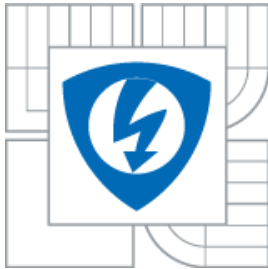




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA MULTICASTOVÝCH PROTOKOLŮ PRO WSN

ANALYSIS OF MULTICAST PROTOCOLS OF WIRELESS SENSOR NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

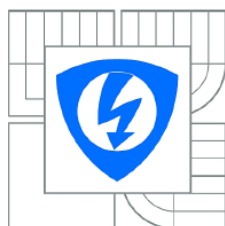
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ KRAJÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN KOUTNÝ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Tomáš Krajiček
Ročník: 2

ID: 97930
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Analýza multicastových protokolů pro WSN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte současný standard Zigbee důrazem na vrstvu síťového rozhraní. Důkladně analyzujte a matematicky vyjádřete multicastové algoritmy ve standardu Zigbee. V rámci práce takto analyzujte také MAODV protokol a srovnajte jej se současným standardem. Vámi analyzované algoritmy ověřte v aplikaci Matlab, kde provedte základní simulace stavů v senzorových sítích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Zigbee alliance [online]. 2002 [cit. 2010-01-15]. Dostupné z WWW: < <http://www.zigbee.org> >.
[2] GADDOUR, Oifa, et al. Z-Cast: A Multicast Routing Mechanism in ZigBee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. s. 9.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Martin Koutný

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou multicastového přenosu v bezdrátové síti ZigBee a implementací příslušných protokolů do prostředí MATLAB, dále realizací multicastového přenosu dat, následným vyhodnocením energetické náročnosti a komparací jednotlivých protokolů.

Klíčová slova:

bezdrátové senzorové sítě, multicast, komunikace, MATLAB, ZigBee, energetická náročnost, MAODV, Z-Cast, Patent

ABSTRACT

This work deals with the issue of multicast traffic over ZigBee wireless network and implementation of corresponding protocols in to MATLAB background, further with realisation of multicast data transmission, consequential energy performance evaluation and comparison of particular protocols.

Keywords:

wireless sensor network, multicast, communication, MATLAB, ZigBee, energy intensity, MAODV, Z-Cast, Patent

KRAJÍČEK, T. Analýza multicastových protokolů pro WSN. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Koutný.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza multicastových protokolů pro WSN“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Martinu Koutnému, za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce, svým rodičům a bratru Michalovi za jejich podporu při studiu.

V Brně dne

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod.....	5
1 Bezdrátová sensorová síť	6
1.1 Vznik.....	6
1.2 VýhodyZigBee.....	7
1.3 Rozdělení uzlů, topologie	8
1.4 Přenos dat.....	9
1.4.1 Unicast	10
1.4.2 Broadcast	10
1.4.3 Multicast	10
1.4.4 Ad-hoc směrovací protokoly	11
2 Multicast v ZigBee	12
2.1 Multicast podle Patentu.....	12
2.1.1 Připojení do multicastové skupiny	13
2.1.2 Opouštění multicastové skupiny.....	15
2.1.3 Přenos datových paketů	16
2.2 MAODV	16
2.2.1 Připojení do multicastové skupiny	17
2.2.2 Odpojení od multicastové skupiny	19
2.3 Z-Cast.....	20
2.3.1 Multicastové směrování v Z-Cast	23
3 Spotřeba energie.....	27
3.1 Spotřeba energie prvku v WSN	27
3.1.1 Spotřeba energie při komunikaci	27
3.2 Výpočet energie v jednotlivých stavech	29
4 Realizace multicastových protokolů v prostředí MATLAB	31
4.1 Úvod do prostředí MATLAB.....	31
4.2 Vytvoření sensorové sítě.....	31
4.3 Provoz v síti	36
5 Výsledky simulace	37
5.1 Patent vs. MAODV	37
5.1.1 Energetická náročnost v závislosti na počtu členů ve skupině.....	37

5.2	Patent vs. Z-Cast	39
5.2.1	Energetická náročnost při posílání dat.....	39
5.2.2	Energetická náročnost v závislosti na hustotě sítě.....	40
5.2.3	Celková energetická náročnost	42
6	Závěr.....	44
7	Seznam použité literatury	45
8	Seznam zkratk	47
9	seznam Příloh	49
9.1	Grafy energetické náročnosti Patent vs. MAODV	49
9.1.1	Energetická náročnost v závislosti na počtu členů ve skupině.....	49
9.2	Grafy energetické náročnosti Patent vs. Z-Cast.....	49
9.2.1	Energetická náročnost při posílání dat.....	49

ÚVOD

Bezdrátové sensorové sítě jsou v poslední době stále více využívanějším elementem na poli moderních technologií. Tento fakt je zapříčiněn především jejich mobilitou - koncové uzly jsou schopny pohybu bez jakéhokoliv omezení díky tomu, že není nutné, aby byly připojeny do sítě. Pro oblast, která je pokryta senzory, stačí zřídít pouze přístupový uzel, přes který probíhá veškerá komunikace a sběr dat. Jedná se o daleko efektivnější a ekonomičtější způsob, než kdyby měl být každý uzel připojený do sítě zvlášť.

Vzhledem k širokému využití senzorů, jejichž umístění či požadavek na pohyblivost může často komplikovat přísun energie, je vhodné koncové uzly napájet baterií. Avšak při použití baterií musíme uvažovat spotřebu uzlů a s tím související životnost baterií. Existuje několik možností zvýšení živnosti baterie. Jednou z nich je zvýšení kapacity. Zde ale narážíme na problém, že při zvětšování kapacity se zvětšuje i velikost baterie a s ní pak rostou i rozměry jednotlivých prvků senzorů. Druhou cestou může být snižování spotřeby energie u koncových zařízení.

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu jednotlivých multicastových protokolů, za jejichž adekvátního použití lze dosáhnout snížení spotřeby energie a zefektivnění přenosu dat. První část práce je zaměřena na teoretické poznatky o bezdrátových sensorových sítích. Druhá část se zabývá rozбором tří multicastových protokolů. Prvním z nich je protokol založený na multicastovém přenosu dat v ZigBee podle amerického patentu. Druhým je známý a využívaný protokol, hlavně v ad-hoc sítích, MAODV. Třetím protokolem je necelý rok starý protokol Z-Cast, který se opírá jednak o MAODV, jednak o protokol, který je patentovaný americkým úřadem – Patent. Třetí část práce se zabývá implementací protokolů do prostředí MATLAB a následným analyzováním multicastových algoritmů.

Cílem diplomové práce je ověření efektivnosti používání multicastových protokolů v bezdrátových sensorových sítích, porovnání dostupných multicastových protokolů mezi sebou a simulace stavů v sensorových sítích. Dále se budu zabývat zpracováním výsledků z aplikace MATLAB a zjišťováním nejefektivnějšího a nejúspornějšího multicastového směrování pro ZigBee. Předpokládám, že potvrdím hypotézu, že energeticky nejšetnější je multicastový protokol Patent, který se opírá se o americký patentový úřad.

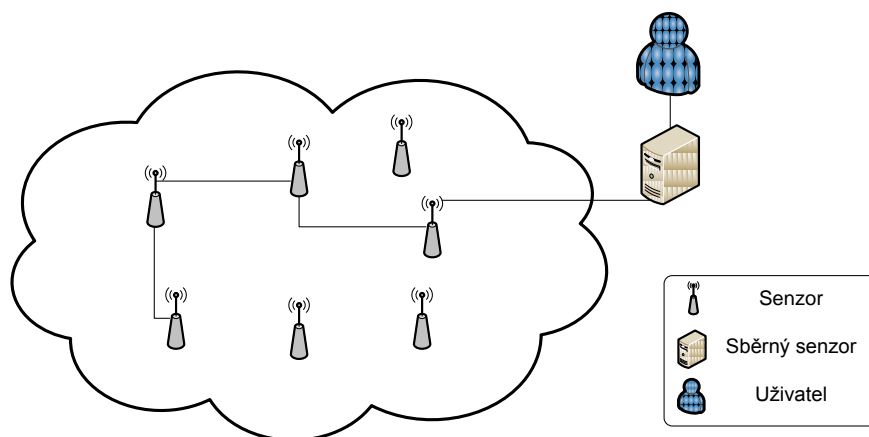
1 BEZDRÁTOVÁ SENZOROVÁ SÍŤ

1.1 Vznik

Bezdrátové senzorové sítě spadají do obecné třídy bezdrátových osobních sítí WPAN (Wireless Personal Area Network). Jedná se o bezdrátové technologie, které jsou určeny ke komunikaci a přenosu informací na krátké vzdálenosti.

Anglickou zkratkou WSN (Wireless Sensor Network) jsou označovány sítě složené z autonomních prvků, které používají senzory k monitorování fyzikálních parametrů okolí. Lze si pod tím představit například sběr informací typu: měření tlaku, teploty, detekce kouře a jiné. WSN se může skládat ze stovek až tisíce senzorů. Každý senzor WSN disponuje bezdrátovým vysílačem, přijímačem, baterií a mikroprocesorem.

Do oblasti, ve které chceme sbírat data, se rozmístí koncové prvky sítě. Tyto prvky zastávají funkci senzorů (čidel), které jsou propojeny prostřednictvím tzv. řídicích prvků s ostatními prvky sítě. Pokud koncové senzory zaznamenají jakoukoliv změnu, posílají data skrz řídicí prvky sítě až k centrálnímu prvku, který většinou bývá výkonnější a kvůli spolehlivosti je napájen z elektrické sítě (viz obr. 1.1). [1]



Obr 1.1: Bezdrátová senzorová síť

Obecně lze do bezdrátových senzorových sítí zařadit technologie typu WLAN (Wireless LAN), Bluetooth, MANET (Mobile Ad Hoc Networks) a ZigBee.

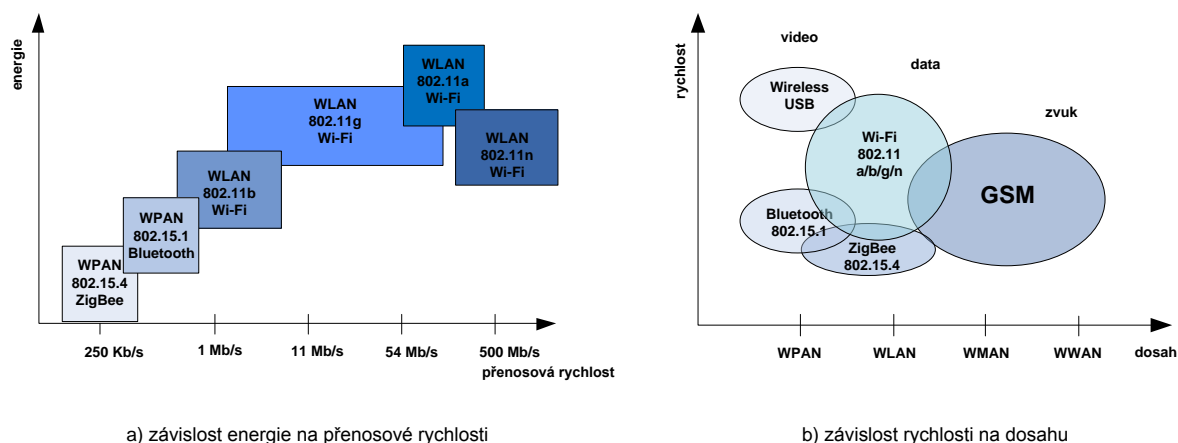
Právě bezdrátová technologie ZigBee, označovaná též jako IEEE 802.15.4., byla vyvinuta za účelem komunikace a spojení elektronických bezdrátových zařízení, které vykonávají monitorující funkce.

ZigBee je celosvětovým otevřeným standardem, platným od roku 2004 a spravovaným společností ZigBee Alliance. [2]

1.2 Výhody ZigBee

Primárně se ZigBee využívá pro bezdrátové pokrytí prostoru zařízeními, které mají dle specifikace dosah do 75 metrů. Ve volném prostoru může mít ZigBee dosah až stovky metrů v závislosti na zvoleném modulu a vysílacím výkonu. Výše zmiňovaná technologie byla vyvinuta za účelem sběru dat ze senzorů. Jedná se o zařízení, které bývá pro svou nízkou spotřebu napájeno baterií, což se projevuje i na přenosové rychlosti, která se pohybuje maximálně ve výši 250kb/s. Tímto ZigBee vyplňuje mezeru již existujících technologií na trhu. [3]

Ve srovnání s výše zmiňovanými technologiemi má ZigBee sice nejnižší přenosovou rychlost s relativně menším dosahem vysílání, ovšem díky tomu dokážou uzly s jedním napájecím článkem fungovat řádově roky, což je jeden z největších kladů této technologie, viz obr. 1.2.



Obr. 1.2: Srovnání bezdrátových technologií podle přenosových rychlostí a dosahu

Mezi další výhody je možné zařadit nízkou pořizovací cenu, vysokou spolehlivost, jednoduchou implementaci, nízký příkon při obousměrné komunikaci či vysoké zabezpečení. Je také důležité zmínit, že se jedná o celosvětově otevřený standard. [4]

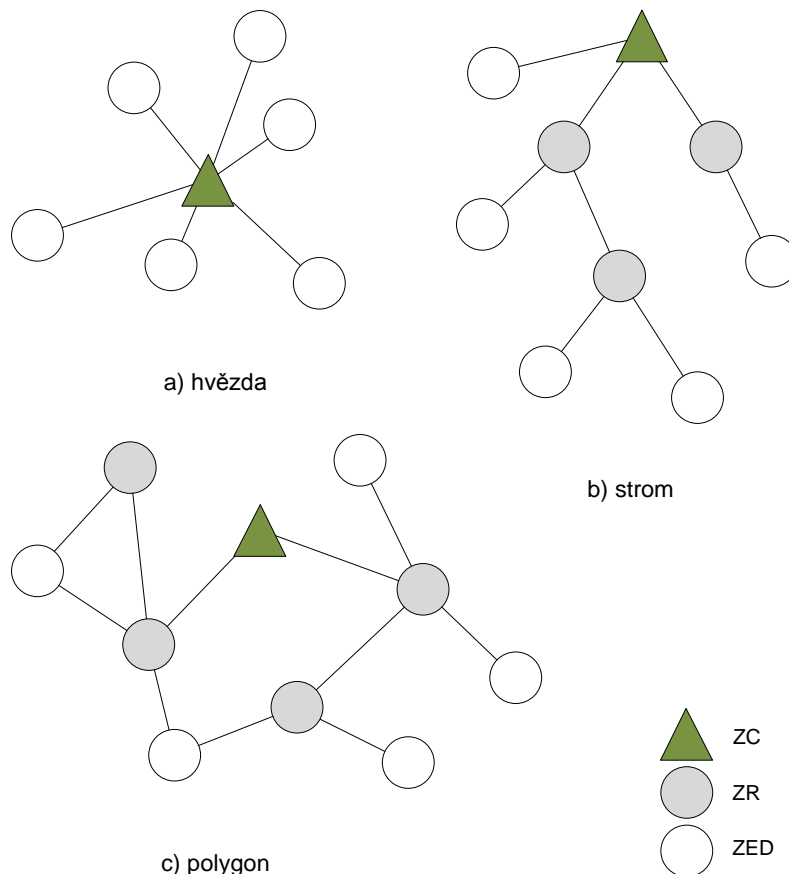
1.3 Rozdělení uzlů, topologie

Síť IEEE 802.15.4 sestává ze dvou typů zařízení. Zařízení plně funkční FFD (Full Function Device) a zařízení s omezenou funkcí RFD (Reduced Function Device). Mezi RFD řadíme uzly typu ZC (ZigBee Co-ordinator) a ZR (ZigBee Router). Mezi RFD patří právě koncové zařízení ZED (ZigBee End Device), které jsou zastoupeny senzory. [5]

Standard ZigBee definuje tři různé topologie, viz obr. 1.3. Základní topologií je topologie hvězda. Toto zapojení je nejjednodušší, ale také nejvíce omezené. Komunikace zde probíhá mezi jedním koordinátorem (ZC) a ostatními koncovými uzly (ZED). ZC řídí veškerou komunikaci; potřebuje – li jedno koncové zařízení komunikovat s jiným, musí tento přenos probíhat právě přes koordinátora.

Topologie strom umožňuje vytvářet dalekosáhlejší sítě díky ZR. V topologii strom je umístěn jeden ZC, který sestavuje a řídí chod celé sítě. Směrovače zvětšují dosah a rozložení sítě do vzdálenějších míst.

Posledním typem sítě je topologie polygon. Jedná se o spojení topologií strom a hvězda. Tato topologie umožňuje komunikaci s koncovými zařízeními více cestně. To znamená, že mezi jednotlivými uzly existuje více spojení, což sebou nese však jak výhody, tak i nevýhody. Pokud z jakýchkoli příčin dojde k odpojení některého z uzlů, síť má možnost komunikovat přes uzel jiný právě díky redundantní cestě. Tímto způsobem se zvyšuje spolehlivost komunikace, na druhou stranu ale díky vícecestnému spojení může docházet k přebytečnému přenášení zpráv.

