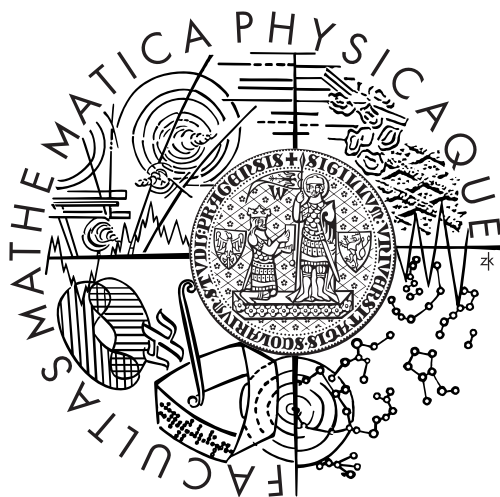


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko–fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Zuzana Vlčková

Chování konfiguračních a směrovacích mechanismů v ad-hoc sítích

Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jan Janeček, CSc.

Studijní obor: Informatika

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu Doc. Ing. Janu Janečkovi, CSc. za zajímavý výběr tématu a cenné připomínky během jeho zpracovávání. Mé poděkování rovněž patří všem mým blízkým za velkou podporu.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce. Obsah přiloženého CD je volně šiřitelný.

V Praze dne

Zuzana Vlčková

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 6 |
| 2 | Definice | 8 |
| 2.1 | Grafy | 8 |
| 2.2 | Uspořádání | 9 |
| 2.3 | Statistika | 10 |
| 2.3.1 | Kumulativní distribuční funkce | 10 |
| 3 | Model ad-hoc sítě | 12 |
| 4 | Interference | 14 |
| 4.1 | Sítě s jednou frekvencí | 14 |
| 4.1.1 | Modely interference | 14 |
| 4.1.2 | Porovnání metrik interference | 16 |
| 4.2 | Sítě pracující s více frekvencemi | 17 |
| 4.2.1 | Model interference | 17 |
| 4.2.2 | Porovnání metrik interference | 18 |
| 5 | Mechanismy řízení topologie sítě | 20 |
| 5.1 | API (Average Path Interference) | 21 |
| 5.1.1 | Popis algoritmu | 21 |
| 5.1.2 | Analýza | 22 |
| 5.1.3 | Výsledky simulace | 25 |
| 5.2 | Low Interference Forest Establisher - LIFE | 25 |
| 5.2.1 | Algoritmus | 26 |
| 5.2.2 | Analýza algoritmu | 26 |
| 5.2.3 | Výsledky simulace | 27 |
| 5.3 | LISE | 29 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.3.1 | Algoritmus | 30 |
| 5.3.2 | Analýza algoritmu | 30 |
| 5.4 | LLISE - Local LISE | 31 |
| 5.4.1 | Algoritmus | 32 |
| 5.4.2 | Analýza algoritmu | 32 |
| 5.4.3 | Výsledky simulace | 33 |
| 5.5 | XTC | 35 |
| 5.5.1 | Algoritmus | 36 |
| 5.5.2 | Analýza algoritmu | 36 |
| 5.5.3 | XTC na euklidovských grafech | 37 |
| 5.5.4 | Výsledky simulace | 41 |
| 5.6 | C2I - Algoritmus pro výpočet 2-interference | 42 |
| 5.6.1 | Analýza algoritmu | 43 |
| 5.6.2 | Výsledky simulace | 43 |
| 6 | Správa energie | 51 |
| 6.1 | Úroveň datové vrstvy | 51 |
| 6.1.1 | Distribuovaný mechanismus pro řízení topologie sítě | 51 |
| 6.2 | Úroveň síťové vrstvy | 52 |
| 6.2.1 | Power-Saving Localized Routing (SPOptPower) | 53 |
| 6.2.2 | Cost-Saving Localized Routing (SP-Cost) | 54 |
| 6.2.3 | Power-Cost-Saving Localized Routing (SPOptPower*Cost) | 54 |
| 7 | Modely mobilních sítí | 56 |
| 7.1 | Navržené měření mobility | 58 |
| 7.2 | Modely mobility | 59 |
| 7.2.1 | RWP - Random Waypoint Model | 59 |
| 7.2.2 | RGM - Random Gauss-Markov Model | 60 |
| 7.2.3 | NCM - Nomadic Community Mobility Model | 60 |
| 7.2.4 | RPGM - Reference Point Group Mobility | 61 |
| 8 | Simulace | 64 |
| 8.1 | Popis programu | 64 |
| 8.1.1 | Implementace pohybu | 64 |
| 8.2 | Výpočet změn hran v topologii | 65 |
| 8.3 | Výsledky simulace | 67 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 9 Závěr | 102 |
| A Program InterSim | 111 |
| A.1 Popis programu | 111 |
| A.2 Ovládání programu | 111 |
| A.3 Syntaxe scénáře | 113 |
| B Kreslení grafů | 115 |

Název práce: Chování konfiguračních a směrovacích mechanismů v ad-hoc sítích

Autor: Zuzana Vlčková

Katedra: Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jan Janeček, CSc.

e-mail vedoucího diplomové práce: janecek@cs.felk.cvut.cz

Abstrakt:

Technologie lokálních a personálních bezdrátových sítí dovolují budovat ad-hoc sítě nevyžadující připravenou infrastrukturu optických či metalických spojů. U takových sítí hrají vedle mechanismů sdílení kanálu a mechanismů směrování významnou roli i mechanismy vytvářející topologii sítě (topology control). Cílem diplomového projektu je vyhodnotit chování vybraných mechanismů pro konfiguraci topologie ad-hoc bezdrátových sítí optimalizujících vhodné kritérium - požadovaný vyzářený výkon nebo interferenci.

Reálné rozmístění stanic bezdrátových sítí obvykle neodpovídá rovnoměrnému nebo Poissonovskému rozložení, na něž jsou obvykle vázána publikovaná řešení. Zajímavé by bylo vyhodnocení metod minimalizujících interferenci pro reálnější rozložení stanic (shluky) a to i pro případ využití frekvenčního multiplexu.

Klíčová slova: ad-hoc sítě, interference, řízení topologie, mobilita

Title: Configuration and routing mechanisms behaviour in ad-hoc networks

Author: Zuzana Vlčková

Department: Department of Software Engineering

Supervisor: Doc. Ing. Jan Janeček, CSc

Supervisor's e-mail address: janecek@cs.felk.cvut.cz

Abstract:

Technologies of local and personal wireless networks allows building ad-hoc networks which don't require prepared infrastructure of optical or metallic wiring. Besides mechanisms of channel sharing and mechanisms of routing, also mechanisms of topology control are very significant, in these networks. The goal of this diploma project is to evaluate behaviour of chosen mechanisms for topology configuration of wireless ad-hoc networks, optimizing suitable criterion - required energy or interference.

Real node distribution of nodes in wireless networks doesn't agree with uniformly or Poisson distribution, published solutions are related to. Interesting would be to evaluate methods minimizing interference for more realistic node distribution (groups of nodes) and also in case of using frequency multiplexing.

Keywords: ad-hoc networks, interference, topology control, mobility

Kapitola 1

Úvod

Ad hoc sítě byly původně vyvinuty pro vojenské a záchranářské aplikace tak, aby fungovaly v místech, kde není žádná síťová infrastruktura. Díky své rychlé a ekonomicky nenáročné instalaci (rozmístění uzlů) nacházejí uplatnění v mnoha oblastech. Bezdrátové sítě mají v souvislosti s technickým rozvojem sítí stále větší význam. Výzkum v této oblasti přinesl např. paketové rádiové sítě (PRNs - packet radio networks), síť mobilních telefonů a množství dalších komerčních aplikací. Největší důraz se ale stále klade na vojenské aplikace. V současnosti můžeme tyto sítě vidět na různých místech - domácí sítě, senzorové sítě, PAN (personal area networks) nebo např. distribuované geodetické aplikace.

Mobilní bezdrátové sítě ad-hoc jsou sítě, které nemají pevnou infrastrukturu a nejsou spravovány žádnou centrální jednotkou. U ad-hoc sítí hovoříme o heterogenních sítích (s nerovnoměrným rozložením uzlů), takže počet uzlů v síti nemusí být směrodatnou informací. Abychom se přiblížili reálnému modelu, používáme tzv. modely mobility, které usměrňují pohyb uzlu. Komunikace v síti je ovlivněna charakteristikou prostředí přenosu signálu, kapacitou baterií a schopností uzlu regulovat svůj vysílací výkon.

Interference, neboli vzájemné rušení uzlů, je jedním z mnoha problémů, kterým musíme čelit při výběru směrovacího mechanismu. Existuje několik způsobů, jak interferenci minimalizovat. Uzly mohou snižovat svůj výkon, aby svým vysláním ovlivňovaly co nejméně dalších uzlů, mohou využívat více frekvencí apod. Úkolem směrovacích algoritmů minimalizujících interferenci je najít vhodnou kombinaci těchto dvou faktorů tak, aby zůstala zachována souvislost sítě a zároveň byl co nejvíce snížen vysílací výkon. Směrovacím mechanismům je věnována kapitola 5.

V článcích věnovaných algoritmům pro řízení topologie sítě jsou experimentální výsledky založeny na simulacích na vybraném modelu topologie [9][7][4][1]. Tyto modely se ale pro jednotlivé algoritmy liší, proto jejich výsledky nelze vzájemně porovnávat. Cílem mé práce je vytvořit modely sítě s reálným rozložením uzlů (kap. 7) a pomocí simulací ověřit vlastnosti daných algoritmů a porovnat vybrané směrovací mechanismy.

V kapitole 2 jsou základní definice, které budu v práci používat. Kapitola 3 popi-

suje model ad-hoc sítí a jeho vlastnosti. Kapitola 4 je věnována interferenci. Existuje více druhů interferencí, já se budu zabývat rušením, kterým působí vysílač na jiné uzly na stejném kanálu. Tato interference může být definována různými způsoby, které popisuji a porovnávám je. Věnuji se také interferenci v sítích pracujících na více frekvencích a porovnáním s interferencí v případě jedné vysílací frekvence. Kapitola 5 tvoří popis vybraných algoritmů pro snižování interference. V kapitole 6 se věnuji algoritmům snižujícím vysílací výkon. Toto snížení přímo ovlivňuje i velikost interference. Kapitola 7 popisuje vybrané modely mobility, které dobře vystihují skutečné chování uzlů v ad-hoc sítích a které budu následně používat v simulacích. V kapitole 8 popisuji simulační program a samotné simulace. Kapitola 8.3 je věnována analýze výsledků simulací.

Kapitola 2

Definice

V této kapitole definuji pojmy, které budu v práci používat.

2.1 Grafy

Definice 1. V *ohodnoceném neorientovaném grafu* $G = (V, E)$ je každé hraně $(u, v) \in E$ přiřazena váha ω_{uv} . Pokud odkazuji na ohodnocený graf, předpokládám, že váhy jsou symetrické ($\omega_{uv} = \omega_{vu}$).

Definice 2. Uzly *euklidovského grafu* [Euclidean Graph] jsou umístěny v euklidovské rovině. Váha hrany (u, v) je definována jako $\omega_{uv} = |uv|$, kde $|uv|$ je euklidovská vzdálenost mezi vrcholy u a v .

Definice 3. *Jednotkový graf* [Unit Disc Graph] je euklidovský graf, který obsahuje hranu (u, v) právě když $|uv| \leq 1$. Jednotkové grafy se občas používají v modelech ad-hoc sítí, které mají stejné (normalizované) vysílací výkony a všesměrové antény.

Definice 4. Definujme *k-sousedství hrany* $e = (u, v)$ [k -Neighbourhood] jako množinu všech hran, do kterých se lze dostat cestou délky k z jednoho z uzlů u nebo v . Tyto informace lze získat lokálním prohledáváním do šířky.

Definice 5. Graf je *řidký*, pokud platí, že $|E_p| = O(|V|)$. Někdy se vyžaduje silnější vlastnost, aby byly omezeny stupně všech vrcholů. Pro všechny uzly u platí $|N(u)| \leq c$ pro nějakou konstantu c .

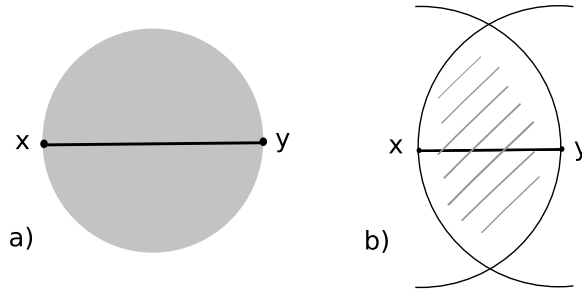
Definice 6. *Ohodnocení hrany* $c(u, v)$ je hodnota přiřazená této hraně. Pokud jsou ohodnoceny všechny hrany grafu G , nazýváme G *ohodnoceným grafem*. Cena cesty se definuje jako součet cen jednotlivých hran cesty.

Definice 7. *Vlastnost pokrytí.* Pro libovolnou dvojici vrcholů u a v , ať je $C(u, v)$ (resp. $C_p(u, v)$) cena nejlevnější cesty mezi u a v v G (resp. G_p). Pokud existuje konstanta t

taková, že $C_p(u, v) \leq t \cdot C(u, v)$ pro všechny dvojice vrcholů $u, v \in V$, pak graf G_p splňuje vlastnost pokrytí a nazýváme ho t -spanner grafu G^1 .

Definice 8. Gabrielův graf [Gabriel Graph] (obr. 2.2) je graf, který obsahuje hranu mezi x a y , právě když kruh s poloměrem xy neobsahuje žádné další uzly grafu (obr. 2.1 a)).
Formálně:

$$d(x, y) \leq \sqrt{|xz|^2 + |yz|^2}, \quad \forall z \in V, z \neq x, z \neq y \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: a) Gabrielův graf b) RNG

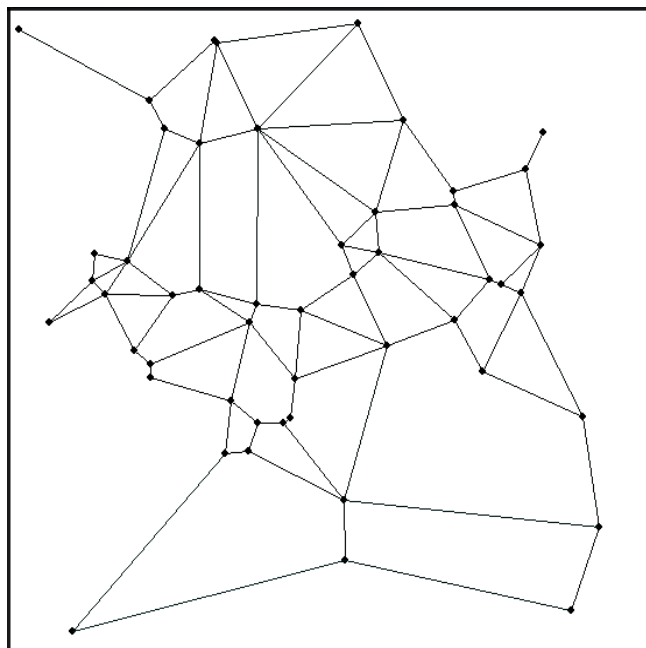
Definice 9. RNG [Relative Neighborhood Graph] je graf, který obsahuje hranu mezi uzly x a y právě když průnik kružnic s poloměry $|xy|$ se středy v x a y neobsahuje žádný další uzel grafu (obr. 2.1 b)).

2.2 Uspořádání

Definice 10. Relaci R na množině A nazveme **uspořádání** (částečné uspořádání), pokud je reflexivní, antisymetrická a tranzitivní. Uspořádání \preceq na množině A se nazývá **totální uspořádání**, pokud každé dva různé prvky jsou srovnatelné: $\forall a, \forall b \in A : a \preceq b \vee b \preceq a$.

Definice 11. Lexikografické uspořádání dvou trojic je definováno podle uspořádání prvních členů, nebo - pokud jsou stejné - podle druhých členů a v případě, že jsou taky stejné, podle třetích členů. Formálně: $(a_1, b_1, c_1) < (a_2, b_2, c_2) \Leftrightarrow (a_1 < a_2) \vee ((a_1 = a_2) \wedge (b_1 < b_2)) \vee ((a_1 = a_2) \wedge (b_1 = b_2) \wedge (c_1 < c_2))$

¹Protože neexistuje žádný vhodný český ekvivalent tohoto názvu, dále v textu budu používat termín spanner (případně t-spanner)



Obrázek 2.2: Gabrielův graf

2.3 Statistika

2.3.1 Kumulativní distribuční funkce

Všechny náhodné veličiny (diskrétní i spojité) mají kumulativní distribuční funkci. Je to funkce, která vyjadřuje pravděpodobnost, že náhodná veličina X je menší nebo rovná x (pro libovolnou hodnotu x) [20][15].

