 2^{macBeaconOrder}$$

kde výsledná hodnota intervalu je v symboloch. Podľa tabuľky 3.1 sa táto hodnota dá previesť na čas v sekundách. Hodnota konštanty  $aBaseSuperframeDuration$  je 960 a predstavuje dĺžku najkratšieho možného intervalu v symboloch oddeľujúceho začiatky dvoch beacon rámcov.

Alternatívu predstavujú zhodné hodnoty atribútov  $macBeaconOrder$  a  $macSuperframeOrder$ . Vtedy sa jedná o non-beaconing mód a beacon rámce sa posielajú len ako odpoveď na explicitnú požiadavku o ich zaslanie.

### 3.1.5 Superframe rámec

Nami navrhovaný model uvažuje použitie beaconing módu, ktorý ponúka zaujímavejší mechanizmus komunikácie a využíva možnosti dané periodicitou v zasielaní rádiových a kontrolných beacon rámcov. V tomto beaconing móde sa využíva komunikačná štruktúra, ktorá sa nazýva superframe rámec. Superframe rámec vymedzuje 4 periodicky sa opakujúce úseky (obr. 3.5) a pre každý z nich platia pravidlá pre posielanie a príjem dát. Superframe rámec vždy obsahuje 16 superframe slotov o dĺžke  $aBaseSlotDuration * 2^{macSuperframeOrder}$  symbolov dynamicky distribuovaných do Contention Access periódy a Contention Free periódy. Slot, v ktorom je vysielaný beacon rámec je označovaný ako slot 0. Konštantu  $aBaseSlotDuration$  má hodnotu 60.



Obrázok 3.5: Štruktúra superframe rámca (obrázok nie je v mierke)

### 3.1.5.1 Beacon rámec

Na úvod každého superframe rámca je FFD prvkom, ktorý je v sieti pripojený ako smerovač (router), posielaný beacon rámec. Obsahuje informačné polia, ktoré okrem iného obsahujú atribúty *macBeaconOrder* a *macSuperframeOrder* definujúce isté vlastnosti danej PAN siete. Z týchto polí vychádzajú hraničné časovače určujúce dĺžky jednotlivých úsekov superframe rámca. Okrem toho definuje aj koniec Contention Access periódy pomocou identifikátora *FinalCAPSlot*.

Beacon rámec je vysielaný prvkom bez použitia CSMA metódy, pretože všetky prvky v dosahu vysielачa daného FFD prvku by sa mali synchronizovať na periodicitu týchto rámcov a nevysielajú žiadne dáta na prenosové médium v čase, keď sa očakáva beacon rámec.

**Contention Access perióda** Počas tejto periódy prvky môžu pristupovať na médium pomocou metódy CSMA-CA. Tento moment slúži hlavne na vybavovanie žiadosti o asociáciu do siete, prípadne žiadosti o prenos užitočných dát smerom od FFD prvku. V takom prípade sú dáta, ktoré chce FFD poslať svojim susedom indikované v beacon rámci. FFD prvky majú väčšinou fronty na zasielanie týchto rámcov s užitočnými dátami pre koncové zariadenia. Ak si sused daného smerovača nevyžiada dáta po uplynutí nejakého konkrétného počtu superframe rámcov od ich prvého indikovania v beacon rámci, smerovač ich z tejto fronty zahadzuje.

Prvok, ktorému smerovač v beacon rámci neindikoval, že má pre neho vo svojich frontách zaradené dáta, a tento prvok ani nemá záujem žiadne dáta poslať smerom k FFD zariadeniu môže vypnúť svoje vysielacie a prijímacie obvody a šetriť tak energiu.

**Contention Free perióda** Časový interval v ktorom sa prenášajú dáta pomocou mechanizmu GTS (Guaranteed Time Slot) sa nazýva Contention Free perióda. GTS mechanizmus alokuje určitý počet superframe slotov pre prenos dát, ktoré často majú periodický charakter. Beacon rámec posielať smerovačom na úvod superframe rámca definuje aj počet alokovaných superframe slotov združených do GTS slotov a pre každý z týchto GTS slotov pomocou 16-bitovej, alebo 64-bitovej adresy určí druhú stranu komunikačného toku. Pomocou jednoduchšej bitovej mapy je následne určený smer komunikácie (smerom od smerovača/smerom k smerovaču). GTS mechanizmus je v novom štandarde IEEE 802.15.4b-2006 vedený už len ako dobrovoľný spôsob prístupu k prenosu dát.

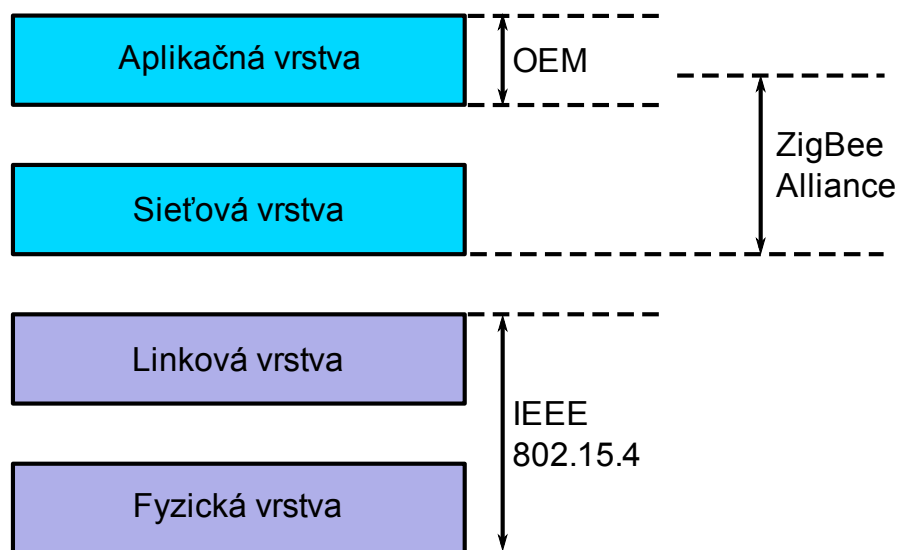
## 3.2 ZigBee

Medzi štandardy definujúce vyššie vrstvy komunikácie v LR-WPAN sieťach patrí napríklad ZigBee od združenia ZigBee Alliance [13]. Tento štandard definuje sieťovú a aplikačnú vrstvu siete ZigBee a v prípade linkovej a sieťovej vrstvy sa spolieha na už vyššie popísaný štandard IEEE 802.15.4. Vzťah medzi ZigBee a IEEE 802.15.4 by sa dal prirovnať vzťahu medzi Wi-Fi a IEEE 802.11. Na obr. 3.6 je vyobrazený vzťah medzi vrstvami definovanými v ZigBee a IEEE štandardoch. Prvá z finálnych verzii ZigBee štandardu sa objavila koncom roku 2004, ale odvtedy bola ešte niekoľko krát upravovaná. My v tomto dokumente pracujeme s verziou z januára 2008 [13], momentálne najaktuálnejšou.

Svojou charakteristikou sú siete ZigBee vhodné pre aplikácie nevyžadujúce vysoké nároky na datovú priepustnosť, uspokojia sa s bezdrôtovým spojením krátkeho dosahu, ale hlavne pre ktoré je kritická nízka energetická náročnosť. Tieto špecifiká posúvajú siete ZigBee ako vhodného kandidáta pre bezdrôtové riadenie osvetlenia, termoreguláciu, bezpečnostné prvky v inteligentných domácnostiach, pre komunikáciu hlásičov požiaru v budovách, alebo aj v medicíne pre rýchle predávanie správ o stave pacienta do definovaného zberného bodu. V priemysle by zase táto technológia našla využitie napríklad v monitorovaní podmienok, v akých sa tovar nachádza v sklade (teplota, vlhkosť, vibrácie), alebo napríklad pri kontrole procesov v čističke odpadových vôd. Keďže sieť má vlastnosť samokonfigurácie, jej inštalácia aj vo väčších mierkach je otázkou zopár hodín.

### 3.2.1 Architektúra ZigBee

Architektúra siete ZigBee sa skladá zo štyroch základných vrstiev, ako zobrazuje aj obr. 3.6. Tieto vrstvy medzi sebou komunikujú predávaním správ cez tzv. body prístupu služby (SAP - Service Access Point). SAP je v princípe miesto, v ktorom jedna z vrstiev môže požadovať služby druhej vrstvy. štruktúra architektúry spolu s vyznačenými SAP bodmi je vyobrazená na obrázku 3.7. Na ňom môžeme rozlišovať dva typy SAP bodov medzi jednotlivými vrstvami. Jeden typ predstavujú body, cez ktoré sú spracovávané



Obrázok 3.6: Vzťah medzi ZigBee Alliance a IEEE 802.15.4

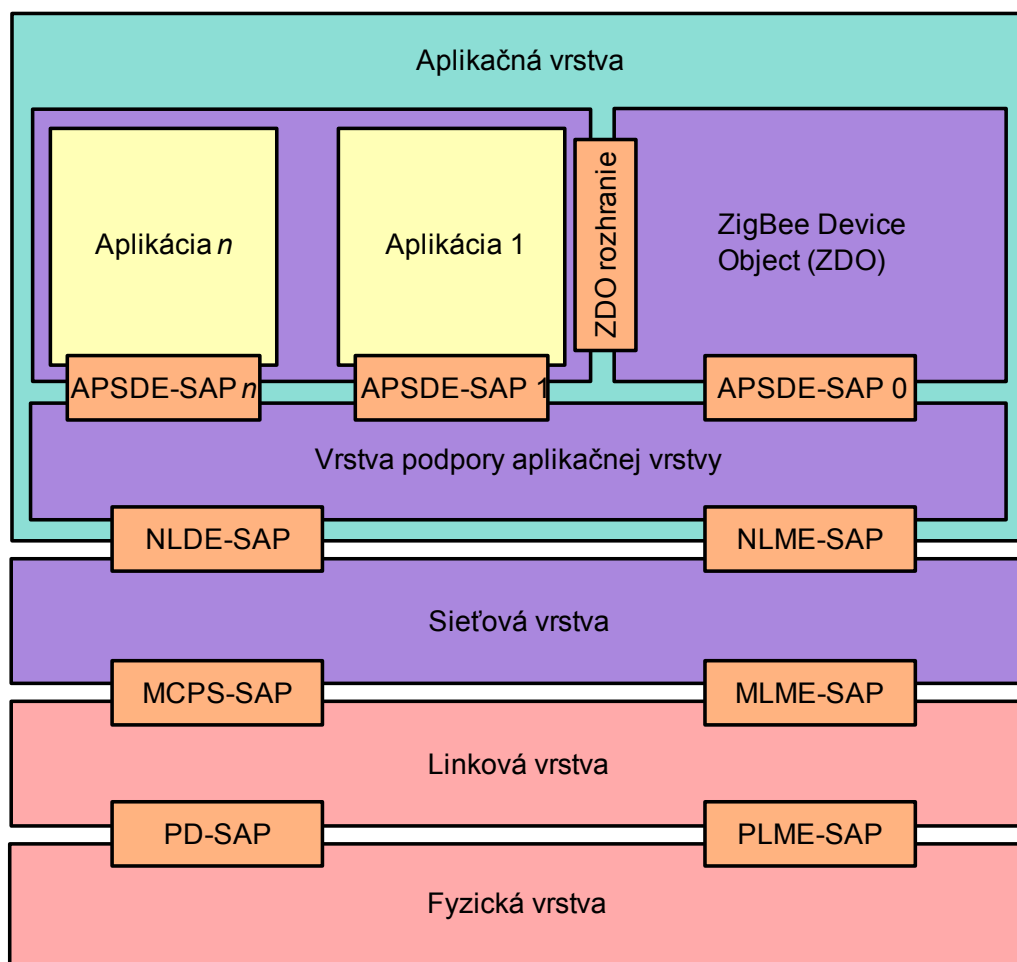
užitočné dáta aplikácii (napr. MCPS-SAP, alebo PD-SAP) a druhý typ SAP bodov sa zaoberá manažmentom siete, ako napr. konfigurácia beacon rámcov, prípadne nastavovanie, alebo čítanie hodnôt atribútov (napr. MLME-SAP, PLME-SAP body).

### 3.2.2 Sieťová vrstva

Požiadavky na sieťovú vrstvu sú zabezpečovanie správneho fungovania linkovej vrstvy a poskytovania vhodných služieb vyššie postavenej aplikačnej vrstve. Podľa konceptu, sieťová vrstva obsahuje dve entity, ktorých služby sú využívané aplikačnou vrstvou. Tieto entity sú datová (NLDE - NWK Layer Data Entity) a manažement entita (NLME - NWK Layer Management Entity). Ku každej sa pristupuje cez príslušný bod SAP - NLDE-SAP, alebo NLME-SAP. Zmysel rozdelenia sieťovej vrstvy na tieto dve časti je v tom, že NLME využíva NLDE pre vykonávanie potrebných úloh, ktoré majú charakter riadenia a kontroly na danej úrovni a takisto zabezpečuje prístup k sieťovej informačnej databázy (NIB - Network Information Base).

### 3.2.3 Aplikačná vrstva

Ako je ukázané na obrázku 3.7, aplikačná vrstva sa skladá zo ZigBee Device Object objektu, z aplikačných objektov (definovaných výrobcom zariadenia, alebo aplikácie) a z podpornej vrstvy APS.



Obrázok 3.7: Znázornenie vrstvovej architektúry siete ZigBee



### 3.2.3.1 Podporná vrstva aplikačnej vrstve

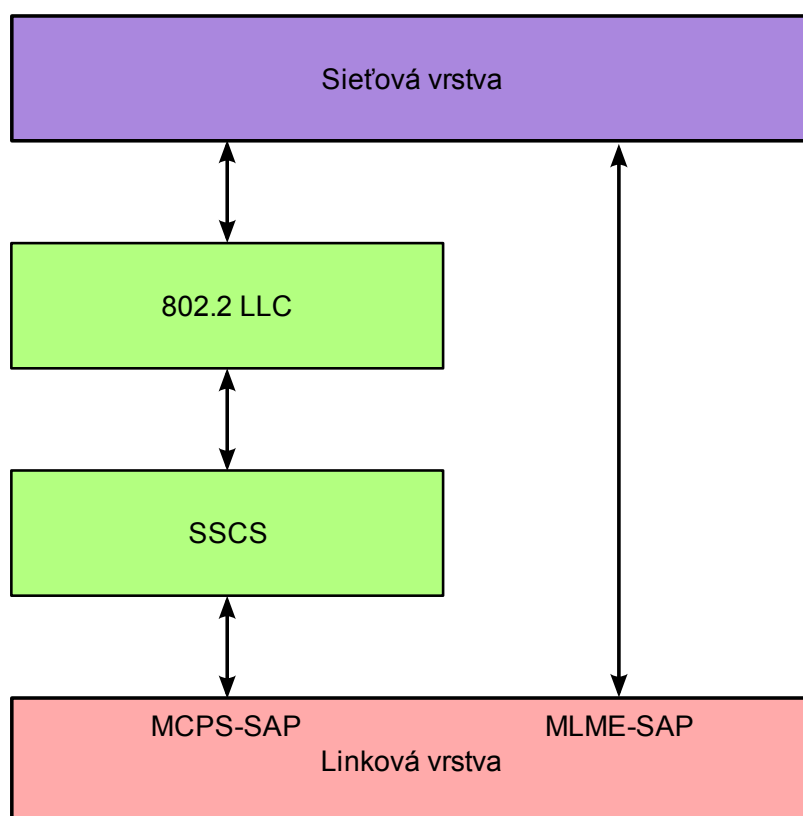
Uvedená vrstva je v špecifikácii označovaná ako APS (Application Support Sub-layer). Úlohy, ktoré jej prináležia si delia dve entity: datová (APSD) a manažment (APSM). Datová ma na starosť sprístupnenie služieb pre aplikačnú vrstvu v danej sieti a manažment entita zabezpečuje cez príslušný SAP bod funkcie bezpečnosti prenosu, prípadne prístup k informačnej báze danej podvrstvy. S podobným rozdelením sa budeme stretávať aj pri ostatných vrstvách protokolu.