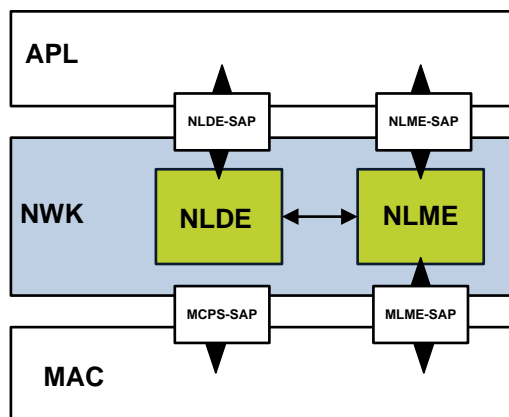


Obr. 1.3: Základní rozdělení topologií

1.4 Přenos dat

Síťová vrstva zaručuje, že každé zařízení bude mít možnost posílat data všem existujícím prvkům v síti. Zajišťuje také další z mnoha úkolů, jakými jsou například připojení a odpojení od sítě, vytváření a udržování směrovacích tabulek, směrování v síti či zabezpečení.

Síťová vrstva poskytuje datové a řídicí služby. Je tvořena podvrstvou NLDE (Network Layer Data Entity), která má za úkol přenos dat, a podvrstvou NLME (Network Layer Management Entity), která má na starosti řízení a směrování. Tyto služby jsou zpřístupněny vyšší vrstvě skrz přístupové body NLDE-SAP a NLME-SAP podle obrázku 1.4.



Obr. 1.4: Datové a řídicí služby síťové vrstvy

Přenos dat je v rámci ZigBee standardu definován typem unicast (pouze jedinému uzlu), broadcast (všem uzlům v síti najednou) a multicast (pouze skupině uzlů), viz obr. 1.5.

1.4.1 Unicast

Zdrojový uzel rozposílá kopii každého paketu směrem k cílovému uzlu. Pokud chce více uživatelů přijímat data, jsou pakety rozposlány každému uživateli současně, což může mít za následek nejen zahlcení sítě, ale i zvýšené energetické nároky na mezilehlé uzly.

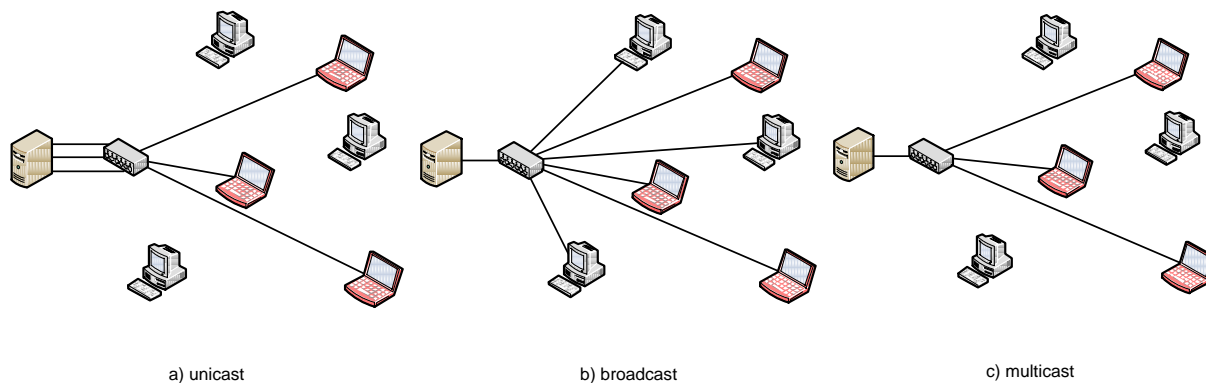
1.4.2 Broadcast

Zdrojový uzel pošle pouze jednu kopii paketu na broadcastovou adresu. Tímto způsobem je paket přeposlán každému uzlu v síti. Propustnost sítě je zachována, avšak dochází k nevyžádanému posílání dat uzlům, které o data nestojí. Tyto uzly spotřebovávají svou energii na příjem a zpracování dat a poté data zahazují. Tento způsob je energeticky nešetrný hlavně pro bezdrátové senzorové sítě.

1.4.3 Multicast

Zdrojový uzel pošle jednu kopii paketu směrem ke skupině vybraných příjemců. Multicast je závislý na typu sítě a taky na typu protokolu, podle kterého se přenos řídí. V praxi to znamená, že uživatelům, kteří žádají stejné data a jsou členové multicastové skupiny, je přeposlána jedna kopie dat, která se potom kopíruje všem členským uzlům.

Obecně multicastová adresa určuje libovolnou skupinu uživatelů, kteří se chtějí připojit do skupiny a chtějí přijímat data posílaná do této multicastové skupiny.



Obr. 1.5: Základní typy datových přenosů

1.4.4 Ad-hoc směrovací protokoly

Ad-hoc sítě jsou koncipované tak, že spojení je vytvořeno až tehdy, má-li uzel potřebu komunikovat s jiným uzlem. Po přenesení potřebných informací toto spojení zaniká.

Tato práce se zaměřuje na implementaci protokolů do standardu ZigBee. Síť tvořená prvky této technologie by se svými parametry spadála spíše do Ad-hoc než do IP sítí. Přesto existují protokoly, které jsou přímo určené standardu ZigBee [6].

2 MULTICAST V ZIGBEE

2.1 Multicast podle Patentu

Jedná se o patent číslo US 7,564,786 B2 z 21.července 2009 [7]. Tento dokument popisuje implementaci a funkci multicastu v ZigBee síti. Podnětem pro vytvoření multicastu jsou výše zmíněné nevýhody unicastového a broadcastového vysílání. Od multicastu se očekává efektivní přenášení datových paketů mezi uzly, které tvoří určitou skupinu. Dalším aspektem tohoto vynálezu je způsob přenosu datových paketů s použitím minimální informace tak, aby se došlo ke snížení požadavků na paměť. Posledním požadavkem pak bylo, aby nedocházelo k přenášení duplicitních paketů a s tím spojenému zvyšování zatížení uzlů.

V souladu s výše uvedenými stanovisky je ZigBee síť tvořená multicastovou skupinou zahrnující nejméně dva uzly, které jsou obklopeny dalšími uzly. Pokud multicastová data vysíláme jenom do uzlu tvořícího multicastovou skupinu, data mohou být doručena ihned.

Uzly jsou rozděleny podle role, kterou v multicastovém stromu vykonávají:

- *GC (Group Coordinator)* – řídí multicastové skupiny mezi uzly, které formují multicastové seskupení
- *GM (Group Member)* – žádá o připojení do multicastové skupiny, většinou se stává koncovým zařízením
- *MR (MulticastRouter)* – spojuje GM s ostatními uzly nebo spojuje GC s GC, má funkci směrovače

Celý patent je rozdělený do tří možných začlenění, podle kterých se může multicastové směrování v ZigBee sítích chovat.

V **prvním vzorovém začlenění** nevyužívá multicastové směrovací tabulky, ale bitmapy, čímž jsou sníženy nároky na paměť. K přiřazování multicastových skupin se používá 16-ti bitová adresa PAN ID. Tato adresa může být dále rozdělena například na 4 bitový prostor, který určuje první multicastovou skupinu, a na prostor o velikosti 12 b, který je určen pro druhou multicastovou skupinu. Multicastová skupina adres je generována kombinováním první a druhé multicastové skupiny adres.

Ve **druhém vzorovém začlenění** jsou počítány všechny potomkové uzly. Díky tomu se zmenší paměťové místo potřebné k uchování směrovacích tabulek. ZC ukládá informace týkající se všech uzlů v ZigBee síti a právě díky těmto informacím řídí uzly v multicastové skupině a jejich polohu ve stromě. K tomu využívá broadcastového adresního bitu v hlavičce síťové vrstvy. Pokud není cílová adresa nastavena, paket je zpracován jako broadcastový. Pokud je cílová adresa nastavena, je s paketem zacházeno jako s multicastem.

Podle **třetího vzorového začlenění** používáme jeden byte k uchování MRT (Multicast Routing Table) v paměti. Multicastová směrovací tabulka obsahuje pole multicastových adres, GM pole, GC pole a počet potomkových uzlů, kterými jsou GM nebo MR pole, viz tab. 2.1. Multicastové pole adres má rozměr 16 – 32 bit, GM a GC jsou samostatně 1 bit veliké.

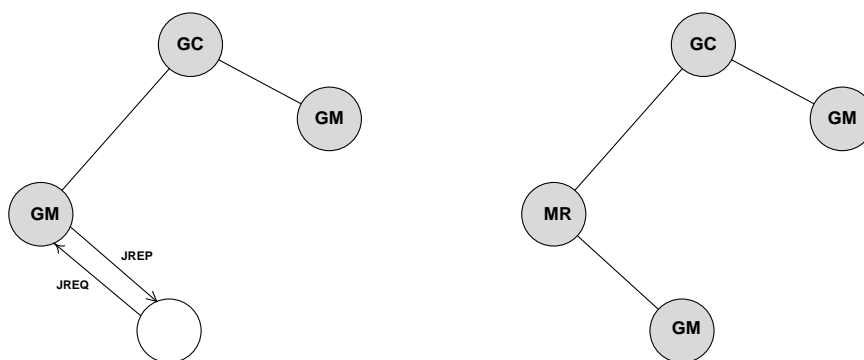
Multicastová skupinová adresa	GM	GC	Počet potomkových uzlů GM nebo MR
-------------------------------	----	----	-----------------------------------

Tab. 2.1: Struktura multicastové směrovací tabulky

Pokud je v síti uzel GM, kontroluje záznam v poli GM, pokud je zapojen uzel GC, je prozkoumáváno GC pole. Pole „Počet Potomkových Uzlů GM nebo MR“ je velké 6 bitů a počítá s potomkovými uzly v celém multicastovém stromě. Velikost každého pole se ovšem může lišit podle nastavení uživatele.

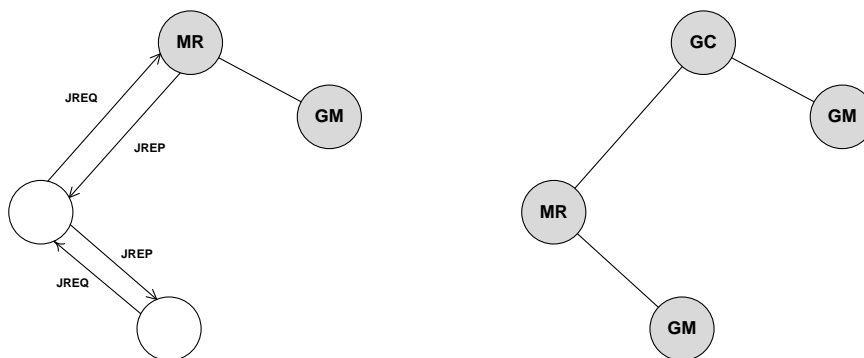
2.1.1 Připojení do multicastové skupiny

Pokud uzel žádá o připojení do multicastové skupiny, posílá unicastem zprávu JREQ (Join Request) po stromové cestě k ZC, viz obr. 2.2. V případě, že uzel uchovává MRT, zastaví další vysílání přijaté JREQ zprávy a aktualizuje svou MRT tím, že zvýší pole s počtem potomkových uzlů o jeden. Jako odpověď na JREQ vytvoří zprávu JREP (Join Reply), která obsahuje informace související s multicastovou skupinou. JREP je posláno uzlu, který vytvořil JREQ a po obdržení této zprávy se tento uzel stává GM.



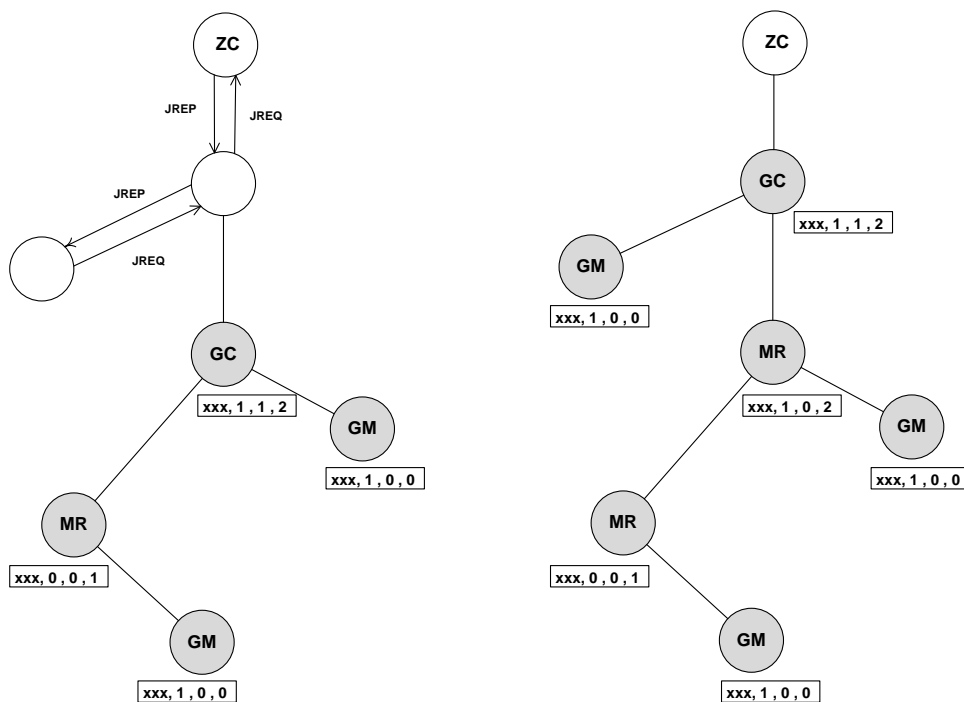
Obr. 2.2: Připojení k uzlu, patřícího do multicastové skupiny

Jestliže uzel, který obdrží JREQ, není v multicastové skupině, přepoše zprávu dalšímu uzlu ve stromě. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud zprávu neobdrží člen skupiny, který vytvoří zprávu JREP jako odpověď, viz obr. 2.3. Při průchodu zprávy uzlem, který nebyl ve skupině a JREQ jenom přeposlal, je změněn status na MR a vytvoří se MRT (pole s počtem potomkových uzlů = 1).



Obr. 2.3: Připojení k uzlu, který nepatří přímo do multicastové skupiny

Pro případ, že se připojí nějaký uzel přímo k ZC prostřednictvím uzlu, který nebude součástí skupiny, si ZC udržuje informace týkající se množství multicastových skupin a proto vytvoří zprávu GCUD (GC Update Message), ve které oznamuje, že byl vytvořen nový GC. Po obdržení zprávy GCUD nový GC aktualizuje informace v MRT (nastaví GC pole na "1"). Uzel, který už nadále nebude vykonávat funkci GC, po obdržení GCUD také aktualizuje informace v MRT (změní GC pole z "1" na "0"), viz obr. 2.4.



Obr. 2.4: Připojení k uzlu přes ZC

2.1.2 Opouštění multicastové skupiny

Uzel GM, který chce opustit skupinu, pošle LREQ (Leave Request) svému rodičovskému uzlu jako požadavek k opuštění skupiny. Po obdržení LREQ rodičovský uzel sníží hodnotu v poli s počtem potomkových uzlů o jedna a pošle LREP (Leave Reply) zprávu uzlu GM. Pokud uzel vygeneroval zprávu LREP status MR, protože není dále potřebný jako router, tak také posílá LREQ svému rodičovskému uzlu. Rodičovský uzel pošle uzlu MR zprávu LREP a sníží si hodnotu pole s počtem potomkových uzlů o jedna.

Pokud uzel GC, který dříve vykonával tuto funkci, má jednoho z potomků GM nebo MR, automaticky vysílá zprávu GCUD. Po obdržení GCUD zprávy se určený uzel stává novým GC. Nato pak GCUD pošle ACK o změně uzlu GC přímo do ZC.

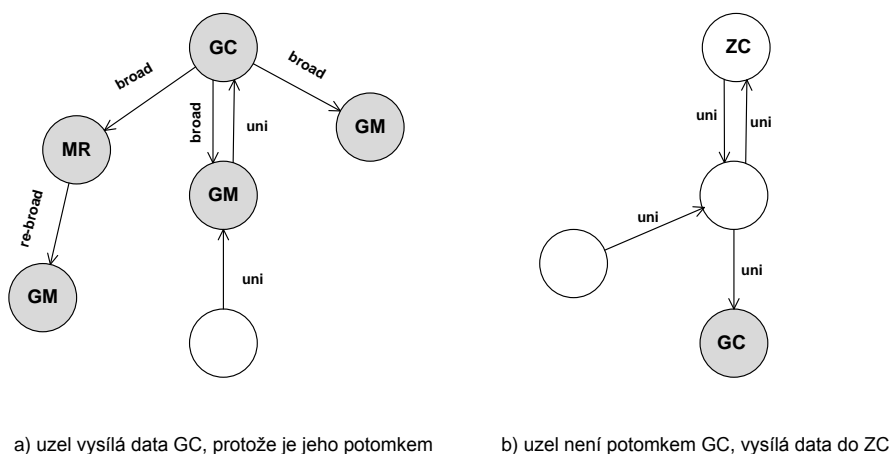
Po přijetí GCUD uzel MR sečte potomky, kteří jsou GM nebo MR. Pokud je pole s počtem potomkových uzlů větší nebo rovno 2, MR slouží jako nový GC. MR pošle do ZC GCUD ACK zprávu oznamující změnu na GC. Pokud pole s počtem potomkových uzlů = 1, MR pošle GCUD zprávu svým potomkovým uzlům.

Pokud GM opouští multicastovou skupinu a nemá žádné potomky, kteří jsou GM nebo MR, vymaže svou MRT. V případě že GM opouští multicastovou skupinu a má přinejmenším jednoho potomka ve stavu GM nebo MR, slouží jako MR.