Formálně je kumulativní distribuční funkce $F(x)$ definována jako

$$F(x) = P(X \leq x), -\infty < x < \infty \quad (2.2)$$

U spojité náhodné veličiny se kumulativní distribuční funkce spočte jako integrál funkce hustoty pravděpodobnosti.

Pro diskrétní náhodnou veličinu je kumulativní distribuční funkce suma pravděpodobností, jak si ukážeme na následujícím příkladu:

Příklad.

Předpokládejme, že náhodná veličina X má následující rozdělení pravděpodobností $p(x_i)$:

| | | | | | | |
|----------|------|------|-------|-------|------|------|
| x_i | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $p(x_i)$ | 1/32 | 5/32 | 10/32 | 10/32 | 5/21 | 1/32 |

Kumulativní distribuční funkce $F(x)$ je tedy

| | | | | | | |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| x_i | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $p(x_i)$ | 1/32 | 6/32 | 16/32 | 36/32 | 31/21 | 32/32 |

Hodnota funkce $F(x)$ se nemění v místech mezi danými diskrétními hodnotami, takže platí např.:

$$F(1.3) = F(1) = 6/32$$

$$F(2.86) = F(2) = 16/21$$

Kapitola 3

Model ad-hoc sítě

Mobilní Ad-hoc sítě (MANET) jsou bezdrátové sítě, nabízející víceskokové spojení mezi mobilními uzly, které se samy organizují a konfigurují bez jakékoliv fixní infrastruktury. Tyto sítě jsou charakterizovány dynamickou topologií, chybějící centrální správou a limitovanými zdroji (např. výkon nebo šířka pásma).

Jeden ze způsobů, jak modelovat ad-hoc síť, je množina bodů ve 2-dimenzionálním (nebo případně i 3-dimenzionálním) euklidovském prostoru, kde každý bod reprezentuje uzel v síti. Každý uzel je určen svou polohou, výpočetní silou a vysílacím výkonem. Výpočetní síla uzlu určuje stupeň kódování a šifrování, který může uzel poskytnout - je to jedna z klíčových otázek bezdrátové komunikace, kvůli relativně snadnému odposlouchávání vysílačů. Celá komunikace v síti je určena charakteristikou přenášení rádiového kanálů, charakteristikou prostředí, kapacitou baterií a schopností řízení výkonu jednotlivých uzlů.

Velikost takové sítě je dána celkovým počtem uzlů v síti, případně v oblasti, která nás zajímá. Počet uzlů může být buď konstantní (předpokládáme, že žádné uzly nemohou vstupovat ani vystupovat ze sítě), nebo proměnný v závislosti na čase. Velké sítě obsahují počet uzlů řádově v tisících, zatímco malé sítě mohou obsahovat na stejné ploše jen desítky uzlů. Počet uzlů může relativně dobře vypovídat o hustotě sítě s homogenním rozložením uzlů, ale tato hodnota nám neřekne nic o heterogenní síti, v níž jsou uzly náhodně rozmístěné v terénu.

Existuje několik klíčových problémů spojených s topologií sítě s měnící se velikostí a hustotou, kterým musíme čelit vhodnou konstrukcí směrovacího protokolu. V řídkých sítích se mohou tvořit vzájemně nepropojené skupiny uzlů. To vede k nízké propojenosti uzlů a nedostatku cest k cílovým uzlům, což způsobuje vysokou ztrátovost paketů a vyšší režijní náklady. V důsledku toho je menší i propustnost sítě.

Se stoupající hustotou sítě je možné sestavit cesty i k uzlům, které jsou vzdálenější. Potom ale nevyhnutelně dochází ke zvýšení chybovosti aktivních spojů. Uzlům, které chtějí toto spojení využít, se bude muset doručovat více zpráv oznamujících chybu spojení. Tyto faktory vedou ke zvýšení režijních nákladů, častějšímu přetěžování, k většímu boji o šířku

pásma a nižšímu podílu doručených paketů.

Husté sítě jsou charakterizovány také vyššími stupni uzlů, kde každý uzel má ve svém dosahu vysílání víc sousedů. To implikuje souvislost mezi uzly v síti a vede ke snižování počtu skoků potřebných k dosažení cílového uzlu a zlepšení poměru doručených zpráv k celkovému počtu odeslaných zpráv. Příliš vysoký stupeň uzlů ale může způsobit více kolizí mezi sousedícími uzly. Tím se zvýší počet odeslaných řídicích paketů a úměrně tomu i energetická spotřeba.

Pro životnost uzlů v ad-hoc sítích je limitujícím faktorem výkon vysílače. Proto vzniklo mnoho mechanismů a algoritmů, které usilují o jeho minimalizaci. Tyto algoritmy představují řízení topologie sítě. V kapitole 5 popisují vlastnosti, které tyto algoritmy mají splňovat. Občas jsou ale založeny na nerealistických předpokladech:

1. Většina algoritmů na řízení topologie využívá geometrické struktury jako Delaunayovy trojúhelníky, minimální kostra nebo Gabrielovy grafy. Delaunayovy trojúhelníky ani minimální kostra se ale nedají vypočítat bez znalostí celkové topologie sítě, proto jsou tyto algoritmy nepraktické. Gabrielovy grafy lze vypočítat lokálně, využívá je třeba algoritmus API (popsán v 5.1).

2. Algoritmy zanedbávají překážky - předpokládají, že svět je bez jakýchkoli terénních překážek nebo zástavby.

Předpokládejme, že jakýkoli uzel může regulovat svůj vysílací výkon na libovolnou hodnotu v rozmezí od 0 až po maximální výkon v závislosti na požadovaném poloměru vysílání: pokud vysílá uzel u pro uzel v , u použije nejmenší možný výkon tak, aby dosáhl uzel v . Toto řízení výkonu nejenom redukuje interferenci, ale šetří zdroje energie a umožňuje lepší využití přenosového kanálu. Pokud je P_R výkon přijatého signálu a P_T je odvysílaný výkon, pak v prostoru bez jakýchkoli překážek platí

$$P_R = O\left(\frac{P_T}{d^\alpha}\right) \quad (3.1)$$

Skrytá konstanta ze vztahu 3.1 je závislá na zisku antény. Ve skutečném prostředí ale musíme počítat s odrazy, rozptylem a různými odchylkám, způsobenými zástavbou, terénními překážkami apod. K simulaci se běžně používá jednoduchý exponenciální model s α z intervalu $\langle 2, 4 \rangle$. V ideálním případě je $\alpha = 2$.

V této práci se budu zabývat řešením interference na vyšších síťových vrstvách. Uvažujme ad-hoc síť jako Euklidův graf $G = (V, E)$, kde V reprezentuje množinu uzlů sítě a E představují komunikační linky. Euklidovská pozice vrcholů v grafu odpovídá skutečné pozici uzlu v euklidovském dvojdimenzionálním prostoru, co znamená, že váha $w(u, v)$ představuje fyzickou vzdálenost mezi vrcholy u a v .

Pro každý uzel u označme R_u jeho maximální dosah vysílače. Protože uvažujeme pouze neorientované spoje, hrana uv existuje jenom v případě, že vzdálenost mezi uzly u a v není větší než $\min(R_u, R_v)$.

Kapitola 4

Interference

Bezdrátové vysílání se musí potýkat s interferencí z různých zdrojů. Dvě hlavní formy interference jsou interference přilehlých kanálů a interference ve společném kanálu.

V případě interference přilehlých kanálů pronikají některé složky vysílaného signálu i do těsně sousedících kanálů. Tomu se dá zabránit pečlivým stanovením ochranných pásem mezi alokovanými kanály.

U interference ve společném kanálu (někdy se jí říká taky interference úzkého pásma) může kvůli jiným blízkým systémům (AM/FM broadcasting) na stejné frekvenci vzniknout rušení. Tato interference může být minimalizována použitím mechanismů multiuser detection [14], směrovými anténami a alokační metodou dynamických kanálů.

4.1 Síť s jednou frekvencí

4.1.1 Modely interference

Mechanismy, vytvářející topologii sítě, které mají za úkol redukovat interferenci, jsou založené na různých metrikách. Dokud není předem známý typ přenosu dat, velikost interference u sítě může být založena pouze na řízení topologie sítě. Existuje několik definic interference. Podle [1] je interference maximální pokrytí hrany v grafu, kde pokrytí hrany $e = (u, v)$ je definováno jako počet uzlů, které jsou ve vzdálenosti $|uv|$ od jednoho z uzlů u nebo v . Formálně:

$$Cov(e) = |\{w \in V, |vw| \leq |uv| \cup |uw| \leq |uv|\}| \quad (4.1)$$

$$MaxPokrytiHran(G) = \max_{e \in E} Cov(e) \quad (4.2)$$

Druhým způsobem, jak definovat interferenci je maximální interference libovolného uzlu grafu. Interferenci uzlu definujeme jako počet vrcholů grafu, které pokrývají vrchol v svým rozsahem vysílání, když komunikují se svým nejvzdálenějším sousedem. Formální

definice říká, že pokud je u_r vzdálenost mezi uzlem u a jeho nejvzdálenějším sousedem v G , tak:

$$Cov(v) = |\{u \mid u \in V, v \in V : |uv| < u_r\}| \quad (4.3)$$

$$MaxPokrytiVrcholu(G) = \max_{v \in V} Cov(v) \quad (4.4)$$

Obě dvě výše zmíněné definice pracují se stejnou myšlenkou: globální interference sítě závisí pouze na lokální části s nejvyšší interferencí. Redukce interference v této části pak způsobí snížení interference celé sítě. Jeden z problémů je ten, že tyto metriky neberou v úvahu interferenci obecněji, síť s vysokou interferencí na jednom místě a nízkou všude jinde může mít stejnou interferenci jako jiná síť se stejně vysokou interferencí na všech místech. Proto lze předešlé modely doplnit o definici průměrné hranové interference jako součet pokrytí všech hran grafu vydělených počtem hran grafu:

$$PrumerneHranovePokryti(G) = \sum_{e \in E} Cov(e) / |E| \quad (4.5)$$

S použitím této definice neovlivní malé změny topologie sítě interferenci v takové míře jako v případě definice dané vztahem 4.1.

Nicméně, ani tato definice nebere v úvahu délku cest v grafu. To znamená, že cesty mohou růst až do nekonečna bez nějakého efektu na interferenci. Proto dodefinujeme průměrnou interferenci cesty grafu jako součet všech cest - optimálních vzhledem k interferenci - pro všechny dvojice vrcholů, vydělený počtem těchto dvojic. Cesta mezi vrcholy u, v , optimální vzhledem k interferenci, je cesta $IoptP_{uv} = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ mezi u a v , která má nejnižší interferenci podle následující definice: Interference cesty je definována jako součet pokrytí všech hran cesty.

$$IOptEdgeI(G) = \sum_{u,v \in V} \sum_{e \in IoptP_{uv}} Cov(e) \quad (4.6)$$

Tato definice má smysl, pokud se na cestu díváme jako na posloupnost hran a každý uzel potřebuje jistý čas na to, aby zprávu přijal a pak ji přeposlal dál. V programu InterSim (příloha A) vypočítávám kromě součtu interferencí hran i interferenci cesty, která je definována jako velikost množiny uzlů, které jsou rušeny alespoň jednou hranou této cesty (vztah 4.7). Rozdíl v porovnání s předešlou definicí je ten, že v původní definici interference hrany můžeme započítat některé vrcholy do výsledné sumy i vícekrát.

$$IOptPathI(G) = \sum_{u,v \in V} |\{w \in V \mid \exists(x, y) \in IoptP_{uv} : |yw| \leq |xy| \cup |xw| \leq |xy|\}| \quad (4.7)$$

Pokud je výsledná hodnota vydělena celkovým počtem dvojích vrcholů, které jsou v G spojeny, dostaneme průměrnou interferenci (pro všechny cesty, minimální vzhledem k interferenci).

Výše zmíněnou definici (vztah 4.6) můžeme pozměnit pro různé použité metriky. Metrika, která zvažuje interferenci u směrovacího algoritmu využívajícího nejkratší cesty (SP - shortest path), vznikne nahrazením cest optimálních vzhledem k interferenci ($IoptP_{uv}$) za nejkratší cesty SP_{uv} [2]. Zbytek vztahu je stejný jako v definici 4.6:

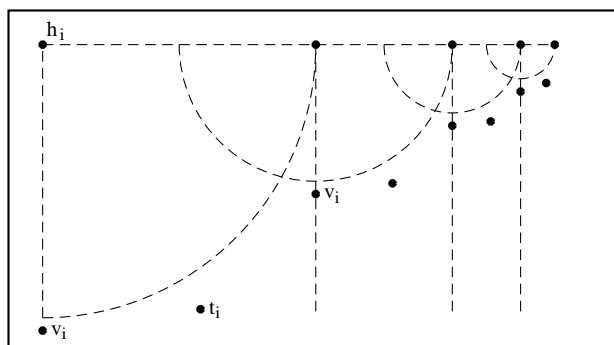
$$SPI(G) = \sum_{u,v \in V} \sum_{e \in SP_{uv}} Cov(e) \quad (4.8)$$

Průměrná interference pro všechny nejkratší cesty je definována jako $SPI(G)$ vydělené počtem dvojic uzlů, vzájemně propojených hranami grafu G .

Alternativním způsobem, jak se dívat na tuto metriku je pomocí vah přiřazených jednotlivým hranám, kde nejkratší cesta je nejmenší vzhledem k daným vahám. Znamená to, že pokrytí některých hran má větší vliv na celkovou interferenci grafu než ostatní hrany. V této metrice se může stát, že i když má graf $G_1 = (V, E_1)$ menší průměrné pokrytí hran než jiný graf $G_2 = (V, E_2)$, graf G_2 může mít nižší interferenci.

4.1.2 Porovnání metrik interference

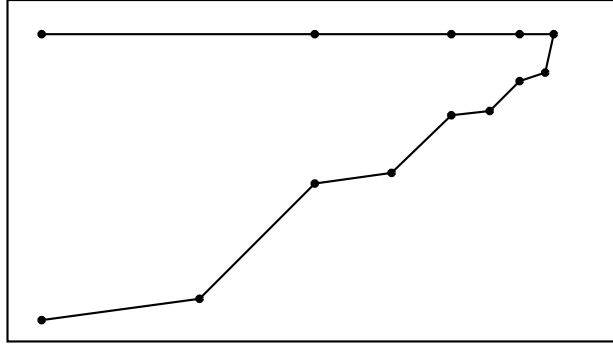
Ve snaze snížit interferenci je důležité uvědomit si, k čemu je metrika vlastně použita. Rozdílné metriky mohou dát zcela různé výsledky pro stejnou topologii: Topologie, která má nízkou interferenci vzhledem k jedné metrice, se může dosti lišit od optima v jiné metrice.



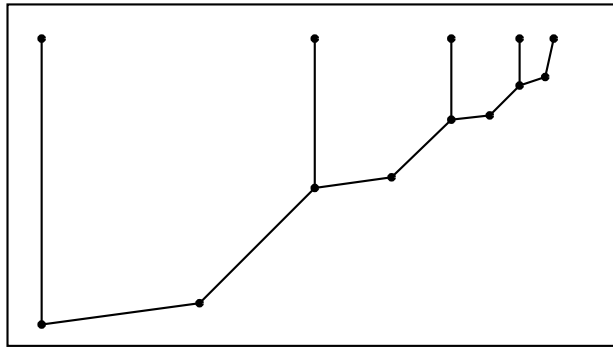
Obrázek 4.1: Uspořádání uzlů ve vybrané topologii

Na obr. 4.1 jsou rozmístěny uzly následujícím způsobem: Nahoře je horizontální řetěz uzlů h_i s exponenciálně rostoucími vzdálenostmi. To znamená, že mezi uzly h_i a h_{i+1} je vzdálenost 2^i . Každý z těchto uzlů h_i má odpovídající uzel v_i , který je umístěn pod ním ve vzdálenosti větší než 2^{i-1} . Uzly v_i tudíž taky tvoří exponenciální řetězec. Nakonec jsou mezi uzly v_i a v_{i-1} umístěny pomocné uzly t_i , pro které platí $|h_i, t_i| > |h_i, v_i|$.

Podíváme se na topologii, která je optimální vzhledem k metrice maximálního pokrytí hran. Abychom vypočítali výslednou interferenci, využijeme faktu, že hrana z h_i do h_{i+1}



Obrázek 4.2: Použití algoritmu RNG s interferencí $\Theta(n)$



Obrázek 4.3: Optimální řešení s konstantní interferencí

pokrývá všechny uzly h_j , kde $j < i$. Uzel h_0 , který je nejvíc vpravo, je pokryt všemi uzly h_i pro $i > 0$. Takže když použijeme metriku průměrné interference cesty, interference grafu bude $\Theta(n)$ (obr. 4.2).

