# 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


# NÁVRH MODELU POHYBU PRO NANO-ZAŘÍZENÍ V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ NS-3

DIDPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER´S THESIS


AUTOR PRÁCE Bc. JAN MIKLICA
AUTHOR



BRNO 2014

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

# NÁVRH MODELU POHYBU PRO NANO-ZAŘÍZENÍ V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ NS-3

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JAN MIKLICA
AUTHOR

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

BRNO 2014

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
**Telekomunikační a informační technika**

| | | | |
|---|---|---|---|
| ***Student:*** | Bc. Jan Miklica | ***ID:*** | 119533 |
| ***Ročník:*** | 2 | ***Akademický rok:*** | 2013/2014 |

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh modelu pohybu pro nano-zařízení v simulačním prostředí NS-3

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Diplomová práce se zabývá problematikou modelování pohybu biologicky inspirovaných nano-zařízení (např. molekuly, bakterie, viry, atd.). V rámci teoretické části se nejprve seznamte s obecnou charakteristikou nano-komunikací a také se specifickými vlastnostmi nano-sítí a jejich uzlů. Pozornost věnujte především způsobu pohybu nano-zařízení a přenosům informace na různé vzdálenosti. Praktická část práce bude nejprve zahrnovat analýzu stávajících nástrojů pro modelování nano-komunikací (např. N3Sim, NanoNS). V další části práce pak bude vytvořen model nano-sítě v prostředí NS-3, kdy bude snahou využít a dle potřeb upravit některý z aktuálně dostupných modelů pohybu a způsobu šíření signálů. Výstupem práce bude funkční model nano-sítě, který bude simulovat difúzní šíření nano-částic s cílem identifikovat minimální počet vyslaných nano-částic přenášejících požadovanou informaci na danou vzdálenost a za daný časový úsek. Výsledky modelu budou porovnány s výsledky simulace rovnocenného scénáře vytvořeného v jiných nástrojích.

**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:*** | 10.2.2014 | ***Termín odevzdání:*** | 28.5.2014 |

***Vedoucí práce:*** Ing. Jiří Hošek, Ph.D.
***Konzultanti diplomové práce:***

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

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## Abstrakt

Diplomová práce se soustředí na popis nanokomunikačních sítí, modelů pro bezdrátové a komunikační sítě a popis pohybu v těchto sítích. V praktické části je uveden popis nastavení simulačního scénáře pro definici Brownova pohybu. Popis je proveden pro simulační programy NS-3 a N3Sim. V diplomové práci jsou naměřené výsledky simulací shrnuty do tabulek a grafů. Z naměřených výsledků je sestavena regresní analýza. Obecné shrnutí výsledků je provedeno na konci diplomové práce.



## Klíčová slova

Nanokomunikační sítě, nanočástice, nanozařízení, N3Sim, NS-3, pohyb, simulace



## Abstract

This thesis focuses on the description of nanocommunication networks, models for wireless communication networks and the description of motion in nanocommunication networks. The practical part describes the settings of the simulation scenarios for the definition of Brownian motion. Description is made for the simulation software NS-3 and N3Sim. In this thesis, the measured results of the simulations are summarized in tables and graphs. From the measured results the regression analysis is prepared. General summary of the results is provided at the end of thise thesis.



## Keywords

Nanocommunication networks, nanoparticles, nanodevices, N3Sim, NS3, motion, simulation

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh modelu pohybu pro nano-zařízení v simulačním prostředí NS-3“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ..... .....

podpis autora

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Hoškovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.


V Brně dne ..... .....

podpis autora

Faculty of Electrical Engineering
and Communication

Brno University of Technology
Technicka 12, CZ-61600 Brno, Czechia

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

# Poděkování:

Výzkum popsaný v této diplomové 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.

V Brně dne .....  .....

podpis autora

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

2007–13
OP Výzkum a vývoj pro inovace

# Obsah

Úvod ..... 13

1. Nanokomunikační sítě ..... 14

1.1. Biologická inspirace ..... 15

1.1.1. Požadavky na nanozařízení ..... 16

1.1.2. Současný výzkum ..... 17

2. Modelování ..... 19

2.1. Propagační ztrátové modely ..... 19

2.1.1. Abstraktní ztrátové modely ..... 19

2.1.2. Deterministické ztrátové modely cesty ..... 20

2.1.3. Stochastické modely ..... 23

2.2. Srovnání modelů ..... 25

3. Pohyb v nanokomunikačních sítích ..... 28

3.1. Molekulové motory ..... 28

3.1.1. Bičíkový motor ..... 29

3.1.2. Syntetické DNA motory ..... 30

3.1.3. Katalytické motory ..... 30

3.2. Brownův pohyb ..... 30

3.3. Buněčná signalizace a mezibuněčná vazba ..... 31

3.3.1. Signalizace za pomocí vápníkových kationtů ..... 31

3.3.2. Mezibuněčná vazba ..... 32

..... 32

4. Simulační prostředí ..... 34

4.1. N3Sim ..... 34

4.2. NanoNS ..... 35

4.3. NS- 3 ..... 36

5. Simulace, praktická část ..... 38
5.1. N3Sim ..... 38
5.1.1. Přehled Parametrů ..... 39
5.1.2. Provázanost parametrů ..... 40
5.1.3. Nastavení vlastních simulačních parametrů ..... 40
5.1.4. Výsledky simulací ..... 42
5.2. NS-3 ..... 49
5.2.1. Random-Walk-2d-Mobility-Model ..... 49
5.2.2. Nastavení vlastních simulačních parametrů ..... 50
5.2.3. Výsledky simulací ..... 51
5.3. Srovnání výsledků NS-3 a N3Sim ..... 55
6. Regresní analýza ..... 57
6.1. Výsledné funkce regresních přímek ..... 59
Závěr ..... 61
Seznam použité literůry ..... 62
Seznam použitých veličin, symbolů a zkratek ..... 65
Seznam příloh ..... 66
Přílohy na cd ..... 66

# Seznam obrázků

1.1 Srovnání velikostí ..... 14

1.2 Zjednodušený model buňky. Přirovnání jednotlivých částí k jednotkám nanozařízení ..... 17

3.1 Znázorněný pohyb molekulového motoru po koleji ..... 29

3.2 Znázornění vápnikové signalizace s velkou koncetrací buněk ..... 32

3.3 Znázornění vápníkové signalizace s malou koncetrací buněk ..... 33

4.1 Blokový diagram N3Sim ..... 34

4.2 Blokový diagram NS-2 ..... 36

5.1 Simulační scénář ..... 38

5.2 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na počtu vyslaných nanočástic pro N3Sim ..... 44

5.3 Brownův pohyb – šíření nanočástic ..... 45

5.4 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti pro N3Sim ..... 47

5.5 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase pro N3Sim . 49

5.6 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti pro NS-3 ..... 53

5.7 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase pro NS-3.... 54

5.8 Graf Srovnání N3Sim a NS-3 v závislosti na vzdálenosti ..... 55

5.9 Graf Srovnání N3Sim a NS-3 v závislosti na čase ..... 56

6.1 Regresni přímka: N3Sim - vzdálenost ..... 58

6.2 Regresni přímka: NS-3 - vzdálenost ..... 58

6.3 Regresni přímka: N3Sim - čas ..... 59

6.4 Regresni přímka: NS-3 - čas ..... 59

# Seznam tabulek

2.1 Srovnání modelů část 1 ..... 25

2.2 Srovnání modelů část 2 ..... 26

5.1 Rychlost nanočástic ..... 42

5.2 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vyslaném počtu nanočástic. ..... 43

5.3 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti.pro N3Sim ..... 46

5.4 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočásticepřijímačem na čase.pro N3Sim.. 48

5.5 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti.pro NS-3. ..... 52

5.6 Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase.pro NS-3.... 54

# Úvod

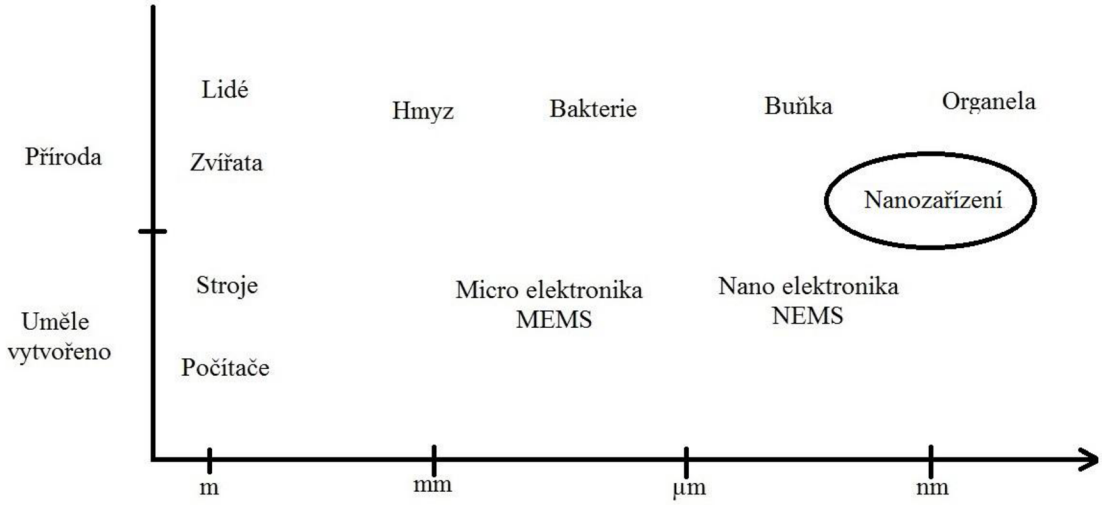
Myšlenka nanotechnologií byla představena v listopadu 1959, nositelem Nobelovy ceny (1965, fyzika) Richardem Freymanem v jeho přednášce nazvané "There's Plenty of Room at the Bottom". V této přednášce bylo představeno zařízení, které je sestavené z molekul či atomů a je schopné plnit zvolené požadavky. Pojem nanotechnologie byl zformulován zhruba o 15 let později. Od roku 2000 se nanotechnologie pomalu začínají dostávat do našich životů [1].

Potřeba se zabývat nanotechnologiemi je skutečně vysoká. Pokud by nanotechnologie byla realizována v plném rozsahu teoretického využití, byla by schopna ovlivnit, jak budoucí vývoj lidstva, tak život jedince. Perspektiva tohoto systému či technologie vykazuje plno kladných vlastností. Technologie by měla být schopna fungovat v různých prostředích typu: vzduch, krev, voda a to dokonce i na velké vzdálenosti v řádech kilometrů (například komunikace hmyzu pomocí feromonů). Infrastruktura nanokomunikační sítě vykazuje samostatnost, schopnost učit se, vyvíjet se, opravovat se, rozšiřovat se, velkou odolnost a spolehlivost. V oblasti medicíny je představa vytvoření nanorobotů, kteří budou aplikováni do lidského těla a pomáhat lidskému organismu k regeneraci, detekci či destrukci škodlivých onemocnění. Ve vojenském průmyslu je představa využití nanozařízení hlavně ke špionáži a obraně. V odvětví ekologie je potřeba pomáhat životnímu prostředí, tím že bude odstraněn nebo omezen nebezpečný odpad z různých továren. V obecném průmyslu bylo vytvořeno nanovlákno, ze kterého je možné vyrobit triko, které je z jedné strany schopné vodu propustit a z druhé strany naopak vodu nepropustit [1], [2].

V oblasti telekomunikací se s dobou zvedají požadavky na síť. Roste počet stanic, počet uzlů a síťový prostor se stále rozšiřuje. Proto je stále potřeba zaručit větší spolehlivost či funkčnost sítě. Nanokomunikační sítě by mohly představovat rozumné řešení do budoucna pro vylepšení stávající architektury sítě, popřípadě vytvoření úplně nové. Fungovaní by bylo na principu bezdrátových nebo mobilních sítí- přenos vzduchem. V další kapitole bude pojem nanokomunikační sítě podrobněji popsán [2].

# 1. Nanokomunikační sítě

Nanokomunikační sítě se obecně zabývají popisem tzv. nanozařízení, které se pohybují svojí velikostí přibližně od 1 nm až po 100 nm, ojediněle okolo 1 µm. V telekomunikačních sítích se informace přenáší hlavně pomocí elektromagnetických signálů. Ve světě nanokomunikačních sítí se informace přenáší hlavně pomocí nanozařízení či nanočástic. Pod pojmem nanozařízení si lze představit člověkem umělé sestrojené zařízení, ale také přírodní (biologické) objekty jako jsou viry, bakterie, organické molekuly apod. Směrovače či uzly v telekomunikačních sítích pomáhají najít ideální cestu od zdroje k cíli za pomocí protokolů (soubor pravidel pro komunikaci mezi dvěma nebo více uzly). V nanokomunikačních sítích je kladen větší důraz na jednotku, která přenáší informaci. Jednotka by měla být schopna se sama pohánět, opravovat, kontrolovat a směrovat. V dnešní době nanozařízení nesplňuje tyto podmínky. Pokud by nanozařízení bylo schopno ideálně splňovat tyto podmínky, nebylo by nutné vytvářet složitou infrastrukturu pro nanokomunikační sítě. Vytvoření složité infrastruktury by představoval technologický a ekonomický problém. Z těchto důvodů je kladen větší důraz na nanozařízení. Na obrázku číslo 1.1 je znázorněn rozdíl velikostí různých objektů vytvořené buď přírodou, nebo člověkem [1] [6].




Obr. 1.1: Srovnání velikostí [1].

. Nanozařízení, které je na obrázku zakroužkováno, leží v grafu mezi objekty, které sestrojila příroda a mezi objekty, které sestrojil člověk. Vytvoření čistě umělého nanozařízení, které splňuje všechny výše uvedené požadavky, představuje velký

technologický problém. Z těchto důvodů se hledá inspirace v přírodě. Budoucí vývoj se zaměřuje hlavně na vytvoření tzv. hybridů. Pod pojmem hybrid si lze představit objekt, který původně vytvořila příroda, ale tento objekt byl upraven člověkem, aby dosahoval cílových požadavků. Pro detailní představu je brán příklad, kde bakterie či virus mají v sobě zabudované řídící jednotky, které jim udávají pokyny pro obsluhu. Případně je možno vzít ideální buňku a částečně ji přestavět [1], [6].

## 1.1. Biologická inspirace

V přírodě existuje spousta systémů, které velmi napodobují chování nanokomunikačních sítí. Tyto systémy se také nazývají biologické systémy. Pod pojmem biologický systém si lze představit například hmyzí společenství, lidské tělo apod. Nejprve je nutné identifikovat analogii systému, tedy zjistit, které metody a struktury se nejlépe hodí pro řešení daného problému. Dále je nutné pochopit fungovaní systému a vytvořit detailní model. Po vytvoření modelu je vhodné model zjednodušit a aplikovat vhodné technologie [6].