2.1.3 Přenos datových paketů

V případě, že některá data mají být doručena do multicastové skupiny, jsou nejprve zaslány unicastem do GC. GC potom tyto data posílá broadcastem všem svým potomkovým uzlům. Pokud je potomkový uzel GM nebo MR, jsou data re-broadcastována. V případě, že se data dostanou ke koncovému uzlu, ten data přijme, zpracuje ve vyšší vrstvě a další data nevyšílá. Jedná-li se o uzel, který do multicastové skupiny nepatří, dojde k zahození paketu.

Pokud není uzel následovníkem GC, musí tento uzel vyslat data unicastem přímo do ZC. ZC po obdržení a zpracování tyto data pošle unicastem do GC, viz obr. 2.5.



Obr. 2.5: Způsob přenosu datových paketů

2.2 MAODV

Protokol MAODV (Multicast Ad hoc On Demand Distance Vector) funguje na principu AODV, avšak aby byla umožněna multicastová komunikace s více uzly najednou, je zapotřebí tyto uzly spojit do stromové struktury. MAODV obecně využívá dynamického, samočinného, multi-skokového směrování mezi stanicemi, které se chtějí připojit a zúčastnit se multicastového vysílání.

Charakteristickým znakem protokolu MAODV je použití sekvenčních čísel pro multicastové skupiny. Každá skupina má své sekvenční číslo, které je inicializované Group leaderem a je pravidelně inkrementované. Pomocí těchto sekvenčních čísel je zabezpečeno, že nalezené cesty k multicastovým skupinám jsou vždy nejaktuálnější. Při možnosti volby mezi dvěma cestami k multicastovému uzlu si žádající uzel vybere vždy tu s nejvyšším sekvenčním číslem.

Uzly v MAODV jsou podobně jako u Patentu rozděleny na:

- *GL (Group Leader)* – uzel, který je prvním v multicastové skupině a koordinuje celou multicastovou skupinu
- *TM (Treemember)* – uzel, který má funkci prostředníka ve stromové struktuře a má za úkol udržovat spojení mezi uzly patřící do multicastové skupiny
- *GM (Group member)* – člen multicastové skupiny, který je spojen s dalšími členy prostřednictvím TM

2.2.1 Připojení do multicastové skupiny

Pokud uzly, které využívají multicastovou skupinu, zůstávají spojeny v multicastovém stromě, protokol MAODV nehraje žádnou roli. Při připojování uzlů k multicastové skupině dochází k objevování multicastové trasy za použití mechanismu route – discovery, který je založen na broadcastovém vysílání.

Cesta je určena tehdy, dosáhne – li zpráva RREQ (Route Request) k uzlu, který je členem multicastové skupiny, a je-li splněn předpoklad, že záznam uzlu o sekvenčním čísle multicastové skupiny je přinejmenším stejně velký, jako číslo obsažené ve zprávě RREQ. Na žádost zprávy RREQ, která nese příznak „J“ (JRREQ – Join Request), může odpovědět každý uzel s aktuální cestou k multicastovému stromu. Tato zpráva je vysílána všesměrově, a to z důvodu, že připojující uzel nezná cestu ke GL, viz obr. 2.6.

V případě, že příznak není ve zprávě nastaven, cílová adresa zprávy je určena adresou multicastové skupiny. Pokud daný uzel zná GL a cestu k němu, může vložit adresu do pole *Multicast Group Leader* ve směrovací tabulce a poslat zprávu RREQ přímo do odpovídajícího cíle. Aktuální cesta je určena v multicastové tabulce, která obsahuje sekvenční číslo pro multicastovou skupinu přinejmenším stejně velkou jako ve zprávě RREQ.

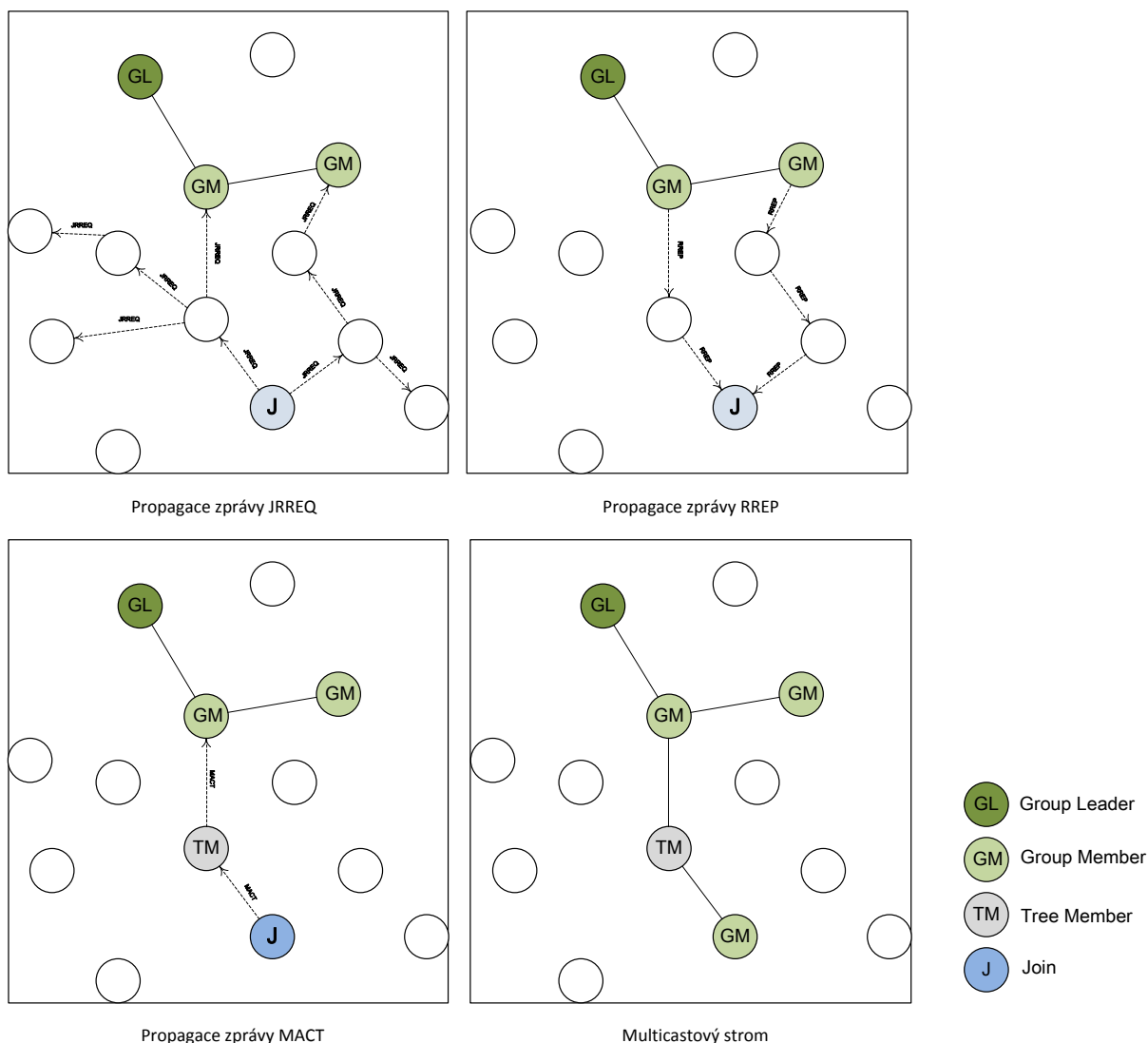
Pokud uzel přijme zprávu RREQ pro připojení k multicastové skupině a je členem multicastu pro danou skupinu, uzel aktualizuje multicastovou směrovací tabulku a vygeneruje RREP zprávu. Cesta k multicastové skupině je zpřístupněná vysláním zprávy RREP (Route Replies) zpátky ke zdroji. Tato zpráva je posílána unicastem a obsahuje aktuální sekvenční číslo pro multicastovou skupinu a IP adresu GL skupiny. [8]

Vzhledem k tomu, že odpověď RREP může ke zdroji přijít od více uzlů patřících do multicastové skupiny, je vždy vybrána ta nejlepší cesta. Za nejlepší cestu je považována ta, po které přijde zpráva RREP obsahující nejvyšší sekvenční číslo, případně nejmenší hodnotu „přeskoku“ (*hop count*). Bez ohledu na to, jestli je zpráva RREP vygenerována GL nebo členem multicastového stromu, pole zprávy jsou nastavena následovně:

- *Počet přeskoků*: 0
- *Cílová IP adresa*: IP adresa multicastové skupiny
- *Sekvenční číslo cíle*: aktuální sekvenční číslo multicastové skupiny
- *Životnost (TTL)*: doba, po kterou uzly obdrží zprávu RREP

Touto cestou je poté vyslána zpráva MACT (Multicast Activation), kterou se daná cesta aktivuje a dojde k připojení daného uzlu ke skupině.

Důležitou roli v procesu připojování hraje i GL, jehož úlohou je inicializace a udržování sekvenčního čísla multicastové skupiny. K tomu slouží zpráva GRPH (Group Hello). Tato zpráva obsahuje sekvenční číslo multicastové skupiny a IP adresu GL, který je zodpovědný za řízení celého multicastového stromu.



Obr. 2.6: Připojení podle MAODV

2.2.2 Odpojení od multicastové skupiny

Člen multicastové skupiny se může kdykoliv od skupiny odpojit. Avšak opustit multicastový strom může jen v tom případě, že není směrovačem pro ostatní uzly ve stromové skupině. Pokud chce uzel opustit multicastovou skupinu a je koncovým uzlem, odešle svému sousednímu uzlu zprávu MACT, která má nastavený příznak „P“ a nastavenou cílovou IP adresu jako adresu multicastové skupiny. Teprve potom si může uzel vymazat záznam o multicastové skupině ze své směrovací tabulky. Poté, co sousední uzel přijme zprávu MACT od uzlu, který se chce odpojit, vymaže si informace o tomto uzlu a směrování k němu. Pokud se odpojením koncového uzlu stane, že sousední uzel se stane koncovým a zároveň

není v multicastové skupině (před odpojením byl pouze směrovacím uzlem), uzel vyšle vlastní MACT zprávu směrem ke GL a sám se odpojí.

Protokol MAODV je protokol pracující výhradně na vyhledávání a připojování uzlů do multicastové skupiny. Jeho využití v bezdrátové technologii ZigBee je spíše nereálné, než pravděpodobné.

ZigBee většinou tvoří stromovou topologii, kde jednotlivé uzly znají své potomky a rodiče. Jediné využití by bylo možné v rozsáhlých sítích s obrovskými počty uzlů, které jsou neustále v pohybu, tudíž nemohou vytvořit stromovou strukturu. V takovém případě by byl protokol založený na broadcastovém vyhledávání cesty na místě. Otázkou jenom zůstává, jestli by nebylo možné zmenšit velikost jednotlivých zpráv, které MAODV využívá. [8]

2.3 Z–Cast

Protokol Z–Cast je multicastový směrovací mechanismus určený pro ZigBee. [9] Je založený na stromovém seskupování bezdrátových sensorových sítí (cluster–tree WSN).

Terminologie rozdělení uzlů v protokolu Z-Cast je následující:

- *ZC (ZigBee Coordinator)* – řídicí uzel stromové struktury, který formuje a řídí přenos dat v multicastovém seskupení
- *ZR (ZigBee Router)* – propojuje členy multicastové skupiny se ZC, má funkci směrovače
- *ZED (ZigBee End Device)* – je koncové zařízení, které může být členem multicastové skupiny; pokud není, má možnost zažádat o připojení do ní

Mechanismus přidělování adres poskytuje každému potenciaálnímu rodiči konečný pod-blok jedinečných síťových adres založených na maximálním počtu potomkových uzlů (C_m), hloubce sítě (L_m) a počtu směrovačů v síti (R_m). Je důležité si uvědomit, že potomek směrovače může být buď směrovačem, nebo koncovým zařízením, z čehož lze vyvodit, že ($C_m \geq R_m$). Zároveň ZC a ZR mohou mít nanejvýš R_m potomků směrovače a musí mít nejméně ($C_m - R_m$) potomků koncových zařízení.

Adresy koncových zařízení jsou přiřazovány direktivně. Celý adresní prostor, který leží na úrovni ZC, je logicky rozdělený do $(R_m + 1)$ bloků. První R_m blok je přiřazen potomkovým směrovačům ZC a poslední blok je vyhrazený pro koncové zařízení, kterým jsou potomky ZC.

Z hodnot C_m , R_m a L_m každý směrovač vypočítá podle vztahu (2.7) parametr C_{skip} , ze kterého odvodí adresu jeho potomka.

$$C_{skip(d)} = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1) & R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \cdot R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m} & R_m > 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

Rodičovské zařízení, které má hodnotu C_{skip} rovno 0, není schopno přijímat potomky a musí s ním být zacházeno jako s koncovým zařízením.

Rodičovské zařízení, které má hodnotu $C_{skip} > 0$, může přijmout zařízení a označit ho adresou, pokud mu zbývá ještě adresový prostor. ZC má hloubku $d = 0$ a \mathbf{d} se zvyšuje o jednotku na každé úrovni.

Každému rodičovskému uzlu umístěnému v hloubce \mathbf{d} , který má adresu $A_{potomkovy_sm\acute{e}rova\acute{c}}$, odpovídá číslo potomkového koncového zařízení N mezi 1 a $C_m - R_m$.

$A_{potomek}$ adresa N -tého potomkového routeru má rodičovský uzel v hloubce \mathbf{d} určený podle vztahu (2.8),

$$A_{potomkovy_sm\acute{e}rova\acute{c},n} = \begin{cases} A_{rodic} + (n - 1) \cdot C_{skip(d)} + 1, & n = 1 \\ A_{rodic} + (n - 1) \cdot C_{skip(d)}, & n > 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

kde číslo \mathbf{n} udává počet potomkových směrovačů.

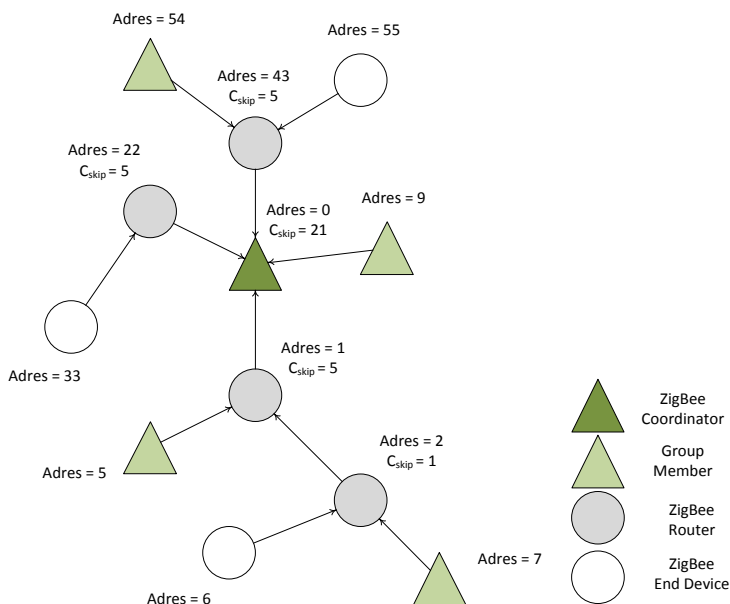
Pro koncové uzly musí být síťová adresa přiřazena následně. Adresa N -tého potomka $ZED - A_{koncove_zarizeni}$ je určena podle (2.9),

$$A_{koncove_zarizeni,n'} = A_{rodic} + (R_m) \cdot C_{skip(d)} + n' \quad (2.9)$$

Kde n' je počet potomkových koncových zařízení.

Pokud bychom uvažovali síť, kde $R_m = 4$, $C_m = 4$ a $L_m = 3$, můžeme přiřadit adresu uzlům ve funkci směrovače pro hloubku $d = 1$ následovně. Nejprve je potřeba podle vzorce (2.7) vypočítat údaj C_{skip} s hloubkou $d = 0$. $C_{skip} = (1 + 4 - 4 - (4 * 4^{3-0-1})) / (1 - 4) = 21$. C_{skip} udává číslo, podle kterého budeme počítat adresy pro potomkové směrovače připojené přímo k ZC. Pro uzel G, který se po zapnutí přihlásí do sítě, obdrží od nadřazeného uzlu (v našem případě ZC) stejnou adresu, jako má on, ale inkrementovanou o hodnotu 1. Podle (2.8) je adresa uzlu $G_{potomkovy_smervac} = 0 + (1 - 1) * 21 + 1 = 1$. Následující potomkový ZR koordinátora je pak adresa předchozího potomka + hodnota C_{skip} rodiče. Adresy potomkových koncových zařízení se počítají podle (2.9). Například pro uzel J, který je připojený k ZR I s adresou = 2 a $C_{skip} = 1$, je výpočet následující: $J_{koncove_zarizeni} = 2 + 4 * 1 + 0 = 6$. Pro uzel K, je adresa: $K_{koncove_zarizeni} = 2 + 4 * 1 + 1 = 7$. [9]

Funkce C_{skip} a hodnoty adres jsou využity v topologii strom při směrování dat k jednotlivým zařízením. Struktura stromového zapojení uzlů a jednotlivé adresy přiřazené na základě výpočtu jsou znázorněny na obr. 2.10.



Obr. 2.10: Adresování uzlů v Z-Cast

2.3.1 Multicastové směrování v Z–Cast

Úkolem Z-Castu je poskytnout účinné směrování dat mezi všemi členy skupin. Z obrázku 1.5 je patrné, že komunikace mezi skupinami členů skrz jednoduchý broadcast není efektivní a proto je vhodnější použít multicastové směrování.

