



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ -СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ ПО ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ

КАТЕДРА "КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ"

маг. инж. Равиндър Бениуол

**Изследване на алгоритми и протоколи за
комуникационни мрежи с ограничени ресурси**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3 „Комуникационна и компютърна техника”

Научна специалност: „Комуникационни мрежи и системи”

Научни ръководители: проф. д-р инж. Георги Илиев

доц. д-р инж. Камелия Николова

София, 2024г

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Комуникационни мрежи“ към Факултета по телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 27.05.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 30.07.2024 г. (вторник) от 13:00 ч. в конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на Научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3-39/14.06.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Кирил Маринов Късев – председател
2. Проф. д-р инж. Георги Любенов Илиев - научен секретар
3. Проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов
4. Доц. д-р инж. Габриела Лъчезарова Атанасова
5. Доц. д-р инж. Ивелина Стефанова Балабанова

Резервни членове:

1. Доц. д-р инж. Георги Райчев Балабанов
2. Проф. д-р инж. Валентина Илиева Маркова

Рецензенти:

1. Доц. д-р Кирил Маринов Късев
2. Доц. д-р Габриела Лъчезарова Атанасова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по телекомуникации на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1254.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Комуникационни мрежи“ на Факултет по телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Равиндър Бениуол

Заглавие: Изследване на алгоритми и протоколи за комуникационни мрежи с ограничени ресурси

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Възлите, използвани в безжичните сензорни мрежи (WSN - Wireless Sensor Networks), обикновено са малки, работещи с батерии устройства с ограничени памет и изчислителни възможности. Те се използват за наблюдение на различни физически или екологични показатели. Очаква се да се използват милиарди сензори за интелигентно наблюдение, управление и реагиране при възникване на горски пожари, лавини, урагани, неизправности в комуналното оборудване в цялата страна, пътен трафик и болници, и още много други области на приложение. Въпреки това, поради ограниченото пространство за съхранение и мощността на сензорните възли, изследователите се сблъскват с различни изследователски проблеми и предизвикателства, когато се опитват да създадат функционална сензорна мрежа. Въз основа на идеята, че всеки възел, дори и с ограничен ресурс, трябва да може да изпълнява интернет протокола (IP – Internet protocol) и да комуникира с останалия свят, се въвежда IPv6 през безжични персонални мрежи с ниска мощност (6LoWPAN - IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Networks). WSN намират приложение в различни области и са в състояние да класифицират, идентифицират, обработват и предават данни, събрани от сензорите в мрежата. Интегрирането на безжичната сензорна мрежа в света на Интернет е основното предизвикателство пред внедряването на Интернет на нещата (IoT – Internet of Things). Методът за адресиране на IPv6 и комуникационните протоколи, адаптирани в IoT, трябва да бъдат модифицирани, за да отговарят на изискванията на безжичните сензорни възли, като ограничена памет, малък размер на пакета, ограничена консумация на енергия, малки режимни разходи и т.н. Сред научните изследвания има много предложени протоколи, които се занимават с проблеми, свързани с маршрутизирането и работата в мрежа, но тези протоколи трябва да се адаптират към условията за работа на 6LoWPAN мрежите. Предвид нарастващото приложение и използване на мрежите с ограничени изчислителни ресурси, разработването и адаптирането на маршрутизиращи протоколи с подобрена производителност и оптимизирано използване на наличните мрежови ресурси е актуална област за научно-изследователската общност.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационния труд е **„Да се адаптира и анализира алгоритъм за маршрутизиране, който може да бъде приложен в комуникационни мрежи с ограничени ресурси като памет, мощност и изчислителен капацитет със същата точност, надеждност, скорост, ефективност, възможност за диференциране на услугите и гарантиране на качеството на обслужване“**. За постигане на тази цел е необходимо да се изпълнят следните задачи :

1. Да се проучат различните протоколи за маршрутизиране в комуникационна мрежа с устройства с ограничени изчислителни ресурси, за да оцени производителността.
2. Да се адаптира алгоритъм за маршрутизиране за комуникационна мрежа с ограничени изчислителни ресурси.
3. Да се анализира производителността на протоколите за маршрутизиране в комуникационна мрежа с устройства с ограничен ресурс по отношение на мощността.

4. Да се сравнят резултатите от различните протоколи за маршрутизиране в мрежа с ограничени ресурси.

Методологична основа

Методологията на изследването в дисертационния труд включва използване на числени и симулационни подходи. Численият подход е приложен при избора и оценката на необходимите параметри на разработения адаптиран маршрутизиращ протокол и оценка на неговата производителност. Симулационният подход е приложен при имплементирането на работата на предложената нова адаптация на маршрутизиращ протокол за 6LoWPAN мрежи, използвайки мрежов симулатор NS3. Въз основа на симулация е сравнена производителността на изследваните и разработени решения за маршрутизация в 6LoWPAN мрежи.

Научна новост

Научната новост в този дисертационен труд е свързана с разработването на адаптиран маршрутизиращ протокол за комуникационни мрежи с ограничени изчислителни ресурси и техники за подобряване на качеството на обслужване, надеждността и производителността на протокола. Анализът на различни маршрутизиращи протоколи е извършен, за да се намери ефективен протокол, подходящ за маршрутизация в комуникационни мрежи с ограничени изчислителни ресурси. В дисертационния труд също така е разработен надежен и енергийно ефективен 6LoWPAN маршрутизиращ протокол и е изследвано неговото поведение в комуникационна мрежа с ограничени изчислителни ресурси. Предложеният 6LoWPAN маршрутизиращ протокол, който взема предвид мощността, е проектиран чрез включване на техника за проверка на енергията във възлите и дава най-добри резултати в сравнение с други подобни протоколи по отношение на надеждност и продължителност на живота на комуникационната мрежа с ограничени изчислителни ресурси.

Практическа приложимост

Всички разработени протоколи, както и предложената енергийно ефективна техника са изследвани и анализирани чрез симулационни експерименти. Сравнение се прави и с други техники, които имат сходни функционалности и характеристики или имат сходни цели по отношение на подобряване на тяхното представяне. Всички разработени маршрутизиращи протоколи могат да бъдат използвани и приложени в реални комуникационни мрежи с ограничени изчислителни ресурси и в сензори, които работят по стандарт 6LoWPAN.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са представени в общо 6 авторски публикации, една от които е публикувана в международно научно списание. Пет от научните публикации са представени и публикувани в сборници от международни научни конференции и национални конференции с международно участие. Една от авторските публикации е самостоятелна, а останалите 5 са в съавторство с научните ръководители. Налични са общо 10 цитирания, всички от които са в индексирани издания.

Международните научни конференции са: 53rd International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST'2018), 7th International Balkan Conference on Lighting (BalkanLight'2018); 7th IEEE International Black

Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom'2019); 27th National Conference with International Participation: The Ways to Connect the Future (Telecom'2019); 29th National Conference with International Participation (Telecom'2021).

Международното научно списание e: International Journal of Wireless Communications and Networking Technologies (IJWCNT), 2017.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е написан на английски език и има обем от 135 страници А4 и съдържа въведение, четири глави, заключение с основните приноси, насоки за бъдеща работа, списък на авторите публикации, списък на използваните съкращения, списък на фигури, списък на таблици, списък на използваната литература. Дисертационният труд съдържа 79 фигури, 12 таблици и 36 математически израза. Използвани са 85 литературни източника, всички на английски език, 60% от които са от последните десет години. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата отговарят на тези в дисертацията.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

1.2 Предизвикателства в WSN

Безжичните сензори и технологиите за контрол се използват за преодоляване на празнината между физическия и виртуалния свят на хората и електрониката. WSN имат способността да предоставят евтини решения за военни и медицински проблеми, както и да помагат за предотвратяването на климатични катаклизми. Но поради ограничените възможности на сензорите като памет, мощност, изчислителни възможности, продължителност на живот и др., изследователите се сблъскват с различни изследователски проблеми и предизвикателства, когато се опитват да създадат функционална безжична сензорна мрежа. Основните проблеми, които засягат дизайна и производителността на безжичната сензорна мрежа, са [2]: енергия, самоуправление, проблеми с хардуера и софтуера, операционна система, проблеми с MAC (Media Access Control) слой, качество на обслужване (QoS), сигурност, събиране и предаване на данни, архитектура, калибриране, внедряване, ограничени памет и пространство за съхранение, физически атаки и сигурност, обработка в мрежата, децентрализирано управление, устойчивост на грешки, устойчивост, интерпретация на данни и формиране на знания, хетерогенност, мултимедийна комуникация, работа в реално време, синхронизация и сигурна локализация.

1.3 Необходимост от IP свързаност в WSN

WSN данните в реално време стават все по-достъпни, особено в индустрията. В програмирането няма удобни инструменти или рамка за достъп до тези открити данни. По този начин получаването и интерпретирането на WSN данни е голямо предизвикателство. WSN мрежи с IP (Internet Protocol) свързаност могат бързо да получат данни в реално време. IP свързаността позволява на потребителите на WSN данни да преглеждат и обработват данни в реално време. Поради ниските си производствени разходи, десетки хиляди сензорни възли могат да бъдат разгърнати за сензорни задачи в големи и малки вътрешни и външни пространства [4]. Гъстотата на населението усложнява събирането на

данни. Би било полезно, ако IP-базиран хост може прозрачно да събира данни от множество отдалечени мрежи, ориентирани към данни, между сензорни възли и IP-базирани хостове.

1.6 Предизвикателства в 6LoWPAN

Internet Engineering Task Force (IETF), която изгражда и поддържа цялата основна работа и стандарти за интернет архитектура, е определила 6LoWPAN като набор от стандарти. Стандартите 6LoWPAN позволяват ефективното и находчиво използване на IPv6 от базови вградени устройства в безжични мрежи с ниска мощност и ниска скорост, чрез слой за адаптиране и оптимизиране на свързаните протоколи. Има различни предизвикателства, които трябва да бъдат преодолени при прилагането на този протокол. Трябва да се направят определени договорености, докато се осигурява IP свързаност в тези протоколи, от друга страна размерът на пакета е ограничен в този протокол, така че трябва да се внимава при създаването на пакети. Също така е предизвикателство да се извърши конфигурацията и управлението в 6LoWPAN протокола. Откриването на нови услуги в ресурсно ограничената среда е предизвикателна задача. Проблемите със сигурността са основни за всеки протокол и особено, ако става въпрос за комуникационна среда с ограничени ресурси, това е много предизвикателна задача.

1.9. Изводи

WSN мрежите се разширяват ежедневно. Фокусирането върху изследванията на WSN е от решаващо значение. Важно е да се разработят алгоритми за маршрутизиране в WSN, които да дадат възможност за интернет свързаност, тъй като предаването на данни между устройства с ограничени ресурси се увеличава. В комуникационни мрежи с ограничени ресурси не могат да се използват всички интернет протоколи за маршрутизиране. Традиционните методи за маршрутизиране изискват изчислителен ресурс, памет и бързодействие и не могат директно да бъдат имплементирани в WSN и съответно създават големи предизвикателства. Устройствата с ограничени ресурси изискват някои настройки и оптимизации на маршрутизиращия алгоритъм, за да изпълняват протоколи за интернет маршрутизиране. Много алгоритми са адаптирани за мрежи с ограничени ресурси, но системите за интернет маршрутизиране все още се нуждаят от допълнително проучване, подобрене и оптимизиране. Необходимо е да се направят задълбочени изследвания на маршрутизиращите алгоритми, които се използват в WSN, да се адаптират и изучат техники, които да са подходящи за мрежово маршрутизиране в комуникационни мрежи с ограничени ресурси, което от своя страна ще може да помогне за решаването на съществуващите проблеми.

