VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MOLEKULÁRNÍ KOMUNIKACE V NANO-SÍTÍCH S VYUŽITÍM DIFÚZNÍHO PROCESU

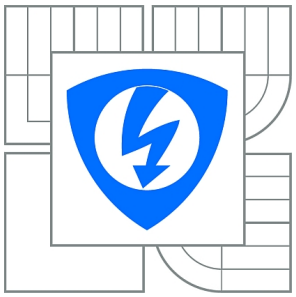
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE LUKÁŠ KUPKA
AUTHOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MOLEKULÁRNÍ KOMUNIKACE V NANO-SÍTÍCH S VYUŽITÍM DIFÚZNÍHO PROCESU

MOLECULAR COMMUNICATION IN NANO-NETWORKS UTILIZING DIFFUSION PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

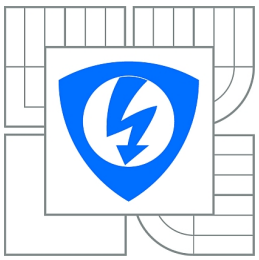
AUTOR PRÁCE — LUKÁŠ KUPKA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JIŘÍ HOŠEK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student:	Lukáš Kupka	***ID:***	154784
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Molekulární komunikace v nano-sítích s využitím difúzního procesu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci bakalářské práce se bude nutné seznámit s obecnou charakteristikou nano-komunikací a také se specifickými vlastnostmi nano-sítí a jejich jednotlivých uzlů. Teoretická část práce bude zaměřena na detailní popis principu molekulární komunikace s využitím difusního procesu, který umožňuje vzájemnou komunikaci mezi jednotlivými nano-zařízeními. Praktická část práce bude provedena nejprve v simulátoru molekulární komunikace N3Sim. Na základně získaných výsledků ze simulací provedených v N3Sim bude v síťovém simulátoru NS-3 vytvořen model nano-sítě se shodnými parametry. Výstup praktické části bude reprezentován porovnáním výsledků z obou použitých simulátorů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NAKANO, T.: Molecular Communication. London: Cambridge University Press, 2013, ISBN: 978-1107023086.
[2] PRASAD, N., PRASAD, A.: 802.11 WLANs and IP Networking: Security, QoS, and Mobility. London: Artech House Publishers, 2005, ISBN: 1580537898.

Termín zadání:	9.2.2015	***Termín odevzdání:***	2.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Hošek, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská se zaměřuje na teoretický popis molekulární komunikace v nanosítích s využítím difúzního procesu, popis simulátoru N3Sim a sestavení modelu nanokomunikace v tomto simulátoru. Druhá část práce se zabývá molekulární komunikací s využitím elektromagnetických pulzů. Zde se využívá simulátoru NS-3 a modulu Nano-Sim. Praktická část obsahuje detailní rozbor nastavení obou simulátorů a výsledků simulací. Simulace jsou prováděny s různým nastavením a v několika scénářích. Jejich porovnání a výsledky v grafech se nacházejí v záveřečné části bakalářské práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nanokomunikace, nanosíť, nanostroje, molekulární komunikace, nanočástice, N3Sim, difuze, difúzní šíření, WNSN, nanosenzor

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on theoretical desription of diffusion-based molecular communication in nanonetworks, description of simulation framework N3Sim and building a model of nanocommunication in this simulator. Second part of thesis is focused on molecular communication based on electromagnetic waves. In this case simulator NS-3 and Nano-Sim module has been used. Practical part contains detail analysis of simulators adjustment and results of simulations. Simulations are performed with different settings in several scenarios. Their comparison and results is summarized in conclusion.

KEYWORDS

Nanocommunication, nanonetwork, nanomahine, molecular communication, nanoparticle, N3Sim, diffusion, diffusion-based, WNSN, nanosensor

KUPKA, Lukáš *Molekulární komunikace v nano-sítích s využitím difúzního procesu*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 57 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Molekulární komunikace v nano-sítích s využitím difúzního procesu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Hoškovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále také musím poděkovat za rady, připomínky a pomoc panu Ing. Pavlu Maškovi.

Brno ....

(podpis autora)

Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic

http://www.six.feec.vutbr.cz

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno ....

(podpis autora)

EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

OBSAH

Úvod **11**

1 Molekulární komunikace **12**
1.1 Přirodou inspirované nanostroje . . . 13
1.1.1 Difusní šíření . . . 14
1.2 Možnosti využití . . . 15
1.2.1 Biomedicínské aplikace . . . 15
1.2.2 Průmysl a spotřební zboží . . . 15
1.2.3 Vojenství . . . 15
1.2.4 Životní prostředí . . . 16

2 Dostupné simulátory molekulární komunikace **17**
2.1 N3Sim . . . 17
2.1.1 Parametry simulace . . . 18
2.1.2 Parametry prostředí . . . 18
2.1.3 Parametry vysílače . . . 19
2.1.4 Parametry přijímače . . . 20
2.2 NS-3 . . . 21
2.2.1 Modul Nano-Sim . . . 21
2.2.2 Průběh simulací v Nano-sim . . . 26

3 Simulační scénáře **27**
3.1 Nastavení parametrů simulátoru . . . 28
3.1.1 Parametry simulace . . . 28
3.1.2 Parametry prostředí . . . 28
3.1.3 Parametry vysílače . . . 28
3.1.4 Parametry přijímače . . . 29
3.2 Výsledky simulací ze simulátoru N3Sim . . . 29
3.2.1 Proměnný počet vyslaných částic . . . 30
3.2.2 Proměnná vzdálenost přijímače a vysílače . . . 32
3.2.3 Proměnná délka trvání simulace . . . 34
3.2.4 Proměnný počet vyslaných částic – aktivní kolize . . . 35
3.2.5 Proměnná vzdálenost přijímače a vysílače – aktivní kolize . . . 37
3.2.6 Proměnná délka trvání simulace – aktivní kolize . . . 38
3.2.7 Porovnání výsledků scénářů s kolizí a bez kolize částic . . . 41
3.3 Výsledky ze simulátoru NS-3 . . . 43
3.3.1 Závislost simulačního času na počtu vysílačů . . . 43

3.3.2 Závislost ztrátovosti paketů na počtu směrovačů 46
3.3.3 Závislost zpoždění paketů na vzdálenosti vysílače a přijímače . 49

4 Závěr **52**

Literatura **54**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **56**

5 Přílohy **57**

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Porovnání velikosti různých objektů [6] 12
1.2 Komunikační model [1] 14
2.1 Blokový diagram simulátoru N3Sim [9] 17
2.2 Síťová architektura modelu nano-sim [14] 21
2.3 Model nano-sítě propojené se počítačem [14] 24
3.1 Model difusního šíření – částice se postupně rozptylují z prostředí o vyšší koncentraci do prostředí s nižší koncentrací [10] 27
3.2 Grafické znázornění polohy přijímače a vysílače 30
3.3 Závislost počtu přijatých částic na počtu vyslaných 32
3.4 Závislost počtu přijatých částic na vzdálenosti přijímače a vysílače . . 34
3.5 Závislost počtu přijatých částic na délce trvání simulace 35
3.6 Závislost počtu přijatých částic na počtu vyslaných částic – aktivní kolize 37
3.7 Závislost počtu přijatých částic na vzdálenosti přijímače a vysílače . . 39
3.8 Závislost počtu přijatých částic na délce trvání simulace 40
3.9 Srovnání scénářů s proměnným počtem vyslaných částic 41
3.10 Srovnání scénářů s proměnnou vzdáleností přijímače a vysílače 42
3.11 Srovnání scénářů s proměnnou délkou simulace 42
3.12 Závislost délky simulace na počtu vysílačů 45
3.13 Závislost ztrátovosti paketů na počtu směrovačů 48
3.14 Závislost ztrátovosti paketů na počtu směrovačů 50

SEZNAM TABULEK

3.1 Přehled proměnných parametrů v jednotlivých scénářích 30
3.2 Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 50\,\mu s$ a $d = 300\,\mathrm{n}m$. 31
3.3 Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 10\,\mathrm{ms}$ a $a = 5000$. . . 33
3.4 Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 1\,\mathrm{mm}$ a $a = 5000$. . . 35
3.5 Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 50\,\mu\mathrm{s}$ a $d = 300\,\mathrm{nm}$ a *activeCollision=true*. 36
3.6 Časy přijetí první částice. 37
3.7 Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 10\,\mathrm{ms}$, $a = 5000$ a aktivní kolizí. 38
3.8 Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 1\,\mathrm{mm}$, $a = 5000$ a aktivní kolizí. 39
3.9 Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\mathrm{cm}$, $n_R = 15$ a Transparent MAC. 44
3.10 Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\mathrm{cm}$, $n_R = 15$ a Smart MAC. 44
3.11 Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\mathrm{cm}$, $n_V = 50$ a Transparent MAC. 46
3.12 Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\mathrm{cm}$, $n_V = 50$ a Smart MAC. 47
3.13 Výsledky simulací s konstantními parametry $n_V = 10$ a Smart MAC. 49
3.14 Výsledky simulací s konstantními parametry $n_V = 50$ a Smart MAC. 49
3.15 Výsledky simulací s konstantními parametry $n_V = 500$ a Smart MAC. 50

ÚVOD

Obor molekulárních komunikací je nový druh komunikace, který využívá molekuly k přenosu informace mezi velice malými zařízeními o velikosti v řádech nanometrů. Komunikační systém, prostřednictvím kterého tyto nanostroje komunikují, se nazývá nanosíť.

Jedná se o relativně nový obor, který není ani zdaleka probádaný a nabízí široké možnosti využití. Síťové technologie, jak jsou známy dnes, totiž nabízí možnosti, jejichž realizace je možná pouze v místech, kde nám to prostor dovolí. Pomocí oboru nanosítí lze ovládnout jednotlivé buňky a přínos, který by tato technologie umožňovala, je velmi široký. Zejména ve zdravotnictví by mohlo díky nanotechnologií dojít k výraznému pokroku. Možnosti realizace jsou důkladněji rozebrány v kapitole 1.2.

Tato práce se zabývá molekulární komunikací v nanosítích s využitím difuzního procesu a také pomocí elektro-magnetických pulzů. Oba princip nevyžadují žádné větší úpravy přenosové prostředí a snaží se co nejvíce využít přirozených jevů. V úvodní kapitole 1 jsou rozebrány samotné principy tohoto druhu komunikace a pozornost je zaměřena na teoretický rozbor celé problematiky.

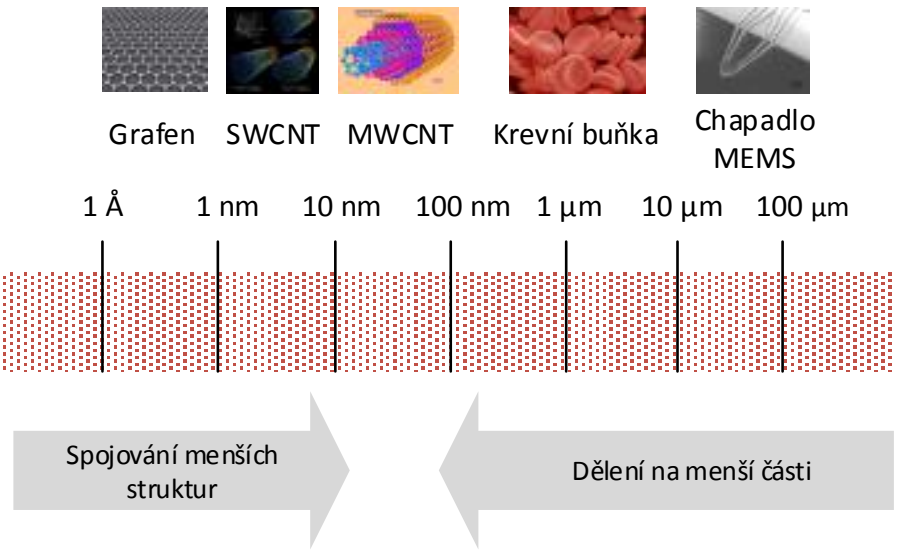
K dispozici bohužel nejsou prostředky pro praktické ověření teoretických faktů a bylo potřeba přistoupit k počítačovým simulátorům. V případě difuzního šíření bylo pracováno se simulátorem N3Sim a pro simulaci komunikace založené na principech elektro-magnetického vlnění byl využit simulátor NS-3.

Jejich bližší popis je také zahrnut do osnov práce 2. Pomocí teoretických znalostí bylo možno vytvořit několik simulačních scénářů, které poslouží k ověření faktů a lepšímu pochopení celého oboru. Výsledky jednotlivých scénářů, jejich interpretace a srovnání s předpoklady se nacházejí v praktické části práce 3.

1 MOLEKULÁRNÍ KOMUNIKACE

Postupem času člověk pronikal do složení předmětů a věcí kolem nás čím dál podrobněji a vždy se věda posunula do větší hloubky. Moderní technika umožňuje analyzovat strukturu hmoty až na základní části jako jsou atomy. Sloučením těchto elementárních částic vznikne molekula, která se rozměrově pohybuje v řádech nanometrů. Toto relativně nové téma je pro člověka stále velkou neznámou. Jedná se totiž o prvky tak malé, že je lidské oko není schopno rozeznat a uchopení celého oboru je tak náročnější.

Současné telekomunikační sítě jsou tvořeny objekty o mnohonásobně větších rozměrech a práce i pokusy s nimi jsou tak mnohem snadnější. Místo elektromagnetických signálů se v případě nanosítí pro přenos informace používají molekuly. Transport molekul je ale pro člověka podstatně méně probádané téma, než elektrické signály. Transportní molekuly budou zajišťovat komunikaci mezi biologickými nanostroji. Nano-stroje jsou zařízení skládající se z uspořádaného množství molekul a jsou schopny provádět jednoduché výpočty, snímaní nebo ovládací úkoly [1], [3].



Obr. 1.1: Porovnání velikosti různých objektů [6]

Aby bylo možné realizovat nejrůznější úlohy, je potřeba docílit stavu, kdy mezi sebou nano-stroje navzájem komunikují. Takto vytvořený systém se potom jmenuje nano-síť. O nano-sítích lze hovořit ve smyslu fyzického propojení několika nanostrojů, například pomocí karbonových nano-trubiček, práce ale bude zaměřena spíše na sítě vytvořené v určitém prostředí a komunikaci probíhající na bázi síření molekul.

Účelem tedy nebude jejich cestu jasně vymezit nějakým materiálem. I prostředí, ve kterém dokáží jednoduché nano-stroje pracovat, je velice omezené. A kritéria pro nalezení vhodného prostředí jsou vysoké. Dalším problémem je komunikace na velkou vzdálenost, kterou zatím nejsme schopni realizovat [2], [3].

Nejjednodušší forma molekulární komunikace se skládá ze skupiny biologických nano-strojů, které vysílají dávky molekul nesoucí požadované informace a ty v prostředí postupují dál pomocí difusního procesu. Druhá skupina nano-strojů potom představuje přijímače. Po přijetí vyslané informace chemicky reagují a dávají tím zprávu, že přenos proběhl úspěšně [1].

1.1 Přirodou inspirované nanostroje

Zmiňované nano-stroje, které jsou při molekulární komunikaci využívané, v přírodě v jisté formě již dávno existují a dokonce i velice spolehlivě fungují. Například lidské tělo právě ke komunikaci orgánů nebo třeba distribuci látek v těle využívá přesunu molekul, v boji proti bakteriím a infekcím využívá bílých krvinek a podobně [11].

Podobné analogie se dají najít i jinde v přírodě mezi hmyzem nebo u rostlin. Sestrojení takto malých zařízení je pro člověka zatím obtížnější a je potřeba se zabývat výzkumem, který může celý tento obor pousnout na jinou úroveň. Zejména z tohoto důvodu se potom člověk inspiruje v přírodě a poznává procesy, kterých každý den proběhne nespočet. S pomocí těchto znalostí bude lidstvo časem schopno bez větších obtíží vytvořit bio-nano-roboty, kteří budou mezistupněm mezi produktem přírody a lidským dílem.

