

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Otvorená informatika



Diplomová práce

Veľkoobjemové úložisko emailov

Bc. Patrik Lenárt

Vedúci práce: Ing. Ján Šedivý, CSc.

Študijný program: Otvorená informatika, Magisterský

Obor: Softwarové inžinierstvo

13. marca 2011

Pod'akovanie

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracoval samostatne a použil som iba podklady uvedené v priloženom zozname.

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

V Prahe dňa 1.3.2011

.....

Abstract

Abstrakt

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Osnova	1
2	Databázové systémy	3
2.1	História	3
2.2	ACID	4
2.3	Škálovanie databázového systému	4
2.3.1	Replikácia	5
2.3.2	Rozsekávanie dát (sharding)	6
2.4	BASE	7
2.5	CAP	8
2.5.1	Konzistencia verzus dostupnosť	9
2.6	Eventuálna konzistencia	10
2.6.1	Konzistencia z pohľadu klienta	10
2.6.2	Konzistencia na strane servera	11
2.7	MapReduce	12
2.7.1	Príklad	13
2.7.2	Architektúra	13
2.7.3	Použitie	13
2.8	Zhrnutie kapitoly	13
3	Definícia problému	15
3.1	Archivácia elektronickej pošty	15
3.2	Požiadavky na systém	16
3.2.1	Obecne vlastnosti	16
3.2.1.1	Rozšíriteľnosť	16
3.2.1.2	Dostupnosť	16
3.2.1.3	Nízkonákladová administrácia	17
3.2.2	Funkčné požiadavky	17
4	NoSQL	19
4.1	Typy NoSQL databázových systémov	19
4.1.1	Kľúč-hodnota (Key-value)	20
4.1.2	Stĺpcovo orientovaný model (Column [Family] Oriented)	20
4.1.2.1	Stĺpcovo orientovaný model v NoSQL	21

4.1.3	Dokumentový model	21
4.1.4	Grafový model	21
4.2	Porovnanie NoSQL systémov	21
4.2.1	Dátový a dotazovací model	22
4.2.2	Škálovateľnosť a schopnosť odolávať chybám	22
4.2.3	Elastickosť	23
4.2.4	Konzistencia dát	24
4.2.5	Perzistentné úložisko	24
4.3	Výber NoSQL systémov	25
4.4	Cassandra	26
4.4.1	Dátový model	26
4.4.2	ARchitektúra	26
4.5	Hadoop	26
4.6	Hadoop vs. Cassandra	26
5	Analýza a návrh riešenia	27
6	ZMAZAT	29
6.1	Komponenty IEEE 802.15.4	29
6.2	Sieťová topológia	30
6.3	Architektúra	30
6.3.0.1	Typy rámcov	30
6.4	Architektúra	31
6.5	Sieťové komponenty	31
6.6	Sieťová topológia	32
6.7	XBee Series 1	32
6.7.1	Technické parametre	33
7	Teória antén	35
7.0.2	Definícia pojmov	35
7.0.3	Propagácia rádiového signálu	36
7.0.3.1	Pojmy	36
7.0.4	Typy antén	37
7.0.5	Stratovosť voľného priestoru (Free-space path loss)	37
7.0.6	Antény a simulácia	38
8	Analýza a návrh riešenia	41
8.0.6.1	Výkonová závislosť	41
8.0.7	Štruktúra MF	43
8.0.7.1	Štruktúra modulu NIC	44
9	Realizácia	49
9.0.8	Model kolízie	50
9.0.8.1	Popis kolízie	51

10 Testovanie	55
10.0.9 Testy zamerané na pohyb XBee zariadení	55
10.0.10 Testy s kolíziou	56
11 Záver	61
Literatúra	63
A Zoznam použitých skratiek	65
B Inštalačná a užívateľská príručka	67
B.0.11 Inštalácia simulátoru OMNeT++ pre platformu Linux	67
B.0.12 Inštalácia mnou modifikovaného Mobility Frameworku	67
B.0.13 Práca s modelom IEEE 802.15.4	68
C Obsah priloženého CD	69

Zoznam obrázkov

4.1	Pozícia dátového modelu z pohľadu jeho škálovania podľa veľkosti a komplexnosti. Zdroj: Neo4J a NOSQL overview and the benefits of graph databases, Emil Eifrem, prezentácia.	23
4.2	24
6.1	Topológia štandardu 802.15.4	30
6.2	Štruktúra štandardu 802.15.4	31
6.3	Štruktúra štandardu ZigBee	32
7.1	Model rádiového systému	36
7.2	Charakteristika zisku antény Whip	38
7.3	Model zoslabenia signálu	38
8.1	Popis výkonov a zisku u antén pre vysieláč a prijímač	43
8.2	Štruktúra stanice v OMNeT++	44
8.3	Štruktúra NIC v OMNeT++	46
8.4	Prechody medzi stavmi v module snrEval	47
9.1	Model kolízie	52
9.2	Kolízia na MAC vrstve	53
10.1	Pohyb na vzdialenosť 5m, vysielací výkon 1mW	57
10.2	Pohyb na vzdialenosť 5m, vysielací výkon 10mW	58
10.3	Pohyb na vzdialenosť 250m, vysielací výkon 10mW	58
10.4	Pohyb na vzdialenosť 250m, vysielací výkon 1mW, rotácia okolo vlastnej osi	59
C.1	Výpis priloženého CD	69

Zoznam tabuliek

6.1	Špecifikácia výkonu a rýchlosti	33
6.2	Obecné parametre	33
6.3	Sieťové parametre	33
10.1	Stratovosť rámcov	56
10.2	Prípad č. 1	56
10.3	Prípad č. 2	57

Kapitola 1

Úvod

S neustálym rozvojom informačných technológií súčasne narastá objem informácií, ktoré je potrebné spracúvať. Tento fakt podnietil vznik databázových systémov, ktoré slúžia na organizáciu, uchovávanie a prácu s veľkým objemom dát. V dnešnej dobe existuje množstvo databázových systémov, ktoré sa navzájom líšia svojou architektúrou, dátovým modelom, výrobcom atď.

Od začiatku sedemdesiatych rokov 20. storočia sú v tejto oblasti dominantou relačné databázové systémy (Relational Database Management Systems). Vďaka neustálemu prudkému rozvoju internetových technológií a rapídneho rastu dát v digitálnom univerze [7] začínajú byť tieto systémy nepostačujúce. Medzi hlavné faktory pre výber relačného databázového systému doposiaľ patrili výrobca, cena a pod. V dnešnej dobe so vznikom moderných aplikácií (napríklad sociálne siete, dátové sklady, analytické aplikácie a iné), požadujeme od týchto systémov vlastnosti ako vysoká dostupnosť, horizontálna rozšíriteľnosť a schopnosť pracovať s obrovským objemom dát (petabyte). Novo vznikajúce databázové systémy, spĺňajúce tieto požiadavky sa spoločne označujú pod názvom NoSQL (Not Only SQL). Pri ich výbere je v tomto prípade dôležité porozumenie architektúry, dátového modelu a dát, s ktorými budú tieto systémy pracovať.

Táto práca si kladie za cieľ viacero úloh, ktorými sú pochopenie a popis základných konceptov, ktoré tieto systémy využívajú, určenie kritérií vďaka ktorým môžeme tieto systémy navzájom porovnávať. Ďalej je úlohou analyzovať a popísať požiadavky pre systém veľkoobjemového úložiska elektronickej pošty, ktorý bude schopný spracovávať milióny emailov. Poslednou úlohou je na základe našich požiadaviek vybrať, čo najlepšie odpovedajúci NoSQL systém a s jeho použitím implementovať prototyp aplikácie.

1.1 Osnova

...

Kapitola 2

Databázové systémy

V tejto časti stručne popíšeme históriu vzniku databázových systémov, základné problémy pri tvorbe distribuovaných relačných databázových systémov a uvedieme možné spôsoby ich riešenia. Ďalej popíšeme základné koncepty, ktoré sa využívajú pri tvorbe distribuovaných databázových systémov a techniku MapReduce, ktorá slúži na prácu s veľkým objemom dát uloženým v systémoch NoSQL.

2.1 História

V polovici šesťdesiatych rokov 20. storočia bol spoločnosťou IBM vytvorený informačný systém IMS (Information Management System), využívajúci hierarchický databázový model. IMS je po rokoch vývoja využívaný dodnes. Po krátkej dobe, v roku 1970, publikoval zamestnanec IBM, Dr. Edger F. Codd článok pod názvom „A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks“ [5], ktorým uviedol relačný databázový model. Prvým databázovým systémom, ktorý tento model implementoval bol System R od IBM. Tento systém používal jazyk pod názvom SEQUEL, ktorý je predchodca dnešného SQL (Structured Query Language) slúžiacého na manipuláciu a definíciu dát v relačných databázových systémoch. Tento koncept sa stal základom pre relačné databázové systémy, ktoré vďaka širokej škále vlastností ako napríklad podpora transakcií, dotazovací jazyk SQL, patria v dnešnej dobe medzi najpoužívanejšie riešenia na trhu.

V minulosti boli objem dát, s ktorým tieto systémy pracovali a výkon hardvéru mnohonásobne nižšie. Dnes napriek tomu, že výkon procesorov a veľkosť pamäťových zariadení rapídne stúpa, je najväčšou slabinou počítačových systémov rýchlosť prenosu dát medzi pevným diskom a hlavnou pamäťou. Ako príklad si vezmeme bežnú konfiguráciu počítačového systému, ktorá obsahuje pevný disk o veľkosti 2TB a operačnú pamäť veľkosti 64Gb. Napriek týmto vysokým kapacitám tento systém bohužiaľ dokáže v daný moment spracúvať maximálne 64Gb dát, čo je zlomok veľkosti v porovnaní s kapacitou pevného disku. Vznik nových webových aplikácií napr. sociálne siete, zavádzanie cloud computingu vyžadujú od systémov podporu škálovania, ktorá zabezpečuje vysokú dostupnosť, spoľahlivosť a ich nároky na spracovávaný objem dát sa neustále zvyšujú. Tieto nové požiadavky efektívne riešia distribuované systémy pod spoločným názvom NoSQL, ktoré popisuje nasledujúca kapitola.

2.2 ACID

Relačné databázové systémy poskytujú veľkú množinu operácií, ktoré sa vykonávajú nad ich dátami. Tranzakcie [7][8] sú zodpovedné za korektné vykonanie operácií v prípade, že spĺňajú množinu vlastností ACID. Význam jednotlivých vlastností akronymu ACID je nasledovný:

- Atomicita (Atomicity) - zaisťuje, že sa daná tranzakcia vykoná celá, čo spôsobí korektný prechod systému do nového stavu. V prípade zlyhania tranzakcie nemá daná operácia žiaden vplyv na výsledný stav systému a prechod do nového stavu sa nevykoná.
- Konzistencia (Consistency) - každá tranzakcia po svojom úspešnom ukončení garantuje korektnosť svojho výsledku a zabezpečí, že systém prejde z jedného konzistentného stavu do druhého. Pojem konzistentný stav zaručuje, že dáta v systéme odpovedajú požadovanej hodnote. Systém sa musí nachádzať v konzistentnom stave aj v prípade zlyhania tranzakcie.
- Izolácia (Isolation) - operácie, ktoré prebiehajú počas vykonávania jednej tranzakcie nie sú viditeľné pre ostatné. Každá tranzakcia musí mať konzistentný prístup k dátam a to aj v prípade, že u inej tranzakcii dôjde k jej zlyhaniu.
- Trvácnosť (Durability) - v prípade, že bola tranzakcia úspešne ukončená, systém musí garantovať trvácnosť jej výsledku aj v prípade jeho zlyhania.

Implementácia vlastností ACID, ktoré zaručujú konzistenciu, zvyčajne využíva u relačných databázových systémoch metódu zamykania. Tranzakcia uzamkne dáta pred ich spracovaním a spôsobí ich nedostupnosť až do jej úspešného ukončenia, poprípade zlyhania. Pre databázový systém, od ktorého požadujeme vysokú dostupnosť alebo prácu pod zvýšenou záťažou, tento model nie je vyhovujúci. Zámky spôsobujú stavy, kedy ostatné operácie musia čakať na ich uvoľnenie. Jeho náhradou je Multiversion concurrency control, ktorý využívajú aj niektoré NoSQL databázové systémy.

Tranzakcie splňujúce vlastnosti ACID využívajú v distribuovaných databázových systémoch ¹ dvojfázový potvrdzovací protokol (two-phase commit protocol). Distribuovaný databázový systém využívajúci tento protokol, ktorého tranzakcie splňujú vlastnosť ACID zaručuje konzistentnosť a je schopný odolávať čiastočným poruchám na sieti alebo v prípade čiastočnej poruchy systému. Vlastnosti ACID nekladú žiadnu záruku na dostupnosť systému. Takéto systémy sú vhodné pre Internetové tranzakcie, aplikácie využívajúce platby apod. Existuje množstvo aplikácií, u ktorých má dostupnosť prednosť pred konzistenciou. Pri tvorbe distribuovaných databázových systémov je preto potrebné upustiť z niektorých ACID vlastností, čo spôsobilo vznik nového modelu pod názvom BASE.

2.3 Škálovanie databázového systému

Obecná definícia pojmu škálovateľnosť [2] je náročná bez vymedzenia kontextu, ku ktorému sa vzťahuje. V tejto práci budeme škálovateľnosť chápať v kontexte webových aplikácií,

¹Distribuované databázové systémy sú tvorené pomocou viacerých samostatne operujúcich databázových systémov, ktoré nazývame uzly a môžu komunikovať pomocou siete a užívateľovi alebo aplikácii sa javia ako jeden celok [ref].

ktorých dynamický vývoj kladie na databázové systémy viacero požiadavkov. Medzi hlavné patrí neustála potreba zvyšovania diskového priestoru a teda zvyšovanie veľkosti databázy alebo schopnosť obslúžiť čoraz vyšší počet užívateľov aplikácie (zvýšenie počtu operácií pre čítanie a zápis do databázového systému). V tomto prípade pod pojmom škálovateľnosť databázového systému rozumieme vlastnosť, vďaka ktorej je systém schopný spracúvať narastajúce požiadavky webovej aplikácie v definovanom čase intervalu. Typicky pridaním nových systémov, čo spôsobuje vznik distribuovaného databázového systému.

Škálovateľnosť delíme na vertikálnu a horizontálnu. Táto metóda dodáva systému nasledujúce vlastnosti [5]:

- umožňuje zväčšiť veľkosť celkovej kapacity databázy a táto zmena by mala byť transparentná z pohľadu aplikácie na dáta.
- zvyšuje celkové množstvo operácií, pre čítanie a zápis dát, ktoré je systém schopný vykonať v danú časovú jednotku.
- v niektorých prípadoch môže zaručiť, že systém neobsahuje jednotku, ktorá by v prípade zlyhania spôsobila nedostupnosť celého systému (single point of failure).

Vertikálna škálovateľnosť je metóda, ktorá sa aplikuje pomocou zvyšovania výkonnosti hardvéru, tj. do systému sa pridáva operačná pamäť, rýchlejšie viacjadrové procesory, zvyšuje sa kapacita diskov. Jednou z nevýhod tohoto riešenia je jeho vysoká cena a možná chvíľková nedostupnosť systému. Proces vertikálneho škálovania nad relačnou databázou obsahuje nasledujúce kroky:

- zámena hardvéru za výkonnejší
- úprava súborového systému (napr. zrušenie žurnálu)
- optimalizácia databázových dotazov, indexovanie
- pridanie vrstvy pre kešovanie (memcached, EHCACHE, atď.)
- denormalizácia dát v databáze, porušenie normalizácie

V tomto prípade je možné naraziť na hranice Moorovho zákona [6] a na rad nastupuje horizontálna škálovateľnosť, ktorá je omnoho komplexnejšia. Horizontálnu škálovateľnosť je možné realizovať pomocou replikácie alebo metódou rozsekávania dát (sharding).

2.3.1 Replikácia

V distribuovaných systémoch sa pod pojmom replikácia rozumie vlastnosť, ktorá má za následok že sa daná informácia nachádza v konzistentnom stave na viacerých uzloch² tohoto systému. Táto vlastnosť zvyšuje dostupnosť, spoľahlivosť a odolnosť systému voči chybám.

V prípade distribuovaného databázového systému sa časť informácií uložených v databáze nachádza na viacerých uzloch. Táto vlastnosť môže napríklad zvýšiť výkonnosť operácií, ktoré

²Pod pojmom uzol v tomto prípade myslíme samostatný počítačový systém, ktorý je súčasťou distribuovaného systému

pristupujú k dátam a to tak, že dochádza k čítaniu dát z databázy paralelne z viacerých uzlov. V systéme obsahujúcom repliku dát nedochádza k strate informácií v prípade poruchy uzlu. Replikácia a propagácia zmien v systéme sú z pohľadu aplikácie transparentné. Metóda replikácie nezvyšuje pridávaním nových uzlov celkovú kapacitu databázy. Problémom tejto techniky je zápis dát, pri ktorom sa zmena musí prejaviť vo všetkých replikách. Existuje viacero metód pomocou, ktorých je možné zabezpečiť túto funkcionálnosť:

- Read one - write all, u tejto metódy sa čítanie dát prevedie z ľubovoľného uzlu obsahujúceho repliku. Zápis dát sa vykoná na všetky uzly obsahujúce repliku a v prípade, že každý z nich potvrdí úspech tejto operácie, zmena sa považuje úspešná. Táto metóda nie je schopná pracovať v prípade, že dôjde k prerušeniu sieťového toku medzi uzlami (network partitioning) alebo v prípade poruchy uzlu.
- Quorum consensus - zápis na jeden uzol a následná asynchrónna propagácia repliky na ostatné uzly. Táto metóda je schopná zvládnuť stav pri ktorom dojde k prerušeniu sieťového toku alebo poruche uzlu. Implementácie využívajú algoritmy pod názvom kôrum konsenzus (quorum consensus). ???

Výber metódy replikácie čiastočne popisuje dvojicu vlastností distribuovaného databázového systému a to dostupnosť a konzistenciu. Podľa teórie s názvom CAP (viď. nasledujúca kapitola) nie je možné aby systém disponoval súčasne vlastnosťami ako dostupnosť, konzistencia dát a schopnosť odolávať poruchám v prípade chyby v sieťovej komunikácii.

V relačných databázových systémoch sa replikácia rieši pomocou techniky Master-Slave. Uzol pod názvom master slúži ako jediný databázový stroj, na ktorom sa vykonáva zápis dát a replika týchto dát je následne distribuovaná na zvyšné uzly pod názvom slave. Touto metódou sme schopný mnohonásobne zvýšiť počet operácií, ktoré slúžia pre čítanie dát z databázového systému a v prípade zlyhania niektorého zo systémov máme neustále k dispozícii kópiu dát. Slabinou tejto techniky je uzol v roli master, ktorý znižuje výkonnosť v prípade operácií vykonávajúcich zápis a zároveň môže jeho porucha spôsobiť celkovú nedostupnosť systému.