Optimální topologie s konstantní interferencí ale vůbec nespojuje horní řetězec uzlů, jak je to vidět na obr. 4.3.

4.2 Síť pracující s více frekvencemi

4.2.1 Model interference

Předpokládejme, že každá hrana (u, v) grafu sítě, má určenou frekvenci vysílání mezi uzly u a v . Vztah $f(u, v) = f(v, u)$ definuje frekvenci na hraně (u, v) . Dále předpokládejme, že množina frekvencí, které jsou použity v síti, je F_p a její velikost je omezena číslem p . Cílem algoritmu na řízení topologie sítě je vypočítat podgraf daného grafu sítě a přiřadit každé hraně tohoto podgrafu frekvenci tak, aby se minimalizoval výkon, interference a spotřeba energie.

Definujme frekvenční množinu uzlu v jako množinu všech frekvencí, které tento uzel

používá [16]:

$$F_p(v) = \{f(u, v) \mid u \in N(v)\} \quad (4.9)$$

kde $f(u, v) \in F_p$.

Označme R_u dosah vysílání uzlu u maximálním výkonem a $D(u, R_u)$ množinu všech uzlů, které mohou být rušeny vysíláním uzlu u . Pro zjednodušení zanedbáme rozdílné podmínky šíření signálu a budeme uvažovat kruh se středem v u a poloměrem R_u :

$$D(u, r) = \{v \mid |uv| < r\} \quad (4.10)$$

Hrana může interferovat jenom s uzly, které pracují se stejnou frekvencí. Definujme množinu p -interferujících vrcholů k hraně $e = (u, v)$ následujícím způsobem:

$$ISet_p(u, v) = \{w \in V \mid f(u, v) \in F_p(w) \wedge w \in D(u, |uv|) \cup D(v, |uv|)\} \quad (4.11)$$

kde p je počet používaných frekvencí v síti.

Pak p -interference hrany definujeme jako

$$I_p(u, v) = |ISet_p(u, v)| \quad (4.12)$$

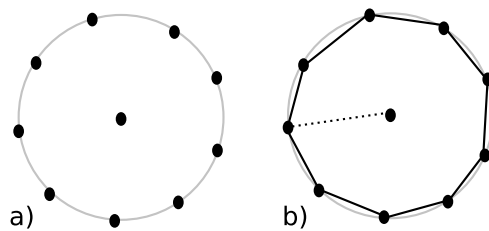
Definujme p -interferenci grafu $G(V, E)$ s maximálně p frekvencemi jako

$$I_p(G) = \max_{e \in E} (I_p(e)) \quad (4.13)$$

Naším úkolem bude vybrat podmnožinu hran z původního grafu a každé hraně v ní přiřadit frekvenci tak, aby zůstala síť spojitá a abychom minimalizovali interferenci $I_p(G)$.

4.2.2 Porovnání metrik interference

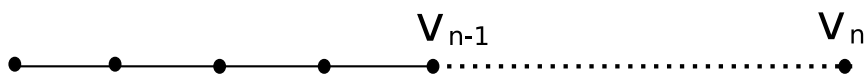
V závislosti na rozložení uzlů v síti lze použitím dalších frekvencí docílit někdy i řádové zlepšení vzhledem k interferenci.



Obrázek 4.4: Optimální topologie pro síť ve tvaru hvězdy

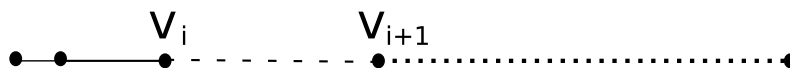
Na obr. 4.4 a) je příklad sítě, kde optimální interference s jednou frekvencí je $\Omega(n)$ ale optimální interference se dvěma frekvencemi je $O(1)$. Síť se skládá uzlu umístěného

uprostřed a $n - 1$ uzlů ve vzdálenosti r od středu. Aby zůstala zachována souvislost sítě, musí existovat alespoň jedna hrana vedoucí do uzlu uprostřed. Díky této hraně mohou být všechny uzly rušeny vysíláním ze středového uzlu a proto je interference grafu rovna $n - 1$. Pokud ale použijeme druhou frekvenci, můžeme vytvořit topologii, kde na jedné frekvenci bude jenom hrana vedoucí do středu a ostatní uzly budou spojeny hranami s druhou frekvencí. Proto je podle vztahu 4.13 interference grafu 3, jak je zobrazeno na obr. 4.4 b).



Obrázek 4.5: Speciální typ rozložení uzlů v síti

Podobná situace nastává i v případě obrázku č. 4.5. Interference v případě jedné frekvence je určena hranou (v_{n-1}, v_n) , takže její hodnota je n . Pokud ale bude mít hrana (v_{n-1}, v_n) přiřazenou druhou frekvenci, bude interference I_2 tohoto grafu 3.



Obrázek 4.6: Exponenciální řetězec uzlů

Dalším příkladem je exponenciální řetězec uzlů zobrazený na obr. 4.6. Vzdálenost mezi sousedními uzly v_i a v_{i+1} je 2^i . Pokud síť používá jednu frekvenci, je výsledná interference n (kvůli hraně (v_{n-1}, v_n)). V případě použití p frekvencí je interference $O(n/p)$.

Toto jsou ale speciální sítě s předem daným vhodným rozmístěním uzlů. Mnohem zajímavější je sledovat, jaké jsou rozdíly v sítích s náhodným rozložením uzlů, což uvidíme v kapitole 8, věnované simulacím.

Kapitola 5

Mechanismy řízení topologie sítě

Ad-hoc sítě nemají žádnou centrální infrastrukturu a proto nemají ani pevnou topologii. Je tedy důležité určit vhodnou topologii pro ad-hoc síť s nepravidelně rozmístěnými uzly, což by mělo být implementováno ve směrovacích protokolech vyšších vrstev.

Když spolu komunikují dva uzly u a v , potřebují na odeslání zprávy výkon kvadraticky rostoucí s jejich vzdáleností. Pokud je v cestě jeden nebo více přenosových uzlů, požadavky na vysílaný výkon klesnou.

Primárním cílem algoritmů pro řízení topologie sítě je zakázat komunikační linky s velkou délkou a místo nich posílat zprávu pomocí několika malých (energeticky efektivních) skoků. Pro tento účel si každý uzel v síti vybírá „blízké“ sousedy, se kterými bude spojen. Pokud je dosah uzlu příliš malý, síť nemusí být souvislá. Pokud je dosah velký, narůstají požadavky na vysílaný výkon a zvyšuje se interference.

Ať $G = (V, E)$ reprezentuje ad-hoc síť před spuštěním algoritmu pro řízení topologie sítě. V je množina uzlů sítě, E určuje komunikační linky. Hrana (u, v) v E existuje právě tehdy, když spolu mohou uzly u a v vzájemně přímo komunikovat. Po ukončení algoritmu vznikne podgraf $G_{tc} = (V, E_{tc})$ grafu G , kde E_{tc} je množina zbylých linek. Výsledná topologie G_{tc} by měla splňovat následující vlastnosti:

1. Symetrie. *Výsledná topologie by měla být symetrická, to znamená, že uzel u je sousedem uzlu v právě když soused v je sousedem uzlu u .*

Asymetrické grafy jsou nepraktické, protože komplikují základní požadavky komunikačních primitiv. V asymetrickém grafu se stává velkým problémem už posílání řídicích ACK¹ zpráv.

2. Souvislost. *Dva uzly u a v jsou spojené, pokud existuje cesta z u do v . Pokud jsou dva uzly spojené v G , měly by zůstat spojené v G_{tc} .*

¹ACK je paket, který se používá v protokolech řídicích přenos dat k oznámení doručení zprávy.

Tuto vlastnost splňují i grafy, které netvoří dobrou topologii (např. minimální kostra daného grafu), proto se většinou od topologie vyžaduje silnější vlastnost:

3. Vlastnost pokrytí. (*t-spanner*). Pro libovolné dva uzly u a v platí, že pokud má optimální cesta mezi u a v v G cenu c , tak optimální cesta mezi u a v má v G_{tc} cenu $f(c)$, kde $f(c)$ je shora ohraničená výrazem tc .

Nejčastěji se za cenu hrany považuje euklidovská vzdálenost nebo různé metriky energie. V obou modelech je cena cesty definována jako součet cen všech linek na cestě.

Jak už jsem zmínila výše, primárním cílem je zrušit v grafu dlouhé linky. Formálně:

4. Hustota. Výsledný graf G_{tc} by měl být řídký, to znamená, že počet hran by měl být srovnatelný s počtem vrcholů ($|E_{tc}| = O(|V|)$).

Protože tato podmínka nevyklučuje graf, kde je uzel s mnoha sousedy (např. topologie hvězdy), používá se vylepšená verze předešlé vlastnosti:

5. Nízký stupeň. Každý uzel v grafu G_{tc} má nízký počet sousedů. Maximální stupeň uzlu v celém grafu G_{tc} lze seshora omezit konstantou.

K těmto požadavkům je možné přidat další - např. že graf by měl být planární, aby na něm fungovaly geometrické algoritmy jako GOAFR/GOAFR+ nebo GFG/GPSR [10], [11].

V následujících kapitolách budu používat značení sledovaných veličin (MaxI, AvgI apod.), popsané v kapitole 8.3.

5.1 API (Average Path Interference)

V této kapitole se budeme věnovat algoritmu na řízení topologie, kterého výstupem je redukováný graf $G_{TC} = (V, E_{TC})$ se sníženou interferencí vzhledem k definici průměrné interference cest (vztah 4.5). K měření kvality spojení mezi dvěma uzly se používá cena energie $c(u, v)$.

5.1.1 Popis algoritmu

Algoritmus API (Average Path Interference - interference průměrných cest) pozůstává ze dvou kroků:

V prvním se spočte Gabrielův graf a ten se ve druhém kroku zredukuje. Výpočet Gab-

rielova grafu (definice 8) probíhá následovně:

Algoritmus 1.

1. Pro každý vrchol u :
2. Broadcastem se odvysílá plným výkonem vysílače uzlu u testovací zpráva.
3. Pro každou doručenou testovací zprávu si uzel:
4. zaznamená sílu doručeného signálu od v jako p_{rec}^v
5. vypočítá vzdálenost d od uzlu u k sousedovi v s použitím modelu poklesu síly signálu $p_{rec} = p_{org}/d^\alpha$.
6. spočte cenu $c(u, v)$ potřebnou pro poslání zprávy od u do v , založenou na funkci $c(u, v) = d^\alpha$.
7. odpoví uzlu v hodnotou $c(u, v)$.
8. Počká, dokud všichni sousedi neodpoví zprávou s hodnotou $c(u, v)$, kde v je souseď.
9. Každému sousedovi pošle všechny hodnoty $c(u, v)$
10. Pro každého souseda v :
11. aktivuje hranu (u, v) právě když neexistuje vrchol w takový, že $c(u, w) + c(w, v) \leq c(u, v)$.

V dalším kroku odstraníme hrany, které způsobují vysokou interferenci. Pokrytí každé hrany můžeme vypočítat lokálně. Pokud může být hrana nahrazena dvěma hranami, které spolu v součtu dávají menší pokrytí, bude nimi nahrazena.

12. Pro každý vrchol u :
13. Pro každý vrchol v :
14. if $\exists w \in V$ takový, že $Cov(u, w) + Cov(w, v) < Cov(u, v)$ then
15. označíme (u, w) a (w, v) .
16. else
17. označíme hranu (u, v) .
18. Odstraníme všechny neoznačené hrany.

5.1.2 Analýza

Tvrzení 1. Graf, který je výsledkem algoritmu 1, je spanner (def. 7) vzhledem k výkonu.

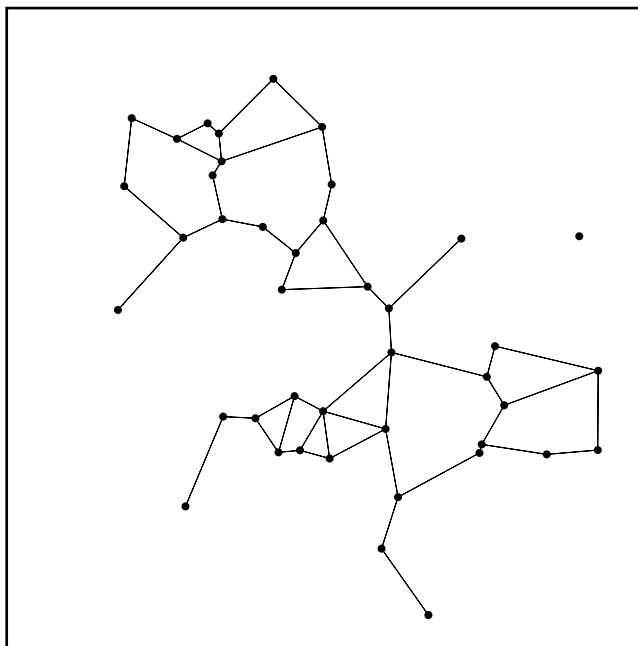
Důkaz. Protože v prvním kroku algoritmu 1 vznikne Gabrielův graf, který obsahuje všechny cesty optimální vzhledem k výkonu, potřebujeme zvažovat pouze druhý krok.

Když je odstraněna hrana e , tak žádná z hran e_1 , e_2 , které ji nahrazují, nemůže být delší než původní hrana. Pokud by byly delší než e , jejich spojené pokrytí by muselo být větší než pokrytí původní hrany. To platí díky definici pokrytí hrany - pokud jsou obě hrany delší než e , musí být uzly, které byly pokryty hranou e , pokryté buď hranou e_1 nebo e_2 . V případě, že spojené pokrytí hran e_1 a e_2 není menší než pokrytí hrany e , by hrana e nemohla být algoritmem odstraněna. Což vede ke sporu.

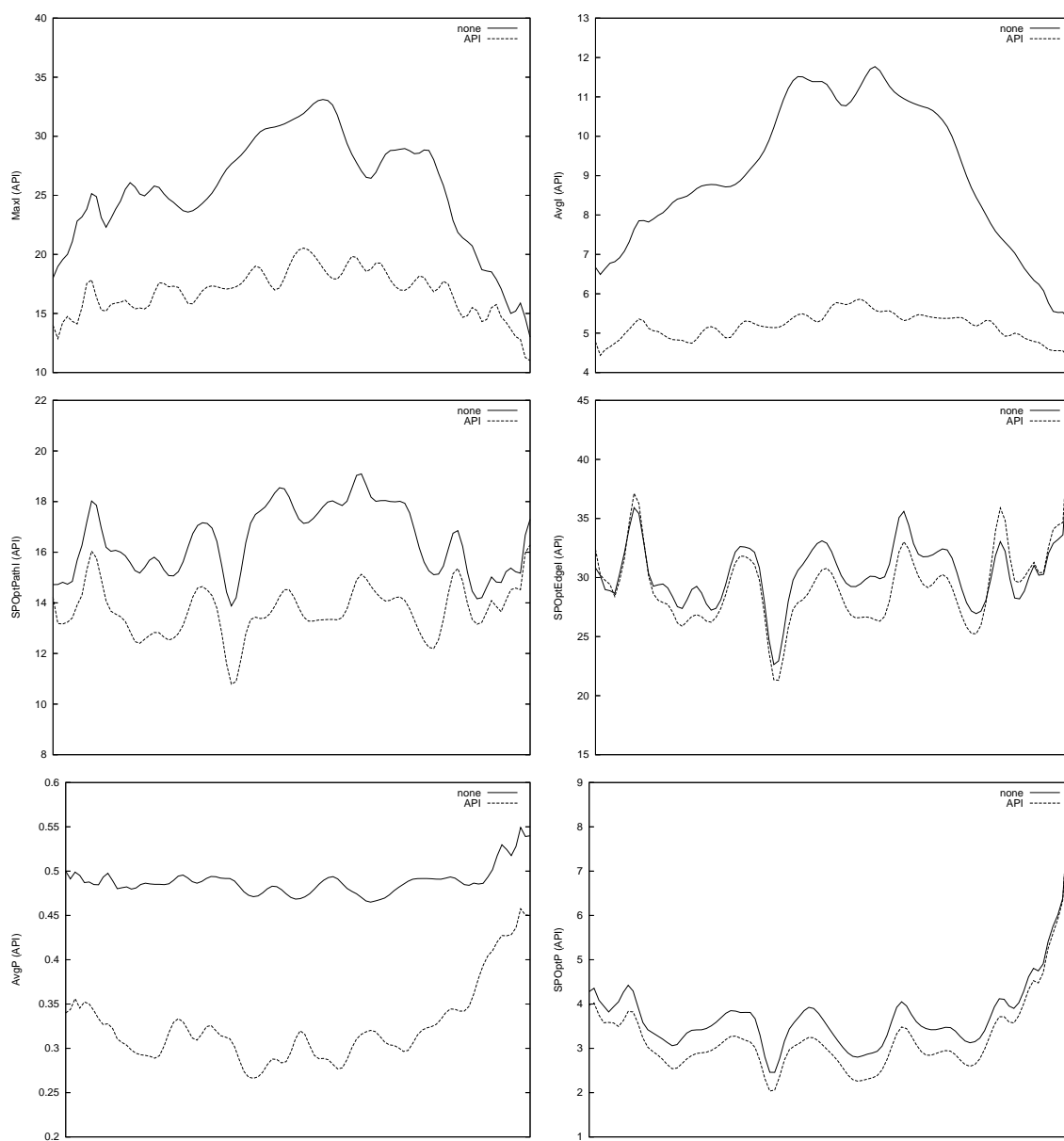
Pokud je d délka původní linky a délky dalších dvou linek, které jí nahrazují, jsou d_1 a d_2 , platí: $d_1 \leq d + d_2$ a $d_2 \leq d + d_1$. Protože nejméně jedna hodnota z d_1 , d_2 je nanejvýš d , nahrazující linka může být nanejvýš $d + d = 2d$. Proto pokud původní délka byla l a původní cena energie l^α (kde α je konstanta, závislá na energetickém modelu), nová cena energie nebude větší než $l^\alpha + (2l)^\alpha$. Jinými slovy, poměr mezi novou a starou cenou energie je $1 + 2^\alpha$. \square

Gabrielův graf je planární, takže redukovaný Gabrielův graf, který vznikne po použití algoritmu 1 bude určitě taky planární.