Na základě pozorování chování různých biologických systémů, bylo vytvořeno přirovnání pro aplikace v síťování. Princip chování hmyzu, který žije v hromadném společenství (včely, mravenci), se dá aplikovat na vyhledávání, šíření, směrování, omezení přetížení v komunikačních sítích. Tyto velká hmyzí společenství se dají přirovnat k nanokomunikačním sítím a jednotlivci, kteří se zde pohybují, k jednotlivým nanozařízením. Různé pohyby či tanečky včel například informují o přítomnosti vetřelce. V nanokomunikačních sítích by tento princip mohl být využit k odhalování chybných zpráv. Výměna informací ve společenství probíhá pomocí semiochemických či infochemických zpráv, které se šíří podobným způsobem jako rádiové frekvence. Společenství mravenců se dá přirovnat k decentralizované síti, kde každá jednotka je schopná samostatné činnosti se specifickým úkolem. Mravenci jsou experti na vyhledávání potravy a zanechávání feromonové stopy pro ostatní, která ostatním umožňuje snadnější vyhledávání a směrování. Synchronizace světlušek se dá využít pro plně distribuovanou hodinovou synchronizaci v síti. Imunitní systémy složitějších organismů (savci apod.) se dají přirovnat k obranným systémům v nanokomunikačních sítí, tedy k odhalení a zneškodnění nežádoucích aplikací (viry, červy apod.) či anomálií. Šíření nemocí ve složitějších organismech se dá využít pro pochopení přetížení sítě či

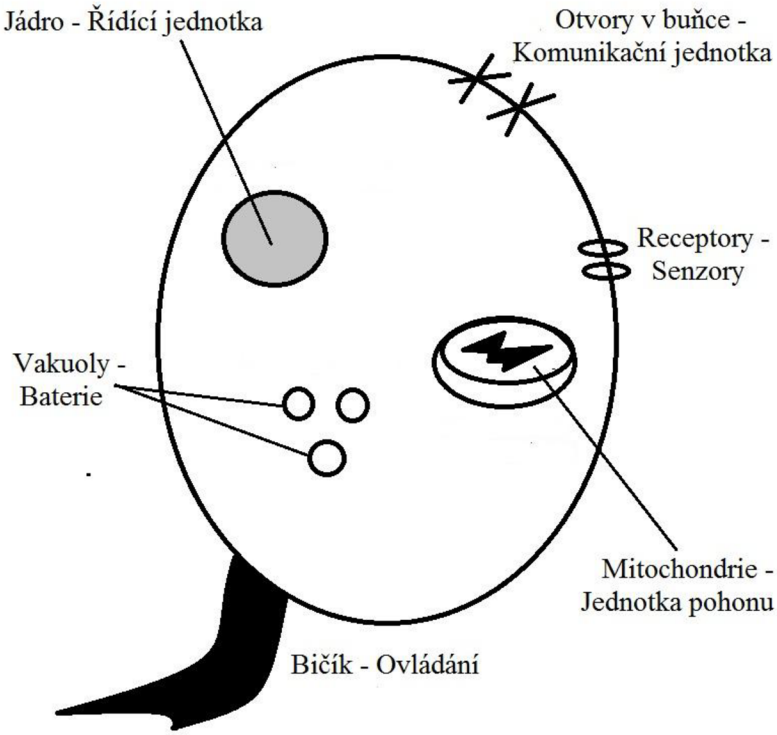
chovaní počítačových virů v komunikačních sítích. Signalizace buněk je užitečná k řešení problémů pro koordinaci a řízení masivních distribuovaných systémů [6].

### 1.1.1. Požadavky na nanozařízení

Nanozařízení v biologicky inspirovaných systémech splňují požadavky pro spolehlivé fungování nanokomunikačních sítí. Optimalizované nanozařízení by mělo obsahovat tyto jednotky [1]:

- Řídící jednotka: Část, která řídí a kontroluje ostatní jednotky v zařízení. Uchovává a poskytuje informace obsažené v zařízení [1].
- Komunikační jednotka: Skládá se z vysílače a přijímače pro výměnu zpráv [1].
- Reprodukční (regenerační) jednotka: Jednotka, která se stará o údržbu zařízení [1].
- Jednotka pohonu: Jednotka, která řídí pohyb zařízení. Schopnost čerpat energii z okolního prostředí [1].
- Senzory a ovladače: Ovladače jsou podobné komunikační jednotce. Slouží jako rozhraní komunikace mezi jednotkami v zařízení. Senzory zjišťují stav okolního prostředí [1].

V dnešní době není sestrojeno takové nanozařízení, která by mělo tyto jednotky plně optimalizované pro nanokomunikační sítě. V přírodě taková zařízení existuje, například buňky. Řídící jednotka se dá přirovnat k jádru, které buňku řídí a uchovává důležité informace. Komunikační jednotka se dá přirovnat k otvorům v buňkách, které umožňují výměnu zpráv pomocí hormonů mezi buňkami. Reprodukční jednotka je přirovnána k molekulárním sekvencím, které umožňují buňku dělit se stejnou DNA. Jednotka pohonu je přiřazena k mitochondriím, které umožňují pohyb buňky. Také chloroplasty v rostlinných buňkách mohou být přiřazeny k jednotce pohonu, protože jsou schopny přeměnit sluneční energii na chemické palivo. Senzory se dají přirovnat k přechodovým receptorům. Bičíky můžou zastávat funkci ovladačů [1].




Obr 1.2: Zjednodušený model buňky. Přirovnání jednotlivých částí k jednotkám nanozařízení [1].

### 1.1.2. Současný výzkum

Článek [6] pojednává o současných projektech, které se zabývají biologickou inspirací. Několik jich bude představeno:

- ANA (Autonomic Network Architecture): Cílem tohoto projektu je vyvinout nezávislou architekturu sítě, která umožňuje flexibilitu, dynamiku a nezávislost pro jednotlivé části v síti a pro síť samotnou. Výsledná autonomní síťová architektura umožní dynamickou adaptaci a reorganizaci sítě v závislosti na pracovní, ekonomické a sociální potřebě uživatelů. Realizace bude obzvláště náročná v mobilních sítích, kde se nové přístupové body stávají dynamické, administrativní domény se často mění, a ekonomické modely se mohou lišit. [6], [3].

- BioNet: Bio-síťová architektura pro návrh a implementaci variabilních a přizpůsobivých síťových aplikací [6].

- BIONETS CASCADAS: Bio-inspirovaný projekt pro vývoj nezávislých a plně informativních komunikací s dynamicky přizpůsobivými službami. BIONETS překonává heterogenitu zařízení a dosahuje škálovatelnosti prostřednictvím autonomní a lokalizované klient - klient komunikace. Služby v BIONETS jsou autonomní a jsou schopny se vyvíjet a přizpůsobovat okolnímu prostředí, jako živé organismy[6], [4] .

- ECAgents Haggle: Vývoj ztělesněných a komunikačních prostředků, které přímo operují v běžném prostředí a ne v mediu. Zaměřeno na autonomní komunikace [6].

- MC: Komunikace na molekulární úrovni. Hledaní řešení pro komunikaci mezi nanozařízeními [6].

- Swarmanoid: Návrh, implementace a řízení robotického systému [6].

- Swarm-bots: Návrh a implementace samo organizačních a samo aplikovatelných aplikací [6].

- WASP: Samo správa uzlů a služby v bezdrátové senzorové síti (WSNs) [6].

# 2. Modelování

Jak bylo zmíněno, v předchozí kapitole, vždy pro vytvoření nového projektu je potřeba se seznámit s daným problémem a před realizací je nutné vytvořit model či simulaci, která se danému problému přiblíží. Při modelování telekomunikačních sítí se nahlíží na několik parametrů, které daný problém objasňují.

Každý model má nastavené podmínky, podle kterých určuje chování v sítí a vyhodnocuje výsledky. Nejčastěji jsou tyto podmínky ve formě matematických rovnic. Modely jsou nejčastěji realizovány simulačními programy. V tomto případě jsou modely vytvořeny pomocí více simulačních prostředí, které budou podrobněji popsány v kapitole č.4. Většina modelů se zaměřuje na určité parametry. Modely jsou schopné některé parametry popsat velice užitečně, ovšem jiné parametry jsou popsány či vymodelovány špatné, nebo nejsou řešeny vůbec [1] [18].

V následující podkapitole budou představeny Propagační ztrátové modely [1], [18].

## 2.1. Propagační ztrátové modely

Tyto modely popisují parametry v bezdrátových sítích. Zaměřují se na sílu signálu, vysílání a příjem signálu, při podmínce nízké chybovosti. Tyto modely je možné rozdělit do tří kategorií [18]:

- Abstraktní ztrátové modely: Tyto modely nepopisují reálné chování sítě, ale jsou nutné ke konfiguraci k upřesnění daného scénáře [18].
- Deterministické ztrátové modely cesty: Tyto modely popisují deterministicky ztráty na přenosu z pohledu vzdálenosti od vysílače k přijímači [18].
- Stochastické modely: Tyto stochastické neboli náhodné modely popisují chování specifických cest, pro zohlednění nedeterministických jevů vzniklých při pohybování určitých objektů [18].

### 2.1.1. Abstraktní ztrátové modely

Tyto modely jsou zde popsány velice stručně. Slouží jako pomocné modely ke stanovení určitých parametrů [18].

- **Model pěvně nastavené síly přijatého signálu**

Bez ohledu na vzdálenost, je vždy přijatá hodnota signálu předem nastavena. Hodnota přijatého signálu není závislá na vysílacím výkonu. Uživatel musí nastavit úrovně přijímaného výkonu prostřednictvím atributu Rss nebo metody public SetRss () [18], [13].

- **Maticový ztrátový model**

Propagace ztrát je nastavena mezi uzly v síti. Ztráta šíření je stanovena pro každou dvojici uzlů a není závislá na svých skutečných pozicích. Využití u symetrických testů [18], [13].

- **Model maximální vzdálenosti**

Maximální vzdálenost vypočítává, z jaké vzdálenosti byl signál vyslán [18].

- **Model náhodným propagačních ztrát**

Propagace ztrát se řídí podle náhodné distribuce [18].

### 2.1.2. Deterministické ztrátové modely cesty

- **COST-Hata model**

Model je založený na předpovědi ztrát paketů na cestách v hustě obydlených oblastech například města. Tento model je jedním z těch nejstarších. Model byl původně vyvinut na mobilní sítě v rozsahu 1500 až 2000 MHz s CPE (Customer-premises equipment či customer-provided equipment nebo tzv. uživatelské poskytované zařízení), které může být použito až do výšky 10 m a s vysílačem položeným ve výšce 30 až 200 m. I přes svoje původní využití, se používá pro studii pásma v rozsahu 2360-2390MHz. Nicméně tento model slouží pro základ modelů, které se používají pro modelování útlumu v oblasti systémů WiMAX [18], [11].

Model se řídí těmito rovnicemi:

$$PL(dB) = 46{,}3 + 33{,}9log_{10}(f) - 13{,}82log_{10}(h_b) - ahm + (44{,}9 - 6{,}55log_{10}(h_b))\ log_{10}(d) + c_m \quad (2.1)$$

Kde $PL$ je vyjádření ztrát v dB, $f$ je kmitočet v MHz, $d$ je vzdálenost mezi BS (Base station- základní stanice či anténa) a CPE, v kilometrech a $h_b$ je výška BS nad zemí v metrech. Pomocný parametr $ahm$ je definován pro hustě zalidněné oblasti (2.2) a pro méně zalidněné oblasti (2.3) [11].

$$ahm = 3{,}2\ (log_{10}(11{,}75H_r))^2 - 4{,}97 \tag{2.2}$$

$$ahm = (1{,}1log_{10}(f) - 0{,}7)H_r - (1{,}56log_10(f)\ -0{,}8) \tag{2.3}$$

kde $H_r$ je výška CPE v metrech nad zemí [11].

- **Friis propagační model**

Tento model počítá s kvadratickými ztrátami na cestách, tak jak se tento jev vyskytuje ve volném prostoru. Friisovy přenosové rovnice vypočítávají sílu přijatého signálu v rámci jedné antény při ideálních podmínkách [18] [15].

$$\frac{P_r}{Pt} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \tag{2,4}$$

Kde $P_r$ je přijatá síla signálu (dBm), $P_t$ je síla vyslaného signálu (dBm), $G_t$ je hodnota na anténě vysílače (dBi/dBd), $G_r$ je hodnota na anténě přijímače (dbi/dBd), $\lambda$ je vlnová délka a $R$ je vzdálenost mezi uzly. Model dále vypočítá fakt, že při vyšší vysílací frekvenci dochází k vyšším ztrátám. Bohužel ideálních podmínek při vysílání není nikdy dosaženo [15].

- **Logaritmický ztrátový model podle vzdálenosti**

Tento model je podobný Friisovu propagačnímu modelu. Předpokládá exponenciální rozložení ztrát ve vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem. Je navržen na předměstské podmínky. Model vychází z dat, které se vysílají na kmitočtu 1,9 GHz z všesměrové antény, která slouží jako terminál ve výšce 2 m a díky této výšce jsou podmínky omezené. Model se řídí těmito rovnicemi [18] [7]:

$$PL = A + 10\gamma log_{10}(d/d_0) + \varsigma, \text{ kde } d \geq d_0 \tag{2.5}$$

Kde parametr $A$ je vyjádřen jako:

$$A = 20log_{10}(4\pi d_0/\lambda) \tag{2.6}$$

Kde $d_0$ je vzdálenost 100 m a $\lambda$ je vlnová délka. Parametr γ je Gaussovo náhodné rozložení pro populaci, která využívá makrobuňky. Je vyjádřen rovnicí [7]:

$$\gamma = (a - bh_b + c/h_b)\, x\sigma_\gamma, \text{ kde } 10\text{ m} \leq h_b \leq 80\text{m} \tag{2.7}$$

Kde parametr $h_b$ je výška antény základní stanice, hodnoty v závorce určují střední hodnotu $\gamma$ (parametry $a$, $b$, $c$ jsou v souladu se zařízením), $\sigma_\gamma$ je standardní derivace $\gamma$, $x$ je střední hodnota Gaussovy variabilní odchylky pro standardní jednotku, $a$, $b$, $c$ a $\sigma_\gamma$ jsou odvozené konstanty z odvozených dat podle terénu [7].

- **Trojitý logaritmický ztrátový model podle vzdálenosti**

Tento model je variantou pro Logaritmický ztrátový model podle vzdálenosti. Modely jsou si velice podobné v základních rovnicích. Jsou zde rozdílné faktory v logaritmickém rozložení ztrát na přenosu a pro rozdílné vzdálenosti [18].

- **Model na bázi dvou paprsků**

Tento model je založen na bázi dvou paprsků. Jeden paprsek jde přímou cestou od vysílače k přijímači a druhý je odražen od země. Model srovnává rozdíly mezi dvěma paprsky, kde každý šel jinou cestou. Rozdíly jsou především ve ztrátách. Model se řídí rovnicí [18] [8]:

$$r_{2-ray}(t) = Re\left\{\frac{\lambda}{4\pi}\left[\frac{\sqrt{G_l}u(t)e^{-j2\pi l/\lambda}}{l} + \frac{R\sqrt{G_r}u(t-\tau)e^{-j2\pi(x-x')/\lambda}}{x+x'}\right]e^{-j2\pi f_c t}\right\} \tag{2.8}$$

Kde $\tau = (x + x' - l)/c$ je relativní časové zpoždění z odrazu od země vzhledem k přímé cestě, $\sqrt{G_l} = \sqrt{G_a G_b}$ je výsledek vyzařovacího diagramu na vysílací a přijímací anténě, $R$ je koeficient odrazu od země a $\sqrt{G_r} = \sqrt{G_c G_d}$ je výsledek pole vyzařovacího diagramu na vysílací a přijímací anténě související s délkou paprsku $x$ a $x'$, kde $x$ je paprsek přímo vysílaný a $x'$ je paprsek, který se odrazil od země. Zpoždění šíření paprsku v tomto modelu závisí na zpoždění parametru τ [8].

### 2.1.3. Stochastické modely

- **Jakes model**

Jeden ze základních modelů vyvinutý konkrétně pro simulace mikro vln. Jakův model vypočítává propagační ztráty sadou několika vyslaných paprsků od vysílače k přijímači různými cestami při přenosu. Pro Jakův model bylo vyvinuto mnoho variant, ale všechny vychází ze základních rovnic pro vyjádření náhodného procesu pro dolní propust [18] [19]:

$$g(t) = E_0 \sum_{n=1}^{N} C_n \, e^{\wedge}[j(w_d t cos(\alpha_n) + \varphi_n] \tag{2.9}$$

Kde $E_0$ je měřítková konstanta, $C_n$ jsou náhodné cesty při různých vstupech, $\alpha_n$ je úhel příchozího signálu, $\varphi_n$ je vstupní fáze spojená s $n$ náhodnými propagačními cestami a $w_d$ je maximální radián Dopplerovi frekvence pro $\alpha_n = 0$ [19]. Za předpokladu, že $E_0$ náleží R pak:

$$g(t) = g_c(t) + j g_s(t) \tag{2.10}$$

$$g_c(t) = E_0 \sum_{n=1}^{N} C_n \, cos[j(w_d t cos(\alpha_n) + \varphi_n] \tag{2.11}$$

$$g_s(t) = E_0 \sum_{n=1}^{N} C_n \, sin[j(w_d t cos(\alpha_n) + \varphi_n] \tag{2.12}$$

Podle centrální limitní věty můžou být hodnoty $g_c(t)$ a $g_s(t)$ aproximovány jako Gaussův náhodný proces pro počet $N$ [19].