1.11. Принос към глава 1.

Основните приноси от направените проучвания и анализи в глава 1 могат да бъдат обобщени по следния начин:

- Изследвани са предизвикателствата в комуникационни мрежи с ограничени изчислителни ресурси.
- Проучени са подходите на маршрутизиращите протоколи, използвани в 6LoWPAN и са анализирани техните проблеми и ограничения.
- Представено е сравнително изследване на различни протоколи в различни форми.

- Анализирани са проблемите със сигурността за IoT мрежи.
- В резултат на анализа на състоянието на проблема са идентифицирани основните предизвикателства в алгоритмите за маршрутизиране и са формулирани целта и задачите на дисертационния труд.

ГЛАВА 2. СРАВНИТЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ПРОТОКОЛИТЕ ЗА МАРШРУТИЗИРАНЕ ЗА 6LoWPAN

2.1 Съществуващи протоколи за маршрутизиране в 6LoWPAN

Механизмът за маршрутизиране в 6LoWPAN е особено чувствителен поради ограничените възможности на възлите по отношение на мощност, обхват на предаване и други съображения. Маршрутизирането в 6LoWPAN е разделено на три типа: многослойно решение; маршрутизиране, базирано на приложения; и маршрутизиране, базирано на параметри. Прямо слоевата архитектурна рамка маршрутизирането се разделя в две категории: маршрутизиране под мрежата (mesh-under routing) и маршрутизиране над маршрута (route-over routing). При мрежовото маршрутизиране (mesh-under routing), адаптивният слой взема решения за маршрутизиране, докато мрежовият слой взема решения за маршрутизиране при маршрутизиране над маршрута (route-over routing). В зависимост от изискванията на приложението, маршрутизирането в 6LoWPAN може да се класифицира като маршрутизиране, базирано на данни, вероятно маршрутизиране, географско маршрутизиране, управлявано от събития маршрутизиране, базирано на заявка маршрутизиране или йерархично маршрутизиране. 6LoWPAN използва LOAD, MLOAD, DYMO-Low, Hi-Low, Extended Hi-Low, S-AODV и други протоколи за маршрутизиране.

2.2 Класификация на протоколите за маршрутизиране в 6LoWPAN

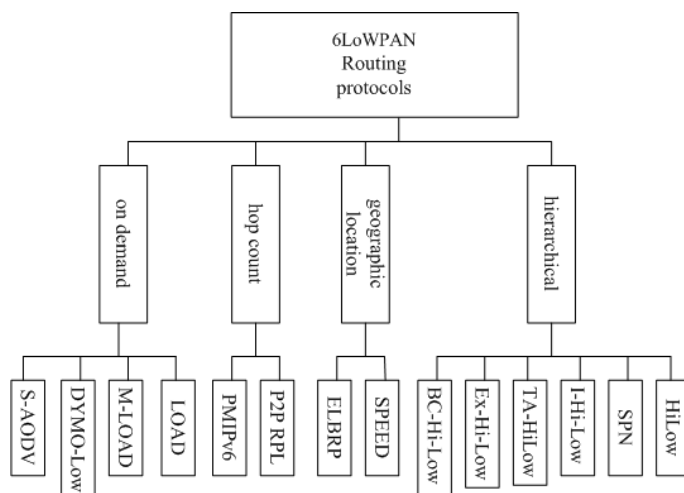
След задълбочено проучване на съществуващата литература може да се види, че разработването на нови протоколи за маршрутизиране, адресиращи всички проблеми на 6LoWPAN, все още е отворена изследователска област. Съществуващите протоколи за маршрутизиране могат да бъдат класифицирани въз основа на различни критерии, както е дадено в [23], [36]. В този раздел е представена нова класификация, водеща до по-ясен и разбираем начин за обяснение и сравняване на характеристиките на съществуващите протоколи за маршрутизиране. Могат да бъдат формулирани четири основни групи протоколи за маршрутизиране, както е дадено на фиг. 2.29.

A. Протоколи за маршрутизиране при поискване

6LoWPAN Ad-Hoc On-Demand Vector Routing (LOAD) е опростен протокол за маршрутизиране при поискване, който работи върху слоя за адаптация, а не върху транспортния слой [23]. Основните дейности на LOAD са намиране на маршрут, управление на структура от данни и поддържане на локална връзка. Консумацията на енергия е висока в LOAD протокола поради многократно бродкастване на съобщение за заявка за повторение (Repeat Request - RREQ) за процеса на откриване на маршрут. MLOAD е проектиран да намали натоварването на мрежата. Той подобрява LOAD протокола за намиране на многопътни маршрути по време на процеса на откриване на пътя чрез внедряване на *Ad-hoc on-demand multipath distance vector routing (AOMDV)* на LOAD. *Dynamic MANET on-demand routing for 6LoWPAN (DYMO-Low)* създава мрежова

топология с 6LoWPAN устройствата, така че IP може да вижда WPAN като единична връзка [27]. DYMO-Low предоставя лесен и ефективен метод за имплементиране на протокол за маршрутизиране. Той използва както 16-битови кратки адреси, така и 64-битови разширени адреси.

Sink Routing Table over Ad hoc On Demand Distance Vector (S-AODV), проектиран в [28], намалява консумацията на енергия, осигурява балансиране на натоварването и увеличава продължителността на живот на мрежата. Данните се прехвърлят във фазата на стабилно състояние между приемния възел и общия възел получател. С помощта на този механизъм се минимизира закъснението и консумацията на енергия при препращане на данни в мрежата.



Фиг.2.26 Класификация на протоколите за маршрутизиране 6LoWPAN.

В. Йерархични протоколи за маршрутизиране

Hierarchical Routing in 6LoWPAN (HiLOW) е проектиран да насърчава мащабируемостта и използва 16-битов кратък адрес като интерфейс идентификатор за пестене на памет и увеличаване на мащабируемостта [25]. Той следва модела родител-дете, като всеки възел в мрежата открива своя родител чрез изпращане на бродкаст сигнал. Ако мрежова връзка се повреди, не се използва метод за възстановяване на маршрута, което води до ненадеждна доставка на пакети в мрежата. *Step Parent Node (SPN)* [27] е нова техника за възстановяване на пътя, предназначена да подобри NiLow протокола, описана в [25]. Когато мрежовата връзка е неуспешна, се използва съобщение за заявка към родителски възел за разрешаване на проблема с индикация за качество на пътя (PQI). *Improved HiLow (I-Hi-Low)* [28] се използва за подобряване на ефективността на протокола. В I-Hi-Low протокола, текущият възел изпраща бродкаст „Hello“ съобщение в своето лично работно пространство (POS), за да научи за своите съседи. В сравнение с предишните методи за йерархично маршрутизиране, подобреният протокол за йерархично маршрутизиране изисква по-малко хопове, за да достигне своята дестинация.

Bias Routing Tree Avoiding Technique for Hierarchical Routing Protocol for 6LoWPAN (TA-HiLow) [32] предлага нов механизъм за избягване на дървото на пристрастно маршрутизиране, което може да възникне, ако дъщерните възли не са свързани равномерно към родителския възел. За да се избегне проблемът с дървото за маршрутизиране на отклонения, се предава информация за прикачен номер на дете. Техниката за *Extended Hierarchical Routing (Ex-Hi-Low)* [32] конфигурира йерархично

дърво за маршрутизиране и ако сензор или родителски възел се повреди по каквато и да е причина, структурата на дървото за маршрутизиране се губи. Новият дъщерен възел предава пакет и идентификатора на целевия възел към родителя, а родителят изпраща информация за пътя на местоназначението към координиращия възел. Координиращият възел доставя тази информация на възлите на рутера, които след това проверяват своите таблици за маршрутизиране за информация за добавено дете (NAC) и отговарят на координиращия възел. След това новият дъщерен възел изпраща пакета към целта чрез своя нов родителски възел. *Bias Child Node Association Avoidance Mechanism for Hierarchical Routing Protocol in 6LoWPAN* (BC-Hi-Low) предотвратява предубедена дървовидна структура на йерархично маршрутизиране, като взема предвид дълбочината, нивото на енергията и интензитета на сигнала на възможния родителски възел [35]. Възможният родителски възел информира дъщерния възел за неговия съществуващ брой дъщерни възли; въз основа на този брой, новият възел избира родител с по-малко дъщерни възли.

C. Протоколи за маршрутизиране, базирани на географско местоположение

SPEED маршрутизиращ протокол за 6LoWPAN мрежи е предназначен да осигури плавна комуникация в реално време в 6LoWPAN мрежи. Географската позиция и глобалните адреси се използват за идентифициране на пакети, изпратени до целевите възли, докато централната позиция и радиусът определят зоната на местоназначение. Най-краткият път се използва за изпращане на информация до възлите получатели, а SPPEED [33] предлага балансиране на натоварването, в реално време и механизми за оформяне на потока, което прави този протокол ефективно решение за маршрутизиране на пакети в 6LoWPAN мрежи. Географското местоположение се използва като мярка за маршрутизиране в протокола *Enhanced Location Based Routing Protocol for 6LoWPAN* (ELBRP) [38] за предаване на пакети в 6LoWPAN мрежата. По време на инициализацията на мрежата приемният възел изпраща бродкаст своята информация за позиция и адрес; другите LER и RFD възли в мрежата използват тази информация за местоположението, разстоянието и LQI като мярка за маршрутизиране. Най-добрият LER се избира измежду всички LER въз основа на максималното разстояние и този LER отговаря на RREP съобщението. Всеки мрежов възел поддържа таблица за маршрутизиране и таблица със съседите. ER адресът, ER местоположението, адресът на източника и местоположението на източника се съхраняват в маршрутизиращата таблица на възела, докато ER адресът, неговото местоположение и LQI се съхраняват в базата данни на съседа на възела. Този протокол също така консумира относително малко енергия.

D. Протоколи за маршрутизиране, базирани на броя на хоповете

Базиран на реактивен механизъм, протоколът за маршрутизиране от точка до точка за мрежи с ниска мощност и загуби (P2P RPL) [45] позволява на рутер да открие и установи маршрути към друг рутер. Когато рутер S трябва да намери маршрут към друг рутер D, той изпраща съобщение, идентично на AODV съобщението - Route Request. Този протокол добавя нова опция за информационни обекти с ориентирана към местоназначението насочена ациклична графика (DODAG - destination-oriented directed acyclic graph), която указва адресът, който се търси и записва изминатия маршрут. Предложени са няколко протокола за мобилен 6LoWPAN сензорен възел (6LoWMSN), базиран на *Proxy Mobile IPv6* (PMIPv6) [46]. Известието за движение на 6LoWMSN

въвежда мобилност в базирани на множество хопове 6LoWPAN мрежи. С добавянето на 6LoWMSN, RS и RA се използват за намаляване на разходите за сигнализиране в безжичната мрежа. PAN системата за откриване на място за прикрепяне в 6LoWMSN е дефинирана да използва RS и RA съобщения, за да приложи PMIPv6 протокола, базиран на един хоп, към базирани на множество хопове 6LoWPAN мрежи.