Algoritmus 1 nemusí vytvořit pokud jde o interferenci optimální graf, protože každý z uzlů má jenom lokální informace o topologii. Ale hrany, které mohou být nahrazeny dvěma jinými s menší celkovou interferencí, jsou z grafu určitě odstraněny. Algoritmus může vynechat hrany, které by bylo možné nahradit delšími cestami. Když ale roste délka cesty, vzroste pravděpodobně i interference této cesty a proto bude tato cesta méně vhodným kandidátem na odstranění hrany.



Obrázek 5.1: Algoritmus API na scénáři G5 (kap. 8.1.1)



Obrázek 5.2: Porovnání topologie vytvořené algoritmem API s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3).

| | None | API | | None | API |
|------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| MaxI (Avg) | 25,59 | 16,86 | MaxP (Avg) | 0,99 | 0,94 |
| MaxI (Med) | 26 | 17 | MaxP (Med) | 0,99 | 0,96 |
| MaxI (Min) | 13 | 11 | MaxP (Min) | 0,99 | 0,61 |
| MaxI (Max) | 36 | 25 | MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 |
| AvgI (Avg) | 9,04 | 5,17 | AvgP (Avg) | 0,49 | 0,32 |
| AvgI (Med) | 8,81 | 5,17 | AvgP (Med) | 0,49 | 0,32 |
| AvgI (Min) | 5,29 | 4,28 | AvgP (Min) | 0,44 | 0,24 |
| AvgI (Max) | 12,37 | 6,39 | AvgP (Max) | 0,57 | 0,48 |
| SPOptPathI (Avg) | 16,47 | 13,67 | SPOptP (Avg) | 3,73 | 3,26 |
| SPOptPathI (Med) | 16,72 | 13,66 | SPOptP (Med) | 3,57 | 3,07 |
| SPOptPathI (Min) | 12,44 | 9,12 | SPOptP (Min) | 1,88 | 1,46 |
| SPOptPathI (Max) | 21,43 | 17,05 | SPOptP (Max) | 8,42 | 8,47 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 30,50 | 29,36 | Links (Avg) | 49,17 | 2,89 |
| SPOptEdgeI (Med) | 30,43 | 29,08 | Links (Med) | 49 | 3,00 |
| SPOptEdgeI (Min) | 19,29 | 17,07 | Links (Min) | 0 | 0,00 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,20 | 43,30 | Links (Max) | 64 | 11,00 |

Tabulka 5.1: Výsledky simulací pro algoritmus API (scénář G5)

5.1.3 Výsledky simulace

Algoritmus API (obr. 5.1) je ze všech sledovaných algoritmů nejméně náročný na výpočetní zdroje. Hodnoty MaxI i AvgI snižuje v porovnání s původním grafem zhruba o 20%. Čím hustější je původní graf, tím je toto zlepšení výraznější (tab. 5.1).

V hustých grafech dokáže algoritmus API snížit hodnoty AvgP až na polovinu AvgP v původním grafu.

Na obr. 5.2 jsou zobrazeny časové průběhy vybraných veličin (porovnáváme původní graf s topologií API).

5.2 Low Interference Forest Establiher - LIFE

Algoritmus LIFE vytváří z existující sítě les (se zachováním souvislosti grafu). Vychází z předpokladu, že každá další hrana může zvýšit interferenci. Seřadíme hrany vzestupně podle interference a do výstupního grafu je přidáváme pouze v případě, že v něm tato hrana nevytvoří cyklus [19].

5.2.1 Algoritmus

Vstup: množina vrcholů V , pro každé $v \in V$ je r_v^{max} maximální poloměr vysílání.

Algoritmus 2.

1. Do E přiřadíme všechny vhodné nezpracované hrany (u, v)
($r_u^{max} \geq |uv|$ a $r_v^{max} \geq |uv|$)
2. $E_{LIFE} = \emptyset$
3. $G_{LIFE} = (V, E_{LIFE})$
4. **while** $E \neq \emptyset$ **do**
5. $e = (u, v) \in E$ s minimálním pokrytím
6. **if** u, v nejsou spojeny v G_{LIFE} **then**
7. $E_{LIFE} = E_{LIFE} \cup \{e\}$
8. **end if**
9. $E = E \setminus \{e\}$
10. **end while**

Výstup: Graf G_{LIFE}

5.2.2 Analýza algoritmu

V následující části kapitoly dokáží tvrzení, která platí pro výstup algoritmu 2 [1].

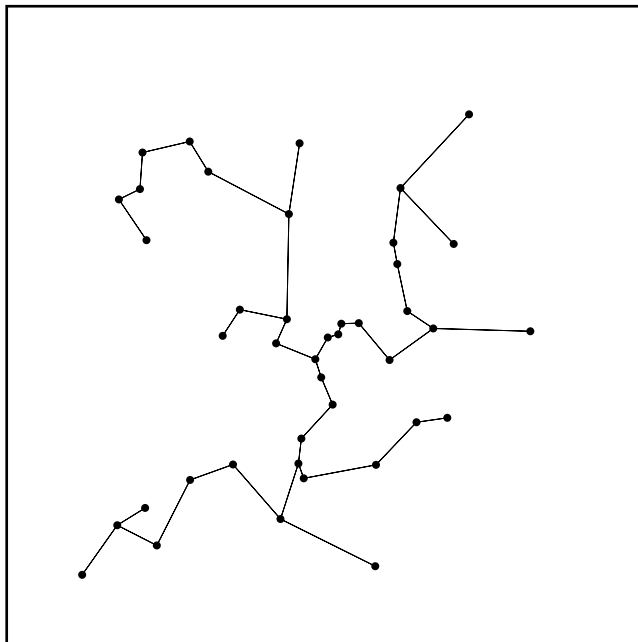
Tvrzení 2. *Výsledkem algoritmu 2 je les s minimální interferencí.*

Důkaz. Algoritmus 2 vypočítá kostru grafu $G = (V, E)$ (v případě nesouvislého to bude les složený z koster jednotlivých komponent grafu G). Když dokážeme tvrzení pro souvislý graf, bude platit pro všechny komponenty a tudíž i pro celý strom. Proto od této chvíle předpokládáme, že graf je souvislý. Všechny hrany z E mají přiřazenou váhu $Cov(e)$. Na určení kostry používáme hladový algoritmus (např. Kruskalův algoritmus pro vytváření minimální kostry [22]).

Abychom tvrzení dokázali, musíme ještě ukázat, že daná kostra je optimální vzhledem k interferenci. To platí, protože algoritmus pro výpočet minimální kostry minimalizuje největší ohodnocení hrany v grafu.

(Kvůli sporu předpokládáme, že graf G^* je minimální kostra a hrana e má v tomto grafu maximální ohodnocení, které je větší než maximální ohodnocení hrany v grafu G_{LIFE} . Nahradíme hranu e odpovídající hranou z grafu G_{LIFE} . Dostáváme strom, ve kterém je součet ohodnocení menší než v původním grafu G^* , což je ve sporu s předpokladem, že G^* je minimální kostra.) □

S vhodnou implementací dotazu souvislosti (alg. 2, řádek 6) je časová složitost algoritmu $O(n^2 \log n)$. Pokud síť pozůstává z více izolovaných komponent, můžeme (např. s použitím Primova algoritmu) algoritmus implementovat v časové složitosti $O(n^2)$. Algoritmy, které počítají minimální kostru distribuovaně (a tudíž jsou vhodné pro ad-hoc sítě), jsou popsány v [23].



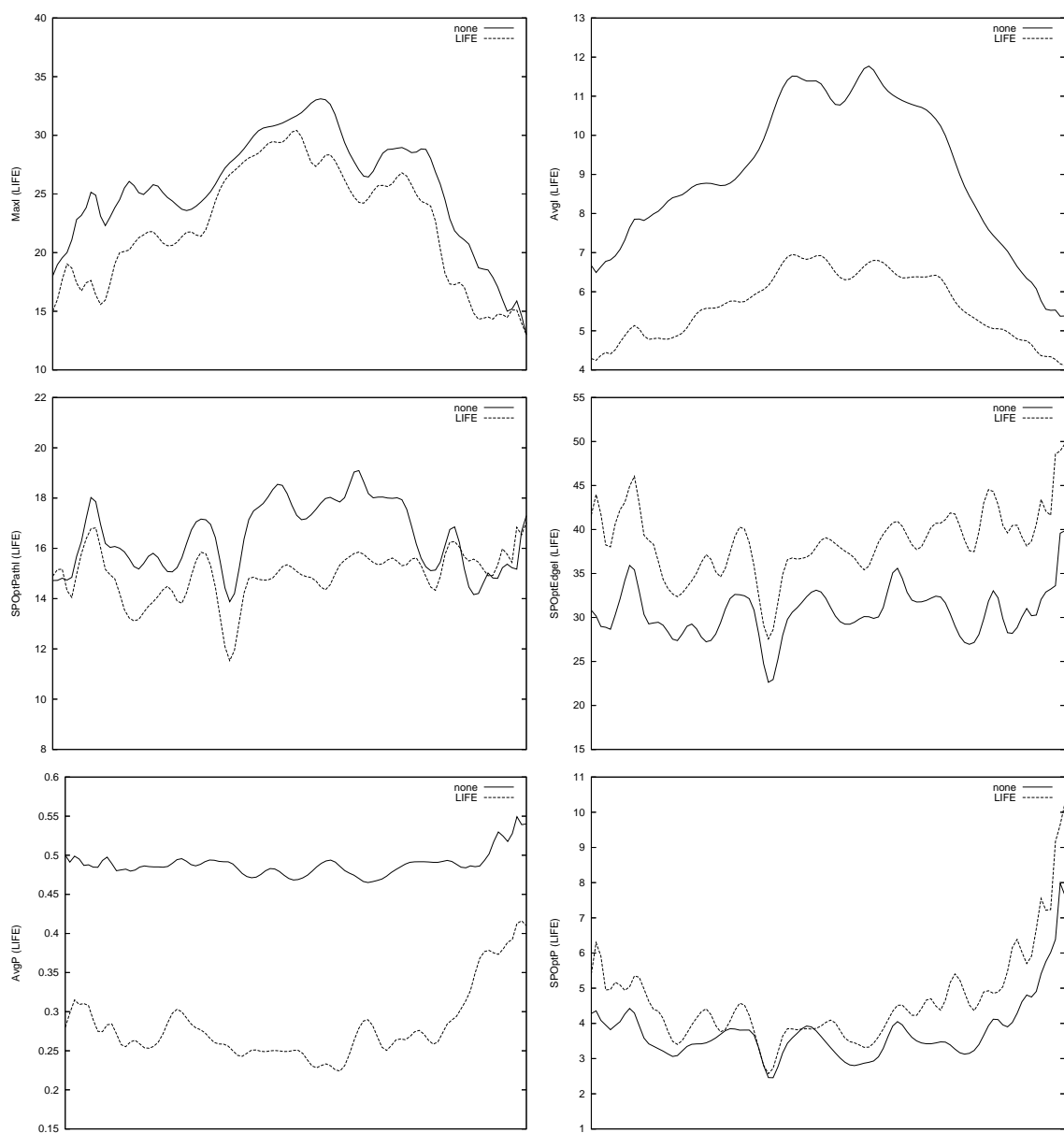
Obrázek 5.3: Algoritmus LIFE na scénáři G5 (kap. 8.1.1)

5.2.3 Výsledky simulace

Na obr. 5.3 je vidět topologie LIFE během simulace na scénáři G5, definovaném v kap. 8.1.1.

LIFE je algoritmus, který vytváří kostru původního grafu. Tím, že obsahuje málo hran, se snižuje celková interference grafu, nicméně u veličin, které pro svůj výpočet hledají nejkratší cesty, není zlepšení natolik patrné. Mezi libovolnými dvěma uzly grafu totiž existuje právě jedna cesta, takže nelze optimalizovat interferenci cesty nebo výkon potřebný na odeslání paketů mezi zvolenými uzly. U porovnávání topologie LIFE s neredukovaným grafem sítě můžeme vidět, že např. výkon - potřebný pro odeslání paketu mezi dvěma zvolenými body v topologii LIFE - je v průměrném případě vyšší než u neredukovaného grafu. Je to způsobeno tím, že neredukovaný graf má k dispozici kratší (a tudíž výkonově méně náročné) cesty.

Protože neexistují alternativní cesty přenosu paketů, není síť stabilní a jakýkoliv výpadek uzlu nebo hrany naruší podmínku souvislosti grafu.



Obrázek 5.4: Porovnání topologie vytvořené algoritmem LIFE s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3).

| | None | LIFE | | None | LIFE |
|------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| MaxI (Avg) | 25,59 | 22,33 | MaxP (Avg) | 0,99 | 0,92 |
| MaxI (Med) | 26 | 23,00 | MaxP (Med) | 0,99 | 0,94 |
| MaxI (Min) | 13 | 13,00 | MaxP (Min) | 0,99 | 0,60 |
| MaxI (Max) | 36 | 33,00 | MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 |
| AvgI (Avg) | 9,04 | 5,65 | AvgP (Avg) | 0,49 | 0,28 |
| AvgI (Med) | 8,81 | 5,64 | AvgP (Med) | 0,49 | 0,27 |
| AvgI (Min) | 5,29 | 4,08 | AvgP (Min) | 0,44 | 0,19 |
| AvgI (Max) | 12,37 | 7,31 | AvgP (Max) | 0,57 | 0,43 |
| SPOptPathI (Avg) | 16,47 | 14,94 | SPOptP (Avg) | 3,73 | 4,60 |
| SPOptPathI (Med) | 16,72 | 15,13 | SPOptP (Med) | 3,57 | 4,39 |
| SPOptPathI (Min) | 12,44 | 9,85 | SPOptP (Min) | 1,88 | 1,91 |
| SPOptPathI (Max) | 21,43 | 18,06 | SPOptP (Max) | 8,42 | 10,41 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 30,50 | 38,54 | Links (Avg) | 49,17 | 34,61 |
| SPOptEdgeI (Med) | 30,43 | 38,63 | Links (Med) | 49 | 35,00 |
| SPOptEdgeI (Min) | 19,29 | 22,67 | Links (Min) | 0 | 0,00 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,20 | 52,60 | Links (Max) | 64 | 43,00 |

Tabulka 5.2: Výsledky simulací pro algoritmus LIFE (scénář G5)

Minimalizování interference se u LIFE je projeví výrazněji na hustých grafech, tam je totiž redukce hran více patrná. Jak potvrzují výsledky měření (kap. 8.3), topologie LIFE není vhodná pro skupinové rozmístění uzlů. Hrany, propojující skupiny uzlů s ostatními skupinami, jsou totiž jediným spojením k uzlům v jiných skupinách. Tyto linky jsou přetížené a způsobují množství kolizí.

Tabulka 5.2 a grafy zobrazené na obr. 5.4 ukazují porovnání výsledků simulací pro původní graf (bez jakékoli redukce hran) a pro topologii LIFE.

5.3 LISE

Algoritmus LISE (Low Interference Spanner Establiher) se pokouší snížit hranové pokrytí sítě a požaduje, aby byl výsledný graf euklidovský t -spanner. To znamená, že hrana e s délkou l může být odstraněna, pokud existuje náhradní cesta, která není delší než tl a ve které nemá žádná hrana větší pokrytí než e . Čím větší je t , tím delší může být náhradní cesta [19].