Druhým riešením je technika Multi-master, kde každý uzol obsahujúci repliku je schopný zápisu dát a následne tieto preposiela zmeny ostatným. Tento mechanizmus predpokladá distribuovanú správu zamykania a vyžaduje algoritmy pre riešenie konfliktov spôsobujúcich nekonzistenciu dát.

2.3.2 Rozsekávanie dát (sharding)

Rozsekávanie dát je metóda založená na princípe, kde dáta obsiahnuté v databáze rozdelíme podľa stanovených pravidiel do menších celkov. Tieto celky môžeme následne umiestniť na navzájom rôzne uzly distribuovaného databázového systému. Táto metóda umožňuje zvýšiť výkonnosť operácií pre zápis a čítanie dát a zároveň pridávaním nových uzlov do systému sme schopný zvyšovať celkovú kapacitu databázy. V prípade, že architektúra distribuovaného databázového systému využíva túto techniku, zvýšenie výkonu jeho operácií a objemu uložených dát sa realizuje automaticky bez nutnosti zásahu do aplikácie.

Techniku rozsekávania môžeme považovať za architektúru známu pod názvom zdieľanie ničoho [8] (shared nothing). Táto architektúra sa používa pre návrh systémov využívajúcich multiprocesory. V takomto prípade sa medzi procesormi nezdieľa operačná ani disková

pamäť. Táto architektúra zabezpečuje takmer neobmedzenú škálovateľnosť systému a využíva ju mnoho NoSQL systémov ako napríklad Google Bigtable, Amazon Dynamo alebo technológia MapReduce.

Pri návrhu distribuovaných databázových systémov, s využitím tejto techniky, patrí medzi kľúčový problém implementácia funkcie spojenia (join) nad dátami, ktorá sa radšej neimplementuje. V prípade, že sa dáta nad ktorými by sme chceli túto operáciu vykonať, nachádzajú na dvoch rozdielnych uzloch prepojených sieťou, takéto spojenie by značne znížilo celkovú výkonnosť systému a viedlo by k zvýšeniu sieťového toku a záťaži systémových zdrojov.

Keďže sa dáta nachádzajú na viacerých uzloch systému, hrozí zvýšená pravdepodobnosť hardverového zlyhania, poprípade prerušenie sieťového spojenia a preto sa táto technika často kombinuje s pomocou využitia replikácie.

V prípade použitia tejto techniky v relačných databázach, je nutný zásah do logiky aplikácie. Dáta uložené v tabuľkách relačnej databáze zachytávajú vzájomné relácie. Týmto spôsobom dochádza k celkovému narušeniu tohoto konceptu. Príkladom môže byť tabuľka obsahujúca zoznam zamestnancov, ktorú rozdelíme na samostatné celky. Každá tabuľka bude reprezentovať mená zamestnancov, ktorých priezvisko začína rovnakým písmenom abecedy a zároveň sa bude nachádzať na samostatnom databázovom systéme. Táto technika so sebou prináša problém, v ktorom je potrebné nájsť vhodný kľúč podľa, ktorého budeme dáta rozsekať a zabezpečíme tak rovnomerné zaťaženie uzlov daného systému. Existuje viacero metód [6] a to:

- segmentácia dát podľa funkcionality - dáta, ktoré sme schopný popísať spoločnou vlastnosťou ukladáme do samostatných databáz a tieto umiestňujeme na rozdielne uzly systému. Príkladom môže byť samostatný uzol spravujúci databázu pre užívateľov a iný uzol s databázou pre produkty. Túto metódu spracoval Randy Shoup³ [10], architekt spoločnosti eBay.
- rozsekanie podľa kľúča - v dátach hľadáme kľúč, podľa ktorého sme schopný ich rovnomernej distribúcie. Následne na tento kľúč aplikujeme hašovaciu funkciu a na základe je výsledku tieto dáta umiestňujeme na jednotlivé uzly.
- vyhľadávacia tabuľka - jeden uzol v systéme slúži ako katalóg, ktorý určuje na ktorom uzle sa nachádzajú dané dáta. Tento uzol zároveň spôsobuje zníženie výkonu a v prípade jeho havárie spôsobuje nedostupnosť celého systému.

Replikácia a rozsekanie dát patria medzi kľúčové vlastnosti využívané v NoSQL systémoch.

2.4 BASE

Akroným BASE [1] bol prvýkrát použitý v roku 1997 na sympóziu SOSP (ACM Symposium on Operating Systems Principles). BASE tvoria nasledujúce slovné spojenia:

³“If you can't split, you can't scale it.” – Randy Shoup, Distinguished architect Ebay

- bežne dostupný (Basically Available) - systém je schopný zvládť jeho čiastočné zlyhanie za cenu nižšej complexity.
- zmiernený stav (Soft State) - systém nezaručuje trvácnosť dát za cieľom zvýšenia výkonu.
- čiastočná konzistencia (Eventually Consistent) - je možné na určitú dobu tolerovať nekorektnosť dát, ktoré musia byť po určitom časovom intervale konzistentné.

Tento model poľavil na požiadavku zodpovednom za konzistenciu dát, s tým že dosiahol vyššiu dostupnosť v distribuovanom databázovom systéme aj v prípade čiastočného zlyhania. Prakticky môžeme každý systém klasifikovať ako systém spĺňajúci vlastnosti ACID alebo BASE.

BASE umožňuje horizontálne škálovanie relačných databázových systémov bez nutnosti použitia distribuovaných transakcií. Použitie tejto metódy je možné vďaka rozsekávaniu dát s využitím metódy segmentácie dát podľa funkcionality, ďalej sa využívajú perzistentné fronty a princípy udalosťami riadenej architektúry (event driven architecture) [9]. Poľavením na požiadavku konzistencie dát sa v tomto prípade myslí stav, že dáta budú konzistentné po uplynutí určitého časového intervalu.

Systém obsahujúci čiastočnú konzistenciu dát je bankomatový systém. Po vybratí určitej čiastky z účtu, sa korektná informácia o aktuálnom zostatku účtu môže zobraziť až za niekoľko dní, kdežto transakcia ktorá túto zmenu vykonala musí spĺňať vlastnosti ACID. Medzi podobné webové aplikácie, u ktorých sa nepožadujú všetky vlastnosti ACID patria nákupný košík spoločnosti Amazon, zobrazovanie časovej osi aplikácií Twitter poprípade indexy Googlu. Ich nedostupnosť by znamenala obrovské finančné straty, napríklad v prípade, zlyhanie vyhľadávania pomocou Googlu by znamenalo zobrazenie nižšieho počtu reklám, nedostupnosť nákupného košíka v Amazone by spôsobila pokles predaja atď.

Aplikácia vyššie popísaných techník na relačné databázové systémy môže byť netrivialnou úlohou. Relačný model, je spôsob reprezentácie dát, ktorý umožňuje efektívne riešiť určité typy problémov, preto snaha prispôbiť tento model každému problému je nezmyselná. V tomto prípade, musíme uvažovať alternatívne riešenia, medzi ktoré patria systémy NoSQL.

2.5 CAP

Moderné webové aplikácie kladú na systémy požiadavky, medzi ktoré patrí vysoká dostupnosť, konzistencia dát a schopnosť odolávať chybám ⁴. Dr. Brewer v roku 2000 nastolil myšlienku dnes známu pod názvom teória CAP [3], ktorá tvrdí že je možné súčasne dosiahnuť len dvojicu z týchto vlastností. V roku 2002 platnosť tejto teórie pre asynchrónnu sieť matematicky dokázali Lynch a Gilbert [?]. Modelu asynchrónnej siete odpovedá svojimi vlastnosťami sieť Internet. Akroným CAP tvoria nasledujúce vlastnosti:

- Konzistencia (Consistency) - distribuovaný systém je v konzistentnom stave ak sa zmena aplikuje na všetky relevantné uzly systému v rovnakom čase.

⁴Chybou v tomto kontexte myslíme, prerušenie sieťovej komunikácie medzi uzlami daného systému, poprípade hardverová porucha uzlu???

- Dostupnosť (Availability) - distribuovaný systém je dostupný ak každý jeho uzol, ktorý pracuje korektne je schopný pri prijatí požiadavku zaslať odpoveď. V spojení s toleranciou chýb, tato vlastnosť hovorí, že prípade ak nastane sieťový problém ⁵ každý požiadavok bude vykonaný.
- Tolerancia chýb (Partition Tolerance) - uzly distribuovaného systému navzájom komunikujú pomocou siete, v ktorej hrozí stráta správ. V prípade vzniku sieťovej poruchy dané uzly medzi sebou navzájom nedokážu komunikovať. Táto vlastnosť podľa definície vid'. Gilbert a Lynch tvrdí, že v prípade vzniku zlyhania sieťovej komunikácie medzi niektorými uzlami musí byť systém schopný naďalej pracovať korektne. Neexistuje reálny distribuovaný systém, ktorého uzly na vzájomnú komunikáciu využívajú sieť a nedochádza pri tom k strate správ, teda k poruchám sieťovej komunikácie.

Pravdepodobnosť, že dôjde k zlyhaniu ľubovoľného uzlu v distribuovanom systéme exponenciálne narastá s počtom pribúdajúcich uzlov.

$$P(\text{ubovonhozlyhania}) = 1 - P(\text{individuálny uzol nezlyh})^{počet uzlov}$$

2.5.1 Konzistencia verus dostupnosť

V distribuovanom systéme nie je možné zaručiť súčasne vlasnosť konzistencie a dostupnosti. Ako príklad si predstavme distribuovaný systém, ktorý zaručuje obe vlasnosti aj v prípade sieťového prerušenia. Tento systém obsahuje tri uzly A,B,C, na ktorých sa nachádzajú identické (replikované) dáta. Ďalej uvažujme, že došlo k sieťovému prerušeniu, ktoré rozdelilo uzly na dva samostatné celky A,B a C. V prípade, že uzol C obdrží požiadavok pre zmenu dát má na výber dve možnosti:

1. vykonať zmenu dát, v tomto prípade sa uzly A a B o tejto zmene dozvedia až v prípade, že bude sieťové prerušenie odstránené
2. zamietnuť požiadavok na zmenu dát, z dôvodu že uzly A a B sa o tejto zmene nedozvedia až do jej odstránenia

V prípade výberu možnosti číslo 1 zabezpečíme dostupnosť systému naopak v prípade možnosti číslo 2 jeho konzistenciu, avšak nie je možný súčasný výber oboch riešení.

Ak od daného systému tolerujúceho sieťové prerušenia požadujeme konzistenciu na úkor dostupnosti jedná sa o alternatívu CP. Takýto systém zabezpečí atomickosť operácií ako zápis a čítanie a zároveň sa môže stať, že na určité požiadavky nebude schopný odpovedať. Medzi takéto systémy môžeme zaradiť distribuovaný databázový systém využívajúci dvojfázový potvrdzovací protokol (2PC).

V prípade, že poľavíme na požiadavku konzistencie tak takýto systém bude vždy dostupný aj napriek sieťovým prerušeniam. V tomto prípade sa jedná o model AP. Je možné, že v takomto systéme bude dochádzať ku konfliktným zápisom alebo operácie čítania budú po určitú dobu vracať nekorektné výsledky. Tieto problémy s konzistenciou sa v distribuovaných databázových systémoch riešia napríklad pomocou metódy vektorový časovač (Vector

⁵týmto sa nemyslí porucha uzlu

clock) alebo na aplikačnej úrovni. Príkladom systému patriaceho do tejto kategórie je služba DNS.

V prípade, že systém nebude schopný zvládať sieťové prerušenia tak takýto systém bude spĺňať požiadavok konzistencie a dostupnosti, varianta CA. Jedná sa o nedistribuované systémy pracujúce na jednom fyzickom hardvéri využívajúce tranzakcie.

Vyššie popísané vlastnosti nám umožnia vhodný výber distribuovaného databázového systému podľa požiadavkov našej aplikácie.

2.6 Eventuálna konzistencia

V ideálnom svete je predstava konzistencie v distribuovaných systémoch nasledovná: v prípade, že sa v systéme vykoná zmena (zápis dát), na všetkých uzloch sa táto zmena prejaví súčasne s rovnakým výsledkom. Konzistencia v distribuovanom databázovom systéme je úzko spojená s replikáciou. Keďže podľa CAP teórie distribuovaný systém nemôže súčasne spĺňať požiadavok dostupnosti, konzistencie v prostredí s možným sieťovým prerušením, je na našom zväžení ktorú z týchto vlastností uprednostníme pri návrhu a tvorbe aplikácií. Väčšina NoSQL systémov poskytuje eventuálnu konzistenciu. V nasledujúcej časti preto popíšeme rôzne typy konzistencie.

V predchádzajúcom texte sme už spomínali, že v dnešnej dobe existuje mnoho aplikácií, u ktorých je možné poľaviť na požiadavku konzistencie a funkčnosť systému nebude v tomto prípade ohrozená, ak sa určitá zmena prejaví s miernym oneskorením. Takáto konzistencia je odlišná od definície vlastností ACID, kde ukončenie tranzakcie spôsobí, že systém sa nachádza v konzistentom stave. Na konzistenciu sa môžeme pozeráť z dôch pohľadov. Prvým je klientský pohľad na strane zadávateľa problému resp. programátora, ktorý rozhodne aká je závažnosť zmien, ktoré sa budú vykonávať v systéme. Druhý pohľad je serverový, ktorý zabezpečuje technické riešenie a implementáciu techník zodpovedných za konzistenciu v distribuovaných databázových systémoch.

2.6.1 Konzistencia z pohľadu klienta

Pre potrebu nasledujúcich definícií uvažujme distribuovaný databázový systém, ktorý tvorí úložisko dát a tri nezávislé procesy A,B,C, ktoré môžu v danom systéme zmeniť hodnotu dátovej jednotky, tj. vykonať zápis. Tieto procesy môžu zároveň zo systému hodnotu dátovej jednotky prečítať. Na základe toho ako dané procesy pozorujú nezávisle zmeny systému delíme konzistenciu [?] na:

Silná konzistencia (Strong consistency) - proces A vykoná zápis. Po jeho ukončení je nová hodnota dátovej jednotky dostupná všetkým procesom A, B, C, ktoré k nej následne pristúpia - vykonajú operáciu čítania. Túto konzistenciu zabezpečujú tranzakcie s vlastnosťami ACID.

Slabá konzistencia (Weak consistency) - proces A vykoná zápis novej hodnoty do dátovej jednotky. V takomto prípade systém negarantuje, že následne pristupujúce procesy A, B, C k tejto jednotke vrátia jej novú hodnotu. Definujeme pojem „nekonzistentné okno“ zabezpečujúci, že po uplynutí určitej doby sa táto nová hodnota dátovej jednotky prejaví vo všetkých procesoch, ktoré k nej pristúpia.

Eventuálna konzistencia (Eventual consistency) - je to špecifická forma slabej konzistencie. V tomto prípade systém garantuje, že ak sa nevykoná žiadna nová zmena hodnoty dátovej jednotky, po určitom čase budú všetky procesy prístupujúce k tejto jednotke schopné vrátiť jej korektnú hodnotu. Tento model má viacero variácií, niektoré z nich popíšeme v nasledujúcej časti textu.

Read-your-write consistency - v prípade, že proces A zapíše novú hodnotu do dátovej jednotky, žiadny z jeho následujúcich prístupov k tejto jednotke nevráti staršiu hodnotu ako jeho posledný zápis.

Session consistency - v tomto prípade prístupuje proces k systému v kontexte relácií. Po dobu trvania relácie platí predchádzajúci typ konzistencie. V prípade zlyhania relácie sa vytvorí nová, v ktorej môže systém vrátiť hodnotu dátovej jednotky, zapísanú pred vznikom predchádzajúcej relácie.

Monotonic read consistency - v prípade, že proces vrátil určitú hodnotu dátovej jednotky, tak v každom ďalšom prístupe, nemôže nastať situácia, kde by vrátil predchádzajúcu hodnotu dátovej jednotky.

Tieto typy konzistencie je možné navzájom kombinovať a ich hlavným cieľom je zvýšiť dostupnosť distribuovaného systému na úkor toho, že poľavíme na požiadavkách konzistencie. Príkladom môže byť asynchrónna replikácia v modernom relačnom databázovom systéme, ktorá spôsobí, že systém bude eventuálne konzistentný.

2.6.2 Konzistencia na strane servera

Kôrum je minimálny počet hlasov, ktorý musí obdržať distribuovaná tranzakcia aby mohla následne vykonať operáciu v distribuovanom systéme. Technika založená na protokoloch kvôra (quorum-based protocols) je používaná na vykonávanie konzistentných operácií v distribuovaných databázových systémoch.

Definujme nasledujúcu terminológiu:

- N - počet uzlov, ktoré obsahujú repliku dát
- W - počet uzlov obsahujúcich repliku, na ktorých sa musí vykonať zápis, aby bola zmena úspešne potvrdená
- R - počet uzlov s replikou, ktoré musia vrátiť hodnotu dátového objektu v prípade operácie čítanie

Rôzna konfigurácia týchto parametrov zabezpečí rozdielnu výkonnosť a dostupnosť distribuovaného systému. Uvažujme nasledujúce príklady, kde $N = 3$.

1. $R = 1$ a $W = N$, v takomto prípade zabezpečíme že systém bude optimalizovaný pre operácie čítania dát. Operácie budú konzistentné, pretože uzol z ktorého dáta čítame sa prekrýva s uzlami na ktorých vykonávame zápis. Nevýhodou tohoto modelu je, že v prípade nedostupnosti všetkých replík nebude možné do systému zapisovať. V prípade systémov, kde vyžadujeme rýchle čítanie a na systém je obrovský počet požiadavok čítania sa môže hodnota N pohybovať v stovkách až tisícoch, závisí to od počtu uzlov v systéme.

2. $W = 1$ a $R = N$, tento prípad je vhodný pre systémy u ktorých požadujeme rýchly zápis. Tento model môže spôsobiť stratu dát v prípade, že systém s replikou na ktorú sa vykoná zápis zlyhá.
3. $W + R \leq N$, tento model spôsobí, že uzly, na ktoré sa vykonáva zápis a čítanie sa neprekrývajú, z čoho vyplýva u distribuovaného databázového systému vlastnosť eventuálnej konzistencie.

Nekonzistentnosť dát, môže byť tolerovaná v distribuovaných systémoch, ktoré sú vysoko škálovateľné za cieľom dosiahnutia lepšieho výkonu operácií, ktoré slúžia pre zápis a čítanie dát, celkovej výkonnosti a dostupnosti systému. Hranica do akej miery je možné dovoliť nekonzistenciu je určená požiadavkom klientskej aplikácie a vyššie spomínané modely sa ju snažia riešiť. Väčšinu z týchto modelov implementujú NoSQL systémy.