K dosažení tohoto úkolu je nutné vytvořit Multicastové směrovací tabulky (MRT) v ZC a v každém ZR, která slouží k uchování informací o členech každé skupiny, viz tab. 2.11. Navržený mechanismus bere na zřetel počet potomkových směrovačů, které jsou členy určité skupiny; rozhoduje také o cestě, kterou bude paket zaslán skrz stromovou strukturu.

Z-Cast mechanismus spoléhá na vytváření směrovacích tabulek uvnitř každého směrovače, přičemž tyto tabulky slouží k uchování informací o členech patřících do určité skupiny v síti.

MRT se skládá z:

Multicast group address – pole s 16-ti bitovou adresou. Obsahuje adresu multicastové skupiny, která identifikuje jistou skupinu.

GMs address – pole obsahuje seznam adres potomkových uzlů, které jsou členy skupiny po celé stromové síti

Multicast group address	GMs address
Multicast Address 1	node address 1, node address 2
Multicast Address 2	node address 2, node address 3
Multicast Address 3	0

Tab. 2.11: Struktura multicastové směrovací tabulky

Zápisy v tabulce musí být aktualizovány po každém připojení / odpojení v síti. Pokud se uzel připojí do skupiny, všechny ZR mezi připojujícím se uzlem a ZC musí přidat

multicastovou adresu skupiny (pokud neexistuje) do pole *Multicast group address* a adresu připojeného uzlu do pole *GMs address* ve své MRT tabulce.

Aktualizování MRT je velmi důležité, protože navržený mechanismus funguje pouze na bázi této tabulky a podle ní se rozhoduje, jestli data budou přeposlána unicastem, broadcastem, nebo budou zahozeny.

Když uzel opustí multicastovou skupinu, všechny ZR, které jsou mezi tímto uzlem a ZC, musí vymazat adresu uzlu z *GMs address*.

Směrování v ZC

ZR může ověřovat pouze své potomkové směrovače, což provádí tak, že ověří MRT tabulku, avšak nemůže kontrolovat další ZR v síti. Proto je nezbytné poslat multicastové zprávy do ZC ještě před tím, než jsou poslány k členům skupin. ZC je jediný uzel v síti, který může poslat zprávu kterémukoliv zařízení v síti, proto máme jistotu, že zpráva byla doručena všem ZED a byla zpracována všemi ZR. Pro signalizaci, že zpráva byla zpracována ZC, se do multicastové zprávy přidává značka (flag).

Pokud ZC přijme rámeček, zkontroluje, jestli je cílová adresa multicastová nebo unicastová. Pokud je to multicastová adresa, ZC přidá značku do rámce a odešle ji přímo připojenému potomkovému směrovači. Značka je nezbytná k označení, jestli je rámeček odeslán ze ZC. Pokud multicastový rámeček přichází do ZR bez značky, paket musí být odeslán rodičovskému zařízení, dokud není doručen až do ZC. Přidáním značky Z-Cast zaručuje, že rámeček dosáhne všech ZR v síti.

Pokud cílová adresa v rámci obsahuje unicastovou adresu, platí standardní směrování cluster-tree.

Pokud členové skupiny chtějí poslat multicastový paket ostatním uzlům patřícím do své skupiny, požadavek bude poslán unicastem do ZC. Poté je multicastový paket zaslán všem členům uvedeným v multicastové směrovací tabulce.

Směrování v ZR

Pokud je multicastový paket doručen do ZR, mohou nastat následující možnosti:

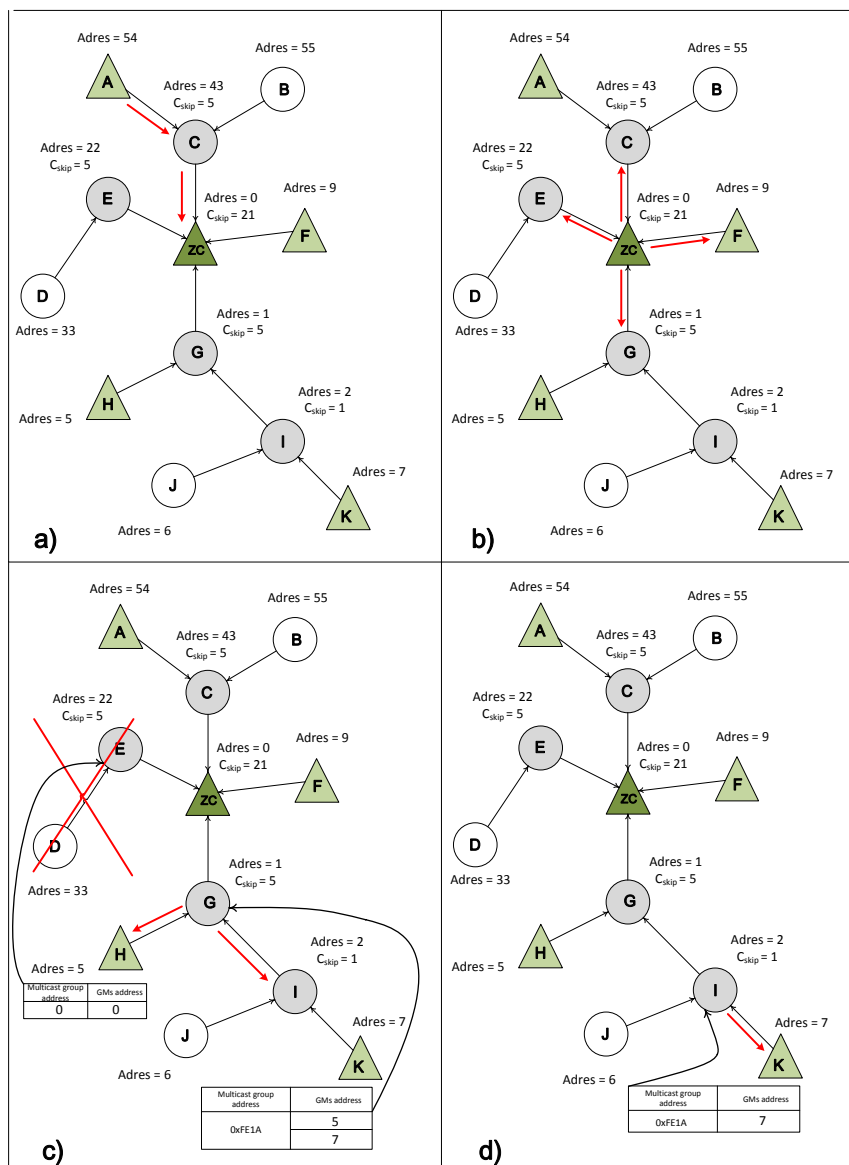
- 1) Pokud není multicastová skupinová adresa nalezena v MRT, je paket zahozen.
- 2) Pokud je multicastová skupinová adresa nalezena v MRT, mohou nastat tyto případy:
 - a) pokud pole GMS_address obsahuje jenom adresu jednoho člena odpovídající skupině, paket bude poslán unicastem členům skupiny
 - b) pokud pole GMS_address obsahuje dvě a více adres odpovídající členům skupiny, paket bude poslán všem přímým potomkovým uzlům (ZR a ZD). ZR nepotřebuje znát kompletní informace sousedů všech přímých potomkových uzlů, což značně snižuje velikost potřebné paměti.

Uvažujme stejné seskupení uzlů jako na obr. 2.10, kde si uzel A přeje poslat multicastový paket ostatním členům patřícím do skupiny.

Podle algoritmu jsou kroky směrování následující:

- 1) Požadavek je nejprve poslán do ZC unicastem (krok **a**, obr 2.12).
- 2) ZC ověří typ adresy a poté zkontroluje MRT tabulku. Ta obsahuje více jak dva členy skupiny, proto je paket poslán broadcastem všem přímým potomkům (krok **b**, obr 2.12).
- 3) ZR **C** má jen jednoho člena ve své potomkové skupině, a protože se jedná o zdrojový uzel **A**, paket mu už znovu neposílá (krok **b**, obr 2.12).
- 4) ZR **E** nemá žádného člena, který by patřil do multicastové skupiny – paket je zahozen. Proto žádný potomkový uzel spadající do stromu od ZR **E** nedostane multicastový paket, což šetří propustnost a snižuje spotřebu energie tím, že nedochází ke zbytečnému vysílání (krok **c**, obr 2.12).
- 5) ZED **F** je členem multicastové skupiny, proto paket obdrží (krok **c**, obr 2.12).
- 6) Směrovací tabulka ZR **G** obsahuje dva členské uzly, uzel **G** tedy rozpošle zprávy svým dvěma potomkovým uzlům (krok **c**, obr 2.12). Takto multicastová zpráva dosáhne ZED **H** a ZR **I**.

7) ZR I ověří svou MRT a nasměruje zprávu do uzlu I, který je jediným potomkem multicastové skupiny (krok d, obr 2.12).



Obr. 2.12: Směrování podle Z-Cast

Z-Cast mechanismus značně minimalizuje počet vyslaných zpráv, a to tak, že prvotní paket dosáhne ke všem členům skupiny. K poslání zprávy ze zdrojového uzlu k N členům potřebuje mechanismus nejprve nasměrovat paket do ZC a poté do větví, které obsahují členy skupiny; to celé na základě MRT. Tím dochází ke snížení počtu zpráv až o 50 % oproti unicastovému směrování. [9]

3 SPOTŘEBA ENERGIE

3.1 Spotřeba energie prvku v WSN

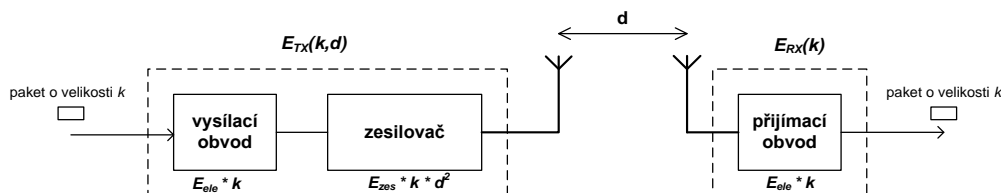
Každý uzel, který je součástí bezdrátové sensorové sítě, je složen ze základních bloků, mezi které patří napájecí obvod, výpočetní obvod a komunikační obvod. Každý z těchto bloků zajišťuje specifickou funkci, která je důležitá pro chod celého zařízení. Ve své práci se nebudu zajímat o to, jak fungují jednotlivé bloky, ale zaměřím se na spotřebu energie v každém uzlu.

Spotřebu energie je možné rozdělit podle operací do několika fází:

- Výpočetní úkony – zajišťuje je mikroprocesor. Spotřeba energie při výpočetních úkonech je na rozdíl od následujících dvou operací poměrně malá a nebudu ji uvažovat.
- Komunikace – spotřeba energie se dělí podle toho, jestli uzel vysílá pakety (Tx power) nebo pakety přijímá (Rx power). Tato spotřeba bude záviset na tom, jaký zvolím vysílací výkon, čímž bude ovlivněn i maximální dosah vysílání.
- Sběr dat – spotřeba energie závisí na snímané veličině, na způsobu snímání a na typu senzoru

3.1.1 Spotřeba energie při komunikaci

Komunikační obvod zajišťuje komunikaci s ostatními prvky sítě. Bezdrátová komunikace probíhá na principu výměny rádiových vln. K tomu je zapotřebí přijímače a vysílače. Spotřeba energie komunikačního obvodu se rozděluje na spotřebu energie při úpravě dat k odeslání, spotřebu zesilovače a spotřebu vysílače, viz obr. 3.1.



Obr. 3.1: Spotřeba energie v komunikačním obvodu

Spotřeba při vysílání se vyjádří pomocí rovnice (3.2) jako energie spotřebovaná

el. obvodem pro zpracování 1 bitu (E_{elec}), vynásobená velikostí paketu (k). E_{zes} určuje energii spotřebovanou zesilovačem pro dosažení požadovaného výkonu v dBm, vztaženou na velikost paketu a vynásobenou vzdáleností (d).

$$E_{TX}(k,d) = E_{elec} \cdot k + \varepsilon_{amp} \cdot k \cdot d^2 = (E_{elec} + \varepsilon_{amp} \cdot d^2) \cdot k \quad (3.2)$$

Spotřeba při příjmu zprávy je závislá na spotřebě energie obvodu a na počtu přijatých bitů. Pro výpočet spotřebované energie platí rovnice (3.3).

$$E_{RX}(k) = E_{elec} \cdot k \quad (3.3)$$

Pro znázornění uvedu příklad výpočtu spotřeby při vyslání jednoho paketu.

Podle standardu IEEE 802.15.4 je maximální velikost PPDU (Physical Protocol Data Unit) jednotky 127 bajtů (1016 b). Při používání zkrácených 16-ti bitových adres se jedná o adresní pole velikosti 13 B a maximální velikost MPDU (MAC Protocol Data Unit) je 114 bajtů. Dále budu uvažovat spotřebu el.obvodu Rx, Tx při zpracování 1 bitu 50 nJ/bit. Spotřeba zesilovače je 100 pJ/bit/m² a vzdálenost, do které budeme zprávu odesílat, je 50 m.

$$E_{TX}(k,d) = E_{ele} \cdot k + E_{zes} \cdot k \cdot d^2 = (E_{ele} + E_{zes} \cdot d^2) \cdot k$$

$$E_{TX}(1016,50) = (50 \cdot 10^{-9} + 100 \cdot 10^{-12} \cdot 50^2) \cdot 1016 = \underline{\underline{0,3 \text{ mJ}}}$$

Při vyslání jednoho paketu o velikosti 127 bajtů do vzdálenosti 50 metrů uzel spotřebuje energii o velikosti 0,3 mJ. Naopak uzel, který tuto zprávu přijme, spotřebuje energii vypočtenou podle vztahu (3.2).

$$E_{RX}(k) = E_{ele} \cdot k$$

$$E_{RX}(k) = 50 \cdot 10^{-9} \cdot 1016 = \underline{\underline{50 \mu\text{J}}}$$

Energetickou náročnost uvnitř zařízení nemůžeme nikterak ovlivnit. Každá firma vyrábějící ZigBee moduly používá rozdílné technologie a elektronické obvody. Jediný způsob, jak lze spotřebu ovlivňovat, je správný výběr zařízení, případně úprava vysílacího výkonu, který však omezuje dosah zařízení. [10]

3.2 Výpočet energie v jednotlivých stavech

Pro účel analýzy energetické náročnosti, použité v této práci, byl vybrán modul používaný na VUT. Jedná se o čip ZigBee-ready RF Transceiver, typ CC2420 od firmy Texas Instrument [11] s následujícími parametry, viz tab. 3.4.

Manufacturer	Model	Data rate (kbps)	Band (MHz)	Data buffer (B)	Sleep (μ A)	Idle (mA)	Rx (mA)	Tx (mA)
TI	CC2420	250	2400	128	0,02	0,4	18,8	17,4

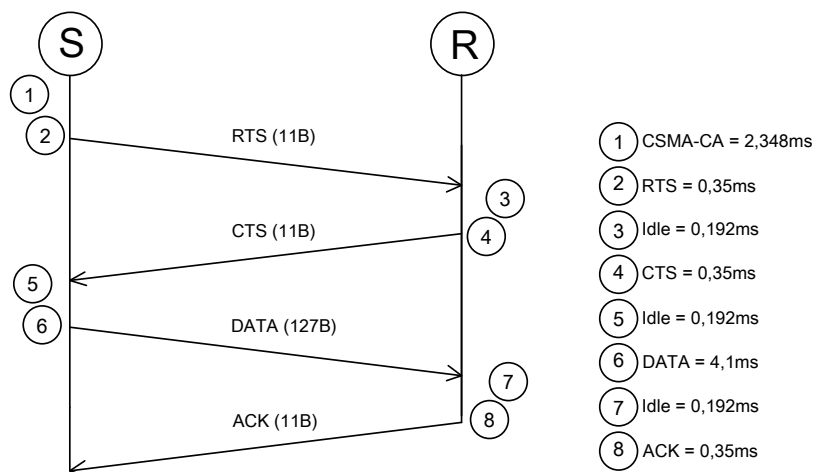
Tab. 3.4. Parametry modulu CC2420

Pro výpočet přenášených rámců je potřeba určit doby, po které trvají jednotlivé stavy při komunikaci uzlů mezi sebou, viz obr. 3.6. [12]

V praxi komunikace probíhá tak, že před vysláním zařízení **S** (Sender) nejdříve čeká náhodnou dobu na volný kanál (metoda CSMA/CA), než začne vysílat. Pokud budeme uvažovat, že zařízení zahájí vysílání už při prvním pokusu o přístup na médium, celková doba přístupu na kanál je 2,368 ms. Po té je vyslán signál s žádostí o vysílání RTS (Request To Send) o velikosti 11 B. Doba přenosu této zprávy je 0,35 ms. Druhá stanice **R** (Receiver), která tuto zprávy přijme, potřebuje čas na přepnutí z režimu Rx (Receive) do režimu Tx (Transmit), tato doba (Idle) odpovídá 0,192 ms. Následuje vyslání zprávy CTS (Clear To Send), což je signál k zahájení přenosu dat, o velikosti 11 B. Stanice **S**, která má data pro stanici **R**, přepne z příjmu na vysílání (0,192 ms) a začne vysílat data. Vyslání dat o velikosti 127 B bude trvat podle vztahu (3.5) 4,1 ms.

$$t = \frac{\text{PPDU[B]} \cdot 8}{250[\text{kbps}] \cdot 10^3} = \frac{127 \cdot 8}{250 \cdot 10^3} = 4,1 \text{ ms} \quad (3.5)$$

Stanice **R** po přijetí dat přepne na vysílání (0,192 ms) a vyšle potvrzovací rámeček o úspěšném přijetí ACK o velikosti 11 B (0,35 ms). Celkový čas potřebný pro přenos jednoho rámce o velikosti 127 B trvá 8,1 ms.