Označme $p^*(u, v)$ délku nejkratší cesty mezi uzly u a v v grafu G .

5.3.1 Algoritmus

Vstup: množina vrcholů V , pro každé $v \in V$ je r_v^{max} maximální poloměr vysílání.

Algoritmus 3.

1. Do E přiřadíme všechny vhodné nezpracované hrany (u, v) ,
pro které $r_u^{max} \geq |uv|$ a $r_v^{max} \geq |uv|$
2. $E_{LISE} = \emptyset$
3. $G_{LISE} = (V, E_{LISE})$
4. **while** $E \neq \emptyset$ **do**
5. $e = (u, v) \in E$ s maximálním pokrytím
6. **while** $|p^*(u, v) \in G_{LISE}| > t|u, v|$ **do**
7. $f =$ hrana $\in E$ s minimálním pokrytím
8. přesuneme všechny hrany $\in E$ s pokrytím $Cov(f)$ do E_{LISE}
9. **end while**
10. $E = E \setminus \{e\}$
11. **end while**

Výstup: Graf G_{LISE}

5.3.2 Analýza algoritmu

Pro graf, který vznikne po použití algoritmu 3, platí následující tvrzení [1]:

Tvrzení 3. Graf $G_{LISE} = (V, E_{LISE})$, který je výstupem algoritmu 3, obsahuje všechny hrany $e \in E$ z původního grafu $G = (V, E)$ takové, že $Cov(e) < I(G_{LISE})$.

Důkaz. Kvůli sporu předpokládejme, že v E existuje hrana e , která není v E_{LISE} a pro kterou platí $Cov(e) < I(G_{LISE})$. Algoritmus 3 tuto hranu nemohl zpracovat na řádce 7, protože na následující řádce by vložil všechny hrany s $Cov(e)$ - tudíž i e - do E_{LISE} . V E_{LISE} musí existovat hrana f , která určuje výslednou interferenci grafu G_{LISE} , tj. $Cov(f) = I(G_{LISE})$. Když jsme tuto hranu zpracovávali na řádce 7, všechny hrany, které jsme vybrali na řádce 5, musely mít pokrytí větší nebo rovné $Cov(f)$, protože maximum uspořádané množiny musí být větší nebo rovné jeho minimu. Hranu e algoritmus na 5. řádce nikdy nevybral (a proto neodstranil z E na řádce 10). To znamená, že v okamžiku určení f jako hrany s minimálním pokrytím, je e stále v E , takže $Cov(f) \leq Cov(e)$, což vede ke sporu. \square

S těmito poznatky jsme už schopni dokázat následující tvrzení:

Tvrzení 4. Graf $G_{LISE} = (V, E_{LISE})$, který vznikne použitím algoritmu 3 na původní graf $G = (V, E)$ je t -spanner vzhledem k interferenci.

Důkaz. Abychom dokázali vlastnost pokrytí, měli bychom pro každou hranu $(u, v) \in E$ ukázat, že existuje cesta v G_{LISE} , jejíž délka není větší než $t|uv|$. To určitě platí, protože pro každou nejkratší cestu $p^*(u, v)$ v grafu G můžeme zkonstruovat cestu $p'(u, v)$ v G_{LISE} takovou, že $|p'| \leq t|p|$ (tím, že nahradíme hrany cesty p odpovídajícími hranami grafu G_{LISE}). Pro hrany v E , které se vyskytují v E_{LISE} je podmínka pokrytí triviálně splněna. Na druhou stranu, pokud existuje v grafu G_{LISE} cesta z u do v , která není delší než $t|uv|$, podle podmínky na řádce 6 může být hrana (u, v) jen v E , ne v E_{LISE} . Proto je G_{LISE} t-spanner grafu G .

To, že má graf G_{LISE} optimální interferenci, dokážeme sporem. Budeme předpokládat, že G_{LISE} není optimální t-spanner vzhledem k interferenci. Označme $G^* = (V, E_{6*})$ optimální t-spanner vzhledem k interferenci pro graf G . G_{LISE} není optimální, tudíž platí $I(G_{LISE}) > I(G^*)$. To znamená, že všechny hrany v E^* mají pokrytí ostře větší než $I(G_{LISE})$. Z předešlého tvrzení plyne, že E^* je netriviální podmnožina E_{LISE} . Ať je T množina hran v E_{LISE} s pokrytím $I(G_{LISE})$ a $\tilde{G} = (V, \tilde{E})$ je graf s $\tilde{E} = E_{LISE} \setminus T$. Graf \tilde{G} je t-spanner, protože E^* je stále podmnožinou \tilde{E} a platí $I(\tilde{G}) \leq I(G_{LISE})$. Protože T je nakonec vložen do E_{LISE} (na řádce 8), musí existovat hrana $(u, v) \in E$, která byla vybrána na řádce 5 a pro které neexistuje žádná cesta $p(u, v)$ v \tilde{G} , kde $|p| \leq t|uv|$. Proto \tilde{G} není t-spanner (tudíž ani G^*), což je ve sporu s předpokladem, že G^* je optimální t-spanner vzhledem k interferenci. \square

Nalezení nejkratší cesty v grafu zabere pro každou dvojici hran časovou složitost $O(n^2)$, síť obsahuje taky maximálně $O(n^2)$ hran, proto je celý algoritmus LISE polynomiální vzhledem k počtu uzlů.

5.4 LLISE - Local LISE

Algoritmus LLISE je lokální algoritmus, podobný algoritmu LISE. Je složen ze tří základních kroků:

V prvním kroku vypočítáme graf k-sousedství (def. 4).

Během druhého kroku se vypočítá cesta p z uzlu u do v , která je optimální vzhledem k interferenci a pro kterou $|p| \leq t|e|$. Algoritmus LLISE začíná s grafem $G_{LL} = (V, E_{LL})$, který obsahuje všechny vrcholy z $\left(\frac{t}{2}\right)$ -sousedství a prázdnou množinou hran. Algoritmus postupně vkládá ve vzestupném pořadí podle pokrytí jednotlivé hrany do E_{LL} až do doby, kdy najde nejkratší cestu $p^*(u, v)$ v grafu G_{LL} , pro kterou platí $|p^*| \leq t|e|$.

Ve třetím kroku oznámí e všem hranám na cestě nalezené ve druhém kroku, že zůstanou ve výsledné topologii. Ta bude obsahovat všechny hrany, které byly označeny tímto způsobem [1].

5.4.1 Algoritmus

Algoritmus 4.

1. vypočítáme $\left(\frac{t}{2}\right)$ -sousedství (def. 4) $G_N = (V_N, E_N)$ grafu $G = (V, E)$
2. $E' = \emptyset$
3. $G' = (V_N, E')$
4. **repeat**
5. $f =$ hrana $\in E_N$ s minimálním pokrytím
6. přesuneme všechny hrany $\in E_N$ s pokrytím $Cov(f)$ do E'
7. $p =$ nejkratší cesta $(u-v)$ v G'
8. **until** $|p| \leq t|uv|$
9. informujeme všechny hrany na cestě p , aby zůstaly ve výsledné topologii

5.4.2 Analýza algoritmu

V následující části si ukážeme, že pro hranu e je dostačující podmínkou pro nalezení cesty $p(u, v)$ - optimální vzhledem k interferenci - to, aby splňovala podmínku pokrytí (spanner) v $\left(\frac{t}{2}\right)$ -sousedství hrany e .

Tvrzení 5. *Mějme hranu $e = (u, v)$. Žádná cesta p z u do v , pro kterou $|p| \leq t|e|$, neobsahuje hranu, která nepatří do $\left(\frac{t}{2}\right)$ -sousedství hrany e .*

Důkaz. Kvůli sporu předpokládejme, že cesta p z u do v ($|p| \leq t|e|$) obsahuje alespoň jednu hranu (w, x) , která není v $\left(\frac{t}{2}\right)$ -sousedství hrany e . Ať je na cestě p - bez újmy na obecnosti - uzel w před uzlem x . Protože (w, x) není v $\left(\frac{t}{2}\right)$ -sousedství, podle definice 4 neexistuje žádná cesta z u do w s délkou menší nebo rovnou $\left(\frac{t}{2}\right)|e|$ (stejná podmínka platí i pro cestu z v do x). Proto platí nerovnost $|p| > t|e| + |wx|$, což je ve sporu s tvrzením, že $|p| \leq t|e|$. \square

S těmito znalostmi jsme schopni dokázat následující tvrzení:

Tvrzení 6. *Graf $G_{LL} = (V, E_{LL})$, který vznikne algoritmem 4 z grafu $G = (V, E)$ je t -spanner grafu G , optimální k interferenci.*

Důkaz. To, že je výsledkem algoritmu 4 t -spanner, dokážeme podobně jako u důkazu tvrzení 4.

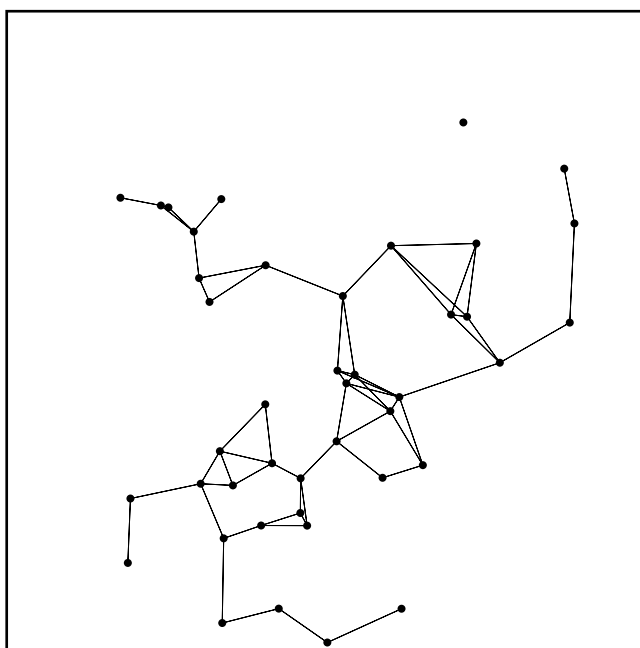
Abychom ukázali optimalitu vzhledem k interferenci, musíme dokázat, že cesta nalezená algoritmem LLISE pro libovolnou hranu $e = (u, v) \in G$ je optimální vzhledem k interferenci (interference cesty je maximální interference hrany na této cestě). Víme, že

ve výsledné topologii zůstávají jenom hrany, které leží na těchto cestách. Pokud je G_{LL} neoptimální, znamená to, že alespoň jedna z cest není optimální vzhledem k interferenci.

Teď se podíváme na algoritmus, který se provádí pro hranu $e = (u, v)$. Na řádce 6 se vkládají do E' hrany z E - začínáme s $E' = \emptyset$, až dokud na řádce 8 nenalezneme cestu p z u do v .

LLISE vkládá hrany do E' ve vzestupném pořadí podle jejich hranového pokrytí a p je první cesta, která splňuje podmínku spanneru, tudíž p je pokrývající cesta (t-spanner) z u do v , optimální vzhledem k interferenci v grafu $(\frac{t}{2})$ -sousedství.

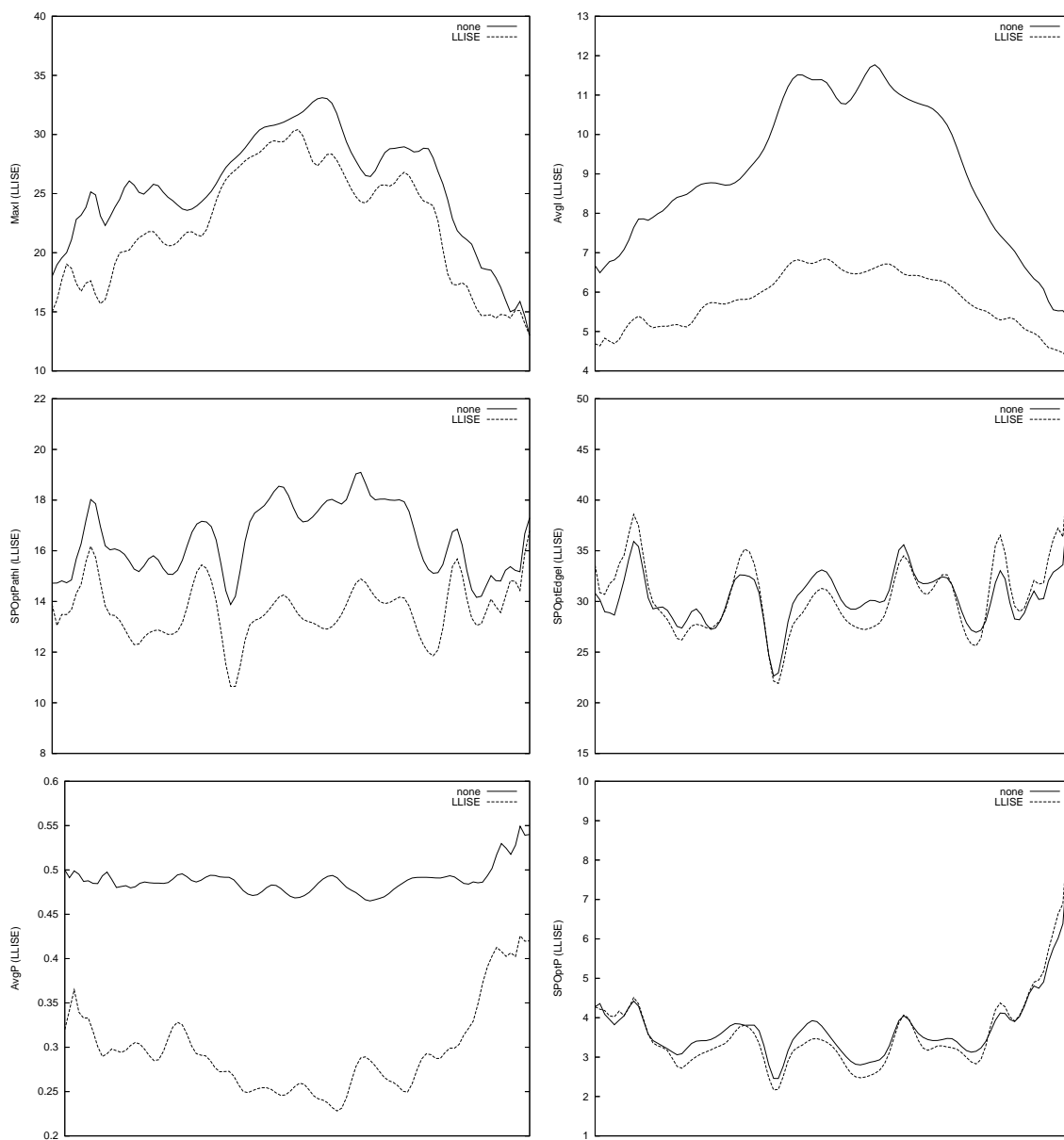
Z tvrzení 5 víme, že $(\frac{t}{2})$ -sousedství hrany e obsahuje všechny pokrývající cesty z u do v a proto je optimální vzhledem k interferenci. Proto je p (t-spanner cesta hrany e) globálně optimální vzhledem k interferenci. \square



Obrázek 5.5: Algoritmus LLISE na scénáři G5 (kap. 8.1.1)

5.4.3 Výsledky simulace

LLISE je algoritmus, který ve výpočtech hledá k -sousedství všech hran grafu a v závislosti na zvolené konstantě k nahrazuje dlouhé hrany cestami s maximálně k hranami. Změna tohoto parametru ovlivňuje kvalitu algoritmu, ale také zároveň kvůli výpočtu k -sousedství spotřebovává větší výpočetní výkon. Obr. 5.5 ukazuje topologii LLISE během simulace scénáře G5.