### 3.2.3.2 Objekty typu ZigBee Device Objects

ZigBee Device Objects objekty (ZDO) hrajú dôležitú úlohu v protokole ZigBee. Pri štarte siete inicializujú sieťovú vrstvu a vrstvu APS. Na základe požiadaviek aplikácii dávajú impulz k procesom, ktoré realizujú vytváranie PAN, asociáciu do už existujúcej siete PAN, prípadne majú na starosť správu sieťovej vrstvy. Ako už bolo spomenuté v [6] ZDO môžeme nazvať komunikačným bodom aplikačnej vrstvy. ZDO poskytuje funkcie pre všetky aplikácie bežiacie na ZigBee zariadení vrátane skenovania siete (device and service discovery), vytvorenia spojenia medzi objektami v sieti (binding) a správy šifrovacích kľúčov (security management). Vo výslednej simulácii je jediná z jej úloh inicializácia daného zariadenia spolu s nastavením základných parametrov pre spojenie. Na aplikačnej vrstve sú uvažované tzv. endpoints. Zariadenie môže mať nadefinovaných max. 240 endpoints a každému z nich zodpovedá jeden aplikačný profil. Pre ilustráciu môžeme uviesť, že cez jeden endpoint je realizovaná komunikácia s cieľom zapnúť svetlo a cez iný endpoint môže aplikácia informovať iný ZigBee prvok o teplote prostredia zmeranej teplotným čidlom.

### 3.2.4 Väzba na IEEE 802.15.4

V špecifikácii k IEEE 802.15.4 sú uvedené aj doplnkové podvrstvy k základnej vrstvovej štruktúre. Na myslí máme podvrstvy označované ako SSCS (Sublayer-Specific Convergence Layer) a LLC (Logical Link Control) vrstvy. Ich polohu znázorňuje obrázok 3.8. Konvergenčná SSCS vrstva slúži k predávaniu informácii medzi sieťovou a linkovou vrstvou. Následne má schopnosť informovať nadradené vrstvy o tom, v akom stave sa nachádza posielanie dát ostatným členom siete. Funkciou podvrstvy IEEE 802.2 LLC je kontrola a zaistenie integrity dátových prenosov. LLC vrstva poskytuje cez body prístupu (SAP) služby linkovej vrstvy pre sieťovú vrstvu.



Obrázok 3.8: Použitie doplňujúcich vrstiev v komunikácii medzi linkovou a sieťovou vrstvou

# Kapitola 4

## Varianty simulačného modelu

Vo svete okolo nástroja OMNeT++ sa za dobu od napísania našej predchádzajúcej práce venovanej simuláciám senzorových sietí udiali viaceré zmeny, ktoré nevyhnutne zasahovali aj do prípravy návrhu nášho simulačného modelu a museli byť zohľadnené. Zo všetkých týchto zmien je to posun dopredu, žiadna z nich sa neprejavila negatívne na našej práci.

Simulačný nástroj OMNeT++ sa vyvinul do verzie 4.0, v ktorej najvýraznejšie úpravy sa dotkli jazyka NED (Network Definition Language) a datového typu premennej simulačného času *SimTime*, ktorá teraz pracuje s vyšším rozlíšením. Ostatné úpravy sa veľmi nedotkli simulačného jadra, ako napríklad sú vyššia rýchlosť simulácii vo *Fast* a *Express* móde pri zapnutom GUI, alebo pre fanúšikov vývojárskych IDE zahrnutie IDE Eclipse upraveného pre potreby OMNeT++ modelov (podpora NED, a pod.).

Okrem zmien vykonaných na samotnom simulačnom nástroji sa pokrok udial aj na scéne rozšírení do OMNeT++ a objavili sa okrem novšej verzie už široko používaného rozšírenia pre bezdrôtové siete Mobility Framework (v 2.0) aj nové rozšírenia pre senzorové siete: PAWiS a MiXiM.

### 4.1 Rozšírenia pre simuláciu WSN sietí

#### 4.1.1 PAWiS

Celým menom PAWiS Simulation Framework [11] je rozšírenie cielené na simuláciu sietí typu WSN (Wireless Sensor Networks). Z toho dôvodu je značný dôraz kladený na správnu simuláciu správy napájania. Každá simulácia zahŕňa aj objekt *Air*, ktorý je obdobou modulu *Channel Control* z Mobility Framework. Modul *Air* realizuje výpočty spojené s útlmom signálu, ktorý je naviazaný na pohyb prvkov, teplotu prostredia, vibrácie zariadení, prípadne identifikuje útlm spôsobený prekážkami v priamej viditeľnosti medzi uzlami. Z praktického hľadiska funguje ako switch, do ktorého sa pripájajú všetky prvky a on následne preposiela rámce doplnené o vypočítaný útlm.

Daný framework v podstate oproti zaužívanému Mobility Framework neponúka pre

nás nič zaujímavé a nevideli sme žiadne benefity, ktoré by sme mohli využiť prechodom z MF na PAWiS. Jediná zaujímavosť v rozšírení PAWiS je uvedená správa napájania, ale tú, aj keď v jednoduchšej forme v podstate zvláda Mobility Framework doplnený o zásuvný modul Battery plugin [1].

### 4.1.2 MiXiM

Druhým novým produktom vo svete bezdrôtových simulácií je MiXiM. Tomuto nástroju sa povenujeme trochu hlbšie, pretože ponúka komplexnejší pohľad na simuláciu bezdrôtových sietí všeobecne. Projekt MiXiM spája v sebe vlastnosti viacerých rozšírení (okrem iného aj MF) a posúva simulačné možnosti o veľký krok ďalej.

#### 4.1.2.1 Vlastnosti

Nástroj ponúka solídny základ pre modely a implementácie simulácií bezdrôtových sietí, vrátane modelov pre mobilné prostredia, propagáciu rádiových vĺn, podporu vo fyzickej vrstve pre modulácie a kódovania a takisto rozsiahlu knižnicu MAC protokolov a rôznych algoritmov. S čím prichádza MiXiM ako novinkou je práca s piatimi rozmermi, kde tri sú priestorové, jeden časový a piaty je frekvenčný. Vďaka tomu môžeme skúmať vzájomné rušiacie vplyvy rôznych kódovaní. V súvislosti so ZigBee sa vytvára vďaka nástroju MiXiM priestor pre povedzme pozorovanie vzájomného rušenia sa s nastupujúcim štandardom IEEE 802.11n (multifrekvenčný - OFDM, viacero antén - MIMO, variabilný bitrate pre hlavičku a telo správy, FEC). Modulárny dizajn pomáha pristupovať priamo aj ku komplexným situáciám a dovoľuje ľahko integrovať nové modely a implementácie protokolov. Prístup realizovaný simulátorom MiXiM je pekne popísaný v dokumente The MiXiM Vision [2].

#### 4.1.2.2 Štruktúra

Vlastnosti prostredia sú zahrnuté v module World. Modul World dokáže pracovať s 2-rozmerným aj 3-rozmerným priestorom (Playground). Ďalej MiXiM používa objekty, ktorými modeluje situáciu v prostredí, rôzne prekážky a podobne. Môžu to byť objekty charakteru budovy (ObjectHouse), alebo steny (ObjectWall). Tieto objekty nielen spôsobujú zmeny v šírení signálu, ale tiež kladú fyzické obmedzenia v mobilite prvkov. Správu takýchto objektov má na starosti modul nazývaný ObjectManager. Úlohu modulu ChannelControl z Mobility Framework prebral modul ConnectionManager. On dynamicky vytvára spojenia medzi uzlami tak, aby sa zbytočne nestrácal výpočtový výkon na simulovanie spojení, ktoré majú takmer nulovú váhu nielen čo sa týka kvality prenosu správ, ale aj z pohľadu príspevku k rušeniu na jednotlivých prijímačoch. Modul ConnectionManager sa vždy zaoberá výpočtom okolo jedného konkrétneho typu vlnenia. To znamená, že pre spoločnú simuláciu dvoch rôznych sietí v pásme ISM 2.4 GHz

a GSM 900 MHz budeme mať v simulácii 2 moduly typu `ConnectionManager`.

Čo sa týka samotných uzlov, aj tu je vidieť, že ľudia, ktorí stoja za projektom MiXiM majú na svedomí aj projekt Mobility Framework. Štruktúra jednotlivých modulov v komunikačných uzloch je veľmi podobná tej z Mobility Framework (bližšie o nej v [6]). Sprostredkovanie prenosu informácií medzi jednotlivými modulmi už sa nedeje cez modul `Blackboard`, ale cez modul `Utility`. Ich funkcie sú totožné. Ďalej pribudol modul pre sledovanie spotreby a predikciu výdrže energie `Battery` a modul pracujúci so smerovacími mechanizmami `Arp`.

Hlavná logika frameworku je ukrytá v moduloch a rozhraniach pre posielanie správ, ich transformácie do signálovej podoby a následné spracovanie prijatého signálu aj s informáciami o útlme a pod.

**Signal** V simulácii signálu vstupuje u vysielacieho prvku do modelu faktor antény, prenosová rýchlosť, vysielací výkon a frekvencia (komunikačný kanál). Na prijímacej strane je výsledok ovplyvnený útlmom na prenosovom médiu, prijímacou anténou a aj útlmom spôsobeným prekážkami v linii priamej viditeľnosti, pretože, ako sme už spomenuli, práca s takýmito objektami je v istej podobe zvládnutá v simulačnom frameworku.

**AnalogueModel** Miesto, v ktorom sú počítané uvedené faktory prijímaného signálu (útlmy, zisk antén).

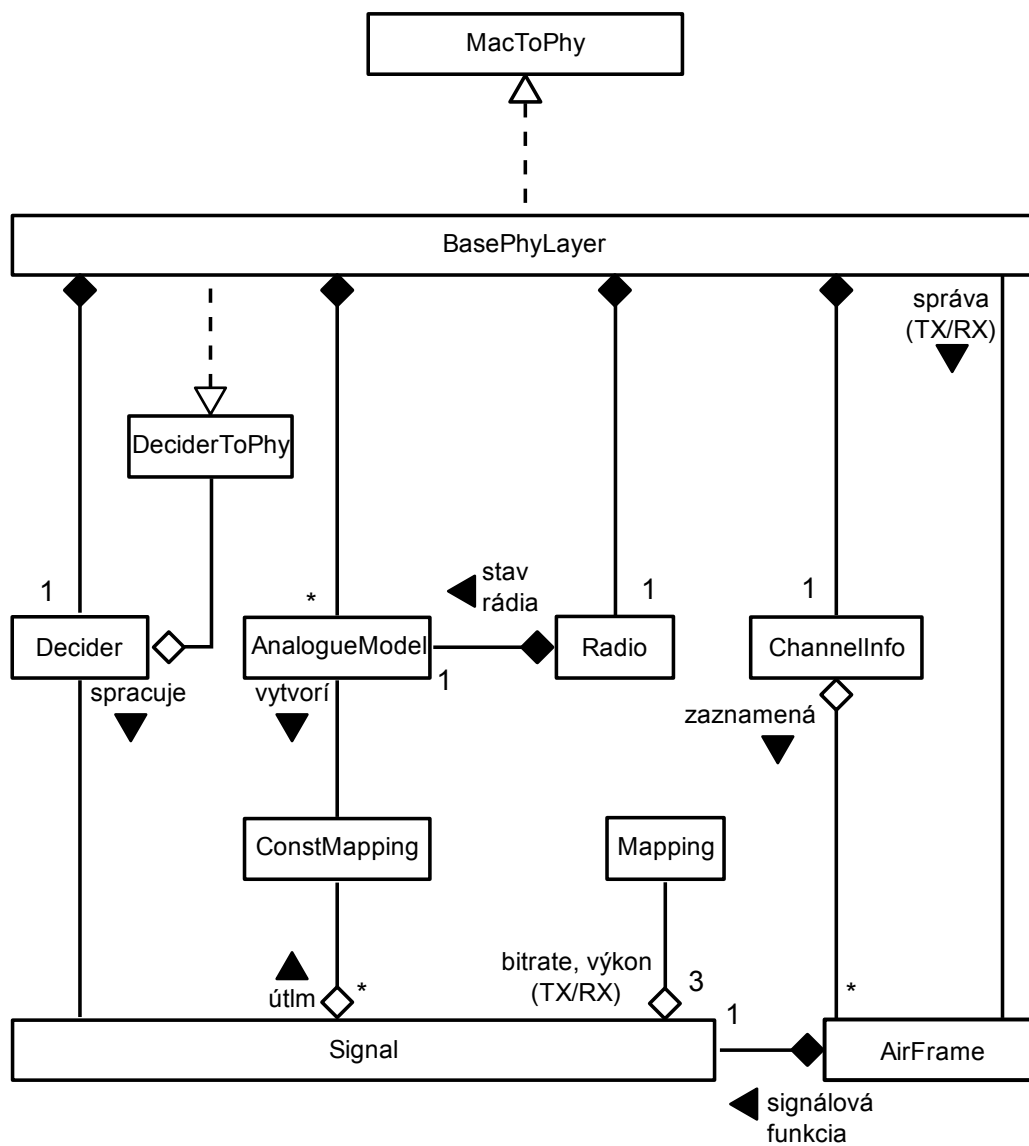
**Decider** Modul `Decider` rozhoduje o výslednom prijatí, alebo zahodení rámca, na základe rušenia a šumu. Aplikuje algoritmy FEC (Forward Error Correction) a tiež informuje nadradené vrstvy o stave prenosového média (busy/idle). Táto vrstva je miesto prechodu z analógového pohľadu na model na digitálny.

**Radio** Bod, v ktorom sú prepínané stavy rádia (*RX*, *TX*, *IDLE*, *SLEEP*). Tieto stavy sú riadené vyššími vrstvami. Prípadne modul `Radio` môže obsahovať premenné, ktoré definujú rýchlosť prechodu medzi stavmi (napr. RX-to-TX time).

**ChannelInfo** Pracuje s rámcami a komunikuje s vrstvou `BasePhyLayer` aby mohol do rámcov doplniť údaje dopĺňajúce dáta vyžadované modulom `Decider`. Dopĺňa rámce vypočítanými hodnotami premenných RSSI (Received Signal Strength Indication) a SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio).

**BasePhyLayer** Je čisto OMNeT++ modul. Komunikuje s vyššími vrstvami cez správy, ktorých obsah je popísaný výhradne NED jazykom.

Podrobné vzťahy sú schematicky vyobrazené na obr. 4.1.



