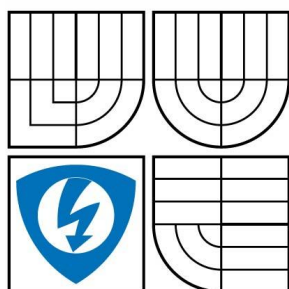


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS**

## **MODERNÍ BEZDRÁTOVÁ TECHNOLOGIE - ZIGBEE**

MODERN WIRELESS TECHNOLOGY - ZIGBEE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Tomáš Krajíček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Michal Skořepa**

BRNO 2009

VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Obor telekomunikací

**Student:** Tomáš Krajíček  
**Ročník:** 3

930  
009

**NÁZEV TÉMATU:**

**Moderní bezdrátové technologie**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte problematiku bezdrátové technologie ZigBee dle standardu IEEE 802.15.4. Provedte porovnání této technologie s ostatními konkurenčními technologiemi a uveďte možnosti jejího využití a oblasti jejího uplatnění. Dále se seznamte se simulačním prostředím OPNET Modeler. V tomto prostředí vytvořte simulační model pole senzorů, které bude obsahovat několik desítek senzorů na dané ploše. Simulujte přenos informace od senzoru k základnové stanici přes celé sensorové pole. Zjistěte závislost zpoždění přenosu informace, spolehlivosti přenosu a energetické náročnosti na hustotě pokrytí dané oblasti senzory.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Misić, Jelena; Misić, Vojislav. Wireless Personal Area Networks: Performance, Interconnection, and Security with IEEE 802.15.4, Wiley, 2008, 336 s., ISBN: 978-0470518472.

[2] Gislason, Drew. Zigbee Wireless Networking, Newnes, 2008, 288 s., ISBN: 978-0750685979.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 2.6.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Skořepa

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

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o moderní bezdrátové technologii – ZigBee.

Snaží se objasnit problematiku bezdrátové technologie dle standardu IEEE 802.15.4.

Popisuje srovnání s ostatními bezdrátovými technologiemi, uvádí možnosti jejího využití a oblasti uplatnění. Dále jde o vytvoření simulačního modelu pole senzorů v simulačním prostředí OPNET Modeler. Cílem celé práce je zjistit zpoždění přenosu informace, spolehlivost přenosu a energetickou náročnost celé oblasti senzorů.

### **Klíčová slova**

ZigBee, IEEE 802.15.4, OPNET Modeler, bezdrátová komunikace, zpoždění přenosu, spolehlivosti přenosu

## Abstract

This bachelor work tells about wireless security of house – ZigBee. It is introducing problems of wireless technology based on standard IEEE 802.15.4, comparing to another wireless technologies and presenting potentialities of it's use and areas of it's exercise.

The work is related to creation of simulated model in OPNET Modeler environment, which simulates a field of sensors. The purpose of the whole effort is to state time-delay of information transfer, specify reliability of the transfer and lay down energy intensity of the process runned over the area of sensors.

### **The key words:**

ZigBee, IEEE 802.15.4, OPNET Modeler, wireless communication, transmission delay, transmission reliability

### **Bibliografická citace**

KRAJICEK, T. *Moderní bezdrátová technologie – ZigBee: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 51 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Michal Skořepa.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Moderní bezdrátová technologie - ZigBee“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 1. června 2009

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Skořepovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu. Stejně tak bych chtěl poděkovat své rodině a snoubence za podporu v průběhu celého studia.

V Brně dne 1. června 2009

.....  
podpis autora

<b>Obsah</b>	<b>str.</b>
1 Úvod.....	7
2 Obecný popis technologie ZigBee.....	8
2.1 Vznik ZigBee.....	8
2.2 Výhody ZigBee.....	8
3 Součásti IEEE 802.15.4 WPAN .....	12
3.1 Topologie sítě .....	13
3.1.1 Topologie hvězda .....	13
3.1.2 Topologie strom .....	14
3.1.3 Topologie polygon.....	16
4 Architektura.....	17
4.1 Standard IEEE 802.15.4 WPAN.....	18
4.1.1 Fyzická vrstva standardu IEEE 802.15.4.....	18
4.1.2 MAC vrstva standardu IEEE 802.15.4 .....	19
5 Zabezpečení.....	25
5.1 AES-based Encryption .....	25
5.2 Message Timeout .....	25
5.3 Access Control Lists .....	25
6 Úvod do prostředí OPNET Modeler.....	26
6.1 Vytvoření senzorové sítě ZigBee v OPNETu.....	27
7 Výsledky simulací OPNETu .....	34
7.1 Scénář: Velikost zpoždění .....	37
7.2 Scénář: Spolehlivost přenosu.....	39
7.3 Scénář: Energetická náročnost.....	43
8 Závěr .....	48
9 Seznam použitých zdrojů .....	49
10 Seznam použitých zkratek.....	51

# 1. ÚVOD

Oblast bezdrátových technologií je velice zajímavé téma; konkrétně ZigBee je pro mne z celé této široké oblasti snad nejzajímavější. Je to nová moderní bezdrátová technologie, která se teprve snaží na prosadit trh. Jedná se o technologii určenou ke komunikaci a k přenosu informací na krátké vzdálenosti, spadající do třídy bezdrátových osobních sítí (WPAN - Wireless Personal Area Network). Bezdrátové technologie získávají v dnešní době na popularitě; s tím je pak spojena i poptávka po širokém spektru jejich využití.

ZigBee zastupuje standard s nízkou spotřebou energie a dlouhou životností, ovšem na úkor nižších přenosových rychlostí.

Bakalářská práce má dvě základní části. V první části této práce bude přiblížena problematika bezdrátové technologie ZigBee dle standardu IEEE 802.15.4, její porovnání s ostatními konkurenčními technologiemi a možnosti jejího využití a oblasti jejího uplatnění. Dále pak bude uveden základní teoretický popis technologie, popsán průvodce architekturou a vlastnosti s tím spojené.

Druhá část je zaměřena na modelování sensorového pole ZigBee v nástroji OPNET Modeler. V úvodu této praktické části se nalézá popis možností modelování bezdrátových ZigBee sítí. Popis zahrnuje výčet všech parametrů, které lze aplikovat na koordinátor sítě; také je zde popsán kompletní návod pro vytváření simulované sítě. V poslední části jsou pak rozebrány možné způsoby řešení problematiky zpoždění, spolehlivosti a energetické náročnosti sensorové sítě.

## 2. OBECNÝ POPIS TECHNOLOGIE ZIGBEE

### 2.1 Vznik ZigBee

Bezdrátová technologie ZigBee, označovaná též jako IEEE 802.15.4, je standardní bezdrátový protokol pro oblast osobních sítí (PAN - personal area networking), přesněji WPAN. Od roku 1999 byl vyvíjen nový globálně otevřený standard, který by zastřešoval spolehlivou, bezpečnou, levnou a hlavně nízko-spotřební bezdrátovou technologii, kterou by bylo možno použít k monitorování, kontrole a komunikaci mezi zařízeními.

V roce 2002 vznikla společnost ZigBee Alliance, která stála v čele vzniku tohoto nového protokolu a angažuje se v jeho spravování a dalším vývoji.

Mezi další hlavní aktéry vzniku nové bezdrátové technologie patří například nadnárodní firmy jako Freescale Semiconductor, Honeywell, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips, Samsung a další, přičemž v dnešní době má ZigBee Alliance přes 225 partnerských společností [2] [4].

### 2.2 Výhody ZigBee

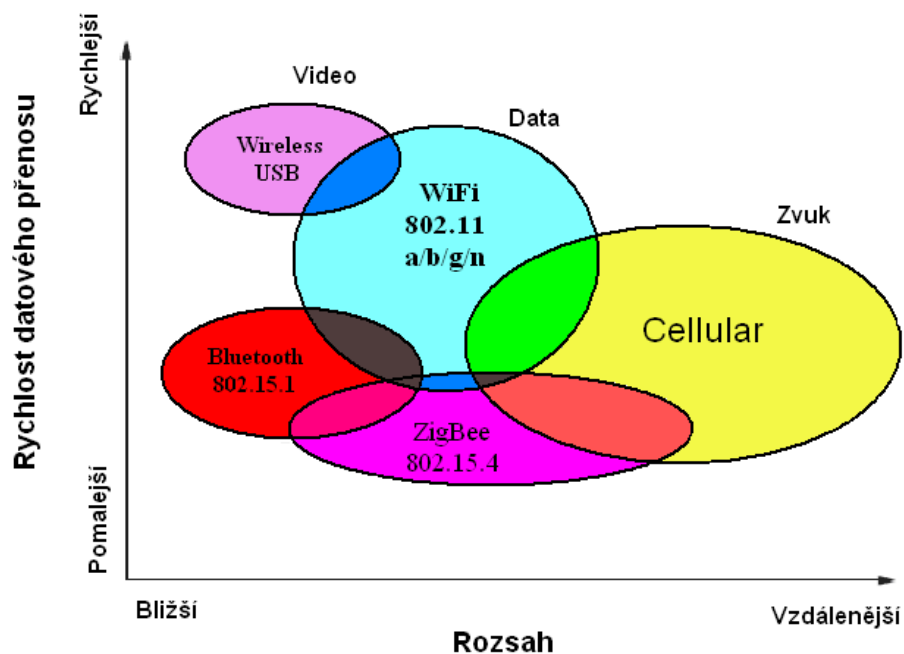
ZigBee bylo navrženo a vzniklo z toho důvodu, že bylo potřeba vytvořit zařízení, které by vyplnilo mezeru v dosavadní oblasti nasazení bezdrátových sítí.

ZigBee má tyto výhody:

- a) nízká pořizovací cena
- b) vysoká spolehlivost
- c) jednoduchá implementace
- d) nízký příkon při obousměrné komunikaci
- e) vysoké zabezpečení
- f) otevřený celosvětový standard

Níže uvedený obrázek 2.1 [2] ilustruje, jak ZigBee doplňuje bezdrátové technologie jako je Bluetooth, WiFi a síť Cellular, které se používají například pro přenos zvuku či dat.

Jde o porovnání různých standardů v závislosti rychlosti přenášených dat na vzdálenosti jejich použití.



Obr. 2.1 : Bezdrátové technologie

Dále budou porovnány výše zmíněné technologie podrobněji; konkrétně jejich výhody a nevýhody.

Nejpodobnější technologií a zároveň největším konkurentem ZigBee je Bluetooth. V porovnání s touto technologií, která je primárně zaměřena na přenos hlasu, obrazu a souborů v sítích ad-hoc, se ZigBee zaměřuje na přenos a sběr užitkových dat, což je zřetelně vidět v následující tabulce 2.1.[5]. Hlavní rozdíly lze vidět například v přenosových rychlostech, dosahu a v počtu zařízení v jedné síti [2].

Tab.2.1 : Vlastnosti bezdrátových technologií

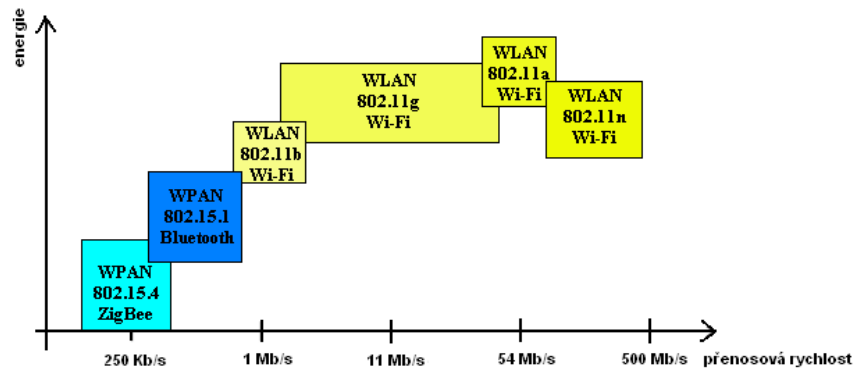
Označení	GSM/GPRS	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Standard	1xRTT/CDMA	802.11b	802.15.1	802.15.4
Zaměřeno na	Široké blasti Hlas a Data	Web, Email, Video	Náhrada za kabel	Monitorování a řízení
Velikost firmwaru	16MB a více	1MB+	250KB+	25KB – 50 KB
Doba životnosti baterie (dny)	1 – 7	0,5 – 5	1 – 7	100 – 1000+
Velikost sítě (počet zařízení)	1	32	7	65000 (příp. až $2^{64}$ )
Přenosová rychlost (Kb/s)	64 – 128	11000+	720	20 – 250
Dosah zařízení (m)	1000 i více	1 – 100	1 – 10+	1 – 100+
Vyhledání nového zařízení	-	-	do 3 s	Typicky 30 ms
Výhody	Dosažitelnost, Kvalita	Rychlost, Flexibilita	Cena, Vhodnost	Spolehlivost, Cena

Největší rozdíly mezi ZigBee a ostatními technologiemi najdeme v oblasti spotřeby energie. Spotřeba energie u Bluetooth je dána tím, že hlavní stanice si musí pořád udržovat synchronizaci a proto ji nelze uvést do režimu spánku.

WiFi předpokládá stálé datové spojení mezi koncovými účastníky a vysoké přenosové rychlosti. Z toho vyplývá, že spotřeba energie je nejvyšší, z čehož vyplývá, že životnost baterií je oproti ostatním nejmenší.

Oproti tomu ZigBee komunikuje s prvky sítě, které se používají méně (tj. buď nemají data na předání, nebo se jedná o data menších objemů) pomocí kratších paketů s delší periodou, tudíž spotřeba energie a zatížení baterie je minimální, což souvisí se závislostí přenosové rychlosti na energii (Obr.2.2) [10].

Čím větší přenosové rychlosti po zařízení požadujeme, tím se zvyšuje množství energie, které je k přenosu dat potřebné. Z následujícího grafu je možné vyčíst, že ZigBee si díky nejnižší spotřebě energie vystačí s pouhou baterií až po dobu 3 let a nemusí při tom využívat napájení ze sítě, jako je tomu kupříkladu u bezdrátové technologie WiFi [2].



Obr. 2.2. Srovnání závislostí energií na přenosových rychlostech

Ze všech výše uvedených vlastností pak pro ZigBee plyne možnost jeho využití. Tento standard je určen především k řízení budov, dálkovému ovládní, monitorování a diagnostice zařízení, vzdálenému čtení měřených hodnot, dále kupříkladu k ovládní počítačových periférií nebo spotřební elektroniky.

Ideálním příkladem může být například dům, který je vybavený bezdrátovými zařízeními, které jsou ovládný pomocí jediného ovladače, což v praxi funguje tak, že odjede-li rodina na týden na dovolenou, stiskem příslušného tlačítka se všechna zařízení nastaví do vzorového nastavení, například klimatizace je ztlumena a pouze udržuje příslušnou teplotu apod. [2].