Obr. 3.6: Sestavení komunikace a přenos dat

Nyní jsou známé časy, které uzly stráví v jednotlivých stavech; bylo také stanoveno, jaká je velikost proudu pro jednotlivé stavy. Parametr $U_{CC} = 2,45 \text{ V}$ je zvolen jako průměrná hodnota vybíjení baterie 2x NiMH za celou dobu. Podle vztahu (3.7) lze určit spotřebovanou energii pro jednotlivé stavy.

$$E_{stav} = U_{CC} \cdot I_{stav} \cdot t_{stav} \quad [J] \quad (3.7)$$

Pro jednoduchost modelování a následnou analýzu energetické náročnosti jednotlivých protokolů není použita kompletní struktura komunikace při vysílání a příjmu. Při výpočtech je pracováno s průměrnou dobou při vysílání a přechodu mezi Rx a Tx. [13]

4 REALIZACE MULTICASTOVÝCH PROTOKOLŮ V PROSTŘEDÍ MATLAB

4.1 Úvod do prostředí MATLAB

Název MATLAB vznikl zkrácením slov MATrix LABoratory [14], což reflektuje skutečnost, že hlavní strukturou při výpočtech jsou matice. MATLAB je prostředí pro numerické výpočty a jejich následnou grafickou prezentací. Obsahuje v sobě numerickou analýzu, maticové výpočty, zpracování signálů a grafiku. Výpočty a řešení jsou vyjádřeny přesně tak, jako je používá matematika bez nutnosti tradičního programování.

MATLAB umožňuje řešit výpočtové technické problémy, zvláště pak ty, které obsahují maticové či vektorové výpočty. Vektory jsou vyjádřené maticí s jedním řádkem nebo sloupcem. Příkazy je možné v MATLABU zadávat přímo do interaktivního řádku, ale častěji jsou spouštěny z tzv. skriptu, kde se vykonávají v sekvenci. Tyto skripty označované jako M-files, mají příponu *.m* a jsou vytvářené v textovém editoru. Dále se MATLAB skládá z okna Workspace, kde se zaznamenávají veškeré proměnné, které jsou aktivní v aktuálním projektu, a z okna Command history, kde se zobrazuje historii vykonaných příkazů.

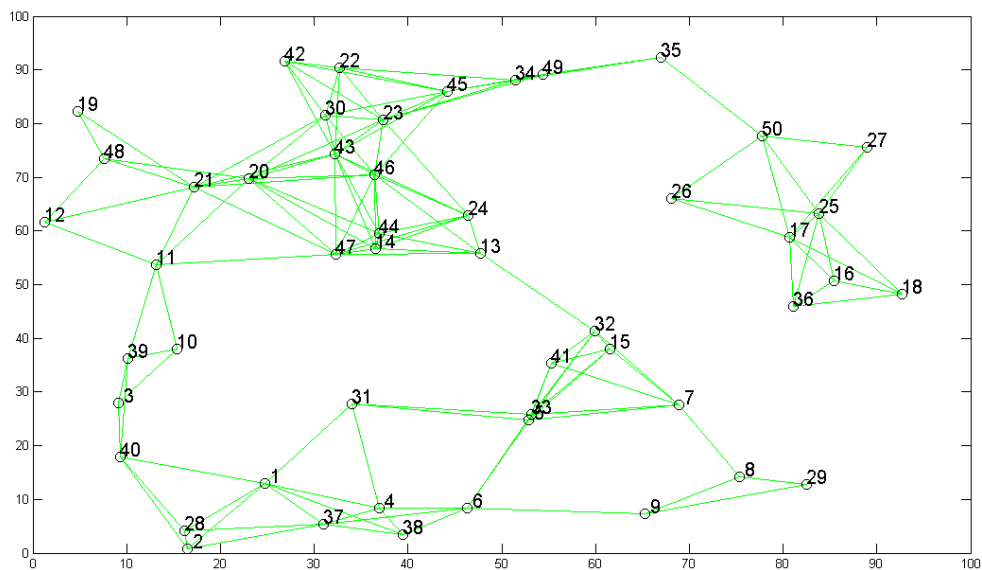
4.2 Vytvoření sensorové sítě

K tomu, aby mohla proběhnout jakákoliv simulace, je potřeba vytvořit strukturu polí, ve kterých jsou umístěné uzly. Pro jednoduchost a kompaktnost simulací byla použita databáze sensorových sítí od Ing. Milana Šimka, Ph.D. [10]

Jedná se o ucelenou databázi s počtem 50-ti náhodně vygenerovaných uzlů:
`netM=databaseNets.net50(:, :, hustota) .`

Parametr *hustota* je možné měnit v rozsahu 1-10. Jde o náhodně, nezávisle na sobě vygenerované databáze o různých hustotách rozložení uzlů. Názorně lze vidět na obrázku 4.2.

Jednotlivé uzly jsou graficky vyobrazeny do 2D souřadnicového systému. Jedná se o nezávislé body o náhodně vygenerovaných souřadnicích. Tyto body jsou pojmenovány čísly. Spojnice mezi těmito body určují, které uzly na sebe „vidí“ a budou mezi sebou komunikovat. Pro jednotlivé simulace byl použit rádiový dosah jednotlivých uzlů $R = 20$ m, viz obr. 4.1.



Obr. 4.1: Vygenerovaná síť senzorů

Dále bylo zapotřebí definovat cesty mezi jednotlivými uzly, které budou tvořit stromovou strukturu. Toto je dosaženo tím, že do vektoru E jsou uloženy všechny uzly, které mezi sebou sousedí a jejich vzájemné vzdálenosti. Využitím toolboxu: grTheory – GraphTheoryToolbox, volně poskytovaného na stránkách www.mathworks.com a implementovaného do MATLABu je vypočítaná cesta od každého uzlu do předem určeného iniciálu (ZigBee Coordinator).

Funkce showtree:

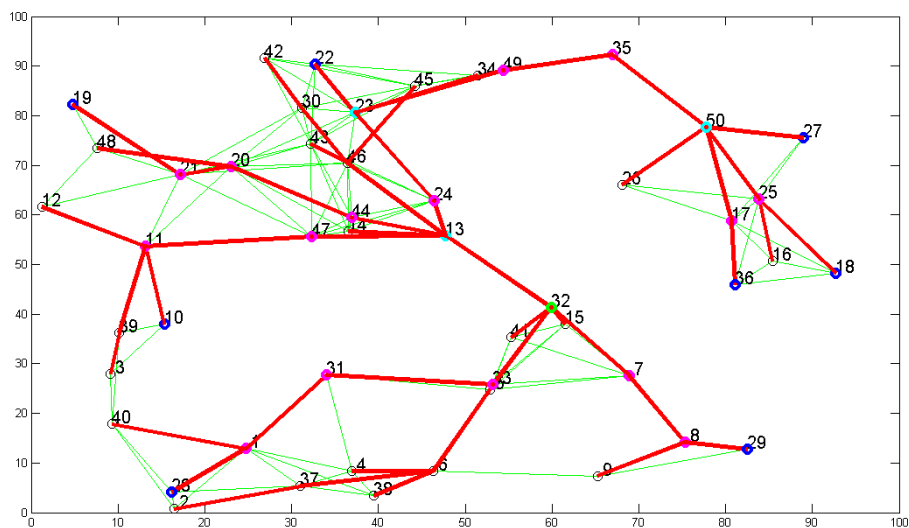
```
function showtree = tree (E,connect,inicial)
showtree = zeros(size(connect));
for destination = 1:numel(connect(:,1))
    [dSP,sp]=grShortPath(E,inicial,destination);
    for i = 1:numel(sp)-1
        showtree(sp(i),sp(i+1)) = dSP(sp(i),sp(i+1));
        showtree(sp(i+1),sp(i)) = dSP(sp(i),sp(i+1));
    end
end
end
```

Tato funkce vrací matici o rozměru 50 x 50, kde je zapsána kompletní stromová struktura senzorové sítě. Matice *connect* je maticí vzdáleností pro každý uzel. Vychází z vektoru *E*, přičemž každá dvojice sousedících uzlů má na dané souřadnici vyplněnou svou vzdálenost. Příkaz: `[dSP, sp]=grShortPath(E, inicial, destination)` řeší právě výpočet nejkratší cesty z inicialu přes cyklus `for` do všech uzlů v síti.

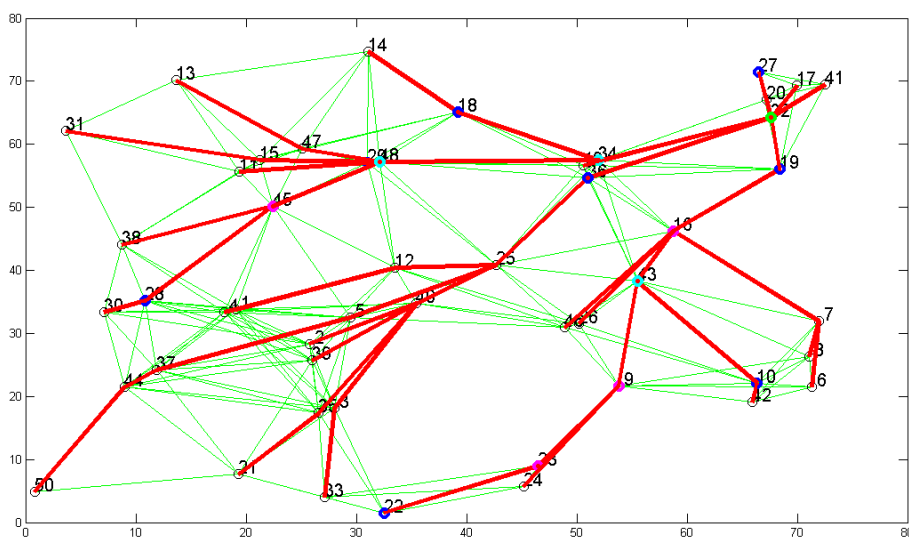
Uzly, které v síti vykonávají specifické činnosti, jsou pro přehlednost odlišeny následujícími barvami:

- *Group Members (blue)* – modrou barvou jsou vyznačeny koncové uzly, které jsou součástí multicastové skupiny
- *Routers(magenta)* – růžovou barvou jsou označeny uzly, které vykonávají funkci směrovačů pro členy multicastových skupin
- *Group Leaders (cyan)* – azurovou barvou jsou označeny ty routery, které taktéž směrují data, ale na rozdíl od klasického routeru do více než jedné větve
- *Group Coordinator (green)* – zelenou barvou je označen uzel, který řídí celou síť

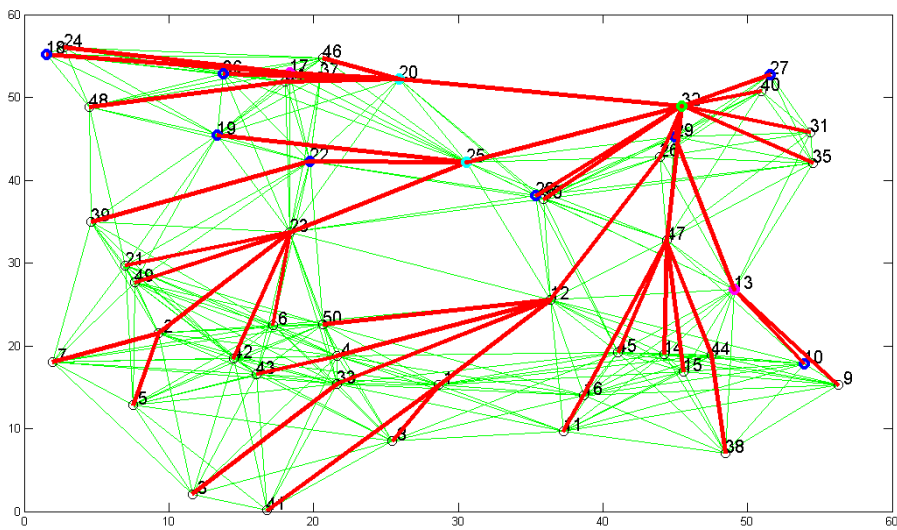
Výsledné stromové struktury a závislosti hustoty uzlů v poli je možné vidět na obrázku 4.2.



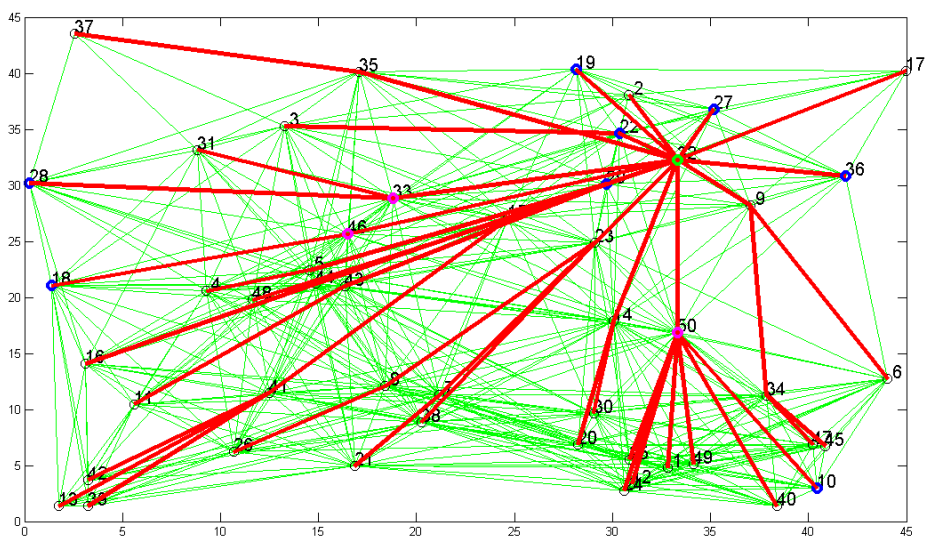
a) hustota sítě s parametrem 1



b) hustota sítě s parametrem 3



c) hustota sítě s parametrem 6



d) hustota sítě s parametrem 10

Obr. 4.2: Stromové struktury

4.3 Provoz v síti

Multicastové protokoly jsou za dodržování zásad a teoretických principů, kterými se řídí při směrování, implementovány do MATLABu, viz kapitoly 2.1, 2.2 a 2.3. Každému protokolu byl vytvořen příslušný m-file, ve kterém jsou zásady a podmínky funkčnosti směrování zpráv.

U jednotlivých protokolů jsou rozlišeny následující zprávy:

- *Rx (vysílání)* – uzel vysílá zprávu s požadavkem připojení do multicastové skupiny, zprávu vysílá také v případě, když má data pro ostatní členy skupiny
- *Tx (příjem)* – uzel přijímá data, které mu jsou určeny
- *Parazit (parazitní příjem)* – jedná se o příjem dat, které nejsou určeny danému uzlu. Uzel však naslouchá, data přijme a následně, po vyhodnocení na základě směrovací tabulky, data zahodí

Zprávy u jednotlivých protokolů se liší svou velikostí, viz tab. 4.3. Pakety protokolu MAODV, které souvisí se směrováním v IP sítích, jsou větší. Přenáší větší množství informací týkajících se přesného určení cesty, pořadové číslo jednotlivých požadavků a příznaky. Stejně tak má i protokol Z-Cast rozdílné velikosti a informace ve směrovacích paketech. Právě proto byly velikosti jednotlivých zpráv, které figurují při procesu připojování pro účel analýzy energetické náročnosti z hlediska velikosti provozu v síti, sjednoceny na 3B. Velikost zpráv byla sjednocena především s ohledem na porovnatelnost jednotlivých protokolů z pohledu principů směrování, ale také proto, aby ve výsledcích nebyly tak markantní rozdíly.

	Join_RREQ	Join_RREP	Leave (Disco)	MACT	DATA
Patent	3 B	3 B	3 B	-	127 B
MAODV	6 B	12 B	15 B	12B	127 B
Z-Cast	5 B	7 B	1 B	-	127 B

Tab. 4.3. Velikosti jednotlivých zpráv použitých při simulaci

5 VÝSLEDKY SIMULACE

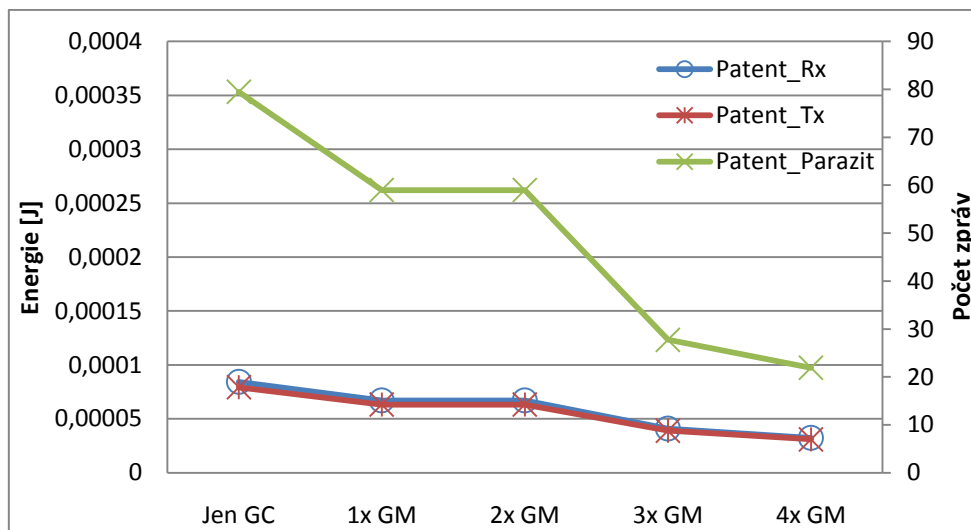
Výsledky simulací v programu MATLAB jsou zpracovány a vyobrazeny do grafů, které vyjadřují závislost určité činnosti, která v senzorovém poli proběhla, na spotřebované energii. Je zde porovnáván protokol pracující výhradně na principu všesměrového vyhledávání uzlů patřících do multicastové skupiny s protokolem patentovaným americkým patentovým úřadem. Porovnán je zde i relativně „mladý“ směrovací protokol Z-Cast, který je určený výhradně pro směrování zpráv v již vytvořeném multicastovém stromě. Připojování uzlů v tomto protokolu funguje na principu MAODV.