Obrázok 4.1: Práca so signálovou časťou simulácie vo frameworku MiXiM

### 4.1.3 Mobility Framework

Mobility Framework [12] je overený framework pre simulovanie bezdrôtových sietí postavený ako modul do simulátora OMNeT++. Medzi jeho nesporné výhody patrí jednoduchosť, prehľadnosť a rýchlosť behu simulácii. Nakoľko vývoj rozšírenia MiXiM sa zatiaľ nedostal do použiteľného stavu, ako najvýhodnejšie sa momentálne javí zostať pri frameworku MF. Ten sa medzičasom dočkal vývojovej verzie 2.0, v ktorej zostal vývoj zakonzervovaný, adaptovaný na verziu 4.0 nástroja OMNeT++. Všetka vývojová snaha sa vkladá do nástroja MiXiM, ktorý je označovaný aj ako nepriamy nástupca MF.

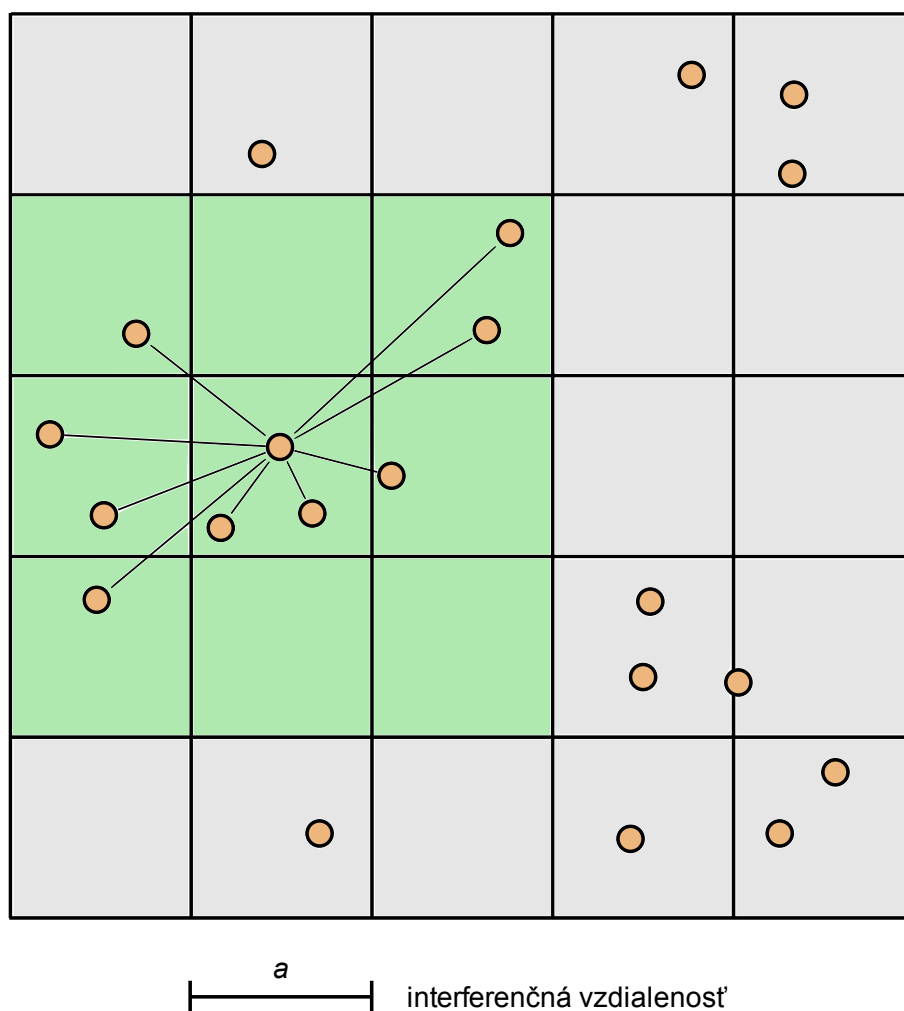
#### 4.1.3.1 Architektúra

V nástroji Mobility Framework sú použité isté zaujímavé riešenia, ktoré je vhodné si popísať a vďaka nim môžeme potom lepšie pochopiť štruktúru návrhu simulačného modelu. K správe jednotlivých spojení sa pristupuje centrálnne, pretože je potrebné poznať polohu všetkých komunikujúcich prvkov. Všetky spojenia sú vytvárané modulom `ChannelControl` dynamicky. Mobilita prvkov je spracovávaná individuálne, pretože každé so zariadení sa pohybuje nezávisle na ostatných a jediné, čo je potrebné, je oznámiť aktuálnu polohu modulu `ChannelControl`. Tento modul teda komunikuje s mobility modulmi, ktoré sú súčasťou každého jednotlivého prvku. Na obrázku je zobrazený princíp komunikácie medzi týmito modulmi. Dá sa povedať, že modul `ChannelControl` je jadrom celej mobility architektúry, pretože spojenia nielen vytvára, ale aj ruší v závislosti na vzdialenosti.

**ChannelControl** Modul `ChannelControl` vytvára komunikačné kanály medzi prvkami, ktorých vzdialenosť nepresahuje určité medze a ruší ich tam, kde je kritická hodnota vzdialenosti presiahnutá. Každý kanál následne vyžaduje pár jednosmerných brán (`gates`) na oboch koncoch pre zabezpečenie obojsmernej komunikácie medzi prvkami. S uvedením OMNeT++ v4.0 boli síce predstavené v jazyku NED aj obojsmerné brány (typu `inout`), ale tie sa tiež len preložia pri kompilácii na 2 jednosmerné brány. Mobilita teda vyžaduje dynamicky sa meniaci počet brán. V rámci efektívneho prístupu k správy pamäte sú brány nielen požadované, ale aj vytvárané dynamicky. Negatívum tohoto prístupu sa prejavuje pri zmene veľkosti vektora obsahujúceho zoznam brán, pretože každá zmena jeho veľkosti znamená nutnosť opakovaného napojenia všetkých brán, ktoré obsahuje, čo sa rovná počtu všetkých brán v simulácii. Následne bol nájdený kompromis v tom, že brány sa vytvárajú a rušia nie po štyroch (najmenšie kvantum, týka sa jedného spojenia), ale po väčších zhlukoch.

Udržovanie stavu o spojeniach je výpočtovo drahá úloha so zložitou  $O(n^2)$ . Aj v tejto oblasti MF pristupuje k problému so zjednodušením. `ChannelControl` udržiava teda informácie o spojeniach len tých, ktoré sú v rozumnom komunikačnom rozsahu. Po inicializácii `ChannelControl` rozhodne o interferenčnej vzdialenosti pri ktorej ešte uzly

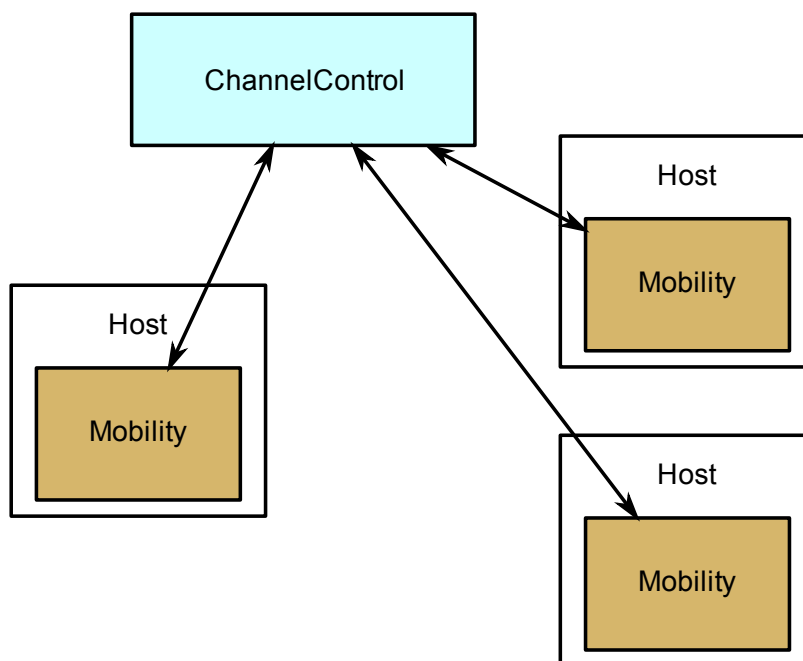
siete stále môžu vzájomne rušiť komunikáciu. **ChannelControl** túto vzdialenosť vie odhadnúť na základe hraničnej threshold hodnoty SNR (Signal-to-Noise Ratio). Celá sieť je rozdelená na kvadranty, ktorých dĺžka strany predstavuje práve spomínanú interferenčnú vzdialenosť. To potom znamená, že uzol v danej zóne môže interferovať len s uzlom nachádzajúcim sa v tej istej, alebo susednej zóne. Pohľad na situáciu, v ktorej sa automaticky nepočíta so spojeniami medzi uzlami o ktorých vieme, že sú od seba vzdialené na väčšiu dĺžku ako je interferenčná vzdialenosť, je na obr. 4.2. Pre každú z týchto interferenčných zón je udržiavaný zoznam obsiahnutých uzlov, ktoré sa v nej nachádzajú. V konečnom dôsledku **ChannelControl** prepočítava len spojenia medzi uzlami z vybraných zoznamov a nie medzi všetkými uzlami v sieti. Samozrejme, zložitosť predstaveného algoritmu je silne závislá na priestorovej hustote uzlov.



Obrázok 4.2: Ignorovanie spojení medzi uzlami z kvadrantov, ktorých vzdialenosť presahuje hodnotu interferenčnej vzdialenosti



**Mobility** Je prirodzené, že každý uzol bude zodpovedný za svoj pohyb po priestore. Teda mobilita zariadení je realizovaná distribuovane v každom uzle. Je riadená modulom *Mobility*, ktorý je obsiahnutý v štruktúre každého uzla. Aj toho statického, pretože *Mobility* pridáva k vysielanému rámcu doplňujúce dáta pre *ChannelControl*, vďaka ktorým je známa poloha prvku a môžu sa prepočítavať vzájomné vzdialenosti medzi uzlami. Pre zníženie náročnosti je volaná priamo metóda na objekte *ChannelControl*. Ušetrí sa tým prostriedky na správu ďalších brán, vytváranie nových správ a ich rušenie u príjemcu. Zásluhou modulu *Mobility* je aj aktualizovaný pohľad na simulačné pole pri zapnutom GUI počas simulácie. Smer komunikácie medzi *ChannelControl* a *Mobility* modulmi v rôznych uzloch je ilustrovaný na obr. 4.3.



Obrázok 4.3: Komunikácia medzi modulmi *Mobility* a *ChannelControl*

**Blackboard** Koncept *Blackboard* sprostredkúva komunikáciu medzi typom od jedného k mnohým (one-to-all). Je súčasťou každého hostu a vďaka nemu prebieha výmena informácií aj medzi tými vrstvami, ktoré nemajú spoločný komunikačný kanál. Komunikácia potom funguje spôsobom zverejňovania informácií (publish) na *Blackboard* a pripísaniu sa k odberu týchto informácií (subscribe). V konečnom dôsledku príjemca má možnosť zistiť, kto bol pôvodcom informácie. Moduly, ktoré sú prihlásené k odberu správ sú upozornené v prípade, že dáta, o ktoré mali záujem, boli sprístupnené alebo aktualizované.

V ďalšom kroku ich potom môžu prečítať.

Príklad efektívneho použitia tohoto modulu si môžeme predstaviť pri bezdrôtovej komunikácii pomocou metódy CSMA-CA, kedy po odoslaní správy sa rádio môže prepnúť do stavu *RX* a túto informáciu zverejní na Blackboard. Vďaka tomu potom povedzme modul, ktorý simuluje energetické zdroje vie, že príkon rádia sa zmenil a zároveň túto informáciu využije aj linková vrstva, ktorá vďaka nej vie, že správa bola odoslaná.

**Decider** Modul **Decider** spracováva informáciu vyslanú fyzickou vrstvou, pomocou použitej modulačnej schémy spočíta hodnoty BER (Bit Error Rate) a prípadne označí bity prijaté s chybou. Tento modul je špeciálne užitočný pri pracovaní s datovými tokmi s premenlivou priepustnosťou (rozdielny bitrate hlavičky a tela - IEEE 802.11) a tým, že je oddelený od ostatných zložiek fyzickej vrstvy umožňuje programátorovi ľahšie aplikovať zmenu použitej modulačnej schémy pri simulácii.

## 4.2 Existujúce modely sietí ZigBee a IEEE 802.15.4

Po ponúknutí vhodných simulačných nástrojov si viacero skupín vybralo pre simuláciu práve protokol IEEE 802.15.4. Dôvody môžu byť rôzne - mobilita prvkov, bezdrôtová komunikácia, jednoduchá implementácia, prípadne analýza mechanizmu GTS. Z uvedených nástrojov vzťahujúcich sa k simulátoru OMNeT++ sú k dispozícii viaceré čiastočné implementácie protokolu IEEE 802.15.4. V krátkosti ich popíšeme na v tejto kapitole.

**PAWiS (Institute of Computer Technology, Vienna University of Technology)** Simulátor PAWiS ponúka základ pre linkovú vrstvu ZigBee protokolu. Pri analýze zdrojového kódu tejto vrstvy sa ukázalo, že sa jedná o čiastočný základ MAC vrstvy. V zjednodušenej podobe zvláda CSMA algoritmus. V kontexte s ostatnými produktami v rámci daného projektu sa jedná skôr o vedľajší výstup.

**MiXiM** Aj v simulátore MiXiM je pripravená implementácia štandardu IEEE 802.15.4. Táto je totožná s tou z Mobility Framework, je z nej totiž portovaná. Podrobnejšie si ju rozoberieme v nasledujúcom odstavci.

**MF (Jérôme Rousselot)** V Mobility Framework vo verzii 2.0 preview 1 sa objavila v istej podobe naimplementovaná linková vrstva protokolu IEEE 802.15.4. Táto implementácia je čistou implementáciou algoritmu CSMA-CA. Veci ako podpora pre *SLEEP* mód rádia, pre GTS sloty, osirotenie, alebo beacon rámce v nej nie je obsiahnutá. Podobu uvedeného modelu sú dve. Predstavujú implementácie kariet Texas Instruments CC 2420 802.15.4 a Texas Instruments CC 1100 802.15.4, a to pre frekvenčné pásma 868 MHz a 2.4 GHz. Podľa toho sú následne nastavené okrem hodnoty frekvencie nosnej

aj veľkosti hlavičiek rámcov, dĺžka SFD (Starting Frame Delimiter), hodnoty viacerých časovačov (napr. ACK timeout).

**MF (Autor)** Naša predchádzajúca práca venovaná simulácii WSN sietí [6] bola doplnená o jednoduchú implementáciu fyzickej, linkovej a sieťovej vrstvy protokolov ZigBee a IEEE 802.15.4. Táto implementácia obsahla procedúry pre vytvorenie siete PAN koordinátorom, správu asociácii a vysielanie beacon rámcov.