Obrázek 5.6: Porovnání topologie vytvořené algoritmem LLISE s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a shora dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3).

| | None | LLISE | | None | LLISE |
|------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| MaxI (Avg) | 25,59 | 22,35 | MaxP (Avg) | 0,99 | 0,93 |
| MaxI (Med) | 26 | 23,00 | MaxP (Med) | 0,99 | 0,95 |
| MaxI (Min) | 13 | 13,00 | MaxP (Min) | 0,99 | 0,61 |
| MaxI (Max) | 36 | 33,00 | MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 |
| AvgI (Avg) | 9,04 | 5,77 | AvgP (Avg) | 0,49 | 0,30 |
| AvgI (Med) | 8,81 | 5,76 | AvgP (Med) | 0,49 | 0,29 |
| AvgI (Min) | 5,29 | 4,23 | AvgP (Min) | 0,44 | 0,20 |
| AvgI (Max) | 12,37 | 7,11 | AvgP (Max) | 0,57 | 0,44 |
| SPOptPathI (Avg) | 16,47 | 13,64 | SPOptP (Avg) | 3,73 | 3,62 |
| SPOptPathI (Med) | 16,72 | 13,56 | SPOptP (Med) | 3,57 | 3,41 |
| SPOptPathI (Min) | 12,44 | 8,98 | SPOptP (Min) | 1,88 | 1,56 |
| SPOptPathI (Max) | 21,43 | 17,53 | SPOptP (Max) | 8,42 | 9,17 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 30,50 | 30,57 | Links (Avg) | 49,17 | 3,58 |
| SPOptEdgeI (Med) | 30,43 | 30,06 | Links (Med) | 49 | 3,00 |
| SPOptEdgeI (Min) | 19,29 | 17,39 | Links (Min) | 0 | 0,00 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,20 | 45,59 | Links (Max) | 64 | 13,00 |

Tabulka 5.3: Výsledky simulací pro algoritmus LLISE (scénář G5)

V porovnání s původním grafem bez jakýchkoli topologických změn, poskytuje algoritmus LLISE výrazné zlepšení u veličin AvgI a AvgP (obr. 5.6). Podle výsledků simulací se tyto hodnoty snižují až o 25%.

Se zvyšováním hustoty sítě se dosažená interference (MaxI, AvgI), blíží optimální interferenci. V tabulce 5.3 jsou porovnány vlastnosti LLISE s hodnotami původního grafu (algoritmus None).

5.5 XTC

Algoritmus XTC využívá pouze lokální informace, proto ho rozeberu podrobněji. Pozůstává ze tří základních kroků [19][9]:

- I. seřazení sousedů
- II. výměna informací o sousedech
- III. výběr hran

V prvním kroku si každý uzel sestaví totální uspořádání (def 10) \prec_u přes všechny své sousedy v grafu G , reprezentujícím síť. Z pohledu uzlu toto uspořádání vyjadřuje kvalitu

linek. Uzel u se bude ve třetím kroku algoritmu řídit právě podle uspořádání \prec_u : Spoj k sousedu w , který je v posloupnosti \prec_u před uzlem v (značíme $w \prec_u v$) je považován za kvalitnější než spoj se sousedem v . Pro jednoduchost budeme předpokládat, že \prec_u odpovídá pořadí euklidovských vzdáleností sousedů od uzlu u (je to samozřejmě zobecnění kvality spoje, kde by se měl brát v úvahu útlum signálu nebo ztrátovost paketů).

Ve druhém kroku se vymění informace o tomto uspořádání se všemi sousedy. Typicky je to tak, že uzel u odvysílá pořadí sousedů broadcastem svým vlastním sousedům a sám dostane ode všech sousedů jejich seznamy.

Během třetího kroku si každý uzel na základě získaných informací určí sousedící uzly, se kterými bude v nové topologii spojen hranou. Pro tento účel bude uzel u procházet svůj seznam v klesajícím pořadí (nejdřív se bude pracovat s „dobrymi“ hranami).

5.5.1 Algoritmus

Algoritmus 5.

1. sestavíme uspořádání \prec_u nad všemi sousedy uzlu u v G
2. broadcastem odvysíláme seznam \prec_u všem sousedům v G
3. přijmeme uspořádání od všech sousedů
4. určíme sousedy v nové topologii
5. $N_u = \emptyset, T_u = \emptyset$
6. **while** \prec_u obsahuje nezpracované sousedy **do**
7. $v =$ nejmenší nezpracovaný soused v \prec_u
8. **if** $\exists w \in N_u \cup T_u : w \prec_v u$ **then**
9. $T_u = T_u \cup \{v\}$
10. **else**
11. $N_u = N_u \cup \{v\}$
12. **end if**
13. **end while**

Na konci tohoto algoritmu obsahuje N_u sousedy uzlu u v topologii nově vzniklého grafu G_{XTC} . Formálně můžeme množinu hran E_{XTC} grafu $G_{XTC} = (V, E_{XTC})$ jako $E_{XTC} = \{(u, v) \mid \exists u : v \in N_u\}$.

Ohodnocení kvality linek z kroku I lze modifikovat tak, že pro vytváření uspořádání \prec_u budeme aplikovat kritérium rostoucí vzdálenosti - začneme s nejbližším sousedem - abychom rozhodli, zda soused v bude patřit do N_u nebo T_u . V tomto případě lze ukončit prokládání kroků I, II a III pro uzel u dříve, a to když se najde „dost“ sousedů.

5.5.2 Analýza algoritmu

Následuje důkaz, že graf, který je výstupem algoritmu 5, je symetrický.

Tvrzení 7. *Hrany v G_{XTC} jsou symetrické: Uzel u obsahuje v N_u souseda v právě když v obsahuje v N_v souseda u .*

Důkaz. Provedeme důkaz sporem. Předpokládejme, že u obsahuje v N_u uzel v (předpoklad 1), zatímco v neobsahuje v N_v uzel u (předpoklad 2). Podle předpokladu 2 existuje uzel $w \in N_v \cup T_v$, když se v rozhodne vložit u do T_v na řádku 9 v algoritmu 5 ($w \prec_v u$), takový, že a $w \prec_u v$ (řádek 8). Protože platí $w \prec_u v$, v čase, kdy se u rozhoduje, zda v patří do N_u , platí, že $w \in N_u \cup T_u$. Spolu s $w \prec_v u$ to znamená, že v je obsažen v T_u , což je ve sporu s předpokladem 1. \square

5.5.3 XTC na euklidovských grafech

Hlavním cílem této kapitoly je popsat graf, vzniklý algoritmem 5. Vyslovíme tři předpoklady:

1. Každý uzel u má jednoznačný identifikátor id_u . Identifikátory jsou srovnatelné, to znamená že existuje totální uspořádání (def. 10) „ $<$ “ definované nad všemi identifikátory.
2. Uzly jsou umístěny v euklidovské rovině.
3. Pokud je $|uv|$ je euklidovská vzdálenost mezi vrcholy u a v , každá hrana (u, v) grafu G má přiřazenou svou váhu, která je definována trojicí $(|uv|, \min(id_u, id_v), \max(id_u, id_v))$. Uspořádání sousedů spočtené v kroku I algoritmu XTC jsou založena na lexikografickém uspořádání (definice 11) těchto vah hran, takže

$$w \prec_u v \Leftrightarrow (|uv|, \min(id_u, id_v), \max(id_u, id_v)) < (|wv|, \min(id_u, id_v), \max(id_u, id_v)) \quad (5.1)$$

Předpoklad 1 je běžný v kontextu distribuovaných algoritmů a realizovatelný i v praxi. Předpoklad 2. je sice méně realistický, ale používá se v modelech ad-hoc sítí a pro lepší ilustraci ho budeme rovněž akceptovat.

Předpoklad 3 může být realizován např. tak, že každý uzel na začátku odvysílá kontrolní signál spolu se zprávou obsahující informaci o výkonu vysílání tohoto signálu. S dalším předpokladem, že použité antény mají stejné vlastnosti a signál se může šířit bez překážek, dokážou přijímací uzly podle odvysílaného výkonu a podle přijatého výkonu vypočítat svoji vzájemnou vzdálenost. Pokud dokonce všechny uzly vysílají se stejným výkonem, uspořádání \prec_u je ekvivalentní relativnímu uspořádání podle výkonu signálů, doručených uzlu u od jeho sousedů.

Následující tvrzení dokazuje souvislost grafu G_{XTC} (postačující vlastnost je, aby byl graf G euklidovský (def. 2)).

Tvrzení 8. *Mějme daný euklidovský graf G . Libovolné dva uzly u a v jsou spojeny v G_{XTC} právě když jsou spojeny v G . V důsledku toho je graf G_{XTC} souvislý právě když je souvislý graf G .*

Důkaz. XTC pracuje výhradně s hranami z grafu G , proto mohou být uzly u a v spojeny jenom pokud jsou spojeny v G .

Abychom dokázali, že platí i opačný směr výše zmíněné ekvivalence, kvůli sporu předpokládejme, že existuje alespoň jeden pár uzlů takových, že nejsou spojeny v G a jsou spojeny v G_{XTC} .

Dále uvažujme uzly u, v s minimální hodnotou $(|p(u, v)|, \min(id_u, id_v), \max(id_u, id_v))$, kde $|p(u, v)|$ je euklidovská cena nejkratší cesty, spojující v G uzly u a v (mezi všemi dvojicemi u a v , které nejsou spojeny v G_{XTC} , ale jsou spojeny v G). Uzly u a v musí být v G spojeny přímo hranou (u, v) , jinak by na cestě spojující u s v existovala jiná dvojice uzlů w, x , s hodnotou $|p(w, x)|$ menší než $|p(u, v)|$. Protože je hrana (u, v) v G , cena nejkratší cesty, spojující u a v je jejich euklidovská vzdálenost: $|p(u, v)| = |uv|$.

Podle předpokladu vložil uzel u souseda v do T_u , co znamená, že v momentě, kdy se u rozhodoval, zda ho vloží do N_u nebo T_u , existoval uzel $w \in N_u \cup T_u$ takový, že $w \prec_v u$. $w \in N_u \cup T_u$, proto buď $w \prec_u v$ nebo $(|uw|, \min(id_u, id_w), \max(id_u, id_w)) < (|uv|, \min(id_u, id_v), \max(id_u, id_v))$.

Víme, že $(|uw|, \min(id_u, id_w), \max(id_u, id_w))$ je nejmenší hodnota pro libovolný pár uzlů nespojených v G_{XTC} taková, že u a w jsou spojeny v G (w je v uspořádání \prec_u). Proto i u a w musí být spojeny v G_{XTC} . Ze stejného důvodu a protože platí $w \prec_v u$, musí být i v a w spojeny v G_{XTC} , což je ve sporu s předpokladem. \square

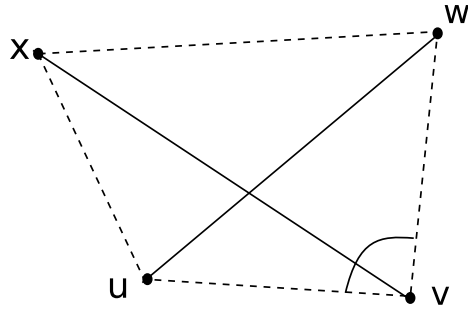
Pro zbytek této kapitoly budeme předpokládat, že G je jednotkový graf (def. 3). Následující tvrzení ukazuje, že v tomto případě jsou stupně vrcholů v G_{XTC} omezeny.

Tvrzení 9. *Pro daný jednotkový graf G má graf G_{XTC} stupně uzlů maximálně 6.*

Důkaz. Dokážeme, že žádné dva sousední úhly v G_{XTC} nesvírají úhel menší než $\pi/3$, z čehož plyne dané tvrzení. Kvůli sporu předpokládejme, že dvě hrany (u, v) a (u, w) svírají u uzlu u úhel $\alpha < \pi/3$. Ať je v soused u , který byl vložen do N_u před w , takže $v \prec_u w$ neboli $(|uv|, \min(id_u, id_v), \max(id_u, id_v)) < (|uw|, \min(id_u, id_w), \max(id_u, id_w))$. Protože $|uv| \leq |uw|$ a $\alpha \leq \pi/3$, tak $|vw| < |uw|$. G je jednotkový graf, takže i hrana (v, w) je v G , protože $|vw| < |uw| \leq 1$. V důsledku toho platí $v \prec_w u$, což znamená, že uzel u vložil w do T_u a to je ve sporu s předpokladem, že hrana (u, w) je v G_{XTC} . \square

Tvrzení 10. *Graf G_{XTC} , vzniklý z daného grafu G , je planární (neobsahuje žádné protínající se hrany).*

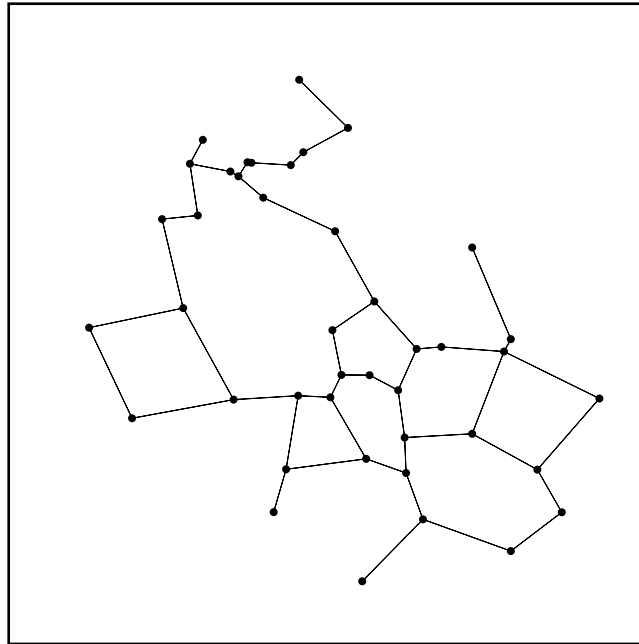
Důkaz. Kvůli sporu předpokládejme, že dvě hrany (u, w) a (v, x) se v grafu G_{XTC} protínají. Ve čtyřúhelníku $vwvx$ má alespoň jeden úhel velikost ne menší než $\pi/2$. Ať je to - bez újmy na obecnosti - úhel β (obr. 5.7), přilehlý k uzlu v . Protože $\beta \geq \pi/2$, platí: $|uv| < |vw|$ a $|vw| < |uw|$. V okamžiku, kdy uzel u zpracovával uzel w a rozhodoval se, zda ho zařadí do N_u , v byl již $N_u \cup T_u$ a $v \prec_w u$, což donutilo u vložit v do T_u . A to je spor s tvrzením, že $(u, w) \in G_{XTC}$. \square



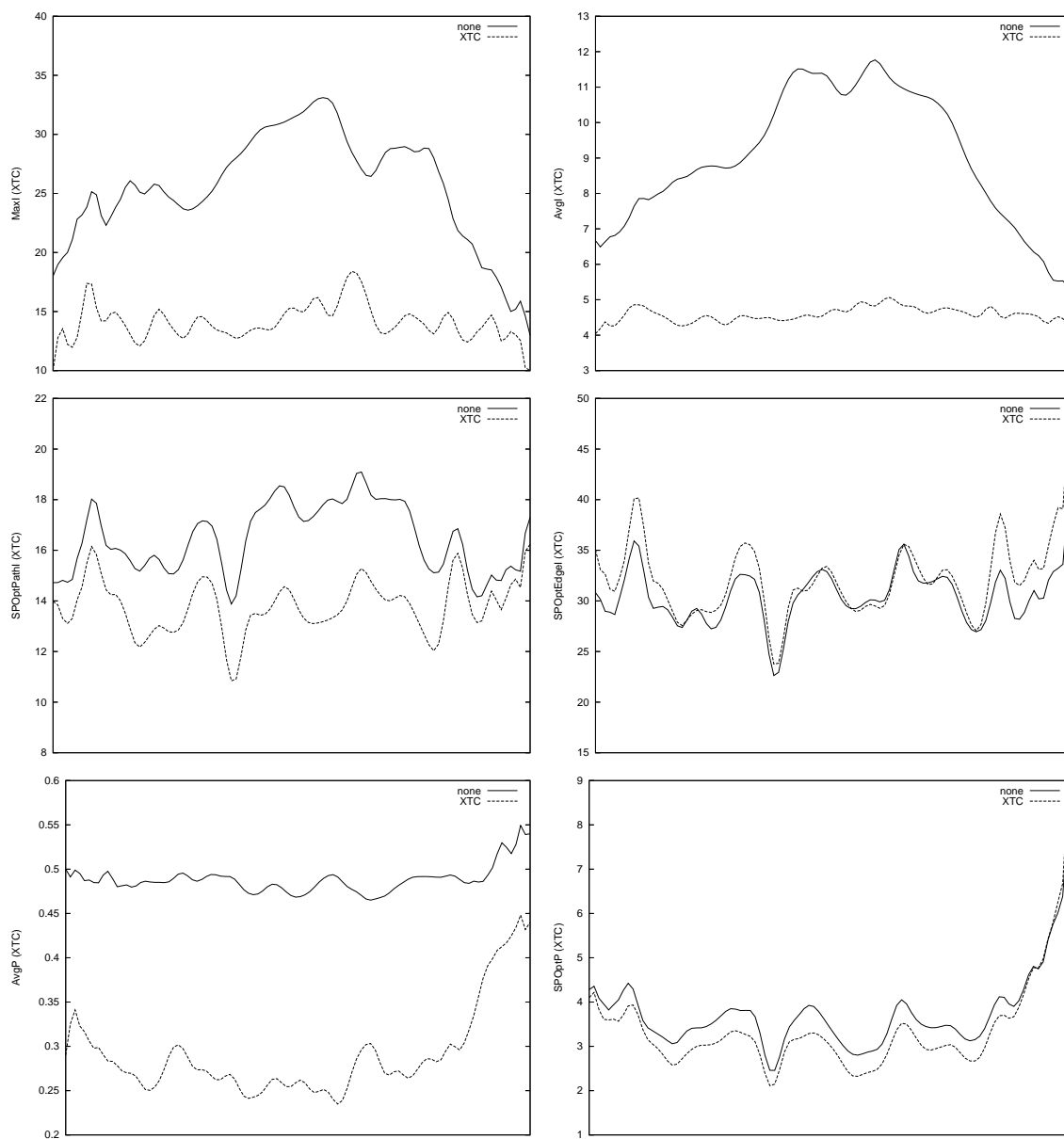
Obrázek 5.7: Pomocný obrázek k důkazu tvrzení 10