- **Nakagami model**

Model popisuje charakteristiky ztrát na krátké a dlouhé vzdálenosti. Nakagami-m distribuce je vhodná pro popisování statistik mobilního rádiového přenosu ve složitých prostředích, jako jsou městské prostředí. V praxi se ukázalo, že distribuce jsou velmi užitečné kvůli snadné manipulaci a široké škále použitelnosti různých aproximací. Vzhledem k tomu, že Nakagami-m náhodný proces je definován jako obálka součtu $2m$ nezávislých Gaussových náhodných procesů, platí pro Nakagami-m distribuce [18] [17]:

$$p_z(z, \Omega) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m z^{2m-1} e^{\left(-\frac{m}{\Omega} z^2\right)} \tag{2.13}$$

pro $z > 0$, $m \geq ½$

Kde $z$ je přijímaná úroveň signálu, $\Gamma$ je gama funkce, $m$ je parametr blednutí hloubky definován jako [17]:.

$$m = \frac{E^2[z]}{Var[z^2]} \tag{2.14}$$

Kde $\Omega$ je střední hodnota signálu pro kterou platí [17]:

$$\Omega = E\ [z^2] \tag{2.15}$$

## 2.2. Srovnání modelů

Pro lepší přehled je v práci obsažena tabulka srovnání modelů na základě práce [18].

Tabulka 2.1: Srovnání modelů část 1[18]

| Modely | Spolehlivost v síti [%] | CPU čas [µs/paket] |
|---|---|---|
| **COST-Hata model** | Pro TXP [1 mW] - 2 | Pro TXP [1 mW] - 10 |
| | Pro TXP [10 mW] - 3 | Pro TXP [10 mW] - 10 |
| | Pro TXP [100 mW] - 5 | Pro TXP [100 mW] - 10 |
| | Pro TXP [1000 mW] - 50 | Pro TXP [1000 mW] - 10 |
| **Friis propagační model** | Pro TXP [1 mW] - 40 | Pro TXP [1 mW] - 8 |
| | Pro TXP [10 mW] - 35 | Pro TXP [10 mW] - 8 |
| | Pro TXP [100 mW] -4 | Pro TXP [100 mW] -8 |
| | Pro TXP [1000 mW] - 5 | Pro TXP [1000 mW] - 8 |
| **Logaritmický ztrátový model podle vzdálenosti** | Pro TXP [1 mW] - 3 | Pro TXP [1 mW] - 8 |
| | Pro TXP [10 mW] - 5 | Pro TXP [10 mW] - 8 |
| | Pro TXP [100 mW] - 35 | Pro TXP [100 mW] - 8 |
| | Pro TXP [1000 mW] - 50 | Pro TXP [1000 mW] - 8 |
| **Trojitý logaritmický ztrátový model podle vzdálenosti** | Pro TXP [1 mW] - 55 | Pro TXP [1 mW] - 10 |
| | Pro TXP [10 mW] - 50 | Pro TXP [10 mW] - 10 |
| | Pro TXP [100 mW] - 45 | Pro TXP [100 mW] - 10 |
| | Pro TXP [1000 mW] - 10 | Pro TXP [1000 mW] - 10 |
| **Model na bázi dvou paprsků (anténa ve výšce 1m)** | Pro TXP [1 mW] - 40 | Pro TXP [1 mW] - 8 |
| | Pro TXP [10 mW] - 50 | Pro TXP [10 mW] - 8 |
| | Pro TXP [100 mW] - 38 | Pro TXP [100 mW] - 8 |
| | Pro TXP [1000 mW] - 20 | Pro TXP [1000 mW] - 8 |
| **Jakes model** | Pro TXP [1 mW] - 25 | Pro TXP [1 mW] - 34 |
| | Pro TXP [10 mW] - 35 | Pro TXP [10 mW] - 34 |
| | Pro TXP [100 mW] - 10 | Pro TXP [100 mW] - 34 |
| | Pro TXP [1000 mW] - 5 | Pro TXP [1000 mW] - 34 |
| **Nakagami model** | Pro TXP [1 mW] - 10 | Pro TXP [1 mW] -32 |
| | Pro TXP [10 mW] - 35 | Pro TXP [10 mW] - 32 |
| | Pro TXP [100 mW] - 25 | Pro TXP [100 mW] - 32 |
| | Pro TXP [1000 mW] - 8 | Pro TXP [1000 mW] - 32 |

Tabulka 2.2: Srovnání modelů část 2[18]

| Modely | Standardní parametry |
|---|---|
| **COST-Hata model** | Centrální frekvence - 2.3 GHz |
| | Základní stanice výška antény - 50 m |
| | Mobilní stanice výška antény - 3 m |
| | Minimální vzdálenost - 0,5 m |
| **Friis propagační model** | Vlnová délka - 58,25 mm |
| | Parametr systemových ztrát - 1 |
| | Minimální vzdálenost - 0,5 m |
| **Logaritmický ztrátový model podle vzdálenosti** | Exponet - 3 |
| | Referenční vzdálenost - 1m |
| | Referenční ztráty - 46,67 dB |
| **Trojitý logaritmický ztrátový model podle vzdálenosti** | Vzdálenost - 1m , 200m, 500m |
| | Exponenty: 1,9; 3,8; 3,8 |
| | Referenční ztráty na 1m - 46,67 dB |
| **Model na bázi dvou paprsků (anténa ve výšce 1m)** | Vlnová délka - 58,25 mm |
| | Parametr systemových ztrát - 1 |
| | Minimální vzdálenost - 0,5 m |
| | Výška vysílače nad zemí - 0 m |
| **Jakes model** | Počet paprsků na jednu "cestu" - 1 |
| | Počet oscilátorů na paprsek - 4 |
| | Doplerova frekvence - 0 Hz |
| | Distrbuce nastavena Constant(1) |
| **Nakagami model** | Vzdálenost - 80m , 200m |
| | Exponenty: 0,75; 0,75; 1,5 |

V tabulce 2.1 část 1 sloupec spolehlivost v síti vyjadřuje v % počet přijatých paketů vzhledem k počtu vyslaných paketů. Sloupec CPU (Central Processing Unit – centrální výpočetní jednotka) čas vyjadřuje čas výpočtu pro hodnotu signálu jednoho paketu. Hodnota TXP (Text Pattern) vyjadřuje nastavení ve zdrojovém kódu pro webové aplikace. Je to univerzální systém pro správu obsahu vhodný pro nasazení v mnoha kontextech. V druhé části jsou popsány standardní parametry, které je potřeba ošetřit při nastavení modelu pro správný chod a výsledky. Směrování používá protokol DSDV [18].

Hodnoty se liší hlavně pro nastavení hodnoty TXP. Pokud by byl použit jiný protokol, tabulka srovnání se bude lišit [18].

Při komunikaci v nanokomunikačních sítích je důležitým faktorem vzdálenost. Princip směrování či pohybu je rozdílný na krátkou vzdálenost a na dlouhou vzdálenost. Krátká vzdálenost je definována od řádu nanometrů po milimetry. Dlouhá vzdálenost je definována od řádu milimetrů po kilometry. Na krátkou vzdálenost se využívají buď molekulové motory, nebo tzv. signalizace za pomocí vápníkových kationtů. Na delší vzdálenost se používá tzv. komunikační proces využívající feromony. Podrobnější popis následuje v další kapitole [1].

# 3. Pohyb v nanokomunikačních sítích

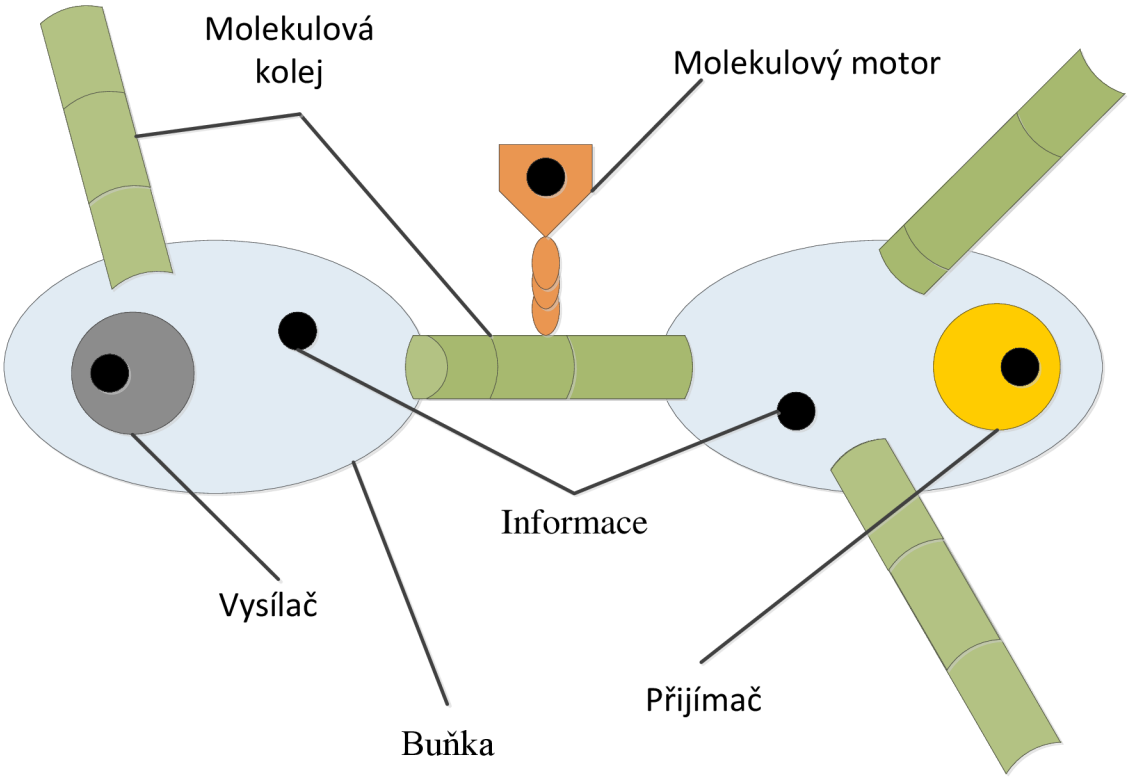
V předchozích kapitolách byl popsán rozdílný způsob přenášení informací v nanokomunikačních sítích a v klasických sítích. Je nutné stanovit parametry, které charakterizují pohyb nanočástice v nanokomunikačních sítích. V klasických telekomunikačních sítích je pohyb charakterizován zpožděním příchozího signálu, rychlostí přenosu a případně parametry signálu jako SNR (Signal to Noise Ration)- poměr odstupu hodnoty užitečného signálu od nežádoucího šumu. Jednotka je v decibelech [dB]. Pro bližší určení parametrů pohybu v nanokomunikačních sítích je nutné přiblížit si danou problematiku. V simulačních prostředích bude simulován pohyb nanočástice na principu náhodného pohybu. V dalších podkapitolách budou vyjádřeny způsoby pohybu v nanokomunikačních sítích [5].

## 3.1. Molekulové motory

Způsob pohybu pomocí molekulových motorů se používá při komunikaci na kratší vzdálenost hlavně pro komunikaci mezi buňkami [1]. Molekulové motory si lze představit jako mechanickou součást pohybové jednotky, která pohybuje danými nanočásticemi. Přírodní molekulové motory čerpají energii přeměnou různých typů proteinů. Molekulové motory používají pro pohyb tzv. koleje. Pod pojmem koleje si lze představit dráhy složené z mikrotubul, na které se buňka naváže (podobně jako vlak na koleje) a sleduje trasu od vysílače k přijímači (v tomto případě přijímač i vysílač představuje buňku). Existuje více typu kolejí, po kterých se nanočástice může pohybovat. Typ koleje, kterou si nanočástice či buňka vybere, závisí na typu zprávy, která je přenášena, typu proteinu, který je použit při pohonu molekulového motoru a na životnosti dané buňky [5]. Pokud se nanočástice nepohybuje po molekulových kolejích, způsob pohybu nanočástice i s molekulovými motory se podobá Brownovu pohybu. Princip mechanismu řízení pohybu řídí hlavně ATP (Adenosine-TriphosPhate) [5].

ATP se skládá ze třech fosfátů α, β a γ. Změny hladin ve fosfátu γ, umožňují změn hladin energie v buňce a umožňují pohyb kupředu [5]. Fosfát α určuje pohyb do stran o úhel 70 stupňů. Motory s větší velikostí jsou schopny se pohybovat rychleji. Molekulární motory musí být schopny zpracovávat směrovací informace pro správné určení cesty. Schopnost motoru přenést určitou velikost dané informace závisí na

rychlosti motorů, průměru mikrotubuly (jedna z možností kolejí, po kterých se nanočástice pohybuje), na velikosti motoru a na maximálním průtoku u uzlů či větví v kolejích[1] [5].




Obrázek 3.1: Znázorněný pohyb molekulového motoru po koleji [1].

Molekulové motory mohou být typu [1], [5]:

### 3.1.1. Bičíkový motor

Bičíkový pohon je využíván hlavně u bakterií, například u Serratia marcescens. Velikost bakterie se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 µm. Naproti tomu velikost bičíků se pohybuje v rozmezí 20 nm až 10 µm. Počet bičíků u této bakterie se pohybuje v rozmezí 4 až 10. Rychlost rotování bičíků se pohybuje v rozmezí 100 až 300 Hz. Pohonová síla motoru se pohybuje okolo 0,45 pN. Díky těmto parametrům je bakterie schopna se pohybovat rychlostí 47 µm / s. Bakterie se pohybuje náhodně, pokud nemá stanoven nějaký cíl. Je schopna velmi variabilně měnit rotaci bičíků a tím pádem i směr. Pokud bakterie zachytí nějaký typ molekulové koleje, změní se náhodný způsob pohybu na typ pohybu, který má stanovený určitý cíl [5].

### 3.1.2. Syntetické DNA motory

Tyto motory jsou založeny na syntetických reakcích v DNA (Deoxyribo Nucleic Acid), konkrétně mezi DNA vlákny. Nanočástice se pohybuje přímo po vláknech DNA. Způsob pohybu motoru je závislý na vnějších podmínkách, jako je teplota a koncentrace iontů v prostředí. Podle těchto vnějších podmínek si motor vybírá typ vlákna DNA, který využije ke svému pohybu [5].

### 3.1.3. Katalytické motory

Pod katalyzátorem si je možno představit látku, která zvyšuje nebo snižuje počet chemických reakcí díky své přítomnosti. Jako příklad je možno uvést rozpad peroxidu vodíku na vodu a kyslík. Díky přítomnosti katalyzátoru je možno vyvažovat propustnost kolejí v síti. Díky těmto chemickým reakcím v nanočásticích, je možno uvést nanočástici do pohybu, za pomocí vzniklé energie při rozpadu určitých látek [5].

Díky předchozím poznatkům, je možno si všimnout, že vlastnosti pohybu molekulových motorů, jsou závislé na [5]:

- Typu konstrukce motoru- výkon
- Typu koleje, po které se nanočástice pohybuje
- Množství přenášené informace

## 3.2. Brownův pohyb

Brownův pohyb byl zaznamenán v roce 1827 skotským biologem Robertem Brownem. Brownův pohyb definuje náhodný pohyb částic ve vodním a v plynném prostředí. Částice se neustále srážejí mezi sebou vlivem tepleného pohybu. Částice se svým neustálým pohybem snaží vyrovnat koncentraci v prostředí. Pokud jsou například vloženy pylové částice o velikost polévkové lžíce do sklenice, za určitý čas se vyrovná koncentrace ve sklenici a to i bez urychlení jako je například míchání. Brownům pohyb je možno vyjádřit mnoho rovnicemi pro mnoho parametrů. Zde budou uvedeny rovnice, které nejlépe popisují pohyb. Rovnice 3.1 vyjadřuje plochu, která může být pokryta částicemi [5]:

$$[z_n^2] = Nl^2 \tag{3.1}$$

Kde $z_n^2$ vyjadřuje plochu, která může být pokryta nanočásticemi či informacemi. Proto je tato hodnota v hranatých závorkách. Je to vyjádření očekávané hodnoty. *N* značí počet skoků tedy počet změn rychlosti a směru částic. Parametr *l* značí délku skoku, tedy po jaké vzdálenosti či čase nanočástice změní svůj směr a rychlost. Z tohoto vztahu je možné odvodit vzdálenost šíření [5]:

$$R = \sqrt{[z_n^2]} = l\sqrt{N} \tag{3.2}$$

Kde *R* představuje vzdálenost šíření informace.