Tým, že sa autor podieľal na príprave tohoto modelu, bol pôvodne zámer ho rozšíriť a doplniť chýbajúce procedúry. Okrem toho boli vydané nové verzie štandardov ZigBee a aj IEEE 802.15.4, čo sa tiež odrazilo v snahe reflektovať tieto skutočnosti v novom modeli. Vtedy sa ale ukázal prvý nedostatok prvého produktu. Nízka modularita. Úprava na štandard IEEE 802.15.4b-2006 by si vyžiadala relatívne veľké zásahy. Ďalšie negatívum, bolo zlúčenie modelu fyzickej vrstvy ako je definovaná v dokumente a fyzickej vrstvy ako ju poníma Mobility Framework. Toto pri danej práci nebolo silnou prekážkou, no v prípade, že sa nájde záujemca o použitie modelu vo frameworku MiXiM, ktorý má tendenciu stať sa náhradou za MF, spraví mu taká implementácia fyzickej vrstvy zopár starostí. A ako jednu z posledných vecí, kde by bolo vhodné zmeniť prístup, je komunikácia medzi vrstvami, kde je preposielanie riadiacich inštrukcií riešené cez modul **Blackboard**. Teraz bude snaha výhradne o preposielanie správ. **Blackboard** bude slúžiť na prenos riadiacich a stavových informácií medzi časťou fyzickej vrstvy, ako je k nej prístupované z pohľadu MF a ako časťou fyzickej vrstvy, ako je popísaná v štandarde.



# Kapitola 5

## Popis simulačného modelu

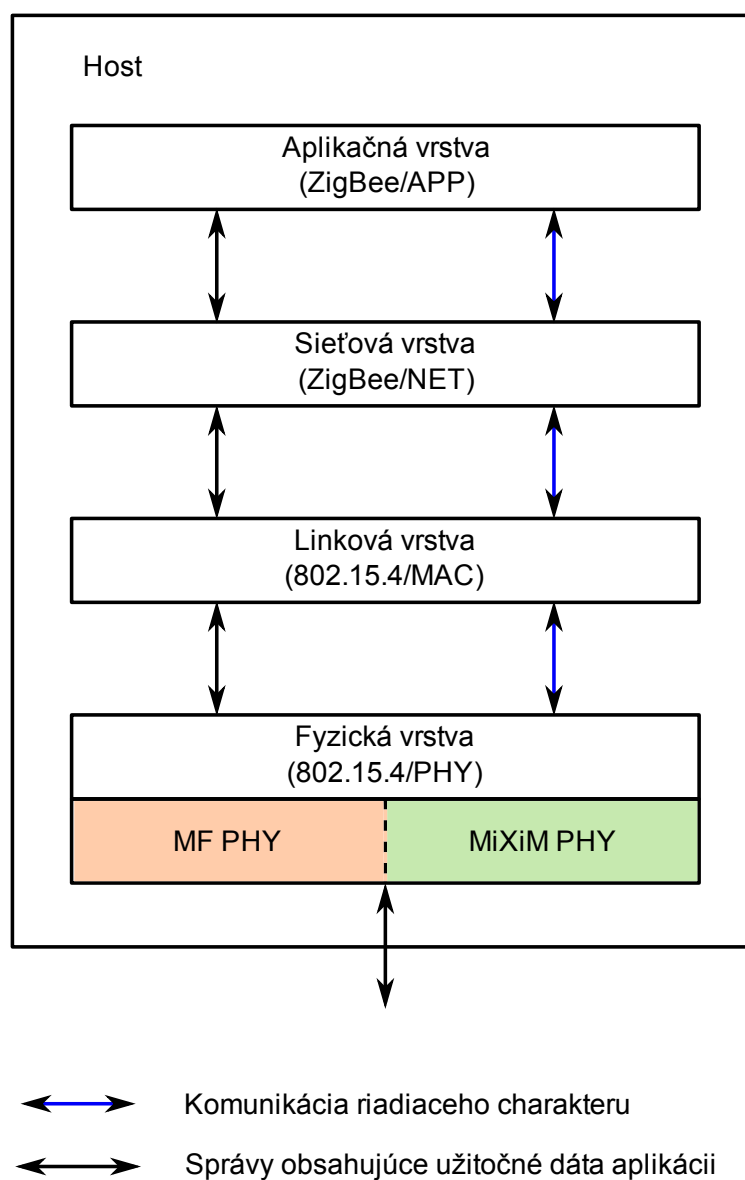
Simulátor MiXiM sa v čase písania tejto práce vyvíjal relatívne dynamicky. Avšak v podobe, v ktorej sa nachádzal, ešte neumožňoval plnohodnotnú prípravu modelu a dynamika jeho vývoja bola skôr na príťaž ako na ošoh. To bol hlavný motív, prečo zostať pri Mobility Framework rozšírení. Našou snahou teda bolo pripraviť taký modul, ktorý sa bude dať vo vhodnej chvíli ľahko transformovať do podoby vhodnej pre simulačný framework MiXiM.

Toto sa podarilo tak, že fyzickú vrstvu sme rozdelili na 2 časti. Jedna je napísaná spôsobom, aby vedela spracovávať formáty správ definované IEEE 802.15.4b-2006 štandardom, aby sekvencie udalostí, ktoré v nej prebiehajú, boli zodpovedajúce štandardu. Táto vrstva ale nekomunikuje priamo s modulom `ChannelControl`, ale predá správy druhej časti fyzickej vrstvy, a tá už je implementovaná v podobe, ktorá silno závisí na konkrétnom použití rozšírení modulu OMNeT++. Medzi týmito dvoma základnými časťami komunikácia prebieha vo forme oznamov cez modul `Blackboard` a aj cez predávanie správ pomocou komunikačných brán. Komunikácia pomocou definovaných brán medzi uvedenými úrovňami fyzickej vrstvy sa deje výhradne za účelom preposielania správ na médium, alebo príjmu správ z prijímača.

Aby sa zabezpečilo bezproblémové nasadenie mobility architektúry a prenos IP paketov sieťou IEEE 802.15.4, implementovali sme robustný model fyzickej a linkovej vrstvy. V zásade sme dodržali členenia na vrstvy tak, ako ho prezentuje štandard. To znamená implementovali model fyzickej (PHY) a linkovej (MAC) vrstvy z dokumentu IEEE 802.15.4 [8] a sieťová vrstva (NET) a aplikačná (APP) je pripravená podľa dokumentu ZigBee Specification [13]. Medzi týmito vrstvami sú preposielané správy, ktoré sa v podstate delia do dvoch základných skupín:

- správy, obsahujúce užitočné dáta aplikácii
- správy, ktoré majú riadiaci charakter

Charakter komunikácie medzi jednotlivými vrstvami a návrh rozdelenia PHY vrstvy je vyobrazený na obr. 5.1.



Obrázok 5.1: Základný pohľad na nami navrhovaný simulačný model

Štruktúra jednotlivých vrstiev modelu sa ďalej člení na isté bloky, ktoré na každej z týchto vrstiev pracujú s presne definovanými správami. Jeden blok má na starosti spracovávanie riadiacich informácií, druhá časť vrstvy správy enkapsuluje pri postupe informácie v smere nadol v hierarchii vrstiev (dekapsuluje pri smere nahor). Oba tieto bloky samozrejme medzi sebou komunikujú. Ako tretí prvok v tejto štruktúre je databáza konfiguračných premenných, z ktorých časť má charakter konštánt a má teda dovolený len prístup na čítanie. K ostatným je povolený aj zápis, samozrejme len v rámci medzí hodnôt, ktoré dovoľujú štandardy.

Z ďalších vecí je zahrnutá podpora pre FFD a RFD zariadenia. Úloha uzlov je diverzifikovaná na úrovni aplikačnej vrstvy.

## 5.1 Aplikačná vrstva - APP

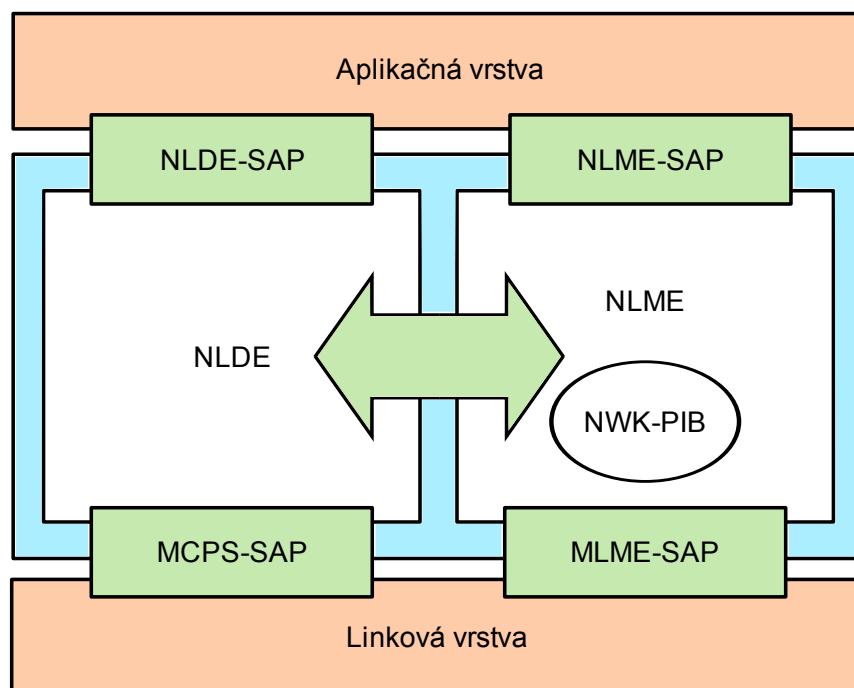
Čo sa týka aplikačnej vrstvy, mala by obsahovať vrstvu podpornú aplikačnej vrstvy (APSD). Tú sme vynechali z dvoch dôvodov. Prvým a najdôležitejším, je ten, že nachádzame sa v oblasti, ktorej podoba silne závisí od výrobcov zariadení (OEM - Original Equipment Manufacturer) a konkrétnych účelov, pre ktoré bolo ZigBee zariadenie vyrobené. Druhým je, že pri získavaní dát o kvalite a rýchlosti algoritmov, ktoré najviac ovplyvňujú a charakterizujú siete ZigBee nemá aplikačná vrstva veľkú váhu. Aplikačná vrstva v nami danej podobe má úlohu spustiť procesy pre zmonitorovanie prostredia, pre zostavenie PAN siete. V ďalšom kroku povolí na nami definovaný interval (akceptuje sa aj nekonečne dlhý interval - hodnota premennej *permitDuration 0xFF*) FFD zariadeniam asociovať ďalšie prvky do siete.

## 5.2 Sieťová vrstva - NET

Sieťová vrstva je členená bloky (obr. 5.2), každý z nich si plní svoje špecifické úlohy. Funkcie týchto blokov zodpovedajú ich popisu v ZigBee špecifikácii. Od sieťovej vrstvy sa požaduje poskytovanie funkcionality a zaistenie vhodných služieb pre správne fungovanie IEEE 802.15.4b-2006 linkovej vrstvy. K rozhraniu smerom k aplikačnej vrstve, ponúka koncept sieťovej vrstvy služby dvoch funkčných blokov. Tieto bloky sú označované ako datová (NLDE - Network Layer Data Entity) a riadiaca (NLME - Network Layer Management Entity).

### 5.2.1 Datová entita - NLDE

Blok NLDE (Network Layer Data Entity) poskytuje datové služby, ktoré dovoľia aplikácii prenos im vlastných datových jednotiek (APDU - Application Protocol Data Unit) medzi viacerými zariadeniami na jednej PAN sieti. V princípe NLDE poskytuje služby:



Obrázok 5.2: Referenčný model sieťovej vrstvy

- Vytváranie a spracovávanie datových jednotiek sieťovej vrstvy (NPDU - Network level PDU)
- Smerovanie NPDU cieľovému zariadeniu v závislosti od topológie
- Zaistenie autentizácie a utajenia prenosu, ak je vyžadované

### 5.2.2 Riadiaca entita - NLME

Riadiaca entita sieťovej vrstvy NLME (Network Layer Management Entity) podľa špecifikácie vykonáva tieto úlohy:

- Konfigurácia nových zariadení
- Založenie novej siete
- Pripájanie sa do existujúcich sietí (či už v rámci štartovacej sekvencie zariadenia, alebo po osirotení)
- Pridelovanie 16-bitových adries podľa zabudovaného algoritmu
- Udržovanie si zoznamu susediacich prvkov v dosahu rádia
- Dáva k dispozícii viaceré smerovacie algoritmy v závislosti od charakteru vyžadovaného prenosu (unicast, multicast, broadcast)



**Implementácia** Implementácia sieťovej vrstvy počíta s rozdelením na 3 jednoduché moduly v jazyku NED. Tieto budú NLME, NLDE a NWK-PIB (Network layer Protocol Information Base). Moduly NLME a NLDE budú pripojené pomocou párov jednosmerných brán k aplikačnej vrstve. Takisto sa počíta so zasielaním správ priamo medzi modulmi NLME a NLDE, preto aj v tomto mieste bude otvorená komunikačná cesta. Ako tretí bude jednoduchý modul NWK-PIB. Tento nebude pripojený k žiadnemu inému modulu komunikačnými bránami, ale bude obsahovať nadefinované verejne prístupné metódy (*public*) slúžiace na zapisovanie hodnôt atribútov a čítanie hodnôt atribútov a konštánt pre sieťovú vrstvu.

Vrstva NLME tiež obsahuje datovú štruktúru reprezentujúcu mapu susediacich prvkov `std::map<unsigned long, NeighborTableEntry>`. Každý z týchto prvkov je identifikovaný 64-bitovým kľúčom - IEEE adresou. Záznam v tabuľke `NeighborTableEntry` obsahuje polia tak, ako sú pre tabuľku susedov definované v ZigBee špecifikácii.

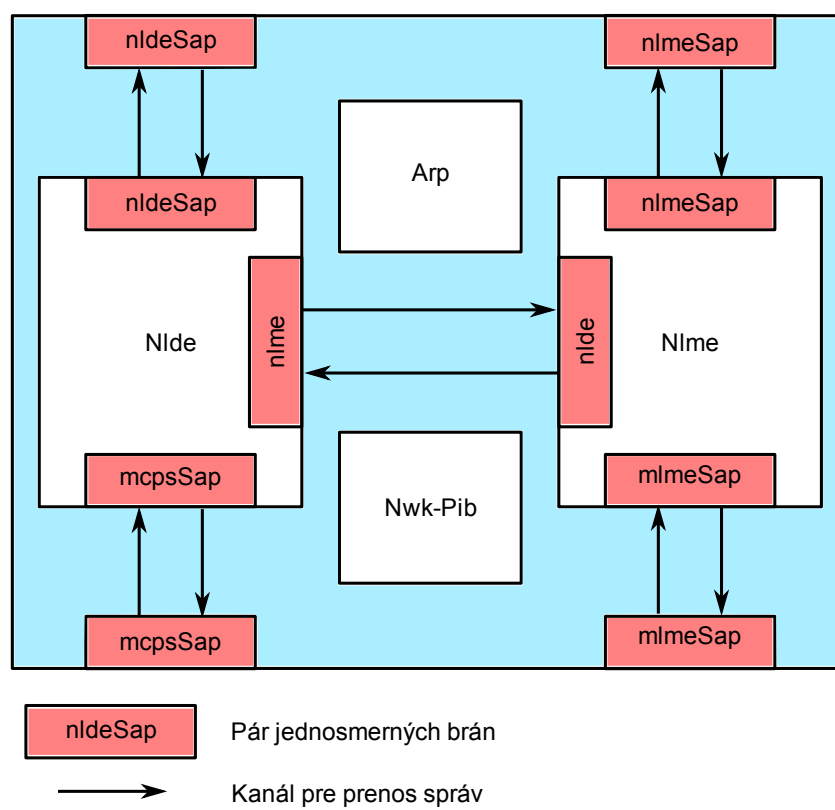
Ďalej si modul NLME uchováva aj informácie o PAN sietiach vo svojom okolí a v prípade FFD prvku tiež zaznamenáva počet asociovaných potomkov do siete a ich charakter (koncové zariadenie/smerovač) pre správne fungovanie distribuovaného mechanizmu prideľovania sieťových adries. Ak si zariadenie ukladá do *neighborTable* záznam o smerovači, tak v tomto zázname je obsiahnutá aj informácia *incomingBeaconTimestamp*, ktorá hovorí o relatívnej dobe prijatia beacon rámca od daného zariadenia. Hodnota je udaná v symboloch. Mimo to záznam v tabuľke, obsahuje ešte údaj v symboloch o časovom odstupe beacon rámca vysielaného susediacim prvkom a prijímaného susediacim prvkom od jeho rodiča v topológii siete. Vďaka kombinácii týchto dvoch údajov si vie potom ďalší prvok účinne naplánovať vysielanie beacon rámcov tak, aby nespôsobovalo konflikty s inými beacon rámcami.