2.3 Сравнение на протоколите за маршрутизиране в 6LoWPAN

Табл. 2.4 сравнява 6LoWPAN протоколите за маршрутизиране и показва направените изводи. В резултат на направеното сравнение може да се обобщи, че протоколите LOAD, DYMO-Low, M-LOAD и S-AODV използват RERR съобщението, за да сигнализират за прекъсната връзка в мрежата, докато другите протоколи не го правят. LOAD, M-LOAD, DYMO Low, Hi-Low и SPN използват много малко енергия и изпращат RREQ съобщение като бродкаст за откриване на маршрут. DYMO-Low използва пореден номер за избягване на цикли, но други протоколи не. Hello съобщенията се използват само в DYMO-Low и I-Hi-Low за постоянно проследяване на състоянието на околните възли. Hi-Low, M-LOAD, S-AODV, I-Hi-Low и ELBRP използват идеята за брой хопове като показател за маршрутизиране, а в LOAD процесът на локално възстановяване се използва за определяне на алтернативна връзка за препращане на данни, докато в M-LOAD се определя алтернативен път.

С изключение на SPEED протокола, всички възли имат възможност да бъдат мобилни и за разлика от други протоколи, мобилността на приемника се обработва в S-AODV. Извършен е и сравнителен анализ на мащабируемостта на протоколите Hi-Low, SPN, I-Hi-Low, TA-Hi-Low, Ex-Hi-Low и BC-Hi-Low. Като резултат може да се обобщи, че на DYMO-Low протоколът му отнема по-голямо време за маршрутизиране. SPN и ELBRP протоколите използват Path Quality Indication (PQI) като параметър за маршрутизиране. HiLow, SPN и SPEED протоколите имат по-бавна конвергенция при промяна на топологията, а P2P-RPL и PMIPv6 използват мулти-хоп като метрика за маршрутизиране.

Таблица 2.4 Сравнение на протоколи за маршрутизиране

характеристики	M-LOAD	S-AODV	SPN	BC-HILOW	HI-LOW	PMIPv6	SPEED	ELBRP
RERR съобщение	да	да	не	не	не	не	не	не
консумация на енергия	ниска	ниска	ниска	ниска	ниска	висока	ниска	много ниска
RREQ бродкастване	високо	намалено	високо	намалено	високо	намалено	намалено	намалено
номер на последователност	да	не	не	не	не	не	не	не
Брой хопове	да	да	не	не	да	да	да	да
Hello съобщение	не	не	не	не	не	не	не	не
мобилност на възела	мобилен	мобилен	мобилен	мобилен	статичен	мобилен	статичен	мобилен
конвергенция	бърза	бърза	бавна	бърза	бавна	бавна	бавна	бърза
PQI	не	не	да	не	не	не	не	да

2.4 Заключение

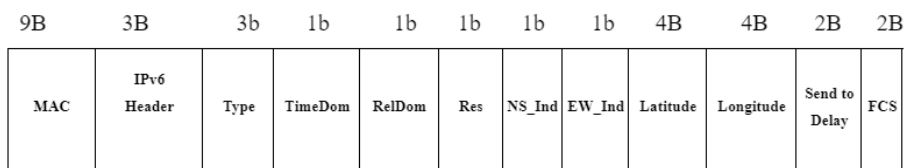
В тази глава са анализирани различни изисквания към маршрутизирането в 6LoWPAN мрежите и са разгледани особеностите на архитектурата. Предложена е класификация на маршрутизиращите протоколи, използвани в 6LoWPAN мрежа и е установено, че могат да

- **Type** (3 бита): идентифицира типа на съобщението;
- **Flow Label** (3 бита): показва потокът, към който принадлежи възела;
- **TimeDom** (4 бита): времева област на пакета;
- **RelDom** (4 бита): домейн на надеждност на пакета;
- **NS_Ind** (1 байт): индикация за север/юг;
- **EW_Ind** (1 байт): индикация за изток/запад;
- **Latitude** (4 байта): посочва географската ширина на възела;
- **Longitude** (4 байта): посочете географската дължина на възела;
- **Send to delay** (2 байта): Оценка на закъснението при препращане на пакети към дестинацията.

3.2.2. Backpressure beacon съобщение

Това съобщение разрешава проблеми с претоварването на мрежата и трудностите при избягване на ситуации, в които не се предава никаква информация. Двубайтово поле за допълване е добавено след параметъра Send to Delay, за да се придържа към изискванията на стандарта. GlobalNodeId на устройството е неговият IPv6 адрес. *Backpressure beacon* съобщението се предава чрез стандартни 6LoWPAN съобщения [57]. MMSPEED полетата, които се различават от тези, използвани в *Beacon* съобщението са както следва:

- **Res** (1 бит): Запазени битове за бъдещи разширения;
- **Send to delay** (2 байта): Оценка на закъснението за контрол на претоварванията и избягване на ситуации, в които не се предава никаква информация.



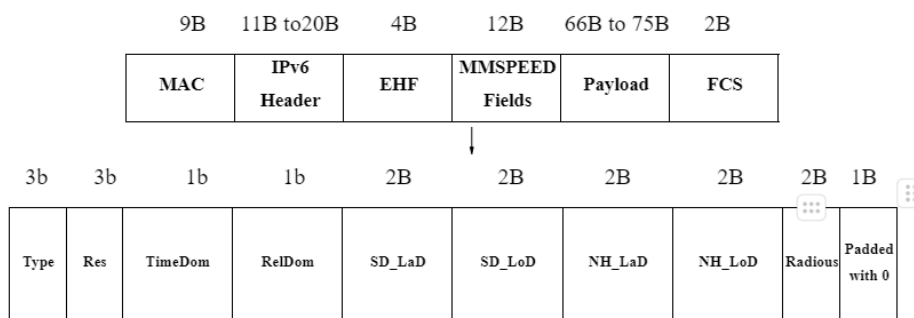
Фиг. 3.7 *Backpressure beacon* съобщение

3.2.3. Data packet съобщение

Този тип съобщение съдържа данни, както и допълнителна информация като PacketType , GlobalNodeID , Destination Area и Time-To-Live (TTL). *Data packet* съобщението изисква допълнителни MMSPEED полета за локалния избор на възела. За да се енкапсулират гореспоменатите полета за маршрутизиране към 6LoWPAN пакетите се добавят нови полета за хедъра за разширение (EHF) [57]. Полетата EHF и MMSPEED трябва да са кратни на 8 байта, когато се добавя Padding.

- **Res** (3 бита): Битовете са запазени за разширения в бъдеще;
- **SD_LaD** (2 байта): Разлика в географската ширина между източника и получателя;
- **SD_LoD** (2 байта): Разлика в географската дължина между източника и получателя;
- **NH_LaD** (2 байта): Разлика в географската ширина в следващия хоп и получателя;
- **NH_LoD** (2 байта): Разлика в географската дължина на следващия хоп и получателя;
- **Radius** (2 байта): Диапазон на съобщенията Area-Multicast и Area-Anycast.

За да направят EHF и MMSPEED полетата кратни на 8 байта, към пакета се добавят допълващи байтове. 6LoWPAN адресът е прикрепен към GlobalNodeID, а променливите NH LaD и NH LoD се използват за определяне на географската дестинация на пакета [57].



Фиг. 3.8 Data packet съобщение

3.2.4 Енкапсулиране на MMSPEED съобщения

6LoWPAN е стандарт, при който IPv6 адресирането и протоколите са адаптирани за работа в IEEE802.15.4 мрежи, по-известни като безжични персонални мрежи. Само физическия и каналния слой на ISO/OSI модела са определени от IEEE802.15.4 стандарта. Фиг. 3.9 изобразява 6LoWPAN протоколния стек в неговата цялост.

Application	Application
Network	IPv6 with LoWPAN
Data Link	IEEE 802.15.4 MAC
Physical	IEEE 802.15.4 PHY

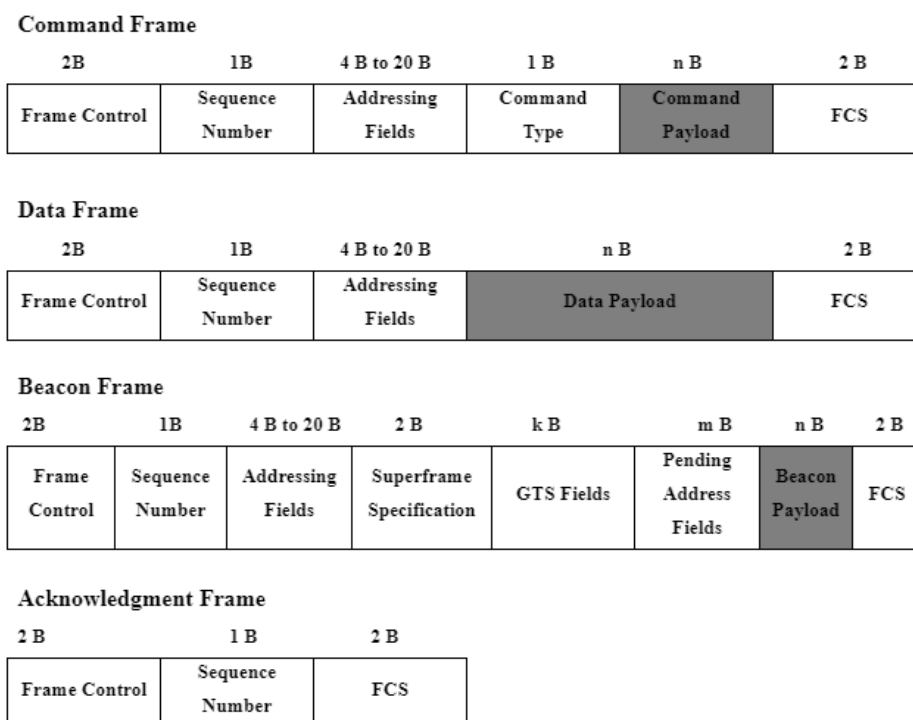
Фиг. 3.9. 6LoWPAN протоколен стек.

IEEE802.15.4 стандартът е създаден от IEEE802.15 работната група с намерението да позволи нискоскоростна, всепроникваща комуникация между устройства с ограничени изчислителни възможности и строги изисквания за пестене на енергия. Стандартът осигурява максимален среден размер на пакета за контрол на достъпа от 127 байта и максимална скорост на предаване от 250 kbps. Има само две поддържани мрежови топологии: звезда и пълносвързана. В топология тип звезда всички пакети се изпращат до местоназначението си от мрежовия координатор в центъра на звездата. Използването на мрежов координатор в топология тип звезда позволява комуникация между устройствата, базирана на гарантирани времеви интервали (GTSs), като по този начин елиминира необходимостта от стратегии за избягване на колизии. Пълният стандарт поддържа четирите MAC рамки, посочени на Фиг. 3.10. (k, m и n означават променливи размери на полето). *Beacon* рамката се използва, само когато мрежата е настроена в топология тип звезда, докато всички други рамки могат да се използват както в топология тип звезда, така и в пълносвързаната топология.