### Kategorie použití:

#### a) Automatizace budov

- regulace osvětlení
- HVAC kontrola
- bezpečnost
- regulace vytápění
- monitorování : teplota, vlhkost, tlak
- zavlažování trávníků a zahrad

b) Průmysl

- kontrola výroby
- průběh výroby
- energetická správa

c) Zdravotnictví

- monitorování pacientů
- monitorování tělesné zdatnosti

d) Spotřebiče

- dálkové ovládání TV,VCR,DVD,PC

### 3. SOUČÁSTI IEEE 802.15.4 WPAN

V síti IEEE 802.15.4 existují dva typy základních zařízení: plně funkční zařízení (FFD – full-function device) a zařízení se sníženou funkčností (RFD – reduced-function device). FFD může komunikovat s RFD nebo jinými FFD, zatímco RFD může komunikovat pouze s FFD. Zařízení FFD může fungovat v třech modelech obsluhujících osobní bezdrátovou síť: PAN koordinátor (ZigBee Co-ordinator), router (ZigBee Router) nebo koncové zařízení (ZigBee End Device) [6].

#### **ZigBee Co-ordinator (ZC)**

ZigBee musí mít nejméně jeden uzel a ten vytváří ZigBee Co-ordinator. Tento uzel zajišťuje kompletní protokolový rámec a veškeré služby, které ZigBee stanovuje. Toto zařízení může fungovat v několika režimech a to jako koordinátor, směrovač nebo koncové zařízení.

V kapitole 3.1 o topologii je pak hlouběji zpracována problematika posílání zpráv z jednoho uzlu do druhého.

#### **ZigBee Směrovač (ZigBee Router - ZR)**

Hlavní úlohou Routeru je přeposílání zpráv z jednoho uzlu do dalšího. Dále umožňuje připojení vzdálených koncových zařízení, které jsou mimo dosah koordinátoru.

## Koncová zařízení ZigBee (ZigBee End Device - ZED)

Koncová zařízení bývají napájené baterií a když nevysílají, mohou přejít do spánkového režimu. Jejich úkolem je odesílání zpráv z čidel [6].

### 3.1 Topologie sítě

IEEE 802.15.4 LR-WPAN může na základě aplikačních požadavků může fungovat ve dvou topologických zapojení: topologie hvězda nebo peer-to-peer.

V topologii hvězda je komunikace vybudována mezi zařízeními a jedním hlavním ovladačem, který se obecně nazývá PAN koordinátor.

Zařízení má obvykle určité přidružené vlastnosti a slouží buď jako zahajovací nebo zakončovací bod síťové komunikace. PAN koordinátor může také mít své specifické použití, avšak většinou bývá použito k zahajování, ukončování nebo směřování komunikace okolo své sítě.

PAN koordinátor je hlavní kontrolní zařízení PAN. Všechna zařízení pracující v síti získají přidělenou adresu PAN. Tato adresa je buď dlouhá (64 bitový binární kód) nebo zkrácená (16 bitový binární kód). Zařízení lze spolehlivě rozpoznat i v případě zkrácené adresy. Nezbytnou náležitostí k adresaci zařízení v síti je také MAC adresa zdroje a cíle. Tyto adresy jsou nezbytné k tomu, aby zařízení mohla komunikovat mezi sebou uvnitř sítě PAN (Obr.3.1).

<b>PAH ID zdroje</b> 0/2 byte	<b>Adresa zdroje</b> 0/2/8 byte	<b>Adresa cíle</b> 0/2/8 byte	<b>PAH ID cíle</b> 0/2 byte
<b>Adresové pole</b>			

Obr.3.1: Adresové pole MAC rámce

#### 3.1.1 Topologie hvězda

Toto zapojení je sice nejjednodušší, ale nejvíce omezené.

V této topologii je vždy definováno jedno zařízení, které přebírá funkci koordinátora (ZC) a ostatní zařízení se chovají jako koncová (ZR a ZED). Použití ZigBee Routeru je v tomto případě zbytečné, protože by ani zdaleka nevyužil všech svých vlastností. Každé koncové zařízení komunikuje pouze s koordinátorem (viz Obr. 3.2.) [7].

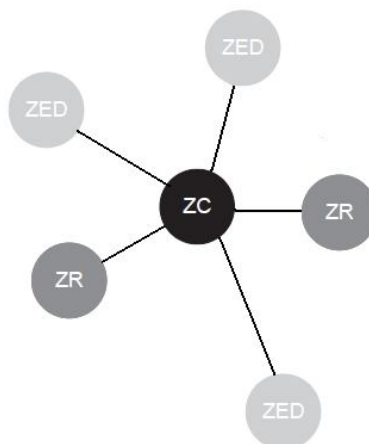
Posílá-li koncové zařízení zprávu druhému koncovému zařízení, musí to být právě přes koordinátor.

Teoreticky může být v tomto uspořádání zapojeno více jak 65 tisíc ZED zařízení. Koncová zařízení mohou být napájena z baterií, zatímco koordinátor by měl být napájen ze sítě vzhledem k jeho větším nárokům na zátěž.

Poté, co je ZC aktivován, se snaží stát PAN koordinátorem. Pokud se jím stane, sestaví svou vlastní síť. Po sestavení sítě vybere PAN identifikátor, což je 16ti bitové jednoznačné číslo určující tuto novou síť a není používáno v žádné jiné síti, která je v rádiovém dosahu.

To zajišťuje, že se překrývající sítě nebudou ovlivňovat.

Zapojení hvězda se nejčastěji využívá k automatizaci menších budov, pro propojování počítačových periférií a osobní zdravotní péči.



Obr. 3.2. Zapojení v topologii hvězda

### 3.1.2 Topologie strom

Topologie strom je speciální případ spojení peer-to-peer, kdy většina zařízení plní funkci směrovače.

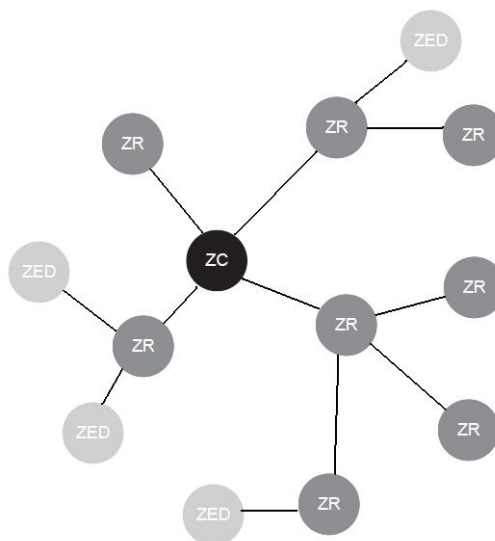
Také v topologii strom existuje pouze jeden funkční PAN koordinátor, ovšem na rozdíl od topologie hvězda nemusí být tento koordinátor spojen se všemi ostatními zařízeními v dané topologii. Spojení mezi zařízeními, které PAN koordinátor nemá v dosahu, zajišťují FFD, které v topologii strom fungují jako routery (viz Obr 3.3). Tato topologie poskytuje možnost realizování složitějších síťových útvarů. Samozřejmě zde existuje způsob, kterým je možné omezit tvoření sítě do určité vzdálenosti.

PAN koordinátor určuje kanál pro komunikaci. Větví se na další zařízení, z nichž většina plní funkci směrovače a umožňuje síťové spojení s dalšími zařízeními. Každý z těchto směrovačů může působit jako koordinátor a synchronizovat ostatní zařízení, které jsou na něj napojeny; avšak pouze jeden ZR je hlavní, který má větší možnosti a prostředky než ty ostatní.

PAN koordinátor vytváří první skupinu tím, že vybere volný PAN identifikátor a vyšle synchronizační rámce sousedním zařízením. Ta signál zachytí a vyšlou žádost o zařazení do hlavní sítě. Pokud jim koordinátor udělí oprávnění, přidají se do hlavní sítě a jejich ID přidá PAN koordinátor do seznamu podřízených zařízení. Nově připojené zařízení pak začnou automaticky vysílat synchronizační rámec (beacon) a hledat další zařízení, která by se eventuálně mohla k síti připojit také. První PAN koordinátor pak může nově připojenému zařízení nařídit, aby se stalo PAN koordinátorem nové větve sousedící s tou první.

Tato topologie je výhodnější než topologie hvězda, a to z toho důvodu, že umožňuje propojení zařízení ve větším rozsahu než má PAN koordinátor díky předávání dat mezi směrovači a přidáváním dalších sousedních uzlů do sítě, avšak velkou nevýhodou je, že ve více rozvětvených sítích dochází ke zpoždění zpráv.

V případě, že v nově vznikající síti existuje více adeptů na funkci PAN koordinátora, technologii ZigBee je pro tento případ stanoven speciální mechanismus, který jednoznačně určí ZC.

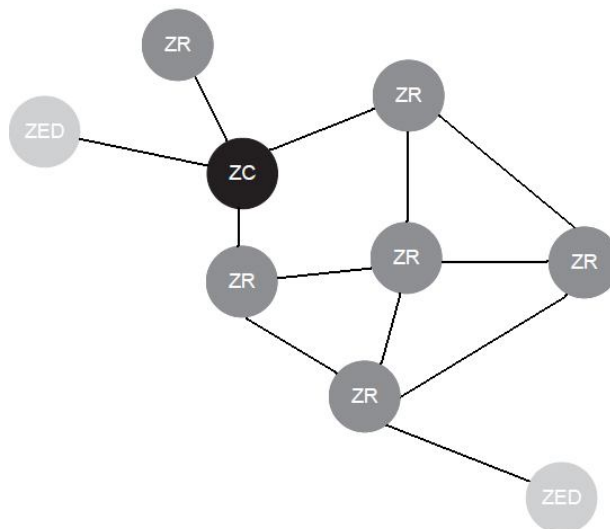


Obr. 3.3: Zapojení v topologii strom

### 3.1.3 Topologie polygon

Poslední, třetí topologií je topologie polygon. Jedná se o hybridní topologii mezi topologií strom a hvězda. Koordinátor komunikuje s koncovými zařízeními vícecestně. Pokud je koncové zařízení přímo v dosahu koordinátora sítě, komunikuje přímo s ním a pokud je navíc i v dosahu směrovače, komunikuje i skrze něj (Obr. 3.4.). Dovolí při předávání zprávy několikanásobné skoky mezi směrovači z jednoho zařízení na jiné. Kombinuje tedy dva předchozí popsané způsoby propojení. Při přenosu přenášíme redundantní data, která jsou již přenášena jinou cestou. Na druhou stranu touto metodou zvýšíme spolehlivost celé sítě, protože dojde-li k výpadku jednoho z uzlů, ZigBee samostatně vyhledá novou přenosovou cestu.

Toto uskupení se používá v aplikacích jako je průmyslové řízení, monitoring, senzorové bezdrátové sítě a sledování přístrojů.



Obr. 3.4. Zapojení v topologii polygon

## 4. ARCHITEKTURA

Standard ZigBee pracuje na podobné bázi jako sedmivrstvý model ISO/OSI, avšak využívá pouze vrstvy, které jsou důležité pro funkčnost v dané oblasti (Obr.4.1.) [6]. Mezi dvě nejnižší vrstvy, které ZigBee používá, řadíme fyzickou vrstvu PHY a podvrstvu MAC.

Nad těmito vrstvami se nachází vrstva síťová NWK a aplikační APL, která se skládá ze tří složek:

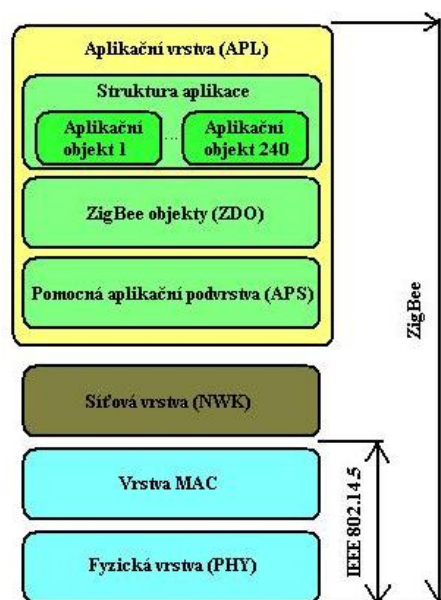
- pomocná aplikační podvrstva APS
- objekty ZigBee ZDO
- aplikační objekty definované výrobcí

Pomocná aplikační podvrstva se stará o vazební tabulky, díky kterým je možné propojit dvě zařízení podle jejich potřeb; zajišťuje také posílání zpráv mezi propojenými zařízeními.

Objektem ZigBee je stanovována role zařízení v síti a zřizováno bezpečné spojení mezi nimi. ZDO také pátrá po zařízeních v síti a po jimi poskytovaných službách.

Síťová vrstva zabezpečuje rámce, směruje je k cílovým uzlům a také zjišťuje informace o nejbližších (sousedních) uzlech. Konkrétně ZigBee koordinátor má speciální síťovou vrstvu, která se vyskytuje jen u plně funkčních zařízení a která uděluje novým zařízením adresy.

Synchronizaci a zabezpečení radiového kanálu zajišťuje MAC vrstva, která také verifikuje platnost rámce a jeho příjem, přičemž také řídí vyhledávání a rozpoznávání adres [6].



Obr. 4.1. Referenční model standardu ZigBee

## 4.1 Standard IEEE 802.15.4

Standard 802.15.4 definuje fyzickou (PHY) a linkovou (MAC) podvrstvou určenou pro pomalý bezdrátový datový přenos (LR-WPAN - low-data-rate) s pevným, přenosným nebo pohybujícím se zařízením.

Některé z charakteristické rysy LR-WPAN :

- Přenosové rychlosti vzduchem 250kb/s, 100kb/s, 40kb/s a 20kb/s
- Zapojení hvězda nebo peer-to-peer
- Přidělování krátké 16ti-bitové nebo rozšířené 64ti-bitové adresy
- Volitelná možnost přidělování garantovaných časových slotů (GTS)
- Protokol, který podporuje plné potvrzování pro přenosovou spolehlivost
- Nízká energetická spotřeba
- Detekce energie
- Mechanismus pro vyhledávání sítí
- Mechanismus pro tvarování a připojování sítí
- Mechanismus pro detekování poruch a „šumu“ na jednotlivých kanálech
- Mechanismus pro změnu kanálů

### 4.1.1 Fyzická vrstva standardu IEEE 802.15.4

Standard definuje několik základních rádiových pásem. Z důvodu rozdílných definicí rádiových pásem v Evropě a Americe byly definovány tři základní frekvenční pásma: celosvětová, Evropa a Amerika. Srovnání jednotlivých území se nachází v tabulce 4.1 [5].