2.7 MapReduce

Nárast diskových kapacít a množstva dát, ktoré na nich ukladáme spôsobuje jeden z ďalších problémov, ktorým je analýza a spracovanie dát. Kapacita pevných diskov sa za posledné roky mnohonásobne zvýšila v porovnaní s dobou prístupu a prenosových rýchlostí pre čítanie a zápis dát na tieto zariadenia.

Pre jednoduchosť uvažujme nasledujúci príklad, v ktorom chceme spracovať pomocou jedného počítačového systému 1TB dát uložených na lokálnom súborovom systéme, pri priemernej prenosovej rýchlosti diskových zariadení 100Mb/s. Za ideálnych podmienok by čas na prečítanie týchto dát presahoval dve a pol hodiny. Tento čas je z praktických dôvodov neprípustný. V prípade, že by sme tento 1TB dát vhodne rozdelili na sto počítačov a na každom z nich tento úsek spracovali, celková doba spracovania by sa znížila za ideálnych podmienok na necelé tri minúty. Spoločnosť Google v roku 2004 zverejnila programovací model pod názvom MapReduce [?], ktorý rieši tento problém pomocou paralelizácie výpočtu.

MapReduce je programovací model, ktorý slúži na paralelne spracovanie dát (PB). Model využíva vlastnosti paralelných a distribuovaných systémov, je optimalizovaný pre beh na klastrí, tvorenom vysokým počtom (tisíce) spotrebných počítačov. Jeho cieľom je pre programátora zastrieť všetky problémy, ktoré spôsobuje paralelizácia, poruchovosť systémov, distribúcia dát vzhľadom na ich lokalitu a rovnomerne rozvňovanie záťaže medzi systémami. Poskytuje rozhranie pre automatickú paralelizáciu a rozsiahly distribuovaný výpočet.

Pre použitie tohoto nástroja musí programátor zadať dve funkcie pod názvom map a reduce. Funkcia map na jednotlivých uzloch systému, transformuje vstupné data na základe zadaného kľúča (k_1) na medzivýsledok, ktorý obsahuje nové kľúče (g_1, \dots, g_n) a k nim odpovedajúce hodnoty. Tieto hodnoty sa zoradia podľa ich príslušnosti ku kľúčom (g_1, \dots, g_n), následne sa odošlú na uzly s funkciou reduce. Užívateľom definovaná funkcia reduce nad hodnotami priradenými pre kľúč (g_1, \dots, g_n) prevedie operáciu, ktorej typickým výsledkom je jedna výsledná hodnota.

```
map(kľúč k1, hodnota) -> list(kľúč(z g1,...,gn), hodnota2)
reduce(kľúč(z g1,...,gn), list(hodnota2)) -> list(hodnota3)
```

2.7.1 Príklad

? histogram slov

2.7.2 Architektúra

Obrázok

2.7.3 Použitie

MapReduce nie je vhodný na spracovanie dát v reálnom čase, online spracovanie dát, ktoré sú citlivé na latenciu a to z dôvodu jeho optimalizácie pre dávkový beh.

Výhodou tohoto modelu je, že dokáže pracovať s neštruktúrovanými dátami. Jeho implementácia spoločnosťou Google, ktorá zároveň využíva distribuovaný súborový systém GFS nie je verejná. V rámci hnutia NoSQL vzniklo open-source riešenie pod názvom Hadoop, ktoré implementuje tento model na vlastnom distribuovanom súborovom systéme HDFS. Zároveň vznikli frameworky ako HIVE alebo PIG, ktoré sú nadstavbou modelu MapReduce, majú syntax podobnú jazyku SQL a využívajú ich NoSql databázové systémy pre spracovanie dát.

2.8 Zhrnutie kapitoly

Cieľom tejto časti bolo pochopiť základné princípy, ktoré platia v distribuovaných databázových systémoch a sú súčasťou systémov NoSQL. Taktiež sme identifikovali problémy, ktoré môžu nastať v prípade tvorby distribuovaných relačných databázových systémov a stručne popísali možnosti ich riešení.

Kapitola 3

Definícia problému

Množstvo digitálnych informácií, každým rokom prudko narastá. Podľa štatistík spoločnosti IDC [7] v roku 2006 dosahovala kapacita digitálneho univerza veľkosť 161 exabytov. Podiel elektronickej pošty bez spamu, tvoril 3% z tohoto objemu. Podľa odhadov na rok 2010 mala kapacita digitálneho univerza dosiahnuť veľkosť 988 EB (exabyte), čo je takmer šesťnásobok nárastu pôvodnej kapacity v období štyroch rokov. V rozmedzí rokov 1998 až 2006 sa mal počet schránok elektronickej pošty zvýšiť z 253 miliónov na 1.6 miliardy. Predpoveď IDC ďalej uvádzala, že po ukončení roku 2010 tento počet presiahne hodnotu dvoch miliard. Počas obdobia medzi rokmi 1998 až 2006 celkový počet odoslaných správ elektronickej pošty rástol trikrát rýchlejšie ako počet jej užívateľov, dôvodom tohoto prudkého nárastu bola nevyžiadaná elektronická pošta, nazývaná spam. Predpokladá sa, že až 85% dát z celkového odhadovaného objemu 988 EB budú spracovávať, prenášať alebo zabezpečovať organizácie. Napriek tejto explózii digitálnych informácií je potrebné správne porozumieť hodnote týchto dát, nájsť vhodné metódy pre ich ukladanie do pamäti počítačových systémov, ich archiváciu a to tak aby sme ich mohli ďalej spracúvať a efektívne využiť. Táto časť práce si preto kladie za cieľ pochopiť štruktúru dát, ktoré reprezentujú elektronickú poštu tj. emaily a následne pomocou využitia vhodných databázových technológií popísať a navrhnúť model systému pre ich archiváciu.

3.1 Archivácia elektronickej pošty

S neustálym nárastom informácií obsiahnutých v digitálnom univerze, sa zároveň zvyšuje objem dát, ktorý reprezentuje elektronickú poštu. Je preto potrebné porozumieť štruktúre emailových správ a následne ich vhodne spracovať. Tieto dáta je potrebné uložiť tak aby sme dosiahli úsporu diskového priestoru, boli sme nad nimi schopný vykonávať operácie ako fulltextové vyhľadávanie, zber údajov pre tvorbu štatistík alebo ich opätovné sprístupnenie. Emaily obsahujú čoraz viac podnikových obchodných infomácií a iný dôležitý obsah, z tohto dôvodu musia byť organizácie všetkých rozmerov schopné uchovávať tento obsah pomocou vhodných archivačných nástrojov. S problémom archivácie zároveň úzko súvisí problém bezpečnosti. Pod pojmom bezpečnosti v tejto oblasti máme na mysli hlavne ochranu proti nevyžiadanej pošte tj. spamu, spyware, malware a phishingu. Na boj proti týmto hrozbám využívajú organizácie anti-spamové a anti-vírusové systémy. Možné dôvody prečo archivovať elektronickú poštu sú následovne: ??? strucne popisat jednotlivé pojmy

- súkromie dát
- regulatory compliance
- e-discovery
- knowledge management
- self-service for end users
- disaster recovery

3.2 Požiadavky na systém

V nasledujúcej časti popíšeme vlastnosti systému, ktorý bude slúžiť na archiváciu veľkého objemu emailových správ.

3.2.1 Obecne vlastnosti

Primárnym požiadavkom na systém je jeho rozširiteľnosť, dostupnosť a nízkonakladová administrácia. Predpokladané množstvo uložených dát v tomto systéme bude dosahovať desiatky až stovky TB (terabyte). Takúto kapacitu dát nie je možné uchovať na bežne prístupnom spotrebnom hardvéri (commodity hardware). Systém musí byť neustále dostupný a dáta zalohované v prípade vzniku havárie niektorej z jeho častí. Nad uloženými dátami, je potrebné vykonávať výpočtovo náročné operácie napr. generovanie štatistík. Tieto požiadavky prirodzene implikujú využitie distribuovaného databázového systému. Medzi hlavných kandidátov, vďaka ktorým sme tieto požiadavky schopný vyriešiť patria NoSQL databázové systémy, ktorých zrovnanie popíšeme v nasledujúcej kapitole.

3.2.1.1 Rozširiteľnosť

Predpokladáme použitie bežne dostupného spotrebného hardvéru, namiesto superpočítačov. Systém musí byť schopný horizontálneho škálovania, ktoré využijeme pre zvýšenie celkovej kapacity dátového úložiska systému a na prípadné efektívnejšie spracovanie dát pomocou techniky MapReduce. U databázového systému je nutná podpora replikácie, ktorá zvýši výkonnosť operácií pre čítanie a zápis do systému a vďaka nej nebude nutné riešiť zálohovanie systému pomocou externého riešenia.

3.2.1.2 Dostupnosť

Systém musí byť neustále dostupný a schopný odolávať poruchám v sieťovej komunikácii (ang. network partitions), preto je vhodné aby sa dáta replikovali vo vnútri datacentra a následne aspoň medzi dvoma datacentrami, ktoré budú umiestnené na geograficky odlišných miestach.

3.2.1.3 Nízkonákladová administrácia

Bolo by vhodné ak by systém neobsahoval bod, ktorého porucha by spôsobila celkovú nedostupnosť systému (ang. single point of failure). Tento problém rieši vlasnosť decentrelizácie, ktorá zabezpečuje, že každá jednotka systému vykonáva rovnakú funkciu.

3.2.2 Funkčné požiadavky

Uložené dáta je potrebné vhodne štruktúrovať aby bolo s nimi možné efektívne pracovať. Od systému požadujeme nasledujúce funkcie:

- vyhľadávanie emailov podľa údajov tvoriacich obálku, podľa hlavičiek (predmet, odosielateľ, príjemca), podľa textu obsiahnutom v tele správy a podľa názvu prílohy
- prístup koncových užívateľov k archívu, jeho prehľadávanie, export vybraných emailov
- tvorba štatistík (ich konkrétny popis)
- expirácia emailov uložených v databáze po predom určenej dobe
- unikátne ukladanie príloh emailov z dôvodu úspory diskového priestoru

Podľa popisu databázových systémov v prechádzajúcej kapitole vidíme, že použitie relačnej databázy nie je vhodné pre riešenie nášho problému. Medzi základné problémy patrí náročné horizontálne škálovanie a problémy s dostupnosťou. Emailová správa je štruktúrovaný objekt, časť z našich funkcií systému bude s touto štruktúrou a jej časťami pracovať, rozhodli sme sa, že náš výber noSQL systému zúžime na tie systémy, ktoré využívajú stĺpcový dátový model.

Kapitola 4

NoSQL

Názov NoSQL bol prvýkrát použitý v roku 1998 ako názov relačnej databázy, ktorej implementácia bola prevažne v interpretovaných programovacích jazykoch a neobsahovala jazyk SQL. V druhej polovici roku 2009 [?] sa názov NoSQL začal používať v spojení s databázovými systémami, ktoré nepoužívajú SQL dotazovací jazyk a tradičný relačný model, sú schopné horizontálneho škálovania pracujú na bežných spotrebných počítačoch, vyznačujú sa vysokou dostupnosťou, odolávajú chybám (hw sw siet) a používajú jednoduchý alebo bezschémový dátový model.

Novo vznikajúce webové aplikácie ako napríklad sociálne siete spracúvajú čoraz väčší objem dát, musia byť schopné v daný moment obslúžiť čoraz väčší počet užívateľov a neustále dostupné. Pôvodným cieľom hnutia NoSql, bolo vytvoriť koncept, pre tvorbu moderných databáz, ktoré by boli schopné riešiť tieto nové požiadavky. Idea týchto systémov je založená na filozofii, ktorá tvrdí, že nemá zmysel sa za každú cenu snažiť prispôbiť dáta modelu relačnej databázy. Cieľom je vybrať systém, ktorý bude čo najvhodnejšie opovedať požiadavkom na uloženie a spracovanie našich dát. NoSQL obecné nepopisuje, žiaden konkrétny databázový systém, namiesto toho je to obecný názov pre nerelačné (non-relational) databázové systémy, ktoré majú odlišné vlastnosti a umožňujú prácu s rôznymi dátovými modelmi. Medzi ich ďalšie znaky patrí slabá konzistencia, možnosť spracúvať obrovské objemy dát (PB), jednoduché API a možnosť asynchrónneho zápisu dát. Tieto systémy nepodporujú operáciu databázového spojenia z dôvodu, že znižuje výkonnosť a zvyšuje zaťaženie siete (v prípade, že by sa táto operácia mala vykonať nad dátami, ktoré sa nachádzajú na rôznych uzloch). Pre tieto databázové systémy ďalej platí, že sú distribuované, podporujú automatickú replikáciu a rozsekávanie dát. Keďže sa jedná o relatívne mladé systémy, jedným z ich nedostatkov je malá podpora frameworkov, neustále sa meniace API a taktiež u mnohých chýbajúce rôzne grafické utility pre ich správu a monitoring. Medzi dátami, ktoré do nich ukladáme, je možné vytvárať vzájomné závislosti až na aplikačnej vrstve. Cieľom tohoto konceptu je riešiť spomínané novo vznikajúce problémy a zároveň koexistovať s relačnými databázovými systémami.

4.1 Typy NoSQL databázových systémov

Medzi nerelačné databázové systémy patria objektové, dokumentové, grafové, stĺpcové a databázové systémy s dátovým modelom typu kľúč-hodnota. V nasledujúcej časti stručne

popíšeme štvoricu najpopulárnejších.

4.1.1 Kľúč-hodnota (Key-value)

Tento model využíva pre ukladanie dát jednoduchý princíp. Blok dát, ktorý môže mať ľubovoľnú štruktúru je v databáze uložený pod názvom kľúča, ktorý zvykne byť reprezentovaný ako textový reťazec. Databázové systémy, využívajúce tento model majú jednoduché API rozhranie:

```
void Put(string kluc, byte[] data);  
byte[] Get(string key);  
void Remove(string key);
```

Výhodou tohoto modelu je, že databázový systém je možné ľahko škálovať. Bohužiaľ v tomto prípade sa o štruktúru uložených dát musí starať klient, čo umožňuje dosahovať vysokú výkonnosť na strane databázového systému. Tento model existuje v mnohých modifikáciách.

Relačný databázový model reprezentuje dáta pomocou tabuliek, pre ktoré definujeme ich štruktúru a ktoré sú normalizované aby sme predišli duplikácii dát. Pre zabezpečenie integrity jednotlivých entít a referenčnej integrity využívame primárne a cudzie kľúče. Tabuľky s popisom názvov ich stĺpcov a vzťahy medzi nimi nazývame databázovou schémou.

Najväčšou nevýhodou je, že databázový systém nie je schopný medzi uloženými dátami zachytiť ich vzájomné relácie, čo patrí medzi základné požiadavky pri modelovaní dát. Úložisko typu kľúč-hodnota nevyužíva normalizáciu dát, dáta sú často duplikované, vzťahy a integrita medzi nimi sa riešia až na aplikačnej úrovni. Pre vkladanie dáta a k nim asociované kľúče sa nedefinujú žiadne obmedzenia.

Medzi databázové systémy využívajúce model kľúč-hodnota patria: Dynamo, Tokyo Cabinet, Voldemort, Redis a iné.

4.1.2 Stĺpcovo orientovaný model (Column [Family] Oriented)

Množstvo databázových systémov využíva pre reprezentáciu dát tabuľky, ktoré sú tvorené stĺpcami a popísané schémou (tj. názvy stĺpcov, tabuliek). Každý riadok tabuľky reprezentuje dáta, ktoré sa nazývajú záznamy a tieto sú následne sekvenčne ukladané na pevný disk. Tento model, nazývaný riadkový, je vhodný pre systémy, u ktorých sú dominantou operácie vykonávajúce zápis. Relačné databázové systémy, využívajúce tento model sú teda optimalizované pre zápis. Pre efektívny prístup k dátam môže tento model využívať indexy.

V dnešnej dobe existuje veľký počet aplikácií, u ktorých prevládajú operácie čítania nad zápisom. Patria sem dátové sklady, customer relationship management (CRM) systémy, systémy pre vyťažovanie dát alebo analytické aplikácie pracujúce s obrovským objemom dát. Pre potreby týchto aplikácií a ich reprezentáciu dát je vhodné použiť stĺpcový model [13][14], ktorý je zároveň optimalizovaný pre operácie čítanie dát. Data reprezentujúce stĺpce sú uložené na pevnom disku v samostatných a súvislých blokoch. Načítanie dát do pamäti a následná práca s nimi je efektívnejšia ako u riadkových databáz, kde je potrebné načítať celý záznam obsahujúci hodnoty stĺpcov, ktoré sú pre nás v daný moment irelevantné.

Riadkový model obsahuje v jednom zázname dáta z rôznych domén, čo spôsobuje vyššiu entropiu v porovnaní so stĺpcovým modelom, kde sa predpokláda, že dáta v danom stĺpci pochádzajú z totožnej domény a môžu si byť podobné. Táto vlastnosť umožňuje efektívnu komprimáciu dát, ktorá znižuje počet diskových operácií. Nevýdou tohoto modelu je zápis dát, ktorý spôsobuje vyššiu záťaž diskových operácií. Optimalizáciou môže byť dávkový zápis dát.

4.1.2.1 Stĺpcovo orientovaný model v NoSQL

Predchodcom tohto nového prístupu k stĺpcovému modelu v NoSQL systémoch je databázový systém od Google - Bigtable. V tomto prípade sa využíva kombinácia modelu kľúč-hodnota so stĺpcovo orientovaným modelom. Na takýto model sa môžeme pozerať ako na viacdimenzionálne úložisko typu kľúč-hodnota. Detailnejšie tento model popíšeme v nasledujúcej kapitole.

Tento model sa používa v databázových systémoch ako Google BigTable, Hbase, Hypertable alebo Cassandra.

4.1.3 Dokumentový model

Dokumentové databáze sú založené na predchádzajúcom modeli typu kľúč-hodnota. Požiadavkom na ukládané dáta je, že musia byť v tvare ktorému rozumie databázový systém. Štruktúra vkládaných dát môže byť popísaná napríklad pomocou XML, JSON, YAML. Táto štruktúra nám následne umožňuje okrem jednoduchého vyhľadávania pomocou kľúč-hodnota vytvárať s využitím indexov zložitejšie dotazy nad dátami na strane databázového systému.

Medzi databáze reprezentujúce tento typ úložiska patrí napríklad CouchDB a MongoDB.

4.1.4 Grafový model

Tento typ databáz využíva pre prácu s dátami matematickú štruktúru - graf. Dáta sú reprezentované pomocou uzlov, hran a ich atribútov. Uzol je základný samostatný a nezávislý objekt. Pomocou hran medzi uzlami modelujeme závislosti, ktoré popisujeme pomocou atribútov. Nad uzlami a hranami sa využíva model kľúč-hodnota. Medzi hlavné výhody patrí možnosť prechádzania týchto štruktúr s využitím známych grafových algoritmov.