Například Ma a Krings se zabývali chemosensorním komunikačním systémem populací můr, mravenců a brouků [8]. Místo kódování zpráv, jak je používáno v bezdrátových sítích, využívá tento hmyz tzv. semiochemického kódování [4]. Velice zajímavý je potom proces hledání potravy u mravenců. Při hledání obživy za sebou zanechávají feromonovou stopu, podle které jsou schopni se navrátit zpět k mraveništi. Další mravenci tuto stopu za zdrojem potravy následují. Tento druh komunikace u mravenců lze vzít jako příklad směrování, který se zakládá na molekulární komunikaci.

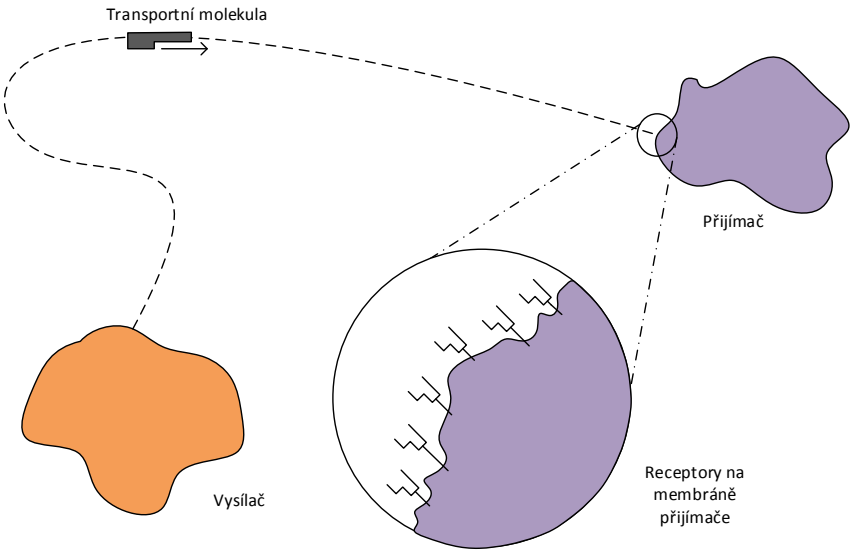
Při komunikaci několika stran je vždy potřeba zajistit přesnou synchronizaci tak, aby si všechny strany správně rozuměly. V oblasti nano komunikací to ale není tak snadný úkol a špatně se realizuje. Jedno ze zajímavých řešení hodinové synchronizace se zakládá na principech synchronizace světlušek. Světluška ve tmě totiž nezáří bez přestání. Má frekvenci, se kterou bliká a pokud se bude uvažovat velká populace světlušek, zjistí se, že fáze tmy a světla se střídá s perfektní přesností u všech jedinců stejně [4], [5].

1.1.1 Difusní šíření

Při komunikaci s využitím difusního procesu se daná informace přenáší mezi vysílačem a přijímačem pomocí transportních molekul. Ty mohou být různého charakteru např. speciální druhy proteinů, peptidů, DNA (Deoxyribonukleová kyselina – nositelka genetické informace) sekvence nebo jiné molekulární struktury [2].

Pro difusní pohyb molekul není potřeba žádný externí zdroj energie. Využívá se totiž neuspořádaného pohybu částic (Brownův pohyb) prostředí, který způsobí rozptyl aplikovaných molekul. Ty se tak rovnoměrně rozptylují, dokud se nedosáhne přibližně homogenní koncentrace. Snaží se vždy přecházet z prostředí o vyšší koncentraci do prostředí s koncentrací menší [10].

Transportní částice vyslané do prostředí jsou zpracovány přijímačem přes jeho receptory. Jakmile se dosáhne požadovaného množství zpracovaných molekul, přijímač vyšle tear-down signál, který přeruší další přenos [1].



Obr. 1.2: Komunikační model [1]

Brownův pohyb

Jedná se o pohyb, který je zapříčiněn tepelným pohybem molekul v látce. Ty do sebe neustále vrážejí a jejich směr a síla jsou naprosto náhodné. Brownův pohyb se považuje za náhradu aktivního transportu při přesunu molekul. Není zapotřebí nijak upravovat transportní částice tak, aby měly vlastní zdroj energie pro pohyb, stačí využít energie prostředí. Vzhledem k faktu, že difuze nefunguje jen v požadovaném směru, musí se do prostředí vypustit mnohem větší množství transportních molekul

tak, aby se zvýšila pravděpodobnost úspěšného transportu. Pokud ovšem toto není možné, jako efektivnější se jeví aktivní pohyb každé částice samostatně [12].

1.2 Možnosti využití

Tento nový obor má velice široké možnosti využití. Přínos totiž nemusí být jen pro obory, které konkrétní principy využijí, ale s vývojem se mohou prohloubit znalosti i v jiných oblastech. Jedná se o elementární komunikaci na bázi molekul a ta může najít uplatnění prakticky kdekoliv [3].

1.2.1 Biomedicínské aplikace

Využití v tomto oboru se přímo nabízí, protože principy, kterým se práce věnuje, lidské tělo už využívá a lidé se od něj pouze učí. Proto pouhou úpravou vlastností již funkčních procesů, lze vytvořit zcela nové funkce. Z takových poznatků je možno později čerpat a inspirovat se v jiných aplikacích. Nano-stroje lze využít třeba v imunitním systému. Nano roboti by se naučili lokalizovat nežádoucí buňky, jako třeba rakovinné, a pomohli by k efektivnější léčbě.

Další oblastí, kde se tato technologie může uplatnit, jsou transplantace orgánů. Při výměně špatně fungujícího orgánu za funkční od dárce totiž může dojít k tomu, že tělo nový orgán odmítne a nebude tak moct plnit svou funkci. Zde pak nastupují speciálně upravení roboti, kteří v místě hojení zajistí ideální prostředí a vytvoří tak příznivější podmínky pro přijmutí implantátu.

Upravením funkce nano-stroje jej lze využít k nejrůznějším účelům. Pro představu se dá uvést přesnější aplikace léčiv a podpůrných látek v konkrétním místě nebo efektivnější analýza krve [3].

1.2.2 Průmysl a spotřební zboží

Využití v tomto oboru je rovněž velmi široké. Mohly by se ještě více zmenšit výrobní technologie a tím by se otevřely možnosti pro nové materiály se specifickými vlastnostmi [3].

1.2.3 Vojenství

V tomto oboru se dají využít poznatky z vícero oblastí. Pomocí nano-strojů lze lépe sledovat těla vojáků nebo je využít pro detekci nebezpečných bojových plynů, či jiných látek, na rozlehlém území. Podobně vyspělé technologie, jaké by se používaly u spotřebního zboží, přinesou ještě výraznější užitek pro potřeby armády. Zde by

se uplatnilo například oblečení pro vojáky ze speciálně upravených materiálů, které plně odolají teplotám nebo se dokáží zbarvit podle okolního prostředí [3].

1.2.4 Životní prostředí

Stejně jako lze aplikovat nano-roboty v lidském těle, lidstvo by mohlo využít jejich potenciál i k ochraně životního prostředí. Rostoucí problém s odpadky, které se hromadí, a nedokážeme se s nimi ekologicky vypořádat, by se dal vyřešit pomocí nano-strojů, které by svým působením urychlily rozpad odpadků a nemusely by se tak hromadit na skládkách. Různé druhy nano-filtrů by se potom daly uplatnit k vyčištění ovzduší od nežádoucích látek [3].

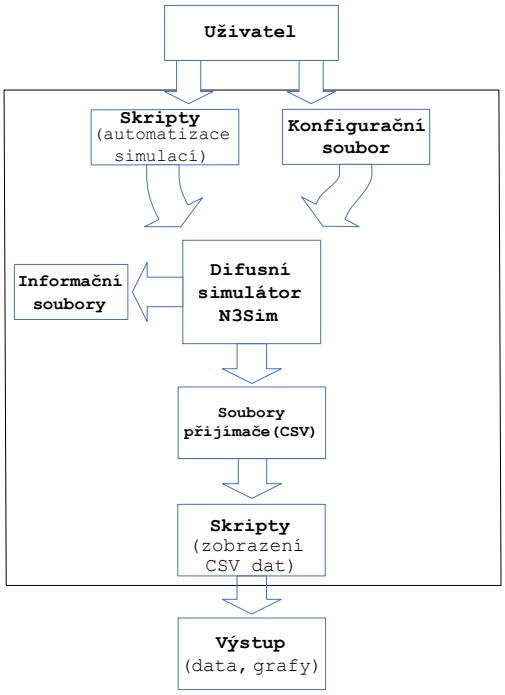
2 DOSTUPNÉ SIMULÁTORY MOLEKULÁRNÍ KOMUNIKACE

Praktické pokusy jsou v našich podmínkách a s naším dostupným vybavením jen těžko realizovatelné. Z tohoto jsme nuceni uchýlit se k simulátorům. Ty pomocí známých vzorců vypočítají předpokládaný pohyb transportních molekul a dokáží tak s určitou přesností předpovědět, jaký bude průběh přenosu [9].

Práce se zabývá dvěma různými pohledy na molekulární komunikaci. První uvažuje difusní šíření molekul v prostoru a druhý se soustředí na komunikaci nano-částic pomocí elektro-magnetických pulzů. Pro každý účel bylo potřeba použít jiný simulátor. V následujících částech 2.1 a 2.2 jsou simulátory popsány.

2.1 N3Sim

Simulátor molekulární komunikace N3Sim se pro účely této práce přímo nabízí. Specializuje se totiž právě na difusní přenos molekul mezi vysílačem a přijímačem. Právě na tento způsob pohybu transportních molekul se práce zaměřuje [9].



Obr. 2.1: Blokový diagram simulátoru N3Sim [9]

Aby simulace probíhala za předem stanovených podmínek, je potřeba nastavit množství parametrů v konfiguračním souboru. Roli konfiguračního souboru lze

vidět na blokovém diagramu 2.1 simulátoru. Parametry se nastavují pro vysílač, přijímač, transportní molekuly i pro samotné prostředí, ve kterém se bude komunikace odehrávat. Parametry tedy lze rozdělit na jednotlivé skupiny, aby se lépe vnímaly souvislosti mezi nimi [9].

2.1.1 Parametry simulace

Do této skupiny parametrů se řadí nastavení výstupu ze simulace ve smyslu pojmenování výstupních souborů a toho, jaká data jsou vůbec po simulátoru požadována. Je možno si například vyžádat i grafický výstup, který se dá použít s programem NSVideo. Tento modul se ovšem stále připravuje a prozatím není k dispozici [9].

V kategorii parametry simulace se samozřejmě nastavují i důležitější vlastnosti, které mají zásadní vliv na samotný průběh. Mezi ně patří následující parametry [9]:

- *activeCollision*: pomocí tohoto parametru lze nastavit, zda se mohou částice navzájem střetnout a ovlinit si tak navzájem trajektorie nebo zda budou vystupovat jako nehmotné a v případě střetu se od sebe neodrazí, ale projdou skrz.
- *BMFactor*: při Brownovu pohybu se využívá neustálého tepelného pohybu částic, díky kterému do sebe navzájem vráží, odráží se a prostorem tak postupují dál. Nastavením BMFactoru je možno ovlivnit sílu, kterou se částice při střetu odrazí. Tento koeficient lze nastavit od nuly do jedné.
- *inertialFactor*: při přechodu na další časový interval se přepočítá setrvačný pohyb částice. Pokud je hodnota intertialFactoru (koeficient setrvačnosti) větší než nula, vynásobí se rychlost v předchozím časovém intervalu. Touto novou rychlostí se potom částice bude pohybovat v daném časovém intervalu.
- *time*: pomocí tohoto parametru lze nastavit celkový čas simulace.
- *timeStep*: celkový čas simulace se dělí na jednotlivé časové intervaly. Při přechodu na nový interval vždy dojde k přepočítání některých hodnot a může dojít k částečnému vyhodnocení simulace.

2.1.2 Parametry prostředí

Parametry prostředí slouží k tomu, aby bylo možné napodobit takové prostředí, ve kterém by měla simulace probíhat. Na simulaci má vliv zejména velikost prostoru, kde se komunikace uskutečňuje. Booleanovský parametr *boundedSpace* nastavuje, zda se bude simulovat ohraničený prostor nebo zda simulovaný prostor nebude mít žádné hranice. Velikost samotného prostoru pak lze upravit pomocí parametrů *xSize* a *ySize*. Velikost x udává rozměr horizontální strany dvojrozměrného prostoru a

y určuje vertikální rozměr. Pomocí parametru *constantBGConcentration* pak lze aktivovat nevymezený prostor [9].

Pokud se simuluje ohraničený prostor, lze nastavit počáteční koncentraci částic parametrem *bgConcetration*. Nastavená hodnota potom udává počet částic na 10000 nm^2. V případě, že je zvolen nevymezený prostor, nemůže se kvůli neznámým rozměrům koncentrace nastavit [9].

Pro difusní šíření jsou některá prostředí vhodnější, protože mají intenzivnější Brownův pohyb svých částic. Ten je úzce spojen s teplotou tohoto média. Celkově se dá prostředí popsat difuzním koeficientem. V simulátoru N3Sim lze tento koeficient nastavit v parametru D. Udává se v jednotkách [nm/ns^2]. Poloměr vyslaných částic v [nm] se nastaví parametrem *sphereRadius* [9].

2.1.3 Parametry vysílače

Základním údajem je počet samotných vysílačů a nastaví se v parametru *emitters*. Každý z těchto vysílačů pak má své nastavení. Musí se nastavit poloměr vyzařování *emitterRadius*, který udává rozsah oblasti, ze které jsou částice vypouštěny do prostředí. Musí se rovněž zvolit poloha vysílače pomocí parametrů x a y [9].

Následující dva parametry se do značné míry ovlivňují a je třeba dbát na jejich správné nastavení. Parametr *punctual* totiž při nastavení na hodnotu true zajistí, aby se částice vyzařovaly vždy ze stejného místa vysílače. V opačném případě se budou vysílat z náhodné pozice v rámci poloměru vyzařování. S tímto ale souvisí počáteční rychlost částice *initV*. V případě vyzařování ze stejné pozice je počáteční rychlost nula a směr potom závisí na nastavení výchozí pozice. Jestliže se ale částice vysílají z náhodných pozic, potom lze *initV* nastavit libovolně a částice jsou nasměrovány k přijímači.

Je potřeba ošetřit ještě jednu situaci a to aktivní parametr, který povoluje kolize částic, a aktivní parametr *punctual*. Docházelo by totiž kvůli vyzařování množství částic ze stejného místa k chybám. Časové rozmezí, kdy bude vysílač aktivní, se nastaví pomocí parametrů *startTime* a *endTime*. Vysílání může začít pouze tehdy, kdy je čas větší než startTime a menší než endTime, obě hodnoty se uvádí v ns [9].

Parametr *concentrationEmitter* má dvě hodnoty true a false. Při nastavení true parametr *amplitude* určuje, kolik částic se v každém časovém intervalu bude nacházet v poloměru vyzařování vysílače. Jestliže bude nastaven na false, pak se stejný počet částic v každém časovém intervalu teprve vyzáří [9].

Simulátor umožňuje také zvolit typ vysílače. Na výběr je z pěti druhů, přičemž se každý liší ve způsobu řízení jejich vyzařování. Důležité je rozumět již zmíněnému parametru *amplitude*. Udává totiž počet částic, které se každých 100 ns uvolní do

prostředí. Je důležité si vždy správně spočítat počet částic, které se mají v každém časovém intervalu vyzářit, tak aby se mohl správně nastavit parametr *apmlitude* [9].

1. typ: vyzáří vždy stejný počet částic v každém časovém intervalu. Toto číslo se vypočítá z parametru *amplitude* [9].
2. typ: vyzařuje částice dle obdélníkového signálu. Musíme ho definovat parametrem *period* a *timeOn*. Perioda je potřeba k sestavení obdélníkového signálu a *timeOn* slouží k určení části signálu, se kterou se má spouštět vysílání [9].
3. typ: místo obdélníkového signálu, jako ve druhém typu, se vysílač řídí bílým šumem [9].
4. typ: tento typ vysílače nám umožňuje sestavit si svůj signál, kterým se bude vysílač řídit. Uloží se ve formě čísel ve sloupci, kde každý řádek představuje jeden časový interval. Musí se nastavit parametr *file*, do kterého se uloží cesta ke zdrojovému souboru a *scaleFactor*, kterým lze počet částic, přečtených z jednotlivých řádků, vynásobit [9].
5. typ: je shodný se 4. typem, pouze se používá ve trojrozměrném prostoru. Je potřeba tedy specifikovat ještě jeho polohu pomocí souřadnice z [9].