Sieťová vrstva cez svoj modul NLME zapisuje do MAC-PIB (Medium Access Control layer Protocol Information Base) modulu linkovej vrstvy cez primitívu `MLME-SET.request` časť obsahu beacon rámcov označovanú ako *macBeaconPayload*. Sú to informácie pre sieťové vrstvy susediacich prvkov, ktoré sú podávané cez implementovanú komunikačnú primitívu `MLME-BEACON-NOTIFY.indication`.

K týmto trom základným blokom (NLDE, NLME, NWK-PIB) je pridaný blok *Arp*. Idea tohoto riešenia je v separovaní smerovacieho algoritmu v extra module z dôvodu jeho prehľadnejšieho ladenia a ľahkosti v prípadnom experimentovaní s použitím iných smerovacích algoritmov.

## 5.3 Linková vrstva - MAC

Úlohou linkovej vrstvy je riadiť prístup na prenosové médium a spracovávať informácie prijaté rádiom. V prípade linkovej vrstvy sú entity použité tiež dve - datová (MCPS - MAC Common Part Sublayer) a riadiaca (MLME - MAC Layer Management Entity). Okrem toho, že ponúkajú služby sieťovej vrstve cez príslušné body služby (SAP), existuje medzi nimi rozhranie, ktoré zabezpečuje riadiacej MLME entite využívať datové služby entity MCPS. Linková vrstva dokáže pracovať v 2 režimoch - beacon enabled a non-beacon enabled móde. V prípade beacon-enabled módu prvok v roli smerovača v pravi-



Obrázok 5.3: Podoba implementovaného modelu sieťovej vrstvy

delných intervaloch vysiela beacon rámec. Periodicita vysielať tohto rámca je daná hodnotou premennej *macBeaconOrder*. V prípade hodnoty *macBeaconOrder* = 0x0F pracuje sieť v non-beacon enabled móde a beacon rámce sú zasielané len na vyžiadanie. V našom modeli sme sa vyhli implementácii tohto módu, pretože podobné implementácie v simulátore OMNeT++ už existujú. Mimo to, úlohy linkovej vrstvy sú delené do dvoch skupín v závislosti od funkcionality, ktorá je od nich požadovaná:

### FFD funkcionality

- Fungovanie v akejkoľvek topológii
- Schopnosť fungovať v roli PAN koordinátor
- Schopnosť komunikovať s akýmkoľvek IEEE 802.15.4 zariadením v PAN sieti
- Implementovaná kompletná sada protokolu IEEE 802.15.4

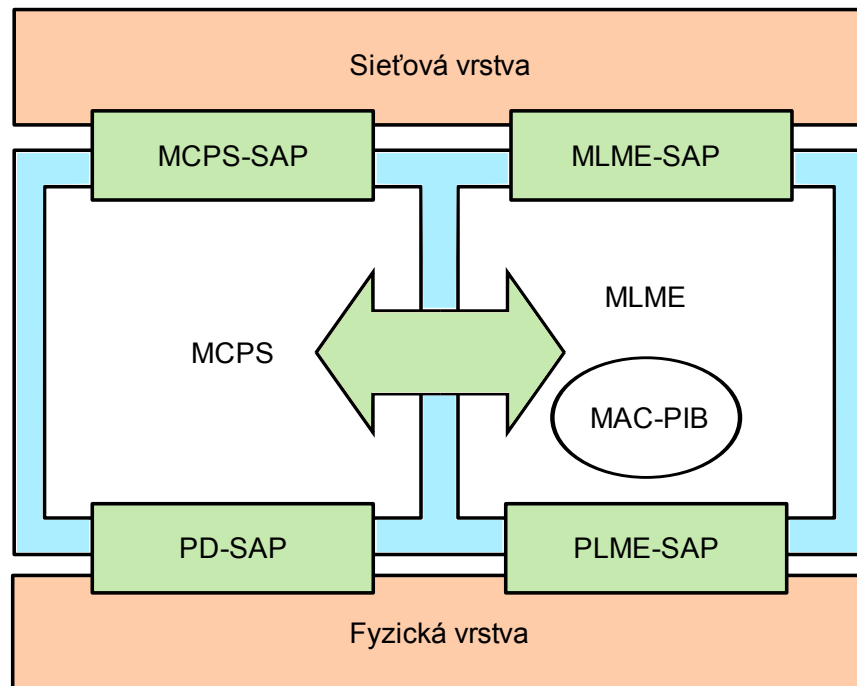
### RFD funkcionality

- Funkcia obmedzená na hviezdicovú topológiu, alebo rolu end-device v peer-to-peer móde
- Nemožnosť vytvoriť sieť a stať sa PAN koordinátorom
- Komunikácia len s FFD zariadením
- Jednoduchá implementácia
- Nízka spotreba energie

Všetky zariadenia komunikujú na linkovej úrovni pomocou 64-bitových IEEE adries, alebo 16-bitových adries pridelených sieťovou vrstvou. Každá PAN sieť má pridelený svoj exkluzívny identifikátor. Tento identifikátor v kombinácii s cieľovou adresou definuje príjemcu komunikácie. Hodnota 16-bit sieťového identifikátora 0xFFFF, alebo hodnota 16-bit PAN identifikátora 0xFFFF predstavuje broadcast adresu. Prijatý rámec, ktorý obsahuje takýto cieľový PAN identifikátor, alebo cieľovú sieťovú adresu nie je zahodený a je spracovaný linkovou vrstvou. Kontrola toho, či dané zariadenie je adresátom prijatého rámca, je vykonávaná vo vrstve MCPS.

#### 5.3.1 Datová entita - MCPS

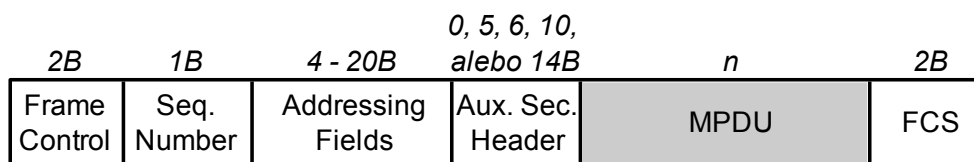
Modul MCPS slúži na prenos SPDU (SSCS Protocol Data Unit) medzi viacerými SSCS entitami.



Obrázok 5.4: Referenčný model linkovej vrstvy

**Implementácia** Datová entita MCPS využíva pre prenos rámcov fronty. Naša implementácia používa tieto fronty dve. Jednu pre prenos správ v perióde CAP pri beacon enabled móde alebo pre prenos riadiacich správ s vyššou prioritou v non-beacon enabled móde a druhú pre prenos správ v móde non-beacon enabled, ktoré majú nižšiu prioritu. Do týchto front sú rámce vkladane hneď po zapúzdrení (enkapsulácii). Teda vrstva MCPS sa stará aj o enkapsuláciu. Niekedy nemá potrebné informácie k enkapsulácii rámca, ktorý je poslaný z povedzme NLME vrstvy, vtedy NLME využije datovej štruktúry `nextEncapsulation` a nastaví v nej príslušné hodnoty. To sa týka parametrov, ktoré nie sú obsiahnuté v správach generovaných NLME vrstvou, ale sú potrebné pre korektnú enkapsuláciu daného paketu (obr. 5.5). Simulačný model sa nezaobrá bezpečnosťou, preto je pole Auxiliary Security Header vždy dĺžky 0.

Modul MCPS posiela rámce potvrdení, ak sú vyžadované. Používa k tomu časovač `ackTimer`. Modul MCPS ďalej dodržiava časové odstupy medzi datovými rámcami a ACK rámcami. Sú to intervaly dané štandardom, ktoré dávajú zariadeniam čas na spracovaní prijatých rámcov. Spôsob dodržovania týchto odstupov je vyobrazený na obr. 5.6.



Obrázok 5.5: Spôsob enkapsulácie MPDU na linkovej vrstve

Potvrdzovaná komunikácia:



Komunikácia bez potvrdzovaní:



Kde  $aTurnaroundTime \leq T_{ack} \leq (aTurnaroundTime + backoffPeriod)$

Obrázok 5.6: Minimálne časové odstupy medzi jednotlivými rámcami

### 5.3.2 Riadiaca entita - MLME

MLME vrstva v časovom intervale označovanom ako CFP (viď obr. 3.5) realizuje prístup na médium cez tzv. CSMA-CA mechanizmus. CSMA mechanizmus znižuje pravdepodobnosť kolízie rámcov pri vysielaní viacerých rádii na spoločnom prenosovom médiu. Konkrétna aktivita CSMA mechanizmu sa nastavuje týmito parametrami:

- *backoffExponent* (východzia hodnota: *macMinBE*)
- *numberOfBackoffs* (východzia hodnota: 0)

CAP perióda je delená do 16 rovnako dlhých superframe slotov. Procedúra pre zistenie, či sa médium nachádza v stave *idle* sa označuje ako Clear Channel Assessment (CCA) a vždy začína spolu so začiatkom nového superframe slotu. Prvý superframe slot je dedikovaný vysielaniu beacon rámca. Požiadavka na vysielanie rámca pomocou CSMA-CA mechanizmu začína po prvý krát vždy počas prvého superframe slotu. Keďže počas neho je vysielaný beacon rámec, CCA procedúra zistí, že kanál nie je voľný a začína tzv. backoff interval. Tento backoff interval hovorí o počte uplynutých superframe slotov pred ďalším pokusom o vyslanie rámca. Vypočíta sa ako náhodné číslo z intervalu  $< 0, 2^{\text{backoffExponent}}$ ). Po neúspešnom pokuse o vyslanie rámca sa zvýši hodnota *backoffExponent* o jednotku a hodnota *numberOfBackoffs* tiež o jednotku. Proces končí buď úspešným vyslaním rámca, prípadne dosiahnutím hraničných hodnôt *backoffExponent* = *macMaxBE*, alebo *numberOfBackoffs* = *macMaxCSMABackoffs* + 1. Vtedy MLME vrstva vracia informáciu sieťovej vrstve so statusom *channel failure*.

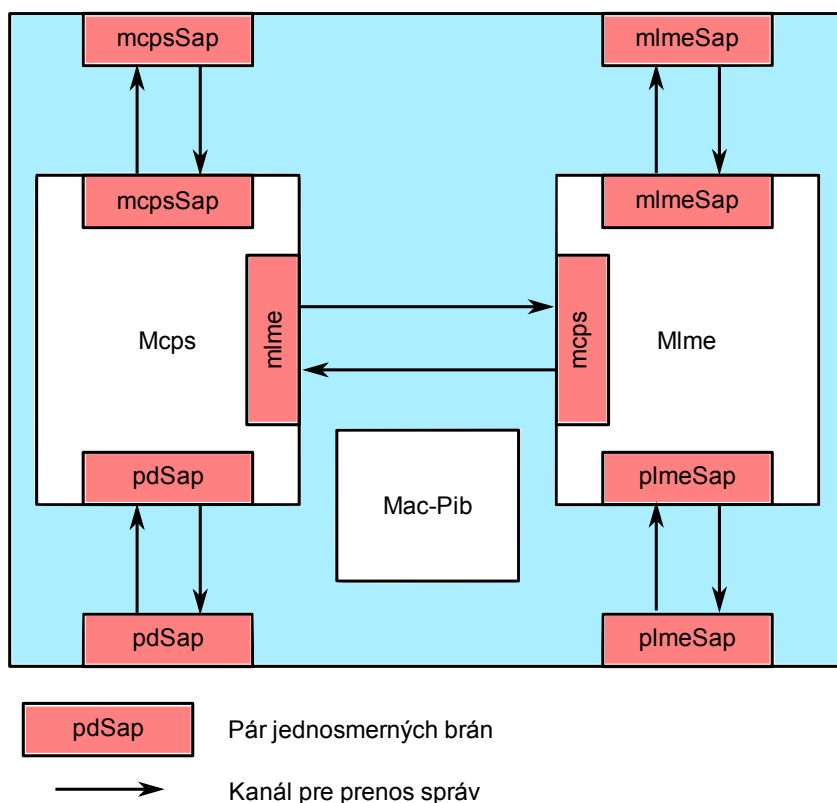
Iba dva typy rámcov pristupujú v CAP intervale na médium bez aplikovania CSMA módu, a to sú rámce potvrdení (ACK frames) a beacon rámce.

**Implementácia** V prípade, že vyprší *backoffTimer* v intervale CAP, MLME vrstva požiada PLME vrstvu primitívou PLME-CCA.request o vykonanie procedúry CCA aby mohlo začať vysielanie rámcov z vrstvy prioritnej fronty MCPS. Ak je prioritná fronta prázdna, pozrie sa na obsah druhej fronty. Možno by niekto mohol mať obavy, či takýto postup nespôsobí hladovanie (starving). Takto by sa dal označiť stav, kedy by sa prioritná fronta nikdy úplne nevyprázdnila a rámce v neprioritnej fronte by čakali teoreticky nekonečne dlho na odoslanie. V prípade architektúry siete 802.15.4 sa toho netreba obávať, pretože prioritná fronta sa využíva len zriedka, a to pre riadiace rámce MAC vrstvy (MAC Command frame) ako je napríklad žiadosť o vyslanie beacon rámca, žiadosť o asociáciu, o zistenie stavu asociácie, žiadosť o zaslanie dát smerom od smerovača a pod.

Modul funguje ako stavový automat. Pre definovanie konkrétneho stavu v ktorýkoľvek moment sú nám pomocné nasledovné premenné:

- *lastUpperMsg* - premenná, ktorá uchováva kópiu poslednej prijatej správy z vyššej vrstvy.

- *lastLowerMsg* - premenná, ktorá uchováva kópiu poslednej prijatej správy z nižšej vrstvy, zatiaľ je používaná len v module (MLME).
- *layerStage* - v prípade, že vyššie uvedené štruktúry nedefinujú presne daný stav automatu, pomôže hodnota tejto premennej, po prijatí novej správy z vyššej vrstvy sa hodnota *layerStage* nastavuje automaticky na 0.