Rovnici 3.1 je možné rozšířit následujícím způsobem:

$$[z^2] = Nl^2 = \frac{t}{\tau}([v])\tau l = ([v]l)t \tag{3.3}$$

Kde $\tau$ představuje čas mezi kolizemi částic, $[v]$ značí průměrnou rychlost částic, $t$ je celkový čas šíření částic a *N* a *l* jsou stejné parametry jako v rovnici 3.1.

Z těchto rovnic je možné vyjádřit souřadnicový koordinovaný systém:

$$[r^2] = 3\,[v]lt = Dt \tag{3.4}$$

Kde $[r^2]$ představuje souřadnicový koordinovaný systém pro 3 prostory, *D* je difúzní koeficient a parametry *v*, *l* a *t* jsou stejné jako v rovnici 3.3 [5].

## 3.3. Buněčná signalizace a mezibuněčná vazba

Tento způsob pohybu je zvolen na krátké vzdálenosti, stejně jako u molekulových motorů. Při tomto způsobu pohybu není použit molekulový motor. Signalizace je důležitým faktorem v nanokomunikačních sitích, protože má také svůj specifický způsob pohybu. Signalizace je také přenášená buňkami, které jsou pro signalizaci určeny. Signalizace určuje budoucí pohyb v sítích obecně. Způsob pohybu signalizace mezi buňkami či nanočásticemi je spíše podobný Brownovu pohybu. Chybovost je omezena počtem vyslaných buněk- velký počet znamená velkou šanci ke správnému doručení signalizace[5].

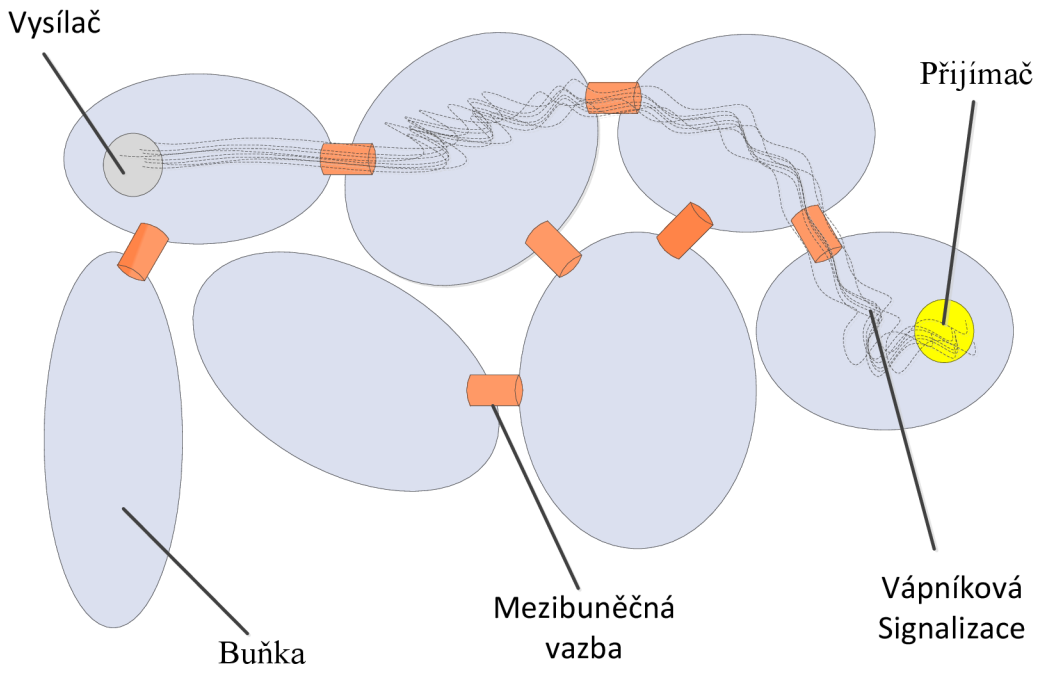
### 3.3.1. Signalizace za pomocí vápníkových kationtů

Pro buněčnou signalizaci se používají vápníkové kationty ($Ca^{2+}$). Buňky využívají určité množství energie, ke koncentraci hladiny vápníkových kationtů. ATP v buňce uvolňuje řádově milióny kationtů vápníku za sekundu, které se pohybují na

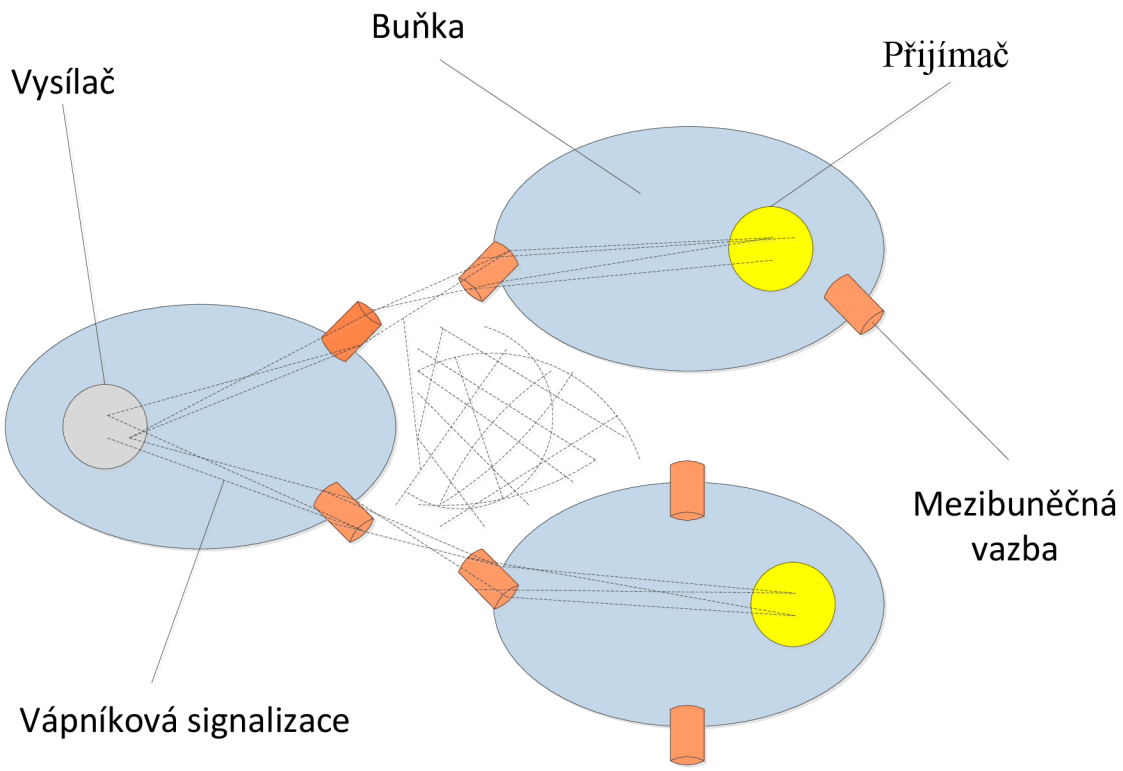
principu Brownova pohybu od jedné buňky k druhé. Tento způsob pohybu nastává v prostředí, kde je malá koncentrace buněk a ty mezi sebou přímo nesousedí. Při pohybu u signalizace hraje také důležitou roli frekvence a amplitudová modulace. Vápníkové kationty mohou také procházet mezibuněčnými vazbami. Tento způsob pohybu nastane, pokud je v prostředí velká koncentrace buněk, které se dotýkají [5].

### 3.3.2. Mezibuněčná vazba

Mezibuněčná vazba se nachází mezi sousedními buňkami. Jsou to fyzické kanály, které spojují sousední buňky. Tyto kanály se otevírají, pokud k tomu dostanou pokyn od jedné ze sousedních buněk. Mezibuněčná vazba se skládá z proteinu zvaný Connexin, kterého může být přes 20 druhů. Tyto kanály jsou zvláštní především v tom, že zde může být přenášen určitý typ informace a to nejen v podobě binární 1 či 0 (ano – ne, on – off) [5].




Obrázek 3.2: Znázornění vápníkové signalizace s velkou koncentrací buněk [1].



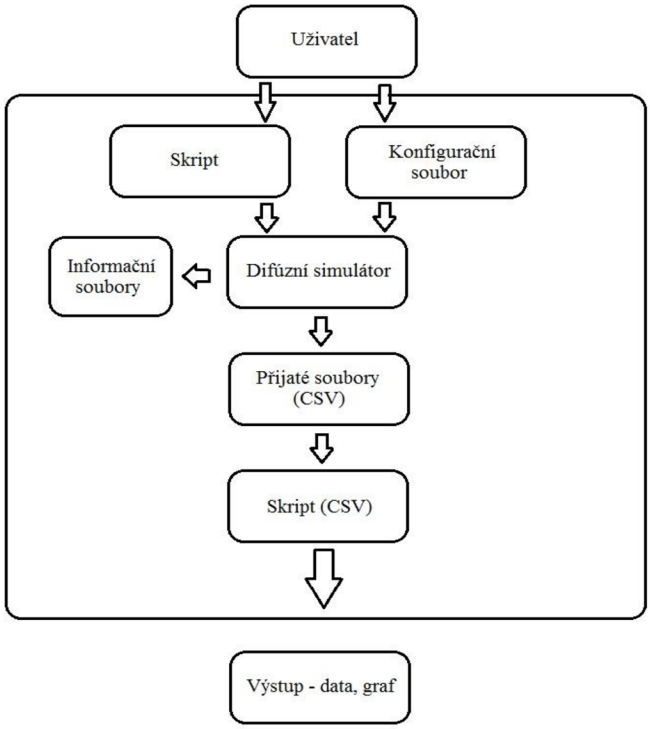

Obrázek 3.3: Znázornění vápníkové signalizace s malou koncentrací buněk [1].

# 4. Simulační prostředí

Tato kapitola popisuje simulační prostředí, ve kterých je možno realizovat simulaci pohybu nanočástice. Zde jsou uvedeny následující simulátory.

## 4.1. N3Sim

N3sim je simulační nástroj, který je určen pro simulaci nanokomunikačních sítí. Informace je přenášena v molekulách. Tento způsob přenosu je biologicky inspirován. Konkrétně se zaměřuje na molekulární komunikaci, která je šířená difúzí či Brownovým pohybem. Tento nástroj simuluje množství nanočástic (většinou představuje molekuly) pohybujících se ve vodním prostředí, které mezi sebou komunikují právě molekulární difúzí. Množství informace, které má být předáno, je modulováno počtem nanočástic, které jsou vyslány do prostředí. Změna v lokální koncentraci je generována vysílačem a tato změna se pak šíří po celém médiu. Přijímače jsou schopny odhadnout koncentraci nanočástic v prostředí ve svém okolí díky přepočtu množství nanočástic v prostředí. Pokud je zjištěna koncentrace nanočástic, přijímač je schopen informaci dekódovat V následujícím obrázku 4.1 je znárodněn blokový diagram N3Sim [2].




Obrázek 4.1: Blokový diagram N3Sim [2].

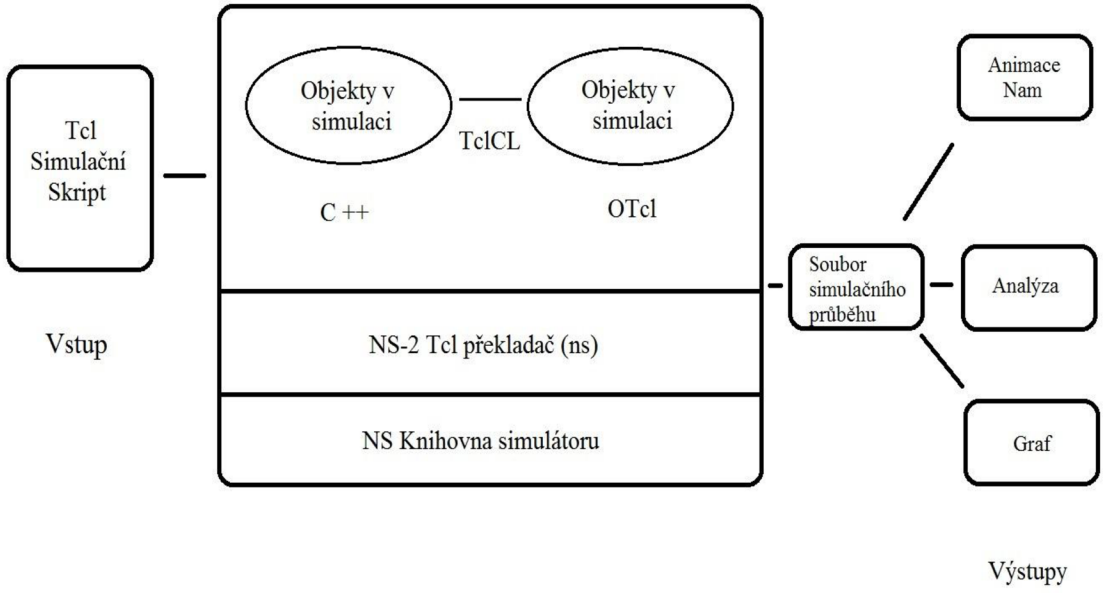
Nejdříve je nutné, aby uživatel nastavil vstupní parametry či hodnoty v konfiguračním souboru. Tyto parametry zahrnují počet vysílačů a přijímačů či nanozařízení, dále počáteční pozici nanočástic, průběh vysílání, velikost nanočástic, koeficient prostředí (určuje typ prostředí) a další parametry. Některé parametry nemusí být definovány. Pokud uživatel nenastaví všechny parametry, mohou být použity pomocí přednastaveného skriptu a toto umožňuje uživateli, za pomocí jednoho skriptu, spustit více různých simulací naráz. Hlavní parametry se ovšem mění. Díky tomu může uživatel lépe posoudit vliv hlavních parametrů (například počet nanočástic) na výsledky simulace [2].

Simulator bere konfigurační soubor jako vstup a podle něj vykonává danou simulaci. Výsledky jsou zapsány do výstupního souboru, který je pojmenovaný podle nastavení ve vstupním souboru. Výsledná data jsou vyhodnocena na přijímačích jako funkce času. Výsledky je také možno znázornit do grafu [2].

## 4.2. NanoNS

NanoNS je difúzní molekulární komunikační simulátor, který pracuje v prostředí NS-2. NS-2 je simulátor pro simulaci komunikačních sítí. Je schopen simulovat různé typy síťových vrstev, směrování, více směrové vysílání, jak pro klasické komunikační sítě, tak pro bezdrátové komunikační sítě. NS-2 je objektově orientovaný simulátor, který využívá jazyk C++ a Tcl (OTcl). Jazyk C++ se používá hlavně pro konfiguraci složitých síťových protokolů a Tcl se používá hlavně pro nastavení parametrů simulace. Uživatel je schopen pomocí Tcl nastavit plánování simulace, topologii sítě a konfiguraci parametrů sítě [9].

Pro lepší přehled je zde obrázek 4.2, který představuje architekturu NS-2. Směr simulace z pohledu obrázku je z levé strany (vstup) do pravé strany, kde je představeno více výstupů [9].




Obrázek 4.2: Blokový diagram NS-2 [9].

Z obrázku je patrné, že vstupní soubor či skript je zapsán v jazyce Tcl. V simulaci se objevují objekty, které pracují v jazyce C++ a v OTcl. Tyto objekty jsou vzájemně kompatibilní. Výstupem simulace jsou data, z kterých podle uživatelova uvážení, se může vytvořit graf nebo animace. Data je možné ponechat v klasickém výpisu pouze na analýzu [9].

Pro NanoNS byla vyvinuta knihovna s názvem ns-mol:tcl, která definuje nanouzly, nové síťové prvky, parametry pro difúzní molekulární komunikaci apod. Difúzní molekulární komunikační komponenty charakterizují chování nanočástic ve vodním prostředí. Tyto komponenty jsou schopny nasimulovat nanozařízení typu vysílač, přijímač a nanočástice, které přenáší informaci. Dále jsou v NanoNS zabudovány rovnice, které přibližují chování difúzního šíření částic. [9].