ZigBee pracující v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz je signál modulován metodou ofsetové kvadrurní fázové klíčování (O-QPSK - Offset Quadrature Phase-Shift Keying); která zajišťuje oproti klasické QPSK snížení parazitní modulace.

V americké a evropské verzi je na kmitočtech 868 a 915 MHz použita modulace dvoustavového fázového klíčování (BPSK – Binary Phase-Shift Keying)

Tab. 4.1. Srovnání používaných frekvenčních pásem v různých oblastech světa

Frekvenční pásmo	BAND	Území	Přenosová rychlost	Kanály	Číslo kanálu
2,4 GHz	ISM	Celosvětově	250kb/s	16	11 - 26
868MHz	_	Evropa	20kb/s	1	0
915MHz	ISM	Amerika	40kb/s	10	1 - 10

**Fyzická vrstva je zodpovědná za následující úlohy:**

- zapínání a vypínání rádiového vysílače/přijímače
- řízení spotřeby na základě aktuálního kanálu
- síťový indikátor kvality (LQI - Link Quality Indicator) pro přijaté pakety
- určování volných kanálů (CCA - Clear Channel Assessment) pro provoz metody s vícenásobným přístupem a nasloucháním nosné (CSMA-CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
- výběr frekvence kanálu
- příjem a vysílání dat

**4.1.2 MAC vrstva standardu IEEE 802.15.4**

Vrstva MAC ovládá všechny přístupy k fyzickým rádiovým kanálům a je zodpovědná za následující úlohy:

- pokud se jedná o zařízení koordinátor, generuje síťovou synchronizaci
- synchronizuje síť pomocí synchronizačních (beacon) rámců
- podporuje bezpečnost zařízení
- zajišťuje a udržuje GTS mechanismus

**Podvrstva MAC**

Tato podvrstva řídí správu rámců Beacon, přístup ke kanálům, správu garantovaných časových intervalů (GTS – Guaranteed Time Slots), ověřování platnosti rámců, potvrzování doručených rámců, spojování a rozpojování uzlů.

MAC protokol podporuje dva provozní režimy, které určuje PAN koordinátor.

**Beacon-enabled mode** (v synchronizačním režimu): signální rámeček (beacon frame) je periodicky generován PAN koordinátorem, aby identifikoval své PAN, synchronizoval zařízení ve své skupině a charakterizoval strukturu superrámce (superframe) Obr. 4.2 [11].

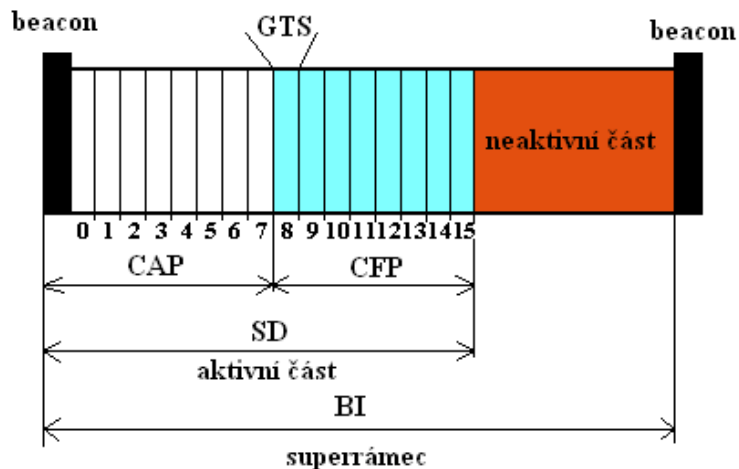
**Non Beacon-enabled mode** (v nesignalizačním režimu): zařízení může jednoduše posílat své data prostřednictvím CSMA-CA mechanismu. V tomto režimu se nepoužívá žádná superrámcová struktura. Výhodou tohoto režimu je rozšiřitelnost a samo-organizace. Nicméně tento nesignalizační režim nemůže poskytnout žádnou časovou garanci doručení datových rámečků.

Když si PAN koordinátor vybere Beacon-enabled mode, docílí tím použití superrámce, který pak ovládá komunikaci mezi zařízeními, které patří do PAN.

Formát superrámce je stanovený PAN koordinátorem a odpovídá signalizačnímu intervalu (BI – Beacon Interval), který je definovaný časem mezi následnými signály. BI obsahuje aktivní periodu, která může být volitelně následována neaktivní periodou. Aktivní perioda koresponduje s délkou superrámce (SD – Superframe Duration) a je rozdělena na 16 stejných slotů, přes které je povoleno posílat data. V neaktivní části může zařízení přejít do režimu spánku (low-power mode).

Každá aktivní perioda může být dále rozdělena do „doby soupeření o přístup“ (CAP – Contention Access Period), kdy probíhá komunikace na základě CSMA-CA, nebo volitelně do „doby volného přístupu“ (CFP - Contention Free Period). CFP je aktivováno poté, co o jeho aktivaci požádá koncové zařízení PAN koordinátor. Po přijetí této žádosti zkontroluje PAN koordinátor, zda zde jsou dostatečné prostředky (zdroje) a pokud ano, přidělí žádosti časový slot.

Této skupině žádostí o časové sloty se říká „garantované časové sloty“ (GTS - Guaranteed Time Slot) a jsou vyhrazeny výhradně (exkluzivně) danému zařízení, které o to požádalo. CFP podporuje až 7 GTS a každé GTS může obsahovat vícenásobné časové sloty. Přiřazení GTS však nemůže omezit délku CAP na menší, než je hodnota specifikovaná minimální CAP konstantou [11].



Obr.4.2: Struktura superrámce

### Modely datového přenosu

Existují tři typy datových přenosů. Prvním z nich je datový přenos z koncového zařízení, které vysílá data do koordinátoru. Druhý typ přenosu probíhá z koordinátoru do zařízení, které data přijímá. Poslední třetí typ přenosu je datový přenos mezi dvěma rovnocennými uzly.

V topologii hvězda existují pouze první dva typy přenosů; to proto, že data mohou být vyměňována jenom mezi koordinátorem a koncovým zařízením. V topologii s rovnocennými uzly (peer-to-peer) mohou data přecházet mezi dvěma jakýmikoliv uzly v síti – mohou zde být použity všechny tři modely.

Mechanismus přenosového typu ve skutečnosti závisí na tom, jestli síť podporuje synchronizační přenos (beacons transmission).

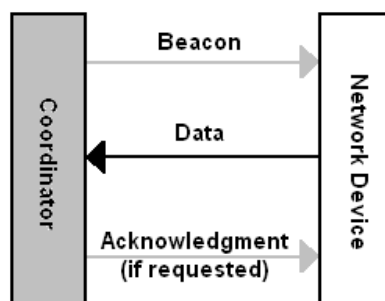
Synchronizační režim (beacon-enabled) PAN je používán v sítích, které požadují synchronizaci nebo podporu pro nízké zpoždění zařízení, jako jsou PC periferie.

Pokud síť nepotřebuje synchronizaci nebo podporu nízkých zpoždění zařízení, může být zvolen přenos bez synchronizace. V každém případě je však synchronizace potřebná pro objevování sítě.

Strukturu jednotlivých rámců používaných pro přenos uvedu v kapitole 4.1.2.2.

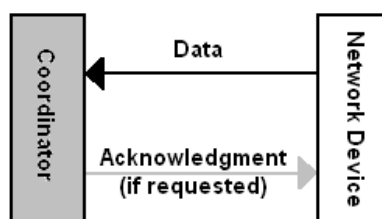
### Přenos dat do koordinátoru

Pokud zařízení potřebuje přenášet data do koordinátoru v synchronizačním režimu (beacon-enabled), čeká, než zachytí beacon od koordinátoru. Až přijme tento signál, zařízení se zesynchronizuje se strukturou superrámce. Ve vhodný čas, použitím slotu CSMA-CA, vyšle zařízení datový rámec. Koordinátor nakonec potvrdí úspěšné přijetí dat vysláním potvrzovacího (acknowledgment) rámce. Tato situace je zobrazena na Obr. 4.3 [8].



Obr. 4.3: Model přenosu dat koordinátoru v režimu beacon-enabled

Pokud však chce koncové zařízení posílat data v nesynchronizační režimu (nonbeacon-enabled), jednoduše vyšle datový rámec použitím unslotted CSMA-CA koordinátoru. Koordinátor potvrdí úspěšné přijetí dat vysláním volitelného potvrzovacího rámce a tím je transakce dokončena. Obrázek 4.4. [8] zachycuje tuto situaci.

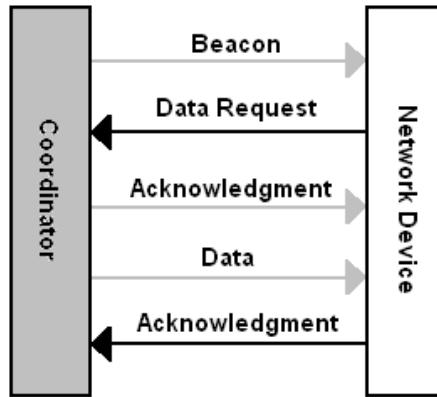


Obr. 4.4: Model přenosu dat koordinátoru v režimu nonbeacon-enabled

#### *Přenos dat z koordinátoru*

Pokud koordinátor přenáší data do zařízení v synchronizačním režimu, signalizuje v síťových synchronizačních rámcích, že má k dispozici nevyřízená data. Zařízení pravidelně naslouchají síťovým signálům a pokud uslyší zprávu o nevyřízených datech, vyšlou MAC příkaz vyžadující data použitím slotu CSMA-CA. Koordinátor odpoví potvrzovacím rámcem, že úspěšně přijal žádost o vyslání dat. Nevyřízený datový rámec je poslán použitím slotovaného CSMA-CA nebo, pokud je to možné, okamžitě po potvrzovacím rámci (jak je vidět na obrázku 4.5.).

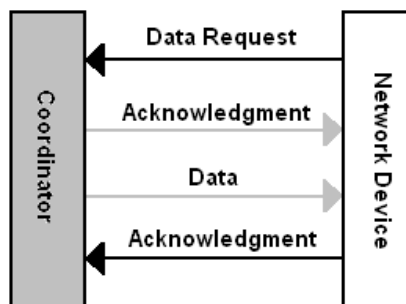
Pokud byla úspěšně přijata data, odpovídá zařízení vysláním volitelného potvrzovacího rámce. Transakce je nyní u konce. Po úspěšném dokončení přenosu dat je zpráva odstraněna ze seznamu k vyřízení v beaconu.



Obr. 4.5: Model přenosu dat z koordinátoru v synchronizačním režimu

Pokud si koordinátor přeje přenášet data v nonbeacon-enabled režimu, ukládá data pro náležité zařízení a čeká, až ho zařízení o tyto data požádá. Zařízení ho obvykle kontaktuje vysláním MAC příkazu vyžadujícím data a dále použitím neslotovaného CSMA-CA. Koordinátor potvrdí úspěšné přijetí žádosti o data vysláním potvrzovacího rámce.

Pokud má koordinátor pro zařízení nevyřízená data, označí tuto skutečnost buď v potvrzovacím rámci, který následuje za datovou žádostí, nebo v datovém rámci s nulovou délkou užitečných dat (payload). Pokud je požadavek vyřízen, pošle koncové zařízení potvrzení o úspěšném přijetí dat a přenos je u konce (Obr. 4.6) [8].



Obr. 4.6: Model přenosu dat z koordinátoru v nesynchronizačním režimu

## Typy rámců

Pro vlastní komunikaci jsou definovány čtyři typy rámců, které jsou buď řídicí nebo datové:

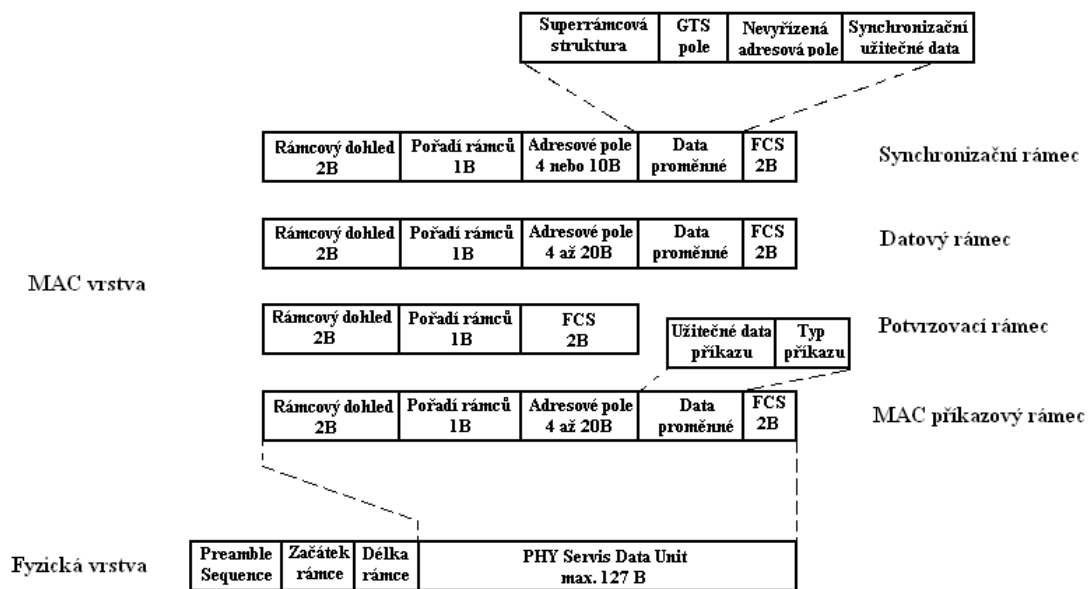
**Beacon Frame** - slouží pro synchronizaci, v beacon-enabled sítích se používá k probuzení uživatelských zařízení. Vysílání superrámce se může opakovat v intervalech 15 ms až 252 s.

**Data Frame** - slouží pro všechny datové přenosy, je možné jej použít pro přenos až 104 byte užitečných dat

**Acknowledgment Frame** - slouží pro potvrzení úspěšně přijatého rámce. Jsou vysílány okamžitě po příjmu datového rámce v čase mezi rámci (IFS - Interframe Space)

**MAC Command Frame** - slouží k nastavení a řízení klientských zařízení v síti.

Na obr. 4.7. [7] jsou uvedeny struktury jednotlivých typů rámců používaných ve vrstvě MAC. Maximální délka těchto rámců je 127 byte.



Obr.4.7: Struktury rámců

## 5. ZABEZPEČENÍ

ZigBee sítě jsou velmi bezpečné. Mají v sobě zabudované opatření zabraňující rušení ze sousedních ZigBee sítí a případných nepřátelských sítí.