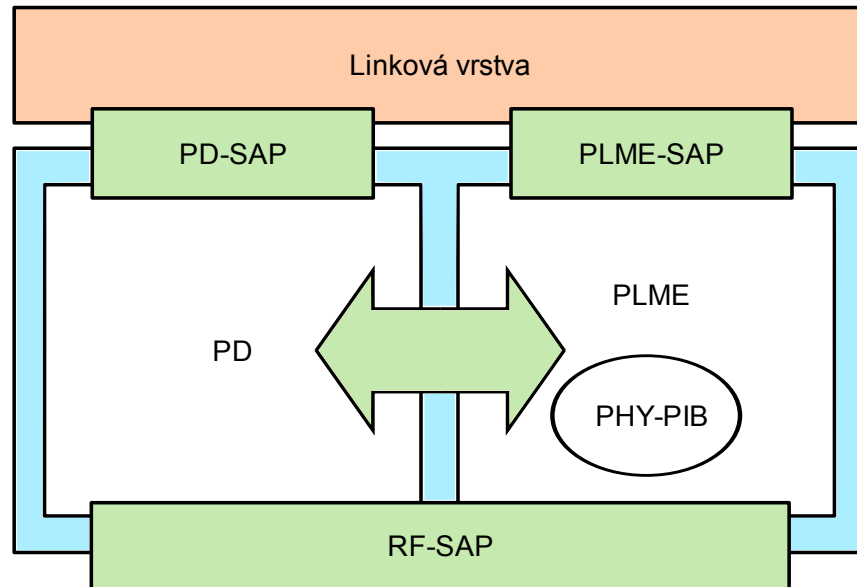


Obrázok 5.7: Podoba implementovaného modelu linkovej vrstvy

## 5.4 Fyzická vrstva - PHY

Fyzická vrstva nášho modelu simuluje transformáciu bitov dodaných linkovou vrstvou na signál, ktorý je následne šírený médium. Standard pracuje so 7 komunikačnými módmi (obr. 3.1). Logika všetkých týchto módov je našim modelom podporovaná na strane komunikačných uzlov, ale pri začiatku simulácie sa musí nastaviť na jednu prenosovú frekvenciu **ChannelControl1**. V tomto bude sa plánuje iný pohľad na správu spojení v simulátore MiXiM a tento nedostatok by sa mal odstrániť. Simulačný model by tam dovoľoval viacero aktívnych správcoch spojení (moduly **ConnectionManager**).

Úlohy fyzickej vrstvy sú alokované do 2 entít - analogicky ako aj v predošlých vrstvách: datovej (PD - PHY Data entity) a riadiacej (PLME - PHY Management Entity). Výstupom smerom do éteru je bod služby RF-SAP a predstavuje rozhranie k rádiovému vysielateľu/prijímaču.



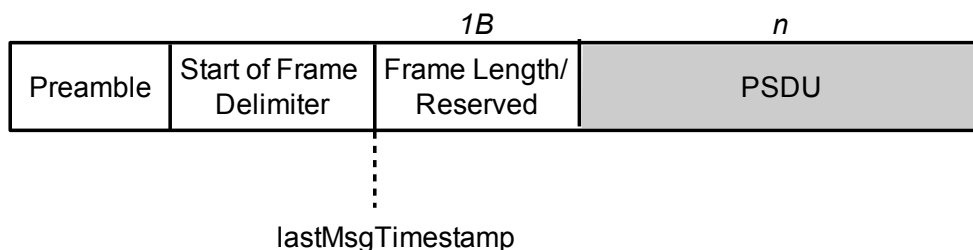
Obrázok 5.8: Referenčný model fyzickej vrstvy

#### 5.4.1 Datová entita - PD

Modul PD preposiela rámce medzi modulom `ChannelControl` a linkovou vrstvou cez bod prístupu PD-SAP. K rámcom pridáva dodatočné bity označované ako preamble a SFD bity (Starting Frame Delimiter). Tieto slúžia podľa špecifikácie k tomu, aby sa prijímací čip zosynchronizoval na týchto prijatých postupnostiach bitov. Vrstva PD nastavuje aj premennú *lastMsgTimestamp*, ktorá je štruktúrou typu *SimTime* a predstavuje časovú značku prijatých rámcov. Táto značka je nastavená až po prijatí bitov patriacich do preamble časti a SFD sekvencie. Názornejšie to vysvetľuje obr. 5.9.

**Implementácia** Dĺžky polí preamble a SFD sa menia v závislosti od aktuálnej hodnoty *phyCurrentChannel* a *phyCurrentPage*. Sú zisťované priamo z modulu PHY-PIB (PHY layer Protocol Information Base). V tejto vrstve je to zatiaľ jediné miesto, kde je aktívne používaná utilita `Blackboard`. Pomocou nej sa vrstva PD dozvedá o tom, v akom stave je rádio a aký je zámer MAC vrstvy (*RX/TX*). Podľa tejto informácie odosiela do bodu služby RF-SAP rámce.





Obrázok 5.9: Spôsob enkapsulácie PSDU na fyzickej vrstve

### 5.4.2 Riadiaca entita - PLME

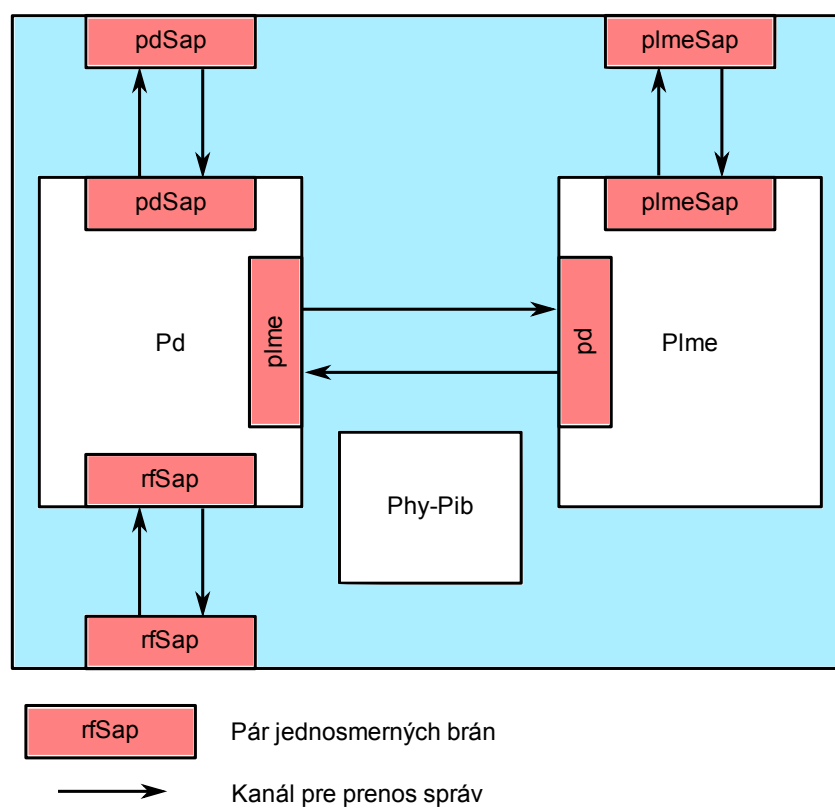
Riadiaca časť fyzickej vrstvy PLME má hlavne za úlohu spracovávať stavy rádia, prepínať ho na správnu frekvenciu a správny kanál. Úzko spolupracuje so sadou premenných a konštánt PHY-PIB. Vrstva ďalej informuje linkovú vrstvu o nameraných hodnotách pri ED (Energy Detection) snímaní okolia.

**Implementácia** Modul PLME je naprogramovaný tak, aby nedalo prípadnému záujemcovi veľa práce ho adaptovať na simulačný framework MiXiM. Tu sa nachádzajú úseky kódu, ktoré si budú vyžadovať úpravy k naplneniu cieľa. Jedná sa hlavne o zistenie spôsobu stavu energetickej hladiny kanálu. Tento údaj sa vysiela v primitíve PLME-ED-SCAN.confirm linkovej vrstve a v trochu inej podobe v primitíve PLME-CCA.confirm. V súvislosti s ED skenovaním by bolo zaujímavé vedieť, aký je časový interval medzi prijatím správy PLME-ED-SCAN.request a odoslaním odpovede na ňu PLME-ED-SCAN.confirm. Pretože samotný údaj o dĺžke vykonávaného skenu je spracovaný linkovou vrstvou, ktorá o tejto dĺžke neinformuje PLME modul, ale dovtedy opakuje vysielanie požiadavku na ED sken, dokedy jej nevyprie timer *TIMER\_ED\_SCAN*. Následne modul PLME pracuje s najvyššie zaznamenanou hodnotou vrátenou v správe PLME-ED-SCAN.confirm. Mimo to, modul PLME má za úlohu pristupovať do sady premenných a konštánt PHY-PIB za účelom predania ich hodnôt vyšším vrstvám cez primitívu PLME-GET.confirm, alebo ich nastavenia primitívou PLME-GET.request.

Tento modul aj spracováva požiadavku pre vykonanie Clear Channel Assessment procedúry PLME-CCA.request. Za týmto účelom kontaktuje modul *SnrEval* a z neho vie zistiť, či je kanál v daný moment v stave *IDLE*, alebo nie.

### 5.4.3 Väzba na Mobility Framework

Súčasťou fyzickej vrstvy v našom modeli sú už okrem spomenutých modulov aj moduly *SnrEval* a *SnrDecider*. Spôsob, akým zapadajú do architektúry modelu PHY je uvedený na obr. 5.11. Tieto moduly sú súčasťou každej simulácie pod rozšírením Mobility



Obrázok 5.10: Podoba implementovaného modelu fyzickej vrstvy

Framework a v skutočnosti sú to upravené moduly z knižníc MF pre potreby nášho simulátora. Modul `SnrEval802154` vysiela rámce priamo modulu `ChannelControl`. V opačnom smere, smere prijímania rámcov rozhoduje, či rámec sa prijme ako rámec, alebo je uvažovaný len ako príspevok k šumu. To závisí od toho, či je vypočítaná sila zaznamenaného signálu vyššia ako nastavená citlivosť prijímača. Energetická úroveň prijatého signálu sa počíta podľa vzorca

$$P_{recv} = \frac{P_{send}\lambda^2}{16\pi^2 l^\alpha}$$

kde  $P_{send}$  znamená vyžarovací výkon,  $\lambda$  vlnovú dĺžku nosnej,  $\alpha$  predstavuje koeficient útlmu a  $l$  vzdialenosť medzi zariadeniami. Modul `SnrEval802154` ďalej pracuje so stavom rádia a uverejňuje ho na `Blackboard`. V prípade spracovania správy ju pošle k modulu `SnrDecider802154`. Jeho úlohou je potom podľa úrovne SNR (Signal to Noise Ratio) a podľa prednastavenej hodnoty `snrThreshold` prečítanej z modulu `ChannelControl` zistiť pravdepodobnosti chyby v prijatých rámcoch.

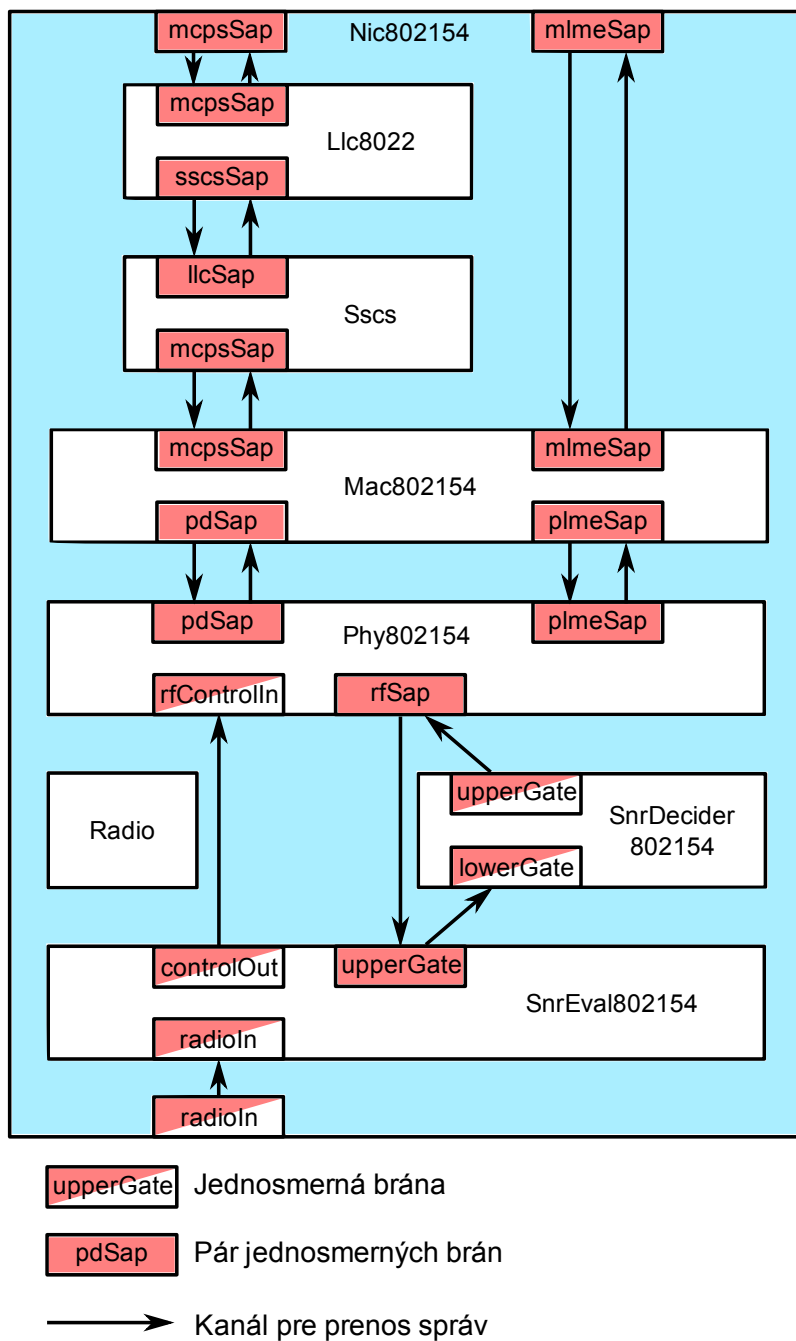
Keď sa uvažuje vzduch ako spoločné prenosové médium, je potrebné si uvedomiť, že všetky zariadenia vzájomne sa ovplyvňujú. To znamená, že musia medzi nimi existovať spojenia. V prípade simulácie  $n$  zariadení, počet spojení bude  $n!$ . Takýto prístup je pri svojom behu značne náročný na systémové prostriedky. V MF bola heuristickými metódami znížená táto náročnosť. Zadefinujeme pojem interferenčná vzdialenosť. Jej hodnota bude predstavovať maximálnu prípustnú vzdialenosť medzi uzlami, pri ktorej ešte budeme uvažovať o ich vzájomnom rušení. Označme ju  $r$ . Vzdialenosť medzi uzlami označme  $l$ . Ak rozdelíme simulačnú plochu na štvorcové zóny s dĺžkou hrany  $r$ , môžeme potom tvrdiť, že ovplyvňovať sa budú len uzly vrámci zóny a v vzájomne susediacich zónach. Uzly siete, ktoré sa nachádzajú vo vzdialenosti menšej, ako je interferenčná vzdialenosť ( $l \in \langle 0, r \rangle$ ), majú vytvorené medzi sebou spojenie. Uzly, ktoré sa nachádzajú vo vzdialenosti väčšej, ako je  $2\sqrt{2}r$ , spojenie určite vytvorené nemajú a uzly, ktorých vzájomná vzdialenosť bude patriť do intervalu  $l \in (r, 2\sqrt{2}r)$  budú mať spojenia vytvorené len v závislosti od ich polohy (viď obr. 4.2).