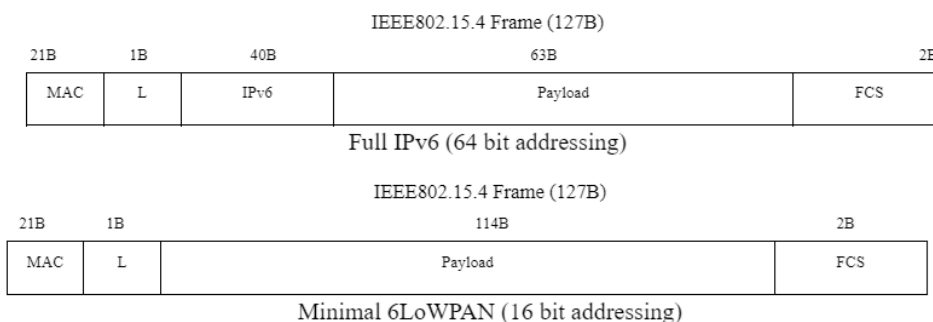
IPv6 адресното пространство представлява първоначалната трудност при прилагането на IPv6 стандартите за IEEE802.15.4 мрежи. IPv6 адресът е дълъг 128 бита, с 64 бита за мрежов префикс и 64 бита за ID на интерфейса, съгласно спецификациите на IETF. За да се спестят байтове за данни на приложението, енкапсулирането на IPv6 адреси в MAC нивото на IEEE802.15.4 стандарта се изисква компресия на хедъра. Фиг. 3.11 изобразява сравнение на запълването на хедъра на IPv6 и 6LoWPAN. Използването на компресия на хедъра осигурява 40% намаление на служебните разходи (13 байта за 6LoWPAN срещу 64 байта за IPv6). По отношение на мрежовите топологии, изисквани от 6LoWPAN, протоколите за маршрутизиране, за да позволят пълносвързана топология и топология тип звезда, вижте [59]. В пълносвързаната топология услугите за маршрутизиране с

множество хопове трябва да се предоставят от междинни възли в съответствие с политика, която се стреми да постигне баланс между количествата необходими пакети за маршрутизиране, потреблението на енергия и изчислителните възможности. 6LoWPAN мрежите изискват инсталирането на услугите за откриване на съседни (ND) [60, 61] и възможност за управление на мрежата, предоставени от ICMPv6 за ефективна комуникация устройство към устройство. По-специално, използването на съобщения като Router Advertisement (RA), Router Solicitation (RS), Neighbor Advertisement (NA) и Neighbor Solicitation (NS) позволява периодични актуализации за състоянието на мрежата, като по този начин позволява на мрежата да реагира на настъпилите промени.

Адаптирането на SPEED протокола към 6LoWPAN среда налага проектирането на техники за енкапулиране на протоколни съобщения и оптимизации, базирани на услугите, предоставяни от ICMPv6 протокола.



Фиг. 3.10. IEEE802.15.4 MAC рамки.



Фиг. 3.11. Пълно и минимално IPv6 капсулиране в стандарт IEEE802.15.4.

3.3 Експериментални резултати от 6LoWPAN имплементацията на MMSPEED протокола

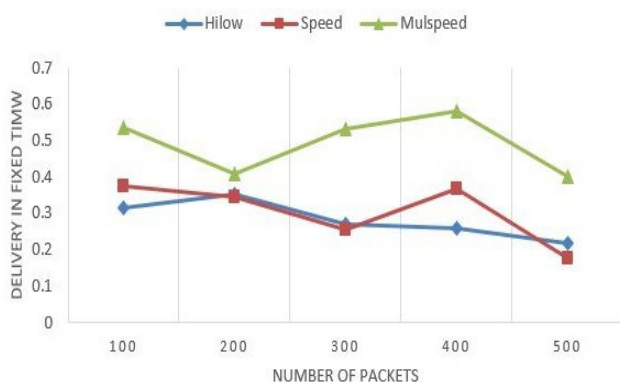
Network Simulator 3 (NS3) се използва за симулации на MMSPEED протокола имплементиран в 6LoWPAN среда [64]. Направени са сравнения с протоколите 6LoWPAN SPEED [57] и 6LoWPAN HiLoW [62] по отношение на производителността.

Ефективността на протоколите MMSPEED, SPEED и HiLoW в 6LoWPAN мрежа е оценена с помощта на показателите, представени в началото на раздела. Табл. 3.1 съдържа основните настройки на симулацията.

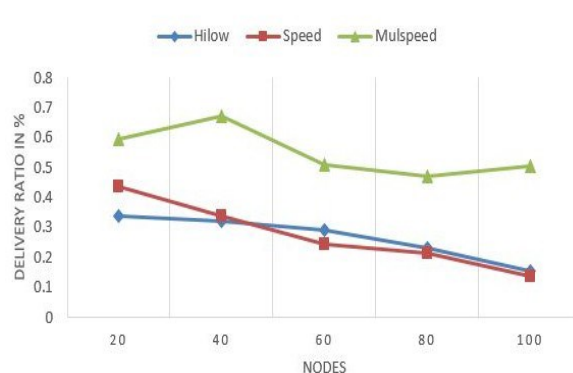
ТАБЛИЦА 3.1 ПАРАМЕТРИ НА ПЪРВОНАЧАЛНАТА СИМУЛАЦИЯ

Channel	Wireless Channel
Queue length	50 packets
Number of Nodes	20 – 100
MAC Type	802.15.4
Model	Two way Ground Propagation
Initial Energy	1000 Joule
Idle Power	7,12E-04 Watt
Sleep Power	1,44E-07 Watt
Packet Size	500 KB (Changing)
Data rate	100 Kb/s

MMSPEED е сравнен с протоколите SPEED и HiLoW по отношение на диференцирането на услугите и гарантирането на доставянето на информацията в първия експеримент. Изискването на протокола е установено и са извършени симулации. Тази симулация изчислява надеждността на различните протоколи в 6LoWPAN мрежа в симулационна среда. Този експеримент е проведен чрез изпращане на различен брой пакети до дестинацията с помощта на трите протокола; констатациите показват, че имплементацията на MMSPEED протокола в 6LoWPAN средата (съкратено MULSPEED) е по-надеждна в сравнение с другите протоколи. Протоколът MULSPEED има възможност да изпраща пакетите по различни маршрути с различни скорости в сравнение с протокола SPEED, който има само маршрути с еднаква скорост. Следователно MULSPEED е по-надежден протокол от SPEED и HiLoW. Резултатите са илюстрирани на Фиг. 3.11.



Фиг. 3.11. Надеждност

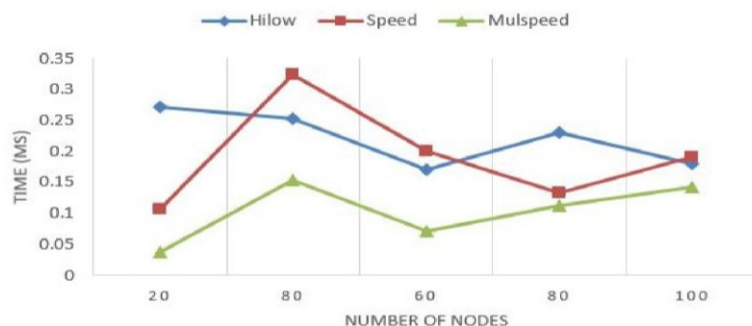


Фиг. 3.12. Съотношение между доставени пакети и брой възли

В следващия експеримент коефициентът на доставяне (delivery ratio) на MULSPEED се сравнява с този на другите два метода. Този експеримент също доказва надеждността на MULSPEED протокола, която е резултат от наличието на маршрути с различни скорости.

Поради факта, че протоколът SPEED има еднаква скорост на маршрутите, коефициентът му на доставка е по-лош. Резултатите са показани на Фиг. 3.12 за мрежи с различна плътност на възлите в сценарий на 6LoWPAN мрежа.

Резултатите от закъснението при предаването са показани на Фиг. 3.13. Когато всички възли имат един и същ краен срок, е невъзможно да се видят значителни вариации.



Фиг. 3.13. Закъснение при предаване

3.4 Анализ на производителността на MM-SPEED протокол, имплементиран в 6LoWPAN среда

Анализирана е производителността на MM-SPEED протокола в 6LoWPAN мрежите. Модифицираният протокол за маршрутизиране MMSPEED (означен като Mulspeed на фигурите) е сравнен с протоколите SPEED и HiLOW също имплементирани в 6LoWPAN спрямо различни параметри. Резултатите показват, че модифицираният MMSPEED е по-подходящ за 6LoWPAN средата спрямо другите симулирани протоколи. Ключови параметри при сравнението са пропускателната способност, контролните пакети и закъснението при предаването.

- **Пропускателната способност** се определя като обема информация, която се предава от възела източник към възела местоназначение за даден период от време.
- **Контролните пакети** са пакетите, измерени в байтове, използвани за определяне на пътя между източника и получателя.
- **Закъснението при предаване** е времето в милисекунди, необходимо за предаване на данни от източника до получателя.

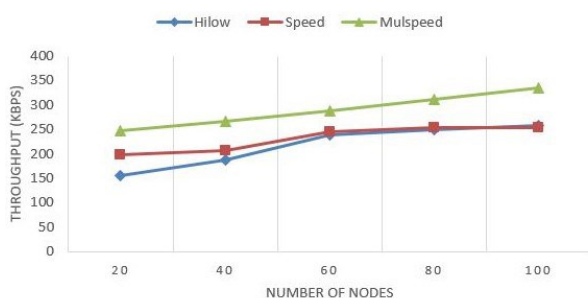
3.4.1 Анализ на производителността спрямо пропускателната способност за различен брой възли

Пропускателната способност е оценена спрямо броя на възлите. Основните параметри на симулацията са дадени в Табл. 3.1. В първия експеримент MMSPEED е сравнен с протоколите за маршрутизиране HiLOW и SPEED по отношение на пропускателната способност за различни брой възли. Експериментът е проведен за между 20 и 100 брой възела. Резултатите от този експеримент показват, че протоколът MMSPEED има по-висока пропускателна способност в 6LoWPAN среда в сравнение с другите протоколи. Поради наличието на повече от един маршрут до дестинацията в MMSPEED протокола, пропускателната способност се увеличава, което води до по-малко изпратени *Backpressure beacon* пакети в сравнение с другите протоколи, където има един единствен маршрут до дестинацията, който поема цялото натоварване и генерира повече *Backpressure beacon*

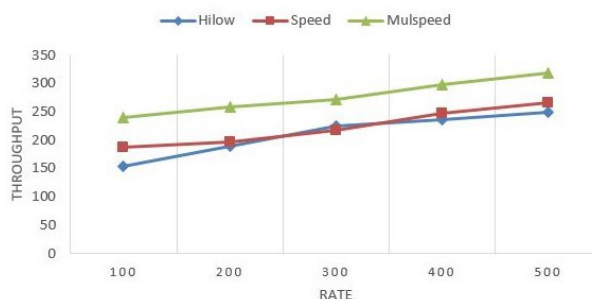
пакети, намалявайки по този начин пропускателната способност на протокола. Експерименталните резултати са изобразени на Фиг. 3.14.

3.4.2 Анализ на производителността спрямо пропускателната способност при различна скорост на предаване на пакета

Пропускателната способност е оценена спрямо скоростта на предаване на пакета. Този експеримент демонстрира, че MMSPEED има по-висока производителност от SPEED и HiLOW при настройка за работа в 6LoWPAN среда. С увеличаването на скоростта на предаване на пакетите се увеличава и пропускателната способност, която е по-голяма от тази на другите протоколи. Изследвана е производителността на трите протокола със скорости на предаване на пакетите, вариращи от 100 до 500 kbit/s. MMSPEED има по-добра производителност от тази на SPEED и HiLOW поради наличието на много маршрути в MMSPEED, които могат да управляват повече натоварване от останалите. Когато скоростта на предаване на пакети се повиши, другите два протокола генерират по-голям брой *Backpressure beacon* пакети от протокола MMSPEED, което води до намаляване на пропускателната способност. Експерименталните резултати са изобразени на Фиг. 3.15.