Tento model sa napríklad využíva v aplikáciách sociálnych sietí alebo pre sémantický web. Patria sem databáze ako Neo4j alebo FlockDB.

4.2 Porovnanie NoSQL systémov

V dnešnej dobe existuje veľké množstvo NoSQL databázových systémov, ktoré majú odlišné vlastnosti, komplexitu a vďaka tomu ich môžeme použiť pre rôzne účely. Snaha porovnať tieto systémy na globálnej úrovni je nerealizovateľná a často vedie k omylu. Cieľom tejto sekcie je definovať základné body vďaka, ktorým je možné tieto systémy kategorizovať a vrámci danej kategorizácie porovnávať. Tieto zistenia nám následne môžu pomôcť pri výbere vhodného systému odpovedajúceho našim požiadavkom.

Následujúce body patria medzi hlavné kritéria pri porovnávaní týchto systémov:

1. dátový model
2. dotazovací model
3. škálovateľnosť
4. schopnosť odolávať chýbam (failure handling)
5. elasticnosť
6. konzistencia dát
7. typ perzistentného úložiska
- 8.

4.2.1 Dátový a dotazovací model

Dátový model definuje štruktúru, ktorá slúži na ukladanie dát v databázovom systéme. Dotazovací model následne definuje obmedzenia a operácie, ktoré sme schopný nad uloženými dátami vykonávať. V predchádzajúcej sekcii sme popísali základnú kategorizáciu NoSQL systémov podľa dátového modelu. Dátový a dotazovací model do určitej miery popisuje výkonnosť, komplexnosť a vyjadrovaciu silu databázového systému. Dotazovací model popisuje API.

Pre výber vhodného dátového modelu pre našu aplikáciu je dôležité porozumieť štruktúre dát a definovať operácie, ktoré nad týmito dátami budeme vykonávať.

4.2.2 Škálovateľnosť a schopnosť odolávať chybám

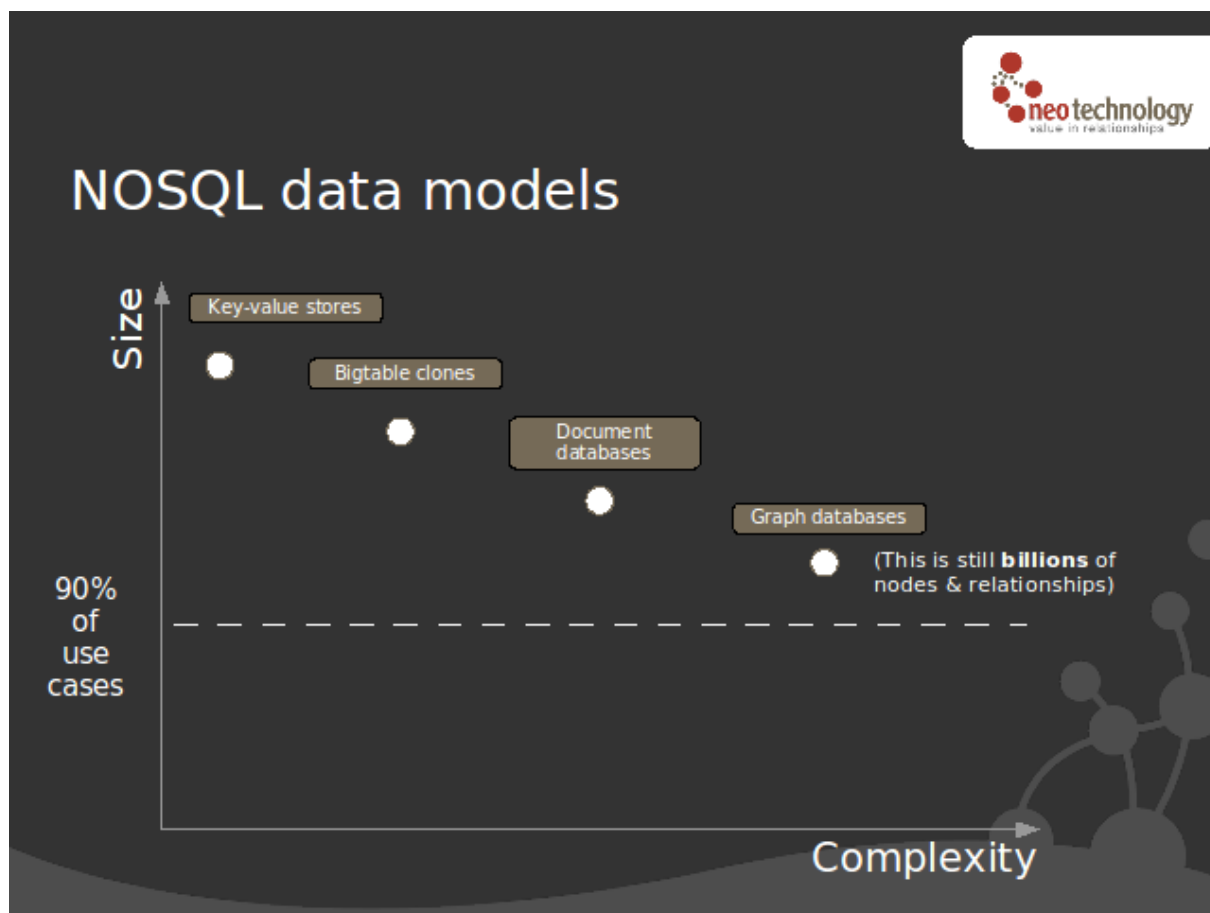
Táto vlastnosť kladie na systém požiadavky ako podpora replikácie a rozsekávania dát. Distribuované databázové systémy implementujú tieto techniky na systémovej úrovni. V prípade ich podpory, môžeme od systému požadovať:

- podporu replikácie medzi geograficky oddelenými dátovými centrami
- možnosť pridania nového uzlu do distribuovaného databázového systému, bez nutnosti zásahu do aplikácie

Počet uzlov, na ktorých sa vykonáva replika dát a konfigurácia databázového systému, ktorá podporuje geograficky oddelené dátové centrá zároveň určujú akej miery je systém schopný odolávať chybám, medzi ktoré môžeme zaradiť poruchu uzlu alebo sieťové prerušenia.

Častým požiadavkom webových aplikácií, z dôvodu neustáleho nárastu dát, na databázový systém je podpora škálovania s cieľom zvýšenia veľkosti databázy. S neustálym vývojom nových aplikácií musíme uvažovať potrebu škálovania z pohľadu komplexnosti. V tomto prípade predpokladáme, že štruktúra dát ktoré do databázového systému ukladáme sa môže s postupom času meniť. Pojem škálovanie z pohľadu komplexnosti je popísaný v knihe... Schopnosť škálovania z pohľadu komplexnosti ovplyvňuje výber dátového modelu.

Obrázok XY zachytáva pozíciu NoSQL dátových modelov z pohľadu škálovania komplexnosti a veľkosti dát.



Obr. 4.1: Pozícia dátového modelu z pohľadu jeho škálovania podľa veľkosti a komplexnosti. Zdroj: Neo4J a NOSQL overview and the benefits of graph databases, Emil Eifrem, prezentácia.

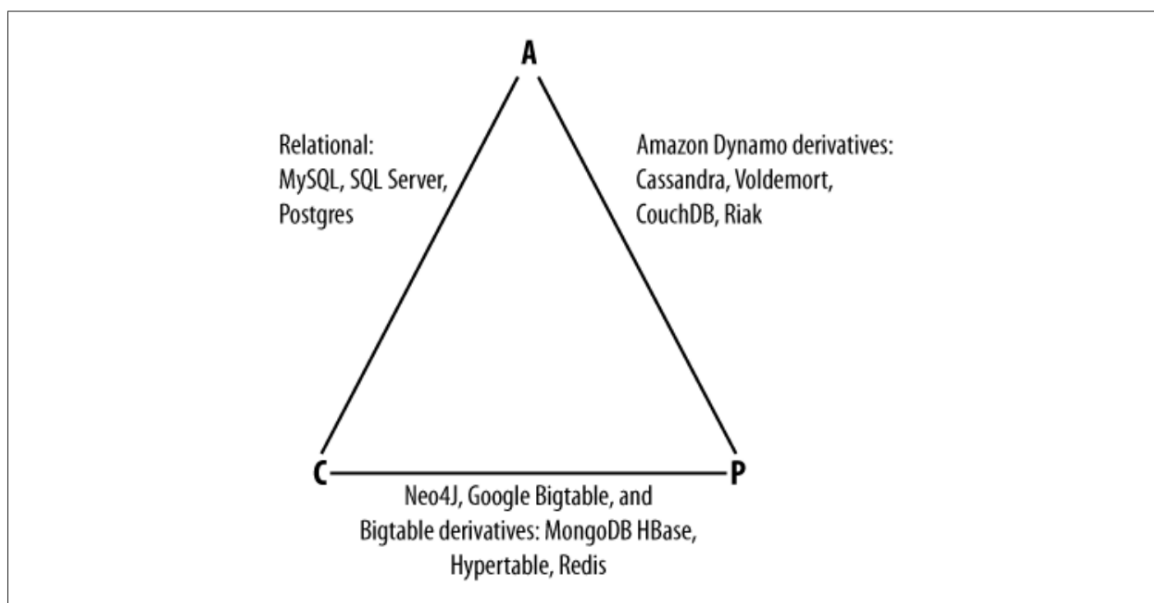
Dátový model typu kľúč-hodnota a stĺpcovo orientovaný model (Bigtable clones) majú jednoduchú štruktúru, ktorá sa dá horizontálne škálovať. Nevýhodou tohoto prístupu je naopak to, že všetka práca s dátami a ich štruktúrou sa prenáša do vyšších vrstiev, o ktoré sa musí starať programátor. Naopak dokumentový a grafový model poskytuje bohatšiu štruktúru na prácu s dátami, ktorá spôsobuje komplikovanejšie škálovanie vzhľadom na veľkosť dát. Podľa odhadov spoločnosti Neotechnology až 90% aplikácií, v prípade že sa nejedná o projekty spoločností Google, Amazon atď., spadá do rozmedia kde sa veľkosť záznamov pohybuje rádovo v miliardách. Za zmienku stojí fakt, že aj napriek tomu, že tieto dátové modely sú si navzájom izomorfné, vhodnosť ich použitia závisí na konkrétnom príklade a požiadavkách na aplikáciu.

4.2.3 Elastickosť

Vďaka škálovaniu sa snažíme o zvýšenie kapacity celkového dátového úložiska. Elastickosť popisuje ako sa daný systém dokáže vysporiadať s pridaním nového uzlu.

4.2.4 Konzistencia dát

Podľa teórie CAP platí, že v prípade výskytu sieťových prerušení, ktoré sú súčasťou distribuovaného databázového systému nie je možné súčasne zaručiť vlasnosť konzistencie a dostupnosti. NoSQL systémy preto môžeme rozdeliť podľa tohoto modelu.



Obr. 4.2:

Umiestnenie niektorých NoSQL dátazových systémvo sa môže meniť podľa ich konfigurácie.

Podpora replikácie, rozsekávania dát a zaradenie systému podľa modelu CAP určuje jeho dostupnosť.

4.2.5 Perzistentné úložisko

Typ perzistentného úložiska popisuje interný spôsob ukladania dát v databázovom systéme. NoSQL systémy môžu používať na ukladanie dát nasledujúce štruktúry:

- B-stromy
- distribuované hešové tabuľky
- Memtable / SSTable ¹
- spojové zoznamy
- operačná pamäť, ktorej obsah je pravidelných intervaloch ukládaný na pevný disk

Podľa požiadavkov na našu aplikáciu sme čiastočne schopný odhadnúť pomocou, ktorej štruktúry by sme mohli dosiahnuť čo najefektívnejšiu výkonnosť.

¹Tieto štruktúry popíšeme v nasledujúcej sekcii

Vlastnosti/Databázový systém	Hbase	Cassandra	Hypertable
Distribúovaný systém	áno	áno	áno
Dátový model	Bigtable ²	Bigtable	Bigtable
Dotazovací model			
API	Thrift, REST	Thrift, Avro	Thrift, C++
Perzistentné úložisko	HDFS	LSS ³	HDFS, KFS, LSS
SPOF ⁴	áno	nie	áno
Pridanie uzlu do živého systému	áno	áno	
Podpora viacerých datacentier	áno	áno	áno
Rozsekávanie dát	áno	áno	áno
Replikácia	pomocou HDFS	áno	áno
Elasticnosť	áno	áno	
Konzistencia	CP	AP	
Programovací jazyk	Java	Java	C++
MapReduce	áno	áno	áno
Komunita	+	+	-

4.3 Výber NoSQL systémov

V predchádzajúcej sekcii sme tieto systémy rozdelili do štyroch hlavných kategórií podľa ich dátového modelu, ktorý je kľúčový pri výbere vhodného databázového systému podľa požiadaviek aplikácie. Popis a výkonnostné porovnanie NoSQL systémov, ktoré reprezentujú jednotlivé kategórie by boli nad rámec tejto práce. Paralelne s touto prácou vzniká diplomová práca, ktorá rieši podobný problém s využitím dokumentových databázových systémov ??, preto túto kategóriu vynecháme.

NoSQL systémy môžeme rozdeliť podľa toho v akom prostredí pracujú. Väčšina týchto systémov vyžaduje ich inštaláciu na počítačové systémy, patria sem napríklad Voldemort, Cassandra, Riak, Hbase. Tieto systémy sú open-source. Okrem nich existujú distribuované databázové systémy, ktoré sú poskytované ako cloudové riešenie a to Amazon SimpleDB, Microsoft Azure SQL, Yahoo! YQL a prostredie od spoločnosti Google AppEngine. Tieto systémy poskytujú priamo rozhranie na prácu s dátami a funkčnosť perzistentného úložiska zabezpečujú poskytovatelia týchto služieb. Ich hlavným cieľom je zefektívnenie vývoja a nasadzovania aplikácií.

Podľa analýzy požiadaviek na našu aplikáciu a štruktúry dát, ktoré budeme do databázového systému ukládať nie je vhodné použitie databázových systémov s grafovým modelom a modelom kľúč-hodnota. Systémy s grafovým modelom sú určené na diametrálne odlišnú úlohu problémov naopak v prípade, použitia systémov kľúč-hodnota by bola práca na strane aplikácie zbytočne náročná. Naším požiadavkom najlepšie vyhovuje stĺpcovo orientovaný model, ktorý sme sa rozhodli použiť pre návrh našej aplikácie.

V tejto časti práce sa zameriame na stručný prehľad a vzájomné porovnanie systémov, ktoré poskytujú stĺpcovo orientovaný model. Medzi tieto voľne dostupné (open-source) systémy patria HBase, Cassandra a Hypertable. Aj napriek totožnému dátovému modelu, majú tieto systémy odlišné vlastnosti. Následujúca tabuľka zobrazuje popis vlastností, na ktoré sme sa zamerali pri výbere víťaznej dvojice.

Z porovania je vidieť, že systémy obsahujú množstvo spoločných vlastností. Pri výbere systémov sme zohľadnili aj ich praktické využitie spoločnosťami pôsobiacimi na trhu v produkčných podmienkach. Systém Cassandra je používaný spoločnosťou Facebook v aplikácii na súkromnú poštu. Medzi ďalšie požiadavky patrili podpora komunity, dokumentácia a vývojový cyklus týchto systémov. Z týchto systémov sme následne vybrali dva a to HBase a Cassandra. Dôvodom prečo sme zavrhnuli systém Hypertable je nepostačujúca dokumentácia, málo aktívna komunita a pomalý vývojový cyklus. V nasledujúcej sekcii popíšeme ich detaily.

4.4 Cassandra

Distribúovaný databázový systém Cassandra bol vytvorený pre interné účely spoločnosti Facebook v roku 2007. Cassandra slúžila na vyhľadávanie v súkromnej pošte, poskytovala úložisko pre indexy. Hlavnými požiadavkami na tento systém bolo zvládať miliardu zápisov denne, schopnosť škálovania podľa narastajúceho počtu používateľov, beh na spotrebných počítačoch a podpora replikácie medzi geograficky oddelenými dátovými centrami. Ďalším požiadavkom bola vysoká dostupnosť, teda aby chyba žiadneho uzlu nespôsobila celkovú nedostupnosť systému. Cassandra je teda decentralizovaný systém, kde každý uzol vykonáva tie isté operácie. V roku 2008 bola zverejnená ako open-source projekt a je neustále vyvíjaná mnohými spoločnosťami a vývojármi. Tento systém využíva architektonické princípy distribuovaného databázového systému Dynamo vytvoreného spoločnosťou Amazon a zároveň ich kombinuje s dátovým modelom distribuovaného databázového systému BigTable vytvoreného spoločnosťou Google. V nasledujúcom texte popíšeme hlavne princípy tohoto systému.

4.4.1 Dátový model

Základný dátový model bol prebraný od systému Google Bigtable. Cassandra k nemu pridala štruktúru super-stĺpec.

Základnou jednotkou dátového modelu je stĺpec. Stĺpec je tvorený názvom, hodnotou a časovým odtlačkom, ktorý využíva Cassandra pri riešení konfliktov. Stĺpce sa zoskupujú do rodiny stĺpcov (Column family). Hodnoty zoskupených stĺpcov reprezentujú jeden záznam, ktorý identifikuje unikátny kľúč. Pomocou tohoto kľúča a názvu stĺpca sme schopný pristúpiť k hodnote ktorú reprezentuje. Pri vytváraní dátového modelu stačí vytvoriť rodinu stĺpcov a každý záznam, ktorý do nej vkládame môže obsahovať ľubovoľný počet stĺpcov. Tabuľkou je teda distribuovaná multidimenzionálna mapa, ktorá je indexovaná pomocou kľúčov. Operácie nad stĺpcami, ktoré identifikuje daný kľúč sú atomické v rámci repliky. Ďalej platí, že vo v rámci rodiny stĺpcov sú stĺpce zoradené. Každá rodina stĺpcov je uložená v samostatnom súbore a je zoradená podľa kľúčov. Je preto vhodné do danej rodiny stĺpcov ukladať dáta, ku ktorým budeme pristupovať spoločne, čím sa vyhneme zbytočným diskovým operáciám.

Štruktúra super-stĺpec (Super column family) je špeciálny typ stĺpca, ktorý je tvorený obyčajnými stĺpcami. Stĺpec typu super má názov a jeho hodnota je tvorená zoznamom názvov obyčajných stĺpcov. Tento prístup pridáva ďalšiu úroveň v štruktúre. Super stĺpec je možné združiť do podobnej štruktúry pod názvom super-rodina stĺpcov (Super Column Family).