5.1 Patent vs. MAODV

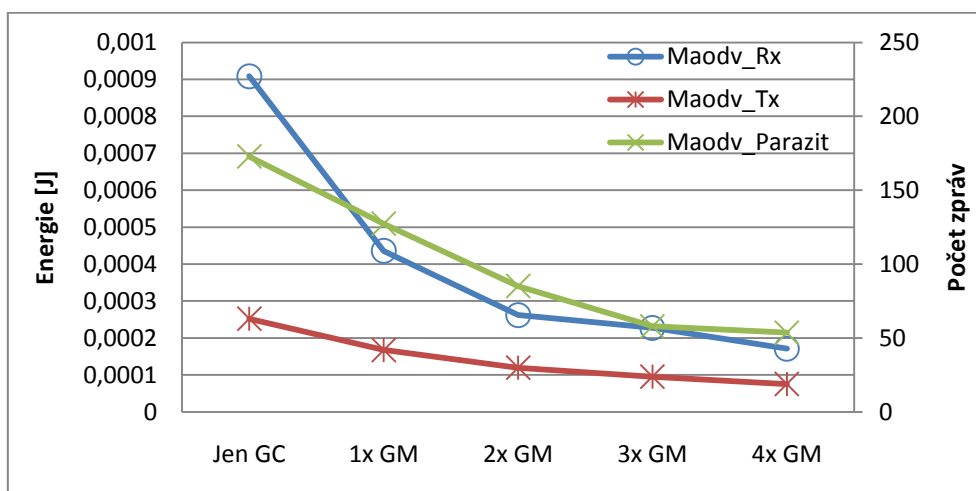
Protokol MAODV, jak už bylo zmiňováno, je protokolem sloužícím k připojení nového uzlu do již existující multicastové skupiny. Velikost zpráv RREQ, RREP a MACT byla z důvodu objektivního zhodnocení toho, kolik zpráv je sítí posláno, sjednocena na stejnou velikost jako u Patentu na 3 B.

5.1.1 Energetická náročnost v závislosti na počtu členů ve skupině

U Patentu putuje požadavek o připojení stromovou strukturou tak dlouho, dokud nenarazí na nějakého člena skupiny, případně ZC. U protokolu MAODV je zpráva šířena všesměrově, tudíž pokud je vzdálenost k uzlu, který je členem, větší, je také vyšší i počet přeskoků a exponenciálně se zvětšuje počet jednotlivých zpráv. Z toho vyplývá, že energetická náročnost je vyšší, pokud je v síti méně členů multicastové skupiny. Z následujících grafů je patrné, že u Patentu s větším počtem GM v síti klesá energie hlavně u parazitního příjmu skokově, viz obr. 5.1, kdežto u MAODV je energie spotřebovaná parazitním příjmem snižována exponenciálně, viz obr. 5.2.



Obr. 5.1: Pokles energetické náročnosti u Patentu při zvyšujícím se počtu GM



Obr. 5.2: Pokles energetické náročnosti u MAODV při zvyšujícím se počtu GM

Z celkové spotřeby energie při postupném připojování jednotlivých uzlů lze vyčíst, že protokol MAODV má skoro desetinásobně větší zátěž na uzlech než Patent. Zajímavé zjištění je, že při připojování obou protokolů k ZC musí MAODV vyslat zprávu do vzdálenosti osmi přeskoků a rozdílu energie spotřebované při Rx pak dosahuje již zmiňovaného desetinásobku vůči Patentu, viz obr. Příloha 9.1. Pokud jsou ale v síti připojeny 4 GM, vzdálenost přeskoků se snižuje na dva a rozdíl ve spotřebované energii v Rx je pouze dvojnásobný, viz obr. Příloha 9.2. Podobně je tomu i u Tx, kde množství vyslaných zpráv při připojení k ZC je 25 krát vyšší než u Patentu a snižuje se na dvojnásobek, viz

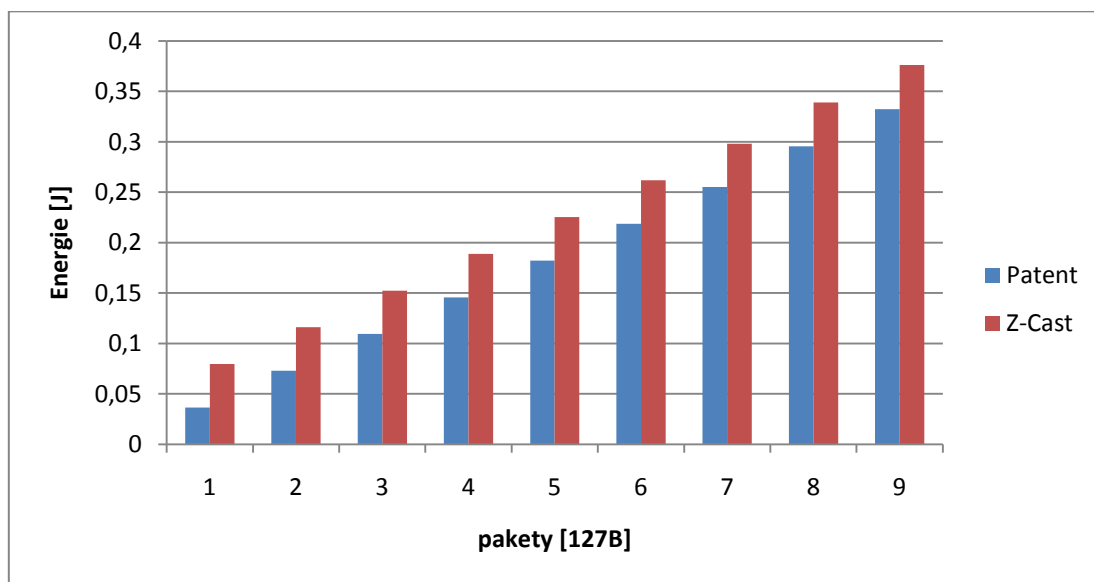
obr. Příloha 9.3. U parazitního příjmu dojde u Patentu k poklesu, při připojení jenom k ZC oproti připojení, když jsou v síti čtyři členové, o 27 % energie. U MAODV jde o snížení energetické náročnosti o 31 %, viz obr. Příloha 9.4.

5.2 Patent vs. Z-Cast

Při srovnávání protokolu Patent a Z-Cast je potřeba brát v úvahu fakt, že Z-Cast při připojování vychází ze všesměrového MAODV. Z-Cast využívá stejného principu při posílání dat jako Patent, ovšem s tím rozdílem, že data putují nejprve do ZC a až poté jsou podle výše zmíněných algoritmů distribuovány ke členům multicastových skupin.

5.2.1 Energetická náročnost při posílání dat

Analýza ukazuje, jak velkou energetickou zátěž má přenesení dat o velikosti 1 MB, které jsou přenášeny v paketech o velikosti 127 B. Užitečná část zprávy (payload) má velikost 114 B. Pro přenos 1 MB, což je 1024 B, je zapotřebí vyslat 9 paketů. Následující obrázek 5.3 vypovídá o spotřebované energii v celé síti při přenesení 1MB dat. Konkrétně bylo v tomto případě v síti připojeno 10 členů multicastové skupiny, kterým byla data zasílána.



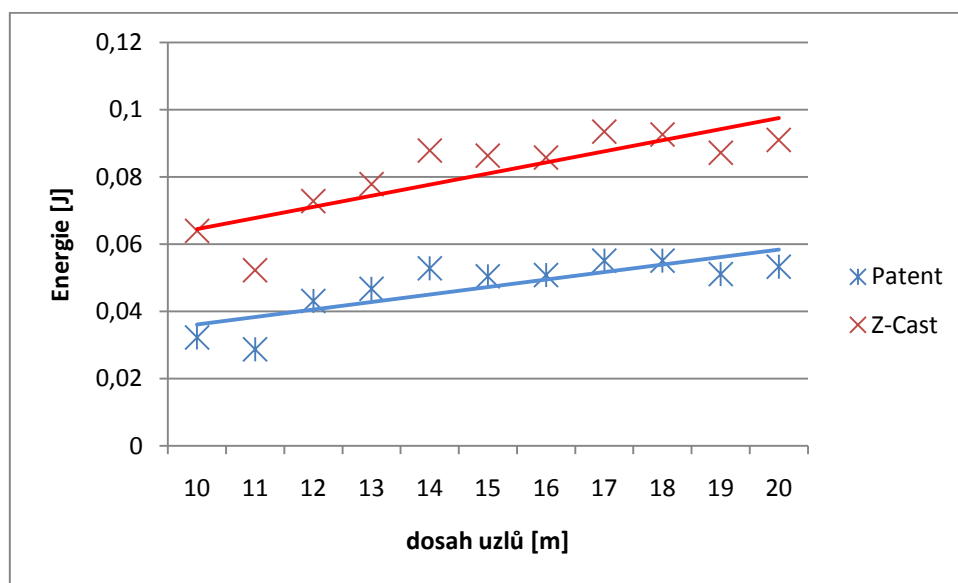
Obr. 5.3: Energetická náročnost při vyslání 1MB dat

Z grafu je patrné, že protokol Z-Cast při přenosu dat o objemu 1 MB vydá o 0,044 J více energie oproti Patentu. Protokol Patent je tedy o 10 % méně energetický náročný oproti Z-Cast. Porovnání energetického zatížení v síti s počtem 5ti a 10ti členů multicastové skupiny, analýzu podílu Rx, Tx, parazitního příjmu a další srovnání je možné vidět v příloze na obrázcích 9.5, 9.6, 9.7 a 9.8.

5.2.2 Energetická náročnost v závislosti na hustotě sítě

Pro analýzu energetické náročnosti v závislosti na hustotě sítě bylo potřeba zvolit neměnnou strukturu pole s uzly. Zvyšování hustoty sítě je docíleno tím, že se zvětšuje rádiový dosah jednotlivých uzlů, a to od 10 do 20 metrů. Tímto způsobem se zvýší pole působnosti uzlů a dojde tak ke zvětšení hustoty dané sítě.

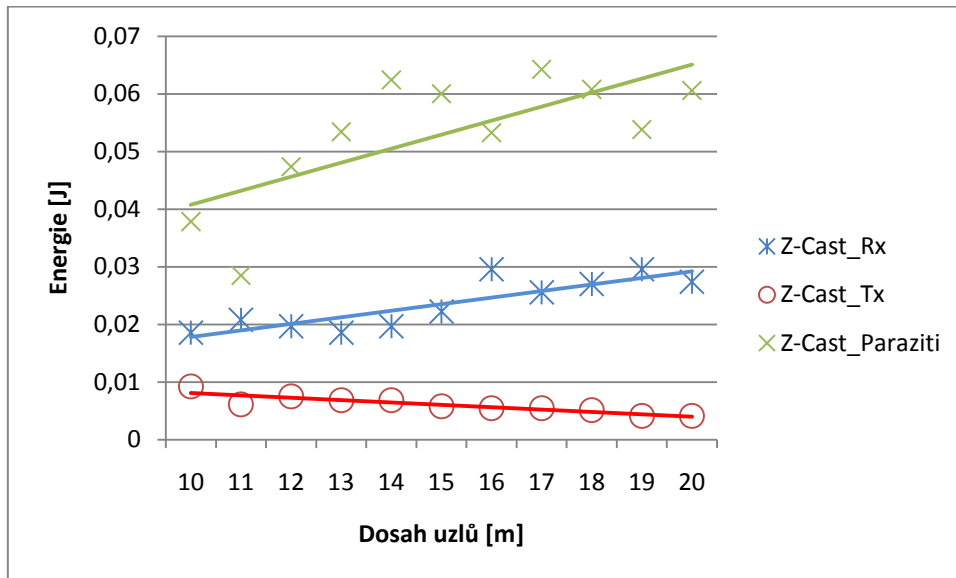
V simulaci figuruje 5 členů multicastové skupiny a je vyslán jeden datový paket. Na obrázku 5.4 je patrné, že čím větší mají uzly vysílací výkon a čím větší pole v síti mohou zaplnit, tím se zvyšuje i celková energetická náročnost.



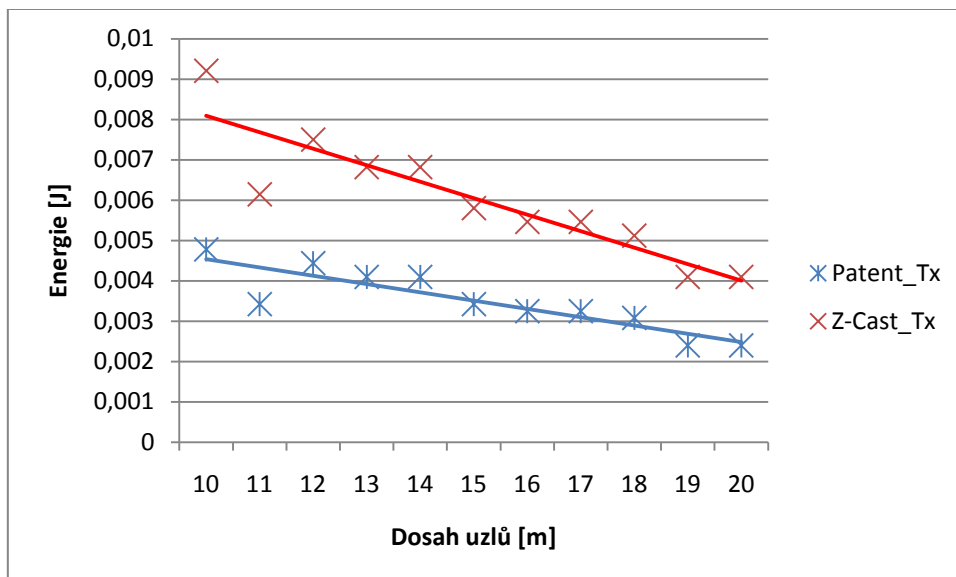
Obr. 5.4: Závislost zvyšující se spotřeby energie na vysílacím dosahu uzlů

Přesto, že energie se zvyšující se hustotou sítě narůstá, celkový počet vyslaných zpráv Tx klesá, viz obr. 5.6. Zajímavým poznatkem však zůstává, že i když Tx klesá, roste počet přijatých i parazitně přijatých zpráv, viz obr. Příloha 9.10 a 9.11. A právě parazitně přijaté

zprávy mají nezanedbatelný vliv na celkový růst energie při vyšší koncentraci uzlů. Celkový rozbor vyslaných, přijatých a parazitních dat v Z-Cast je možné vidět na obrázku 5.5 nebo kompletní rozbor protokolu Patent v příloze na obr. 9.9.



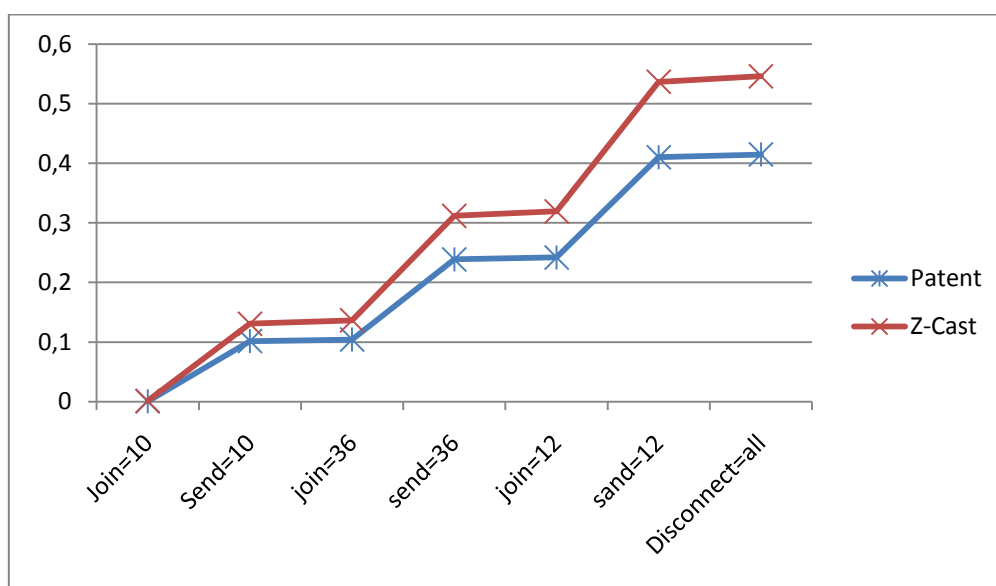
Obr. 5.5: Rozbor vyslaných, přijatých a parazitních dat v Z-Cast



Obr. 5.6: Klesající závislost vyslaných zpráv na větší hustotě sítě

5.2.3 Celková energetická náročnost

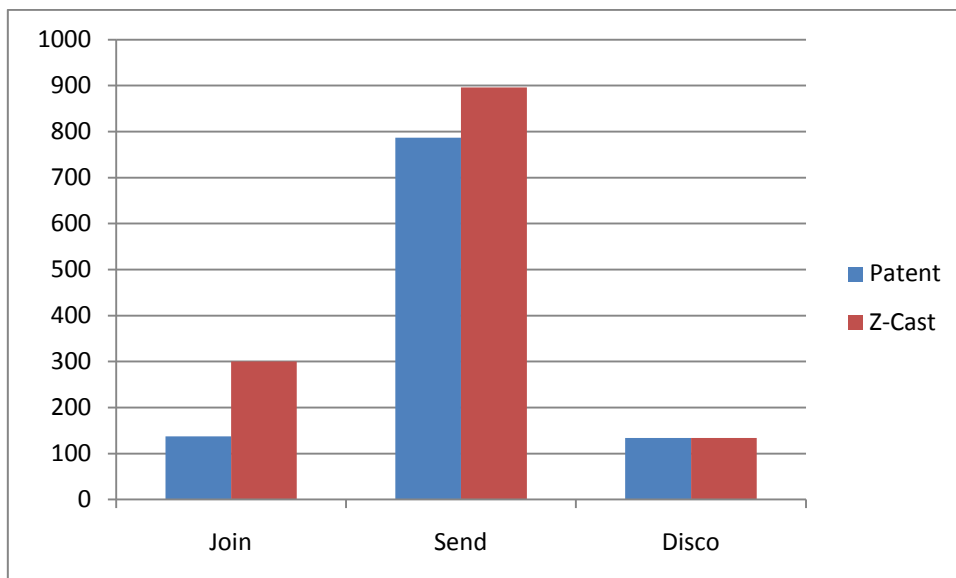
Tato část analýzy je založená na případném reálném chování uzlů v senzorovém poli, založené na multicastové komunikaci. V síti existuje šest členů multicastové skupiny. Uzel, který není členem, se připojí do skupiny a vyšle jeden datový paket o velikosti 127 B. Poté se postupně připojují další dva nové uzly a každý z nich vysílá data, a to i nově připojeným uzlům. To znamená, že ke konci simulace se vyskytuje v síti devět GM a byly vyslány tři datové pakety od nově připojených uzlů. Nakonec se všechny tři nově připojené uzly odpojí. O celém tomto průběhu zřetelně vypovídá obrázek 5.7.