2.1.4 Parametry přijímače

Parametr *receivers* určuje počet přijímačů v simulaci. Dále lze jednotlivé přijímače blíže specifikovat pomocí následujících parametrů [9]:

- *name*: dává přijímači unikátní jméno, podle kterého jej později ve výsledcích simulace můžeme identifikovat.
- x a y: souřadnice přijímače na simulační ploše.
- *absorb*: pokud nastavíme hodnotu na true, pak se částice změřené v každém časovém intervalu, v oblasti dosahu přijímače, smažou.
- *accumulate*: určí, zda bude výstup přijímače udávat, kolik části přijmul za celý průběh simulace nebo jen v daném časovém intervalu.

Podobně jako u vysílačů, můžeme i u přijímačů volit z několika typů.

1. typ: detekční oblast přijímače má tvar čtverce, který má stranu danou parametrem *side* [9].
2. typ: detekční oblast má tvar kruhu s poloměrem daným parametrem *rradius* [9].
3. typ: detekční prostor má tvar koule. Používá se ve trojrozměrných simulacích. Je potřeba uvést parametry z (třetí souřadnice umístění přijímače) a *rradius* (poloměr koule) [9].

2.2 NS-3

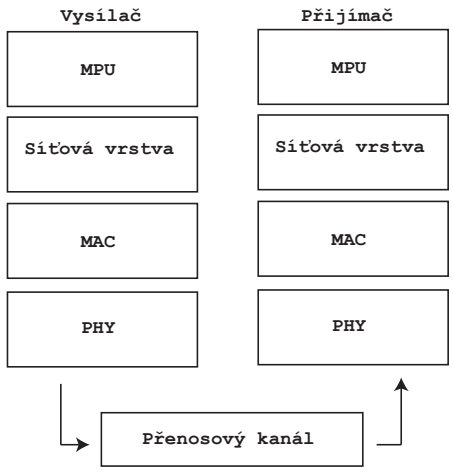
Zatímco simulátor N3-Sim pracuje s difuzním šířením molekul a zajišťuje tak komunikaci mezi nano-stroji, modul Nano-Sim v simulátoru NS-3 pro komunikaci mezi vysílačem a přijímačem využívá elektromagnetických vln a nabízí tak jiný pohled na celou problematiku a řešení komunikace. Simulátoru NS-3 je věnována druhá část práce [15].

Tento síťový simulátor je určen především pro výzkumné a akademické účely. Software NS-3 je dostupný zdarma pod licencí GNU GPL v2 a používá programovací jazyky C++ a Python [13]. Pro účely práce bude využíván simulátor ve vydání NS-3.16. Pro simulaci nanosítě je potřeba do simulátoru NS-3 implementovat modul Nano-Sim, který slouží k simulaci WNSN (Wireless Nano Sensor Network) [15].

Nano-Sim poskytuje knihovny, které pracují s jádrem programu NS-3. Uživatel tak má k dispozici model sítě, který lze s využitím znalosti knihoven vhodně upravit podle svých potřeb. V případě simulátoru N3Sim je již simulace naprogramovaná a na uživateli je pouze nastavení parametrů. [14], [15].

2.2.1 Modul Nano-Sim

Modul Nano-Sim implementovaný do platformy simulátoru NS-3 nabízí simulaci bezdrátových sítí s nano-senzory využívající komunikaci na bázi elektromagnetických vln. Modul lze pro detailnější popis rozdělit na menší části, které spolupracují a dohromady vytváří celkový obraz nano-sítě.



Obr. 2.2: Síťová architektura modelu nano-sim [14]

Dělení je podobné jako u modelu TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Celá síťová architektura modulu Nano-Sim se skládá z MPU (Message

Processing Unit), síťové vrstvy, MAC (Media Access Control), fyzického rozhraní a přenosového kanálu. Grafické znázornění vrstev modelu se nachází v obrázku 2.2 [15], [14].

Bezdrátová nano-síť se dle modelu nano-sim skládá ze tří různých uzlů [14]:

- nano-uzel: malé zařízení, které slouží zejména jako sběrač požadovaných dat a informací v cílové oblasti,
- nano-směrovač: je větší než nanouzel, jeho úloha je zpracovat informace od nanouzlů a předat je dál v cestě a kontrolovat komunikaci pomocí kontrolních zpráv,
- nano-rozhraní: toto zařízení je schopno fungovat jako výchozí brána mezi vytvořenou nano-sítí a standardní počítačovou sítí, slouží ke komunikaci s vytvořenou sítí.

Model nano-sítě, který využívá všech jmenovaných uzlů a skrze nano-rozhraní komunikuje s počítačovou sítí, je znázorněn na obrázku 2.3. Taková nano-síť představuje základní komunikační model, který využívá nano-sensorů (nano-uzel nebo nano-router), které operují v místě aplikace, získávají potřebná data a pomocí elektromagnetických pulzů komunikují s nano-rozhraním, které představuje bránu do počítačové sítě. Model, který bude v této práci využit obsahuje množství malých nano-sensorů, které mezi sebou komunikují a pomocí směrování jsou schopny na delší vzdálenost informace dopravit až k nano-rozhraní. Rozhraní bude v modelu využíváno pouze jedno [14].

Model využívá velkého množství nano-sensorů, které jsou umístěny do cílové oblasti a pomocí EM signálu posílají informaci dále v síti. Vzhledem k velmi malým rozměrům nano-sensorů a vysoké frekvenci signálu (THz), je dosah jednoho nano-sensoru malý (řádově centimetry). Aby se vyřešil přenos na delší vzdálenosti využívá se dvojí funkce nano-sensoru. Ten totiž může fungovat i jako směrovač a přijatý signál tak předat v síti dál. Přidáním většího množství nano-sensorů do sítě se sníží vzdálenost mezi nimi a sníží se tím také ztrátovost paketů [14].

MPU

Úkolem MPU je pomocí procesních zpráv udržovat stálý bitový tok tak, aby se mohly vytvářet pakety s fixní délkou. Jakmile je takový paket vytvořen, MPU jej pošle na fyzické rozhraní. Když je paket přijat na cílovém zařízení, je doručen na cílovou síťovou vrstvu, která rozhodne, zda bude paket poslán ke zpracování do MPU nebo bude přeposlán na jiné zařízení [14].

```
uint8_t *buffer  = new uint8_t[packetSize];
for (int i = 0; i < packetSize; i++)
{
```

```
buffer[i] = 129;
}
Ptr<Packet> p = Create<Packet>(buffer, packetSize);
SeqTsHeader seqTs;
seqTs.SetSeq (p->GetUid ());
p->AddHeader (seqTs);

d->GetObject<SimpleNanoDevice>()->SendPacket (p);
Simulator::Schedule (Seconds (packetInterval), &GenerateAPacket, d)
   ;
```

Tento úryvek kódu vytváří samotný paket o stanovené délce. Délku paketu určí uživatel skrze proměnnou *static int packetSize*. Po vytvoření paketu se přidá hlavička a paket je odeslán [14].

Síťová vrstva

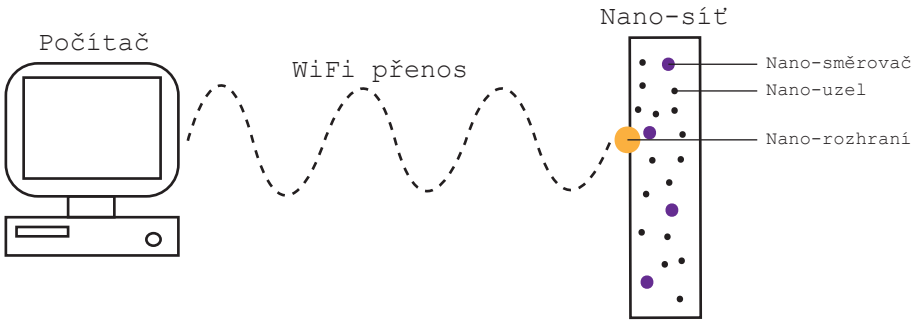
Síťová vrstva má za úkol směrovat jednotlivé události na požadovaný cíl. Předtím, než je paket předán vrstvě MAC, přidá k němu síťová vrstva hlavičku obsahující: ID zdrojového zařízení, ID odesílatele, ID zařízení na dalším skoku, ID paketu a TTL (Time to Live). Dle směrovací strategie lze rozdělit způsoby směrování paketů na náhodné a selektivní [14].

- Selektivní flooding: uzel, který obdrží paket od vyšší vrstvy nebo od jiného zařízení, jej odešle na všechna zařízení v jeho okolí,
- Náhodné směrování: nano-stroj, který chce paket předat dál, vybere jedno ze zařízení ve svém dosah a na něj je komunikace směrována.

MAC

Vrstva MAC zajišťuje přístup uzlů k transportnímu kanálu. Tato technologie byla u nano-sim zvolena především pro svou nízkou náročnost a jednoduchou implementaci. Vrstva MAC nepřidává paketům žádnou další hlavičku, vše potřebné je již obsaženo v hlavičce přidané síťovou vrstvou.

V Nano-Sim jsou pro MAC vrstvu nastaveny dvě odlišné technologie – Transparent-MAC a Smart-MAC. Transparent-MAC do komunikace mezi síťovou vrstvou a fyzickým rozhraním nijak nezasahuje. Odlišně pracuje Smart-MAC, která pakety, získané od síťové vrstvy, ukládá do front a předtím, než je odešle, se pokusí navázat spojení se zařízeními ve svém dosahu. Pokud je dosažitelné alespoň jedno zařízení, je paket směrován právě tam. V případě, že jich je v dosahu více, uplatní se náhodný výběr [14].



Obr. 2.3: Model nano-sítě propojené se počítačem [14]

Fyzická vrstva a přenosový kanál

Přenos paketů založený na komunikaci pomocí elektromagnetických pulsů by mohl probíhat za pomoci nano-antén, které vysílají v teraherzovém spektru (0,1 ÷ 10,0 THz). Kapacita přenosového kanálu by tak byla obrovská, ale dosah vysílání krátký.

Nejslibněji se jeví použití modulace TS-OOK (Time Spread On-Off Keying) [16]. S touto modulací se logická 1 přenáší jako krátký impuls a logická 0 jako signál s nulovým rozkmitem. Výhodou tohoto přenosu je, že nano zařízení nemusí být navzájem synchronizovaná a největším plusem potom, že přenosové médium může být sdíleno s několika uživateli (nano-stroji). Je to dáno především tím, že prodleva mezi dvěma po sobě jdoucími pulsy je mnohem delší, než délka samotného pulsu.

Parametry signálu jako délka trvání, přenosová frekvence nebo jeho energie se nastavuje pomocí fyzické vrstvy. Přenos paketů je spravován na systémové úrovni v několika krocích [14]:

1. Vrstva MAC volá metodu fyzické vrstvy, která spravuje vysílání paketů.
2. Fyzická vrstva ukládá data spojená s vysílaným signálem – začátek vysílání, délka trvání pulsu T_p, interval mezi pulsy T_i a délku vysílání $txTime$. Celková délka trvání vysílání se dá vyjádřit pomocí rovnice 2.1:

$$txTime = [(L-1) \cdot T_i] + T_p\,, \tag{2.1}$$

   kde L je délka paketu v bitech.
3. Sestavený signál s daty z přechozího bodu se doručí do přenosového kanálu a odešle se na všechny uzly v dosahu.
4. Přijímač analyzuje přijatý signál a pokud neshledá chybu v přenosu, předá data vyšší vrstvě.

Nastavení parametrů fyzické vrstvy a rovněž simulace se provádí úpravou hodnot následujících proměnných, které se nacházejí na začátku třídy **Run** [14]:

- **double** duration – délka trvání simulace,

- **double** txrange – transmission range (dosah vysílání),
- **double** xrange – délka simulovaného prostoru,
- **double** yrange – šířka simulovaného prostoru,
- **double** zrange – výška simulovaného prostoru,
- **double** pulseEnergy – energie přenášeného signálu,
- **double** pulseDuration – delké trvání jednoho pulsu,
- **double** pulseInterval – délka intervalu mezi pulsy.

Výstupy modelu nano-sim

Ve stavu, v jaké je modul využívám, není naprogramován žádný výstup ve formě souboru s daty, ale při běhu se s každým přijatým nebo odeslaným paketem vypíše řádek s informacemi o čase i informacích v hlavičce paketu [14].

```
TX 1 0.001 1 10 350 350 114 id 15 src 11 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 11 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 1 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 146 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 325 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 2 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 3 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 4 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 5 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 6 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 7 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 8 Time 3.52625
PHY_TX 1 0.001 1 10 350 350 TX 138 id 15 src 9 Time 3.52625
RX 1 0.001 1 10 350 350 102 id 15 src 11 dst 0 Time 3.52625 Delay
   123091
```

Kvůli tomu, aby byly výsledky relevantní, je potřeba provést stejnou simulaci několikrát a výsledky zprůměrovat. K tomuto účelu je do programu přidán cyklus for, který pracuje s proměnnou SEED. Z jakého cyklu výsledky pochází lze zjistit podle první číslice výpisu. Počáteční řetězec znaků na každém řádku značí, zda byl paket vyslán (TX) nebo přijat (RX).

Řádky začínající řetězcem PHY_TX jsou záznamy o přeposlání paketu jiným uzlem nebo směrovačem. Další čtyři čísla značí dosah vysílání uzlu, počet rozhraní, směrovačů, uzlů a aplikací. Číslice na osmé pozici v řádku značí velikost paketu (v bitech). Následující hodnoty specifikují id paketu, id uzlu, který jej odeslal a čas, kdy byl paket přijat. Výpis doprovázející přijetí paketu v cíli (RX) nese navíc i informaci o celkovém zpoždění paketu (v pikosekundách) [14].

2.2.2 Průběh simulací v Nano-sim

Měření a závěry ze simulátoru nejsou plně porovnatelné s výsledky z modelu nano-sim. Jedná se totiž o rozdílný druh komunikace. N3Sim ke komunikaci využívá částice, které jsou vyslány z vysílače a k přijímači se šíří pomocí difuze. Nano-sim jde jinou cestou a informaci zabalenou v paketech si zařízení předávají pomocí elektromagnetických vln. Už z tohoto důvodu nelze výsledky přímo porovnat, protože nelze postavit do rovnosti částice s pakety.

Dalším důvodem je samotné šíření pomocí vln, které není náhodné, na rozdíl od difuzního šíření, ale je jasně dané parametry vlnění a směrem, kterým je vyzařováno. Simulátor N3Sim neumožňuje využití opakovačů, které by zvětšily dosah vysílače a umožnily komunikaci na delší vzdálenost. Na rozdíl od toho je právě opakování a směrování hlavním principem komunikačního modelu u simulátoru nano-sim. Lze tak simulovat mnohem větší prostor s úspěšným přenosem informace a přiblížit se tak reálným podmínkám a využití například v lidském těle.

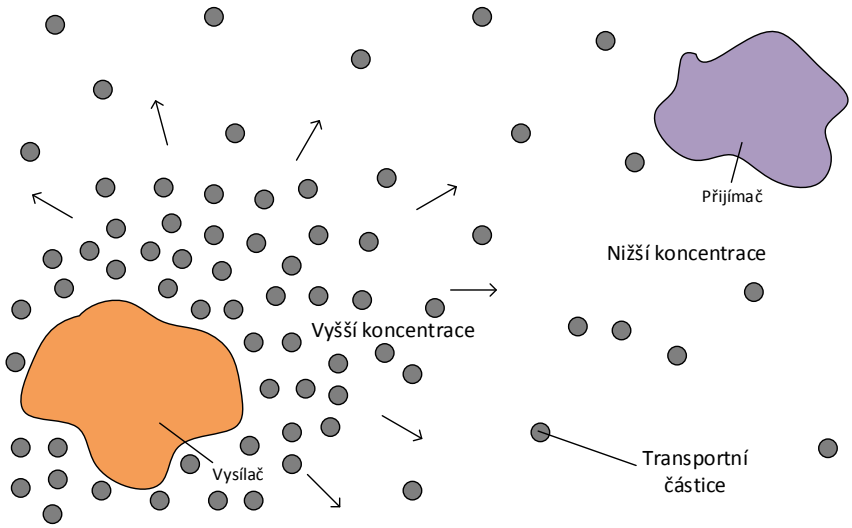
Nano-sim už jen z principu svého fungování nenabízí stejné možnosti nastavení jako N3-Sim. V případě simulátoru komunikace nano-částic založené na pricipu EM pulzů, lze nastavit frekvenci generace paketů a tím zvýšit počet vyslaných jednotek informace za stejný čas. Lze také upravit počet nano-uzlů, nano-směrovačů a nano-rozhraní v simulaci.