Distribúovaného databázového systému obsahuje štruktúry pod názvom keyspace. U týchto štruktúr môžeme napríklad definovať faktor replikácie, môžeme sa na nich pozerať ako na databázu u relačných databázových systémov. Do štruktúry keyspace vkladáme rodiny stĺpcov, ktoré môžeme prirovnávať k tabuľkám v relačných databázach.

keyspace:CF:stlpec keyspace:CF:SC:stlpec

Nad týmto dátovým modelom je možné vykonávať nasledujúce operácie: insert... get.. delete...

4.4.2 Rozsekávanie dát a replikácia

4.4.3 Konzistencia

4.4.4 Mechanizmy pre správu chýb

4.4.5 Perzistentné úložisko

perzistentné úložisko Tento systém bol primárne navrhnutý tak aby spracúval vysoký tok pre zápis, s tým že čo najmenej ovplyvní efektívnosť operácií na čítanie. Hlavné vlastnosti popíšeme v nasledujúcej časti textu.

Rodina stĺpcov - last 100 emails , je automaticky zotriedená podľa datumu, čo podporuje samotná Cassandra.

4.5 Hadoop

4.6 Hadoop vs. Cassandra

Obecné výkonové porovnanie NoSQL systémov je zložitá úloha. Žiadny systém nie je navrhnutý tak aby ním bolo možné dosiahnuť optimálne výsledky v prípade, že ho použijeme pre rôzne typy aplikácií. Niektoré systémy sú optimalizované pre zápis iné pre čítanie dát. Výkon týchto systémov ďalej ovplyvňuje faktor replikácie, spôsob rozsekávania dát, ich umiestnenie a iné. Veľmi častou a zároveň časovo náročnou metódou, ktorá slúži na porovnávanie týchto systémov je implementácia daného riešenia s využitím všetkých porovnávaných systémov.

Spoločnosť Yahoo! zverejnila v roku XXX nástroj pod názvom Yahoo! Cloud Serving Benchmark (YCBS) pre obecné porovnávanie distribuovaných databázových systémov. Tento nástroj je zameraný na meranie výkonu a elasticity a podporuje rôzne testovacie prípady, ktorými je možné popísať vlastnosti testovanej aplikácie. Medzi tieto prípady patrí napríklad intenzívny zápis, intenzívne čítanie, náhodné vyhľadávanie v databázovom systéme a iné. Keďže sa jedná o maximálne modulárny nástroj, poskytuje zároveň možnosť tvorby vlastných testovacích prípadov. Cieľom tohoto nástroja je obecné porovnanie distribuovaných databázových systémov.

Kapitola 5

Analýza a návrh riešenia

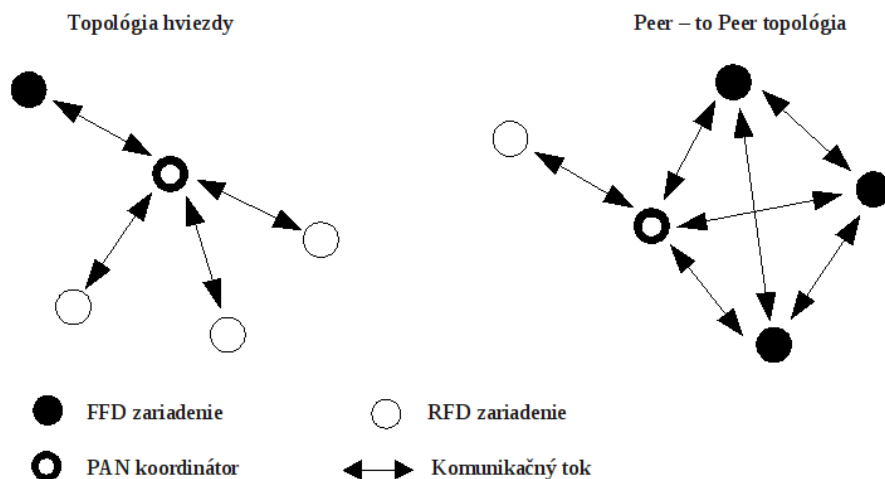
Kapitola 6

ZMAZAT

6.1 Komponenty IEEE 802.15.4

Zariadenia delíme na dva druhy a to zariadenie poskytujúce úplnú funkčnosť FFD (Full-function device) a redukované zariadenia RFD (Reduced-function device). Zariadenie FFD môže operovať v troch módoch, ktorými sú PAN (Personal area network) koordinátor, koordinátor, alebo koncové zariadenie. Zariadenie FFD ďalej dokáže komunikovať so zariadeniami typu RFD alebo FFD a zariadenie RFD je schopné komunikácie len so zariadením FFD. Výhodou RFD zariadení, je že neposielaajú veľké objemy dát a teda na ich realizáciu je potrebná minimálna pamäťová kapacita. Samotná WPAN je tvorená dvoma alebo viacerými zariadeniami, ktoré komunikujú na tom istom fyzickom kanály.

6.2 Sieťová topológia



Obr. 6.1: Topológie štandardu 802.15.4

6.3 Architektúra

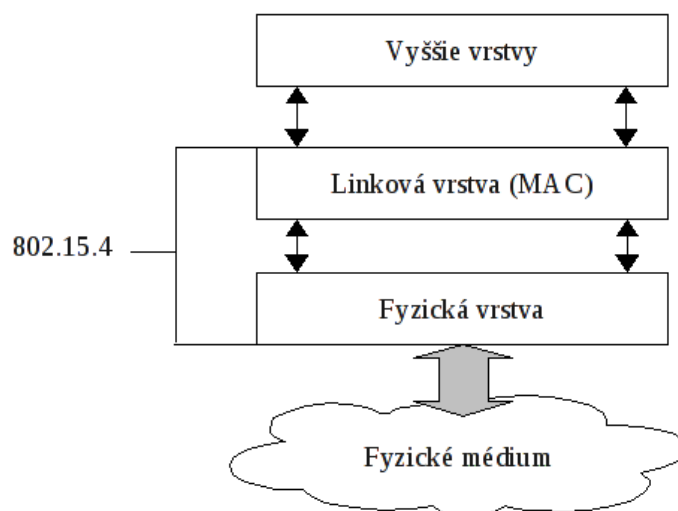
Architektúra IEEE 802.15.4 vid'. obrázok 6.2 je tvorená pomocou vrstiev. Každá vrstva je zodpovedná za časť štandardu a poskytuje služby vyšším vrstvám. Vrstvy sú zavedené z dôvodu aby bol štandard ľahko popísateľný modelom ISO-OSI.

LR-WPAN zariadenie je tvorené fyzickou vrstvou, ktorá zahŕňa rádiový vysielateľ, prijímač a mechanizmus potrebný na jeho obsluhu. Ďalšiu vrstvu tvorí linková vrstva, ktorá je zodpovedná za prístup všetkých prenosov ku komunikačnému kanálu. Jednotlivé vrstvy medzi sebou komunikujú pomocou prístupových bodov SAP (Service access point). Medzi vyššie vrstvy patrí sieťová vrstva a aplikačná vrstva, ktoré poskytujú zamýšľanú funkčnosť zariadenia a patria do štandardu ZigBee. Architektúra LR-WPAN môže byť implementovaná u embeded zariadení a taktiež aj u zariadení vyžadujúcich pre svoj chod PC.

6.3.0.1 Typy rámcov

Štruktúry rámcov boli navrhnuté aby zostala komplexnosť na minime, pri súčasnom zachovaní robustnosti pri posielaní dát na kanáli obsahujúcom šum. Štandard definuje štyri druhy rámcov a to:

- beacon rámeč
- dátový rámeč, ktorý sa používa pre prenos všetkých dát
- potvrdzovací rámeč, použitý k potvrdeniu úspešne prijatého rámca
- MAC rámeč, ktorý sa používa k spracovaniu všetkých servisných MAC prenosov



Obr. 6.2: Štruktúra štandardu 802.15.4

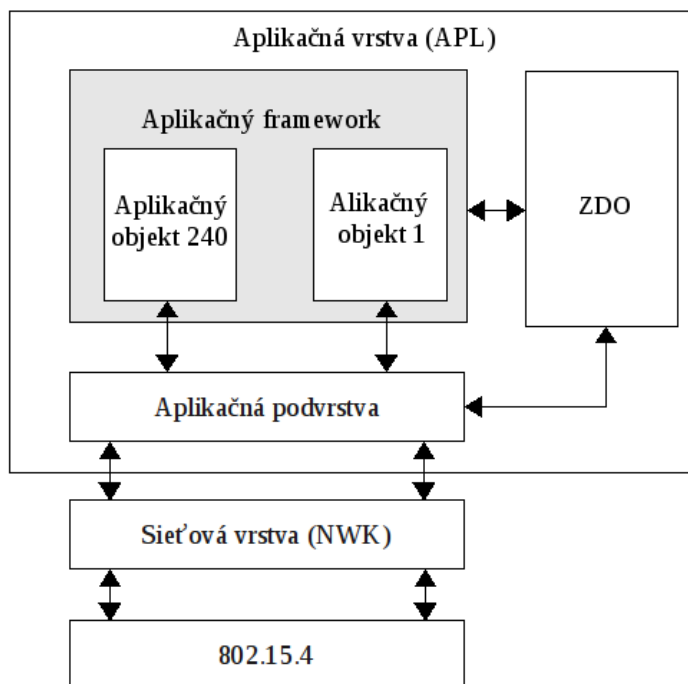
6.4 Architektúra

Architektúra štandardu ZigBee je tvorená viacerými blokmi, ktoré nazývame vrstvy. Každá z vrstiev vykonáva špecifickú množinu operácií, ktoré následne využívajú nadradené vrstvy. Ďalej sú použité dátové jednotky, ktoré sú zodpovedné za prenos dát a riadiace jednotky vykonávajúce všetky ostatné služby. Každá jednotka poskytuje svoje funkcie vyšším vrstvám pomocou rozhrania, ktoré sa nazýva SAP. Každé SAP rozhranie poskytuje množstvo servisných primitív, pomocou ktorých sa dosahuje požadovaná funkcionálnosť. ZigBee aliancia stavia na základoch štandardu IEEE 802.15.4-2003, ktorý definuje dve vrstvy a to fyzickú vrstvu (PHY) a spojovú vrstvu (MAC), viď. predošlá kapitola. Nadstavbu týchto vrstiev tvorí sieťová vrstva (NWK) a framework aplikačnej vrstvy. Tento framework je ďalej tvorený vrstvou APS (Application support sub-layer) a vrstvou nazývanou ZDO (ZigBee device objects). Špecifické aplikácie daných výrobcov následne využívajú daný framework, vrstvy APS a objekty ZDO. Samotná architektúra je zobrazená na obrázku 6.3

6.5 Sieťové komponenty

U siete typu ZigBee rozoznávame nasledujúce tri druhy zariadení:

- ZigBee koordinátor, odpovedá PAN koordinátoru štandardu IEEE 802.15.4-2003
- koncové zariadenie ZigBee, FFD alebo RFD zariadenie štandardu IEEE 802.15.4-2003, ktoré v ZigBee sieti nevystupuje ako ZigBee koordinátor alebo ZigBee smerovač
- ZigBee smerovač, FFD zariadenie štandardu IEEE 802.15.4-2003, ktoré nemôže vystupovať v sieti ako ZigBee koordinátor, ale vystupuje ako koordinátor štandardu IEEE 802.15.4-2003, ktorý smeruje správy medzi zariadeniami a umožňuje asociáciu



Obr. 6.3: Štruktúra štandardu ZigBee

6.6 Sieťová topológia

Sieťová vrstva štandardu ZigBee podporuje topológiu hviezda, ďalej stromovú a mesh (je to topológia používaná hlavne u bezdrôtových sietí, pri ktorej je každé sieťové zariadenie prepojené so všetkými ostatnými zariadeniami v danej sieti) topológiu.

6.7 XBee Series 1

Konkrétnu implementáciu predchádzajúcich štandardov tvoria moduly XBee/XBee PRO OEM od spoločnosti Digi, ktorá patrí do zoznamu certifikovaných výrobcov. V tejto práci som použil modul XBee Series 1, ktorý implementuje len štandard 802.15.4. Tento modul bol použitý pri meraniach v anténnej komore a jeho popisujúce parametre v samotnej simulácii. Linková vrstva modelu, ktorý som použil, pracovala s parametrami modulu TI CC1100, keď som chcel tieto parametre nahradiť, kontaktoval som spoločnosť Digi, ktorá mi však tieto parametre nebola schopná poskytnúť z dôvodu, že časť modulu, ktorá je zodpovedná za hodnoty týchto parametrov tvorí Ember 3.1 Stack, ktorý dodáva spoločnosť Ember. Spoločnosť Ember, však na moju žiadosť o sprístupnenie týchto parametrov (čas medzi prechodom z režimu spánku do režimu vysielania/prijímania, čas pri prechode zo stavu vysielania do stavu prijímania a opačne) vôbec nezareagovala.

6.7.1 Technické parametre

Modul popisujú nasledujúce parametre[4].

Dosah vnútri	30m
Dosah vonku	90m
Sila výstupného signálu	1mW (0 dBm)
Rýchlosť prenosu dát	250 000 bps
Rýchlosť sériového rozhrania	1200 bps - 250 kbps
Citlivosť pri prijíme	-92 dBm

Tabuľka 6.1: Špecifikácia výkonu a rýchlosti

Frekvenčné pásmo	ISM 2.4 GHz
Rozmery	2.438cm x 2.761cm
Operačná teplota	-40 až 85C

Tabuľka 6.2: Obecné parametre

Podporované sieťové technológie	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer
Počet kanálov	16
Anténa	Whip
Adresácia	PAN ID

Tabuľka 6.3: Sieťové parametre

Kapitola 7

Teória antén

Anténa je zariadenie, ktoré slúži na vysielanie a príjem rádiových signálov. Toto zariadenie konvertuje elektromagnetické vlny na elektrickú energiu a opačne. Podľa toho ako sú signály vysielané ich delíme na všesmerové (vysielanie vo všetkých smeroch) a smerové (vysielaajú len v danom smere). Medzi chovaním sa vysielacej a prijímacej antény nepozorujeme žiadne rozdiely.

Následujúce parametre slúžia na popis základných vlastností antén:

- smerovosť, určuje v akom smere sú elektromagnetické vlny vysielané. Je posudzovaná na základe vyžarovaných charakteristík, ktoré delíme na vertikálne a horizontálne. Meria sa pomocou parametrov zisk antény a vyžarovací uhol.
- vyžarovací uhol
- impedancia antény
- zisk antény
- frekvenčná šírka prenášaného pásma
- polarizácia
- účinnosť

H rovina, je rovina v ktorej sa šíri vektor magnetického poľa a sleduje sa v nej ako sa mení intenzita elektrického poľa. Naopak v E rovine sa šíri vektor elektrického poľa a sleduje sa zmena intenzity magnetického poľa.

7.0.2 Definícia pojmov

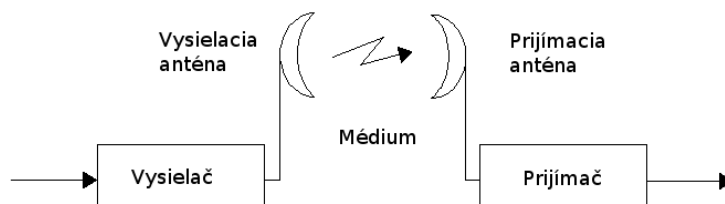
Účinnosť je pomer vyžarovaného výkonu k výkonu, ktorý privádzame na vstup antény.

Zisk určuje mieru smerovosti antény. Definujeme ho ako pomer vyžarovanej intenzity antény v danom smere k intenzite, ktorá je vyprodukovaná ideálnou anténou vyžarujúcou do všetkých smerov rovnomerne, bez strát a obe antény majú na vstupe rovnaký výkon. Zisk berie v úvahu

okrem smerovosti aj účinnosť antény. Pre zisk ďalej platí, ak má anténa pre daný smer väčší zisk ako je celkový zisk antény, tak v nejakom inom smere musí byť zisk menší aby bola zachovaná celková energia. Tohoto faktu si je možno všimnúť u grafov popisujúcich zisk antén, ktoré boli vytvorené meraním v anténnej komore viď obrázok 7.2.

7.0.3 Propagácia rádiového signálu

Následujúci obrázok 7.1 zachytáva typický rádiový systém. Informácie vstupujú do vysielача. Informácie sú následne vysielané anténou, ktorá konvertuje rádiový signál na elektromagnetické vlny. Médium na prenos elektromagnetických vln je voľný priestor. Následne sú elektromagnetické vlny odchytené pomocou prijímacej antény, ktorá ich konvertuje späť na rádiový signál. Ideálny stav je ak tento signál odpovedá signálu generovanému vysielачom. Originálna informácia, ktorá vstupovala do vysielача je následne demodulovaná na svoju pôvodnú formu.



Obr. 7.1: Model rádiového systému

7.0.3.1 Pojmy

- dB - je skratka pre decibel. Je to matematické vyjadrenie používané na zobrazenie závislosti medzi dvoma hodnotami.
- Rádiový výkon - je buď výkon vysielача alebo prijímača vyjadrený vo Wattoch. Taktiež môže byť vyjadrený v dBm. Vzťah medzi dBm a Wattmi je vyjadrený nasledovne $P_{dBm} = 10 * \log P_{mW}$
- Zoslabenie signálu modeluje nasledujúci obrázok 7.3. Kde P_{in} je vstupný výkon a P_{out} je hodnota výstupného výkonu.
Zoslabenie je vyjadrené v dB podľa nasledujúceho vzťahu: $P_{dB} = 10 * \log(P_{out}/P_{in})$. Napríklad predpokladajme, že dôjde k strate 1/3 vysielaného signálu ($P_{out}/P_{in} = 2/3$), potom hodnota zoslabenia v dB je $10 * \log(2/3) = -4.05$ dB
- Citlivosť prijímača je minimálna hodnota výkonu radio frekvenčného signálu potrebná na vstupe prijímača, aby bol signál ďalej spracovaný.
- Stratovosť je oslabenie výkonu rádiového signálu, ktorý je šírený v priestore. Je vyjadrená v dB a ďalej závisí na vzdialenosti medzi vysielacou a prijímacou anténou, na viditeľnosti medzi vysielacou a prijímacou anténou a na veľkosti antén.

7.0.4 Typy antén

Izotropická anténa sa používa pre teoretické účely, vysielané vlny majú rovnaké parametre, ktoré popisujú anténu vo všetkých smeroch. Používa sa hlavne pri popisovaní a porovnávaní vlastností reálnych antén.