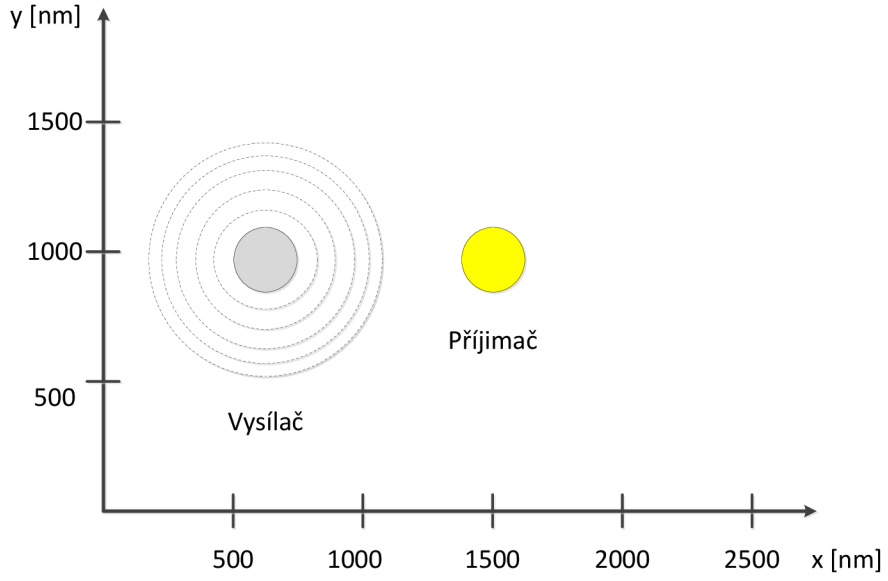
## 4.3. NS- 3

NS-3 je simulační program, který byl vyvinut v roce 2006 pro akademické účely. Program má otevřený zdrojový kód a je možno v něm budovat kódy na bázi jazyků C++ a Python. Je navržený hlavně pro simulace komunikačních sítí obecně. Způsob pracování protokolů, chování bezdrátových či klasických sítí je možno nasimulovat pomocí NS-3. Pro NS-3 bylo vyvinuto mnoho knihoven, které je možno

importovat bud samostatně, nebo jako kombinace více z nich mezi sebou. Simulační program je navržen pro prostředí Linux. Pro získávání potřebných dat je možno použít výpis s konzole či příkazového řádku. Zpracování dat je také možno uložit do XML souborů, které se dají animovat pro lepší přehled uživatele [13].

# 5. Simulace, praktická část

V této kapitole je popsáno vysvětlení a nastavení simulačních parametrů pro každý simulátor zvlášť. Výsledky simulací jsou uvedeny v tabulkách a v grafech pro každý simulátor odděleně. Simulační scénář představuje oblast, ve které je jeden vysílač, který vysílá nanočástice. Vysílač a přijímač představuje nanozařízení. Nanočástice mají nastavený Brownův pohyb. Ve scénáři je také jeden přijímač, který zaznamenává úspěšně zachycené nanočástice. Cílem simulací je zjistit, jak moc ovlivňují parametry doba trvání simulace a vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem pravděpodobnost úspěšného přijetí nanočástice přijímačem. Pro lepší přehled je zde obrázek 5.1, který znázorňuje simulační scénář.




Obrázek 5.1: Simulační scénář.

Na obrázku 5.1 představují obě osy rozměry simulované oblasti. Vysilač i přijímač mají tvar kružnice. Přerušované čáry u vysílače představují směr šíření nanočástic. Na konci kapitoly je srovnání výsledků simulací mezi simulátory.

## 5.1. N3Sim

V této podkapitole jsou vysvětleny funkce parametrů pro simulátor N3Sim. Je zde uvedeno číselné nastavení parametrů. Dále jsou zde uvedeny výsledky simulací pro tento simulátor.

### 5.1.1. Přehled Parametrů

-N3Sim má rozdělen parametry do čtyř základních skupin:

- **Parametry Simulace:** V těchto základních parametrech si uživatel může nastavit typ a množství informačních souborů na výstupu simulace. Dále se zde nastavuje základní chování částic. Je možno určit zda částice při kolizi budou reagovat či ne apod. Nejdůležitější parametry jsou **time** (Čas)- délka trvání simulace a **time Step** (časový skok)- parametr, který určuje, po jak dlouhém časovém úseku se zapíšou data do výstupního souboru a po jak dlouhém časovém skoku dojde ke změně směru a rychlosti částic [2].

- **Prostorové parametry:** Tyto parametry převážně určují vlastnosti simulačního prostředí. Zde je možno určit velikost prostředí, zda bude prostředí vyplněno náhodně rozloženými částicemi, velikost vysílaných částic apod. Mezi nejdůležitější parametry patří **boundedSpace** (ohraničení oblasti). Pokud je parametr nastaven na false (nepravda) je simulovaný prostor nekonečný. Pokud je parametr nastaven na true (pravda), pak je nutné nastavit parametry **xSize** (velikost osy *x*) a **ySize** (velikost osy *y*). Další důležitý parametr je **D,** který vyjadřuje konstantu zvanou difúzní koeficient [$nm^2$/ns]. Difúzní koeficient svou číselnou hodnotou udává typ prostředí (voda, krev apod.), ve kterém se pohybuje určitý typ nanočástic. Tento typ (biologické, mechanické apod.) nanočástic je také vyjádřen difúzním koeficientem[2].

- **Parametry vysílače:** Jak napovídá název, tyto parametry se soustředí na nastavení vysílače. Zde je možno nastavit pozici vysílače, velikost vysílače, délku a frekvenci vysílaní apod. Nejdůležitější parametr vysílače je **emitterType** (typ vysílače). Při nastavování typu vysílače má uživatel výběr z pěti typů vysílačů. Typy vysílačů se liší způsobem vysílaní, tedy s jakou frekvencí a periodou bude vysílač vysílat. Dále je možné určit typy vysílačů, které se hodí pro zkoumání bílého šumu, nebo typ vysílačů pro 3D simulaci [2].

- **Parametry přijímače:** Tyto parametry slouží pro nastavení přijímačů. I zde se nastavuje pozice přijímače jeho velikost apod. Důležitý parametr pro vysílač je **name**.(jméno), protože při nastavení tohoto parametru se vytvoří výstupní složka s přiřazeným jménem, kde je po každém časovém skoku zaznamenán

počet přijatých nanočástic. Další důležitý parametr je **receiverType** (typ přijímače), který určuje hlavně tvar přijímače a také je zde typ pro nastavení na 3D simulaci [2].

Při nastavování číselných hodnot jako je například čas, velikost, pozice apod. simulátor počítá vždy v jednotkách nano (ns, nm …).

### 5.1.2. Provázanost parametrů

Některé parametry jsou mezi sebou provázané. Zde budou uvedeny podmínky nastavení pro některé parametry:

- Pokud je parametr boundedSpace (ohraničení oblasti) nastaven na true pak: parametry xSize a ySize musí mít nastaveny velikost větší než 0. Pokud je parametr boundedSpace nastaven na false pak: parametr bgConcentration musí být nastaven na 0. Parametr bgConcentration určuje hustotu rovnoměrně rozložených částic v prostředí. Zvolené číslo určuje počet částic na 10 000 $nm^2$ [2].

- Pokud je parametr activeCollision (nastavení kolize) nastaven na true pak: parametr punctual (přesnot) musí být nastaven na false. Když je nastavena aktivní kolize částic, pak částice se od sebe odrážejí a tím pádem nemůžou být dvě na stejné pozici. Parametr punctual určuje počáteční pozice částic na vysílači. Pokud je true, tak všechny částice jsou vyslány ze středu vysílače. Z tohoto důvodu musí být tento parametr nastaven na false. Každá částice tedy začíná na libovolném místě v rozsahu vysílače a nedojde k chybě či kolizi [2].

- Pokud je parametr punctual nastaven na true: pak parametr initV (počáteční rychlost částic) musí být nastaven na 0 [2].

- Rozdíl mezi parametry startTime (čas startu vysílání na vysílači) a endTime (čas konce vysílaní) nesmí být menší než timeStep. Pokud je tento rozdíl menší, vysílač nevysílá nanozařízení [2].

### 5.1.3. Nastavení vlastních simulačních parametrů

Po nastudování materiálů [5] [16] [10] [2] byly zvoleny konkrétní hodnoty nastavení dříve popsaných parametrů. Všechny parametry zde uvedeny nejsou, protože

méně důležité parametry neovlivňují výsledek simulace. Následuje popis důležitých parametrů.

**Parametry Simulace:** Time (délka trvání simulace). Pro výsledky, které jsou závislé na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem, je stanovena doba trvání simulace na 20 [µs]. Tato doba trvání simulace se může zdát jako velmi krátká, ovšem z pohledu nanokomunikačních sítí je tady doba adekvátní. Pokud jsou výsledky závislé právě na době trvání simulace, mění se tento parametr od 2 do 20 µs. Více v podkapitole 5.1.4 s názvem výsledky simulací. TimeStep = 100 [ns]. Activecollision = false (částice se vzájemně neovlivňují).

**Prostorové parametry:** BoundedSpace = true . xSize = 2500 [nm] a ySize = 2000 [nm]. BgConcentration=0 (žádné náhodné částice v pozadí). D = 0.1 [$nm^2$/ns] – hodnota pro pohyb biologických částic ve vodním prostředí.

**Parametry vysílače:** emitterRadius (velikost poloměru vysílače) =100 [nm]. Počáteční pozice x = 550, y=1000. Punctual = false. (částice jsou vyslány v celé oblasti vlivu tzn. souřadnice středu + poloměr vysílače). EmitterType =1 (v tomto případě se jedná o tvar kružnice a frekvence vysílání je konstantní). StartTime = 100. EndTime = 200. Rozdíl těchto dvou předchozích parametru je roven časovému skoku. Z toho vyplývá, že parametr amplitude je právě roven počtu vyslaných částic. Amplitude = 5000. Při experimentálních měření bylo zjištěno, že pokud je amplituda nastavena na hodnotu 7500 a výše, tak ve výstupním souboru error.log (soubor, který hlásí chyby) je uvedena chyba typu vysílání velkého počtu částic.

**Parametry přijímače:** Počáteční pozice je pro výsledky simulace, které jsou závislé na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem se pohybuje v rozmezí x = 850 až do 1750, y = 1000 (neměnná). Pokud jsou výsledky simulace závislé na době trvání simulace, je pozice x = 1350 a pozice y je konstantní. Absorb = true (Pokud dorazí nanozařízení na vysílač, tak je pohlceno. Ošetření proti opakovanému započítání jedné částice.) ReceiverType = 2 (tvar kružnice). Rradius = 100 [nm].

Dále je nutné nastavit rychlost pohybu částic. Podle definice Brownova pohybu [5] částice mění svůj směr a rychlost pohybu. Rychlost pohybu částic byla experimentálně ověřena za pomocí testovacích simulací. Rychlost byla zjištěna na

základě, v jakém časovém okamžiku byla úspěšně přijatá první částice a jakou vzdálenost musela tato částice urazit. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce rychlost nanočástic.

Tabulka 5.1: Rychlost nanočástic.

| Průměrná rychlost nanočástic | v [nm/ns] | 0,287 |
|---|---|---|
| Měřené rychlosti nanočástic | v 1 | 0,13 |
| | v 2 | 0,22 |
| | v 3 | 0,23 |
| | v 4 | 0,25 |
| | v 5 | 0,29 |
| | v 6 | 0,33 |
| | v 7 | 0,3 |
| | v 8 | 0,33 |
| | v 9 | 0,43 |
| | v 10 | 0,36 |

První řádek, kde je označení *v*, vyjadřuje průměr všech následujících hodnot. Díky tomuto parametru bylo možné určit potřebný čas k nastavení parametru doba trvání simulace vzhledem ke vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem.

### 5.1.4. Výsledky simulací

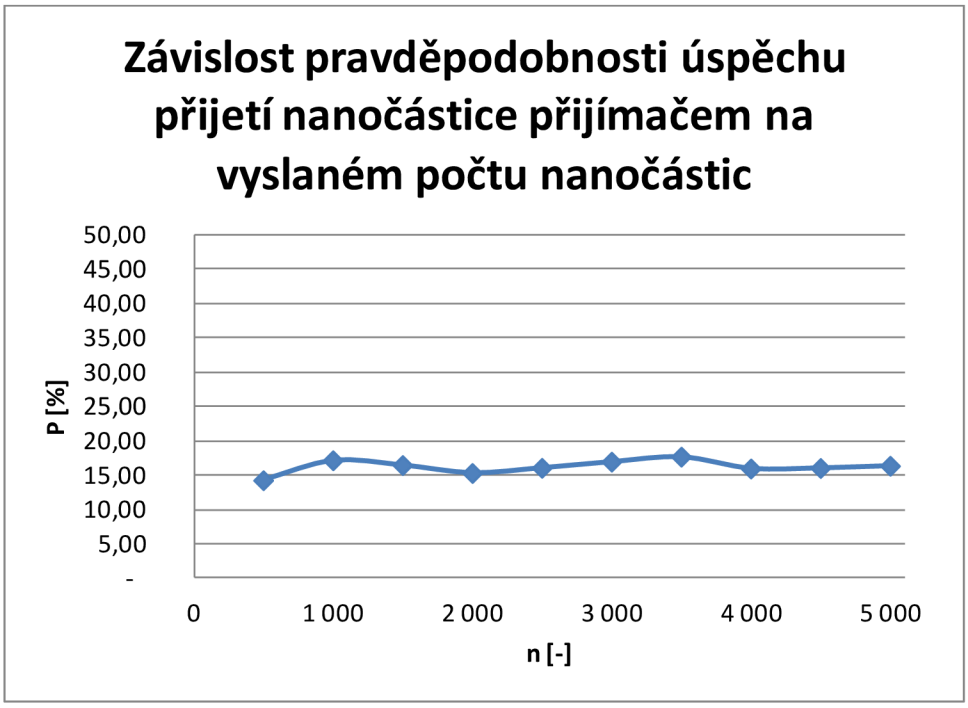
V této podkapitole jsou uvedeny výsledky simulací.

Při testovacích simulacích bylo zjištěno, že pokud se nemění vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a pokud se také nemění doba trvání simulace, pravděpodobnost úspěšného přijetí nanozařízení se nemění a to i přes rostoucí počet vysílaných nanozařízaní na vysílači. Zde jsou výsledky tabulky 5.2.

Tabulka 5.2: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vyslaném počtu nanočástic pro N3Sim.

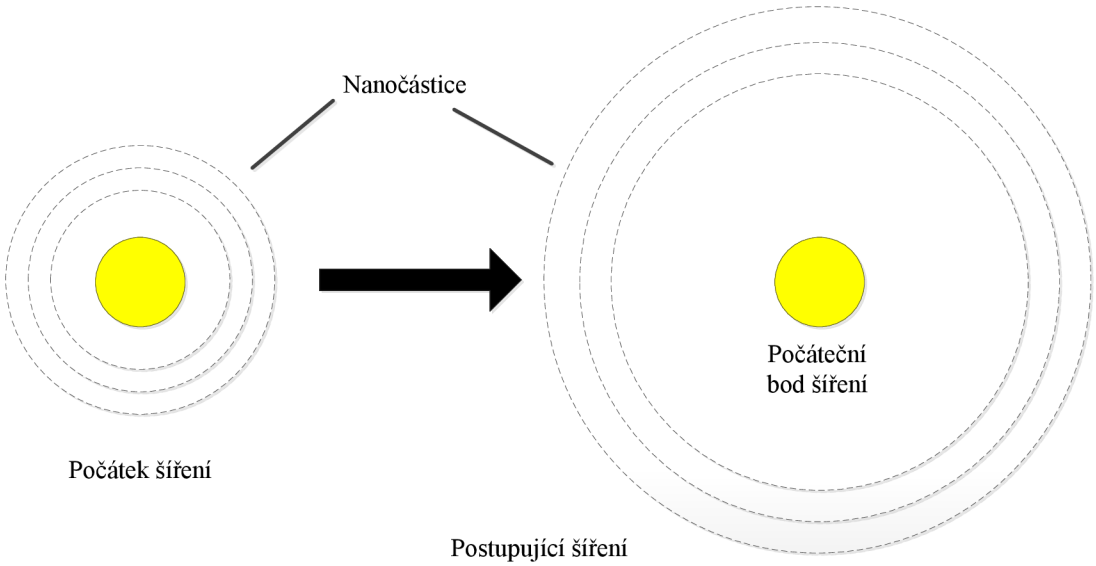
| Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vyslaném počtu nanočastic pro d = 500 nm, t = 20 µs | | |
|---|---|---|
| n [-] | $n_1$ [-] | P [%] |
| 500 | 71 | 14,20 |
| 1 000 | 171 | 17,10 |
| 1 500 | 246 | 16,40 |
| 2 000 | 305 | 15,25 |
| 2 500 | 400 | 16,00 |
| 3 000 | 507 | 16,90 |
| 3 500 | 617 | 17,63 |
| 4 000 | 636 | 15,90 |
| 4 500 | 719 | 15,98 |
| 5 000 | 815 | 16,30 |

Parametr *d*, který je roven 500 nm vyjadřuje vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a parametr *t*, který je roven 20 µs, vyjadřuje dobu trvání simulace. Oba tyto parametry jsou během testovacích simulací konstantní. První sloupec v tabulce 5.2 s označením *n* vyjadřuje počet vyslaných nanozařízení , druhý sloupec s označením $n_1$ vyjadřuje počet úspěšně přijatých nanozařízení na přijímači a třetí sloupec s označením *P* je přepočet na pravděpodobnosti úspěšného přijetí nanozařízení v %. Z tabulky 5.2 byl sestaven Graf závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vyslaném počtu nanočástic.