Tvrzení 11. *Mějme daný jednotkový graf G . Pak G_{XTC} je podgrafem RNG (viz definice 9), který vznikl z G . Pokud G neobsahuje žádný uzel, který má dva nebo více sousedů ve stejné vzdálenosti, pak je G_{XTC} shodný s tímto RNG.*

Důkaz. Pokud graf G_{XTC} obsahuje hranu (u, v) neexistuje vrchol w takový, že $|uw| < |uv| \wedge |vw| < |uv|$, což znamená, že (u, v) jsou obsaženy taky v RNG. Kromě toho XTC vyřazuje hrany (u, v) , které jsou zachovány v RNG - neexistuje w , pro které $|uw| < |uv| \wedge |vw| < |uv|$ - jenom pokud existuje uzel w takový, že $w \prec_u v \wedge w \prec_v u$. To je možné jenom když $|uw| = |uv|$ a úhel $\angle uvw \leq \pi/3$ nebo $|vw| = |uv|$ a úhel $\angle uvw \leq \pi/3$. \square



Obrázek 5.8: Algoritmus XTC na scénáři G5 (kap. 8.1.1)



Obrázek 5.9: Porovnání topologie vytvořené algoritmem XTC s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3).

| | None | XTC | | None | XTC |
|------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| MaxI (Avg) | 25,59 | 14,08 | MaxP (Avg) | 0,99 | 0,91 |
| MaxI (Med) | 26 | 14,00 | MaxP (Med) | 0,99 | 0,94 |
| MaxI (Min) | 13 | 10,00 | MaxP (Min) | 0,99 | 0,52 |
| MaxI (Max) | 36 | 24,00 | MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 |
| AvgI (Avg) | 9,04 | 4,58 | AvgP (Avg) | 0,49 | 0,29 |
| AvgI (Med) | 8,81 | 4,57 | AvgP (Med) | 0,49 | 0,28 |
| AvgI (Min) | 5,29 | 3,94 | AvgP (Min) | 0,44 | 0,20 |
| AvgI (Max) | 12,37 | 5,59 | AvgP (Max) | 0,57 | 0,46 |
| SPOptPathI (Avg) | 16,47 | 13,78 | SPOptP (Avg) | 3,73 | 3,36 |
| SPOptPathI (Med) | 16,72 | 13,75 | SPOptP (Med) | 3,57 | 3,18 |
| SPOptPathI (Min) | 12,44 | 9,24 | SPOptP (Min) | 1,88 | 1,55 |
| SPOptPathI (Max) | 21,43 | 17,15 | SPOptP (Max) | 8,42 | 8,94 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 30,50 | 32,14 | Links (Avg) | 49,17 | 37,09 |
| SPOptEdgeI (Med) | 30,43 | 31,72 | Links (Med) | 49 | 37,00 |
| SPOptEdgeI (Min) | 19,29 | 18,85 | Links (Min) | 0 | 0,00 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,20 | 48,26 | Links (Max) | 64 | 48,00 |

Tabulka 5.4: Výsledky simulací pro algoritmus XTC (scénář G5)

5.5.4 Výsledky simulace

Obrázek 5.8 zobrazuje stav uzlů sítě a topologii XTC během simulace scénáře G5.

Algoritmus XTC snižuje hodnoty veličin MaxI (v porovnání s původním grafem) v průměru o 20 – 30% a AvgI o 25 – 30%. Cenou za to je ale určité zvýšení výkonu potřebného pro doručení zprávy na větší vzdálenost.

Ze všech srovnávaných algoritmů, pracujících s jednou vysílací frekvencí, nabízí tento algoritmus nejlepší kompromis mezi snížením interference a s tím souvisejícím zvýšením výkonu potřebného na odeslání zprávy mezi dvěma náhodnými uzly. Podle výsledků simulací je XTC poměrně málo ovlivňován rozložením uzlů na ploše a hustotou grafu.

V tabulce 5.4 jsou statistické výpočty výstupu programu InterSim se scénářem G5 pro algoritmus XTC a původní neredukovaný graf. Časové průběhy sledovaných veličin jsou znázorněny na obr. 5.15.

5.6 C2I - Algoritmus pro výpočet 2-interference

V této kapitole si představíme algoritmus [16], který minimalizuje interferenci nejenom výběrem hran z původního grafu, ale i použitím druhé vysílací frekvence. Algoritmus se bude skládat ze dvou částí. V první pomocí již známých algoritmů popsaných v předešlých kapitolách dostaneme podgraf, se kterým budeme dále pracovat. Hlavní myšlenka algoritmu je, že všem hranám, které mají interferenci $I_1(e)$ (def. 4.11) nad určitou hranicí - tzv. prahem, přiřadíme druhou frekvenci f_2 , zbylé hrany budou mít frekvenci f_1 . Hlavním problémem je určit vhodný práh. Pokud bude příliš nízký, může to způsobit vysokou interferenci na druhé frekvenci, a naopak - pokud bude příliš vysoký, bude to vést k vysoké interferenci na první frekvenci. Označme $M(v)$ maximální 1-interferenci hran s vrcholem v , formálně $M(v) = \max_{u \in N(v)} (I_1(v, u))$, kde $N(v)$ je množina sousedů uzlu v

Vezměme si libovolnou hranu e grafu $G_1(V, E_1)$, vzniklého použitím jednoho z algoritmů 1, 2, 5 na původní graf $G = (V, E)$. Rozdělíme množinu uzlů $ISet_1(e)$ - definovanou vztahem 4.11) - do dvou podmnožin $ISet'_1$ a $ISet''_1$ takové, aby byla velikost množiny $ISet'_1$ maximální a aby byly splněny následující podmínky:

- (1) $ISet_1(e) = ISet'_1(e) \cup ISet''_1(e)$
- (2) $\forall v \in ISet'_1(e) \vee u \in ISet''_1(e), M(v) < M(u)$
- (3) $|ISet''_1| \geq \max_{v \in ISet'_1} M(v)$

At $\zeta(e) = |ISet''_1(e)|$ a $\zeta = \max_{e \in E_1} \zeta(e)$. $\zeta(e)$ můžeme vypočítat seřazením vrcholů $u \in ISet_1(e)$ podle $M(u)$.

Algoritmus 6.

1. pomocí některého z algoritmů 1, 2, 5 množinu hran E_1
2. **for all** $e \in E_1$ **do**
3. určíme dolní práh $\zeta(e)$
4. **end for**
5. $\zeta = \max_{e \in E_1} \zeta(e)$
6. **for all** $e \in E_1$ **do**
7. **if** $|ISet_1(e)| > \zeta$ **then**
6. hraně e přiřadíme frekvenci f_2
8. **else**
9. hraně e přiřadíme frekvenci f_1
10. **end if**
11. **end for**

5.6.1 Analýza algoritmu

První krok algoritmu 6 zabere v závislosti na výběru pomocného algoritmu čas $O(n^2 * \log n)$ nebo n^3 . Určení dolního prahu hrany lze implementovat taky v polynomiální časové složitosti ($O(n^3)$), takže výsledný algoritmus je polynomiální v počtu vrcholů.

Tvrzení 12. *Algoritmus 6 najde přiřazení dvou frekvencí takové, aby $I_2(G_1) \leq \zeta$.*

Důkaz. Uvažujme hranu $e \in E_1$. Pokud je této hraně přiřazena frekvence f_1 , muselo platit $I_1(e) \leq \zeta$ a tudíž $I_2(e) \leq \zeta$. Jinak uvažujme množinu $A = \{v \mid v \in ISet_1(e) \vee M(v) > \zeta\}$. 2-interference hrany e je $|A|$. Z podmínky 2 a vztahu $\zeta(e) \leq \zeta$ dostáváme $|A| \leq |ISet_2''(e)|$. Proto platí $|A| \leq \zeta$. \square

Tvrzení 13. *ζ je optimální práh pro algoritmus 6. To znamená, že pro každý jiný práh ζ_1 vypočítá algoritmus 6 interference větší nebo rovnou ζ .*

Důkaz. Předpokládejme že použijeme práh $\zeta_1 < \zeta$. Označme množinu $A = \{v \mid v \in ISet_1(e) \vee M(v) > \zeta_1\}$. Všem uzlům z A přiřadíme frekvenci f_2 . Protože $|A| \geq |ISet_2''(e)|$ (podmínky 2, 3), výsledná interference bude nejméně tak velká jako interference získaná pro práh ζ . \square

5.6.2 Výsledky simulace

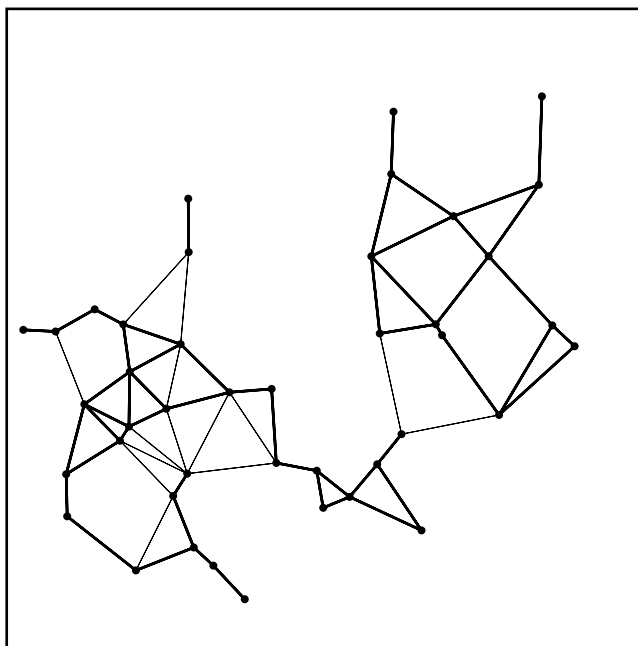
Algoritmus 2-interference byl navržen pro speciální topologie. Nejvýraznější zlepšení v porovnání z původním grafem, ze kterého vzniká, je u skupinového rozmístění uzlů. Pokud se v grafu střídají dlouhé a krátké hrany, je zřejmé, že největší interference způsobují právě ty dlouhé, které vytvářejí spojení mezi jednotlivými skupinami (uvnitř skupiny jsou krátké hrany). Pokud je totiž hrana delší než průměr skupiny, pokryje celou tuto skupinu, čímž zvyšuje hodnoty veličiny MaxI (maximální pokrytí hran). Hlavní myšlenkou proto bylo odstranit tuto vysokou interference zavedením druhé komunikační frekvence uzlů.

Pokud jsou ale hrany přibližně stejně dlouhé, algoritmus 2-interference nevykazuje tak dobré výsledky jako v skupinovém modelu.

Algoritmus pro výpočet 2-interference ze vstupního grafu neodstraňuje žádné hrany, pouze je přiřazením jedné ze dvou frekvencí rozdělí do dvou skupin. Proto jsou veličiny, které se týkají výkonu (MaxP, AvgP, SPOptP) stejné jako u původního grafu, mění se pouze interference.

C2I-Gabriel vzniká použitím algoritmu pro výpočet 2-interference na Gabrielův graf (definice 8). Pro většinu mechanismů řízení topologie, které používají Gabrielovy grafy, je jejich konstrukce pouze prvním z několika kroků (např. algoritmus API, kap. 5.1). Algoritmus C2I-Gabriel tudíž neredukuje interference natolik jako mechanismy C2I které si jako bazový algoritmus vyberou topologii s lepšími výchozími podmínkami (např. C2I-XTC). Ve srovnání s původním grafem bez redukce hran je ale zlepšení patrné i tady,

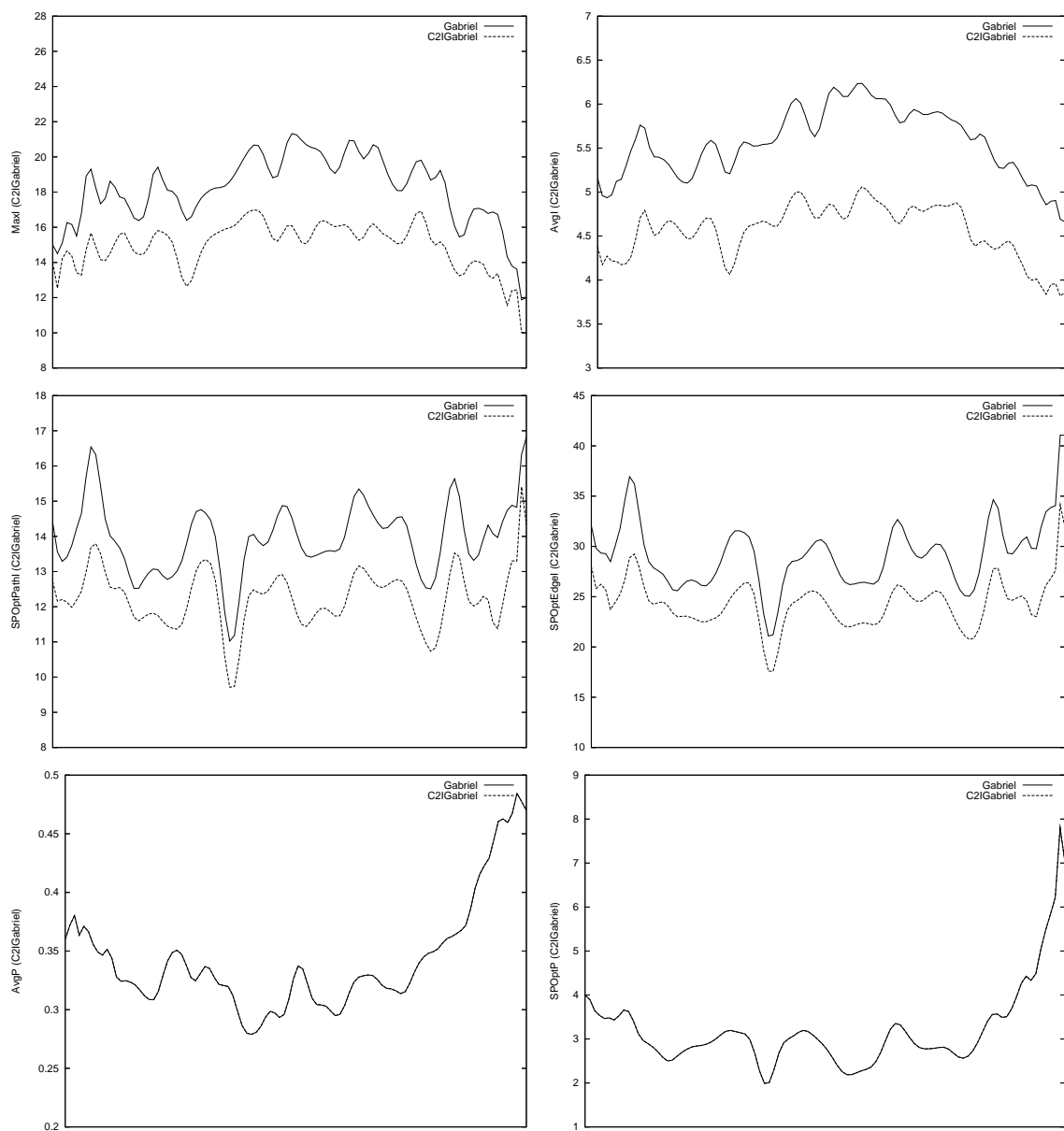
MaxI a AvgI jsou menší přibližně o 40%. Srovnání algoritmu C2I-Gabriel s původním grafem představují tabulka 5.5 a obr. 5.11.



Obrázek 5.10: Algoritmus 2-interference nad Gabrielovým grafem na scénáři G5 (kap. 8.1.1)

Nejnižší interferenci dosahuje algoritmus C2I-LIFE (obr. 5.12). Jak už bylo popsáno v kapitole 5.2, topologie LIFE nemá dobré vlastnosti, protože je příliš řídká. Stejný problém je i u topologie C2I-LIFE. Hodnoty MaxI jsou v porovnání s topologií LIFE o 20 – 25% nižší. U veličiny AvgI je zlepšení přibližně o 15% (tabulka 5.6, obr. 5.13).