Horn anténa sa používa v situácia, kde je potrebné dosiahnuť vysokého zisku, vlnová dĺžka je krátka, môže byť širokopásmová alebo úzko-pásmová, čo závisí na jej tvare. Taktiež dokáže pracovať s akoukoľvek frekvenciou. Keďže charakteristiky tejto antény sú známe a dobre matematicky popísané používa sa táto anténa ku kalibrácii iných systémov, tento fakt bol využitý aj počas meraní v anténnej komore. Hlavným parametrom, ktorý bol podstatný u meraní s touto anténou je jej zisk.

Whip anténa, je model antény, ktorý používajú ZigBee zariadenia, ktoré som simuloval. Anténa je poväčšine vertikálna a u ZigBee zariadení upevnená na dosičke plošného spoja. Je to anténa, ktorá vysiela horizontálne do všetkých smerov a hluché zóny sú vertikálne v bode upevnenia a ukončenia.

7.0.5 Stratovosť voľného priestoru (Free-space path loss)

Stratovosť signálu vo voľnom priestore sa používa k predikcii sily rádiového signálu. Napriek tomu, že nemodeluje dôveryhodne realitu obsahujúcu prekážky, odrazy atď, má veľký význam pre základné pochopenie šírenia sa signálu v reálnych podmienkach. Využíva sa taktiež pri tvorbe simulačných modelov a pri vývoji v oblasti bezdrôtových systémov.

Definujeme ju ako stratu sily signálu elektromagnetickej vlny, ktorá vzniká medzi dvoma priamo viditeľnými bodmi vo voľnom priestore, kde nie sú žiadne prekážky, odrazy a nedochádza k ohybu vln.

Formula pre výpočet stratovosti je nasledovná:

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2,$$

kde:

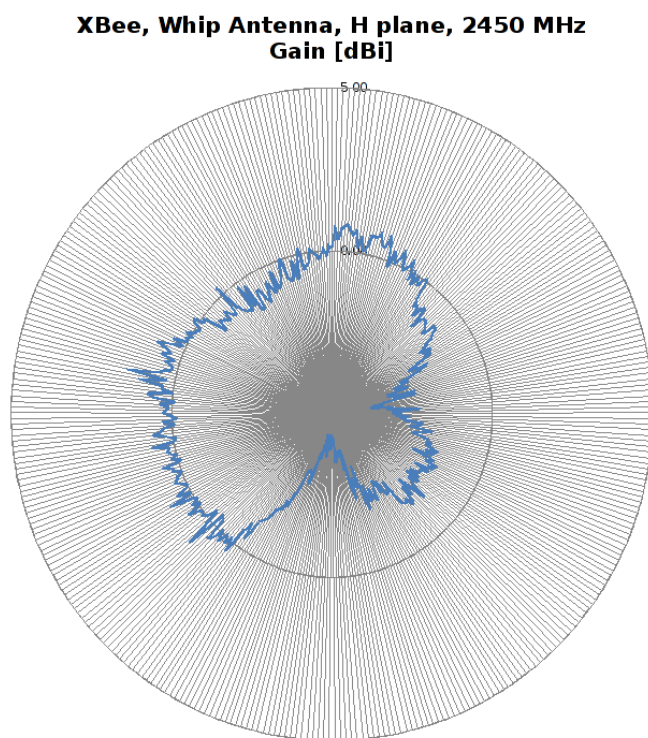
- λ je vlnová dĺžka (m)
- f je frekvencia signálu (Hz)
- d je vzdialenosť od vysielača (m)
- c je rýchlosť svetla vo vákuu $2.99792458 * 10^8$ m/s

Daná formula vyjadrená v dB:

$$\begin{aligned} FSPL(dB) &= 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \\ &= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \end{aligned}$$

7.0.6 Antény a simulácia

Jednotlivé antény, na ktorých bolo vykonané meranie v anténnej komore, boli popísané hodnotami výkonu (v dBm a W) v rozmedzí 0-360 stupňov pre každý stupeň. Z týchto hodnôt som pre každý stupeň spočítal hodnotu zisku. Samotný XML súbor, ktorý popisuje anténu a je použitý k simulácii potom obsahuje hodnoty ziskov po 10 stupňov, ktoré som spočítal ako priemer z hodnôt z meraní, čo samozrejme spôsobí ďalšiu odchýlku od reality.



Obr. 7.2: Charakteristika zisku antény Whip



Obr. 7.3: Model zoslabenia signálu

inicializácia - vybudovanie modelu a vloženie prvých udalostí do FES


```
while(FES nie je prázdna a simulácia neskončila)
{
vyber prvú udalosť z FES
t:= sprav časovú značku tejto udalosti
spracuj udalosť
(spracovanie udalosti môže pridať novú udalosť alebo zmazať existujúcu z FES)
}

ukončenie simulácie (zápis výsledkov, atď.)
```


Kapitola 8

Analýza a návrh riešenia

8.0.6.1 Výkonová závislosť

Následujúci obrázok 8.1 zobrazuje vysieláč (T), u ktorého vystupuje dvojica výkonov P_1 , P_2 a hodnota zisku pre daný smer $G_T(\alpha_T)$, ďalej u prijímača (R) vystupujú výkony P_3 , P_4 a zisk v danom smere $G_R(\alpha_R)$. V simulácii bude zohrávať hlavnú úlohu hodnota výkonu P_4 , hodnota výkonu P_1 je pred vyslaním rámcu známa, je to hodnota špecifikovaná výrobcom zariadenia. V nasledujúcej časti odvodím vzťah pomocou, ktorého určím hodnotu výkonu P_4 , na základe ktorej sa prijímač rozhodne či sa naozaj jedná o prijímané dáta alebo sa vysielaný signál zoslabil na takú úroveň, kedy bude považovaný za šum na kanály.

Nasleduje formula pre výpočet hodnoty výkonu P_4 , pomocou FSPL:

$$\left[\frac{P_3}{P_2} \right]_W = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{d^\alpha}$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{P_3}{P_2} \right]_{dB} &= 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{d^\alpha} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{c}{4\pi f} \right)^2 \frac{1}{d^\alpha} \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{c}{4\pi f} \right) - 10\alpha \log_{10} d \\ &= -40.2251 - 10\alpha \log_{10} d, \end{aligned}$$

kde:

- λ je vlnová dĺžka (m), $\lambda = \frac{c}{f}$
- f je frekvencia signálu (Hz), pre použité zariadenia XBee $f = 2450$ Mhz
- d je vzdialenosť od vysieláča (m)
- c je rýchlosť svetla vo vákuu $2.99792458 * 10^8$ m/s

- α je koeficient útlmu prostredia (pre vzduch $\alpha = 2$)

Zavediem nasledujúce označenie:

$$L = -40.2251 - 10\alpha \log_{10} d$$

Ďalej platí:

$$P_2 = P_1 + G_T(\alpha_T)$$

$$P_3 = P_2 + L$$

$$P_4 = P_3 + G_R(\alpha_R),$$

z čoho následne vyplýva nasledujúca rovnosť:

$$P_4 = P_1 + G_T(\alpha_T) + G_R(\alpha_R) + L + K,$$

kde:

- P_1 - výkon privedený do antény vysielacza (dBm)
- P_2 - výkon vysielaný vysielacou anténou (dBm)
- P_3 - hodnota výkonu prijatého prijímacou anténou (dBm)
- P_4 - výkon vystupujúci z káblu prijímacej antény a vstupujúci do prijímača (dBm)
- $G_T(\alpha_T)$ - zisk vysielacej antény v danom smere (dBi)
- $G_R(\alpha_R)$ - zisk prijímacej antény v danom smere (dBi)
- K - konštanta, ktorá spôsobuje ďalšie straty existujúce v reálnom prostredí (odrazy vo vodičoch, konektoroch, atď.)

Taktiež zároveň platí:

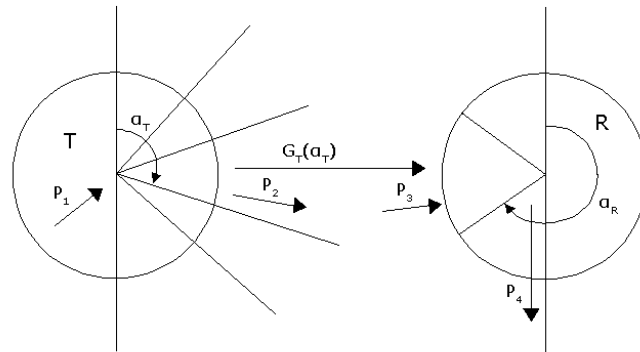
$$P'_4 < P''_4,$$

kde:

- P'_4 - hodnota výkonu v reálnom prostredí (W)
- P''_4 - spočítaná hodnota výkonu P_4 (W)

$$[P_3]_W < [P_2]_W \Rightarrow \left[\frac{P_3}{P_2} \right]_{dB} < 0.$$

Daný vzťah uvažuje straty, ktoré vznikajú na konektoroch antén, prepojavacím káblom medzi anténou a zariadením, vlastným odporom vodiča antény a iné. v podobe konštanty K .



Obr. 8.1: Popis výkonov a zisku u antén pre vysielateľ a prijímač

8.0.7 Štruktúra MF

V tejto časti sa zameriam na detailný popis funkcie modulov a ich následnú implementáciu. Obrázok 8.2 zachytáva štruktúru stanice, ktorú popisujeme pomocou jazyka NED. Na základe konvencie musí názov súboru vo svojom názve obsahovať reťazec „host“. Ako môžeme vidieť daná stanica sa skladá z jednotlivých podmodulov a to aplikačná vrstva, sieťová vrstva a vrstva NIC, ktoré navzájom komunikujú. Stanica taktiež obsahuje modul *Mobility*, ktorý zabezpečuje pohyb a geografickú pozíciu uzlu.

Podmoduly modulu stanica majú spoločného predka, ktorým je trieda *BasicModule*. Táto trieda je ďalej potomkom triedy *cSimpleModule*, ktorá je súčasťou Omnetu. Trieda *BasicModule*, obsahuje dvojfázovú inicializáciu, ktorá je vhodná aj v prípade použitia modulu *Blackbox*¹, ktorý v tomto texte nebudem popisovať. Medzi ďalšie vlastnosti patrí napríklad metóda *logName*, ktorá vracia názov NED modulu, čo je možné využiť pri ladení za pomoci makra *EV*, ktoré slúži pre výpis ladiacich správ.

Samotná komunikácia medzi jednotlivými podmodulmi modulu stanice je zabezpečená pomocou metód:

- *handleUpperMsg* - táto metóda je volaná zakaždým, keď modul obdrží správu z vyššej vrstvy, následne ju spracuje a predá nižšej vrstve
- *handleLowerMsg* - metóda je volaná po príchode správy z nižšej vrstvy, správu ďalej spracuje a predá nadradenej vrstve

Ďalej sú k dispozícii pomocné metódy slúžiace k enkapsulácii a dekapulácii správy predávanej medzi vrstvami (*encapsMsg*, *decapsMsg*) a metódy na opozdenie správy pri jej vysielaní na kanál.

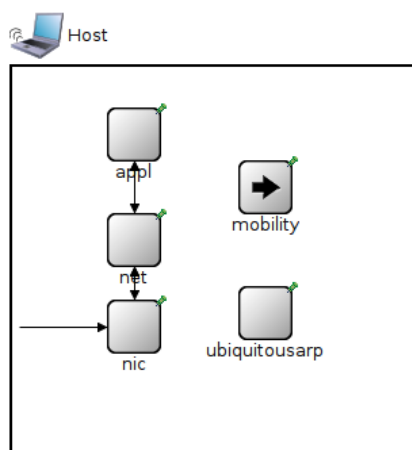
Keďže model poskytuje enkapsuláciu a dekapuláciu správ, z toho vyplýva, že pre každú vrstvu definujeme osobitný typ správy, ktorej štruktúra je popísaná pomocou súboru s príponou *.msg*. K dispozícii sú napríklad správy typu *AirFrame* (správa pre komunikáciu

¹Je to modul umožňujúci medzivrstvovú komunikáciu, bez nutnosti zasielania správ

na fyzickej vrstve), *MacPkt* (správa pre komunikáciu na linkovej vrstve), *NtwPkt* (správa pre sieťovú vrstvu) a *ApplPkt* (správa pre vrstvu aplikačnú). Všetky typy správ sú rozširiteľné, resp. si pomocou nich môžeme odvodiť vlastný typ správy. Pre potreby mojej simulácie bola najdôležitejšia správa typu *AirFrameRadioAccNoise3*, zdedená z triedy *AirFrame*, ktorej štruktúra obsahuje nasledujúce položky

- pSend - výkon, ktorým bol rámec odoslaný
- channelId - kanál, na ktorý bola správa zaslaná
- duration - čas, ktorý bol spotrebovaný na zaslanie rámcu (v sekundách)
- hostMode - štruktúra popisujúca pozíciu stanice, jej rýchlosť, smer pohybu, čas kedy sa pohyb začal
- SnrControlInfo - trieda, ktorá obsahuje pomocné informácie SNR (Signal to noise ratio), ktoré sa predávajú modulu *Decider*

Danú správu som ďalej rozšíril o parameter *moduleId*, ktorý obsahuje globálny identifikátor modulu, z ktorého bola správa odoslaná.



Obr. 8.2: Štruktúra stanice v OMNeT++

8.0.7.1 Štruktúra modulu NIC

NIC (Network card interface) je časť sieťového adaptéru zodpovedná za fyzický prístup k médiu a adresácii na úrovni MAC vrstvy, popisuje ju fyzická a linková vrstva ISO-OSI modelu. Štruktúra tohoto modulu je znázornená na obrázku 8.3. V mojom prípade je teda fyzická vrstva tvorená modulom *snrEval*, *decider* a vrstvu MAC tvorí modul *mac*. Vzájomná úzka kooperácia medzi týmito vrstvami je dôvodom prečo sú zapuzdrené v jednom module. Všetky submoduly modulu NIC, sú zdedené z triedy *ChannelAcces*, ktorá je ďalej odvođená z triedy *BasicModule*. Táto trieda poskytuje funkcionality umožňujúcu komunikáciu

jednotlivých staníc, ktoré sú vo vzájomnom dosahu. Na úrovni fyzickej vrstvy ma hlavne zaujíma modelovanie oslabenia signálu a výpočet chybovosti na kanále. Tým, že je fyzická vrstva tvorená osobitne modulom *snrEval*, som schopný modelovať výpočet stratovosti na kanále pomocou rôznych metód a na základe výsledku sa v module *decider* rozhodnem pomocou akého kritéria tieto dáta vyhodnotím. Napríklad modul *decider* bude rozhodovať o tom či dané dáta prijme na základe porovnania hodnoty SNR, spočítanej z modulu *snrEval*, s definovanou hraničnou hodnotou, alebo sa môže rozhodovať na základe počítania pomocou formúl pre výpočet chybovosti na kanále (napr. BER). Vďaka tomu môžem tieto moduly navzájom rôzne kombinovať. V nasledujúcej časti detailnejšie priblížim štruktúru modulov *snrEval* a *decider*.

Modul *snrEval*

Tento modul zabezpečuje príjem a vysielanie dát na kanál. Ďalej vytvára správy typu *AirFrame* z *MacFramu* a opačne, počas toho ako odpočúva kanál zároveň mení stavy rádia, ktoré sú reprezentované stavovým automatom a taktiež zabezpečuje simuláciu oneskorenia vo vysielaní alebo prijíme pomocou pomocných funkcií (*bufferMsg*, *unbufferMsg*). V mojom modeli ma zaujímala jedna z jeho ďalších vlastností a to ukladanie a spracúvanie SNR hodnôt pri prijímaní rámcov. Rámec fyzickej vrstvy (*AirFrame*) obsahuje pomocnú štruktúru *SnrList*, ktorú reprezentuje štruktúra *List* programovacieho jazyka C++ a záznam tejto štruktúry obsahuje dve položky a to časovú značku prijatia rámcu a k nej odpovedajúcu hodnotu SNR. V mojom prípade je hodnota SNR spočítaná na základe vzťahu [hodnota výkonu vstupujúca do prijímača (P_4) / hodnota šumu na kanále], kde hodnotu P_4 počítam za využitia modifikovanej formuly FSPL. Túto hodnotu následne predávam do modulu *Decider*, kde je ďalej spracovaná.

Práca modulu *snrEval* je znázornená vývojovým diagramom na obrázku 8.4. Keď sa nachádza modul v stave SYNC prijíma správu. Pred jej prijatím sa najskôr vykoná kontrola, či nedošlo k poškodeniu SFD (Start frame delimiter), následne sa spracuje zvyšok správy a spočíta sa hodnota SNR. V prípade, že sa modul nenachádza v stave SYNC a obdrží ďalšiu správu je táto správa považovaná za šum, hodnota šumu sa zvýši o hodnotu výkonu, ktorým bola táto správa prijatá a spočíta sa nová hodnota SNR, ku ktorej je pripojená časová značka. Detailnejšie sa budem zaoberať modelom kolízie v nasledujúcej kapitole.

V tomto module je metóda *handleLowerMsg* rozdelená na dve časti a to:

- *handleLowerMsgStart* - volá sa hneď po prijatí správy, volá metódy na výpočet hodnoty prijatého výkonu (P_4) a následne predáva spracovanie ďalším metódam na základe stavu rádia
- *handleLowerMsgEnd* - slúži na samotné odoslanie správy vyššej vrstve a zároveň pripája *SnrList* ako parameter.