### 5.1 AES-based Encryption

Velmi vysoké zabezpečení, založené na systému klíčového šifrování (key-based encryption systém). To je použito k zamezení vnějšího odposlechu dat. Data jsou zašifrována zdrojem a rozšifrována cílovou stanicí použitím stejného klíče – jen zařízení se správným klíčem může dekódovat zašifrovaná data.

128-bitový šifrovací systém je založen na AES (Advanced Encryption Standard) algoritmu [8].

### 5.2 Message Timeout

Tato vlastnost umožňuje odmítnutí zpráv, kterým vypršel čas (timed-out messages) a chrání síť před jejich opakovanými útoky.

Součet velikosti rámce (A frame counter) je přidán ke zprávě, což pomáhá zařízení stanovit jak stará přijatá zpráva je. Dodatková hodnota je porovnána s hodnotou uloženou v paměti zařízení (jaká je hodnota velikosti posledního přijatého rámce). Tato hodnota synchronizuje jen uspořádání zpráv a neobsahuje informaci o čase nebo datu.

Toto poskytuje ochranu proti opakovanému zasílání starých zpráv při falešném vyžádání z venku. Příkladem takových falešných útoků může být zákeřné nahrávání otevíracích příkazů garážovým vratům pro jejich následné otevření a vloupání se do domu [8].

### 5.3 Access Control Lists

Standard IEEE 802.15.4 umožňuje uzlu vybrat si druhý síťový uzel ke komunikaci.

Toho dosáhne použitím přístupového kontrolního seznamu Access Control List (ACL), který se nachází v zařízení a který je obsažen v MAC adrese uzlu, se kterým je komunikace povolena.

Zdrojový uzel v příchozí zprávě je porovnán s tímto seznamem a výsledek je předán vyšší vrstvě, která se rozhodne zdali zprávu přijme nebo odmítne.

Pokud však uzly, posílající zprávu, nejsou zašifrovány, může být údajný zdroj zprávy zfalšován [8].

## 6. ÚVOD DO PROSTŘEDÍ OPNET MODELER

OPNET Modeler (OM) je simulační program, který poskytuje výkonné nástroje pro tvorbu, simulaci a analýzu rozsáhlých sítí v softwarovém prostředí. Rovněž umožňuje aplikovat různé nastavení a optimalizovat provoz v sítích. OM je graficky orientovaný nástroj, díky tomu je v něm práce rychlejší a efektivnější. Simulace probíhá se zrychlením, díky čemuž je možné simulovat měsíční provoz sítí v řádu hodin. Největší výhodou však spočívá v objemných knihovnách a dostupném zdrojovém kódu, který je možné dále upravovat.

### **OPNET Modeler se skládá z :**

- Síťového editoru (umožňuje definovat a měnit topologii sítě)
- Simulačního nástroje (zde lze definovat vlastnosti, které je třeba simulovat)
- Nástroje pro analýzu (zobrazení a porovnání statistických výsledků)

Simulační prostředí OPNET Modeler umožňuje v síti ZigBee nastavit následující rysy:

### **Vlastnosti aplikační vrstvy:**

- generování a přijímání provozu
- spouštění detekci (objevování) a připojování nových síťových prvků

### **Vlastnosti síťové vrstvy:**

- budování sítě
- propojování sítí a povolení k jejich tvorbě
- přidělování adres
- udržování tabulek sousedících sítí
- postupy směrování v topologii polygon
- vysílání všem uzlům v síti
- vysílání a přijímání dat
- plánování synchronizace

### **Vlastnosti MAC vrstvy**

- skenování kanálů
- CSMA/CA

### **Vlastnosti, které nejsou dostupné v OPNET Modeler pro ZigBee:**

- multicastový provoz
- nerovný přenos
- zabezpečení
- slotový režim
- režim doby volného přístupu (CFP)

## **6.1 Vytvoření senzorové sítě ZigBee v OPNETu**

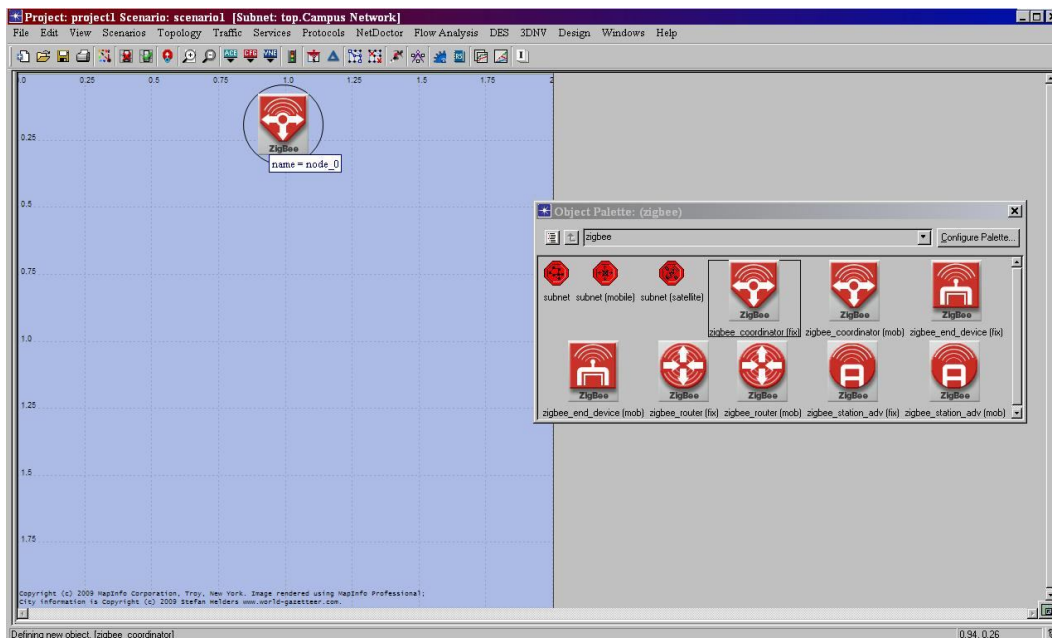
Pro simulaci a získání výsledků je nejprve nutné sestavit bezdrátovou síť a nastavit potřebné parametry provozu. Za tímto účelem jsem sestavil postupný návod, jak toho dosáhnout.

- 1. Vytvoření nového projektu**
- 2. Výběr potřebných objektů**
- 3. Nastavení parametrů objektů**
- 4. Nastavení sledovaných parametrů objektů**
- 5. Simulace sítě**
- 6. Zobrazení výsledků**

### **Ad.1 Vytvoření nového projektu:**

- 1) Spustit **OPNET modeler 14.0**.
- 2) Vybrat položku **File > New...** a potvrdit snahu vytvořit nový „**project**“.
- 3) Do řádku **Project name** uvést jméno projektu. Do řádku **Scenario name** napsat jméno vytvářeného scénáře a položku *Use Startup Wizard when creating new scenarios* nechat zaškrtnout.
- 4) V dalším okně zadat *Create empty scenário* pro vytvoření prázdného scénáře.
- 5) Při specifikaci rozlohy vybrat položku *Campus* a nechat zaškrtnout hodnotu *Use metric unit* pro používání metrické soustavy.
- 6) Zadat požadované rozměry plochy  $2 \times 2$  v jednotkách kilometrů.

- 7) V okně výběru technologie vybrat položku ZigBee a to tak, že ve sloupci **Include?** se změní stávající **No** na **Yes**.
- 8) V posledním okně Review existuje možnost zkontrolovat nastavení; tlačítkem Finish se toto nastavení potvrdí.
- 9) Vytvoří se prázdná plocha o přednastavené rozloze, na kterou se umísťují uzly z **Object Palette: (zigbee)** ( Viz. Obr. 6.1)



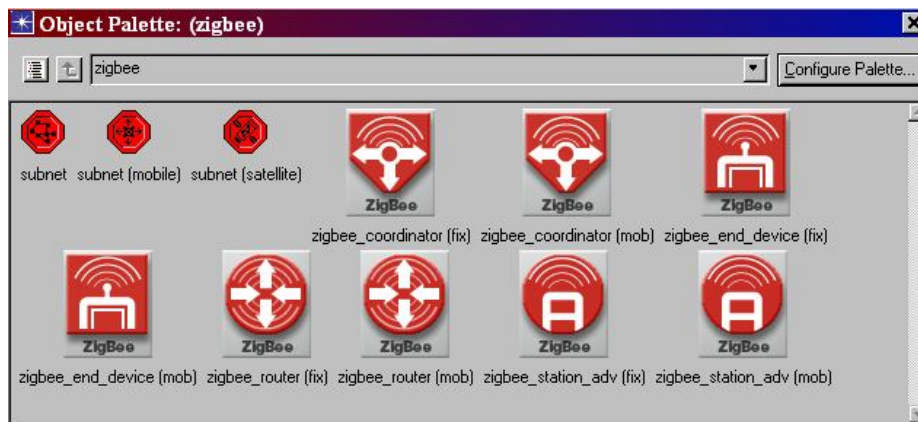
Obr. 6.1: Čistá plocha s paletou uzlů pro vytvoření nového senzorového pole

## **Ad.2 Výběr potřebných objektů:**

Do nově vytvořeného projektu se postupně vkládají objekty z Object Palette, které se podílí na vytváření senzorové sítě.

### **Dostupné uzlové modely:**

Knihovna ZigBee je specializovaná knihovna modelů, která obsahuje různé uzly. Jejich výčet je možné vidět v objektové paletě ZigBee (viz Obr. 6.2)



Obr. 6.2: Výběr z palety dostupných uzlů

Tab. 6.3. Funkce uzlových modelů

Uzlové modely:		Popis
<b>Koordinátor</b>	zigbee_coordinator (fix)	Koordinátor sítě, rozdělení na pevný nebo pohyblivý.
	zigbee_coordinator (mob)	
<b>Router</b>	zigbee_router (fix)	Směrovač sítě, který může být jak fixní, tak mobilní
	zigbee_router (mob)	
<b>Koncové</b>	zigbee_end_device (fix)	Koncové zařízení, taktéž s možností pohybu.
	zigbee_end_device (mob)	
<b>Stanice</b>	zigbee_station_adv (fix)	Obecná stanice, která se může po nastavení chovat jako Koordinátor, Router nebo Koncové zařízení.
	zigbee_station_adv(mob)	

Model ZigBee umožňuje konfigurování Lokálních a Globálních parametrů

### Lokální parametry:

Následující parametry jsou dostupné pro konfiguraci ZigBee uzlů.

- 1) Z palety objektů se nejprve musí vybrat koordinátor. Držením levého tlačítka myši a simultánním pohybem se koordinátor přesune do pole.
- 2) Tímto způsobem lze pokračovat i u dalších uzlů, které budou součástí sítě.
- 3) Každý z těchto prvků je třeba pojmenovat; a to pravým poklikem myši a výběrem položky **Set Name**
- 4) Je možné vytvořit libovolně rozsáhlou síť s libovolnou hustotou a různých tvarů.

## Globální parametry:

Za globální parametry lze považovat vlastnosti sítě, které byly nastaveny již zpočátku; dále sem patří nastavení hodnot při spouštění simulace.

### Ad.3 Nastavení parametrů objektů:

Dalším krokem je nastavení parametrů jednotlivých uzlů sítě.

Pro přehled jsou v tabulce 6.4. uvedeny významy jednotlivých parametrů.

- 1) Po kliknutí pravým tlačítkem myši na uzel Koordinátor je třeba vybrat položku **Edit Attributes**. **Transmission Power** se nastaví na hodnotu 0,003

Hodnoty **Maximum Children**, **Maximum Routers** a **Maximum Depth** je potřeba nastavit v závislosti na tom, jak velká síť bude vytvářena a jak hluboce bude třeba tuto síť testovat.

**Mesh Routing Enabled/Disabled** lze zvolit podle toho, zda chceme umožnit, aby síť pracovala v topologii Tree nebo Mesh.

- 2) Na uzlech **Router** a **Koncové zařízení** se stejným způsobem upraví velikost vysílaného výkonu.

Tab. 6.4. Význam všech parametrů nastavovaných u senzorů

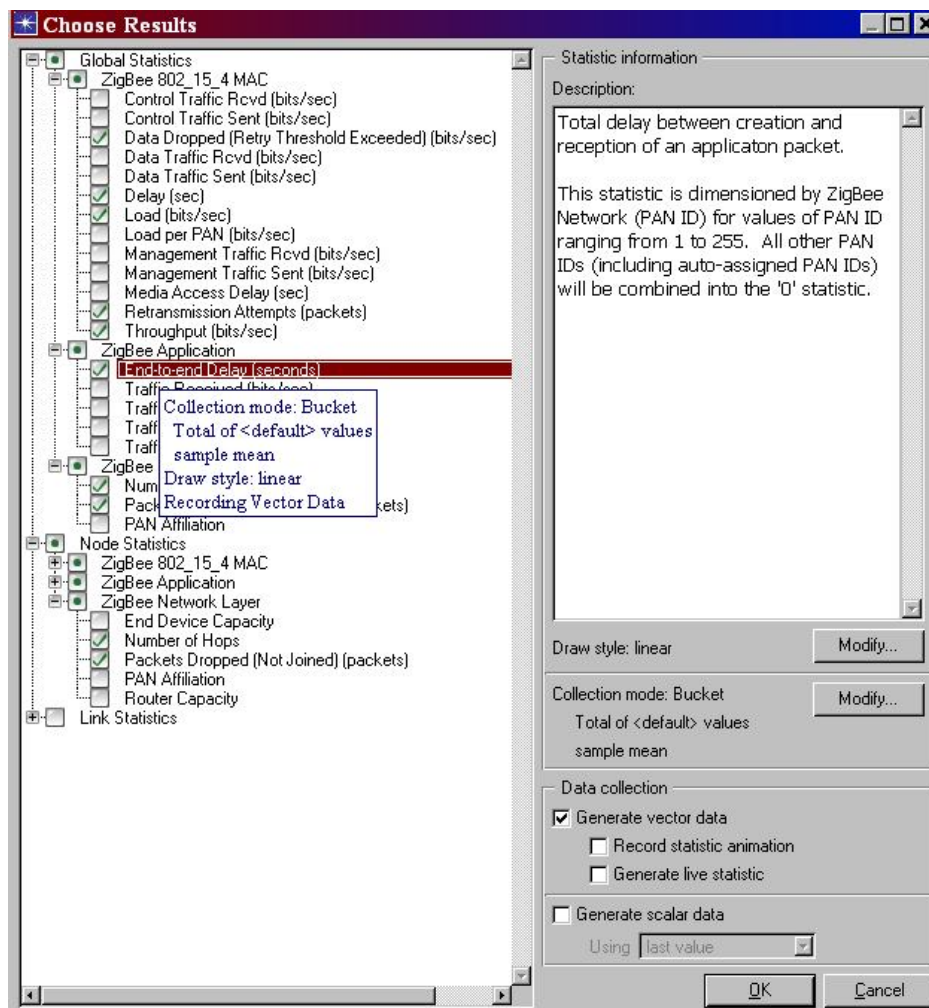
<b>ZigBee Parameters</b>	<b>MAC Paramers</b>	<b>ACK Mechanism</b>	<b>Status</b>	Povolen/Zakázán ACK přenos pro daný uzel
			<b>ACK Wait Duration (s)</b>	Doba, po kterou MAC bude čekat na ACK. Pokud ACK neobdrží během této doby, MAC bude opakovaně vysílat.
			<b>Number of Retransmissions</b>	Číslo, kolikrát je paket znovu poslán, než je prohlášen za porušený.
		<b>CSMA-CA Parameters</b>	<b>Minimum Backoff Exponenet</b>	Minimální hodnota Backoff exponentu CSMA-CA (pokud je hodnota 0 – vyhnout se kolizím během prvního opakování je zakázáno).
			<b>Maximum Number of Backoffs</b>	Maximální číslo Backoffů CSMA-CA, ke kterému dojde, než je prohlášeno za „chybu přístupu ke kanálu“
		<b>Channel Sensing Duration</b>	Doba, po kterou kanál skenuje rámce „beacon“. ('Auto-Compute' – uzel, který automaticky určuje kanál snímání založený na rychlosti přenosu)	