Obrázek 5.2: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vyslaném počtu nanočástic pro N3sim.

Z obrázku 5.2 je možné potvrdit, že pokud jsou parametry dobra trvání simulace a vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem konstantní, je pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanozařízení přijímačem také konstantní (místy s odchylkami). Toto chování je způsobeno Brownovým pohybem. Pro lepší pochopení je zde obrázek 5.3: Brownův pohyb – šíření nanočástic.




Obrázek 5.3: Brownův pohyb – šíření nanočástic [14].

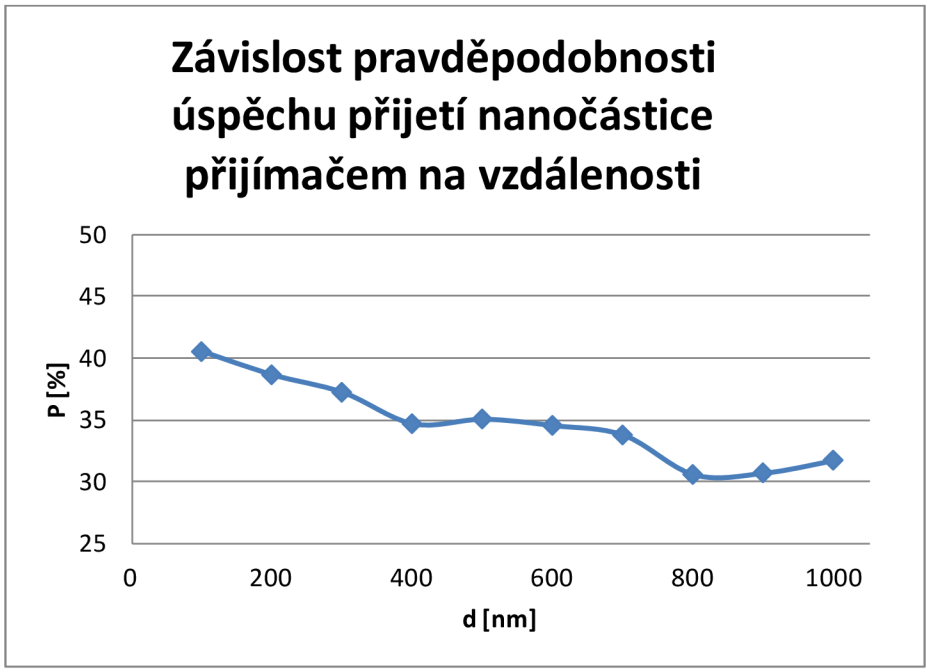
Pokud se změní koncentrace či hustota v jedné oblasti (vysílání nanočástic v místě vysílače), tak díky Brownovu pohybu, se nanočástice snaží vyrovnat koncentraci či hustotu v prostředí ve všech směrech šíření a v celé oblasti. Takže i když se zvedne počet vysílaných nanočástic na vysílači, princip šíření zůstává pořád stejný. Z tohoto důvodu zůstává pravděpodobnosti úspěšného přijetí nanočástice na přijímači konstantní.

V následující tabulce 5.3 jsou zahrnuty výsledky simulace s proměnným parametrem souřadnice středu přijímače, čili vzdálenost vysílače a přijímačem. Vzdálenost je brána od okrajů vysílače a přijímače, nikoliv od jejich středů.

Tabulka 5.3: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti pro N3Sim.

| Tabulka závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti v čase 20 µs | | | |
|---|---|---|---|
| n [-] | $n_1$ [-] | d [nm] | P [%] |
| 5000 | 2027 | 100 | 40,54 |
| 5000 | 1933 | 200 | 38,66 |
| 5000 | 1862 | 300 | 37,24 |
| 5000 | 1735 | 400 | 34,7 |
| 5000 | 1754 | 500 | 35,08 |
| 5000 | 1728 | 600 | 34,56 |
| 5000 | 1689 | 700 | 33,78 |
| 5000 | 1529 | 800 | 30,58 |
| 5000 | 1536 | 900 | 30,72 |
| 5000 | 1587 | 1000 | 31,74 |

V tabulce 5.3 parametr $n$ [-] vyjadřuje počet vyslaných nanočástic vysílačem, parametr $n_1$ [-] vyjadřuje počet přijatých nanočástic na přijímači, parametr $d$ [nm] vyjadřuje vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a parametr $P$ [%] vyjadřuje pravděpodobnosti úspěšného přijetí částice, tedy přepočet mezi parametry $n$ a $n_1$ . Tyto hodnoty jsou vyjádřeny pro dobu trvání simulace 20 µs. Z těchto naměřených hodnot byl sestaven Graf závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti.




Obrázek 5.4: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanozařízení přijímačem na vzdálenosti pro N3Sim.

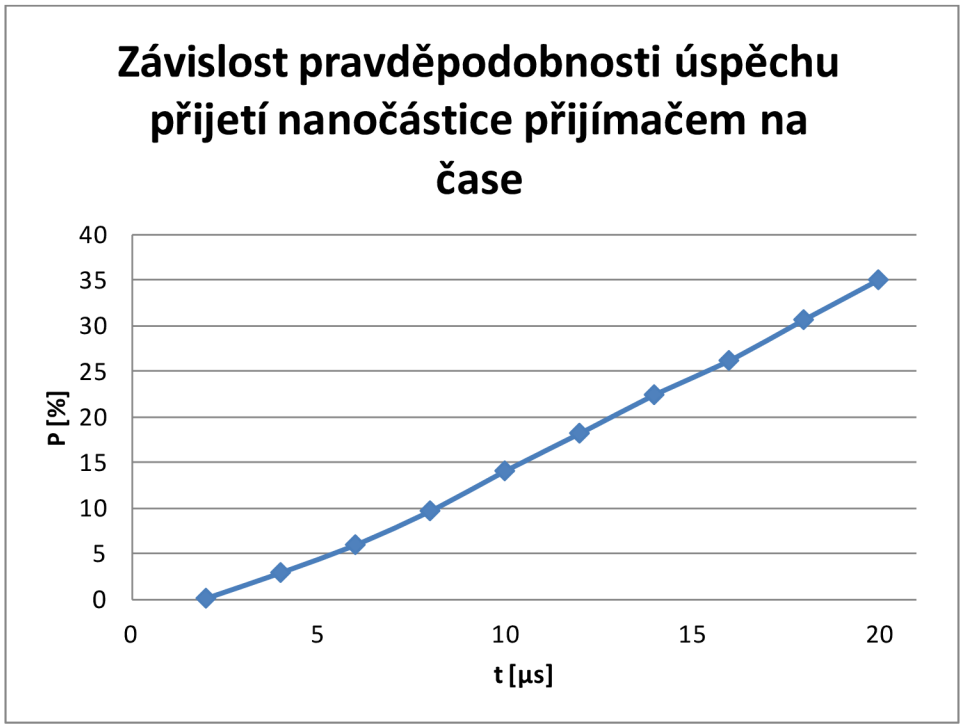
Osa *x* vyjadřuje vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a osa *y* pravděpodobnost úspěšného přijetí nanočástice. Hodnoty na ose *y* byly stanoveny pro lepší přehlednost. Z grafu je možné vyčíst, že s rostoucí vzdáleností, se snižuje pravděpodobnost úspěšného přijetí částice. Ovšem z tabulky 5.3 a z obrázku 5.4 si je možné všimnout, že i při větší vzdálenosti jako například pro $d$ = 800 nm je $P$ = 30,58 % a pro $d$ = 1000 nm je $P$ = 31,74 %. Je to dáno proměnou rychlostí a náhodným pohybem částic. Pokud je však rozdíl vzdáleností větší, je jisté, že pravděpodobnost úspěchu klesá.

V následující tabulce 5.4 jsou zahrnuty výsledky simulace s proměnným parametrem doba trvání simulace.

Tabulka 5.4: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase pro N3Sim.

| Tabulka závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase ve vzdálenosti 500 nm | | | |
|---|---|---|---|
| n [-] | $n_1$ [-] | t [μs] | P [%] |
| 5000 | 6 | 2 | 0,12 |
| 5000 | 147 | 4 | 2,94 |
| 5000 | 300 | 6 | 6 |
| 5000 | 486 | 8 | 9,72 |
| 5000 | 705 | 10 | 14,1 |
| 5000 | 912 | 12 | 18,24 |
| 5000 | 1123 | 14 | 22,46 |
| 5000 | 1311 | 16 | 26,22 |
| 5000 | 1535 | 18 | 30,7 |
| 5000 | 1754 | 20 | 35,08 |

. Sloupce v tabulce 5.4 jsou téměř identické s tabulkou 5.3 s rozdílným třetím sloupcem s označením *t*, který místo parametru vzdálenost vyjadřuje dobu trvání simulace [μs]. V této simulaci je vzdálenost konstantní s hodnotou 500 nm. Z těchto naměřených hodnot byl sestaven Graf závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase.




Obrázek 5.5: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase.

Osa *x* vyjadřuje dobu trvání simulace a osa *y* pravděpodobnost úspěšného přijetí částice. Z grafu je možné vyčíst, že s rostoucí dobou trvání simulace se zvyšuje pravděpodobnost úspěšného přijetí částice. Závislost je lineárně rostoucí.

## 5.2. NS-3

V této podkapitole jsou vysvětleny funkce parametrů pro simulátor NS-3. Je zde uvedeno číselné nastavení parametrů. Dále jsou zde uvedeny výsledky simulací pro tento simulátor.

### 5.2.1. Random-Walk-2d-Mobility-Model

Jak naznačuje název, tento model určuje náhodný pohyb vytvořených stanic. Zároveň nejlépe vystihuje chování Brownova pohybu. Nyní budou představeny parametry, kterými se tento model řídí [13]:

- Hranice (Bounds): Určuje rozlohu, po které se vytvořené stanice mohou pohybovat. Dojde-li ke střetu s hranicí, je vytvořená stanice odražena zpět do pole, které je určeno právě parametrem Hranice [13].

- Čas (Time): Po tomto nastaveném čase, stanice změní svůj směr pohybu a rychlost pohybu [13].

- Vzdálenost (Distance): Po této nastavené vzdálenosti, stanice změní svůj směr pohybu a rychlost pohybu [13].

- Mód (Mode): Parametr, který určuje volitelnou podmínku pro změnu směru pohybu a rychlost pohybu [13].

- Směr (Direction): Náhodná proměnná, která se použitá pro výběr směru [13].

- Rychlost (Speed): Náhodná proměnná, která se použitá pro výběr rychlosti[13].

### 5.2.2. Nastavení vlastních simulačních parametrů

Po nastudování materiálů [5] [16] [10] byly zvoleny číselné hodnoty pro nastavení simulačních parametrů. Dále bylo nutné přizpůsobit hodnoty parametrů NS-3 vůči simulátoru N3Sim. Pokud by hodnoty parametrů byly nastaveny odlišně, nebylo by možné srovnávat výsledky mezi simulátory. Následující parametry jsou nastavení pro Random-Walk-2d-Mobility-Model.

- Parametr hranice nastaven na velikost 2,5 µm (osa *x*) a 2 µm (osa *y*). Dále v tomto parametru nastavena počáteční pozice nanočástic. Tento parametr je konstantní. Počátek na ose *x* je roven 550 nm a počátek na ose *y* je roven 1000 nm. Tato pozice je rovna pozici vysílače.

- Parametr čas nenastaven. Ideální hodnota pro nastavení simulace je 100 ns. Bohužel, při experimentálních simulacích v NS-3 tento parametr vykazoval chybu a nefungoval, protože v oblasti přijímače byl vždy počet přijatých nanočástic 0.

- Parametr vzdálenost nastaven místo parametru čas. Tento parametr nastaven na hodnotu 30 nm, protože pokud je cílem nahradit parametr čas s hodnotou 100 ns, stačí vynásobit průměrnou rychlost nanočástic, která je rovna 0,3 nm/ns (zjištění ze simulátoru N3Sim), časem a tím pádem je výsledek 30 nm.

- Parametr mód (určení volitelné podmínky) nenastaven. Není potřebné, protože je zde nastaven parametr vzdálenost.

- Parametr směr nastaven na proměnnou hodnotu v rozsahu min = 0 a max = 6,283184. Simulátor NS-3 počítá změnu směru v radiánech. Proto je číselná hodnota 6,283184 rovna 2π. Díky tomuto rozsahu je možné, aby nanočástice nezměnila směr vůbec, anebo libovolně směr měnila.

- Parametr rychlost nastaven na proměnnou hodnotu v rozsahu min= 0,15 nm/ns a max = 0,4 nm/ns. Tato rychlost je stanovena na základě prostudování uvedených materiálů a testovacích simulací v N3Sim.

Následující parametry jsou obecné parametry v NS-3.

- Doba trvání simulace (Simulator::Stop(MicroSeconds(*Hodnota*)). Pro simulaci s konstantním časem hodnota 20 µs a pro simulace s proměnou dobou trvání simulace hodnota od 2 do 20 µs časovým skokem 2 µs.

- Počet nanočástic (c.Create (*Hodnota*)) nastaven na 5000.

- Poloměr přijímače nastaven na 100 nm.

- Pozice přijímače pro simulace s konstantní vzdálenosti nastaven pro osu $x$ 1150 nm a pro osu $y$ 1000 nm. Počáteční pozice je pro výsledky simulace, které jsou závislé na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem se pohybuje v rozmezí $x$ = 850 až do 1750, $y$ = 1000 (neměnná).

Dále je nastavena podmínka na straně přijímače. Podmínka určuje, že pokud je vzdálenost pozice nanozařízení od pozice přijímače menší než poloměr přijímače, přičte pomocná proměnná hodnotu jedna k počítadlu.

### 5.2.3. Výsledky simulací

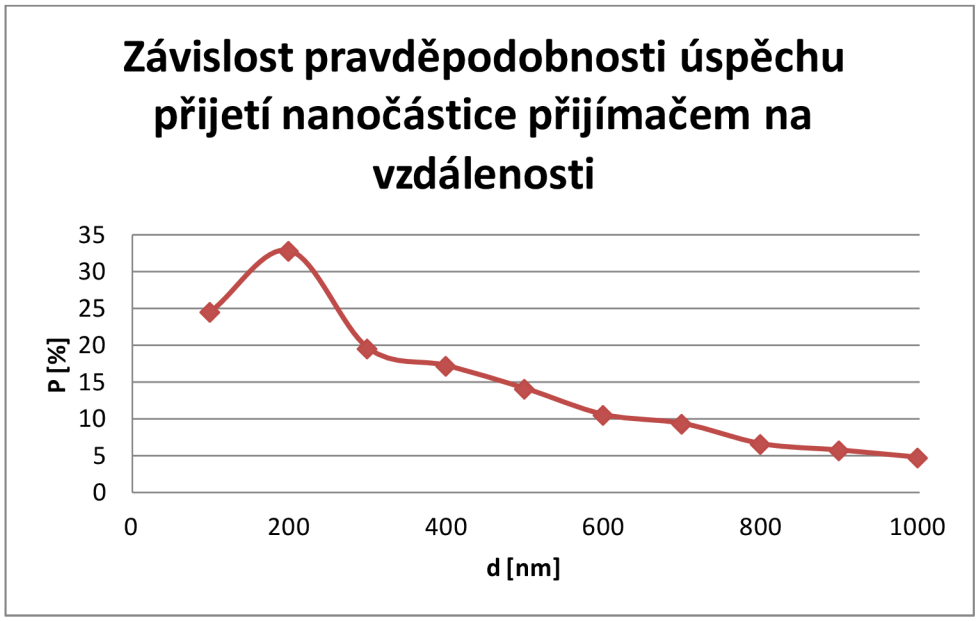
Stanovení rychlosti bylo již provedené v simulátoru N3Sim. Dále byla ověřena závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanozařízení přijímačem na počtu vyslaných nanozařízení.