Фиг. 3.14. Пропускателна способност спрямо брой възли

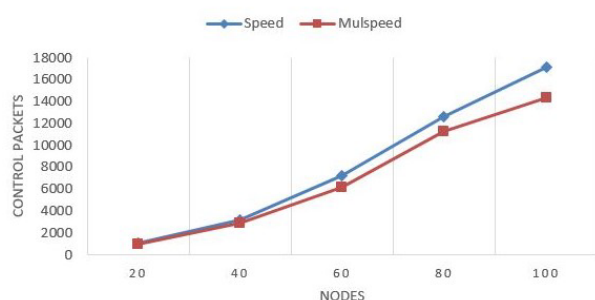


Фиг. 3.15. Пропускателна способност спрямо скорост на предаване

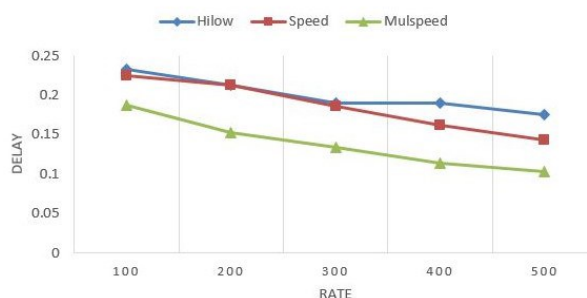
3.4.3 Анализ на производителността спрямо контролни пакети при различен брой възел.

Всеки от разглежданите протоколи използва различни типове контролни пакети, които имат своята последователност и разпределение във времето и се използват, за да могат да осигурят специфичната за протокола функционалност. Тези контролни пакети създават допълнително натоварване в комуникационната мрежа и в тази точка е анализирано и сравнено как това оказва влияние върху производителността на самия протокол. Следните контролни пакети *Location update*, *Timeliness backpressure* се използват във всички протоколи, докато *Reliability backpressure* се използва изключително в MMSPEED. Фиг. 3.16 показва, че допълнителното натоварване от контролни пакети се изразява в увеличаване на броя на потоците. Общото количество контролни пакети, генерирани от MMSPEED е по-малко от количеството, генерирано от другите протоколи. Броят на съобщенията за актуализация на местоположението е идентичен, но броят на генерираните *Timeliness backpressure* пакети от MMSPEED протокола е по-малък от тези на другите протоколи. Това е така, защото петдесет процента от трафика изисква висока скорост, докато целият трафик в SPEED се конкурира за висока скорост, което води до

увеличаване на *Backpressure* пакетите. MMSPEED генерира сравнително минимално количество *Reliability backpressure* пакети в сравнение с другите протоколи.



Фиг. 3.16. Контролни пакети спрямо брой възли



Фиг. 3.17. Закъснение спрямо скорост на предаване

3.4.4 Анализ на производителността спрямо закъснение при различна скорост на предаване

На Фиг. 3.17 е показана зависимостта на закъснението от скоростта на предаване за MMSPEED, SPEED и HiLOW протоколи за маршрутизиране в 6LoWPAN среда. Тъй като скоростта на предаване се увеличава, закъснението при предаването намалява, но протоколът за маршрутизиране MMSPEED има най-ниското постигнато закъснение на предаването сред протоколите, симулирани в експеримента.

3.5 Заключение

Настоящият труд представя метод за адаптиране на MMSPEED протокол за маршрутизиране в 6LoWPAN мрежи. Производителността на MMSPEED протокола се сравнява с два други протокола за маршрутизиране, а именно SPEED и HiLoW в NS3 симулатора. Предложени са механизмите и политиката за енкапсулиране на всички MULSPEED съобщения и пакетния формат на IEEE802.15.4 и 6LoWPAN. Производителността е сравнена със SPEED и HiLoW, реализирани в 6LoWPAN мрежа.

Протоколът MMSPEED осигурява възможност за диференциране на услугите и гарантиране на QoS със съответната надеждност в реално време. Предоставена е възможност за избор на различни скорости при обслужване на различни видове трафик, за да може да се осигури обслужване в реално време. Използва се вероятно пренасочване по различни маршрути, оформящо област на надеждност с цел да се контролира броя на маршрутите за доставка на пакети. Показано е отношението надеждност/коэффициента на гарантирано доставяне на разработения протокол в сравнение със SPEED и HiLoW в контекста на 6LoWPAN среда.

Анализирана е производителността на протокола за маршрутизиране MMSPEED в 6LoWPAN среда. Експериментът показва ефективността на MMSPEED протокола за маршрутизиране спрямо протоколите за маршрутизиране SPEED и HiLOW при различни параметри в NS3. MMSPEED има по-добра производителност в 6LoWPAN в сравнение с другите два протокола.

3.6 Приноси към глава 3

Приносите в глава 3 могат да се обобщят, както следва:

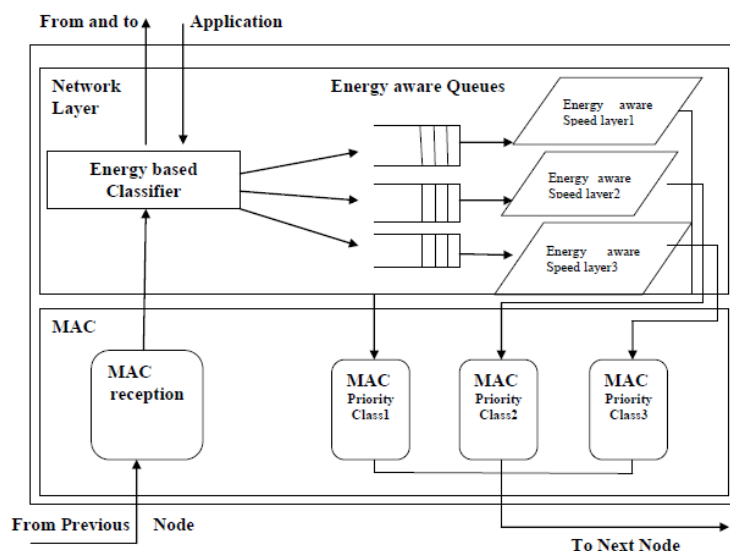
- Разработен е метод за адаптация на MMSPEED протокол за маршрутизиране в 6LoWPAN мрежи.

- Извършен е сравнителен анализ на резултатите от SPEED, MMSPEED и HiLoW, реализирани в 6LoWPAN мрежа по отношение на надеждност, закъснение на предаване, пропускателна способност, както и скорост на предаване, както и влиянието на няколко параметъра върху резултатите за производителността.
- Експерименталните резултати доказват, че прилагането на протокол MMSPEED, адаптиран за 6LoWPAN мрежа, е ефективно по отношение на пропускателна способност и надеждност в сравнение със SPEED и HiLoW. MMSPEED дава по-добра точност и е ефективен по отношение на надеждността в сравнение със SPEED и HiLoW.

ГЛАВА 4. Енергийно ефективни протоколи за маршрутизиране в IoT мрежи с ограничени ресурси

4.2 Енергийно ефективен MMSPEED маршрутизиращ протокол, имплементиран в 6LoWPAN мрежи

Първоначално необходимите данни се обменят между възлите и се изгражда таблицата за маршрутизиране. Използвайки необходимите данни, източникът анализира наличните възли по отношение на скорост, която могат да поддържат и изчислява подходящата мощност на предаване към допустимите възли. При многопътни методи за изпращане, които предоставят различни скорости на източника, протоколът избира оптималния път въз основа на приоритета на пакета. На MAC слоя всеки възможен маршрут представлява опашка с приоритети с различна скорост в зависимост от категорията на трафика. Например, възел с жизненоважна информация за комуникация с централния възел ще избере най-бързата скорост. Ако това се случва често, тогава при всяка заявка за маршрут може да се избира едно и също подмножество от възли за изпращане на пакета, консумирайки енергията на възела много по-бързо от останалите възли в мрежата. По този начин цялата мрежа може да бъде компрометирана. За да се балансира натоварването на мрежата при гореспоменатите условия, целта е да се предложи метод, при който да се изберат възлите въз основа на тяхната остатъчна енергия. Чрез включването на остатъчната енергия в процеса на вземане на решения за маршрутизация, мрежовият трафик се разпределя ефективно в мрежата, по този начин удължавайки нейния живот. Този нов метод подобрява надеждността на мрежата и разпределя натоварването на трафика между сензорите, като същевременно увеличава скоростта на предаване и осигурява необходимата надеждност на пакетите. В адаптираният MMSPEED протокол възлите се категоризират по низходящ ред въз основа на тяхната скорост в съответното направление. Възелът с най-висока скорост към съответното направление може да бъде избран за изпращане на полезна информация. Използвайки предложения протокол, енергийното ниво на приоритетните кандидат-възли се взема предвид при техния избор за участие във следващата фаза, което увеличава средния продължителност на живот на мрежата. Фиг. 4.1 изобразява структурата на протокола, реализирана във всеки сензорен възел, използвайки предложения метод. Ако енергийното ниво на кандидат-възлите е еднакво, те се сортират според честотата на тяхното използване. Поради това се избира най-краткият маршрут до съответното направление, за да се пести енергия.



Фиг. 4.1 Структура на MMSPEED протокола, съобразена с енергията на всеки сензорен възел.

4.2.1. Модел на системата

По време на живота на мрежата [76] мощността на предаване може да се променя за всяко предаване по всяко време. Всеки възел може да изчисли капацитета на приемане и съотношението сигнал/шум (SNR) на получен пакет. Според използваната модулация процентът на битови грешки (BER) може да бъде изчислен от стойността на SNR [77]. Например, в случая на FSK, BER е:

$$BER = \frac{1}{2} e^{-\frac{SNR}{2}} \quad (4.1)$$

Използва се логаритмично-нормален модел с многопътно разпространение за безжичен канал. Загубите по пътя при разпространение на сигнала на разстояние d се изчислява, както следва:

$$PL(d) = PL(\hat{d}) + 10 \gamma 10 \log_{10} \left(\frac{d}{\hat{d}} \right) + X_{\sigma} \quad (4.2)$$

Където \hat{d} представлява референтното разстояние, PL представлява експонентата на загубите по пътя, а X е Гаусова случайна променлива със средна стойност нула и дисперсия 2. Всички променливи се изразяват в dB.

Количеството енергия, необходимо за предаване на пакет с размер f е [78]:

$$E_{tr}(P_{tr}) = \frac{8f}{BW} (P_{cir} + \frac{P_{tr}}{\eta}) \quad (4.3)$$

Където BW е честотната лента на предавателя, P_{cir} е кръговата мощност и η е ефективността на преобразуване на усилвателя.

4.2.2 Управление на изграждането на съседство между възлите

Всеки възел в мрежата изпраща бродкаст Hello съобщения на фиксиран интервал за обмен на необходимите данни. Информацията, която трябва да бъде предадена, се състои от ID, местоположение и средна интерференция на възлите. Когато даден възел получи съобщение за предаване, той изчислява средната стойност на интерференцията. Това се постига като се използва стойността на SNR и силата на получения сигнал. Използва се метод на средната стойност, именно EWMA, за да се изчисли стойността на всяка

итерация. Възлите добавят запис към своята таблица за маршрутизиране и поставят информацията там при получаване на такива данни от друг възел.

4.2.3 Изчисляване на скоростта

Когато даден възел трябва да изпрати пакет до местоназначението си, той трябва да определи скоростта на наличните възли. Съществуват множество слоеве на скоростта и конкретният слой на скоростта се определя въз основа на необходимата скорост на обработка на пакета. След това латентността на възлите се оценява и те предават към основния възел (sink node). Въз основа на тази оценка могат да бъдат идентифицирани възлите, способни да поддържат необходимата скорост.