	<b>Physical Layer Parameters</b>	<b>Data rate</b>	Určuje rychlost přenosu dat rámců přes fyzickou vrstvu. ("Auto Calculate" přepočte rychlost přenosu dat na základě použitého frekvenčního pásma).
		<b>Packet Reception -Power Threshold</b>	Definuje citlivost přijímače (hodnota v dBm pro přicházející pakety). Pakety s nižším výkonem než je hranice nejsou přijaty a detekovány (označí se jako šum a mohou způsobovat rušení a kolize s platnými pakety). Pakety s přijaté s vyšším výkonem jsou považovány za platné.
		<b>Transmission Bands</b>	Nastavení frekvenčních pásem, které bude zařízení používat (858 MHz, 902–928 MHz a 2,4 GHz).
		<b>Transmit Power [W]</b>	Tato hodnota udává vysílací výkon přidělený vysílaným paketům přenášeným skrz kanál.
	<b>Network Parameters</b>	<b>Beacon Order</b>	Určuje interval beaconu, pokud je tento modus povolen. Hodnota musí být stejná po celé síti.
		<b>Superframe Order</b>	Určuje délku Superrámce (pokud je v beacon enabled módu). V současné době nemá efekt na simulace.
		<b>Maximum Children</b>	Určuje maximální počet „dětí“ (celkem), které může jednotlivý router nebo koordinátor mít.
		<b>Maximum Routers</b>	Určuje maximální počet Routerů, které může jednotlivý router nebo koordinátor mít (tato hodnota musí být menší než hodnota Maximum Children attribute).
		<b>Maximum Depth</b>	Určuje maximální hloubku, jakou může síť mít (tato hodnota je aplikovaná na všechny uzly koordinátorovi sítě).
		<b>Beacon Enabled Network</b>	Určuje, bude-li zařízení pracovat v beacon enabled módu (zatím není OPNETem podporován).
		<b>Mesh Routing</b>	Specifikuje povolení Mesh směrování v dané PAN
		<b>Route Discovery Timeout</b>	Délka, po kterou zůstávají objevené cesty v tabulce, než jsou odstraněny (používá se jen pro povolený Mesh Routing).
	<b>PAN ID</b>	Specifikuje Identifikační číslo sítě, která je tvořena koordinátorem. Pokud je PAN ID nastaveno na 'Auto Assigned', koordinátor vybere náhodné PAN ID a Router nebo Koncové zařízení se připojuje do jakékoliv sítě bez ohledu na PAN ID.	
	<b>Application Traffic</b>	<b>Destination</b>	Jméno cílového uzlu: <b>"Random"</b> – Uzel si vybere náhodný cílový uzel ve své PAN. <b>"All Nodes"</b> – Uzel vysílá všem uzlům ve své PAN. <b>"All Coordinators and Routers"</b> – Vysílá všem Koordinátorům a Routerům ve své PAN. <b>"Parent"</b> – Uzel vždy posílá provoz svému mateřskému uzlu (pokud je to nastaveno u Koordinátora – provoz je zahozen).. <b>"No Traffic"</b> – Uzel neposílá žádný provoz.
<b>Packet Interarrival Time</b>		Generuje náhodný časový interval mezi následujícími vygenerovanými pakety.	
<b>Packet Size</b>		Určuje velikost náhodně generovaných paketů.	
<b>Start Time</b>		Určuje začátek generování náhodného provozu.	
<b>Stop Time</b>		Určuje konec generování náhodného provozu.	

#### Ad.4 Nastavení sledovaných parametrů objektů

Zde jsou vybrány parametry, které je potřeba sledovat při simulaci. Nabízí se možnost sledovat jak celou síť, tak jednotlivé objekty.

1) Výběr lze provést následovně: Poklikem na pravé tlačítko myši na volné místo na ploše se vybere záložka **Choose Individual Des Statistics**. Objeví se možnost výběru z Globálních a Uzlových statistik (viz Obr.6.5). Zde lze zvolit, jaké vlastnosti senzorové sítě chceme změřit a zaznamenat.



Obr.6.5: Nastavení možností sledovaných statistik

## Ad.5 Simulace sítě

Zde se nastavují hodnoty pro simulaci.

1) Simulaci se spouští přes hlavní menu **DES>Configure/Run DES** nebo pomocí ikony „běžce“



Po zobrazení okna **Configure/Run DES** lze nastavovat parametry simulace (viz Obr. 6.6).

**Duration** – nastavení doby simulace (1 hodina)

**Value per statistic** – nastavení počtu hodnot, které budou uloženy z každé statistiky.

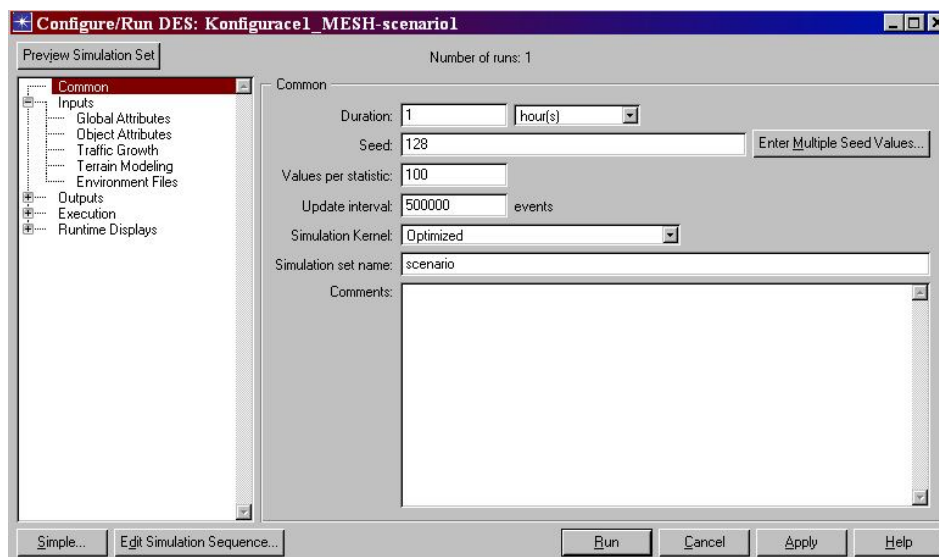
Standardně nastaveno na 100.

**Update interval** – nastavení, po kolika událostech se bude aktualizovat křivka.

Standardně nastaveno na 500000.

**Simulation kernel** – nastavení kernelu simulace. Obvykle se ponechává beze změny.

Dále lze v levém sloupci rozkliknout položku Inputs. V *Global attributes* se nachází položka *Report Snapshot Time(s)*. Toto nastavení sděluje, ve který čas budou do paměti uložena data. Do kolonky *Value* lze proto připsat další časové hodnoty pro ukládání dat.

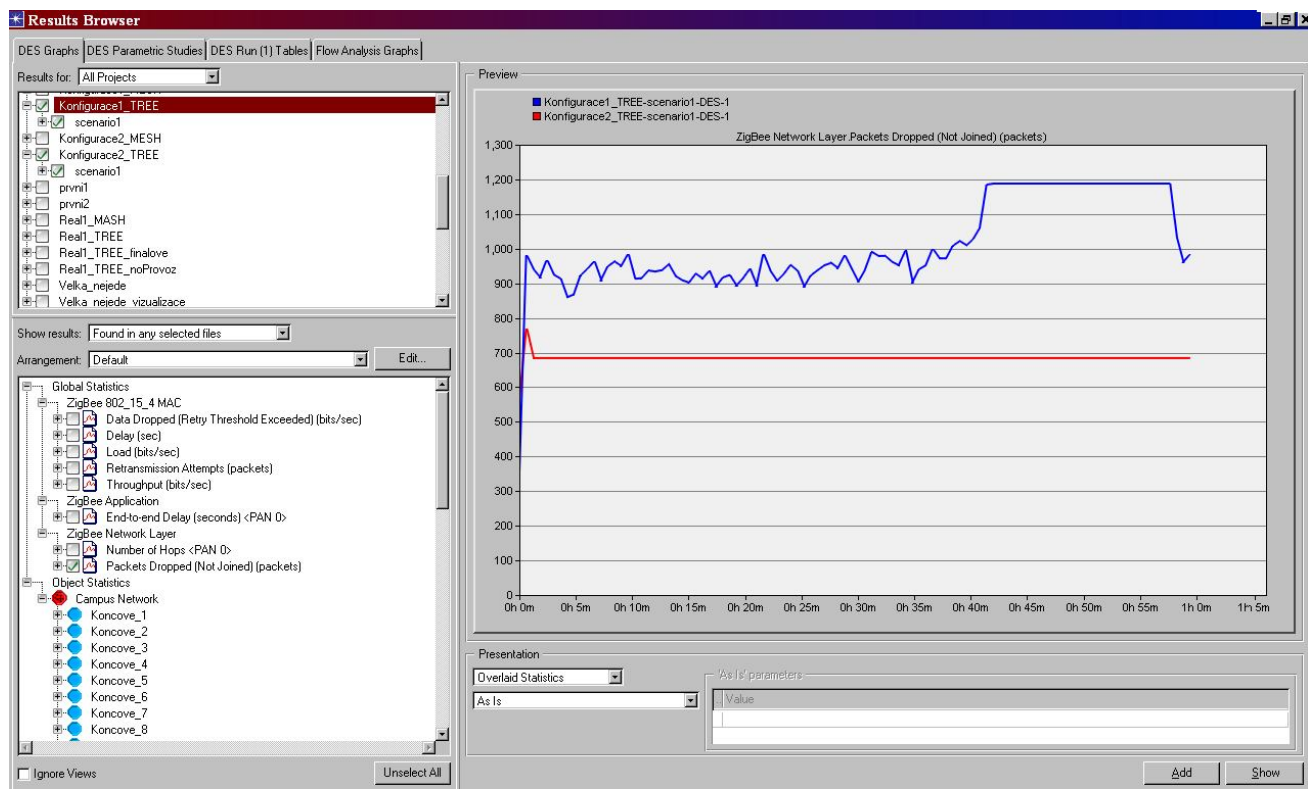


Obr.6.6: Okno pro nastavení průběhu simulace

### Ad.5 Zobrazení výsledků

Výsledky se zobrazí tak, že v hlavním menu editoru se postupuje tímto způsobem: **DES>Results>Compare Results**. Zobrazí se okno, ve kterém lze porovnávat výsledky všech sestavených sítí a všech vytvořených simulací. Stačí nastavit **Results for:** na **All Projects** a vybrat, ze kterých sítí chceme výsledky porovnávat.

Potom už jen stačí rozkliknout a zatrhnout, který uzel budeme zkoumat a výsledek se objeví v grafu (viz Obr. 6.7).



Obr.6.7: Okno s výsledky dané simulace

## 7. VÝSLEDKY SIMULACÍ V OPNETU

Z důvodu získání více poznatků o senzorových sítích obecně jsem vytvořil dvojí konfiguraci bezdrátové ZigBee sítě.

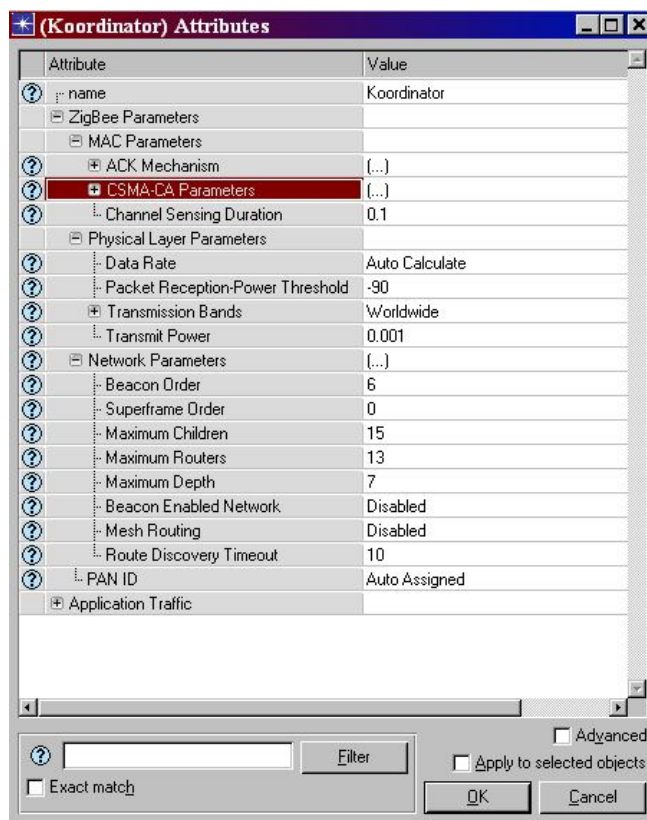
### Konfigurace č. 1:

Tato síť je umístěna do pole 2 x 2 kilometry. Síť je složená z 30 Routerů a 20ti koncových zařízení. U všech těchto uzlů jsem změnil parametry citlivost přijímače na

- 90dBm a vysílací výkon snížil na 0.001 W. Tato hodnota odpovídá výkonu 0 dBm, což se v praxi uvádí jako maximální vysílací výkon. Taktéž citlivost odpovídá reálným hodnotám, které jsem našel v Data sheetu ZigBee Transceiveru RC220x od firmy Radiocrafts. Tyto hodnoty se pohybují od – 95 dBm do – 85 dBm. [12]