Interferenčná vzdialenosť sa počíta podľa vzorca

$$r = \left( \frac{\lambda^2 P_{max} 10^3}{16\pi^2 10^{\frac{sat}{10}}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

kde  $\lambda$  predstavuje vlnovú dĺžku nosnej frekvencie,  $P_{max}$  najvyššiu hodnotu vyžarovacieho výkonu uzlu použité v simulácii, premenná `sat` hraničnú hodnotu útlmu (Signal Attenuation Threshold) a  $\alpha$  koeficient útlmu. Pre nami použité hodnoty  $\lambda = 0,125$  ( $f = 2,4 \cdot 10^9 [Hz]$ ),  $P_{max} = 10 \cdot 10^{-3} [mW]$ , `sat` =  $-112 [dBm]$  a  $\alpha = 3,5$  vychádza hodnota interferenčnej vzdialenosti  $r = 219.555 [m]$ .

V grafickom okne bežiackej simulácie (obr. 6.1 a obr. 6.2) je dobre vidieť, aký výsledok sa dostaví s použitím uvedenej heuristiky pri nastavení prostredia podľa vyššie uvedených hodnôt parametrov. Spojenia sú vytvorené len medzi určitými uzlami a dynamicky vznikajú a zanikajú počas behu simulácie v závislosti na pohybe sieťových prvkov po ploche. V danom prípade bola nastavená dĺžka strany simulačného poľa o veľkosti  $500m$ .



Obrázok 5.11: Modul rozhrania 802.15.4 a jeho štruktúra v kontexte s rozšírením Mobility Framework

## 5.5 Mobilita

Mobility Framework poskytuje, ako už z jeho názvu vyplýva, silnú podporu mobilité modelov. V MF je mobilita rozdistribuovaná medzi všetky moduly FFD a RFD. Keďže nie je dôvod, aby jeden prvok ovplyvňoval druhý v pohybe, mobilita je počítaná na lokálnej úrovni jednotlivých prvkov. Informácia o vzájomných polohách zariadení je potom spracovávaná v module **SnrDecider** z informácií, ktoré poskytne **ChannelControl**. Mobility Framework 2.0 preview 3 má obsiahnutých niekoľko základných modelov pohybu po simulačnom poli. K základným patria:

**CircleMobility** kde prvok opisuje trajektóriu v tvare kružnice s definovaným stredom, polomerom, rýchlosťou, počiatočným uhlom zvierajúcim sprievodiča s osou X (*startAngle*) a periodicitou updatovania danej polohy. Obdobne pracuje aj model **RectangleMobility**, ktorý definuje pohyb po obdĺžniku.

**ConstSpeedMobility** je mobilita, ktorá simuluje pohyb zariadenia smerom k náhodne definovaným cieľom s konštantnou rýchlosťou. Po dosiahnutí tohoto konkrétneho cieľa je ďalej zvolený iný, tiež náhodný.

**LinearMobility** modeluje pohyb po poli s definovaným počiatočným stavom (súradnice, uhol pohybu voči osi X, rýchlosť a zrýchlenie). Smer pohybu prvku sa potom zmení len pri dosiahnutí okraja poľa, na ktorom prebieha simulácia, a to podľa pravidla uhol dopadu = uhol odrazu.

**MassMobility** [4] opisuje nasledovný spôsob pohybu po poli: prvok sa pohybuje priamo po priamke po dobu náhodne dlhého intervalu. Dĺžka toho intervalu je daná normálnym rozložením. Po uplynutí tohoto intervalu zmení smer pohybu o uhol, ktorého veľkosť je tiež náhodné číslo z normálneho rozloženia. Zároveň zmení v tomto bode aj rýchlosť na nejakú náhodnú veľkosť. Po náraze na hranicu simulačnej zóny sa odrazí pod rovnakým uhlom. Tento model hovorí o tom, že prvky majú moment zotrvačnosti a nemenia smer pohybu nárazovo. Východzie hodnoty sú *changeInterval* = *normal*(5, 0.1)[s], *changeAngleBy* = *normal*(0, 30)[deg] a *speed* = *normal*(*avgSpeed*, 0.01)[m/s].

**TurtleMobility** modul spracováva pohyb opísaný externým súborom vo formáte \*.xml. Pohyb je nadefinovaný určitými blokmi úsekov, ktoré majú zadanú počiatočnú zmenu smeru, rýchlosť a číslo, koľko krát sa daný blok opakuje.

Mobility modely v MF sú aj schopné pracovať s externe definovanými modelmi mobility simulátora **ANSim** [5] a s modelmi mobility formátu **BonnMotion** [3]. Všetko závisí na tom, aký spôsob mobility architektúry je definovaný v súboroch **FFD.ned** a **RFD.ned**.

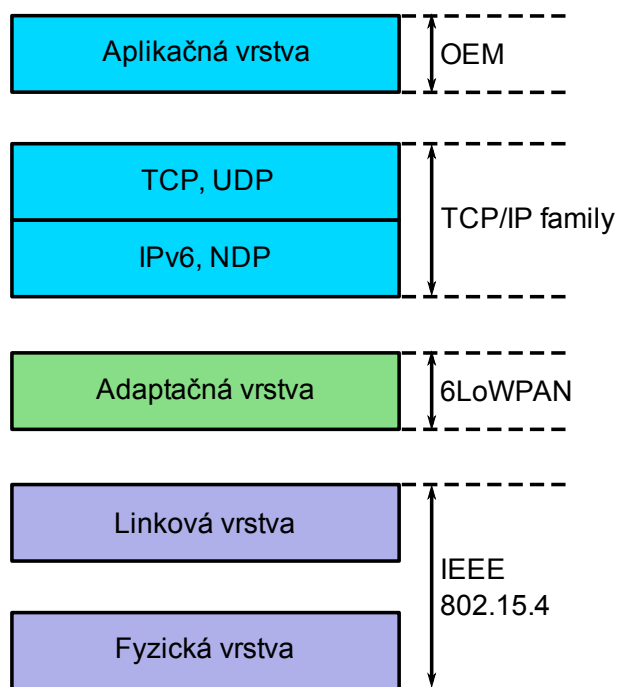
V simulátore MiXiM bude obsiahnutý podobný prístup k riešeniu mobility prvkov. Tam bude existovať aj centrálny prvok riadiaci mobilitu a eventuelné kolízie prvkov *ObjectManager*. Predpokladá sa, že množstvo mobility modelov z MF bude implementované aj do MiXiM frameworku.

## 5.6 IP over IEEE 802.15.4

Až donedávna bola predstava, že IP prístup bude obchádzať LR-WPAN siete, pretože IP protokoly nebude možné prešlávať na linky s nízkymi prenosovými rýchlosťami, z ktorých množstvo funguje v energeticky úsporných režimoch. IEEE 802.15.4 rámce sú relatívne malé a celý stack protokolov sa musí zmestiť do obmedzeného pamäťového priestoru. Návrh štandardu IETF 6LoWPAN pre IPv6 komunikáciu [9] a [10] cez IEEE 802.15.4 zmenil pohľad na danú problematiku. S podporou šifrovania AES-128 zahrnul základné bezpečnostné a autentizačné mechanizmy. Uvedený štandard definuje spôsob prenosu IP paketov cez siete štandardu IEEE 802.15.4 vďaka čomu umožňuje interoperabilitu medzi zariadeniami na rôznych linkách v hierarchii siete a zároveň dovoľuje paralelné fungovanie zariadení v týchto sieťach, ktoré nepoužívajú IP pakety k prenosu dát.

Nasadenie IP technológie nad IEEE 802.15.4 má mnohé výhody. Menovite odpadá veľké množstvo potrebných smerovačov rôznych IEEE 802.15.4 protokolov, riadiacich a bezpečnostných procedúr, pretože v týchto veciach sa môžeme spoľahnúť na protokoly z rodiny TCP/IP. Nevýhodou nasadenia IPv6 sú veľké polia v hlavičke paketu a spolu s užitočným obsahom paketu presahujú prípustné veľkosti rámcov IEEE 802.15.4 (IPv6: 1280 B, 802.15.4: max 127B). 6LoWPAN formát v základnom režime pracuje s extrémne kompaktným záhlavím IP, ktoré rozširuje v prípade, že viaceré vlastnosti a schopnosti IPv6 protokolu sú využívané. Napríklad pri komunikácii susediacich 802.15.4 zariadení, polia obsahujúce IP adresy môžu byť skrátené takmer na nulu. V plnej forme sú použité v prípade, že jeden koniec komunikačného toku sa nachádza mimo 802.15.4 siete. Pri prekročení veľkosti MPDU, ktorú sú schopné zariadenia preniesť, sa pristupuje k fragmentácii. Tiež návrh 6LoWPAN dovoľuje smerovať rámce pomocou IP v sieťach LR-WPAN. Senzorové siete budú obsahovať brány (gateways), ktorých funkcionality bude zredukovaná na úlohu jednoduchého smerovača medzi senzorovou a konvenčnou sieťou. Je nutné poznamenať, že IEEE 802.15.4 neposkytuje podporu pre broadcast smerovanie, čo sa samozrejme negatívne prejaví pri fungovaní protokolu IPv6, ktorý práve poskytuje silné mechanizmy na prácu s broadcast a multicast adresami. Z absencie broadcast smerovania sa nedá počítať s fungovaním služieb vyžadujúcich broadcast komunikáciu ako napr. DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol).

Pre nasadenie IP komunikácie je pripravené rozhranie na linkovej vrstve, ktoré poskytuje adaptačnej vrstve vstupné brány `input mlmeSapIn`, `input mcpsSapIn` a výstupné `output mlmeSapOut`, `output mcpsSapOut`. Modul linkovej vrstvy je implementovaný tak, aby korektne spracoval sekvencie správ pre inicializáciu siete (správy typu MLME-BEACON-NOTIFY.indication, MLME-SCAN.request, MLME-START.request, MLME-ASSOCIATE.request, MLME-SET.request). Tieto správy sú postačujúce na to,



Obrázok 5.12: Architektúra modulu komunikujúceho IP protokolmi na LR-WPAN sieti

aby sa adaptačný modul nakonfiguroval pre správne prenášanie paketov IP, zviazal IPv6 s 64-bit IEEE adresami a bol schopný enkapsulovať IP pakety do IEEE 802.15.4 rámcov. Presné definície a formáty správ, cez ktoré je možné naviazať adaptačnú vrstvu k linkovej vrstve sú uvedené v súbore `Messages.msg` a majú prefix `Mlme`.

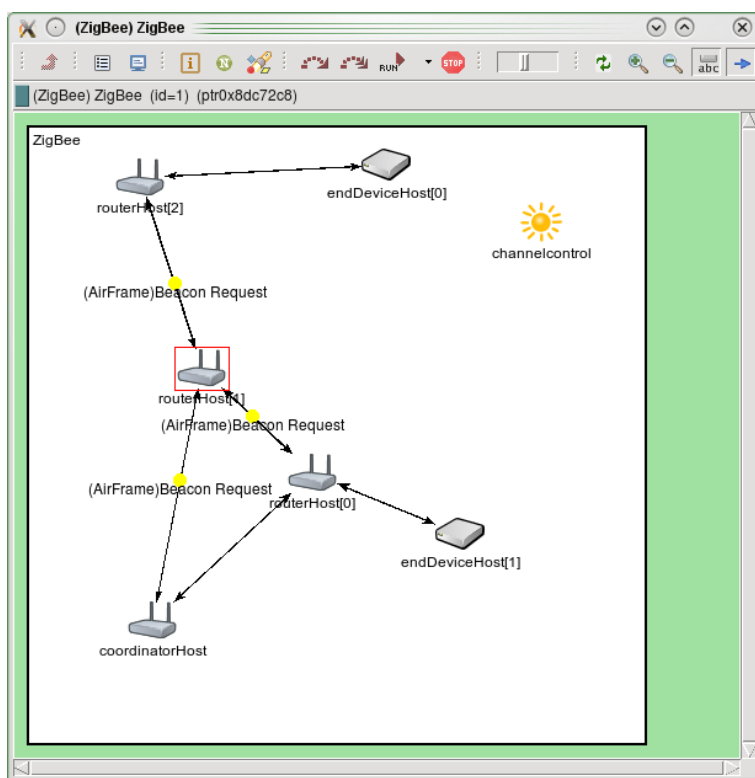




## Kapitola 6

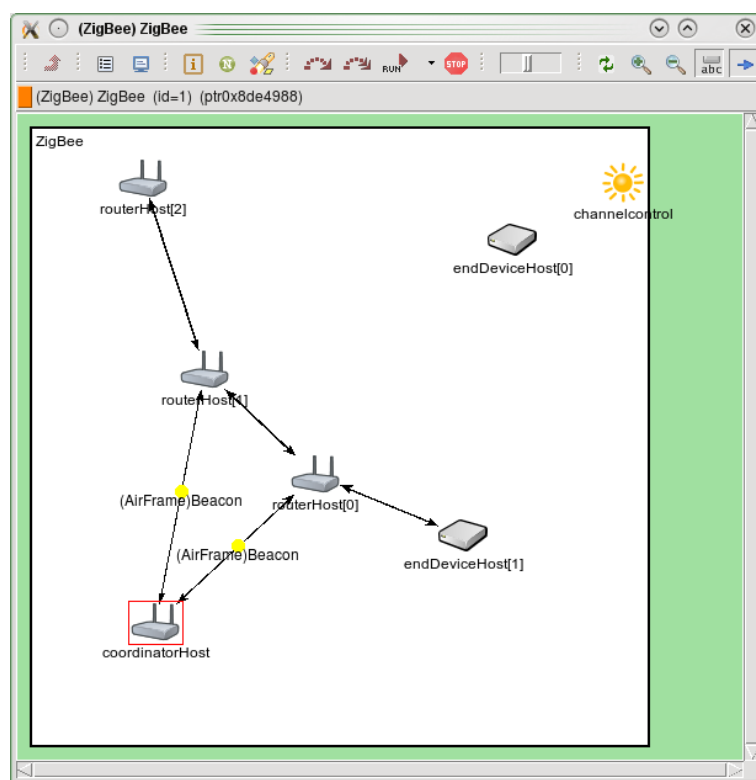
### Funkčnosť, výsledky testovania

Na priloženom obrázku 6.1 je stav už nami pripravenej simulácie tak, ako ho zobrazuje grafické rozhranie OMNeT++. Pre názornosť bola mobilita aktivovaná len na prvku endDevice[0]. Ten sa počas behu simulácie stratí z dosahu zariadenia routerHost[2], čo je pekne vidieť na obr. 6.2. Zobrazené linky znamenajú, že zariadenia sú ešte v dosahu svojich vyselačov, čo ale negarantuje spoľahlivý prenos dát medzi nimi. OMNeT++