Simulátor umožňuje nastavení také odlišného přístupu jednotlivých vrstev. Lze tak simulovat scénáře s aktivní technologií Smart MAC a výsledky porovnávat s technologií Transparent MAC. Podrobnosti o těchto technologiích jsou popsány v kapitole 2.2.1 věnované vrstvě MAC. Cílem simulací na principu šíření pomocí EM pulzů bude vyhodnotit výhody této technologie a vyzkoušet jiný přístup ke komunikaci nano-částic.

3 SIMULAČNÍ SCÉNÁŘE

V předchozí části práce byla pozornost zaměřena na teoretický popis oboru nanosítí 1 a simulátoru N3Sim 2 a NS-3 2.2. Po rozebrání jednotlivých parametrů, které je potřeba správně nastavit tak, aby simulace probíhala podle definovaných požadavků, se již lze přesunout k samotné simulaci a konkrétnímu nastavení.

Jak už bylo řečeno simulátor N3Sim pracuje s difusním šíření částic, které využívá Brownova pohybu, a nastavením těchto parametrů už není potřeba se zabývat. Postačí tedy jednoduchý model komunikace, který zahrnuje jeden vysílač a jeden přijímač. Vysílač bude do prostředí vysílat molekuly, jejichž cílem bude dostat se k přijímači. Budou nastavovány parametry jako jsou vzdálenost přijímače od vysílače, délka simulace nebo počet vyslaných částic a z dat poskytnutých simulátorem se vyvodí závěry.



Obr. 3.1: Model difusního šíření – částice se postupně rozptylují z prostředí o vyšší koncentraci do prostředí s nižší koncentrací [10]

Simulátor NS-3 na rozdíl od něj pracuje s elektro-magnetickými pulzy. V tomto simulátoru se sice využívá model Nano-Sim, který umožňuje simulace s tímto druhem šíření, nicméně pro potřeby práce jej bylo potřeba upravit. Simulována totiž bude komunikace typu P2P (Point-to-Point), zatímco ve výchozím stavu tomu tak není [15].

3.1 Nastavení parametrů simulátoru

Ze znalostí jednotlivých parametrů a souvislostí mezi nimi už je možno stanovit základní parametry simulace. Pro lepší orientaci bude zvolen stejný způsob rozčlenění parametrů, jako při jejich popisu v předchozí kapitole 2.

3.1.1 Parametry simulace

Vzhledem k tomu, že bude vytvořen základní komunikační model, mohou se některé parametry, které nehrají klíčovou roli v našem zkoumání, zanedbat. V úvodním bloku parametrů tedy postačí specifikovat délku simulace a délku časového intervalu. Vzájemné kolize částic budou deaktivovány, tak aby se při výpočtu neuvažovaly možné srážky jednotlivých transportních molekul.

Délka simulace je stanovena na hodnotu 50 µs (*time*=50000). Vzhledem k tomu, že výstup ze simulátoru reprezentuje, kolik částic přijímač přijal za každý časový interval, není horní hranice trvání simulace až tak důležitá. Je potřeba spíše dodržet její minimální trvání, aby měly výsledky určitou vypovídající hodnotu. Zbytečně dlouhá simulace je ale náročnější na výpočet a trvá déle.

3.1.2 Parametry prostředí

V tomto simulačním scénáři bude simulován ohraničený prostor a zvolí se tedy parametr *boundedSpace=true*. S tím souvisí i nastavení jeho velikosti. Horizontální rozměr x bude nabývat velikosti 2 500 nm a rozměr y 2 000 nm. Simulace komunikace mezi vysílačem a přijímačem bude provedena ve vodním prostředí, pro které je nutné nastavit difusní koeficient na $D = 0,1\,\mathrm{nm/ns^2}$. Počáteční koncentraci částic v prostředí bude ponechána na nule.

3.1.3 Parametry vysílače

Adekvátně k velikosti simulovaného prostředí je potřeba zvolit také poloměr oblasti, ze které bude vysílač emitovat částice. Poloměr 100 nm představuje 10 % z vertikálního rozměru, což je akceptovatelná hodnota [9]. Důležitější je v našem případě jeho poloha. Pomocí souřadnic x a y lze později vypočítat jeho vzdálenost od přijímače a pracovat s těmito hodnotami dle potřeby.

Bude umístěn na horizontální osu ($y = 1000$), tak aby byl dostatek prostoru pro případné změny vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem.

U parametrů *startTime* a *endTime* budou hodnoty zvoleny tak, aby byly částice vyslány dvakrát a to chvíli po startu simulace. Počáteční čas je tedy nastaven na 100 ns a koncový na 300 ns. S tímto se musí nastavit i typ vysílače. Postačí první

model, který vyzařuje částice s každým novým časovým intervalem. Parametr *amplitude* bude dle typu měření proměnný nebo konstantní. Zbylé parametry se nebudou uvažovat a ponechají se deaktivované.

3.1.4 Parametry přijímače

Přijímač je nastaven jako typ 2, což znamená, že jeho detekční oblast tvoří kruh. Jeho poloměr je stejný jako u vysílače a to 100 nm.

Aby se zabránilo opakované detekci stejných částic, je potřeba aktivovat parametr *absorb*. Ten také způsobí, že koncentrace částic v okolí přijímače je snižována a pokud bude čas simulace dostatečně dlouhý, většina částic k přijímači dorazí. Je to dáno vyrovnáváním koncentrace částic v prostředí a jejich rovnoměrným rozptylem. S klesajícím počtem částic v prostředí se ovšem prodlužuje také čas, za jaký molekula k přijímači dorazí.

Aktivním parametrem *accumulate* se ušetří práci při pozdějším vyhodnocování. Ve výstupním souboru totiž bude na každém řádku vypsán do té doby zaznamenaný počet přijatých částic. Nebude tak potřeba sčítat hodnoty na předcházejících řádcích.

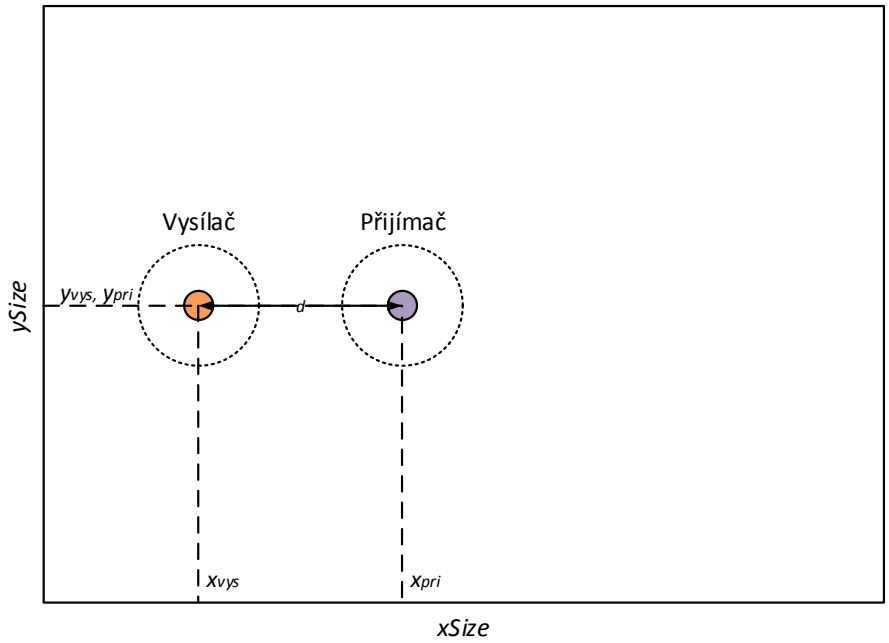
Při vyhodnocování závislosti počtu přijatých částic na vzdálenosti přijímače a vysílače se bude měnit poloha právě přijímače. Pro zjednodušení výpočtu vzdálenosti bude umístěn na stejnou vodorovnou osu ($y = 1000$) a bude se měnit pouze souřadnice x.

Pro výpočet vzdálenosti se potom použije jednoduchý vzorec:

$$d = x_{pri} - x_{vys}\,[\mathrm{nm}]. \tag{3.1}$$

3.2 Výsledky simulací ze simulátoru N3Sim

Postupně budou v této části práce rozebrány výsledky jednotlivých simulací, které vždy probíhají za trochu jiných podmínek a jejich výsledky se tak budou lišit. Nastavované parametry jsou počet vyslaných částic vysílačem, vzdálenost přijímače od vysílače a délka trvání simulace. V jednotlivých scénářích bude vždy pouze jeden z těchto parametrů proměnný a ostatní zůstanou konstantní tak, aby se dal snadno vyčíst dopad na komunikaci. Při skutečné molekulární komunikaci mají na přenos zásadní vliv také interakce mezi částicemi, které jsou do prostředí vyslány. Z tohoto důvodu budou všechny uvažované scénáře odsimulovány také s aktivním parametrem *activeCollison*, aby bylo možné je porovnat s výsledky bez aktivní kolize částic.



Obr. 3.2: Grafické znázornění polohy přijímače a vysílače

Tab. 3.1: Přehled proměnných parametrů v jednotlivých scénářích

Scénář	Čas	Vzdálenost	Počet vyslaných částic	Kolize mezi částicemi
1	50 µs	300 nm	**1 000 − 7 000**	vyp.
2	10 ms	**500 nm − 10 mm**	5 000	vyp.
3	**600 µs − 15 ms**	1 mm	5 000	vyp.
4	50 µs	300 nm	**1 000 − 7 000**	zap.
5	10 ms	**500 nm − 10 mm**	5 000	zap.
6	**600 µs − 15 ms**	1 mm	5 000	zap.

3.2.1 Proměnný počet vyslaných částic

První simulace byla provedena s konstantní délkou trvání $time = 50\,\mu s$ a vzdáleností přijímače a vysílače $d = 300\,\mathrm{n}m$. Docházelo akorát ke změnám v množství vysílaných částic. Vysílaly se ve dvou vlnách a to v čase $t = 100\,\mathrm{n}s$ a $t = 200\,\mathrm{n}s$. Ve zbylém čase probíhala difuze částic v prostředí a jejich analýza přijímačem. V tabulce 3.2 je pro každou hodnotu vypuštěných částic (a_v) uvedeno množství částic zaznamenaných přijímačem (a_p).

Z výsledných hodnot je zřejmé, že poměr částic přijatých vůči těm vyslaným, je vždy stejný. Z principu difusního šíření to ale není žádným překvapením. Při simulaci

Tab. 3.2: Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 50\,\mu s$ a $d = 300\,\mathrm{n}m$.

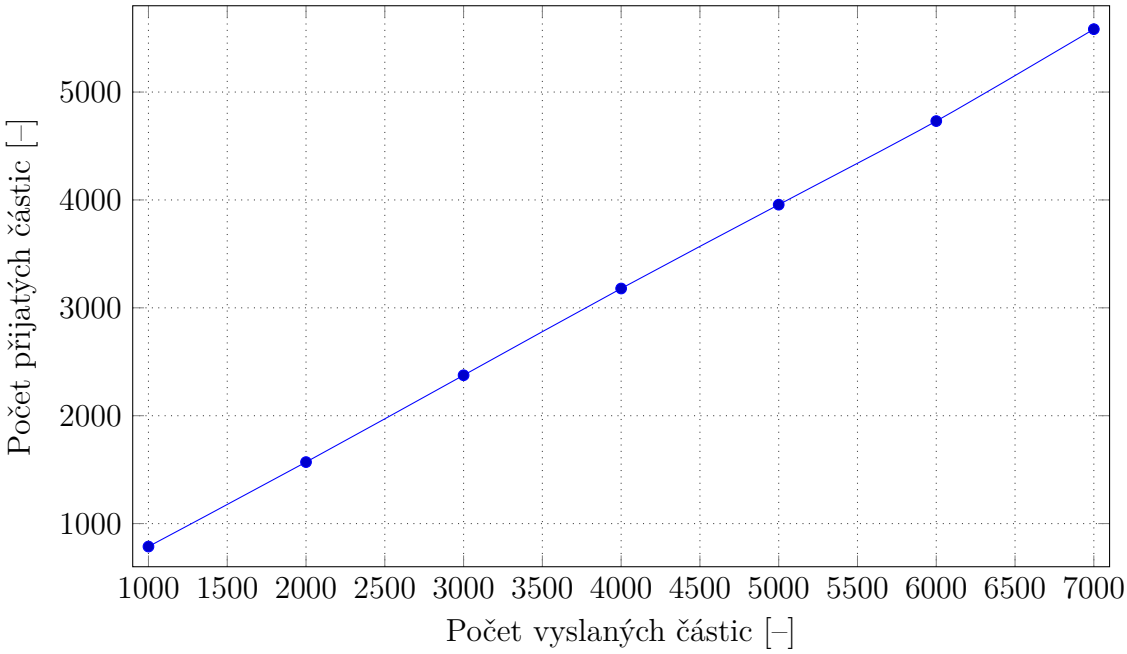
Počet vyslaných částic $a_v\,[-]$	Počet přijatých částic $a_p\,[-]$	Poměr přijatých a vyslaných částic $p\,[\%]$
1000	787	78,7
2000	1570	78,5
3000	2375	79,2
4000	3179	79,5
5000	3956	79,1
6000	4731	78,9
7000	5583	79,8

totiž dochází k rozptylování částic z prostředí o vyšší koncentraci do prostředí s koncentrací nižší a to tak, že výsledkem by měla být homogenní koncentrace v celém prostředí. Ať tedy vyšleme jakýkoliv počet molekul, rozptýlí se rovnoměrně a ve vzorku o rozměru např. 10×10 nm se bude vždy nacházet úměrný počet částic.

Je ovšem potřeba měření provádět ve správném čase, kdy už došlo k dostatečném rozptylu částic a zároveň ještě nejsou všechny částice přijaty. Přijímač totiž částice z prostředí absorbuje a snižuje tak koncentraci ve svém okolí, což zapříčiňuje postupné vymizení všech transportních molekul. Je ale potřeba simulovat ohraničený prostor, v případě, že by prostor hranice neměl, bylo by úspěšné přijetí všech částic čistě náhodné.

Horní hranice počtu vyslaných částic je omezena velikostí oblasti, ze které je vysílač emituje. Vysílání by se muselo rozložit do několika kroků s menším počtem částic. Pokud totiž simulátor vyhodnotí příliš vysokou koncentraci molekul ve své vysílací oblasti, vyšle jen část molekul tak, aby se nepřekročila riziková hranice. Tuto skutečnost způsobí vypsání chyby do výstupního souboru error.log.

V této simulaci došlo k nasycení při vypuštění 4 000 částic ve dvou po sobě jdoucích časových intervalech ($timeStep = 100\,\mathrm{n}m$), tedy dohromady 8 000 částic, proto tabulka končí hodnotou 7 000 vyslaných částic. Závislost počtu přijatých částic na počtu vyslaných je zobrazena v grafu 3.3. Přímka v tomto grafu znázorňuje přímou úměru mezi těmito veličinami.



Obr. 3.3: Závislost počtu přijatých částic na počtu vyslaných

3.2.2 Proměnná vzdálenost příjímače a vysílače

Úkolem tohoto scénáře je zjistit závislost počtu přijatých částic na vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem. Tato vzdálenost se nastavuje změnou polohy přijímače v rámci simulovaného prostoru. U přijímače se pro jednoduchost mění jen souřadnice x a poloha na ose y zůstává konstantní *y=1000* nm. Počet vyslaných částic i délka simulace zůstavají konstantní a to 5000 částic a 10 ms. Konstantní zůstává také velikost simulovaného prostoru pro zaručení stejných podmínek u všech vzdáleností.