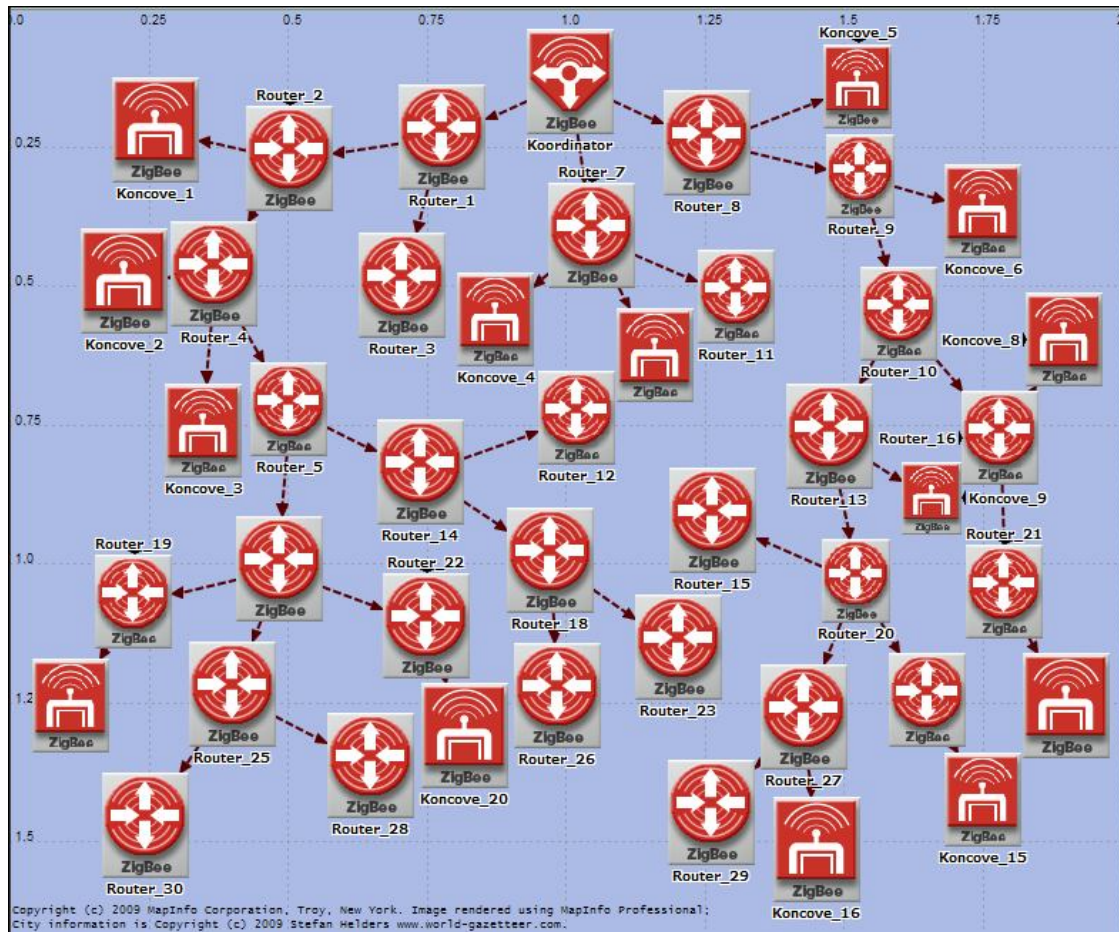
Nastavení koordinátoru je možné vyčíst z obrázku 7.1. Výše uvedené hodnoty jsou aplikovány i na koordinátor; navíc je zde potřeba nastavit parametry velikosti sítě.

Celou tuto síť nejprve simuluji v topologii TREE a poté v topologii MESH. Rozdíly ve výsledcích je možné vidět níže.



Obr. 7.1: Nastavení parametrů u Koordinátoru

Celou sestavenou síť je možné vidět na obrázku 7.2. Jedná se o senzorovou síť v konfiguračním rozložení číslo 1 na rozloze 2 x 2 kilometru.



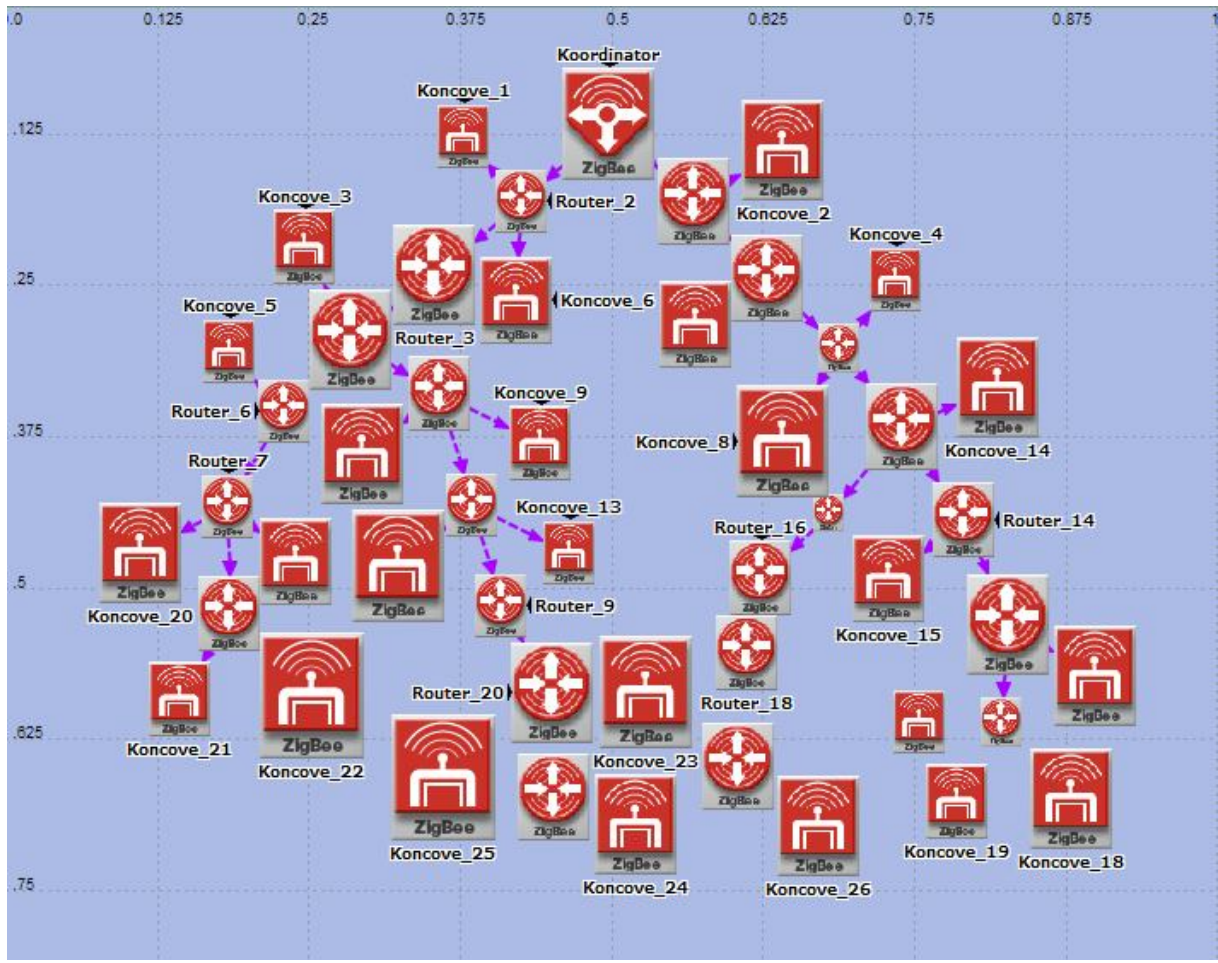
Obr. 7.2: Rozložení sítě s konfigurací č. 1

## **Konfigurace č. 2:**

Síť v této konfiguraci byla zhotovena na ploše o rozloze 1 x 1 kilometr. Síť je podobná první konfiguraci, avšak zde jsou vysílací výkonů nižší než v předešlé síti.

Koordinátor a všechny další uzly jsou nastaveny na vysílací výkon 0,0001 W, což odpovídá hodnotě -10 dBm. Velikosti vysílacích a přijímacích výkonů u ZigBee jsou v rozsahu 0dBm až -25 dBm. Zvolenou hodnotu jsem takovou nastavil z důvodu, že při ještě nižších výkonech klesá i dosah uzlů, což je v mém případě prakticky neúčinné.

Tato konfigurace je jako v předešlém případě simulovaná v topologii „Strom“ i „Síť“. Níže uvedený obrázek 7.3. ilustruje velikost a hustotu rozložení uzlů v této konfiguraci.



Obr. 7.3: Rozložení sítě s konfigurací č. 2

## 7.1 Scénář: Velikost zpoždění

Cílem tohoto úkolu je změřit zpoždění přenosu dat na jednotlivých uzlech a provnat ho v závislostech na velikosti senzorové sítě a její topologii.

K tomuto účelu je třeba nastavit sledování hodnot Globální statistiky a to konkrétně tyto:

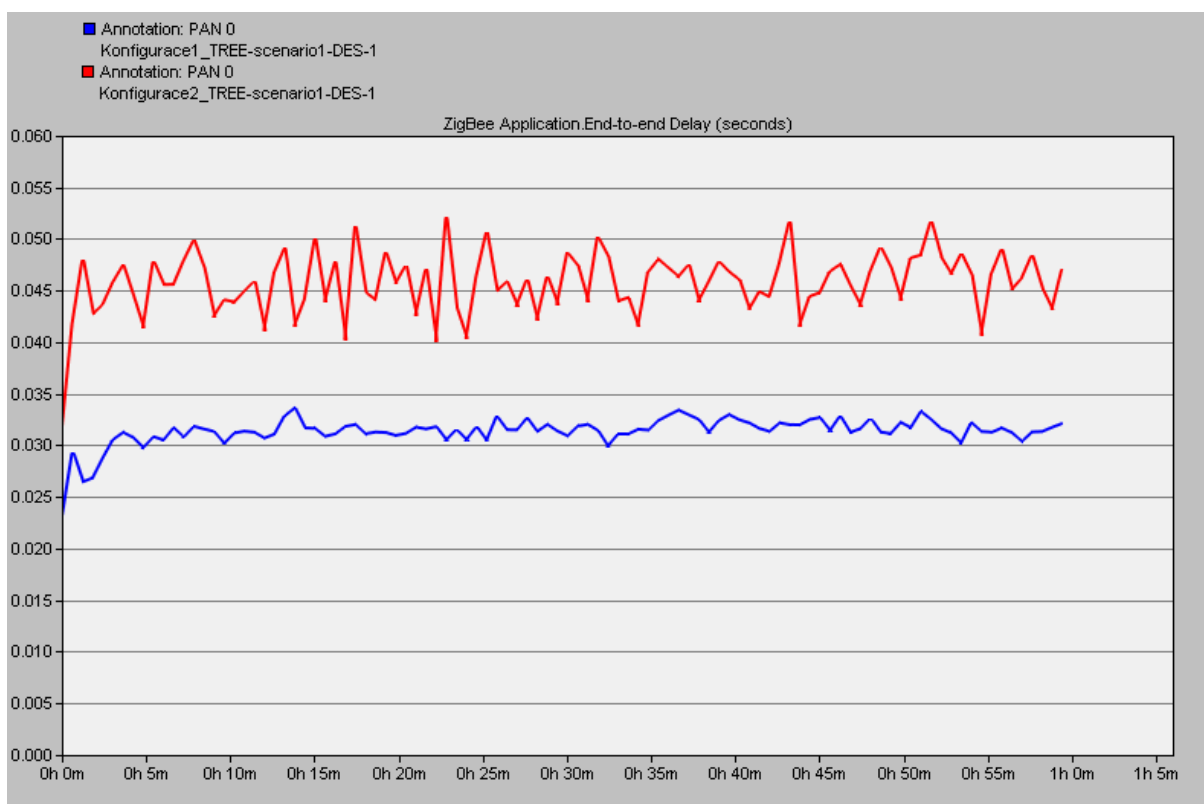
**Delay** - Představuje koncové zpoždění všech paketů přijatých MAC vrstvou všemi uzly v síti a přeposlané vyšší vrstvě.

**End-to-End Delay** - Celkové zpoždění mezi vytvořením a opětovným příjmem paketu.

## Naměřené hodnoty a závěry:

Na obrázku 7.4. lze vidět porovnání Konfigurace č. 1 (modrá barva, větší výkon vysílače a zároveň větší plocha a menší hustota sítě) se sítí značenou červenou barvou - tou je Konfigurace č. 2. Obě tyto sítě pracují v topologii TREE.

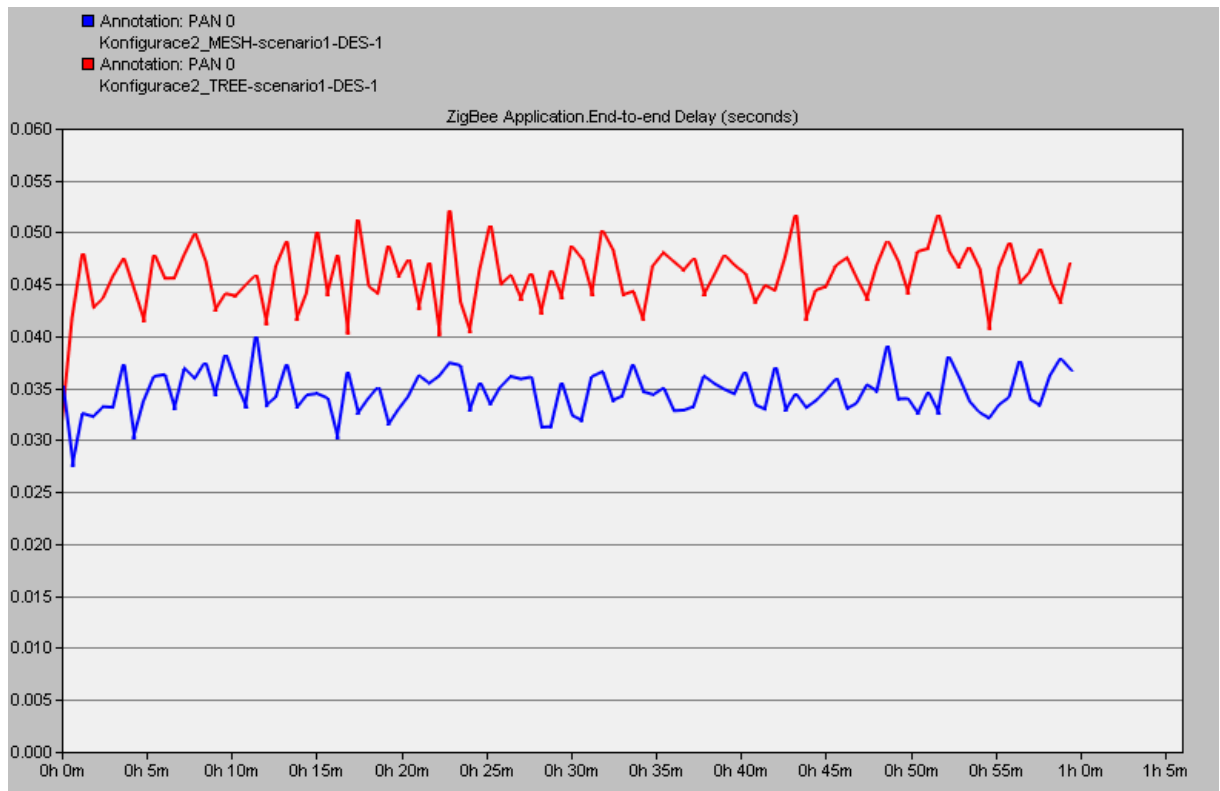
Z výsledků vyplývá, že čím je síť hustší a čím menší je její vysílací výkon, tím více dochází ke zpoždění paketů. V hustější síti je zpoždění 0,045 sekund a v síti s větším rozložením uzlů se zpoždění pohybuje kolem hodnoty 0,032 s. To může být způsobeno jednak přeslechly, délkou zpracování paketů v jednotlivých uzlech nebo také podmínkou citlivosti přijímače. Pakety, které jsou přijaty s nižším výkonem, než je nastavena hranice citlivosti (Packet Reception-Power Treshold), jsou detekovány a označeny jako šum.