Obrázok 6.1: Inicializovaná simulácia, modul routerHost[1] vykonáva aktívny sken okolia

ponúka veľmi efektívne nástroje na spracovávanie výsledkov simulácii. Jedným z nich je

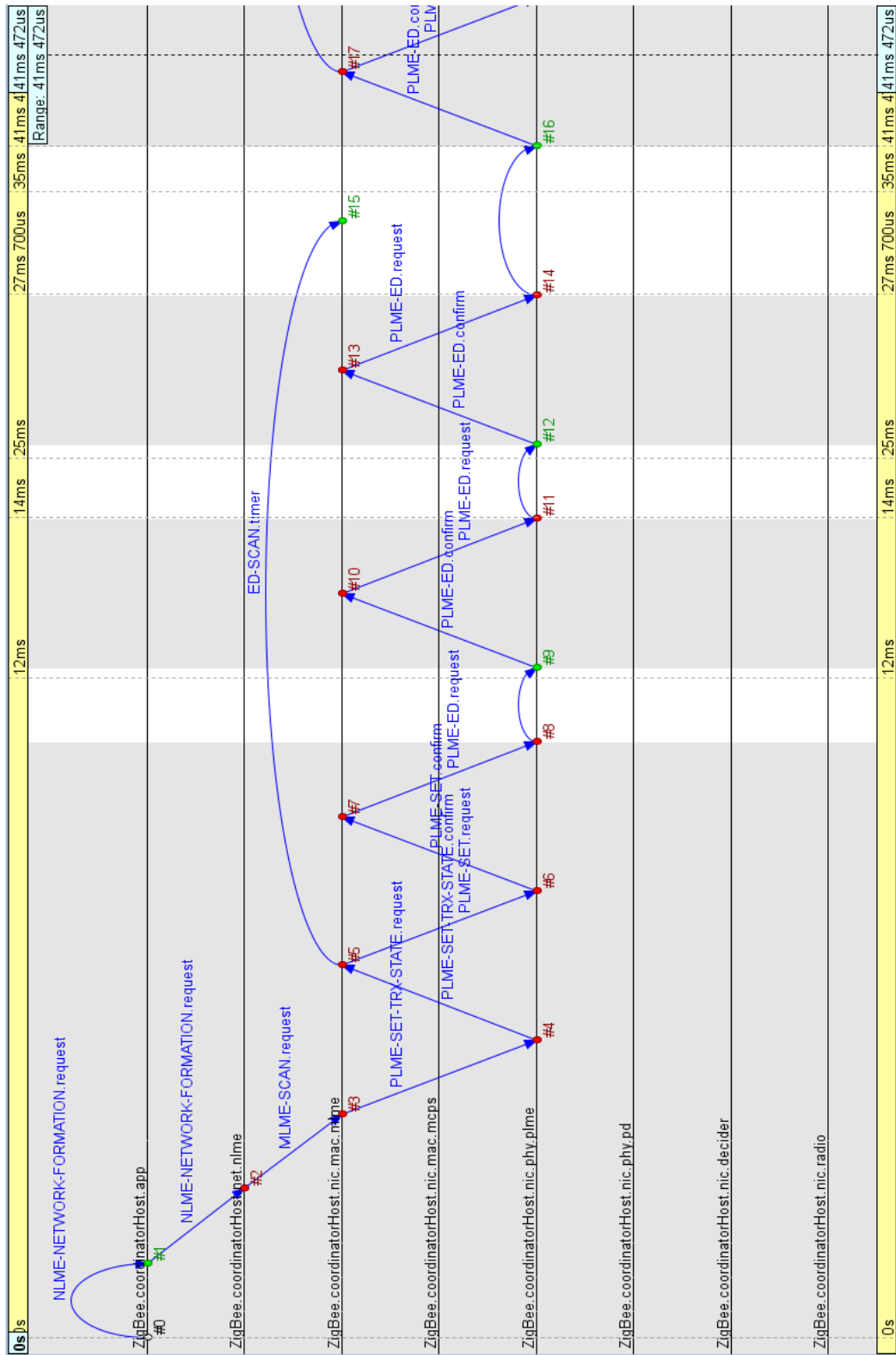


Obrázok 6.2: Sieť vo svojej funkčnej konfigurácii, koordinátor vysiela beacon rámce zariadeniam v dosahu

aj tzv. Event Log Viewer. Priebeh simulácie vrátane popisu zasielaných správ, stavov a ich väzba na simulačný čas sú zaznamenávané do súboru. Následne je možnosť tieto priebehy spracovať cez zásuvný modul v nástroji Eclipse, ktorý je dodávaný spolu so štvrtou hlavnou verziou simulátora. Takýmto spôsobom sú na nasledujúcich stranách tejto kapitoly vyobrazené a popísané niektoré zo základných implementovaných sekvenčii z nášho modelu.

Na prvom z uvedenej série 6.3 je sekvencia opisujúca úvodnú postupnosť správ pre vytvorenie siete PAN koordinátorom. Na sieťovej vrstve entitou NLME je prijatá správa NLME-NETWORK-FORMATION.request, ktorej obsah definuje konfiguračné parametre siete, ktorú chceme vytvoriť. Podľa akceptovanej množiny kanálov sú spustené procedúry pre preskenovanie kanálov a zistenie ich energetických hladín. Pre každý kanál to predstavuje vykonanie série testov, z ktorých MLME vrstva si vyberie ten pesimistický variant. Po vykonaní daných analýz sa spustí tzv. aktívny sken na požadovaných kanáloch. Ten je doprevádzaný vysielaním požiadavku pre zaslanie beacon rámca. Po spracovaní výsledkov sa zapíšu konfiguračné premenné do informačných báz NWK-PIB a MAC-PIB a začína sa s rozposiľaním beacon rámcov (obr. 6.4) (v prípade, že sa jedná o beaconing mód). Na príslušnom obrázku je vidieť, že simulátor pracuje aj rýchlosťou šírenia signálu. To je ošetrené modulom `ChannelControl`. V prípade zvolenia vhodného kandidáta ako rodiča pre začlenenie sa do siete sa môže vyslať požiadavka pre asociáciu do siete. Táto správa je poslaná v CAP perióde. Na príslušnom grafe 6.5 je možné pozorovať časovač CAP slot timer, ktorý určuje začiatok a koniec CAP slotov. Associate Request Command požiadavok je posiľaný (tak isto, ako iné riadiace správy) vždy na začiatku nového CAP slotu. Ďalej je daný obrázok zobrazuje posiľanie potvrdzujúceho rámca (žiadosť o asociáciu vyžaduje potvrdzovanie), ktorý je iniciovaný v MCPS vrstve cieľového zariadenia. Po uplynutí periódy o dĺžke *macResponseWaitTime* symbolov môžeme na sekvencii znázornenej na obr. 6.6 pozorovať transfer rámca typu Data Request Command z vrstvy MLME do vrstvy MCSP, ale aj keď už je obsiahnutý v tejto fronte, čaká sa na začiatok nového CAP slotu (časovač CAP slot timer), ktorým sa vyšle PLME vrstve príkaz na vykonanie CCA procedúry. V prípade, že tá detekuje kanál v stave *IDLE*, je Data Request Command príkaz poslaný cieľu. Prijatie takéhoto rámca je tiež potvrdené ACK rámcem. Odpoveďou potom bude vyslanie Associate Response Command príkazu (obr. 6.7).

Z dôvodu zjednodušenia modelu je možné v jeden okamih asociovať len jeden uzol. Každý ďalší požiadavok o asociáciu bude ignorovaný.



Obrázok 6.3: Inicializácia koordinátora, ED sken











# Kapitola 7

## Záver

V práci sme prezentovali simulačný model sietí ZigBee a IEEE 802.15.4b-2006 navrhnutý v populárnom simulačnom nástroji OMNeT++. Mimo štruktúrovania jednotlivých uzlov podľa funkcionality na FFD a RFD, model implementuje podstatnú časť správy PAN siete tak, ako je definovaná v špecifikácii. V porovnaní s našim predchádzajúcim modelom siete IEEE 802.15.4-2003 definuje flexibilnejšiu štruktúru, je naviazaný na Mobility Framework a zároveň predpripravený pre nasadenie v prichádzajúcom simulačnom frameworku MiXiM. Mimo schopnosti vyhľadať sieť a asociovať sa do nej, pracuje model s CSMA-CA mechanizmom, vie si vytvárať a udržiavať zoznamy susediacich prvkov a fungujúcich PAN sietí vo svojom okolí, vysielat' a spracovávať beacon rámce a má predpripravené základné konštrukcie pre nasadenie GTS mechanizmu.

Práca ponúkla silný základ pre implementáciu IPv6 protokolu s použitím adaptačnej vrstvy. IP over IEEE predstavuje veľmi užitočnú konfiguráciu, ktorá rozširuje možnosti komunikácie založenej na IP protokole v zmiešaných prostrediach. Z dôvodu, že technológia je pomerne nová (predstavená v r. 2007) a zatiaľ nie je masívnejšie nasadzovaná, sú akékoľvek charakteristiky jej správania sa získané simuláciami veľmi cenné.

V prípadnom pokračovaní a rozšírení tejto práce je priestor na dokončenie GTS mechanizmu, spracovanie osirotenia prvku, ktorý je úzko naviazaný na predstavené vlastnosti mobility nášho modelu a doplnenie vyšších vrstiev, hlavne sieťovej o smerovanie rámcov. Po implementácii týchto vlastností by bolo prospešné doplniť model o bezpečnostné procesy a pozorovať ich vplyv na prenosové a výkonové vlastnosti sietí ZigBee. Tiež sa ponúka využitie v simulátore MiXiM na testovanie vzájomného vplyvu IEEE 802.15.4 sietí so sieťami postavenými napríklad na nastupujúcom štandarde IEEE 802.11n.



# Literatúra

- [1] A. Foerster, A. L. Murphy. Balancing energy expenditure in WSNs through reinforcement learning: A study. 2008.
- [2] A. Köpke, M. Swigulski, K. Wessel, D. Willkomm. Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ — The MiXiM Vision. 2008.
- [3] C. de Waal. Bonnmotion: A mobility scenario generation and analysis tool, 2002.
- [4] C. E. Perkins, K. Wang. Optimized smooth handoffs in mobile IP. In *In Proceedings of ISCC*, pages 340–346, 1999.
- [5] H. Hellbrück, S. Fischer. Basic analysis and simulation of ad-hoc networks, 2001.
- [6] B. Halás. Návrh simulácie bezdrôtovej siete ZigBee 802.15.4 pomocou simulačného systému OMNeT++, 2003. In Slovak.
- [7] IEEE Computer Society. IEEE 802.15.4: Wireless medium access control and physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks, Oct 2003.
- [8] IEEE Computer Society. IEEE 802.15.4b: Wireless medium access control and physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks, Sep 2006.
- [9] IETF 6LoWPAN Taskgroup. IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals, 2007. RFC4919.
- [10] IETF 6LoWPAN Taskgroup. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, 2007. RFC 4944.
- [11] S. Mahlknecht, J. Glaser, T. Herndl. PAWiS: Towards a power aware system architecture for a SoC/SiP wireless sensor and actor node implementation, 2005.
- [12] W. Drytkiewicz, S. Sroka, V. Handziski, A. Köpke, H. Karl. Mobility Framework for OMNeT++, 2003.
- [13] ZigBee Alliance, Inc. Zigbee specification, Jan 2008.



# Dodatok A

## Zoznam použitých skratiek

**ACK** Acknowledgment

**APDU** Application level Protocol Data Unit

**APP** Application

**APS** Application Support Sublayer

**APSD** Application Support Sublayer Data Entity

**APSME** Application Support Sublayer Management Entity

**CSMA-CA** Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance

**DHCP** Dynamic Host Configuration Protocol

**ED** Energy Detection

**FCS** Frame Check Sequence

**FEC** Forward Error Correction

**FFD** Full Functionality Device

**GTS** Guaranteed Time Slot

**GUI** Graphical User Interface

**IDE** Integrated Development Environment

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**IETF** Internet Engineering Task Force

**IP** Internet Protocol

**ISM** Industrial Scientific and Medical

|                |   |
|----------------|---|
| <b>LLC</b>     | Logical Link Control                                  |
| <b>LR-WPAN</b> | Low-Rate Wireless Personal Area Network               |
| <b>MAC</b>     | Medium Access Control                                 |
| <b>MAC-PIB</b> | Medium Access Control layer Protocol Information Base |
| <b>MCPS</b>    | MAC Common Part Sublayer                              |
| <b>MF</b>      | Mobility Framework                                    |
| <b>MHz</b>     | Megahertz   |
| <b>MIMO</b>    | Multiple In, Multiple Out                             |
| <b>MLME</b>    | MAC Sublayer Management Entity                        |
| <b>MSB</b>     | Most Significant Bit                                  |
| <b>NET</b>     | Network   |
| <b>NLDE</b>    | Network Layer Data Entity                             |
| <b>NLME</b>    | Network Layer Management Entity                       |
| <b>NPDU</b>    | Network level Protocol Data Unit                      |
| <b>NWK</b>     | Network   |
| <b>NWK-PIB</b> | Network layer Protocol Information Base               |
| <b>OEM</b>     | Original Equipment Manufacturer                       |
| <b>OFDM</b>    | Orthogonal Frequency Division Multiplexing            |
| <b>PAN</b>     | Personal Area Network                                 |
| <b>PD</b>      | PHY Data  |
| <b>PDA</b>     | Personal Digital Assistant                            |
| <b>PDU</b>     | Protocol Data Unit                                    |
| <b>RFD</b>     | Reduced Functionality Device                          |
| <b>PHY</b>     | Physical  |
| <b>PLME</b>    | PHY Layer Management Entity                           |
| <b>RSSI</b>    | Received Signal Strength Indication                   |
| <b>SAP</b>     | Service Access Point                                  |

**SAT** Signal Attenuation Threshold

**SFD** Starting Frame Delimiter

**SINR** Signal to Interference plus Noise Ratio

**SNR** Signal to Noise Ratio

**SSCS** Sublayer-Specific Convergence Sublayer

**TCP** Transmission Control Protocol

**UWB** Ultra-Wideband

**Wi-Fi** Wireless Fidelity

**WPAN** Wireless Personal Area Network

**WSN** Wireless Sensor Network

**ZDO** ZigBee Device Object





## Dodatok B

### Obsah priloženého CD

```
|-- 802.15.4»      »      Kompletný model IEEE 802.15.4 + ZigBee
|  |-- simulations»  »      Uložené nastavenia k modelu
|  |  |-- ZigBee.ned»  »      Štruktúra modulu
|  |  |-- omnetpp.ini»  »      Konfiguračné premenné k simulácii
|  |-- src»          »      Zdrojové súbory k simulácii
|-- README.txt»      »      Súbor s pokynmi ku kompilácii
|-- text»            »
|  |-- thesis.pdf»    »      Skompilovaný text DP
|-- text_src»        »      Zdrojové súbory vo formáte LaTeX k DP
|  |-- figures»       »      Obrázky obsiahnuté v DP
|-- tree.txt»        »      Obsah tohoto suboru

6 directories, 172 files
```

Obrázok B.1: Obsah priloženého CD