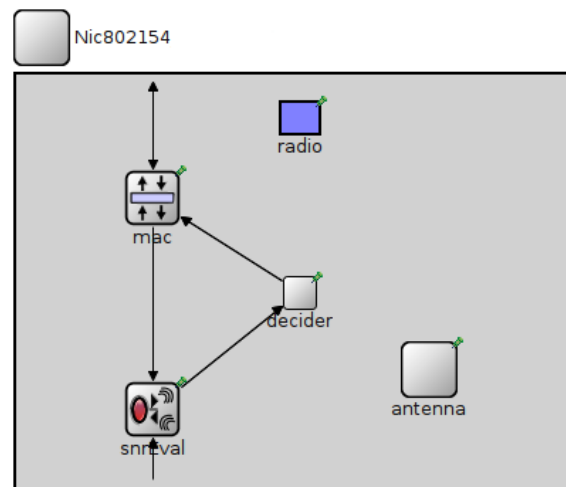
Modul *decider*

Modul spracúva len správy, ktoré prichádzajú z kanálu cez modul *SnrEval*. Správy z vyšších vrstiev, ktoré sa posielajú na kanál neprechádzajú týmto modulom a to z dôvodu, že tento modul len rozhoduje, či sa daná správa zahodí alebo prepošle vyššej vrstve. Rozhodovanie je založené na základe výpočtov ako napríklad chybovosť bitov alebo sa rozhoduje či sa má

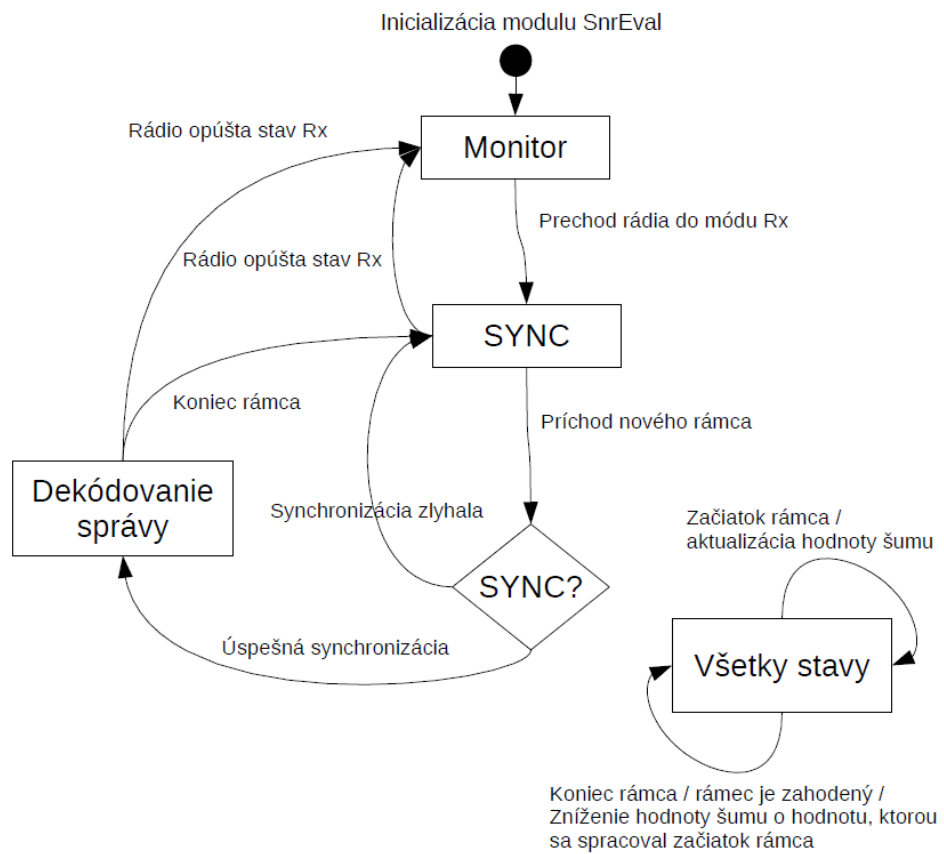
správa zahodiť na základe vysokej hodnoty šumu na kanále porovnaním s hraničnou hodnotou. Tieto vlastnosti však sledujem len u správ prichádzajúcich z kanálu. *Decider* teda slúži na výpočet chybných bitov (BER) v správe, čo počíta pomocou hodnôt uložených v štruktúre *SnrList*. Ďalej je v ňom možné implementovať rôzne opravné kódy. V simulácii je použitý vzorec na výpočet chybných bitov (BER) pre moduláciu MSK.

$$BER = 0.5 * \exp(-0.5 * SNR)$$

Modul *mac* ďalej poskytuje funkcionality metódy na riadenie prístupu k médiu CSMA. Modul *radio* je centrálne zdieľaný a moduly ako *snrEval* alebo *mac* prepínajú jeho stavy (napr. RX, TX) podľa potreby. Posledným modulom, je modul *antenna* ktorý popisuje parametre antény a je využívaný modulom *snrEval*.



Obr. 8.3: Štruktúra NIC v OMNeT++



Obr. 8.4: Prechody medzi stavmi v module snrEval

Kapitola 9

Realizácia

Pre potrebu simulácie som teda ako prvý vytvoril modul *Antenna*, ktorý popisuje anténu ZigBee zariadení nasledujúcimi parametrami:

- zisk - ideálny zisk antény, ktorý nájdeme v popise antény (dBi)
- impedancia (Ω)
- config - odkazuje na xml súbor popisujúci zisk antény (*.xml)