Obr.7.4 Porovnání výsledků sítí s různou konfigurací

Při porovnávání sítí stejných vysílacích výkonů a různých topologií dojdeme k zjištění, že červená křivka, která značí zpoždění sítě s topologií Strom, má větší zpoždění (kolem 0,045 s) než modrá křivka, která zastupuje zpoždění v síti Mesh. Tady se zpoždění pohybuje kolem hodnot 0,035 sekund (viz Obr. 7.5).

Tento fakt je dán tím, že síť Mesh má schopnost hledat nejkratší cestu k cíli a tím urychlit přenášené data. Další výhodou je nižší zatížení sítě a jejich uzlů. V neposlední řadě je výhodou, že v případě výpadku některého z uzlů nedojde k úplnému výpadku zbytku sítě.



Obr. 7.5 Porovnání výsledků sítí s různou topologií

## 7.2 Scénář: Spolehlivost přenosu

Dalším cílem této práce je zjistit spolehlivost dané sítě. Sensorové sítě jsou známé svou spolehlivostí, přesto se čas od času objevují výpadky nebo dojde k zahození některého z paketů.

Ke zjištění spolehlivosti sítě existuje v OPNETu možnost sledovat při simulaci následující prvky:

**Data Dropped (retry treshold exceeded)**-Tato statistika ukazuje počet zahozených paketů vrstvou MAC, protože MAC nedošly žádné ACK pro opětovné zaslání těchto paketů. Po vypršení limitu vyslání je paket zahozen.

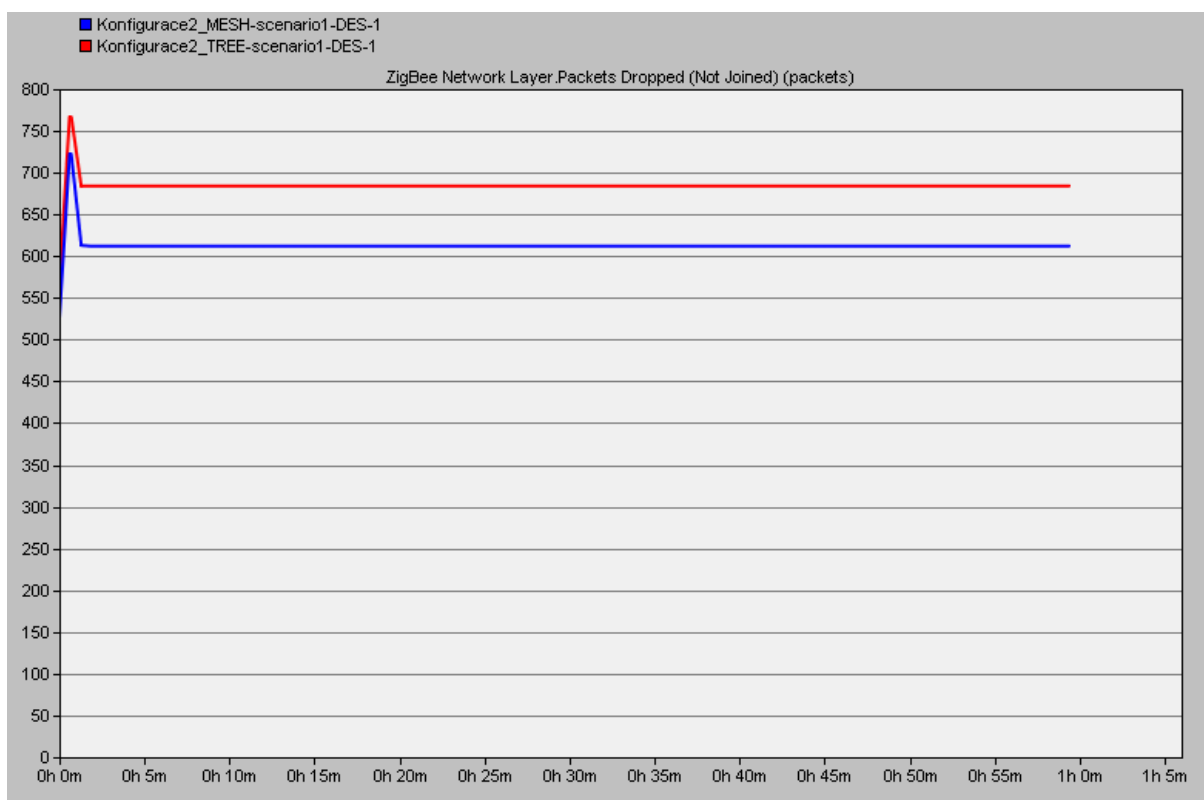
**Traffic dropped en route** - Počet vyslaných paketů, které byly zahozeny cestou k cíli.

**Packets dropped (not joined)**- Pakety zahozené kvůli neschopnosti připojení do sítě

### Naměřené hodnoty a závěry:

Na prvním obrázku 7.6. lze vidět graf, který zobrazuje počet zahozených paketů. Porovnávají se zde dvě různé topologie, a to v síti s hustějším rozložením uzlů (Konfigurace 2).

V grafu je možné vidět, že při začátku simulace, když dochází k sestavení sítě, je počet zahozených paketů větší, než ve zbývajícím průběhu provozu. Dále lze vidět, že topologie Strom má větší ztrátovost než topologie Síť.



Obr. 7.6: Porovnání výsledků zahozených paketů v topologiích MESH a TREE

Tento fakt je doložen i dvojicí obrázků 7.7. a 7.8. Je zde ukázáno, že při 60té sekundě simulace došlo v případě topologie TREE k zahození 759 paketů, kdežto u topologie MESH jen k 549 paketům.

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	1600	284	749	567	43.47	40	7 <a href="#">Click Here</a>

Obr. 7.7: Počet zahozených paketů v konfiguraci č. 2 a topologii TREE

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	1480	311	549	620	49.73	37	7 <a href="#">Click Here</a>

Obr. 7.8: Počet zahozených paketů v konfiguraci č. 2 a topologii MESH

Pokud sečteme hodnoty Packets Received (přijmuté pakety), Packets Dropped (zahozené pakety), Packets Outstanding (pakety co obstály), získáme hodnotu Packets Sent (vyslané pakety), neboli celkový počet paketů.

Z toho lze vyvodit závěr, že pokud vyjádříme četnost zahozených paketů poměrem „chybně“ přenesených paketů k celkovému počtu přenášených paketů, získáme spolehlivost dané sítě v procentech.

#### PER (Packet Error Rate) pro topologii MESH

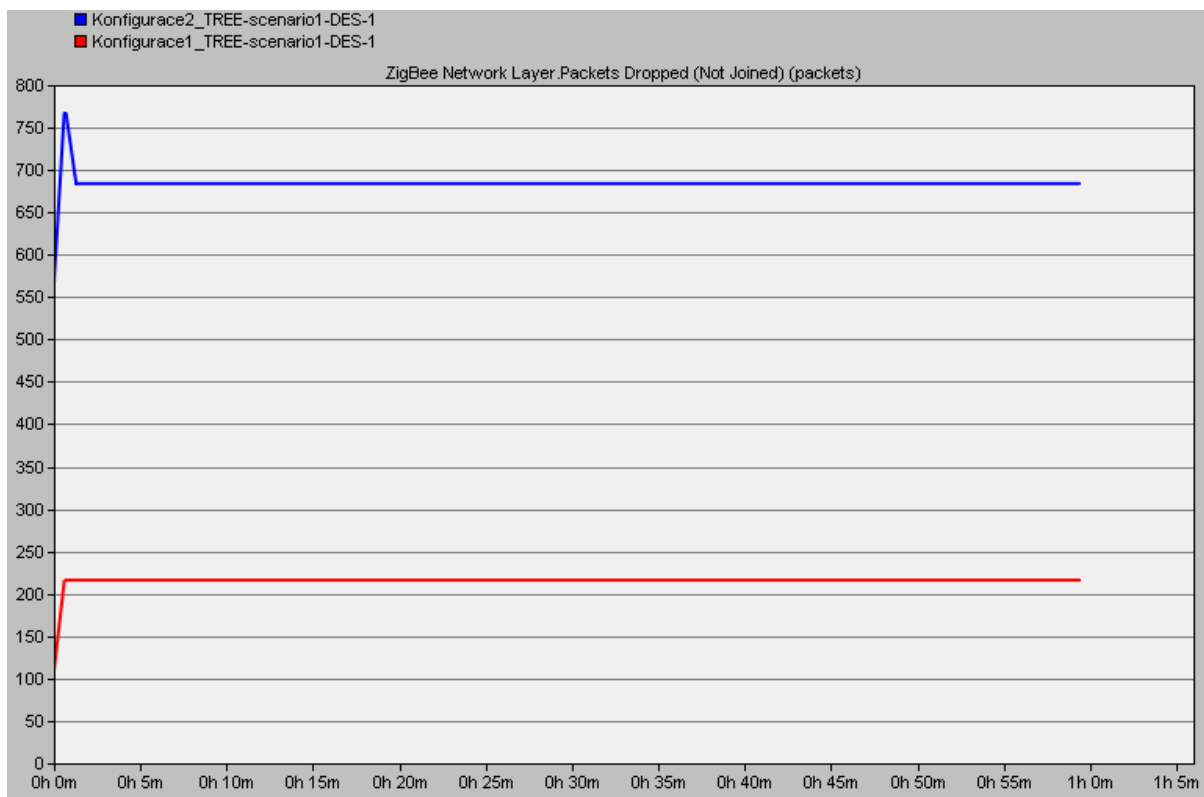
$$PER = \frac{PacketsDropped}{PacketsSent} = \frac{549}{1480} \cdot 100 = 37\% \quad (1.1)$$

#### PER (Packet Error Rate) pro topologii TREE

$$PER = \frac{PacketsDropped}{PacketsSent} = \frac{749}{1600} \cdot 100 = 47\% \quad (1.2)$$

Z výše uvedených výsledků je jasné, že v síti, která pracuje ve stromové topologii, dochází k většímu počtu zahození paketů a tudíž je tato síť méně spolehlivá. Dále je z výsledku patrné, že procentuelně vyjádřeno jsou oba výsledky příliš vysoké, než aby síť mohla být prohlášena za spolehlivou.

V dalším měření jsem porovnával spolehlivost dvou sítí s různou hustotou uzlů. U konfigurace 1, kde jsou uzly v síti rozloženy průměrně po 250 metrech, dochází k zahazování paketů daleko v menší míře, než v síti hustější, kde jsou uzly od sebe rozmístěny cca 95 metrů (viz Obr.7.9.).



Obr.7.9: Porovnání zahozených paketů v sítích s různou hustotou uzlů

U konfigurace č.1 je zřetelné, že procentuelní poměr zahozených paketů k paketům vyslaným je daleko menší, než je tomu u konfigurace č.2. Na následujících obrázcích 7.10. a 7.11. lze vidět konkrétní množství paketů vyslaných a zahozených.

ZigBee.Global Report at Simulation Time 60										
PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure	
1	0	26	1960	268	95	1597	19.99	49	7	<a href="#">Click Here</a>

Obr. 7.10: Počet zahozených paketů v konfiguraci č. 1 a topologii TREE

### PER (Packet Error Rate) pro konfiguraci č. 1

$$PER = \frac{PacketsDropped}{PacketsSent} = \frac{95}{1960} \cdot 100 = 5\% \quad (1.3)$$

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	1600	284	749	567	43.47	40	7 <a href="#">Click Here</a>

Obr. 7.11: Počet zahozených paketů v konfiguraci č. 2 a topologii TREE

### PER (Packet Error Rate) pro konfiguraci č. 2

$$PER = \frac{PacketsDropped}{PacketsSent} = \frac{749}{1600} \cdot 100 = 47\% \quad (1.4)$$

Z následujících výpočtů je patrné, že pro síť s menší hustotou je PER řádově o desítky procent menší než pro síť hustější. To může být způsobeno vlivem většího vzájemného rušení jednotlivých senzorů.

U zapojení konfigurace č. 1 už lze získat reálné výsledky spolehlivosti sítě. Výsledek spolehlivosti 5% je v praxi považován za akceptovatelný

## 7.3 Scénář: Energetická náročnost

Cílem posledního úkolu je spočítat energetickou náročnost senzorové sítě, vztažené k hustotě pokrytí dané oblasti. Pro co nejpřesnější výsledek jsem nejprve určil, jak velkou oblast senzorová síť skutečně pokrývá a kolik obsahuje uzlů.

**Senzorová síť s konfiguračním číslem 1** je velká 1,97 x 1,63 km a je sestavená ze 44 uzlů včetně koordinátora. Celková rozloha tedy činí 3,21 km<sup>2</sup>. Průměrný počet uzlů na 1 km<sup>2</sup> je pak 13,7 senzorů.

**Senzorová síť s konfiguračním číslem 2** je velká 0,88 x 0,71 km, což se rovná rozloze 0,625 km<sup>2</sup>. V této oblasti se nachází 49 senzorů, průměrný počet senzorů na 1 km<sup>2</sup> je tedy 78.