Velikost prostoru je nastavena tak, aby v největší vzdálenosti 10 mm zůstalo mezi přijímačem a hranicí prostoru stále odstup 550 nm. V tabulce 3.3 jsou uvedeny hodnoty pro různé vzdálenosti od 500 nm až po 10 mm. Všechny simulace proběhly třikrát a uvedená hodnota přijatých částic je průměrem z jednotlivých výsledků. Je také potřeba zmínit, že hodnoty vzdálenosti uvedené v tabulce jsou vzdálenosti středů jednotlivých nano-strojů a není v nich zahrnut poloměr detekční a vysílací oblasti přijímače a vysílače (100 nm).

Z výsledných hodnot je patrné, že s rostoucí vzdáleností počet přijatých částic za čas 10 ms klesá. Tento výsledek lze vysvětlit tím, že když je přijímač blíže k vysílači, vyslané částice dorazí k přijímači dříve a nestihnou se tolik rozptýlit do prostředí. Pokud jej umístíme do větší vzdálenosti, částice stihnout více vychýlit dráhu a čas potřebný k dosažení cíle se prodlužuje.

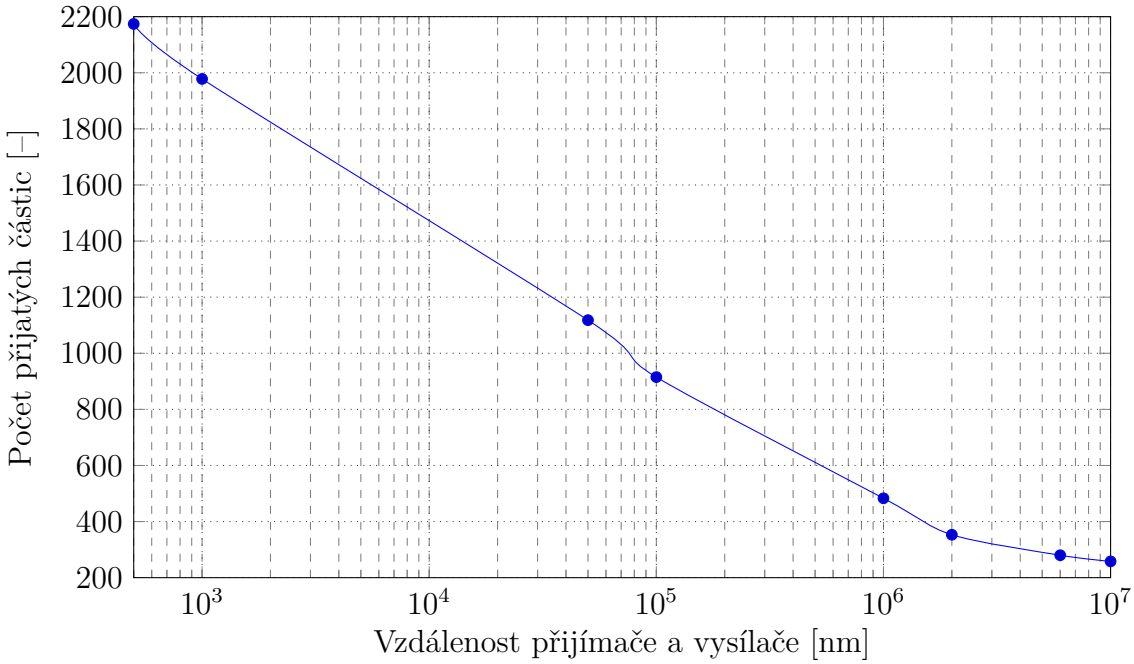
Tab. 3.3: Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 10\,\text{ms}$ a $a = 5000$.

Vzdálenost přijímače a vysílače $d\,[\text{nm}]$	Počet přijatých částic $a_p\,[-]$	Poměr přijatých a vyslaných částic $p\,[\%]$
500	2174	43,5
10^3	1978	39,6
$5 \cdot 10^4$	1118	22,4
10^5	915	18,3
10^6	483	9,7
$2 \cdot 10^6$	353	7,1
$6 \cdot 10^6$	280	5,6
10^7	258	5,2

Roli samozřejmě hraje i čas, který je potřeba k uražení vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem po přímé spojnici, nicméně tato doba nemá takový vliv. Jako příklad lze vzít dva simulační scénáře jeden se vzdáleností 50 μm a druhý se vzdáleností 100 μm.

V případě scénáře s kratší vzdáleností dorazí první částice v čase $t = 51800\,\text{ns}$ a u druhého scénáře v čase $t = 95600\,\text{ns}$. V pořadí 700 částice dorazí v čase 705000 ns v případě vzdálenosti 50 µm a u scénáře se 100 µm dorazí 700 částice v čase 1976800 ns. Jestliže by měl hrát roli pouze čas potřebný k přijmutí první částice, měl by po odečtení času přijetí první částice od času přijetí 700 částice vyjít přibližně stejný. Po takové operaci se ovšem výsledné hodnoty liší o 1,228 ms, což je vzhledem k délce trvání simulace ($t = 10$ ms) dostatečně velký rozdíl.

Z grafu 3.4 je patrné pomalejší klesání křivky od vzdálenosti 10^6 nm. Lze si to vysvětlit tím, že jsou počty přijatých částic oproti kratším vzdálenostem mnohem menší a rozdíly v počtech přijatých částic jsou tak v jiných řádech.



Obr. 3.4: Závislost počtu přijatých částic na vzdálenosti přijímače a vysílače

3.2.3 Proměnná délka trvání simulace

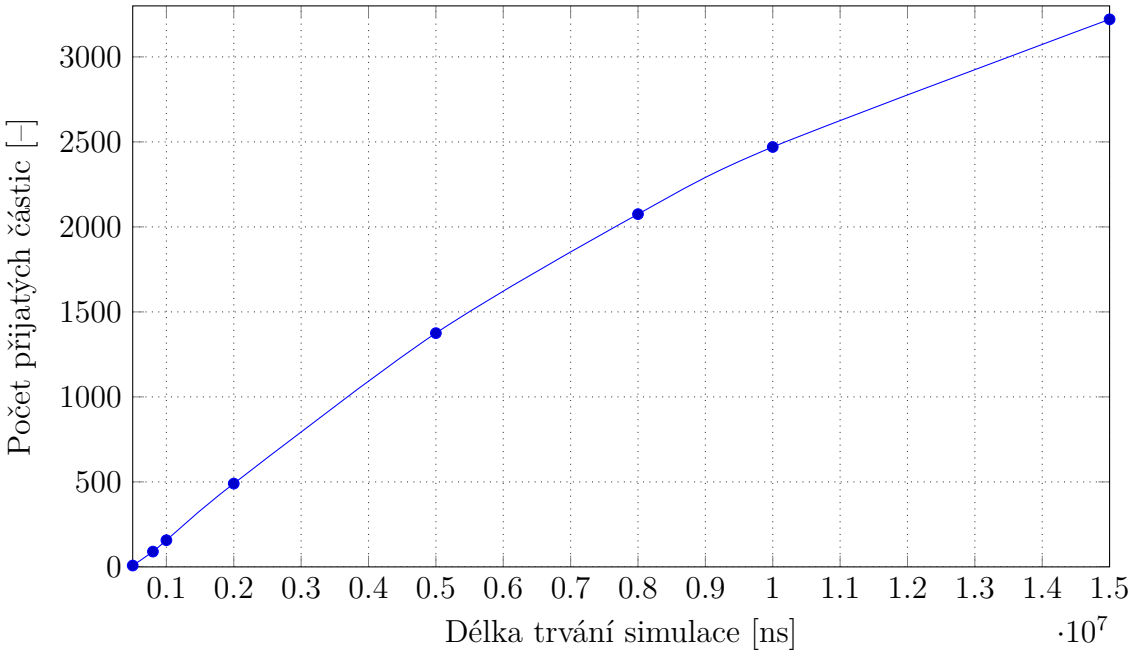
Simulace probíhala za stejných podmínek jako přechozí scénáře, pouze docházelo ke změně délky simulace. Časové rozpětí bylo zvoleno 600 µs – 15 ms. Dílčí hodnoty i s výsledky jsou vypsány v tabulce 3.4. Vzdálenost přijímače od vysílače byla nastavena na 1 mm. Počet částic zůstává samozřejmě konstantní a vždy jich bylo vysláno 5000. Vzhledem k menší výpočetní náročnosti tohoto scénáře bylo možno všechny simulace provést desetkrát a výsledky jsou tak zprůměrovány.

Z výsledků je evidentní, že s rostoucí délkou simulace roste počet přijatých částic přijímačem. Čím delší dobu totiž simulace probíhá, tím delší čas má systém na to aby zpracoval transportní částice. Pokud se ovšem počet přijatých částic blíží počtu vyslaných, je potřeba více času pro přijetí dalších částic. Je to dáno klesající koncentrací částic v prostředí, která způsobí pokles pravděpodobnosti, že trajektorie částice se protne s detekční oblastí přijímače.

Zobrazený graf 3.5 ukazuje úměrný nárůst počtu přijatých částic při prodloužení trváni simulace. Šíření částic v prostředí je náhodné a dáno Brownovým pohybem, který nenasměruje částice vždy stejně. Ve stanovených časech není počet přijatých částic vždy stejný a právě z tohoto důvodu byla každá simulace provedena desetkrát, aby bylo možné získat průměrnou hodnotu.

Tab. 3.4: Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 1\,\text{mm}$ a $a = 5000$.

Délka trvání simulace t [ns]	Počet přijatých částic a_p [−]	Poměr přijatých a vyslaných částic p [%]
$5 \cdot 10^5$	8	0,2
$8 \cdot 10^5$	90	1,8
10^6	157	3,1
$2 \cdot 10^6$	490	9,8
$5 \cdot 10^6$	1375	27,5
$8 \cdot 10^6$	2075	41,5
$10 \cdot 10^6$	2470	49,4
$15 \cdot 10^6$	3221	64,4



Obr. 3.5: Závislost počtu přijatých částic na délce trvání simulace

3.2.4 Proměnný počet vyslaných částic – aktivní kolize

Všechny předchozí scénáře podaly určité výsledky, v těchto scénářích se ale nepředpokládaly vzájemné interakce mezi částicemi. V následujících částech budou provedeny všechny simulace znovu, ale s aktivním parametrem kolize. Pokud se tento parametr zahrne do simulací, budou se jednotlivé vyslané částice v případě vzájemné srážky odrážet a měnit svou dráhu pohybu.

Ostatní parametry zůstávají stejné. V případě měření závislosti počtu přijatých

částic na počtu vyslaných, bude simulace probíhat s konstantní délkou $t = 50\,\mu s$ a vzdáleností $d = 300\,nm$. Proměnný parametr bude pouze počet vyslaných částic $a_v = 1000$ *až* 7000 částic. Budou vysílány ve dvou krocích chvíli po startu simulace ($t = 100\,ns$ *a* $t = 200\,ns$).

Při pohledu na výsledné hodnoty v tabulce 3.5 lze pozorovat mírný nárůst počtu přijatých částic vzhledem k předchozí simulaci bez aktivní kolize 3.2.1. Ještě důležitější je ovšem rostoucí poměr přijatých a vyslaných částic s větším počtem vyslaných částic. Tento výsledek si lze vysvětlit tak, že pomocí vzájemných kolizí se zvětší počet přijatých částic úměrně k počtu částic v prostředí. Jinak řečeno, čím více částic se v jedné chvíli v prostředí nachází, tím více vzájemných střetů proběhne a více částic se pomocí těchto sil dostane k přijímači.

Tab. 3.5: Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 50\,\mu s$ a $d = 300\,nm$ a *activeCollision=true*.

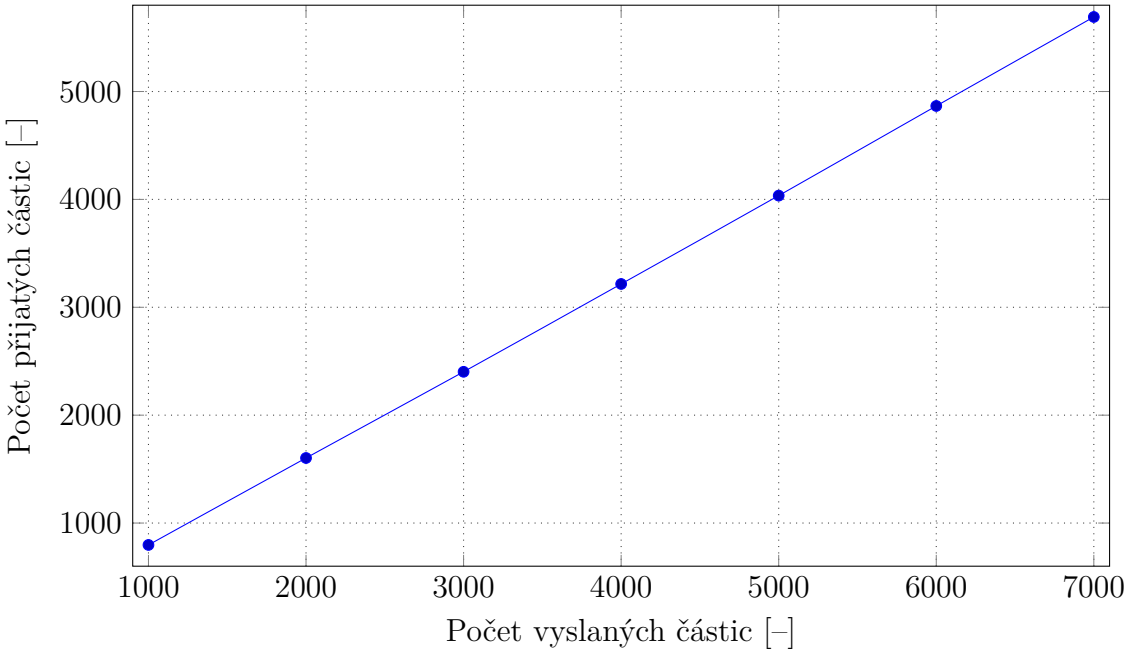
Počet vyslaných částic $a_v\,[-]$	Počet přijatých částic $a_p\,[-]$	Poměr přijatých a vyslaných částic $p\,[\%]$
1000	797	79,7
2000	1627	80,2
3000	2402	80,1
4000	3216	80,4
5000	4035	80,7
6000	4866	81,1
7000	5691	81,3

Platí to také pro rychlost přijetí první částice. Rychlost pohybu jedné částice je stále stejná a vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem také. První částice bývá ta, která má nejideálnější trajektorii, tedy nejkratší ze všech přijatých částic. Interakcemi s ostatními částicemi byla její trajektorie upravena tak, aby byla co nejkratší. Tento fakt si lze ověřit z hodnot v tabulce 3.6.

Změny jsou vzhledem k rychle se zvětšujícímu počtu vyslaných částic malé a grafické vyjádření závislosti 3.6 tak vypadá jako čistě lineární. S grafem z hodnot ze simulace s vypnutými kolizemi částic 3.3 jsou téměř shodné. Drobné odchylky v počtech částic se v tomto měřítku tolik neprojeví. Nicméně samotný fakt, že s rostoucím počtem částic v prostředí rovnoměrně roste i jejich koncentrace je pravdivý. Vlivem kolizí mezi částicemi se jen dosahuje mírně efektivnějšího transportu a za stejný čas se přijme více částic v poměru k celkové počtu vyslaných molekul.

Tab. 3.6: Časy přijetí první částice.

Počet vyslaných částic a_v [−]	Čas přijetí první částice t [ns]
1000	960
2000	860
3000	800
4000	790
5000	770
6000	720
7000	740



Obr. 3.6: Závislost počtu přijatých částic na počtu vyslaných částic – aktivní kolize

3.2.5 Proměnná vzdálenost přijímače a vysílače – aktivní kolize

Tato simulace by měla přinést výsledky, které ukáží jaký vliv má vzdálenost přijímače částic od jejich vysílače. Simulace bez aktivní kolize už ukázala, že s rostoucí vzdáleností výrazným způsobem klesá počet přijatých částic. Jaký vliv na tento jev bude mít aktivování kolizí mezi částicemi ukáže následující simulace. Parametry zůstávají totožné se simulací bez aktivní kolize. Nastaven je tedy stejný čas $t = 10\,\text{ms}$, stejný počet vyslaných částic 5 000 a mění se pouze vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem $d = 500\,\text{nm}$ až $10\,\text{mm}$.