Modul sa snaží byť čo najobecnejší pre prípadne využitie aj v iných modeloch a pridal som ho medzi ostatné moduly MF. Z predošlých parametrov je najdôležitejší parameter *config*. Pomocou tohoto parametru sa odkazujem na súbor, ktorým popisujem zisk antény pre daný uhol, v ktorom anténa prijíma alebo vysiela. Hodnoty tohoto súboru sú z meraní, ktoré boli vykonané v anténnej komore. Nasledujúce riadky zachytávajú príklad popisu konkrétnej antény.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!DOCTYPE antenna SYSTEM "Antenna.dtd">
<antenna>
  <angle min="0" max="0" gain="0.3" />
  <angle min="0" max="30" gain="0.4" />
  <angle min="30" max="360" gain="0.9" />
</antenna>
```

Jednotlivé záznamy v elementoch `<angle ...>`, reprezentujú hodnotu zisku pre uhol z intervalu (min, max). Jednotlivé intervaly musia byť zoradené vzostupne, bez prekryvania sa. V prípade, že je rámec odoslaný pod uhlom ktorý, sa v popisnom xml súbore nenachádza, je použitá hodnota ideálneho zisku, ktorá je zapísaná v .ned súbore popisujúcom štruktúru modulu antény. Táto hodnota môže byť prepísaná v konfiguračnom súbore danej simulácie omnetpp.ini pomocou nasledujúceho zápisu: `sim.host[*].nic.antenna.gain = 2.1dBi`

Parametru *config*, ktorý odkazuje na xml súbor je potrebné priradiť xml súbor aj v prípade ak chcem v simulácii použiť len hodnotu teoretického zisku antény. V aktuálnej verzii Omnetu nie je možné priradiť tomuto parametru napríklad hodnotu „false“ a zabezpečiť

týmto neodkazovanie sa na xml súbor. Túto funkcionálnosť som ďalej do Omnetu neimplementoval, pretože po konzultácii s autorom Omnetu, som sa dozvedel, že táto možnosť pribudne v jeho novej verzii. Tento prípad riešim tak, že parametru config priradím xml súbor obsahujúci samotný koreňový element `<root />`, ktorý vyhodnotím pri samotnom spracúvaní xml súboru.

Samotný xml súbor popisujúci konkrétny model antény priradím danej stanici následovne: `sim.host[*].nic.antenna.config = xmldoc(„antenna1.xml“)`

Po spustení simulácie sa v inicializačnej časti modulu validuje daný xml súbor pomocou súboru `Antenna.dtd`, ďalej sa načíta do pamäti, z dôvodu, že simulátor poskytuje len DOM parsér a sprístupním si odkaz na jeho prvý element `<angle ...>`. Modul ďalej obsahuje metódu `findGainValue`, ktorá v danom xml súbore vyhľadá hodnotu zisku pre daný uhol. Z dôvodu optimalizácie som pre vyhľadávanie v štruktúre xml súboru použil binárne vyhľadávanie.

Ďalej som do modulu `SnrEvalRadioAccNoise3` implementoval výpočet modifikovanej formule FSPL. Samotný priestor, takzvaný playground, v ktorom sa odohráva simulácia som rozdelil na štyri kvadranty, vďaka čomu dokážem veľmi efektívne počítať uhol, pod ktorým bol rámec vyslaný z vysielačnej stanice a uhol, pod ktorým bol rámec prijatý na prijímacej stanici. Tieto uhly sú prepočítané na strane príjemcu, z ich hodnôt zistím pomocou modulu antény, konkrétne hodnoty daných ziskov $G_T(\alpha_T)$ a $G_R(\alpha_R)$. Hodnotu zisku $G_R(\alpha_R)$ určím priamo pomocou metódy `findGainValue` modulu `antenna`, ktorý obsahuje prijímač. Prijatý rámec obsahuje hodnotu jedinečného identifikátoru modulu (`moduleId`), z ktorého bol vyslaný. Pomocou neho sprístupním odkaz na modul vysielača a taktiež zavolám jeho metódu `findGainValue`, ktorá mi vráti hodnotu zisku $G_T(\alpha_T)$. Následne môžem spočítať hodnotu výkonu P_4 , z tejto hodnoty sa ďalej spočíta hodnota SNR pomocou vzťahu $SNR = P_4 / [\text{hodnota šumu prostredia}]$, kde hodnota šumu prostredia je rovná -100dBm. SNR sa ďalej pripojí ako kontrolná informácia k rámcu a odošle o úroveň vyššie vrstve `decider`. Táto vrstva následne spočíta hodnotu BER pre daný rámec a v prípade, že nedošlo k poškodeniu rámca je tento rámec predaný opäť vyššej vrstve a to vrstve MAC.

Pre potreby vyhodnocovania modelov, som ďalej upravil modul `ChannelControl`, kde bol pridaný parameter `ratio`, pomocou, ktorého je prepočítavaná vzdialenosť v modeli na reálnu vzdialenosť.

Počas implementácie a ladenia modelu som objavil v produkčnom kóde MF, dve chyby, konkrétne pri výpočte hodnoty BER v module `decider`, druhá chyba bola v module `snrEval`. Po upozornení autora boli obe chyby opravené.

9.0.8 Model kolízie

Pri komunikácii ZigBee zariadení v reálnom prostredí môže dochádzať k ich vzájomnému rušeniu. Takáto situácia môže nastať napríklad v prípade, že nastane kolízia v mechanizme, ktorý riadi prístup k médiu (CSMA-CA) alebo ak máme dve siete, kde prijímač z prvej siete práve súčasne v jednom okamihu počas svojho stavu Rx, dva rámce. Súčasné prijatie dvoch rámcov na anténe zanesie do komunikácie šum (čo je vlastne prídavný signál), ktorý môže ďalej spôsobiť chybovosť (BER). Keďže, som chcel modelovať aj situácie, u ktorých by dochádzalo k rušeniu, musel som pre tieto potreby model čiastočne modifikovať. Daný model neposkytuje vrstvy štandardu ZigBee preto nie je možné modelovať dve nezávislé siete. Danú kolíziu som preto vytvoril pomocou modifikácie MAC vrstvy, čím som dosiahol,

že dané zariadenie sa chovalo ako generátor šumu, tj. periodicky vysiela rámce, s tým, že dochádza ku kolízii a prijímač prijme viacero rámcov súčasne.

V simulácii je používaný diskretný simulátor, počas simulačného času prebiehajú udalosti. Model súčasného prijatia viacerých rámcov vyzerá tak, že v čase keď prijímač prijme rámce simulačný čas sa zastaví a samotné prijatie rámcov považujeme za udalosti v rovnakom simulačnom čase. Procesorový čas však neustále beží a teda program obsluhujúci súčasne prijatie viacerých rámcov prijme tieto rámce v skutočnosti s určitým časovým odstupom, čo je v simulácii reprezentované pomocou udalosti. Najprv je prijatý prvý rámec, je spracovaná jeho obsluha, následne sa spracuje druhý rámec atď. Tomuto popisu odpovedá nasledujúci obrázok 9.2, ktorý zachytáva situáciu pri ktorej došlo ku kolízii v modifikovanej vrstve MAC (modul *mac*).

9.0.8.1 Popis kolízie

Obrázok 9.2 je výstup z nástroja Sequence chart a detailný popis jednotlivých udalosti je možné analyzovať pomocou nástroja Event log. Oba tieto nástroje sú vhodné pre analýzu simulácie poprípadе jej ladenie a pribudli vo verzii OMNeT++ 4.0. V mojom modeli 9.1 som simuloval vznik kolízie na module *host[0]*, ktorý periodicky prijímal rámce z modulu *host[1]*. Modul *host[2]* som použil ako generátor rámcov, ktoré budú spôsobovať kolízie. Na obrázku reprezentuje sivý úsek zastavenie simulačného času. Modul *host[0]* prijal v rovnaký čas dva rámce, prvý od modulu *host[1]*, čomu odpovedá číslo udalosti 41, druhý od modulu *host[2]* s číslom udalosti 43. Oba tieto rámce boli prijaté modulom *snrEval*. Na základe predchádzajúceho popisu modulu *snrEval*, prebehne nasledujúca obsluha:

1. rámec z udalosti 41, vstupuje do modulu *snrEval*, ktorý sa sa prepne do stavu SYNC, keďže sa jedná o nový rámec, je spočítaná hodnota SNR1, nasleduje prepnutie do stavu Dekódovanie správy

$$\text{SNR1} = (\text{výkon, ktorým bol rámec prijatý} / \text{šum})$$

2. následne je prijatý rámec z udalosti 43, tento rámec bude spracúvaný ako šum, spočíta sa nová hodnota SNR2, rámec sa následne zahodí

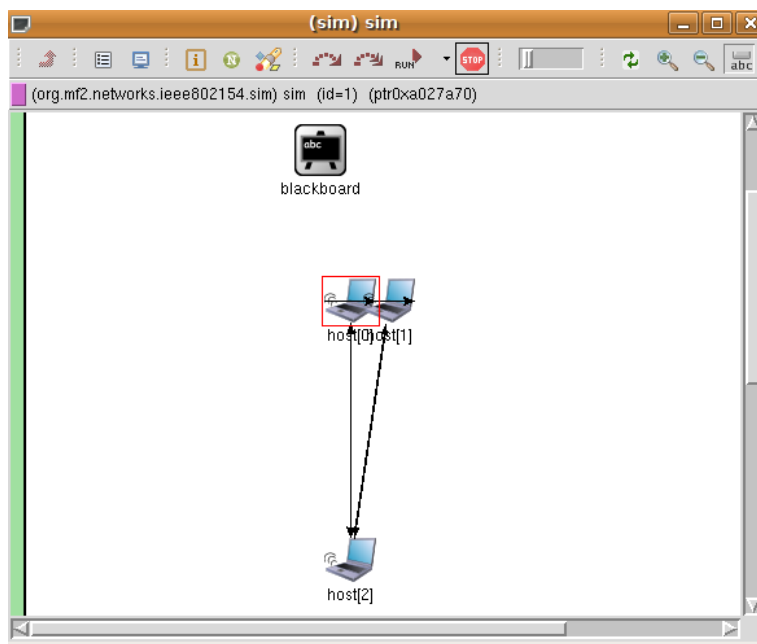
$$\text{SNR2} = (\text{hodnota výkonu, ktorým bol prijatý rámec z udalosti 41}) / (\text{šum} + \text{prijatý výkon rámcu z udalosti 43})$$

3. ukončí sa spracovanie rámcu z udalosti 41, hodnoty SNR1 a SNR2 sa pripoja ako kontrolné informácie k správe, ktorá sa následne prepošle modulu *decider*
4. *decider* na základe hodnôt SNR1, SNR2 spočíta BER a podľa jeho hodnoty sa rozhodne či sa rámec zahodí (tj. rámec obsahuje chybné bity) alebo pošle modulu *mac*

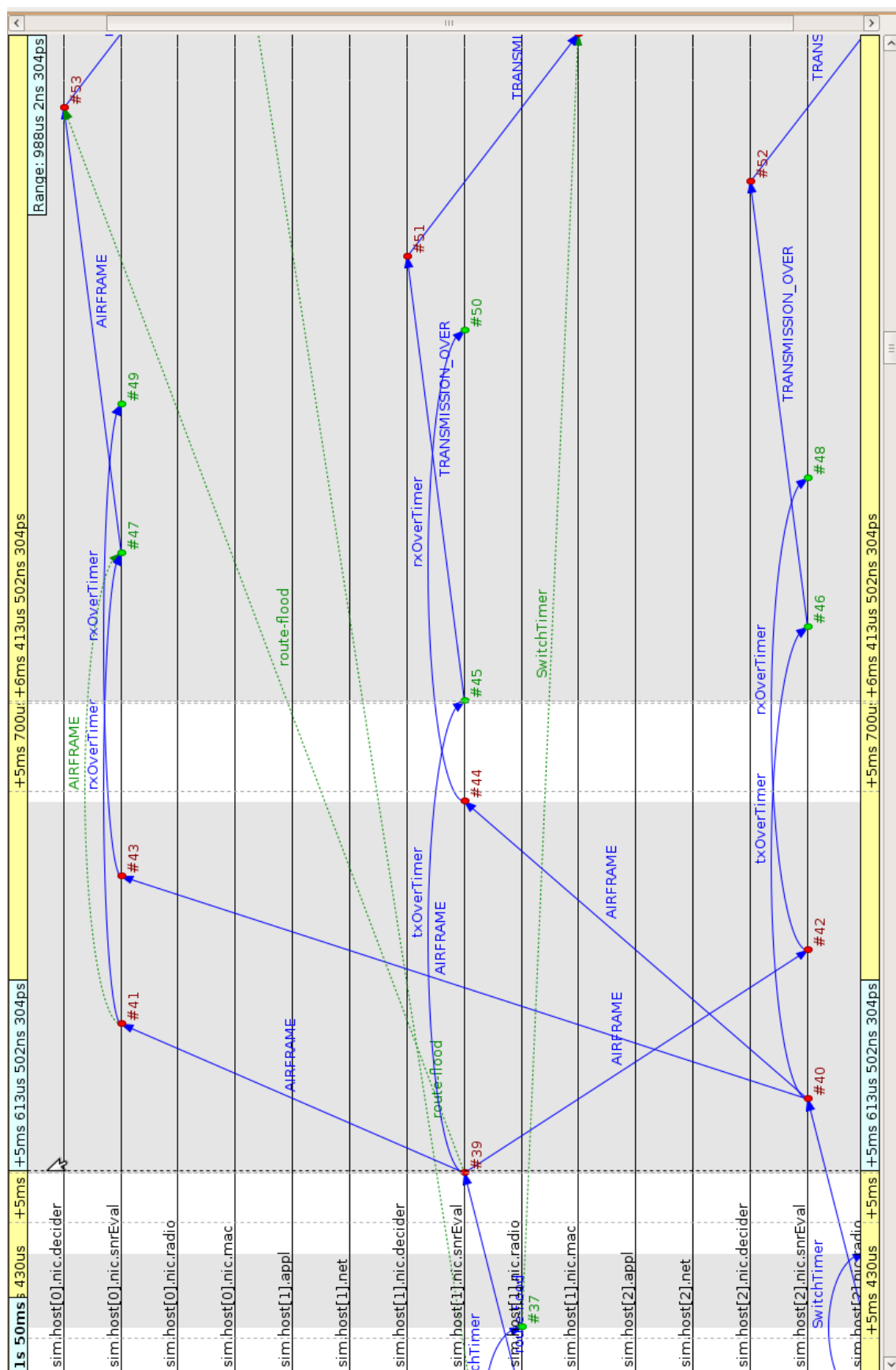
Čím je nižšia hodnota SNR, tým je vyššia pravdepodobnosť, že prijatý rámec bude obsahovať chyby. Tento fakt vychádza zo Shannonovej vety, danej nasledujúcou formulou, ktorá udáva max. teoretický limit prenosovej rýchlosti C kanálu s pásmom o šírke W a odstupom signálu od šumu (SNR).

$$C = W * \log_2(1 + SNR)[b/s, Hz]$$

V prípade, že sa hodnota SNR blíži k nule, prenosová rýchlosť kanálu sa taktiež blíži k nule, z čoho vyplýva, že dochádza k veľkej strate prenášaných dát, čo zapríčini veľkú chybovosť na prenášaných dátach.



Obr. 9.1: Model kolízie



Obr. 9.2: Kolízia na MAC vrstve

Kapitola 10

Testovanie

V tejto časti popíšem testy, ktoré som uskutočnil pomocou daného modelu a porovnáam výsledky týchto testov s reálnym meraním.

10.0.9 Testy zamerané na pohyb XBee zariadení

Pri vykonávaní týchto testov, som modeloval komunikáciu dvoch XBee zariadení, z ktorých jedno bolo v pozícii príjemcu a vysielateľ sa pohyboval. Hlavný faktor, na ktorý som kládol dôraz bolo pozorovanie ako sa mení hodnota výkonu na strane príjemcu s narastajúcou vzdialenosťou. Taktiež som sledoval počet zahodených rámcov, takzvanú stratovosť rámcov (na základe výpočtu chybovosti BER na prijímači) s narastajúcou vzdialenosťou a oslabovaním sa signálu, viď tabuľka [10.1](#)

Vykonal som nasledujúce testy:

1. vzdiaľovanie sa vysielateľa (s výkonom vysielateľa 1mW a 10mW) po kroku 0.6cm (po každom kroku bol vyslaný rámec) do vzdialenosti 5m, viď. grafy [10.1](#) a [10.2](#)
2. vzdiaľovanie sa vysielateľa (s výkonom vysielania 1mW a 10mW) po kroku 0.6cm (po každom kroku bol vyslaný rámec) do vzdialenosti 5m a súčasná náhodná rotácia oboch zariadení okolo vlastnej osi
3. vzdiaľovanie sa vysielateľa (s výkonom vysielania 1mW a 10mW) po kroku 0.6m (po každom kroku bol vyslaný rámec) do vzdialenosti 250m, viď. graf [10.3](#)
4. vzdiaľovanie sa vysielateľa (s výkonom vysielania 1mW a 10mW) po kroku 0.6m (po každom kroku bol vyslaný rámec) do vzdialenosti 250m a súčasná náhodná rotácia oboch zariadení okolo vlastnej osi, viď. graf [10.4](#)
5. náhodná rotácia vysielateľa okolo prijímateľa vo fixnej vzdialenosti 10m

Detailné výstupy z týchto testov sa nachádzajú na priloženom CD vo forme spracovaných grafov a taktiež vo forme súboru s príponou .sca, čo je jeden z výstupných formátov simulátoru Omnet, ktorý sa dá ďalej vhodne spracúvať pomocou nástroja Scave.

Analýzou týchto meraní je vidno, že krivky grafov sa takmer zhodujú s reálnymi meraniami a to aj napriek tomu, že reálne prostredie obsahuje množstvo faktorov spôsobujúcich odrazy atď. Daným modelom som schopný modelovať reálne podmienky s vysokou presnosťou aj napriek tomu, že zanedbám straty, ktoré v nich vznikajú.

Vzdialenosť [m]	Stratovosť [%]	Výkon vysielača [mW]
100	0	1
150	0.12	1
200	11.87	1
220	30.42	1
250	76.38	1
300	49.65	10

Tabuľka 10.1: Stratovosť rámcov

10.0.10 Testy s kolíziou

V týchto testoch bola poloha zariadení XBee stacionárna. Model uvažoval dve zariadenia prijímač a vysielač, kde vysielač vysielal rámce. Ďalej som do simulácie zapojil generátor šumu (zariadenie periodicky generujúce rámce, ktoré spôsobovali kolíziu). V tejto simulácii som sledoval koľko rámcov bolo zahodených (stratovosť) z dôvodu šumu spôsobeného generátormi na prijímači.

Vykonal som nasledujúce testy:

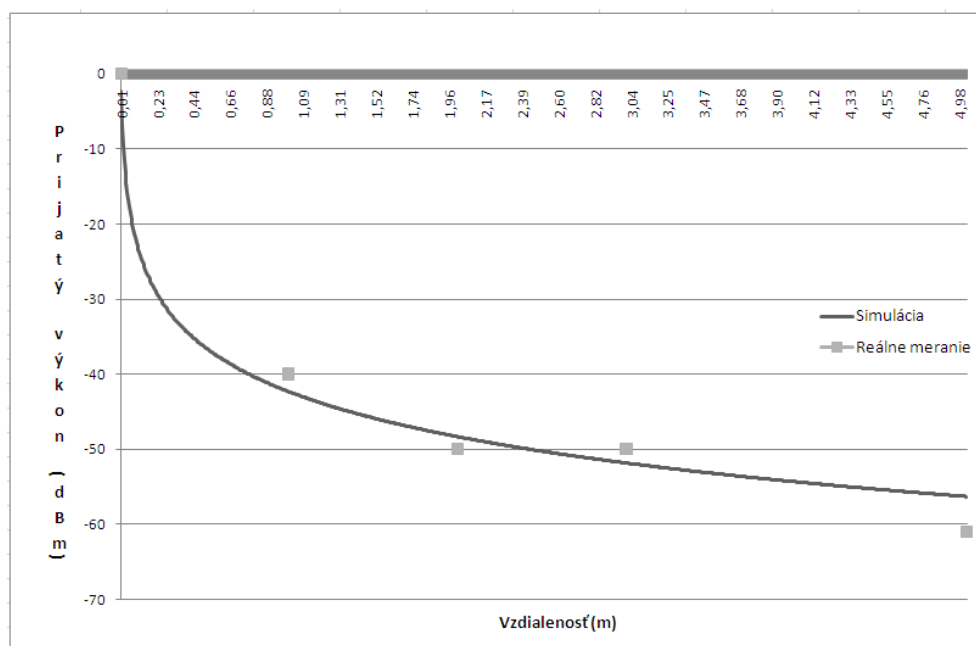
1. model vid'. obrázok 9.1 prijímač - host[0], vysielač - host[1] boli umiestnené vo vzdialenosti 30cm, generátor šumu - host[2] (vysielací výkon 10mW) vo vzdialenosti 3m a 4m
2. model totožný s predchádzajúcim no bol pridaný druhý generátor šumu, jeho umiestnenie bolo $x = \text{host}[2].x - 0.7\text{m}$, $y = \text{host}[2].y$. Vysielací výkon oboch generátorov šumu bol 10mW.

Vzdialenosť generátora šumu [m]	Stratovosť [%]	Stratovosť v reálnych podmienkach [%]
3	9.8	15
4	0	nebolo merané

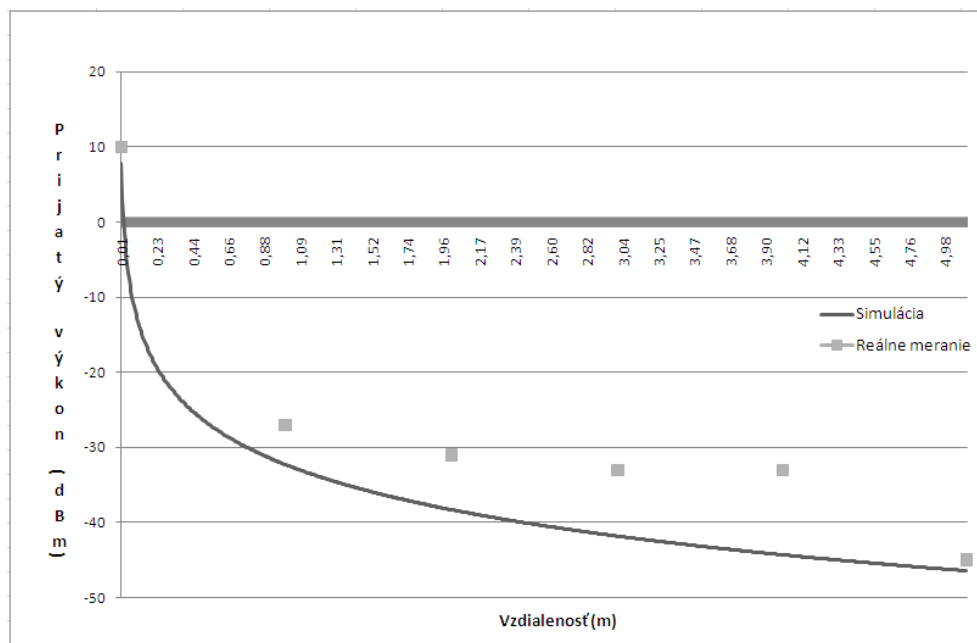
Tabuľka 10.2: Prípád č. 1

Vzdialenosť generátorov šumu [m]	Stratovosť [%]
3	98
4	80

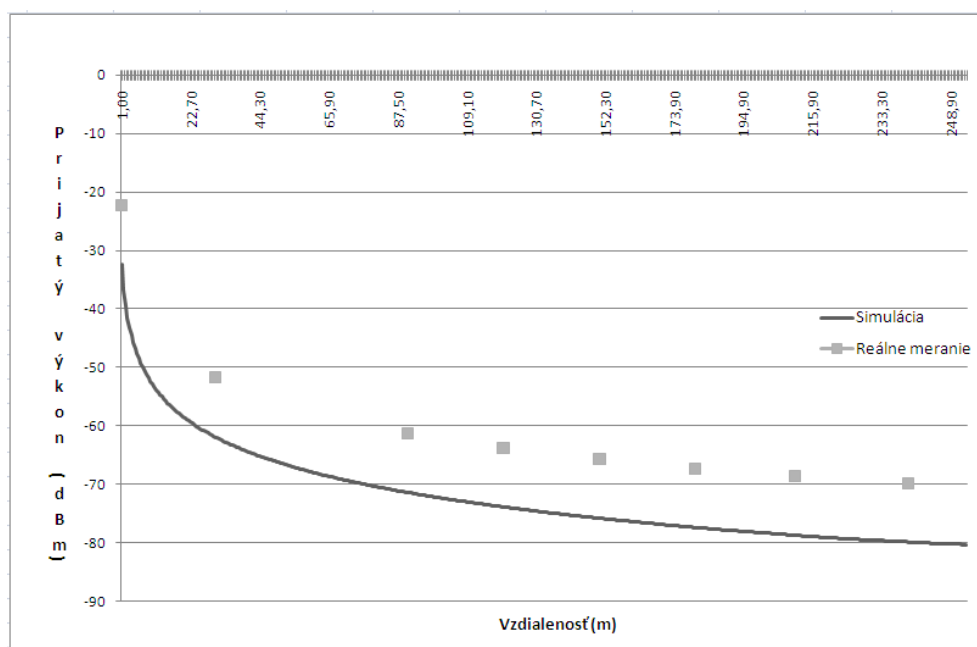
Tabuľka 10.3: Prípad č. 2



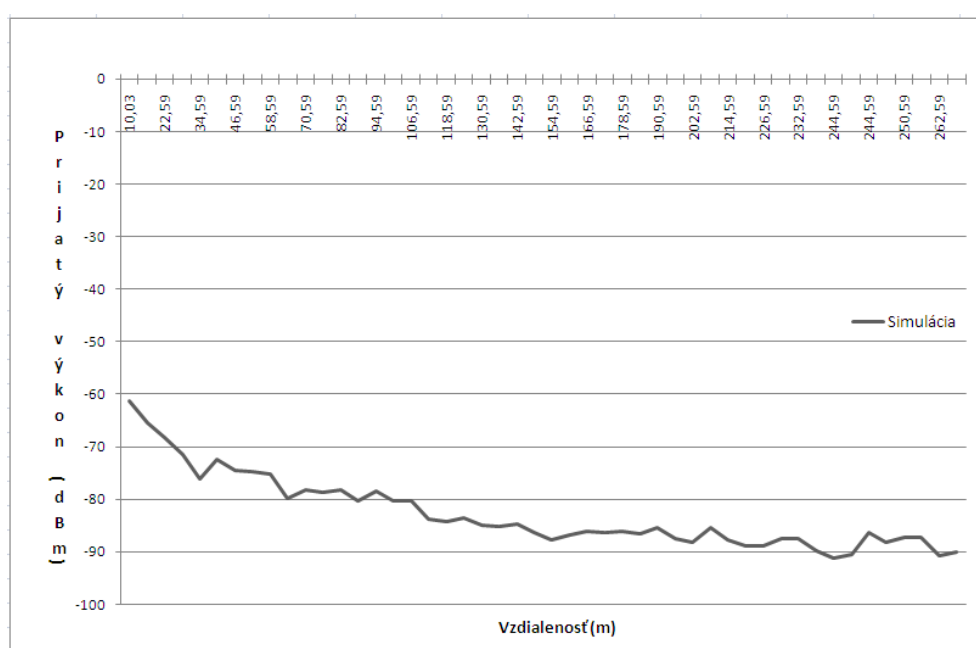
Obr. 10.1: Pohyb na vzdialenosť 5m, vysielací výkon 1mW



Obr. 10.2: Pohyb na vzdialenosť 5m, vysielací výkon 10mW



Obr. 10.3: Pohyb na vzdialenosť 250m, vysielací výkon 10mW



Obr. 10.4: Pohyb na vzdialenosť 250m, vysielací výkon 1mW, rotácia okolo vlastnej osi

Kapitola 11

Záver

Literatúra

- [1] Armando Fox, Steven D. Gribble, Yatin Chawathe, Eric A. Brewer, Paul Gauthier. Cluster-base scalable network services, 1997.
- [2] A. B. Bondi. Characteristics of Scalability and Their Impact on Performance, 2000.
- [3] Brewer. Towards robust distributed systems., 2000.
- [4] Digi International Inc. XBee/XBee-Pro ZB OEM RF Modules product manual, 2008.
- [5] E. F. Codd. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks, Jún, 1970.
www.seas.upenn.edu/~zives/03f/cis550/codd.pdf.
- [6] Eben Hewitt. Cassandra: The Definitive Guide, November 2010.
- [7] John F. Gantz, David Reinsel, Christopher Chute, Wolfgang Schlichting, John McArthur, Stephen Minton, Irida Xheneti, Anna Toncheva, Alex Manfrediz. The Expanding Digital Universe, A Forecast of Worldwide Information Growth Throught 2010, Marec 2007.
<http://www.emc.com/>, stav z 28.2.2011.
- [8] Michael Stonebraker. The Case for Shared Nothing Architecture, 1986.
<http://db.cs.berkeley.edu/papers/hpts85-nothing.pdf>, stav z 28.2.2011.
- [9] D. Pritchett. BASE: An Acid Alternative.
- [10] R. Shoup. The eBay Architecture, Striking a balance between site stability, feature velocity, performance, and cost, November 2006.
www.addsimplicity.com/downloads/eBaySDForum2006-11-29.pdf, stav z 28.2.2011.

Dodatok A

Zoznam použitých skratiek

APL Application Layer

APS Application Support Sub-layer

CSMA-CA Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance

FFD Full Functionality DEvice

FEL Future Event List

FES Future Event Set

FSPL Free-space path loss

GTS Guaranteed Time Slot

GUI Graphical User Interface

IDE Integrated Development Environment

LQI Link Quality Indicator

LR-WPAN Low-Rate Wireless Personal Area Network

MAC Medium Access Control

MF Mobility Framework

NED Network Description

NIC Network Card Interface

NWK Network

RFD Reduced Functionality Device

PAN Person Area Network

PHY Physical

SAP Service Access Point

SFD Start Frame Delimiter

SNR Signal to noise ratio

ZDO ZigBee Device Object

WLAN Wireless Local Area Network

WPAN Wireless Personal Area Network

Dodatok B

Inštalčná a užívateľská príručka

B.0.11 Inštalácia simulátoru OMNeT++ pre platformu Linux

1. Stiahnutie archívu obsahujúceho zdrojový kód zo stránok
<http://www.omnetpp.org/omnetpp>
2. Prekopírovanie archívu do adresára /usr/local/
3. Rozbalenie archívu pomocou príkazu `tar zxvf omnetpp-4.0.src.tgz`
4. Do užívateľského profilu `.bash_profile` alebo `.profile` pridáme riadok
`export PATH=$PATH:/usr/local/omnetpp-4.0/bin`
5. Je potreba zabezpečiť prítomnosť nasledujúcich balíkov v systéme

```
sudo apt-get install build-essential gcc g++ bison flex perl tcl8.4 tcl8.4-dev  
tk8.4 tk8.4-dev blt blt-dev libxml2 libxml2-dev  
zlib1g zlib1g-dev libx11-dev
```

6. Prevedieme nasledujúce príkazy:
`cd /usr/local/omnetpp-4.0`
`./configure`
`./make`
7. Spustenie OMNeT++ s IDE pomocou príkazu `omnetpp`

B.0.12 Inštalácia mnou modifikovaného Mobility Frameworku

1. Stiahnutie súborov Mobility frameworku z svn <http://my-svn.assembla.com/svn/mframework/>,
poprípade prekopírovanie adresára `mf2o4` z priloženého CD do adresára /usr/local/
2. Import MF do aplikácie OMNeT++
 - (a) Po spustení aplikácie Omnet, klikneme na oblasť „Project explorer“, pravým tlačítkom
a zvolíme položku „Import...“
 - (b) Zvolíme „General->Existing project into Workspace“

- (c) V položke „Select root directory“, zvolíme cestu k adresáru mf2o4, tj. /usr/local/mf2o4
- (d) Pomocou CTRL+B, preložíme zdrojové súbory

B.0.13 Práca s modelom IEEE 802.15.4

Vo vývojom prostredí Omnetu si otvoríme v oblasti „Project explorer“ adresárovú štruktúru mf2o4, kde si následne otvoríme adresár networks a v ňom adresár ieee802.15.4. V tomto adresári sa nachádzajú aj xml súbory popisujúce antény. Otvoríme si súbor omnetpp.ini, tento súbor je hlavným konfiguračným súborom modelu simulácie. Zahŕnul som do neho ukážkové nastavenia viacerých modelov, ktoré som simuloval. Samotná simulácia sa potom spustí otvorením súboru omnetpp.ini a následným kliknutím na tlačítko „Run“ z menu aplikácie.

Dodatok C

Obsah priloženého CD

Následující obrázok [C.1](#) zobrazuje štruktúru priloženého CD.

```
.
|-- data
|   |-- XBee.xlsx           - popis charakteristik antén z meraní
|   |-- Graphs.xls         - grafy z realnych meraní
|   |-- Graphs2.xls        - grafy zo simulácie
|-- mf2o4                   - modifikovaný Mobility framework
|   |-- networks
|       |-- ieee802154      - model IEEE 802.15.4
|       |-- results        - výsledky zo všetkých uskutočnených simulácií
|-- readme.txt              - popis adresárovej štruktúry
|-- text
|   |-- Lenart-thesis-2009.pdf - text bakalárskej práce vo formáte PDF
|-- zoznamCD
```

Obr. C.1: Výpis priloženého CD