Obr. 5.7: Energetická náročnost při reálném chování uzlů v poli

Z obrázku je patrné, že největší nárůsty energií jsou při vysílání dat. Vypovídají o tom i obrázky z přílohy 9.12 a 9.13, kde lze vidět, že u Patentu je podíl při vysílání dat 74 % a u Z-Castu je to 67,4 %. U protokolu Z-Cast je možno vidět, že na rozdíl od protokolu Patent, zvyšuje postupně své energetické nároky, a to díky protokolu MAODV, na kterém je proces připojování založen.

Celkový podíl spotřebované energie při připojení – vyslání dat – odpojení je vidět na obrázku 5.8. Z důvodu velmi malé spotřeby energie při připojovacím a odpojovacím mechanismu není graf vyjádřen ve vydané energii, ale v počtu zpráv, které polem senzorů prošly.



Obr. 5.8: Energetický podíl jednotlivých událostí v poli senzorů

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo stanovit nejefektivnější způsob přenosu dat bezdrátovou sítí ZigBee se zaměřením na úsporu energie, a to následujícím způsobem: teoretické principy bezdrátových sítí aplikovat na simulaci přenosu dat pomocí multicastových protokolů v programovém prostředí MATLAB, analýzou výsledných údajů stanovit energetickou náročnost jednotlivých protokolů, jejich komparací pak stanovit nejefektivnější a nejúspornější multicastové směřování pro ZigBee a v závěru pak ověřit hypotézu, že energeticky nejšetrnější je protokol Patent.

Při rozboru a rozpoznávání algoritmů, podle kterých multicastové protokoly pracují, bylo zřejmé, že nejefektivnější a nejšetrnější směřování v stromové struktuře má Patent, což je protokol amerického patentového úřadu, určený přímo pro využití v ZigBee sítích. Protokol Z-Cast je odvozený od právě od Patentu. Navíc má zdokonalené principy výpočtů multicastových adres a jejich přidělování. Z-Cast se projevil jako energeticky více náročný, což je způsobeno především tím, že pro připojování nových uzlů využívá všesměrový vyhledávací mechanismus, který je založený na protokolu MAODV, ale také tím, že při rozesílání dat členům multicastové skupiny jsou data vyslána nejprve ZigBee Koordinátorovi, který poté společně se směrovači řídí celé směřování. Oproti Patentu je tento princip směřování dat simulovaný a publikovaný v části 5.2.5 o 12 % energeticky náročnější. I když je Z-Cast energeticky náročnější, pro rozsáhlejší síť, ve kterých je zapotřebí mít jednoduchý přehled o členech multicastových skupin a funkcích jednotlivých uzlů, bude mít tento multicastový protokol enormní uplatnění. Protokol MAODV, založený na všesměrovém vysílání požadavků a hledání cesty k uzlům, patřících do multicastové skupiny, ke kterým by se následně mohl připojit, je v malých, stacionárních sítích prakticky nevyužitelný. Nejenže v případě simulace z kapitoly 5.2.5 bylo přeneseno a přijato celkově o 54 % více zpráv než u Patentu, ale navíc v reálu jsou tyto zprávy trojnásobně větší. Protokol MAODV by bylo možné jistě využívat v sítích, které nemají pevnou stromovou strukturu. Pokud by sensorové uzly byly neustále v pohybu, pak by MAODV našel své uplatnění i v ZigBee.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CALLAWAY, E.; GORDAY, P.; HESTER, L.; GUTIERREZ, J.A.; NEAVE, M.; HEILE, B.; BAHL, V. "Home networking with IEEE 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks," In *IEEE Communication Magazine*, vol. 40, no. 8, s. 70-77, August 2002.
- [2] *Zigbee alliance* [online]. 2002 [cit. 15. 3. 2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.zigbee.org>>.
- [3] VOJÁČEK, A. ZigBee – novinka na poli bezdrátové komunikace. In *HW server* [online]. [cit.16. 12. 2010]. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/Rozhrani/ART1299-ZigBee---novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html>
- [4] BROCH, J.; MALTZ, D. A.; JOHNSON, D. B.; HU, Y.-C. AND JETCHEVA. J.; .A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols.In *Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM.98)*, Dallas, TX, USA, 1998, 85-97 s.
- [5] KOTON, J.; ČÍKA, P.; KŘIVÁNEK, V. Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee. In *Access server* [online]. [cit. květen 2011]. Dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>
- [6] PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E.; DAS, S.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, RFC3561, July 2003.
- [7] United States Patent. US 7,564,786 B2: MULTICAST METHOD IN ZIGBEE NETWORK. New York: City University of New York, Jul.21, 2009. 19 s. Dostupné z WWW: <<http://www.freepatentsonline.com/7564786.pdf>>.
- [8] ROYER, E. M; PERKINS, C: Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector (MAODV) Routing, *draft-ietf-manet-maodv-00.txt*. 2000.
- [9] GADDOUR, Olfa, et al. Z-Cast: A Multicast Routing Mechanism in ZigBee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. s. 9.

- [10] ŠIMEK, M. *Senzorové systémy - Přednášky do předmětu MSSY*. Brno: Ústav telekomunikací FEKT VUT v Brně 2010/2011. 41 s.
- [11] 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF. In *Texas Instruments* [online]. [cit. 12. 4. 2011]. Dallas, TX, USA, 2010, 89 s. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2420.html>>
- [12] J. INC., “Calculating 802.15.4 Data Rates,” In *Jennic* [online] 2006. [cit. 9. 4. 2011]. Dostupné z WWW: <http://www.jennic.com/files/support_files/JN-AN-1035%20Calculating%20802-15-4%20Data%20Rates-1v0.pdf>
- [13] *ZigBee Alliance* [online] ZigBee Specification - Document 053474r17. ZigBee Alliance, Inc., San Ramon, 2008, 604 s Dostupné z WWW: <http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2011/kjb79_ajm232/pmeter/ZigBee%20Specification.pdf>
- [14] *MathWorks* [online]. 1994 [cit. 7. 5. 2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.mathworks.com/>>.

8 SEZNAM ZKRATEK

ACK (Acknowledgment number)

AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector)

Cm (Maximum number of Child nodes)

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

CTS (Clear To Send)

FFD (Full Function Device)

GC (Group Coordinator)

GCUD (GC Update Message)

GL (Group Leader)

GM (Group Member)

GM (Group member)

GRPH (Group hello)

JREP (Join Reply)

JREQ (Join Request)

Lm (depth of the network)

LREP (Leave Reply)

LREQ (Leave Request)

MACT (Multicast Activation)

MANET (Mobile Ad Hoc Networks)

MAODV (Multicast Ad hoc On Demand Distance Vector)

MR (Multicast Router)

MRT (Multicast Routing Table)

NLDE (Network Layer Data Entity)

NLDE-SAP

NLME (Network Layer Management Entity)

NLME-SAP

RFD (Reduced Function Device)

Rm (Maximum number of child Routers)

RREP (Route Replies)

RREQ (Route Request)

RTS (Request To Send)

Rx (Receive)

TM (Tree member)

Tx (Transmit)

WLAN (Wireless LAN)

WPAN (Wireless Personal Area Network)

WSN (Wireless Sensor Network)

ZC (ZigBee Co-ordinator)

ZED (ZigBee End Device)

ZR (ZigBee Router)

9 SEZNAM PŘÍLOH

9.1 Grafy energetické náročnosti Patent vs. MAODV

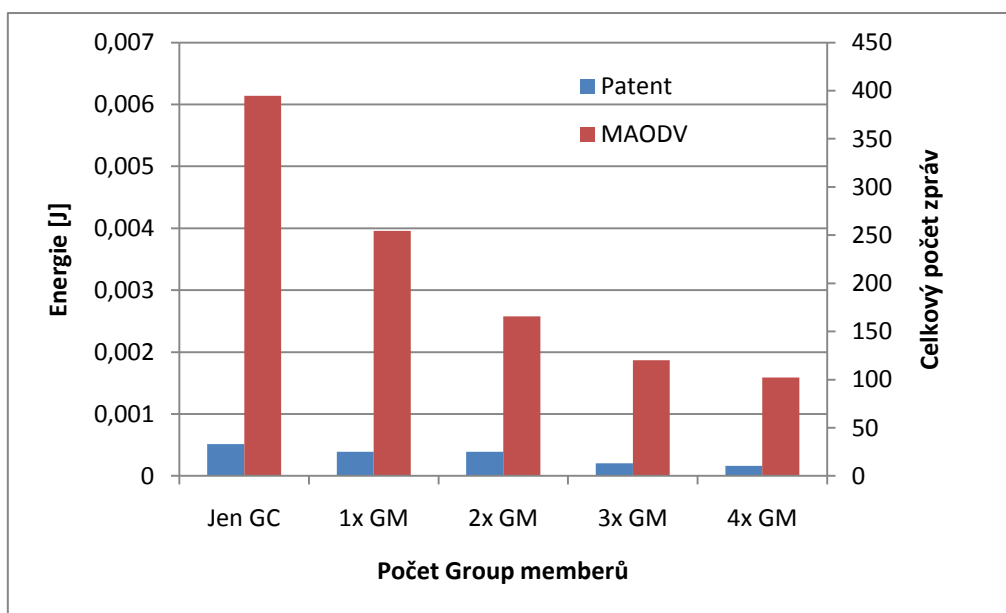
9.1.1 Energetická náročnost v závislosti na počtu členů ve skupině

9.2 Grafy energetické náročnosti Patent vs. Z-Cast

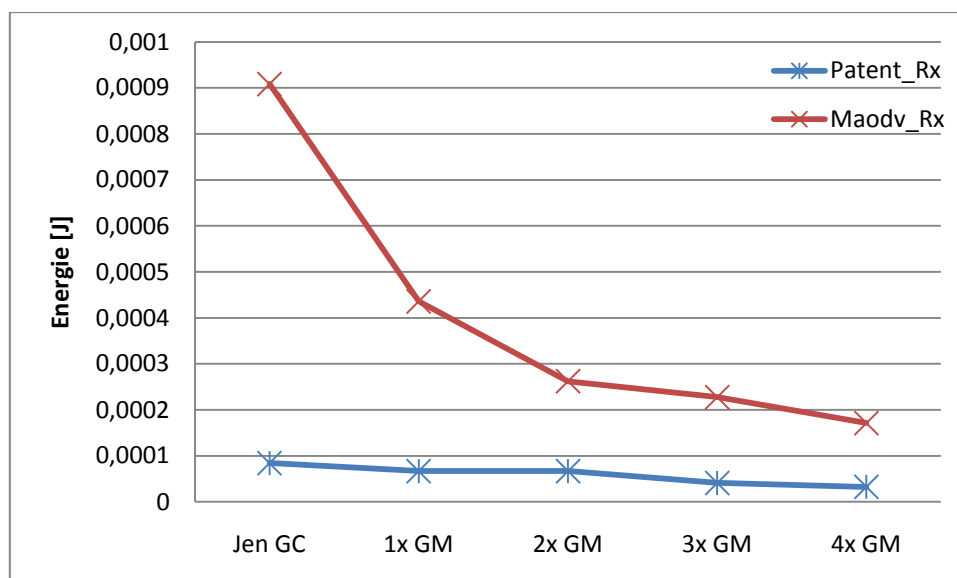
9.2.1 Energetická náročnost při posílání dat

Grafy energetické náročnosti Patent vs. MAODV

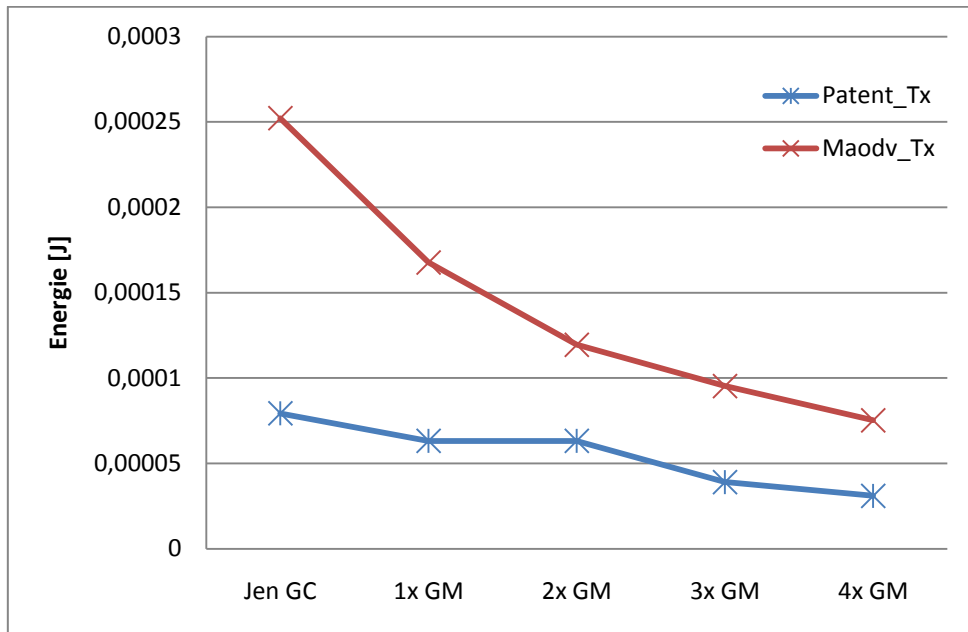
Energetická náročnost v závislosti na počtu členů ve skupině



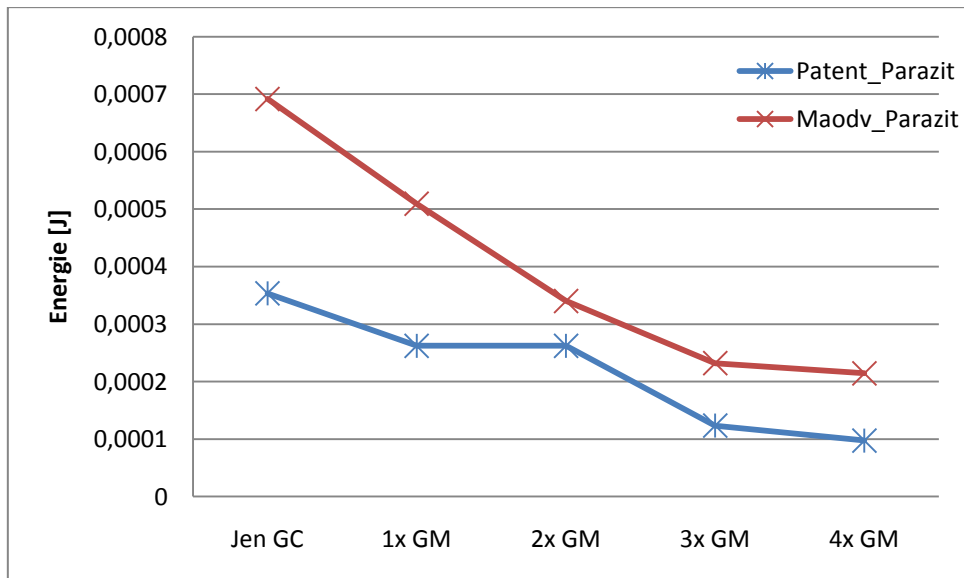
Obr. Příloha 9.1: Porovnání energetické náročnosti při zvyšujícím se počtu GM