Z tabulky hodnot 3.7 lze pozorovat zajímavou skutečnost. Oproti simulaci bez aktivní kolize totiž došlo k poklesu počtu přijatých částic. Pokles není nikterak dramatický, nicméně podobný jev v žádném ze scénářů s aktivní kolizí nenastal. U dvou největších vzdáleností poté už dochází k mírnému nárůstu počtu přijatých částic.

V rámci simulovaného prostoru jsou si v případě menších vzdáleností vysílač s přijímačem totiž hodně blízko a za přijímačem zůstává ještě množství volného prostoru, kam se mohou částice šířit. A právě tato skutečnost způsobí menší pokles v počtu přijatých částic. Vzájemnými srážky částic se totiž zvýší pravděpodobnost minutí detekční zóny přijímače a částice se tak dostanou do volného prostoru za přijímačem.

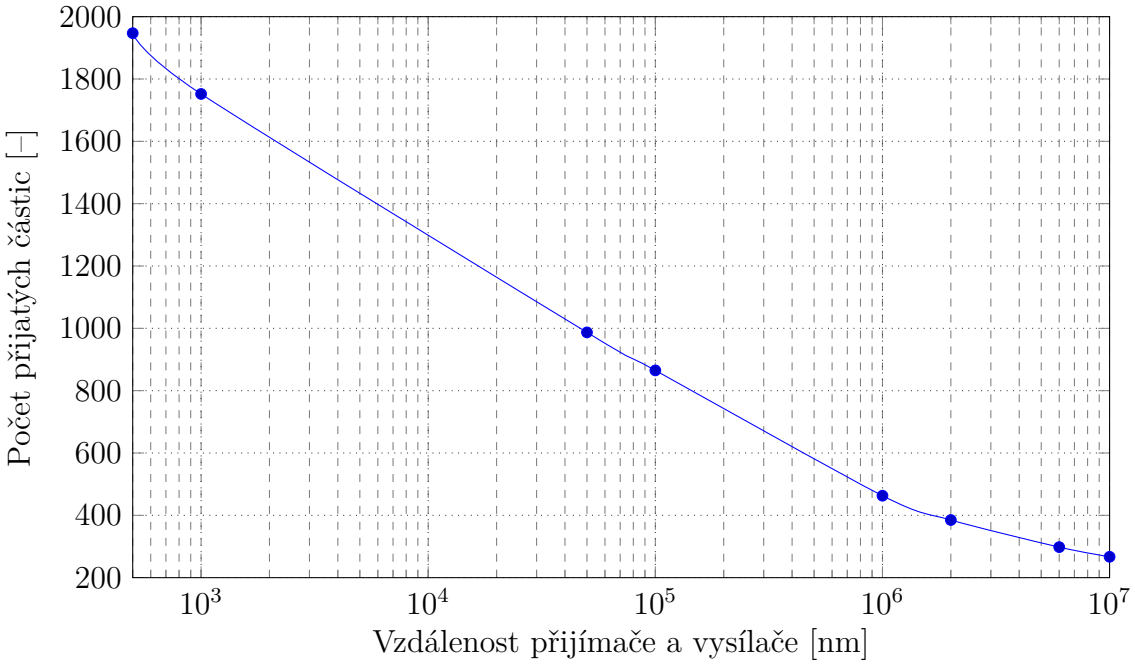
Tab. 3.7: Výsledky simulací s konstantními parametry $t = 10\,\text{ms}$, $a = 5000$ a aktivní kolizí.

Vzdálenost přijímače a vysílače $d\,[\text{nm}]$	Počet přijatých částic $a_p\,[-]$	Poměr přijatých a vyslaných částic $p\,[\%]$
500	1947	38,9
10^3	1752	35,0
$5 \cdot 10^4$	987	19,7
10^5	865	17,3
10^6	463	9,3
$2 \cdot 10^6$	385	7,7
$6 \cdot 10^6$	298	6,0
10^7	267	5,3

Z grafu 3.7 lze pozorovat přibližně lineární klesání počtu přijatých částic v závislosti na vzdálenosti přijímače a vysílače. Změnu sklonu v hodnotě $10^6\,\text{nm}$ lze vyložit tak, že počty přijatých částic jsou oproti kratším vzdálenostem mnohem menší a rozdíly v počtech přijatých částic jsou tak v jiných řádech.

3.2.6 Proměnná délka trvání simulace – aktivní kolize

U této simulace zůstává parametr vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem neměnný, nemění se ani počet vyslaných částic. Jediný parametr, který nezůstává konstantní je délka trvání simulace. Byly zvoleny stejné časové úseky, ve kterých se vyhodnocují



Obr. 3.7: Závislost počtu přijatých částic na vzdálenosti přijímače a vysílače

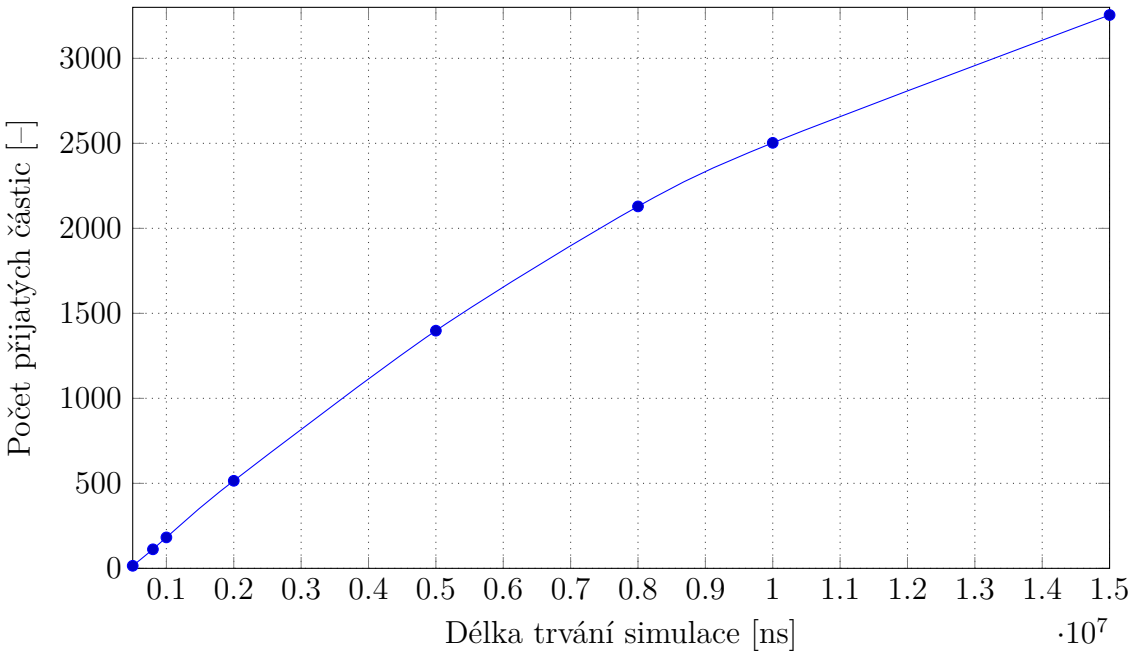
výsledky, tak aby se mohly porovnat s výsledky ze stejného scénáře ale bez aktivní kolize částic. Aby byly zaručeny stejné podmínky, byla vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem nastavena na 1 mm, počet vyslaných částic na 5000 a pro tento případ byly také aktivovány kolize mezi částicemi ($activeCollision = true$).

Tab. 3.8: Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 1\,\text{mm}$, $a = 5000$ a aktivní kolizí.

Délka trvání simulace t [ns]	Počet přijatých částic a_p [–]	Poměr přijatých a vyslaných částic p [%]
$5 \cdot 10^5$	15	0,3
$8 \cdot 10^5$	112	2,2
10^6	182	3,6
$2 \cdot 10^6$	515	10,3
$5 \cdot 10^6$	1398	28,0
$8 \cdot 10^6$	2129	42,6
$10 \cdot 10^6$	2503	50,1
$15 \cdot 10^6$	3255	65,1

Z výsledků v tabulce 3.8 lze pozorovat nárůst počtu přijatých částic při stejné délce trvání oproti scénáři bez aktivní kolize. S rostoucí délkou simulace se tento roz-

díl mezi scénáři zvětšuje. Takový výsledek lze vysvětlit interakcemi mezi vyslanými částicemi, které zvýší pravděpodobnost dřívějšího doražení částice do detekční zóny přijímače. Obdobného jevu bylo dosaženo i v ostatních scénářích s aktivní kolizí, kde se počet přijatých částic mírně navýšil.



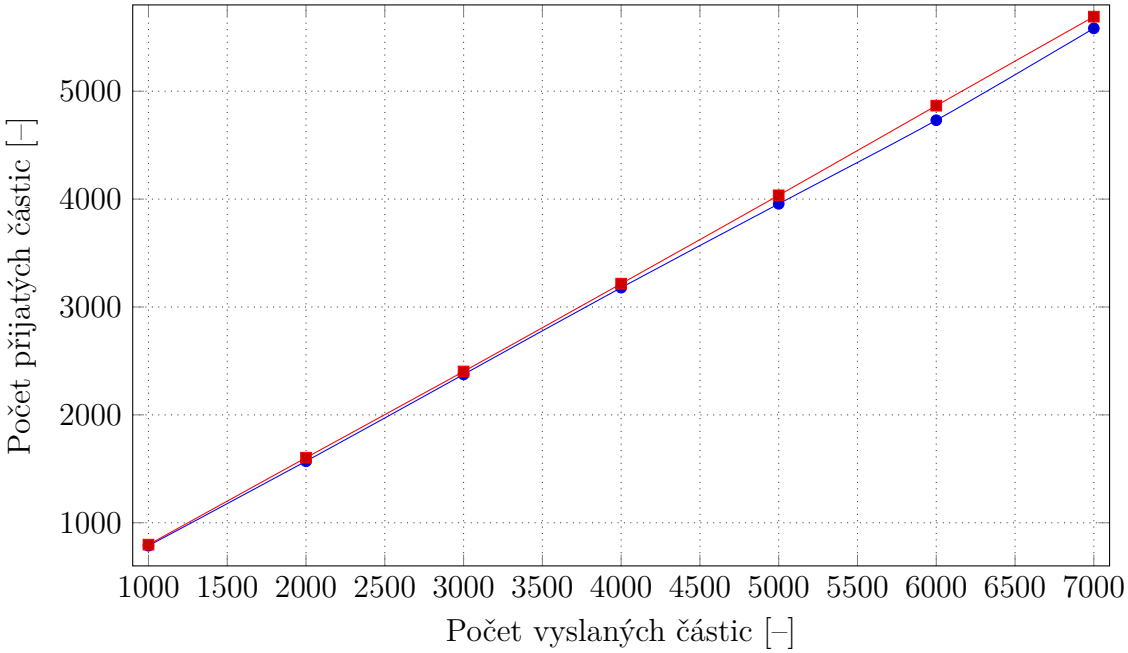
Obr. 3.8: Závislost počtu přijatých částic na délce trvání simulace

Z grafu 3.8 je zřejmý stoupající počet přijatých částic s délkou simulace. Lze ale pozorovat zpomalení růstu křivky u většího počtu přijatých částic. Je to z důvodu poklesu koncentrace částic v prostředí a jejich menší hustotě. Při delším trvání simulace lze tedy očekávat ještě pomalejší nárůst, až do přijetí všech vyslaných částic, kdy bude křivka trvale rovnoběžná s osou x.

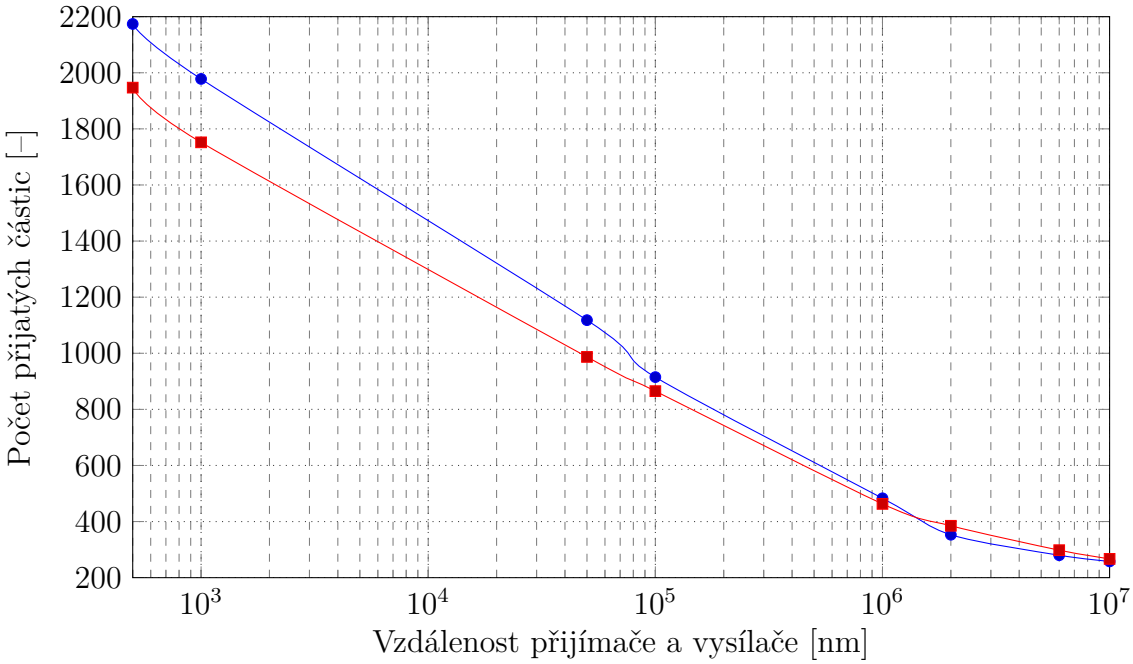
3.2.7 Porovnání výsledků scénářů s kolizí a bez kolize částic

Slovní komentář k výsledkům jednotlivých simulací se vždy nachází v příslušné kapitole. Pro lepší představu vlivu parametru kolize částic jsou výsledky scénářů umístěny do jednoho grafu, aby byly rozdíly více zřetelné. Modrá křivka představuje výsledky scénáře bez aktivní kolize částic a červená křivka potom výsledky ze scénářů s aktivní kolizí.

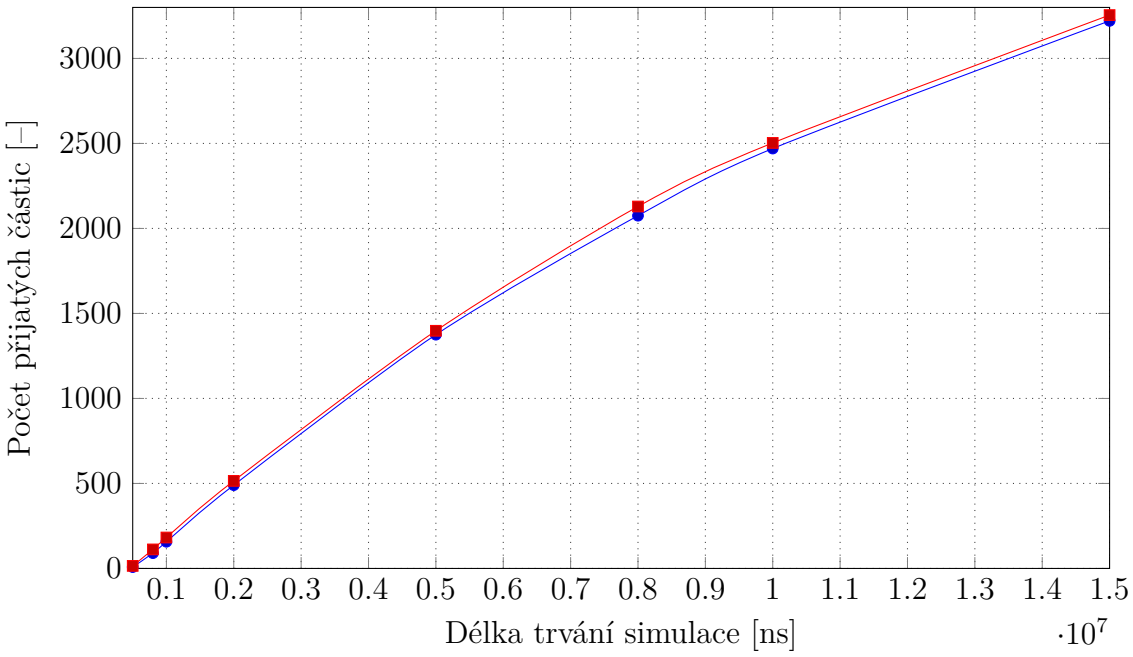
U scénářů 3.9 a 3.11 lze pozorovat určitou míru nárůstu počtu přijatých částic. Červená křivka má navíc strmější průběh. Výjimkou je ale scénář s proměnnou vzdáleností přijímače a vysílače 3.10. Zde se s aktivní kolizí dosahuje menších hodnot až do bodu přibližně $d = 1,5\,\text{mm}$, kde se přímky protnou a simulace s aktivní kolizí začne dosahovat vyšších hodnot přijatých částic. Je to způsobeno charakterem simulovaného prostoru, který v tomto případě ovlivňuje výsledek.