Предполага се, че има различни предварително зададени SetSPEED стойности за различните слоеве на скоростта. Когато даден възел иска да изпрати пакет, той проверява оставащото време на пакета и въз основа на оставащото време избира слоя с минимална скорост, който отговаря на изискването. На MAC слоя всеки слой на скоростта се имплементира като приоритизирана опашка и категоризиран трафик. Като е определен необходимия слой за скорост, трябва да се провери скоростта на съседните възли. Скоростта за възел j се намира като [78]:

$$Speed_{ij} = \frac{P_{ij}}{delay_{ij}} \quad (4.9)$$

В някои случаи повече от един възел може да удовлетвори изискването за производителност. В такива ситуации трябва да се запазят всички допустими възли, за да се осигури балансиране на натоварването и да се предотврати енергийното изчерпване на възела. Възлите, които отговарят на необходимата скорост за тази цел, формират FN набора от бързи възли. На следващ етап се оценяват изискванията за тяхната надеждност.

4.2.4 Оценка на мощността на предаване

В тази фаза се използва метод за контрол на мощността, за да се отговори на изискванията за формиране на домейн за надеждност. За да се постигне това, всеки възел променя нивото на мощността за предаване, за да се възстанови надеждността на връзката. Надеждността на връзката се измерва чрез стойността на BER, която може да бъде оценена от SNR на канала. Както беше посочено по-горе, възлите изчисляват смущението за получен пакет и, използвайки историята на всички получени пакети, оценяват средното смущение, възникнало по време на Hello комуникацията. Тази информация се предава чрез Hello пакети и възлите я използват за определянето на смущенията, които са налични при техните съседи. По този начин възлите, които трябва да предадат пакет, могат да предвидят SNR на получения пакет и да изчислят нивото на предавателна мощност, при което ще изпратят пакетите.

Когато възел желае да препрати пакет към приемника, той знае с желаното съотношение на приемане на пакети (PRR) на местоназначението. Следователно необходимият PRR за възел с пакети за препращане, ако е избран възел j за следващ хоп, е:

$$pr_r(j) = PRR \frac{1}{|P_{ij}/D_{id}|} \quad (4.10)$$

Съгласно изискването съотношение на приемане на пакети за възел j , може да се изчисли максималният BER, разрешен при предаване ij . Коефициентът на приемане на пакети за пакет с размер f се дава от:

$$pr_r(j) = (1 - P_e(j))^{8f} \quad (4.11)$$

в който $P_e(j)$ е вероятността за битови грешки при предаване на пакета от възел i до j и е равна на стойността на BER. Така че необходимият BER за ij предаването ще бъде:

$$BER(j) = 1 - pr_r(j)^{\frac{1}{8f}} \quad (4.12)$$

Така че имаме:

$$BER(j) = 1 - PRR^{\frac{1}{8f \lceil P_{ij}/D_{id} \rceil}} \quad (4.13)$$

Използвайки необходимия BER за следващия хоп и избраната модулация, може да се изчисли необходимия SNR като се използва дадената формула:

$$SNR(j) = -2 \log \left(2 - 2 PRR^{\frac{1}{8f \lceil P_{ij}/D_{id} \rceil}} \right) \quad (4.14)$$

В приемника SNR се изчислява чрез изваждане на стойността на смущението от интензитета на получения сигнал. Както бе споменато по-рано, възлите са наясно със средната стойност на смущението, възникнала по време на последния интервал на Hello обмен. Следователно необходимата получена енергия може да се изчисли като:

$$P_{rec}(j) = SNR(j) - X(j) \quad (4.15)$$

в която $X(j)$ е средната интерференция във възел j . Имайки необходимия SNR, възлите могат да изчислят необходимата мощност за предаване като:

$$P_{tr}(ij) = P_{rec}(j) + PL(D_{ij}) \quad (4.16)$$

така че имаме:

$$P_{tr}(ij) = -2 \log \left(2 - 2 PRR^{\frac{1}{8f \lceil P_{ij}/D_{id} \rceil}} \right) - X(j) + PL(d) + 10 \gamma \log_{10} \left(\frac{D_{ij}}{d^\alpha} \right) + X\sigma \quad (4.17)$$

Трябва да се отбележи, че горната формула се прилага само когато се използва FSK като модулация. Оценката на мощността на предаване се извършва за всички допустими възли в комплекта FN, които могат да поддържат необходимата скорост. В тази фаза възлите се елиминират от този набор, ако тяхната необходима мощност за предаване надвишава максималното ниво на мощност на предаване, разрешено от предавателя. След това останалите възли се оценяват въз основа на енергийни показатели, за да се определи следващата стъпка.

4.2.5 Политика за препращане

Следващата стъпка се избира въз основа на енергията, необходима за предаване и оставащата енергия на препращащите възли, ако е налице списък с всички възли, които могат да поддържат необходимата скорост и тяхната съответна мощност на предаване. За да се постигне това, на възлите се присвоява резултат въз основа на двата енергийни показателя и вероятността за избор на следващ хоп се определя въз основа на този резултат. Необходимата енергия за предаване се определя на базата на специфичното за възела ниво на предавателна мощност, а останалата енергия се предава от Hello пакетите. Следователно стойността на резултата на всеки възел е:

$$Sc(j) = \omega \cdot Norm \left(\frac{P_{ij}}{E_{tr}(ij)} \right) + \varpi \cdot Norm (E_{res}(j)) \quad (4.18)$$

Където ω и ϖ могат да се коригират според мрежовите изисквания. Отношението $P_{ij}/E_{tr}(ij)$

показва намаляването на енергията, постигнато в процеса на предаване на пакетите от i до j . Нормализираните стойности могат да се изчислят като:

$$Norm \left(\frac{P_{ij}}{E_{tr}(ij)} \right) = \frac{\frac{P_{ij}}{E_{tr}(ij)}}{\sum_{k \in FN} \frac{P_{ik}}{E_{tr}(ik)}} \quad (4.19)$$

$$Norm \left(E_{res}(j) \right) = \frac{E_{res}(j)}{\sum_{k \in FN} E_{res}(k)} \quad (4.20)$$

Вероятността за избор на конкретен възел се определя чрез разделяне на резултата на възела на сумата от резултатите на всички допустими възли. Като се вземе предвид както консумираната енергия, така и оставащата енергия на възлите, се постига енергийно ефективно предаване и се предотвратява изчерпването на енергията за единичен възел или възли по дадено направление.

4.3 Експериментални резултати от EMMSPEED протокол

Производителността на предложения протокол, който по-нататък ще бъде наричан накратко 6LoWPAN EMMSPEED, се оценява и сравнява с тази на протокола 6LoWPAN SPEED, протокола 6LoWPAN MMSPEED и протокола 6LoWPAN HiLoW. В NS3 всеки протокол за маршрутизиране има своя собствена реализация [79]. Параметрите на началната симулация са изброени в Табл. 4.1.

ТАБЛИЦА 4.1. ПЪРВОНАЧАЛНИ ПАРАМЕТРИ НА СИМУЛАЦИЯ ЗА ПРОТОКОЛА EMMSPEED.

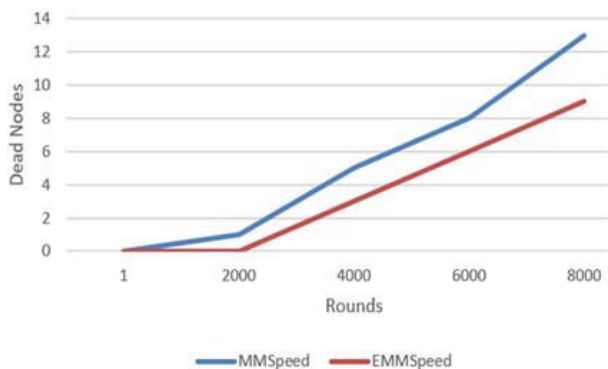
Channel	Wireless Channel
Modulation type	QPSK
MAC Type	802.15.4
Simulation area	100 x 100 m
Simulation time	20 Minutes
Queue length	50 packets
Number of Nodes	100
Model	Two way Ground Propagation
Deployment Type	Uniform
Packet Size	500 KB (Changing)
Data rate	100 Kb/s
Initial Energy	10 Joule
Idle Power	7,12E-04 Watt
Sleep Power	1,44E-07 Watt

4.3.1 Консумация на енергия

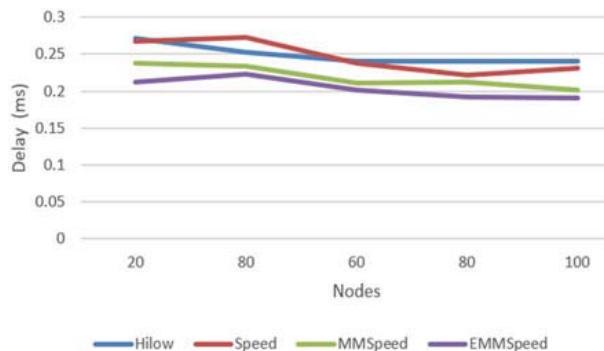
Както може да се види на Фиг. 4.3, сензорните възли, които участват в MMSPEED протокола, започват да губят своята енергия след 100 итерации (броя на решенията за маршрутизиране), но възлите, които участват в EMMSPEED протокола, започват да губят енергията си след 2000 итерации. Протоколът EMMSPEED няма нито един отпаднал възел (възел с изразходвана енергия) след 2000 итерации, докато протоколът MMSPEED има един отпаднал възел. В протокола MMSPEED възлите започват да губят енергия още в ранния етап на експлоатация на мрежата, докато в протокола EMMSPEED възлите започват да губят енергия в по-късен етап.

4.3.2. Закъснение

Резултатите от симулацията, които са представени на Фигу. 4.4, демонстрират, че протоколът EMMSPEED има латентност, която е малко по-ниска от тази на другите протоколи, които бяха изследвани. Това е така, защото в сравнение с други протоколи, EMMSPEED гарантира, че пакетите с данни се доставят за по-кратко време. Това помага да се гарантира, че трафичният товар върху мрежата се разпределя справедливо.



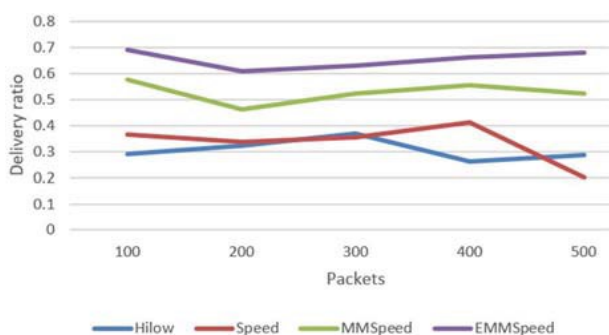
Фиг. 4.3. Брой отпаднали възли.