V následující tabulce 5.5 jsou zahrnuty výsledky simulace s proměnným parametrem souřadnice středu přijímače, čili vzdálenost vysílače a přijímačem.

Tabulka 5.5: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti pro NS-3.

| Tabulka závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti v čase 20 µs | | | |
|---|---|---|---|
| n [-] | n1 [-] | d [nm] | P [%] |
| 5000 | 1223 | 100 | 24,46 |
| 5000 | 1638 | 200 | 32,76 |
| 5000 | 974 | 300 | 19,48 |
| 5000 | 856 | 400 | 17,12 |
| 5000 | 700 | 500 | 14 |
| 5000 | 522 | 600 | 10,44 |
| 5000 | 462 | 700 | 9,24 |
| 5000 | 324 | 800 | 6,48 |
| 5000 | 281 | 900 | 5,62 |
| 5000 | 232 | 1000 | 4,64 |

V tabulce 5.5 parametr $n$ [-] vyjadřuje počet vyslaných částic vysílačem, parametr $n_1$ [-] vyjadřuje počet přijatých nanočástic na přijímači, parametr $d$ [nm] vyjadřuje vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a parametr $P$ [%] vyjadřuje pravděpodobnosti úspěšného přijetí částice, tedy přepočet mezi parametry $n$ a $n_1$ . Tyto hodnoty jsou vyjádřeny pro dobu trvání simulace 20 µs. Z těchto naměřených hodnot byl sestaven Graf závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti.




Obrázek 5.6: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti pro NS-3.

Osa *x* vyjadřuje vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem a osa *y* pravděpodobnost úspěšného přijetí nanočástice. Z grafu je možné vyčíst, že s rostoucí vzdáleností, se snižuje pravděpodobnost úspěšného přijetí částice. Ovšem z tabulky 5.5 a obrázku 5.6 si je možné všimnout, že i při větší vzdálenosti jako například pro d = 100 nm je P = 24,46 % a pro d = 200 nm je P = 32,76 %. Je to dáno proměnou rychlostí a náhodným pohybem částic. Pokud je však rozdíl vzdáleností větší, je jisté, že pravděpodobnost úspěchu klesá.

V následující tabulce 5.6 jsou zahrnuty výsledky simulace s proměnným parametrem doba trvání simulace.

Tabulka 5.6: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase pro NS-3.

| Tabulka závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase ve vzdálenosti 500 nm | | | |
|---|---|---|---|
| n [-] | n1 [-] | t [µs] | P [%] |
| 5000 | 20 | 2 | 0,4 |
| 5000 | 131 | 4 | 2,62 |
| 5000 | 223 | 6 | 4,46 |
| 5000 | 296 | 8 | 5,92 |
| 5000 | 367 | 10 | 7,34 |
| 5000 | 434 | 12 | 8,68 |
| 5000 | 503 | 14 | 10,06 |
| 5000 | 562 | 16 | 11,24 |
| 5000 | 627 | 18 | 12,54 |
| 5000 | 700 | 20 | 14 |

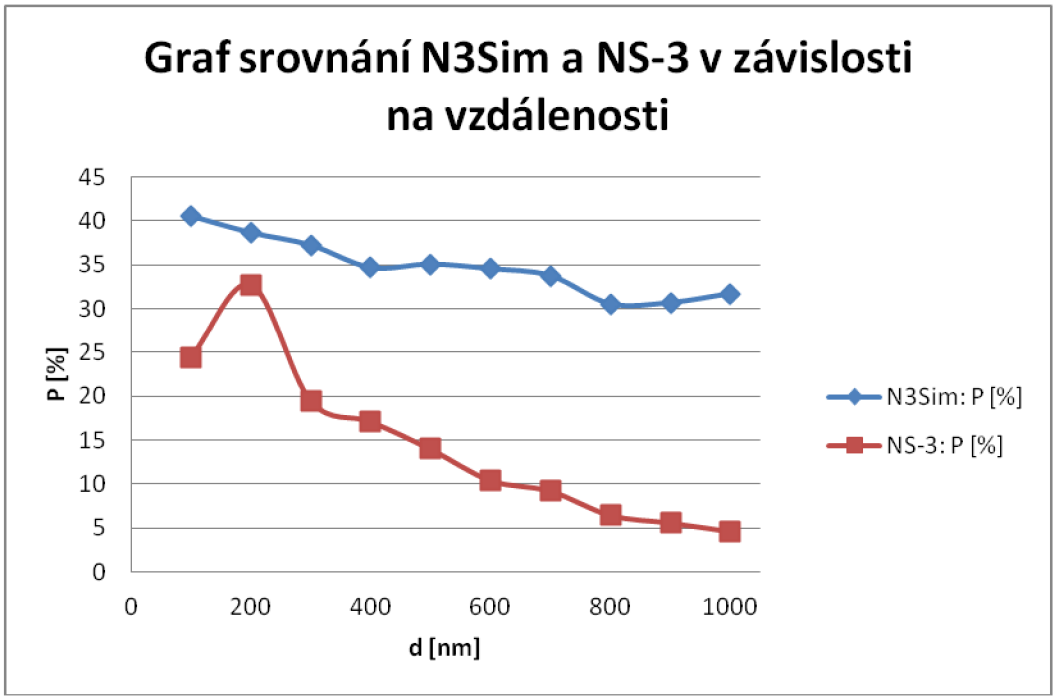
Sloupce v tabulce 5.6 jsou téměř identické s tabulkou 5.5 s rozdílným třetím sloupcem s označením *t*, který místo parametru vzdálenost vyjadřuje dobu trvání simulace [µs]. V této simulaci je vzdálenost konstantní s hodnotou 500 nm. Z těchto naměřených hodnot byl sestaven Graf závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase.

Obrázek 5.7: Závislost pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase pro NS-3.

Osa *x* vyjadřuje dobu trvání simulace a osa *y* pravděpodobnost úspěšného přijetí částice. Z grafu je možné vyčíst, že s rostoucí dobou trvání simulace se zvyšuje pravděpodobnost úspěšného přijetí částice. Závislost je lineárně rostoucí.

## 5.3. Srovnání výsledků NS-3 a N3Sim

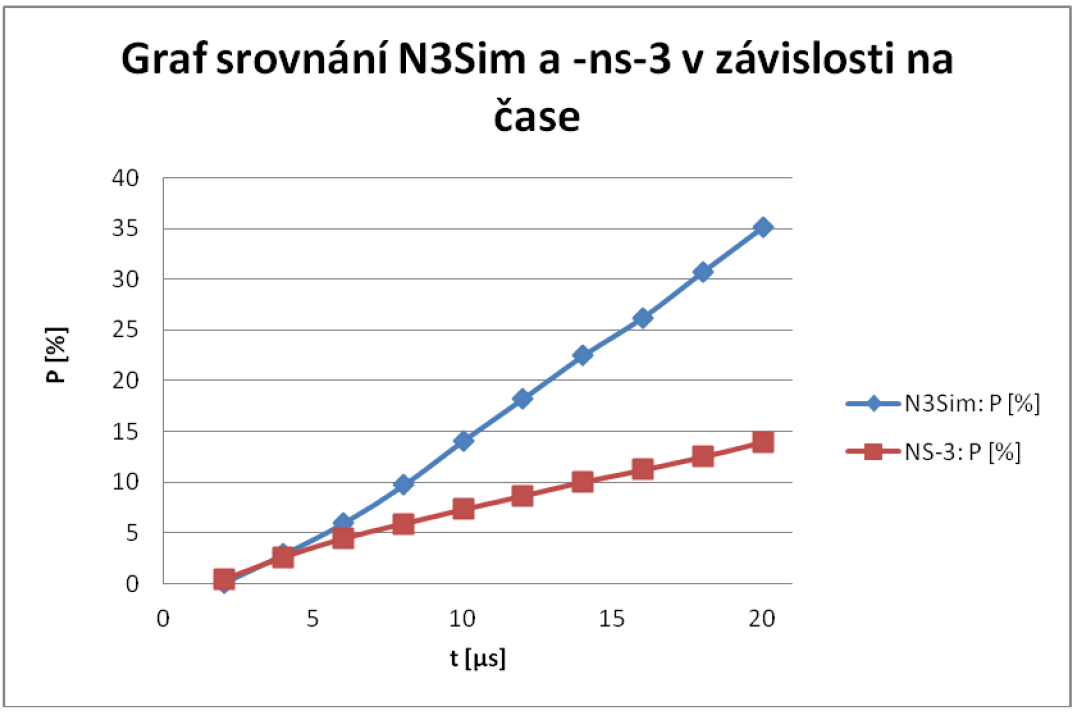
V této kapitole jsou shrnuté výsledky simulací NS-3 a N3Sim. Následující graf vyjadřuje srovnání závislosti pravděpodobností úspěchu přijetí nanozařízení přijímačem na vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem mezi simulátory NS-3 a N3Sim.




Obrázek 5.8: Srovnání N3Sim a NS-3 v závislosti na vzdálenosti.

Při srovnání výsledků simulací vykazuje N3Sim vyšší pravděpodobnost úspěchu než NS-3. V simulátoru N3Sim byl počet přijatých částic vyšší než v NS-3.

V následujícím grafu je vyjádření srovnání závislosti pravděpodobností úspěchu přijetí nanozařízení přijímačem na době trvání simulace mezi simulátory NS-3 a N3Sim.




Obrázek 5.9: Srovnání N3Sim a NS-3 v závislosti na čase.

Při srovnání výsledků simulací vykazuje N3Sim vyšší pravděpodobnost úspěchu než NS-3. V simulátoru N3Sim byl počet přijatých částic vyšší než v NS-3.

N3Sim a NS-3 mají různou pravděpodobnost úspěchu kvůli rozdílným parametrům, které mění rychlost a směr nanozařízení. U N3Sim je to parametr timestep a u NS-3 je to parametr vzdálenost. U testovacích simulací bylo zjištěno, že pokud parametr timestep zvýší svoji hodnotu, pravděpodobnost úspěchu přijetí nanozařízení klesá. To samé pravidlo platí pro parametr vzdálenost u NS-3. Čím častěji nanočástice mění svůj směr pohybu a svoji rychlosti, tím větší pravděpodobnost úspěšného přijetí nanočástice na přijímači. Pokud by parametr čas v NS-3 fungoval správně, výsledky by byly přesnější. Parametr čas v simulátoru NS-3 není schopen pracovat s tak nízkou hodnotou jako je 100 ns. Při přepočtu z parametru čas na parametr vzdálenost dochází k nepřesnostem. Simulátor N3Sim má oproti NS-3 v sobě možnost využití parametru difúzní koeficient, který také významně ovlivňuje pohyb nanočástic. Ovšem i kdyby byly parametry shodné, výsledky by nikdy nebyly u obou simulátorů totožné, protože je zde proměnlivá rychlost a směr nanozařízení. Nicméně výsledky by vykazovaly menší odchylky.

# 6. Regresní analýza

Na dosažených výsledcích se provede regresní analýza. Pomocí regresní analýzy vznikne regresní přímka. Díky této přímce je možné určit budoucí pravděpodobnost úspěchu přijetí nanozařízení pro vyšší čas a pro větší vzdálenost. Regresní analýza využívá metody nejmenších čtverců k vypočítání matice, která vrací přímku a tato přímka nejlépe popisuje použitá data. Pro data zhotovená v této práci se je nutné použít lineární regresní analýzu. Přímka se řídí následujícím vzorcem [12]:

$$y = m_1x_1 + m_2x_2 + \ldots + b \tag{6.1}$$

kde závislá hodnota $y$ je funkcí nezávislých hodnot $x$. Hodnoty $m$ jsou koeficienty odpovídající každé z hodnot $x$, $b$ je konstanta [12].

Regresní analýza je provedena v programu Microsoft Excel. Pro analýzu v tomto případě je možné použít zjednodušený vzorec, který je vyjádřen ze vztahu 6.1:

$$y = b_1 + b_2 * x \tag{6.2}$$

Konstanta $b_2$ se vypočítá podle vzorce:

$$b_2 = \frac{(x \times y) - \bar{x} * \sum y}{(x \times x) - |x| * \bar{x}^2} \tag{6.3}$$

Kde $(x \times y)$ je skalární součin hodnot $x$ a $y$, $\bar{x}$ je průměr hodnot $x$, $\sum y$ je součet hodnot $y$, $(x \times x)$ je skalární součin hodnot $x$, $|x|$ je počet hodnot $x$ a $\bar{x}^2$ je mocnina průměru hodnot $x$ [12].

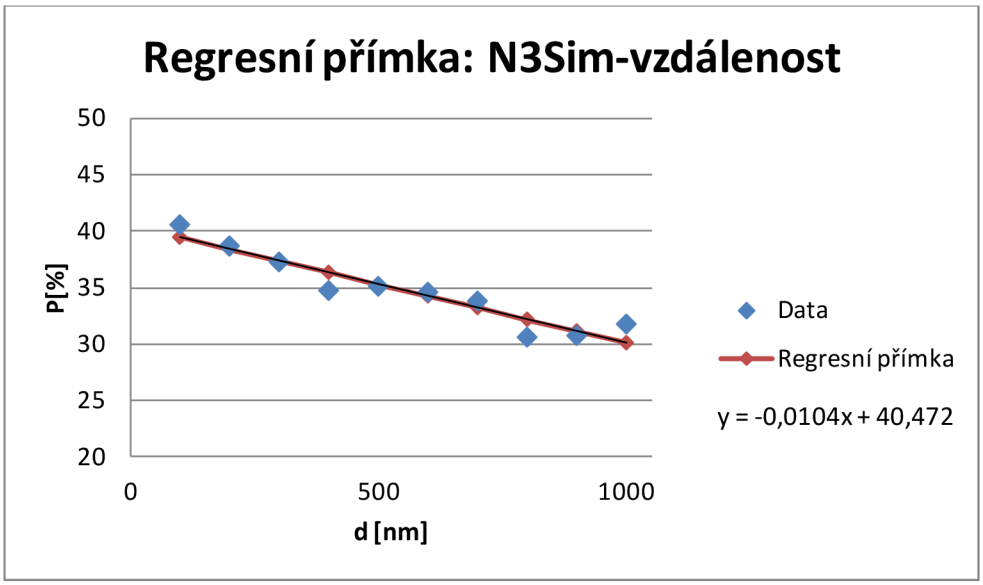
Jakmile je vypočítána konstanta $b_2$ je možno vypočítat konstantu $b_1$ podle vzorce:

$$b_{1 = \bar{y}} - b_2 * \bar{x} \tag{6.4}$$

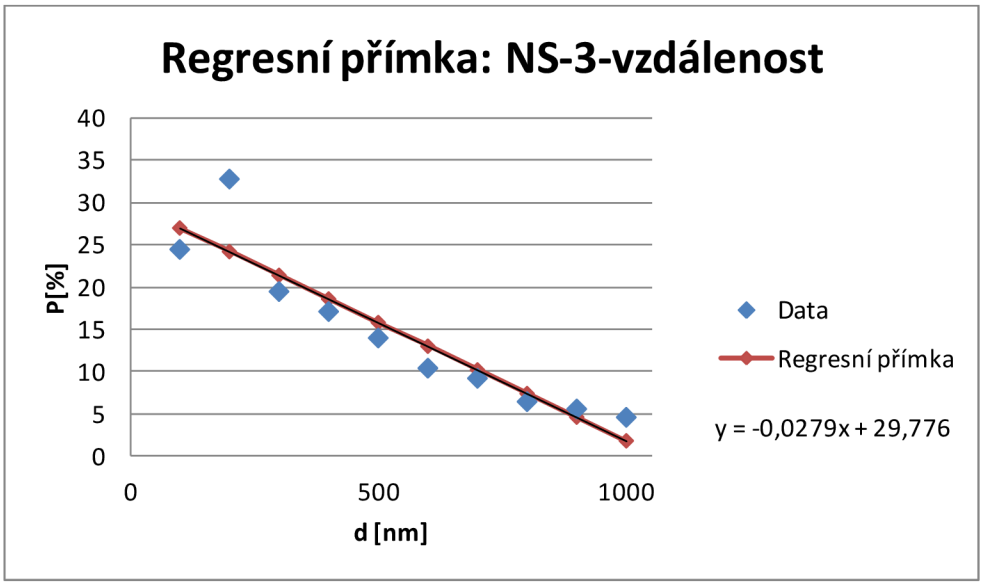
kde $\bar{y}$ je průměr hodnot y, $b_2$ je konstanta a $\bar{x}$ je průměr hodnot $x$.