Obr. 3.9: Srovnání scénářů s proměnným počtem vyslaných částic



Obr. 3.10: Srovnání scénářů s proměnnou vzdáleností přijímače a vysílače



Obr. 3.11: Srovnání scénářů s proměnnou délkou simulace

3.3 Výsledky ze simulátoru NS-3

Stejně jako část s výsledky ze simulátoru N3Sim 2.1 bude i části s výsledky ze simulátoru NS-3 zahrnovat soupis parametrů a odpovídajících výsledků v tabulce a jejich grafické znázornění v grafu. Simulační scénáře jsou postaveny na stejném principu, kdy se mění jeden parametr a sleduje se jeho dopad na několik sledovaných veličin. Sledované hodnoty jsou zpoždění paketu při cestě od vysílače k přijímači (z [ps]), celkový čas potřebný k odsimulování scénáře (t [s]) a ztrátovost paketů (plr [%]).

U všech scénářů je nastaven konstantní čas simulace 3 s, frekvence generace paketů na 0,5 s, počet volně se pohybujících uzlů v prostoru na 100. Proměnnými parametry jsou počet routerů (n_R), počet vysílajívích uzlů (n_V), vzdálenost přijímače od vysílače (d [cm]) a technologie MAC vrstvy (Transparent/Smart). Jelikož je dosah směrujících uzlů omezený, vychází minimální počet směrujících uzlů pro každou vzdálenost vysílače a přijímače jinak. Tento minimální počet se musí dodržet, jinak by komunikace nebyla funkční. Bude ale sledován i dopad zvyšujícího se počtu směrovačů na cestě.

3.3.1 Závislost simulačního času na počtu vysílačů

Účelem prvního simulovaného scénáře je zjištění závislosti potřebného času pro dokončení simulace na počtu nano-částic. Zvyšuje se pouze počet vysílajících uzlů, přičemž počet uzlů volně se pohybujících v prostru zůstává konstantní. Všechny vysílače jsou umístěny do stejné vzdálenosti od přijímače a vysílají jeden po druhém, přičemž začátek vysílaní každého uzlu je náhodně generován z intervalu 0 až 0,1 s.

Rostoucí trend křivky 3.12 odpovídá předpokladu, že s roustoucím počtem částic ve scénáři roste i jeho výpočetní náročnost a celkový simulační čas je potom delší. Více uzlů totiž vyžaduje větší práci simulátoru jak z hlediska obsluhy samotných vysílačů, tak z ohledu obsluhy vyslaných paketů. Závislost ale není lineární, což napovídá tomu, že nároky nejsou pouze přímo úměrné počtu vysílačů, ale roli hrají také vyslané pakety. Jejich počet totiž s rostoucím počtem vysílačů neroste lineárně.

Tab. 3.9: Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\text{cm}$, $n_R = 15$ a Transparent MAC.

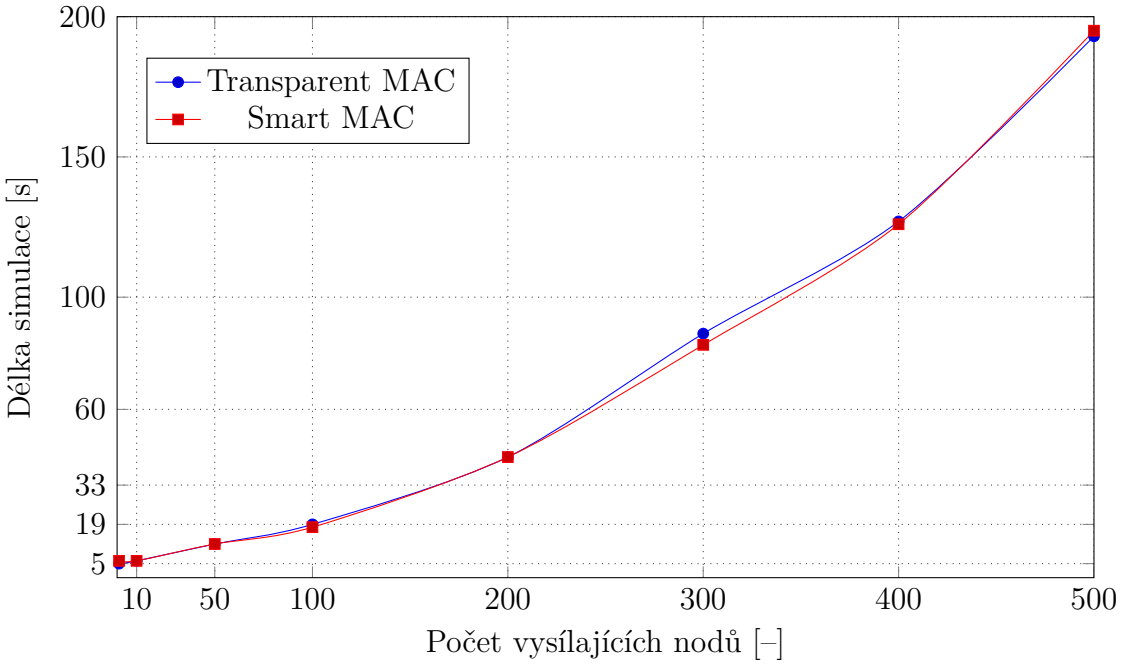
Počet vysílacích nodů n_V [−]	Zpoždění paketu z [ps]	Délka simulace t [s]	Ztrátovost paketů plr [%]
1	179041,65	5,00	5,56
10	179041,67	6,00	0,00
50	179041,58	12,00	0,00
100	179041,60	19,00	0,11
200	179041,59	42,80	0,27
300	179041,59	87,33	0,22
400	179041,59	127,20	0,16
500	179041,62	193,00	0,18

Tab. 3.10: Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\text{cm}$, $n_R = 15$ a Smart MAC.

Počet vysílacích nodů n_V [−]	Zpoždění paketu z [ps]	Délka simulace t [s]	Ztrátovost paketů plr [%]
1	179041,60	6,00	0,00
10	179041,58	6,20	0,00
50	179041,72	12,00	0,00
100	179041,53	18,80	0,00
200	179041,60	42,60	0,00
300	179041,57	82,80	0,00
400	179041,62	125,80	0,00
500	179041,64	195,00	0,00

Tento fakt se potom na křivce projeví tak, že s větším počtem částic je nárůst času rychlejší. V grafu 3.12 jsou zobrazeny dvě křivky, červená zobrazuje scénář pracující se Smart MAC a modrá křivka zobrazuje scénář s Transparent vrstvou MAC. Lze vidět, že technologie vrstvy MAC nemá vliv na náročnost simulace a obě křivky mají podobný tvar a částečně se překrývají.

Z výsledků v tabulkách 3.9 a 3.10 jde ale vidět jiný rozdíl mezi technologiemi. Zatímco Smart MAC zajistí spolehlivý přenos všech vyslaných paketů, u Transparent MAC dochází ke ztrátám. Největší ztrátovost je zaznamenána u scénáře s jedním



Obr. 3.12: Závislost délky simulace na počtu vysílačů

vysílačem, zde je ale výsledek trochu zkreslen, jelikož za celou dobu simulace bylo vysláno pouze 18 paketů. Ztráta 5,56% informací tak představuje ztrátu pouze jednoho paketu.

3.3.2 Závislost ztrátovosti paketů na počtu směrovačů

Druhý simulovaný scénář se bude věnovat závislosti počtu ztracených paketů na cestě mezi přijímačem a vysílačem a počtu směrovačů umístěných zde umístěných. Směrovače jsou rozmístěny na spojnici přijímače a vysílače. V simulátoru se nastaví pouze jejich počet a přesné souřadnice se dopočítají automaticky tak, aby byly mezi směrovači stejné rozestupy.

Opět je zvolena stejná délka simulace jako v přechozím scénáři (3 s). Počet vysílačů je 50, do prostoru je umístěno 100 volně se pohybujících uzlů a vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem zůstává na 70 cm. Pro srovnání se porovnají výsledky scénáře s nastavenou vrstvou MAC na Smart a na Transparent. Počet směrovačů se bude měnit od 10 do 50. Hodnoty jsou zvoleny adekvátně ke vzdálenosti, aby se závislost správně odrazila na výsledcích.

Tab. 3.11: Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\text{cm}$, $n_V = 50$ a Transparent MAC.

Počet směrovačů $n_R\,[-]$	Zpoždění paketu $z\,[\text{ps}]$	Délka simulace $t\,[\text{s}]$	Ztrátovost paketů $plr\,[\%]$
10	∞	9,20	100,00
14	∞	10,40	100,00
15	179041,58	12,00	0,00
20	234992,09	12,20	0,20
25	290942,56	12,60	0,13
27	313322,77	12,80	0,00
28	235100,20	13,00	86,20
29	340550,35	13,00	56,60
30	314125,93	14,00	72,13
35	350876,86	13,40	70,60
40	362283,83	13,80	56,33
50	403131,62	18,20	63,20

V tabulce 3.11 jsou uvedeny výsledky simulací s nastavením Transparent MAC a v tabulce 3.12 jsou výsledky pro scénář se Smart MAC. Ačkoliv je sledovaným parametrem především ztrátovost paketů, lze při pohledu na zbylé parametry vidět i jiné závislosti. Vzhledem k tomu, že je dosah směrovačů nastaven na 5 cm, je u scénářů, kde je směrovačů příliš málo a rozestupy mezi nimi přesahují jejich dosah, ztrátovost 100% a zpoždění tedy nekonečně velké.

Nejmenší počet směrovačů, nutných pro konvergenci sítě, činí v případě vzdálenosti 70 cm 15 směrovačů. Zde lze také vidět ideální fungování spojení, zpoždění

paketů je nejmenší, ztrátovost je nulová a simulace trvá nejkratší čas. S rostoucím počtem směrovačů roste zpoždění a také ztrátovost. Je potřeba upozornit na to, že jsou výsledky proměnné a neplatí, že při každé simulaci by byly výsledky stejné. Údaje zapsané v tabulkách 3.11 a 3.12 jsou průměrem z pěti simulací pro každé nastavení.

Tab. 3.12: Výsledky simulací s konstantními parametry $d = 70\,\text{cm}$, $n_V = 50$ a Smart MAC.

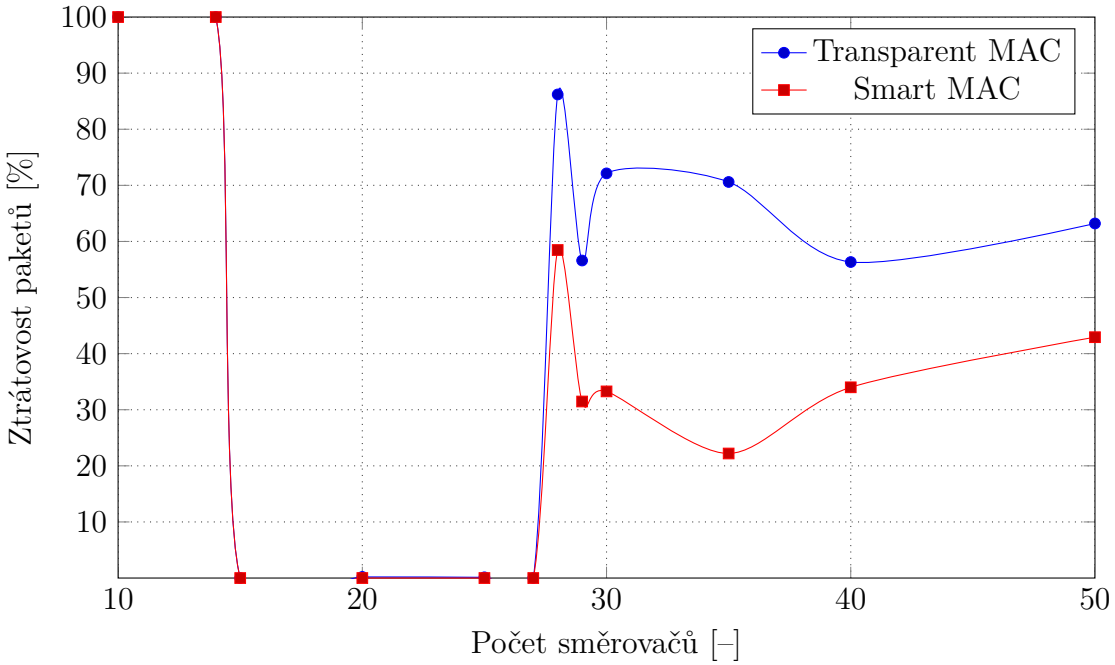
Počet směrovačů $n_R\,[-]$	Zpoždění paketu $z\,[\text{ps}]$	Délka simulace $t\,[\text{s}]$	Ztrátovost paketů $plr\,[\%]$
10	∞	33,00	100,00
14	∞	25,00	100,00
15	179041,72	12,00	0,00
20	234992,12	12,00	0,00
25	290942,60	12,80	0,00
27	313322,82	12,60	0,00
28	312149,67	22,00	58,47
29	386041,66	19,40	31,47
30	343032,88	20,20	33,27
35	404581,50	18,20	22,20
40	464992,60	20,60	34,00
50	425283,94	21,60	42,93

Z hodnot v tabulkách je sestaven graf 3.13. Modrá křivka reprezentuje scénář s Transparent MAC a červená Smart MAC. V první fázi lze pozorovat, že vývoj obou scénářů je totožný a křivky se tak překrývají. Odchylka je jen malá v oblasti mezi 20 a 27 routery. Zde se Smart MAC jeví o něco efektivnější. Jakmile se dosáhne minimální počet směrovačů (v případě vzdálenosti 70 cm je to 15), začne probíhat komunikace mezi vysílačem a přijímačem a to téměř beze ztrát na paketech.

Změna nastává, když se počet routerů zvýší na 29. V tomto případě dramaticky naroste ztrátovost a také se začnou projevovat rozdíly mezi Smart a Transparent MAC. Ztrátovost se zvětší zejména proto, že vzdálenost mezi routery se zmenší na přesnou polovinu jejich dosahu a do dosahové vzdálenosti jednoho směrovače se dostanou dva routery za sebou. Přesun paketu se zacyklí a paket nikdy k přijímači nedorazí.

Vzhledem k většímu počtu jednotlivých přesměrování se také zvýší náročnost simulací a roste čas potřebný k odsimulování. S rostoucím počtem směrovačů už ale ztrátovost opět klesá, až se ustálí kolem určité hladiny. Stále ale platí, že je pro-

měnná a při opakovaném simulování nedopadne úplně stejně. S tím, že se vzdálenosti mezi směrovači opět o něco zmenší způsobí, že už neleží na hranici svých dosahů a ztrátovost proto klesá. Z grafu je potom patrné, že technologie Smart MAC je pro komunikaci typu P2P (Point-to-Point) vhodnější, dosahuje totiž menší ztrátovosti.