### Výpočet spotřeby senzorové sítě:

Při modelování sítě byly senzory nastaveny na vysílací výkony podle reálných hodnot ZigBee modulů od firmy Radiocraft.

Bohužel OM zatím neumožňuje měřit hodnoty spotřeby energie jednotlivých uzlů, ani neumožňuje přepínat jednotlivé uzly do spánkového režimu IDLE a snižovat tím spotřebu. Proto jsem pro další výpočty použil hodnoty uváděné v Data Sheetu ZigBee modulech a spotřebu jsem vypočítal následujícím způsobem:

V dokumentu jsem vyhledal hodnoty aktuální spotřeby energie při vysílání dat, přijímání dat i pro spánkový režim.

Pro vysílání a přijímání dat se velikost proudu mění v závislosti na vysílacím výkonu zařízení. Pro výkon 0 dBm se spotřeba  $I_{RX,TX}$  pohybuje kolem 27 mA, zatímco pro výkon -10 dBm, který je použit v síti s větší hustotou senzorů je spotřeba  $I_{RX,TX} = 13$  mA. Dále je nutné znát hodnotu napájecího napětí  $U_{CC} = 3,1$  V.

Tyto hodnoty se mohou lišit v závislosti na různých typech zařízení, odlišných výrobcích i nastavených vyzařovacích výkonech. Na trhu je zařízení mnoho, při porovnání mezi více zdroji jsem však zjistil, že se tyto hodnoty liší jen nepatrně. [12]

### **Spotřeba senzorů v daných sítích:**

#### **1) Konfigurace sítě č. 1**

$$E_{[W]} = U_{[V]} \cdot I_{[A]} = 3,1V \cdot 27mA = 83,7mW / h \quad (2.1)$$

Spotřeba jednoho senzoru je 83,7 mW/h. V mnou vytvořené síti se nachází 44 senzorů, proto:

$$E_{celkova} = p \cdot E = 44 \cdot 83,7 mW / h = 3683mW / h \quad (2.2)$$

Spotřeba celé sítě s menší hustotou je tedy 3683 mW/h. Abychom mohli výsledek porovnat s druhou sítí, je nutné výsledek upravit a propočítat spotřebu na 1 km<sup>2</sup>.

$$E_{1km^2} = p \cdot E = 13,7 \cdot 86,8mW / h = 1147mW / h \quad (2.3)$$

Nakonec je možné vypočítat celkovou dobu, po kterou vydrží jednotlivé senzory pracovat z napájení dvou baterií o celkovém napětí 3 V ( 2x 1,5 V AAA LR03 alkaline o kapacitě 1200 mAh)

$$t = \frac{KapacitaBaterie}{I_{TX,RX}} = \frac{1200mAh}{27mA} = 44,44hod \quad (2.4)$$

Baterií napájené senzory v této síti vydrží pracovat 1,85 dne. Tato doba je velmi krátká, a to z toho důvodu, že jak už jsem zmínil výše, OPNET Modeler neumožňuje uspávání zařízení, tudíž v síti probíhá provoz neustále.

## 2) Konfigurace sítě č. 2

$$E_{[W]} = U_{[V]} \cdot I_{[A]} = 3,1V \cdot 13mA = 40,3mW / h \quad (2.5)$$

Spotřeba jednoho senzoru je 40,3 mW/h. V síti konfigurované pro přenos na menší vzdálenosti se nachází 49 senzorů, proto:

$$E_{celkova} = p \cdot E = 49 \cdot 40,3 mW / h = 1975mW / h \quad (2.6)$$

Spotřeba celé sítě s větší hustotou senzorů je ve výsledku 1975 mW/h. Abychom mohli výsledek porovnat s druhou sítí, je nutné výsledek upravit a propočítat spotřebu na 1 km<sup>2</sup>.

$$E_{1km^2} = p \cdot E = 78 \cdot 40,3mW / h = 3143mW / h \quad (2.6)$$

I zde jsem vypočítal dobu výdrže baterie v senzoru mnou vytvořené sítě.

$$t = \frac{KapacitaBaterie}{I_{TX,RX}} = \frac{1200mAh}{13mA} = 92,3hod \quad (2.7)$$

V této síti, která pracuje v nižších vysílacích výkonech, vydrží baterií napájený senzor 3,8 dne neustálého provozu.

### Shrnutí výsledků energetické spotřeby:

Tab. 7.12. Porovnání spotřeby energií v různých konfiguracích sítě

Počítané veličiny	Konfigurace č.1 ( 0 dBm )	Konfigurace č.2 ( -10 dBm)
Rozloha sítě [km]	<b>3,211</b>	<b>0,625</b>
Počet uzlů v síti [ks]	<b>44</b>	<b>49</b>
Počet uzlů na 1 km <sup>2</sup> [ks]	<b>13,7</b>	<b>78</b>
Spotřeba jednoho uzlu [mW/h]	<b>83,7</b>	<b>40,3</b>
Spotřeba energie uzlů na 1 km <sup>2</sup> [mW/h]	<b>1147</b>	<b>3143</b>
Výdrž baterie v senzoru [h]	<b>44,44</b>	<b>92,3</b>

Z následující tabulky 7.12. je patrné, že síť č.1, která má na první pohled vyšší vysílací výkon, je rozsáhlejší a musí vysílat ke vzdálenějším uzlům, má menší energetickou spotřebu vztahenou na rozlohu jednoho kilometru čtverečního i přes to, že baterie v senzoru vydrží poloviční dobu.

Hustší síť má i přes menší spotřebu energie jednotlivých senzorů větší celkový příkon na rozloze  $\text{km}^2$ .

Pro představu je nutné ještě uvést, jaké jsou spotřeby a výdrže baterií v praxi. Bezdrátová technologie ZigBee je založena za účelem přenosu informací na kratší vzdálenosti, avšak s cílem dosáhnout toho s co nejmenší spotřebou energie.

K tomu mu pomáhá již výše zmiňovaný stav spánku, kdy zařízení rapidně sníží spotřebu.

Budu – li uvažovat, že zařízení je usnáno na dobu, než si koordinátor sítě vyžádá jeho probuzení. Tato hodnota se může měnit v rozmezí 15ms až 252s. Po tuto dobu je zařízení v IDLE módu, kdy nevysílá, ale čeká, až bude vyzváno k přenosu dat. V této době je spotřeba zařízení redukována na  $I_{IDLE} = 23 \mu\text{A}$ .

V závislosti na důležitosti zařízení a na ohledy jeho funkčnosti je nutné si zvolit průměrnou dobu usnání zařízení.

Praktickým příkladem může být síť mnou vytvořená, která může fungovat jako les senzorových hlásičů požáru. Pokud bude požární hlásič usnáván na 50 sekund a potom zbylých 10 sekund bude vysílat data, tak za hodinu bude zařízení v módu IDLE po dobu 3000s a zbylých 600s bude vysílat. V číselných hodnotách to bude znamenat, že v hodinovém provozu zařízení z 16,667% vysílá a ve zbývajících 83,333% spí.

### **Výpočet teoretické spotřeby energie sítě s konfigurací č.1:**

Hodinová spotřeba jednoho senzoru ve vysílacím módu:

$$E_{TX,RX} = U_{[V]} \cdot I_{[A]} = 3,1\text{V} \cdot 27\text{mA} = 83,7\text{mW} / h \cdot 16,667\% = 13,95\text{mW} / h \quad (3.1)$$

Hodinová spotřeba jednoho senzoru v IDLE módu:

$$E_{IDLE} = U_{[V]} \cdot I_{[A]} = 3,1\text{V} \cdot 13\mu\text{A} = 40,3\mu\text{W} / h \cdot 83,333\% = 33,5\mu\text{W} / h \quad (3.2)$$

Po sečtení těchto dvou výsledků získáme celkovou energii senzoru v reálném použití.

$$E_{celkova} = E_{TX,RX} + E_{IDLE} = 13,95mW/h + 0,0335mW/h = 13,9835mW/h \quad (3.3)$$

Pokud bychom tento výsledek aplikovali na výše zmíněný příklad senzorů v lese, získali bychom tento výsledek:

$$E_{1km^2} = p \cdot E_{celkova} = 13,7 \cdot 13,9825mW/h = 191,56mW/h \quad (3.4)$$

Tento výsledek je už daleko menší a pro představu ještě přidám výpočet výdrže baterie v senzoru:

$$t = \frac{KapacitaBaterie}{I_{TX,RX}} = \frac{1200mAh}{4,5mA} = 267hod = 11dni \quad (3.5)$$

## 8. ZÁVĚR

V této práci byly popsány výhody a nevýhody nového bezdrátového protokolu ZigBee.

Prostudoval jsem doporučenou literaturu a k novým poznatkům došel i prostřednictvím internetu. Protokol ZigBee je jedním z novějších technologií, jejíž způsobilost doposud nebyla v praxi dostatečně verifikována, avšak ze studií jeho prozatímní existence lze soudit, že protokol ZigBee v sobě skrývá velký potenciál a pravděpodobně se s ním budeme v budoucnosti setkávat častěji, ať už to budou bezdrátově řízené budovy či kontrola výroby v továrnách. V literatuře je dokonce uváděn i příklad použití IPtelefonie v menších firmách pomocí protokolu ZigBee, což je důkaz toho, že ZigBee má obrovský potenciál, co se týče nastavení jeho vlastností.

Druhá část bakalářské práce byla zaměřena na simulaci, rozbor a chování sensorové sítě ZigBee v programu OPNET Modeler. Po studii tvorby sensorových sítí v simulačním programu OPNET jsem vytvořil velké množství různých sensorových sítí a nasimuloval stovky hodin provozu těchto sítí, až jsem dospěl k uspokojivým výsledkům.

Při analyzování velikosti zpoždění provozu byly patrné delší odezvy v sítích s menší rozlohou a hustějším rozprostřením uzlů než v sítích s většími rozestupy a vyššími vysílacími výkony. Totéž platí i pro sítě konfigurované v topologii TREE, kde jsou taktéž viditelné větší doby zpoždění.

Pro měření spolehlivosti byl důležitým faktorem poměr zahozených paketů k celkovému počtu paketů vyslaných. I zde se potvrdilo, že sítě s větší hustotou uzlů mají větší ztrátovost, tudíž menší spolehlivost než sítě rozsáhlejší s menším počtem uzlů.

Co se týče náročnosti na spotřebu energie, zde je potřeba dodat, že výsledky nejsou výstupem simulačního prostředí, ale jsou spočítány pro reálné spotřeby jednotlivých uzlů. Energetická náročnost závisí na hustotě pokrytí dané oblasti. V případě, že se na dané ploše nachází více senzorů, je spotřeba pro tuto plochu větší; na druhou stranu vydrží zařízení při napájení z baterie pracovat delší dobu, protože zařízení pracují s menšími vysílacími výkony.

Přesto, že tato práce byla založená především na teoretickém zkoumání a softwarových simulacích, bylo dosaženo předpokládaných a v praxi několikrát ověřených výsledků. Jsem rád, že jsem se mohl podílet na výzkumu nového, nízkorychlostního bezdrátového protokolu a doufám, že tato práce poslouží jako zdroj informací a jako podklad pro další studium.

## 10. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GISLASON, D.: Zigbee Wireless Networking, Newnes, 2008, 288 s., ISBN: 978-0750685979.
- [2] GUTIERREZ, J. A.: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003. 679 s. ISBM 0-7381-3677-5.
- [3] Jennic, ZigBee – e-learning. Jennic Technology for a Changing World [online] [cit 10.prosinec 2007]. Dostupné z :<http://www.jennic.com/elearning/zigbee/index.htm>
- [4] JURČÍK, K.: The IEEE 802.15.4 OPNET Simulation Model: Reference Guide v2.0 Polytechnic Institute of Porto (ISEP-IPP) [cit 29.květen 2007] Dostupné z : <http://www.hurray.isep.ipp.pt>
- [5] KOTON, J., ČÍKA P., KŘIVÁNEK V., Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee, ACCESS SERVER [online]. [cit 18. duben 2006]. Dostupné z : <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2006032001>
- [6] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, IEEE Computer Society IEEE 802.15.4 IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) 8 September 2006 305s
- [7] MISIC, J., MISIC, V.: *Wireless Personal Area Networks: Performance, Interconnection, and Security with IEEE 802.15.4*, Wiley, 2008, 336 s., ISBN: 978-0470518472.
- [8] OPNET Technologies, Inc. *Internetové stránky sdružení*, [cit. prosinec 2008]. Dostupné z : <http://www.opnet.com/>
- [9] Radiocrafts Embedded Wireless Solutions [cit.květen2009]. Dostupné z: [www.radiocrafts.com](http://www.radiocrafts.com)
- [10] STAUDEK , J., WPAN, Wireless Personal Area Networks [cit. jaro 2008]. Dostupné z : [http://www.fi.muni.cz/usr/staudek/vyuka/PA151/10\\_wpan.ps.pdf](http://www.fi.muni.cz/usr/staudek/vyuka/PA151/10_wpan.ps.pdf)
- [11] VOJÁČEK, A., ZigBee - novinka na poli bezdrátové komunikace. HW server [online]. [cit. 8. červen 2005]. Dostupné z : [http://hw.cz/Rozhrani/ART1299- ZigBee---novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html](http://hw.cz/Rozhrani/ART1299-ZigBee---novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html)

[12] Zigbee Alliance. *Internetové stránky sdružení*, [cit. prosinec 2008]. Dostupné z:  
*<http://www.zigbee.org/>*

## 9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>ACL</b>	Access Control List, kontrolní seznam přístupů
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard, šifrování symetrickým klíčem
<b>CAP</b>	Contention Access Period, doba soupeření o přístup
<b>CFP</b>	Contention Free Period, doba volného přístupu
<b>CSMA-CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, metoda vícenásobného přístupu a naslouchání nosné
<b>FFD</b>	Full-Function Device, plně funkční zařízení
<b>GTS</b>	Guarenteed Time Slots, garantované časové sloty
<b>HVAC</b>	Heating, Ventilating, and Air Conditioning,
<b>LR-WPAN</b>	Low-data-Rate Wireless Personal Area Network, nízko-rychlostní bezdrátová osobní síť
<b>PAN</b>	Personal Area Network, osobní síť
<b>QPSK</b>	Offset Quadrature Phase-Shift Keying, ofsetové kvadraturní fázové klíčování
<b>RFD</b>	Reduced-Function Device, zařízení se sníženou funkčností
<b>SD</b>	Superframe Duration, délka superrámce
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network, bezdrátová osobní síť
<b>ZC</b>	ZigBee Coordinator, koordinátor ZigBee
<b>ZDO</b>	ZigBee Device Object, objekty ZigBee zařízení
<b>ZED</b>	ZigBee End Device, koncový objekt ZigBee
<b>ZR</b>	ZigBee Router, ZigBee směrovač