Nyní je možné konstanty $b_1$ a $b_2$ dosadit do vzorce 6.2. Hodnoty $x$ jsou hodnoty v grafu na ose $x$ a výsledná hodnota $y$ představuje hodnoty na ose $y$ pro regresní přímku [12]. Výpočty byly provedeny pro výsledky simulací pro závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na vzdálenosti a pro závislosti pravděpodobnosti

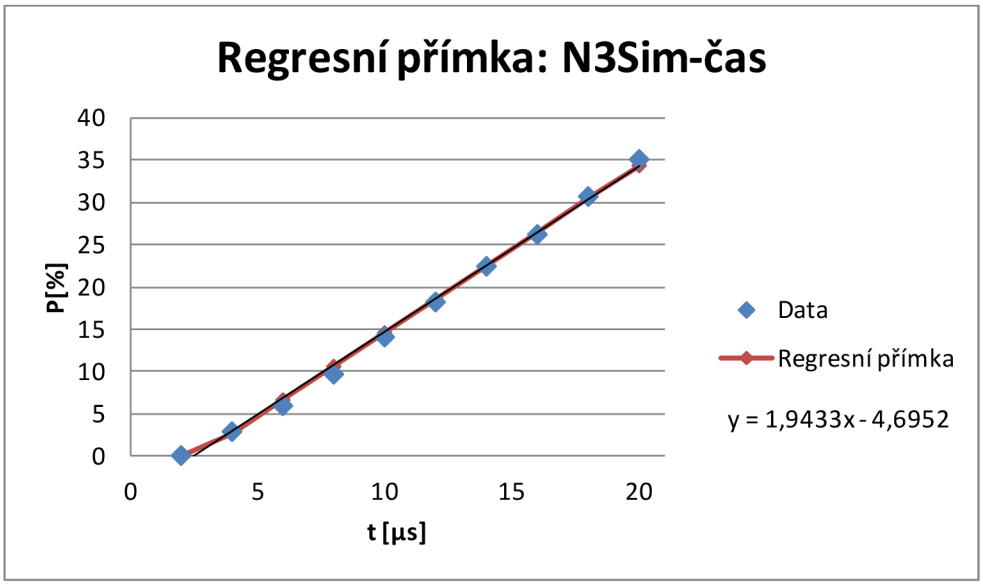
úspěchu přijetí nanočástice přijímačem na čase. Regresní analýza byla provedena pro simulátory NS-3 a N3Sim. Následující 4 grafy vyjadřují regresní přímky.



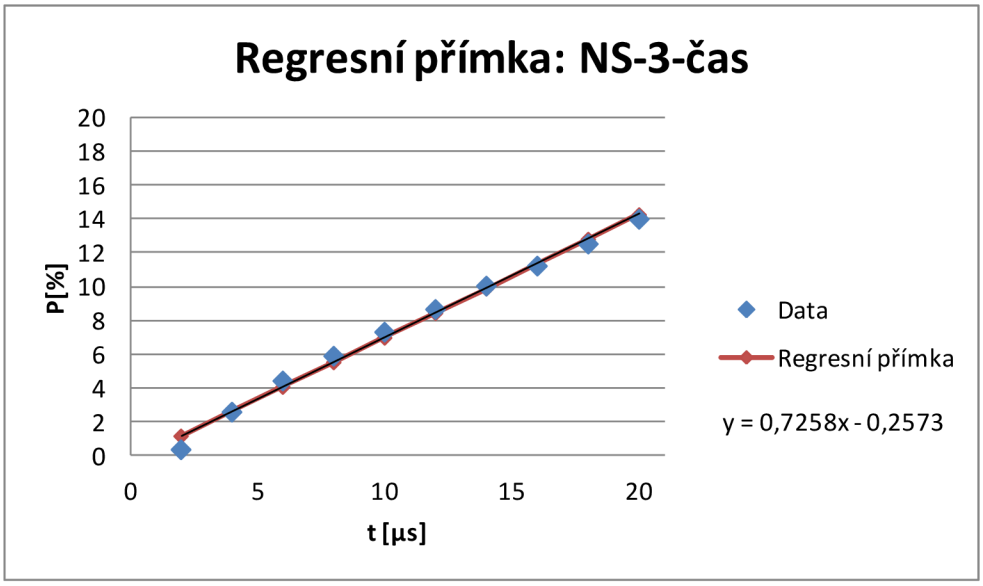

Obrázek 6.1: Regresní přimka: N3Sim- vzdálenost.




Obrázek 6.2: Regresní přimka: NS-3- vzdálenost.




Obrázek 6.3: Regresní přimka: N3Sim- čas.




Obrázek 6.4: Regresní přimka: NS-3 - čas.

Díky regresní analýze je vytvořena přímka, která je lineární. Pro čas je lineárně rostoucí, pro vzdálenost je lineárně klesající.

## 6.1. Výsledné funkce regresních přímek

Každá regresní přímka z předchozích čtyř grafů, má svoji funkci, podle které se řídí. Naměřená data se pohybují okolo regresních přímek s určitými odchylkami. Odchylky jsou vypočítány jako rozdíl hodnot $y$ pro naměřenou hodnotu $P$ [%] a pro

hodnotu $P$ [%] vypočítanou pomocí regresní analýzy. Nyní zde budou uvedeny číselné hodnoty.

**Regresní přímka**: **N3Sim – vzdálenost** se řídí fukcí:

$$y = 40,472 - 0,01*x \tag{6.5}$$

Následuje nejmenší odchylka $\delta_{min} = 0,12$, největší odchylka $\delta_{max} = 1,65$ a průměrná odchylka $\delta = 0,78$.

**Regresní přímka**: **NS-3 – vzdálenost** se řídí fukcí:

$$y = 29,776 - 0.28*x \tag{6.6}$$

Následuje nejmenší odchylka $\delta_{min} = 0,97$, největší odchylka $\delta_{max} = 8,57$ a průměrná odchylka $\delta = 2,46$.

**Regresní přímka**: **N3Sim – čas** se řídí fukcí:

$$y = -5,189 + 1,977*x \tag{6.7}$$

Následuje nejmenší odchylka $\delta_{min} = 0,03$, největší odchylka $\delta_{max} = 1,36$ a průměrná odchylka $\delta = 0,52$.

**Regresní přímka**: **NS-3 – čas** se řídí fukcí:

$$y = -0,257 + 0,726*x \tag{6.8}$$

Následuje nejmenší odchylka $\delta_{min} = 0,03$, největší odchylka $\delta_{max} = 0,79$ a průměrná odchylka $\delta = 0,29$.

# Závěr

V diplomové práci bylo v teoretické části provedeno seznámení s pojmem nanokomunikační sítě, modelování a princip pohybu nanozařízení. V praktické části bylo provedeno několik simulací. Jako simulační prostředí byly použity programy NS-3 a N3Sim. Simulační scénář představoval oblast, ve které je jeden vysílač, který vysílá nanozařízení a jeden přijímač. Nanozařízení se pohybovalo na princip Brownova pohybu. Tato simulace představovala vápníkovou signalizaci v buňkách složitějších organismů (savci apod.). Byly vyneseny závislosti pravděpodobnosti úspěchu přijetí nanozařízení na vzdálenosti a na čase. Závislosti byly vytvořeny jak pro NS-3, tak pro N3Sim. Z nasimulovaných výsledků byly vypočítány pomocí regresní analýzy regresní přímky. Pomocí těchto regresních přímek je možné předpovídat budoucí výsledky pro vyšší hodnoty v závislosti na čase či vzdálenosti. Program N3Sim je oproti NS-3 schopen lépe simulovat Brownův pohyb, protože byl přímo vyvinut pro tento typ simulace. Je zde složitější matematická definice Brownova pohybu. Jako příklad je možné uvést započítání difúzního koeficientu. Naproti tomu NS-3, který je původně vyvinut pro simulací komunikačních sítí, je schopen lépe simulovat vyšší počet hodnot nanozařízení. V této práci se počet simulovaných nanozařízení 5000, ale pro přiblížení reálného chování systému by bylo potřeba simulovat počet nanozařízení v řádech miliónů.

Nanokomunikační sítě zřejmě nikdy nenahradí komunikační sítě, jak je známe dnes. Musel by nastat velký technologický průlom. Nanokomunikační sítě mají budoucnost ve využití ve složitých či nepřátelských prostředích jako je například lidské tělo. Pohyb nanozařízení a jeho vlastnosti patří k výzkumu nanokomunikačních sítí. Zkoumání pohybu nanozařízení je nutné pro budoucí vývoj nanokomunikačních sítí, který je velmi perspektivní v oblasti využití pro lidstvo.

# Seznam použité literůry

[1] Ian F. Akyildiz, Fernando Brunetti, Cristina Blazquez. *Nanonetworks: A new communication paradigm.*

[2] Prof. Ian F. Akyildiz and Prof. Josep Solé-Pareta. *NaNoNetworking Center in Catalunya* [cit. 28.2.2014]. [online] Dostupné na www: http://www.n3cat.upc.edu/tools/n3sim/UserGuide#Installation

[3] *ANA: Autonomic Network Architecture*. [online]. [cit. 18.10.2013]. Dostupné na www: http://www.ana-project.org

[4] *BIOlogically inspired NETwork and Services (BIONETS)*. [cit. 27.5.2014]. [online] Dostupné na www: http://www.bionets.eu/index.php?area=11

[5] Stephen F. Bush. *Nanoscale Communication Networks*. [cit. 17.11.2013]. ISBN – 13: 978-1-60807-003-9.

[6] Falko Dressler, Ozgur Akanb. *A survey on bio-inspired networking*. [online]. [cit. 18.10.2013]. Dostupné na www: http://www.eee.metu.edu.tr/~ee644/References/bio-survey.pdf.

[7] Vinko Erceg, Senior Member, IEEE, Larry J. Greenstein, Fellow, IEEE, Sony Y. Tjandra, Seth R. Parkoff, Member, IEEE, Ajay Gupta, Boris Kulic, Member, IEEE, Arthur A. Julius, Member, IEEE, and Renee Bianchi. *An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments*. [online] [cit. 2.11.2013]. Dostupné na www: http://radioexp.ru/books/An_empirically_based_path_loss_model_for_wireless_channels_in_suburban_environments.pdf

[8] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. [online] [cit. 2.11.2013]. Dostupné na www: http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=n-3ZZ9i0s-cC&oi=fnd&pg=PR17&dq=Wireless+Communications,+Principles+and+Practice+pdf&ots=Ax0FSzpeda&sig=3Tq4kWsT39ZZVwQ5nWpJzES8M00&redir_esc=y#v=onepage&q=Wireless%20Communications%2C%20Principles%20and%20Practice%20pdf&f=false

[9] Ertan Gul, Baris Atakan, Ozgur B. Akan *NanoNS: A nanoscale network simulator framework for molecular communications* [cit. 15.3.2014]. [online] Dostupné na www: http://nwcl.ku.edu.tr/paper/J25.pdf

[10] Barbara Innocenti, Vladimir Parpura, and Philip G. Haydon. *Imaging Extracellular Waves of Glutamate during Calcium Signaling in Cultured Astrocytes* [cit. 15.12.2013]. [online] Dostupné na www: http://www.jneurosci.org/content/20/5/1800.full.pdf

[11] Mardeni.R. *Optimised COST-231 Hata Models for WiMAX Path Loss Predictionin Suburban and Open Urban Environments* [online] [cit. 2.11.2013]. Dostupné na www: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CEYQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.ccsenet.org%2Fjournal%2Findex.php%2Fmas%2Farticle%2Fdownload%2F6462%2F5745&ei=Lkp2UpT_C8SKswaV3oGoCg&usg=AFQjCNEfJVpQEiaf4mq9CNjDSwo80qOlLg&bvm=bv.55819444,d.Yms&cad=rja

[12] Microsoft Corporoation. [cit. 4.5.2014]. [online] Dostupné na www: http://office.microsoft.com/cs-cz/excel-help/linregrese-HP005209155.aspx

[13] *NS- 3 Network s Simulator* [cit. 30.11.2013]. [online] Dostupné na www: http://www.nsnam.org/

[14] Iñaki Pascual. *N3Sim : Simulator for diffusion-based molecular communications in Nanonetworks.* [cit. 20.4.2014]

[15] Hagen Paul Pfeifer. *On the Validation of Radio Propagation Models* [online] [cit. 2.11.2013]. Dostupné na www: http://www.jauu.net/data/pdf/propagation-models.pdf

[16] G. Piro, L.A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda. *Simulating Wireless Nano Sensor Networks in the NS-3 platform* [cit. 15.12.2013]. [online] Dostupné na www: http://telematics.poliba.it/publications/2013/Piro_PAEWN2013

[17] Stefanovic, Z., Hana; and Savic, M., Ana. *Integral Characteristics of the Nakagami-m Distribution of Signal Envelope*. [online] [cit.16.11.2013]. Dostupné online na www: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Finternetjournals.net%2Fjournals%2Ftar%2F2011July%2Fp3.doc&ei=O8-HUtC9GIidtQbR1IDYCg&usg=AFQjCNG7PyX1HMMinxSMWPtyrG36qUqIkA&sig2=-dSr96TDrHLcx0KBwDEm-A&bvm=bv.56643336,d.Yms&cad=rja

[18] Mirko Stoffers, George Riley. *Comparing the ns–3 Propagation Models*. [online] [cit. 2.11.2013]. Dostupné na www: https://www.comsys.rwth-aachen.de/fileadmin/papers/2012/2012-stoffers-ns3-propagation-models.pdf

[19] Yahong Rosa Zheng, Chengshan Xiao. *Simulation Models With Correct Statistical Properties for Rayleigh Fading Channels*. [online] [cit. 16.11.2013]. Dostupné na www: http://web.mst.edu/~xiaoc/Pub/Zheng_Xiao_TCOM.pdf

# Seznam použitých veličin, symbolů a zkratek

ANA Autonomic Network Architecture – Autonomní síťová architektůra

ATP Adenosine-Triphosphate - adenosin-trifosfát

BS Base Station – základní stanice či anténa

CPE Customer-Premises Equipment – uživatelské poskytované zařízení

CPU Central Procesor Unit – centrální procesorová jednotka

DNA DeoxyriboNucleic Acid - deoxyribonukleová kyselina

DSDV Destination Sequenced Distance Vector

MC Molecular Communication – molekulární komunikace

N3Sim A Simulation Framework for Diffusion-based Molecular Communication – simulační rámec pro difúzní molekulární komunikaci

NS-2 Network Simulator 2 – síťový simulátor 2

NS-3 Network Simulator 3 – síťový simulátor 3

PL Propagation loss – propagační ztráty

SNR Signal to Noise Ration – odstup signálu od šumu

TXP TextPattern

XML Extensible Markup Language - rozšiřitelný značkovací jazyk

# Seznam příloh

## Přílohy na cd

nano_dp.cc – zdrojový kód pro simulaci Brownova pohybu v NS-3

nano_dp.cfg - zdrojový kód pro simulaci Brownova pohybu v N3Sim