Obr. 3.13: Závislost ztrátovosti paketů na počtu směrovačů

3.3.3 Závislost zpoždění paketů na vzdálenosti vysílače a přijímače

Poslední sledovanou závislostí bude hodnota zpoždění paketů po cestě od vysílače k přijímači v závislosti na jejich vzdálenosti. I v tomto scénáři zůstávají základní parametry jako délka simulace nebo počet nano-částic v prostoru stejné a to $3\,s$ a 100 částic. Mění se pouze vzdálenost vysílače a přijímače a s tím celý simulovaný prostor. Simulované vzdálenosti budou 10, 30, 60 a $100\,cm$. Se vzdáleností se musí měnit i počet směrovačů po cestě, aby byla dodržena vzdálenost mezi nimi a byly tak navzájem dostupné.

Všechny čtyři vzdálenosti jsou odsimulovány celkem třikrát a to pro různé počty vysílačů. Jejich počet je v prvním případě nastaven na 10 a v dalších scénářích se zvyšuje na 50 a 500. Z výsledků tak bude patrné, zda bude mít počet vysílačů vliv na zpoždění. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 3.13, 3.14 a 3.15. Sledované hodnoty jsou zpoždění paketu, čas potřebný pro odsimulování a také ztrátovost paketů.

Tab. 3.13: Výsledky simulací s konstantními parametry $n_V = 10$ a Smart MAC.

Počet směrovačů $n_R\,[-]$	Vzdálenost $d\,[\mathrm{cm}]$	Zpoždění paketů $z\,[\mathrm{ps}]$	Délka simulace $t\,[\mathrm{s}]$	Ztrátovost paketů $plr\,[\%]$
2	10	33570,28	6,60	0,00
7	30	89520,78	6,40	0,00
13	60	156661,40	6,20	0,00
21	70	246182,36	6,40	0,00

Tab. 3.14: Výsledky simulací s konstantními parametry $n_V = 50$ a Smart MAC.

Počet směrovačů $n_R\,[-]$	Vzdálenost $d\,[\mathrm{cm}]$	Zpoždění paketů $z\,[\mathrm{ps}]$	Délka simulace $t\,[\mathrm{s}]$	Ztrátovost paketů $plr\,[\%]$
2	10	33570,30	10,80	0,00
7	30	89520,84	10,80	0,00
13	60	156661,38	10,80	0,00
21	70	246182,21	11,60	0,00

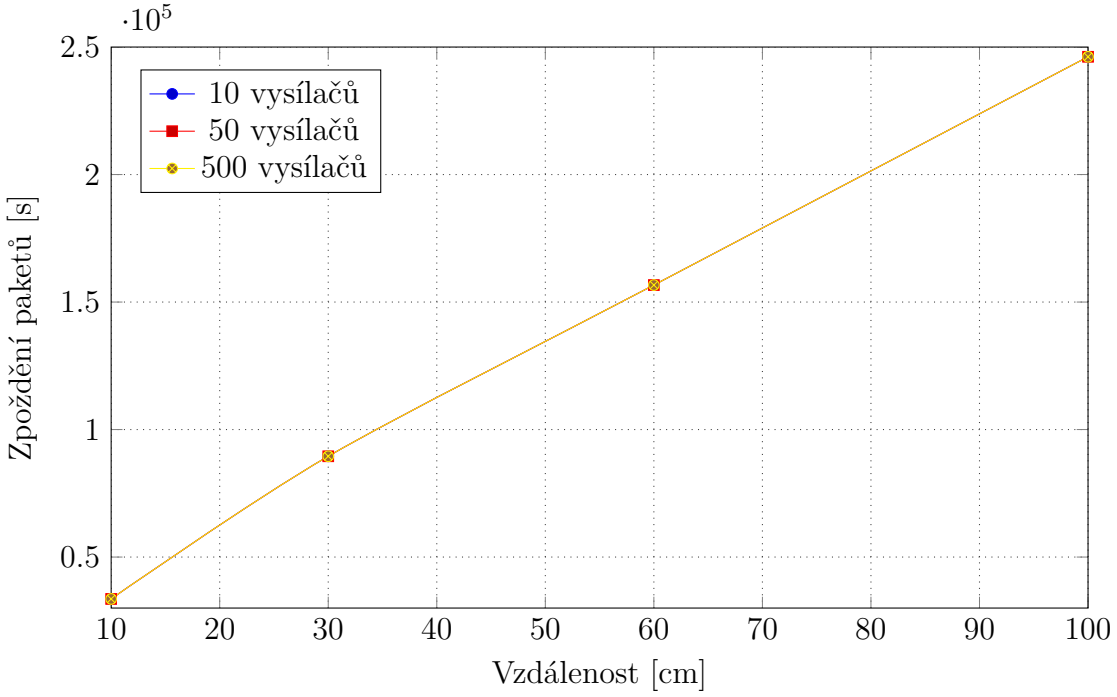
Z výsledných hodnot lze vyčíst jasně rostoucí trend zpoždění s rostoucí vzdáleností. Ztrátovost zůstává u všech scénářů nulová. U tohoto scénáře se počítá pouze s technologií vrstvy MAC Smart, Transparent MAC není zahrnuta do srovnání. V

Tab. 3.15: Výsledky simulací s konstantními parametry $n_V = 500$ a Smart MAC.

Počet směrovačů n_R [−]	Vzdálenost d [cm]	Zpoždění paketů z [ps]	Délka simulace t [s]	Ztrátovost paketů plr [%]
2	10	33570,30	174,80	0,00
7	30	89520,84	179,40	0,00
13	60	156661,39	176,80	0,00
21	70	246182,20	184,40	0,00

přechozích částech 3.3.1 a 3.3.2 totiž bylo ověřeno, že Transparent MAC v případě komunikace P2P (Point-to-Point) vykazuje větší ztrátovost paketů.

Simulační čas poté zůstává v rámci simulací se stejným počtem vysílačů přibližně stejný. Pokud se počet vysílačů zvýší, zvýší se také náročnost simulace a tím i čas potřebný k jejímu odsimulování. Délky simulací v případě scénáře s deseti vysílači (tabulka (3.13)) jsou téměř třicetkrát menší než u scénáře s pěti sty vysílači (tabulka (3.15)).



Obr. 3.14: Závislost ztrátovosti paketů na počtu směrovačů

Všechny tři scénáře jsou zaneseny do stejného grafu 3.14, přičemž modrá křivka znázorňuje scénáře s deseti vysílači, červená s padesáti vysílači a žlutá scénář s pěti

sty vysílači. Křivka je jasně rostoucí a to téměř lineárně. Důležitější poznatek je ale ten, že se křivky překrývají.

Lze tedy vyvodit, že počet vysílajících částic nemá žádný vliv na zpoždění paketů a čas potřebný k přenosu informace tak zůstává konstantní nezávisle na celkovém počtu přenášených paketů. Dalším zjištěním potom je, že ani při velkém počtu vysílajících uzlů nedochází k zahlcení přenosového kanálu a všechny vyslané pakety jsou doručeny k přijímači.

4 ZÁVĚR

Simulátor N3Sim pracuje s difusním šířením molekul a modul Nano-Sim v simulátor NS-3 pro komunikaci využívá elektro-magnetických pulsů. Bylo zjištěno, že scénáře nemohou být postaveny na stejných principech. Zatímco simulátor N3Sim se více hodí pro detailní zkoumání chování částic na krátkou vzdálenost, simulátor NS-3 využívá směrovačů a komunikace tak může probíhat na mnohem větší vzdálenosti s menší ztrátovostí. V simulátorech N3Sim a NS-3 byly provedeny tři simulace. Každá simulace měla za úkol sledovat konkrétní parametry a jejich vliv na sledované veličiny. Scénáře byly z důvodu odlišnosti obou simulátoru různé a pro každý simulátor byly postaveny zvlášť.

V případě simulátoru N3Sim s difusním šířením molekul byl pozorován vliv změny počtu vyslaných částic, změny vzdálenosti přijímače a vysílače a změna délka trvání simulace. Simulace dopadly dle očekávání a potvrdily se tak předpoklady. Při změně počtu vyslaných částic došlo k úměrnému nárůstu počtu přijatých částic a závislost byla vyhodnocena jako lineární.

Pokud se měnila vzdálenost nano-strojů (přijímače a vysílače) zásadním způsobem se měnil také počet přijatých částic. U vzdáleností větších docházelo k velice pomalému příjmu částic a za stejný čas tak dorazilo mnohem méně částic. Při proměnné délce simulace rovněž docházelo k zásadním změnám v počtech přijatých částic. Čím delší čas byla simulace prováděna, tím větší byl počet přijatých částic. Tento výsledek je také logický, při delším trvání je k přijmutí částic vyhrazena větší doba a je tak možno přijmout více částic. Pokud ovšem doba roste, už je v prostředí částic méně a počet přijatých částic už nestoupá takovým tempem.

Ve druhé fázi byly všechny simulace provedeny s aktivním parametrem kolize, který do simulace zahrne také vliv srážek jednotlivých částic. Při takové srážce dojde k vychýlení dráhy transportní molekuly, což má dopad na výsledek simulace. Očekávání se i v tomto případě potvrdilo. Při aktivaci tohoto parametru došlo k mírném nárůstu počtu přijatých částic. Výjimkou je jen scénář s proměnnou vzdáleností nano-strojů. Zde se nárůst dostavil až při větších vzdálenostech. U menších naopak došlo k mírnému poklesu. Způsobeno to je volným prostorem, který za přijímačem vznikl při jeho posunutí blíže k vysílači. Podrobnější vysvětlení tohoto jevu se nachází v komentáři u simulace 3.2.5.

Sledovanými závislostmi pro simulátor NS-3 byla časová náročnost simulace na počtu vysílačů, ztrátovost paketů na počtu směrovačů a zpoždění paketů na vzdálenosti přijímače a vysílače. Z výsledků vyplývá, že počet částic v simulaci je klíčovým faktorem. S přibývajícím počtem vysílačů a tedy i vyslaných paketů náročnost simulace roste a její odsimulování trvá déle. Pokud se bude sledovat rozdíl mezi technologií Smart MAC a Transparent MAC, pak v náročnosti pro simulátor rozdíl není,

ale už v prvním scénáři lze pozorovat větší ztrátovost v případě Transparent MAC. Je potřeba zmínit, že byla simulována Point-to-Point komunikace a tyto závislosti nemusí platit pro všechny typy komunikace.

Z dalšího scénáře, který se soustředí na vliv počtu směrovačů na ztrátovost paketů, jsou už patrné větší rozdíly mezi Smart a Transparent MAC. Pro fungující spojení vysílače s přijímačem bylo potřeba dosáhnout minimálního počtu směrovačů, přičemž tyto počty byly shodné pro obě technologie. Rozdíl je ovšem patrný při překročení hranice, kdy jsou už vzdálenosti mezi směrovači příliš malé, zde vykazují obě technologie vysokou ztrátovost, nicméně Transparent MAC je téměř dvakrát ztrátovější.

Posledním scénářem je závislost zpoždění na vzdálenosti vysílače od přijímače. Nárůst zpoždění jednotlivých paketů je v tomto případě zřejmý a rychlost růstu zpoždění je přibližně konstantní. Dopad vzdálenosti na zpoždění byl sledován pro tři různé počty vysílačů a závěr je takový, že větší počet vysílačů (vyslaných paketů) se na zpoždění a ani ztrátovosti nijak neprojeví.

LITERATURA

[1] FELICETTI, Luca, Mauro FEMMINELLA, Gianluca REALI, Tadashi NAKANO a Athanasios V. VASILAKOS. *TCP-like molecular communications*. 2014. Dostupné z: http://arxiv.org/pdf/1406.4259v1.pdf

[2] SÜKRÜ KURAN, Mehmet, H. Birkan YILMAZ, Tuna TUGCU a Bilge ÖZERMAN. *Nano Communication Networks: Energy model for communication via diffusion in nanonetworks*. 2010, s. 86-95. Dostupné z: http://202.114.89.42/resource/pdf/4906.pdf

[3] F. AKYLDIZ, Ian, Fernando BRUNETTI a Cristina BLÁZQUEZ. Computer Networks: Nanonetworks: A new communication paradigm. 2008. Dostupné z: http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/papers/2008/j3.pdf

[4] DRESSLER, Falko a Ozgur B. AKAN. Computer Networks: A survey on bio-inspired networking. 2010. Dostupné z: http://www.eee.metu.edu.tr/~ee644/References/bio-survey.pdf

[5] E. MIROLLO, Renato a Steven H. STROGATZ. Synchronization of pulse-coupled biological oscillators. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1990, s. 1645-1662. Dostupné z: http://math.bd.psu.edu/faculty/stevens/MATH497K/Papers/Syncrhonization.pdf

[6] [online]. [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: http://www.amir.uni-oldenburg.de/bilder/image_A_1.jpg

[7] LLATSER, Ignacio, Deniz DEMIRAY, Albert CABELLOS-APARICIO, D. Turgay ALTILAR a Eduard ALARCÓN. Simulation Modelling Practise and Theory: N3Sim: Simulation framework for diffusion-based molecular communication nanonetworks. 2013, s. 210-222. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S1569190X13001640/1-s2.0-S1569190X13001640-main.pdf?_tid=3a0b807c-6531-11e4-9bd6-00000aab0f01&acdnat=1415222463_c95974be4f3cb3c04a18ab6233165bdc

[8] MA, Z.S a A.W. KRINGS. Insect sensory system inspired computing and commnucations. 2009, s. 742-755. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870508000486

[9] AKYILDIZ, Ian F. a Josep SOLÉ-PARETA. NANONETWORKING CENTER IN CATALUNYA. *N3Sim Project Parameter List* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: http://www.n3cat.upc.edu/tools/n3sim/ParameterList

[10] Yr11-Biology-Revision. [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: http://yr11-biology-revision.wikispaces.com/Osmosis+and+Diffusion

[11] BLYTHE, GANNON, CRAIG a FEGAN. Care of the racing & retired greyhound. Dostupné z: http://www.dogracing.cz/upload/greyhound_krev.pdf

[12] ECKFORD, Andrew W., Nariman FARSAD, Satoshi HIYAMA a Yuki MORITANI. Microchannel molecular communication with nanoscale carriers: Brownian motion versus active transport. *10th IEEE International Conference on Nanotechnology*. 2010. DOI: 10.1109/nano.2010.5697990. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5697990

[13] Nsnam: overview. [online]. [cit. 2015-02-27]. Dostupné z: https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/

[14] PIRO, G., L. A. GRIECO, G. BOGGIA a P. CAMARDA. Simulating Wireless Nano Sensor Networks in the NS-3 Platform. *2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. IEEE, 2013, s. 67-74. DOI: 10.1109/WAINA.2013.20. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6550375

[15] PIRO, Giuseppe, Luigi Alfredo GRIECO, Gennaro BOGGIA a Pietro CAMARDA. Nano-Sim: simulating electromagnetic-based nanonetworks in the Network Simulator 3. *Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation Tools and Techniques*. ACM, 2013, s. -. DOI: 10.4108/icst.simutools.2013.251699. Dostupné z: http://eudl.eu/doi/10.4108/icst.simutools.2013.251699

[16] JORNET, Josep Miquel a Ian F. AKYILDIZ. Information capacity of pulse-based Wireless Nanosensor Networks. *2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. IEEE, 2011, s. 80-88. DOI: 10.1109/SAHCN.2011.5984951. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5984951

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a	počet transportních částic
a_p	počet přijatých částic přijímačem
a_v	počet vyslaných částic vysílačem
D	difuzní koeficient
d	vzdálenost přijímače a vysílače
DNA	Deoxyribonukleová kyselina – nositelka genetické informace
MAC	Media Access Control
MPU	Message Processing Unit
P2P	Point-to-Point
p	poměr přijatých a vyslaných částic
PHY	message processing unit
t	délka trvání simulace
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TS-OOK	Time Spread On-Off Keying
TTL	Time to Live
WNSN	Wireless Nano Sensor Network

5 PŘÍLOHY

Zdrojový kód modulu Nano-Sim a konfigurační soubor simulátoru N3Sim se nacházejí na přiloženém CD.