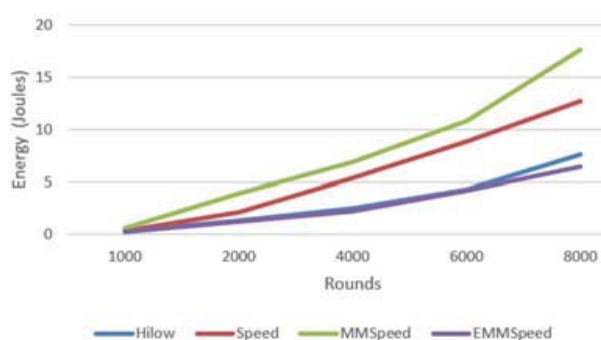
Фиг. 4.4 Закъснение

4.3.3 Надеждност и енергия

От Фиг. 4.5 става ясно, че коефициентът на гарантирано доставяне на пакетите за протокола EMMSPEED е по-висок от този на другите протоколи. В протокола MMSPEED, когато пакет с по-висок приоритет се генерира от възел, той се препраща през слой с по-висока скорост. При това е възможно пакетът да бъде отхвърлен в даден момент, защото няма да намери пътя за препращане поради загуба на енергия на възлите. В същия сценарий протоколът EMMSPEED избира следващия хоп, който да използва, въз основа на енергийното ниво на възела, за да осигури доставката на пакета до предвиденото му местоположение. Както може да се види на Фиг. 4.6, протоколът EMMSPEED има по-ниска обща консумация на енергия в сравнение с други подобни протоколи поради факта, че той проверява нивото на енергия на следващия хоп, преди да реши дали да го използва или не като възможен маршрут, който да поеме при предаване на пакета до крайното му местоположение. Това е така, защото се изчисля потенциалната енергия на следващия хоп. В сравнение с EMMSPEED, енергийните изисквания на другите протоколи, които могат да варират в зависимост от конкретните маршрути, които се използват могат да бъдат значително по-високи.



Фиг. 4.5 Надеждност (Фиксиран прозорец)

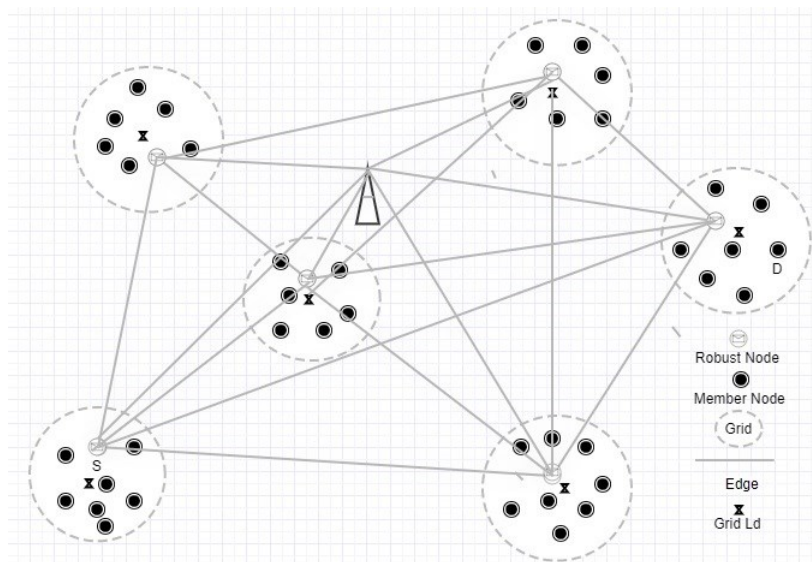


Фиг. 4.6 Енергия

4.4 Mobile Aware EMMSPEED протокол за маршрутизиране, имплементиран в 6LoWPAN среда

4.4.2 Принцип на работа на протокола за маршрутизиране Mobile Aware EMMSPEED

Протоколът се основава на маршрутизиращия протокол 6LoWPAN MM-SPEED, предложен в [84]. Фиг. 4.9 изобразява физическата топология на предложения алгоритъм. Всеки възел обявява присъствието си с периодично съобщение, съдържащо неговия глобален идентификатор на възел, географско местоположение и прогнозна латентност. 6LoWPAN мрежата се формира динамично като избира стабилен следващ възел. Тази операция се извършва последователно в цялата мрежа. Всеки *Robust* възел в мрежата може да комуникира директно с всички други *Robust* възли в близост. Всеки *Robust* възел, способен да изчислява мощността от край до край между *Robust* възлите, поддържа таблицата с мощността на възела. В представения мрежов сценарий изходният възел S трябва да се свърже с целевия възел D. Възелът S е информиран за мрежата Ld и устойчивия възел Ltd, в които се намира целевият възел D. S определя пътя с най-малко количество необходима мощност между S и Ltd. Маршрутът се определя въз основа на минималната необходима мощност. Възлите с по-малка мощност от необходимата мощност за предаване се премахват от списъка с маршрути, докато възлите с по-голяма мощност се добавят.



Фиг. 4.9. Географска топология на мрежата

В [84] 6LoWPAN MM-SPEED протоколът, който взема под внимание изразходената енергия е подобрен като е въведена и функцията за мобилност. Новият протокол за маршрутизиране при наличие на мобилност на сензорните възли, означен съкратено като 6LoWPAN EMMSPEED, се основава на следните стъпки:

Стъпка 1: Инициализация: (Този процес се случва първоначално във всеки възел) Броудкаст изпращане на *Beacon* съобщение (ID на съсед , глобален идентификатор на възел, географско местоположение и оценка на закъснението).

Стъпка 2: Ако има претоварване в следващия възел: Се изпраща съобщение обратно и се прави запитване към съседите за ново изпращане на информация за закъснение и глобален идентификатор на наличен възел до местоназначението (може да бъде ∞ за възли, които не могат да бъдат достигнати).

Стъпка 3: Всеки *Robust* възел комуникира с други *Robust* възли в

*if(Robot node departs the grid),
begins the Robot node Election procedure*

Стъпка 4: Еластичният възел изчислява таблицата на мощността и всеки устойчив възел оценява и периодично актуализира закъснението за дадения възел.

Стъпка 5: Изходният възел S се свързва с целевия възел D.

*If (Robust node S needs to connect to destination D),
then Robust node S will access D's grid Ld and Robust node Ltd.*

Стъпка 6: S определя минималното количество енергия между S и Ltd. Открива маршрут, изискващ най-малко количество енергия:

*If (Minimal Power > Needed power),
Route not established*

За всяка заявка за възел източникът генерира уникален идентификатор. Междинният възел получава пакет за актуализация на маршрута и актуализира t_power :

*($t_power = t_power + incoming\ link + self\ power$).
If ($t_power > max_power$)
join route list and transmit the required packet to neighbors,
else
drop the needed packet.*

Стъпка 7: Сравнява се минималната мощност между S и Ltd

*If (minimum power between S and Ltd < maximum power)
S alert Ltd to find a path to D.
 $t_power = t_power + the\ power\ between\ Ltd\ and\ D.$
If ($t_power < max_power$)
Route discovered and Ltd sends an ACK (acknowledgment) packet in the
opposite direction to S, and every node updates its node power.*

Стъпка 8: Във втория възможен сценарий за изходния възел S.

*If (S is not Robust node)
Node S floods the packet in the grid to establish a route to the Robust node;
upon receiving this packet, a node updates its power.
If ($t_power < max_power$)
The node adds itself to the route list and forwards the packet to its neighbor
nodes.
else
Packet will be dropped.
The first packet is received by the robust node, which then updates its
 t_power and compares it to its maximum power.
If ($t_power < max_power$)
Determine the minimal power between this node and the robust node closest
to the target. The remainder of the procedure remains unchanged.*

Стъпка 9: Мощността и местоположението на стабилните възли се актуализират периодично и се разпространяват до всички други стабилни възли.

Стъпка 10: *Data packet съобщение:* Тъй като следващият хоп се определя на ниво възел, не е необходимо да се конструира целия маршрут до дестинацията. Този набор трябва да съдържа PacketType, GlobalNodeID, Destination area и TTL. GPS може да определи географската дължина на местоположението. Той може да предава *Beacon* съобщения, използвайки IPv6 RA.

Псевдо код за избор на Robust Sensor възел

```
For each valid path  $P_i$ ,
  For every node  $n_k$  in  $P_i$ 
     $t\_power = t\_power + power(nL, n_k) + power(n_k)$ 
    If  $t\_power \geq max\_power$ , delete this path, break.
    If  $t\_power \geq min\_power$ , delete this path, break.
    If  $n_k$  is the destination  $D$ , and  $t\_power < min\_power$ ,  $min\_power = t\_power$ ;
     $best\_path = P_i + \{n_k\}$ ;
    Else add node  $n_k$  to the end of the path,
  End For
End For
```

4.4.3. Избор на Robust възел

Първоначално във всяка мрежа се избира един *Robust* възел. Необходим е механизъм за генериране на нови *Robust* възли, тъй като стабилните възли също са мобилни, когато *Robust* (*стабилен*) възел напусне текущата си мрежа или по някаква друга причина, в мрежата няма повече стабилни възли. Ако има допълнителни стабилни възли в текущата мрежа, следващият възел с най-ниска претеглена стойност ще бъде избран като нов стабилен възел за мрежата. В предложения алгоритъм за маршрутизиране трябва да се определи пътя с минимално закъснение между два стабилни възела, като се изчисли минималното закъснение между тях. Този протокол за маршрутизиране намалява консумацията на енергия и закъснението в мрежата. Той също така подобрява съотношението на коефициента на гарантирано доставяне на пакети както е илюстрирано в експерименталните резултати.

4.5 Експериментални резултати от стационарен и мобилен протокол за маршрутизиране EMMSPEED

Симулациите на предложия протокол за маршрутизиране 6LoWPAN EMMSPEED (с поддържане на мобилност) се извършват в NS3. Направена е оценка на ефективността на предложия протокол в сравнение с други маршрутизиращи протоколи и по специално с EMMSPEED, който е проектиран за стационарни сензорни възли в [84].

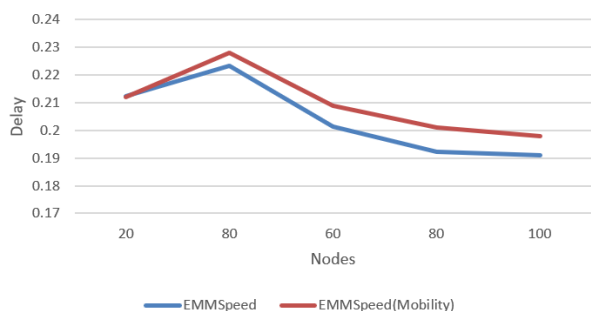
4.5.1 Закъснение

Терминът "закъснение при предаване" се отнася до времето, което изтича между получаването на пакета и изпращането му. Милисекундите се използват като мерна единица, а стойността на закъснението при EMMSPEED протокола се използва за определяне на качеството на предаване, което се сравнява тук както за фиксирани, така и за мобилни сензори. Фиг. 4.10 представя сравнение между закъснението при фиксирани и мобилни възли, когато се използва протокол за маршрутизиране EMMSPEED. Може да се обобщи, че поведението на предложия метод демонстрира по-добро поведение от това на съществуващите до момента други протоколи за маршрутизиране. Ясно е, че разликата не е голяма, тъй като мрежите са сравнително малки, но за по-големи мрежи предимството ще бъде значително по-голямо.

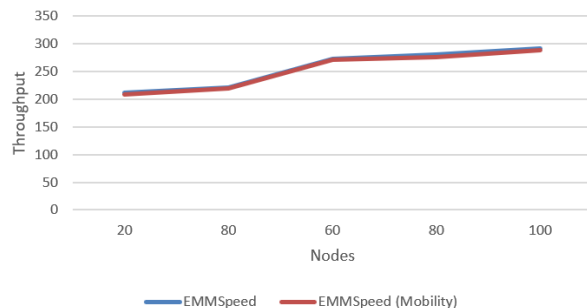
4.5.2. Пропускателна способност

Фиг. 4.11 изобразява сравнение на пропускателната способност на предложеното маршрутизиране, съобразено с мощността (EMMSPEED (мобилен)) с пропускателната

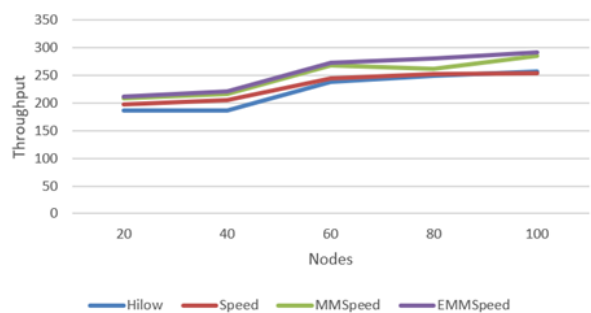
способност на алгоритъма EMMSPEED (стационарен). Пропускателната способност с отчитане на мощността е идентична с пропускателната способност на EMMSPEED. Няма разлика в производителността на протокола при добавяне на мобилността в EMMSPEED, което демонстрира много ясно, че пропускателната способност не се влияе от факта, че сензорните възли са мобилни. В същото време обаче пропускателната способност е по-голяма от тези на другите протоколи, които бяха изследвани, както е показано на Фиг. 4.12.