Obr. Příloha 9.2: Porovnání energetické náročnosti přijatých zpráv při připojení



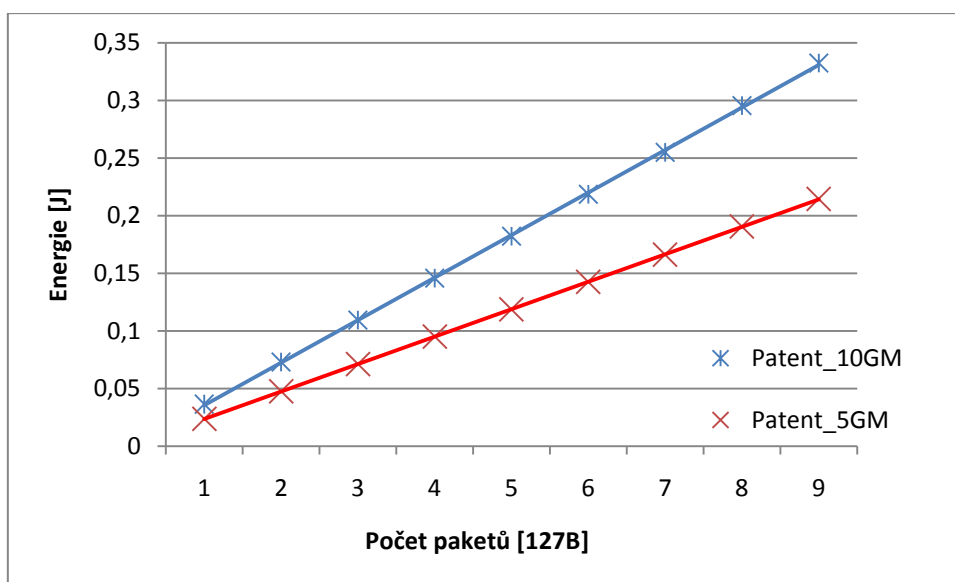
Obr. Příloha 9.3: Porovnání energetické náročnosti vyslaných zpráv při připojování



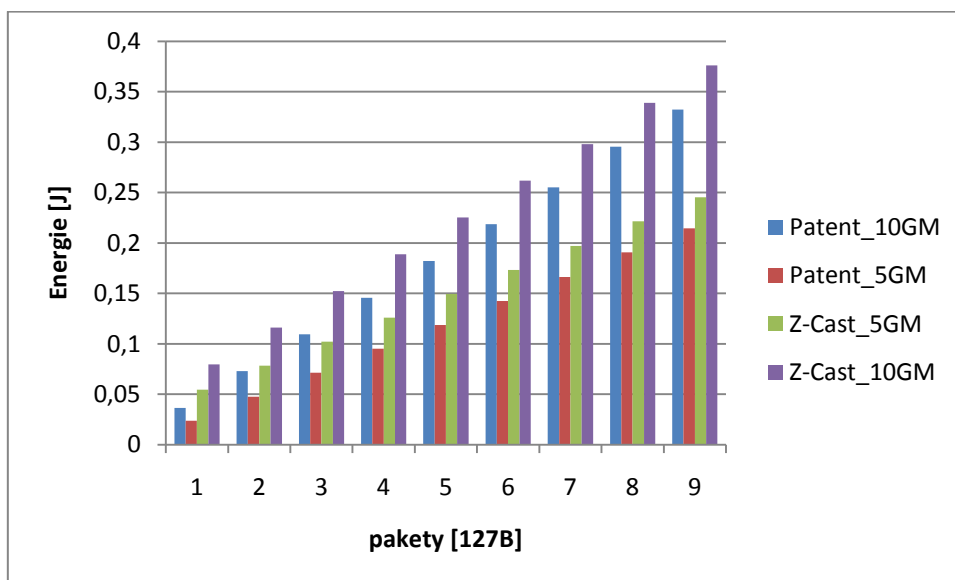
Obr. Příloha 9.4: Porovnání energetické náročnosti parazitních příjmů při připojování

Grafy energetické náročnosti Patent vs. Z-Cast

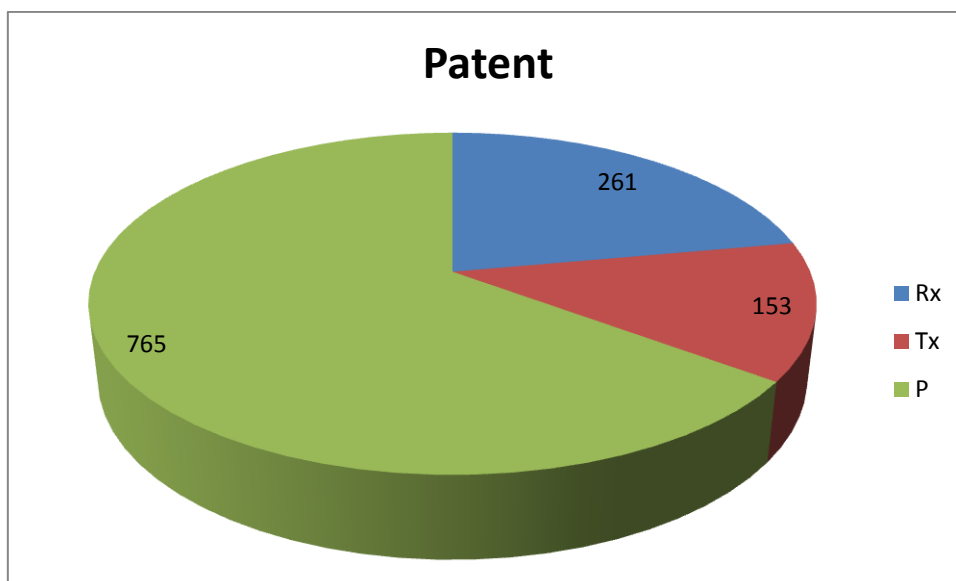
Energetická náročnost při posílání dat



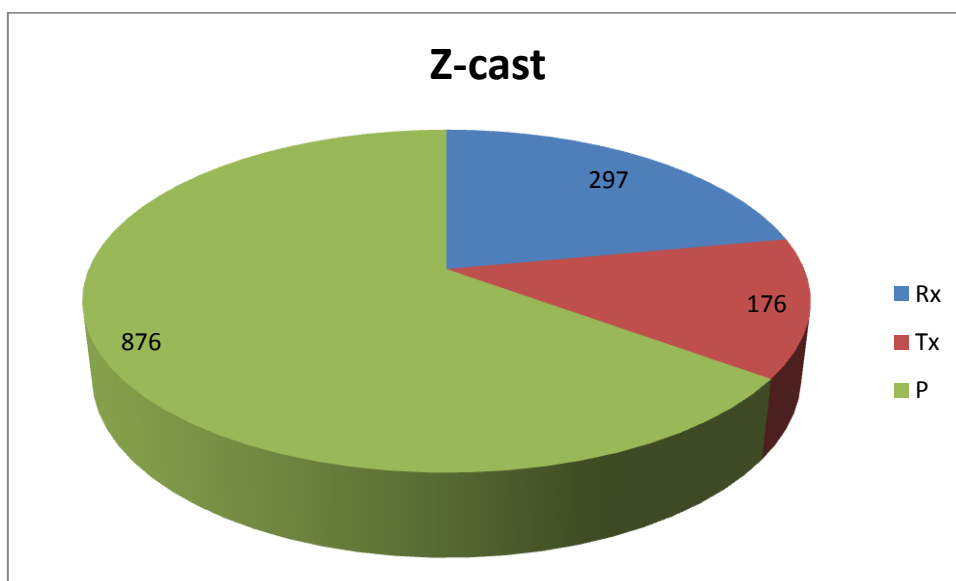
Obr. Příloha 9.5: Vyslání 1MB dat do sítí s počtem 5 a 10 Group member



Obr. Příloha 9.6: Srovnání energetické náročnosti při vyslání 1MB prostřednictvím protokolu Patent a Z-Cast

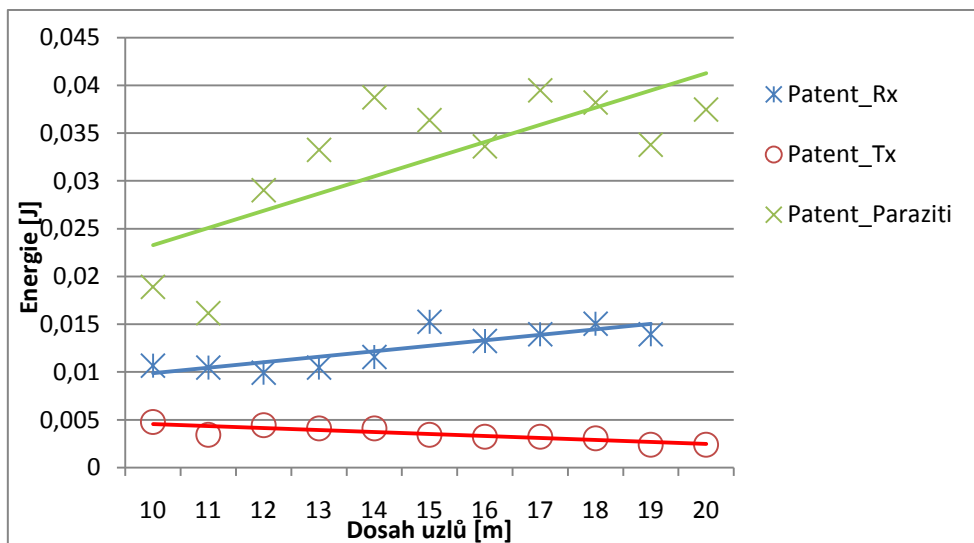


Obr. Příloha 9.7: Podíl jednotlivých zpráv při vyslání 1MB dat do sítě s 5ti GM prostřednictvím Patentu

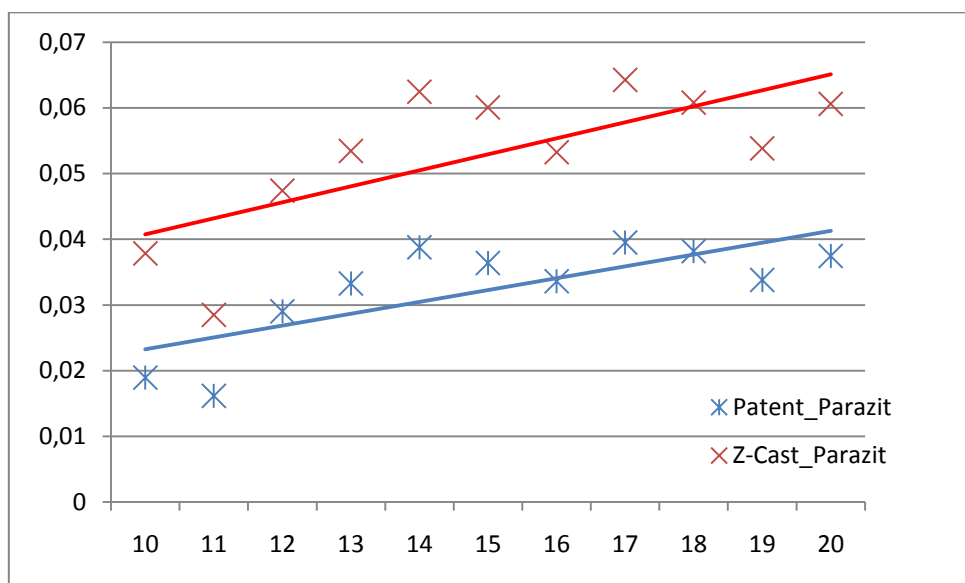


Obr. Příloha 9.8: Podíl jednotlivých zpráv při vyslání 1MB dat do sítě s 5ti GM prostřednictvím Z-Cast

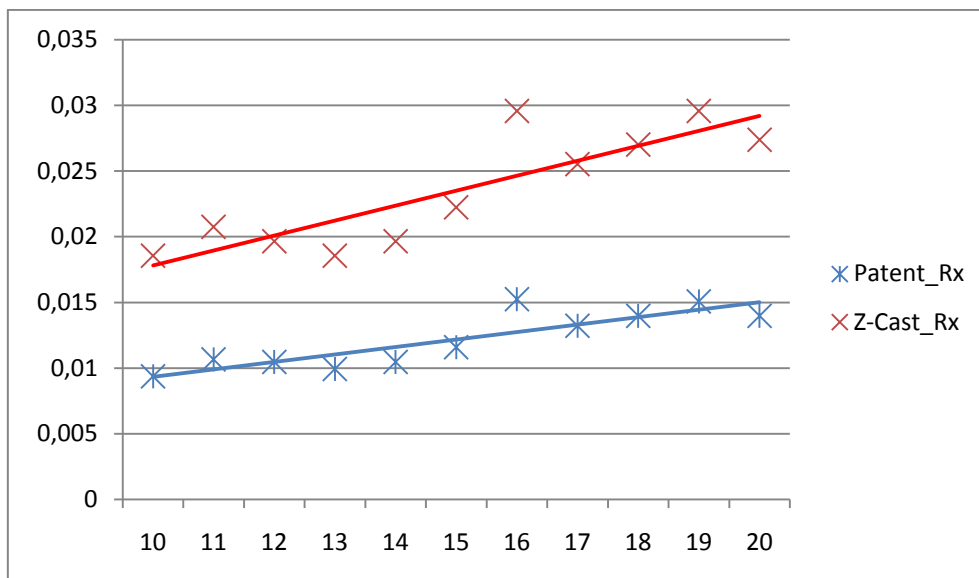
Energetická náročnost v závislosti na hustotě sítě



Obr. Příloha 9.9: Rozbor vyslaných, přijatých a parazitních dat v Patentu

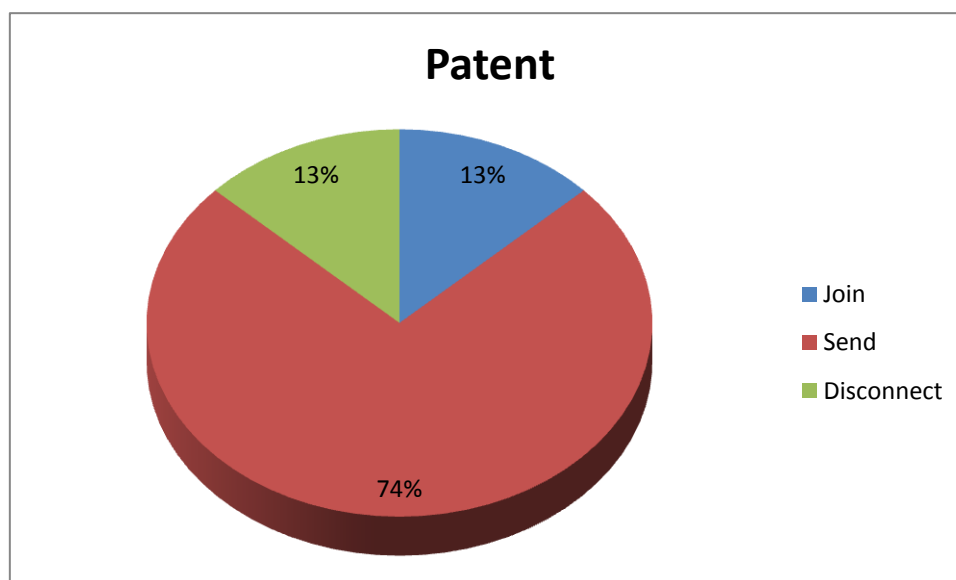


Obr. Příloha 9.10: Vzdávající tendence parazitně přijatých dat v závislosti na vyšší hustotě sítě

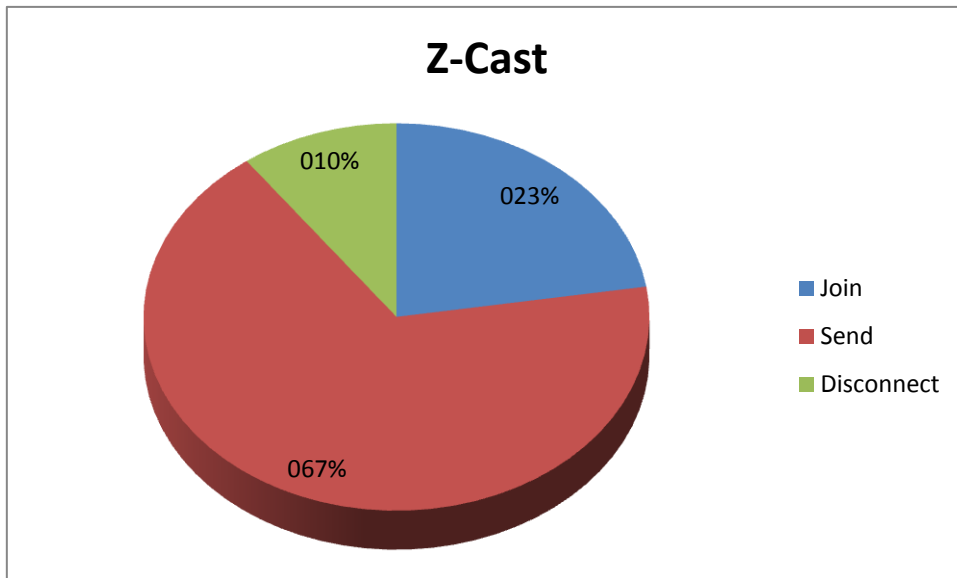


Obr. Příloha 9.11: Vzrůstající tendence přijatých dat v závislosti na vyšší hustotě sítě

Celková energetická náročnost



Obr. Příloha 9.12: Procentuální podíl jednotlivých činností při použití protokolu Patent



Obr. Příloha 9.13: Procentuální podíl jednotlivých činností při použití protokolu Z-Cast