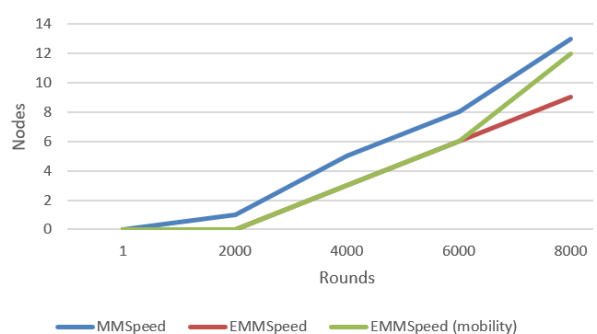
Фиг. 4.10. Закъснение



Фиг. 4.11. Пропускателна способност



Фиг. 4.12. Пропускателната способност при стационарни възли



Фиг. 4.13. Отпаднали (dead) възли

4.5.3 Отпаднали възли

В мрежа с ограничени ресурси работоспособността на сензорните възли зависи от батерията, с която разполагат. В тези видове мрежи енергоспестяващите алгоритми се използват, за да може животът на мрежата да се увеличи максимално при наличния енергиен капацитет. Фиг. 4.13 илюстрира производителността на предложения адаптиран протокол, който демонстрира, че броят на отпадналите възли, поради изразходваната им енергия, е по-малък от този на протокола MMSPEED и равен на този на протокола EMMSPEED при 6000 итерации. След този момент броят на отпадналите възли започна да се увеличава поради естеството на мобилността на възлите, но производителността все още е по-добра от тази на протокола MMSPEED.

4.6 Заключение

Предложен е протокол за маршрутизиране за 6LoWPAN мрежи, който е едновременно надежден и ефективен по отношение на използването на енергията на възела. Методът, който е предложен, управлява процеса на маршрутизация в зависимост от количеството енергия, което все още е налично във всеки възел. Когато се използва тази стратегия, надеждността на мрежата е подобрена и общата продължителност на живот се удължава в резултат на тези подобрения. Резултатите от симулацията показват, че се постига евективно разпределение на натоварването на трафика във възлите на мрежата, както и че

се увеличава средната продължителност на живот на възлите, като същевременно подобрява функционалността на мрежата. В резултат на това се подобрява и надеждността на протокола. Анализирани са поведението на протоколът за маршрутизиране, който отчита наличната мощност във възела за Ad-hoc 6LoWPAN мрежи. Когато мобилният възел излезе извън обхвата на съседните възли в мрежата, с помощта на съхранената в паметта на сензора информация, той изгражда мрежа, която е съобразена с мощността на вече новите му съседни възли. Животът на 6LoWPAN мрежата се удължава чрез използване на подход за маршрутизация, който отчита използваната енергия. Резултатите от симулацията показват, че такъв подход не само удължава продължителността на живот на мрежата, но и повишава надеждността на мрежата.

4.7 Приноси към глава 4

Приносите към глава 4 могат да се обобщят, както следва:

- Предложен е протокол за маршрутизиране, съобразен с мощността за Ad-hoc 6LoWPAN мрежа, базиран на алгоритъма MMSPEED.
- Направена е експериментална оценка на производителността на предложените алгоритми за енергийно ефективен и надежден протокол за маршрутизиране на базата на MMSPEED за 6LoWPAN мрежата.
- Направен е сравнителен анализ на резултатите от MMSPEED, EMMSPEED и EMMSPED (мобилност) по отношение на закъснение, пропускателна способност и отпаднали възли, както и влиянието на няколко параметъра върху резултатите за производителността.
- Експерименталните резултати доказват теоретичните твърдения, че EMMSPED (мобилност) е по-ефективен по отношение на закъснение и пропускателна способност в сравнение с MMSPEED и EMMSPEED.

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Темата на този дисертационен труд е свързана с анализ и разработване на протоколи за маршрутизиране в мрежи с ограничени ресурси. Мрежите с ограничени ресурси имат много предизвикателства за прилагане на протоколи за маршрутизиране за целите на комуникацията. Тези предизвикателства трябва да бъдат взети предвид и протоколите трябва да бъдат адаптирани според мрежите с ограничени ресурси. Разработени са различни протоколи и техники, които осигуряват енергийна ефективност и също така подобряват производителността на протоколите.

Приносите на дисертационния труд могат да се обобщят, както следва:

1. Представен е сравнителен анализ на различните протоколи в различни форми. В резултат на проучването на състоянието на проблема са идентифицирани основните предизвикателства в алгоритмите за маршрутизиране и са формулирани целите на дисертационния труд.
2. За постигане на поставените цели на дисертационния труд в глава 1 е необходимо задълбочено сравнително изследване и анализ. В този контекст се извършва сравнително проучване и анализ на различни протоколи за маршрутизиране, предназначени за

6LoWPAN мрежи. Въз основа на това е определено, че маршрутизиращите протоколите, предназначени за 6LoWPAN мрежи, могат да бъдат внедрени в мрежи с ограничени ресурси.

3. Разработен е метод за адаптиране на MMSPEED маршрутизиращ протокол за 6LoWPAN мрежи. Извършен е сравнителен анализ на резултатите от SPEED, MMSPEED и HiLoW, имплементирани в 6LoWPAN мрежа по отношение на надеждност, закъснение, пропускателна способност и скорост на предаване, както и влиянието на няколко параметъра върху резултатите, свързани с производителността. Експерименталните резултати доказват, че адаптирането на MMSPEED протокола в 6LoWPAN мрежата е ефективно по отношение на пропускателна способност и надеждност в сравнение със SPEED и HiLoW. MMSPEED дава по-добра точност и е ефективен по отношение на надеждността в сравнение със SPEED и HiLoW.

4. Направена е експериментална оценка на производителността на предложените алгоритми за енергийно ефективен и надежден протокол за маршрутизиране на базата на MMSPEED за 6LoWPAN мрежи. Направен е сравнителен анализ на резултатите от MMSPEED, EMMSPEED и EMMSPEED (с поддържане на мобилност) по отношение на закъснение, пропускателна способност и отпаднали възли, както и влиянието на няколко параметъра върху резултатите, свързани с производителността. Експерименталните резултати доказват теоретичните твърдения, че EMMSPEED (с поддържане на мобилност) е ефективен по отношение на закъснение и пропускателна способност в сравнение с MMSPEED и EMMSPEED.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A1] **R. Beniwal**, Security Issues for Internet of Things - State of Art, International Journal of Wireless Communications and Networking Technologies (IJWCNT), Vol. 6, No.4, pp. 35-41, June - July 2017. ISSN 2319 – 6629.
- [A2] **R. Beniwal**, K. Nikolova, and G. Iliev, A Comparative Study of Routing Protocols for 6LoWPAN, in Proceedings of 53rd International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST'2018), Sozopol, Bulgaria, pp. 171-174, June 28 – 30, 2018. ISSN: 2603-3267(online).
- [A3] **R. Beniwal**, K. Nikolova, and G. Iliev, MM-SPEED: Multipath Multi-SPEED Routing Protocol in 6LoWPAN Networks, in Proceedings of 7th Balkan Conference on Lighting (BalkanLight'2018), Varna, Bulgaria, pp. 1-4, Sept. 20 – 22, 2018. DOI: 10.1109/BalkanLight.2018.8546963; indexed: **Scopus**.
- [A4] **R. Beniwal**, K. Nikolova, and G. Iliev, Performance Analysis of MM-SPEED Routing Protocol Implemented in 6LoWPAN Environment, in Proceedings of 7th IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom'2019), Sochi, Russia, pp. 1-4, 3-6 June, 2019. DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2019.8812809; indexed: **Scopus**.
- [A5] **R. Beniwal**, K. Nikolova, and G. Iliev, Energy Efficient Routing Protocols in Resource Constrained IoT Networks, in Proceedings of 27th National Conference with International Participation: The Ways to Connect the Future (Telecom'2019), Sofia, Bulgaria, pp. 31-34, 30-31 Oct, 2019. DOI: 10.1109/TELECOM48729.2019.8994889; indexed: **Scopus**.
- [A6] **R. Beniwal**, K. Nikolova, and G. Iliev, Power Conscious Routing Protocol for Ad-hoc 6LoWPAN Networks, in Proceedings of 29th National Conference with International Participation (Telecom'2021), Sofia, Bulgaria, pp. 61-64, 28-29 Oct., 2021. DOI: 10.1109/TELECOM53156.2021.9659570; indexed: **Scopus**.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS
DEPARTMENT OF “COMMUNICATION NETWORKS”

Ravinder Beniwal

Investigation of Algorithms and Protocols in Resource Constrained Networks

ABSTRACT of Ph.D THESIS

The title of this thesis is related to analysis of routing protocols in resource constrained networks. Resource constrained networks have many challenges to implement routing protocols for communication purposes. These challenges have to be taken care of and protocols has to be adapted according to the resource constrained networks. Various protocols and techniques are developed which provide energy efficiency and enhanced the performance of the protocols.

The thesis consists of 4 chapters, 77 figures, 12 tables and 34 mathematical expressions. The number of references is 85 literary sources have been used, all of them in Latin, 60% of which have been in the last ten years. The analysis, proposed methods and results are presented through 6 author publications, 1 of which is in an international scientific journal and 3 are presented at international conferences and 2 are presented in national conferences. Chapter 1 provides a comparative study of the different protocols that are provided in different forms. As a result of the state of art analysis, the major challenges in the routing algorithms are identified. Chapter 2 provides a comparative study and analysis of various routing protocols designed for 6LoWPAN networks and it was determined that routing protocol designed for 6LoWPAN networks could be implemented in resource constrained networks. Chapter 3 presents the adaptation of the MMSPEED routing protocol in 6LoWPAN networks and chapter 4 purposes algorithms for an energy efficient and reliable routing protocol on the MMSPEED (mobility) basis for the 6LoWPAN network.

The major contributions of the thesis are listed below. 1) A comparative study of the different protocols is provided in different forms. 2) A comparative study and analysis of various routing protocols determines that routing protocol designed for 6LoWPAN networks could be implemented in resource constrained networks. 3) The adaption of the MMSPEED routing protocol in 6LoWPAN networks has been made and comparison of the results of SPEED, MMSPEED and HiLoW implemented with 6LoWPAN network in terms of reliability, transmission delay, throughput as well as transmission rate is evaluated. 4) An energy efficient and reliable routing protocol on the MMSPEED basis for the 6LoWPAN network is designed and experimental evaluation of the performance of proposed algorithms done. 5) A power conscious 6LoWPAN EMMSPEED (mobility) protocol is proposed, and comparison is done with the results of MMSPEED, EMMSPEED and in terms of delay, throughput and dead nodes are evaluated.