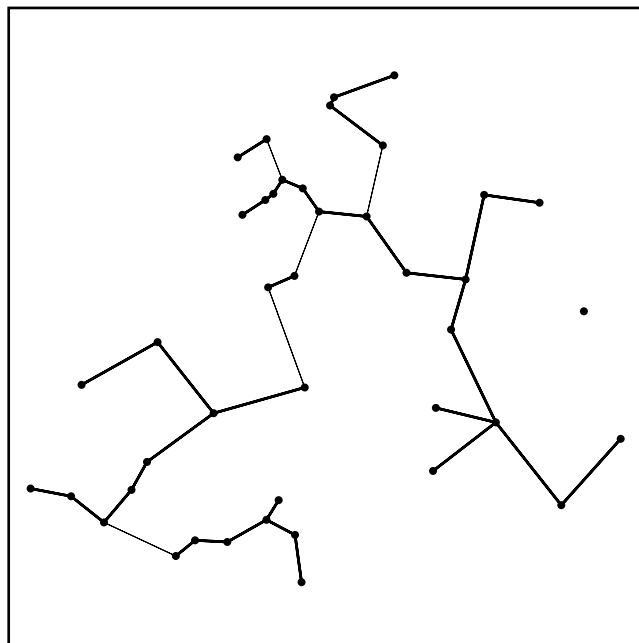
C2I-XTC dává nejstabilnější výsledky. Nemá sice nikdy nejnižší hodnoty MaxI a AvgI, ale funguje stejně dobře jak na řídkých tak i na hustých sítích, nezávisle na tom, zda jsou uzly rozmístěny relativně rovnoměrně, nebo jde o skupinový model. Samotné XTC má lepší vlastnosti než Gabrielovy grafy a je hustější než LIFE, proto je to ze všech tří algoritmů nejvhodnější metoda pro řízení topologie sítě. V porovnání s algoritmem XTC snižuje hodnotu MaxI přibližně o 30%, AvgI v průměru o 15 – 20%. V tabulce 5.7 jsou statistické výpočty pro neredukovaný původní graf a pro graf XTC (data jsou ze simulací scénáře G5). Časové průběhy sledovaných veličin jsou znázorněny na obr. 5.15.



Obrázek 5.11: Porovnání topologie vytvořené algoritmem C2I-Gabriel s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3).

| | Gabrielův graf | C2I Gabriel | | Gabrielův graf | C2I Gabriel |
|------------------|-----------------------|--------------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| MaxI (Avg) | 18,21 | 14,94 | MaxP (Avg) | 0,95 | 0,95 |
| MaxI (Med) | 18 | 15,00 | MaxP (Med) | 0,96 | 0,96 |
| MaxI (Min) | 11 | 9,00 | MaxP (Min) | 0,73 | 0,73 |
| MaxI (Max) | 27 | 22,00 | MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 |
| AvgI (Avg) | 5,57 | 4,56 | AvgP (Avg) | 0,34 | 0,34 |
| AvgI (Med) | 5,54 | 4,57 | AvgP (Med) | 0,34 | 0,34 |
| AvgI (Min) | 4,53 | 3,40 | AvgP (Min) | 0,25 | 0,25 |
| AvgI (Max) | 6,77 | 5,80 | AvgP (Max) | 0,50 | 0,50 |
| SPOptPathI (Avg) | 13,94 | 12,25 | SPOptP (Avg) | 3,18 | 3,18 |
| SPOptPathI (Med) | 13,89 | 12,27 | SPOptP (Med) | 3,01 | 3,01 |
| SPOptPathI (Min) | 9,64 | 8,08 | SPOptP (Min) | 1,44 | 1,44 |
| SPOptPathI (Max) | 17,49 | 16,26 | SPOptP (Max) | 8,20 | 8,20 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 29,14 | 24,30 | Links (Avg) | 48,92 | 3,29 |
| SPOptEdgeI (Med) | 28,94 | 24,43 | Links (Med) | 49 | 3,00 |
| SPOptEdgeI (Min) | 17,24 | 14,21 | Links (Min) | 0 | 0,00 |
| SPOptEdgeI (Max) | 44,39 | 36,63 | Links (Max) | 67 | 16,00 |

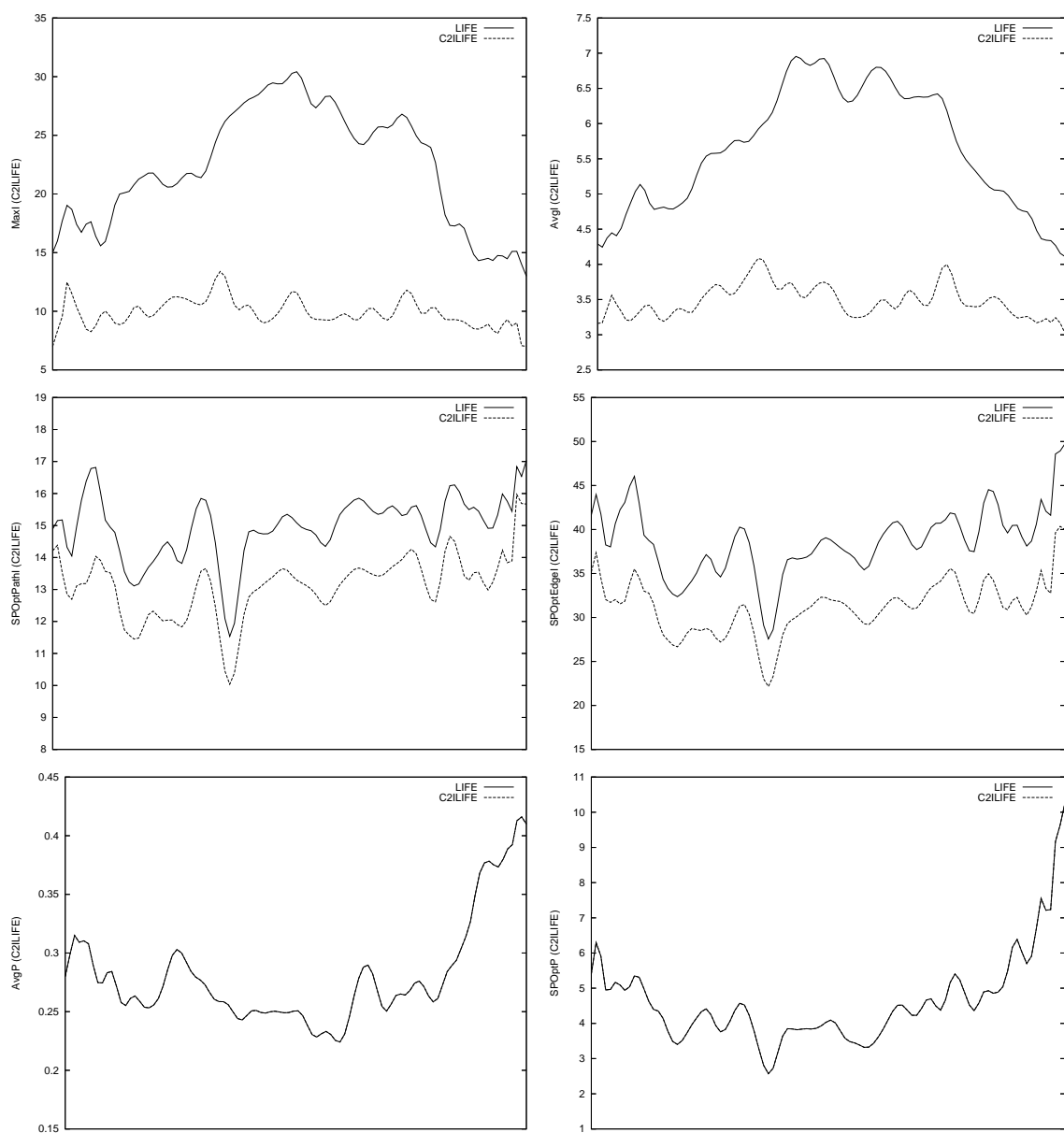
Tabulka 5.5: Výsledky simulací pro algoritmus C2I-Gabriel (scénář G5)



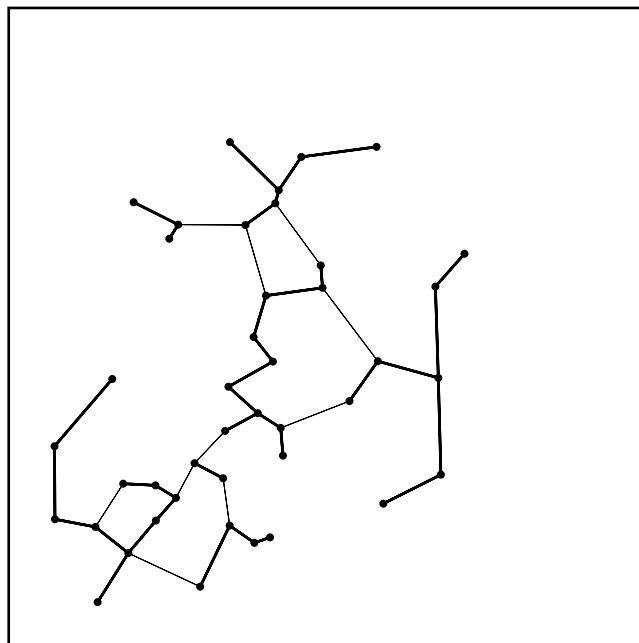
Obrázek 5.12: Algoritmus 2-interference nad LIFE na scénáři G5 (kap. 8.1.1)

| | LIFE | LIFE | | LIFE | C2I-LIFE |
|------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| MaxI (Avg) | 22,33 | 10,72 | MaxP (Avg) | 0,92 | 0,91 |
| MaxI (Med) | 23,00 | 10,00 | MaxP (Med) | 0,94 | 0,94 |
| MaxI (Min) | 13,00 | 7,00 | MaxP (Min) | 0,60 | 0,52 |
| MaxI (Max) | 33,00 | 15,00 | MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 |
| AvgI (Avg) | 5,65 | 3,61 | AvgP (Avg) | 0,28 | 0,29 |
| AvgI (Med) | 5,64 | 3,59 | AvgP (Med) | 0,27 | 0,28 |
| AvgI (Min) | 4,08 | 3,01 | AvgP (Min) | 0,19 | 0,20 |
| AvgI (Max) | 7,31 | 4,37 | AvgP (Max) | 0,43 | 0,46 |
| SPOptPathI (Avg) | 14,94 | 11,83 | SPOptP (Avg) | 4,60 | 3,36 |
| SPOptPathI (Med) | 15,13 | 11,83 | SPOptP (Med) | 4,39 | 3,18 |
| SPOptPathI (Min) | 9,85 | 7,89 | SPOptP (Min) | 1,91 | 1,55 |
| SPOptPathI (Max) | 18,06 | 16,03 | SPOptP (Max) | 10,41 | 8,94 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 38,54 | 25,62 | Links (Avg) | 34,61 | 2,79 |
| SPOptEdgeI (Med) | 38,63 | 25,54 | Links (Med) | 35,00 | 2,00 |
| SPOptEdgeI (Min) | 22,67 | 15,06 | Links (Min) | 0,00 | 0,00 |
| SPOptEdgeI (Max) | 52,60 | 40,52 | Links (Max) | 43,00 | 15,00 |

Tabulka 5.6: Výsledky simulací pro algoritmus C2I-LIFE (scénář G5)



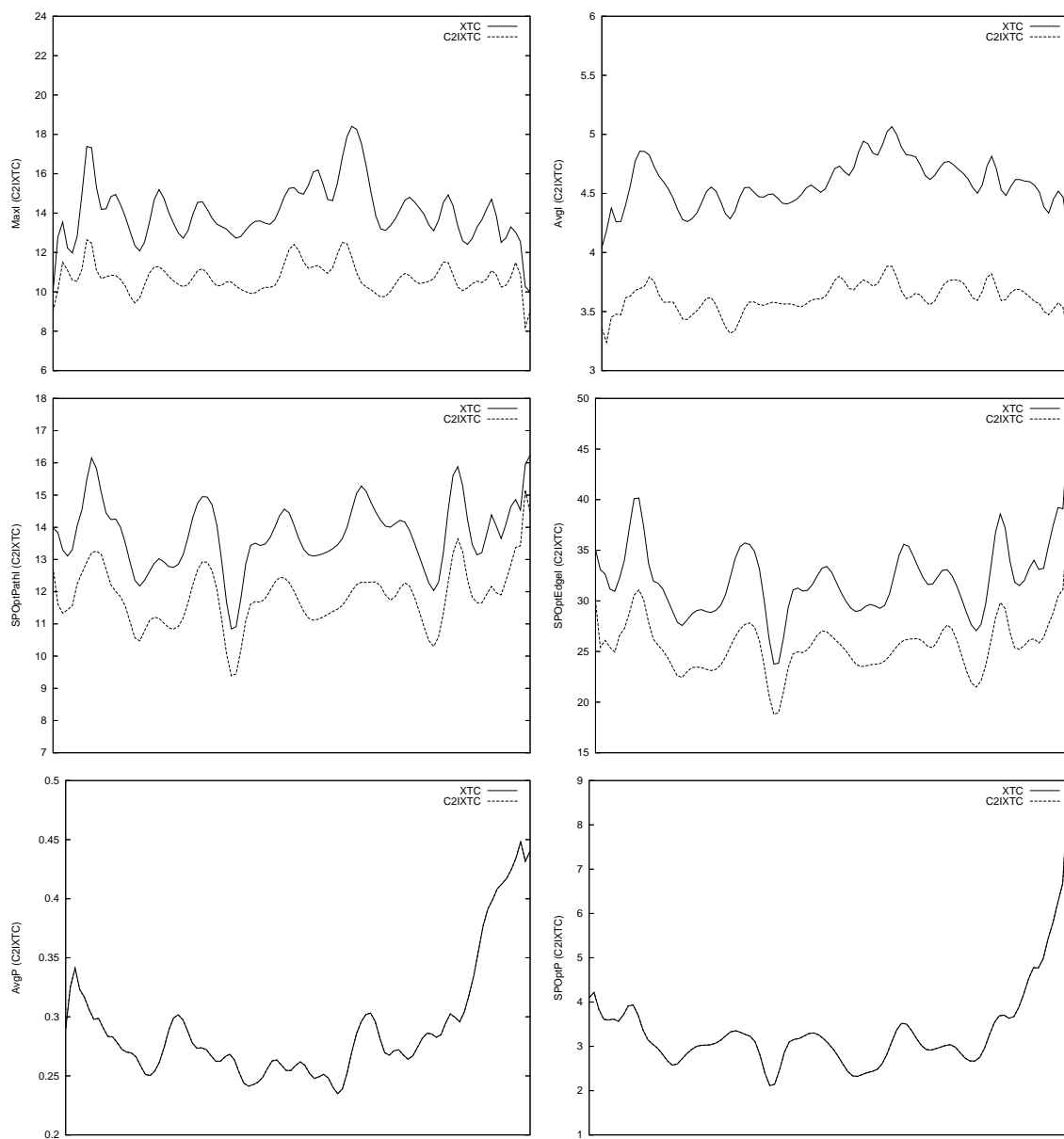
Obrázek 5.13: Porovnání topologie vytvořené algoritmem C2I-LIFE s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3).



Obrázek 5.14: Algoritmus 2-interference nad algoritmem XTC na scénáři G5 (kap. 8.1.1)

| | XTC | C2I-XTC | | XTC | C2I-XTC |
|------------------|------------|----------------|--------------|------------|----------------|
| MaxI (Avg) | 14,08 | 10,72 | MaxP (Avg) | 0,91 | 0,91 |
| MaxI (Med) | 14,00 | 10,00 | MaxP (Med) | 0,94 | 0,94 |
| MaxI (Min) | 10,00 | 7,00 | MaxP (Min) | 0,52 | 0,52 |
| MaxI (Max) | 24,00 | 15,00 | MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 |
| AvgI (Avg) | 4,58 | 3,61 | AvgP (Avg) | 0,29 | 0,29 |
| AvgI (Med) | 4,57 | 3,59 | AvgP (Med) | 0,28 | 0,28 |
| AvgI (Min) | 3,94 | 3,01 | AvgP (Min) | 0,20 | 0,20 |
| AvgI (Max) | 5,59 | 4,37 | AvgP (Max) | 0,46 | 0,46 |
| SPOptPathI (Avg) | 13,78 | 11,83 | SPOptP (Avg) | 3,36 | 3,36 |
| SPOptPathI (Med) | 13,75 | 11,83 | SPOptP (Med) | 3,18 | 3,18 |
| SPOptPathI (Min) | 9,24 | 7,89 | SPOptP (Min) | 1,55 | 1,55 |
| SPOptPathI (Max) | 17,15 | 16,03 | SPOptP (Max) | 8,94 | 8,94 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 32,14 | 25,62 | Links (Avg) | 37,09 | 2,79 |
| SPOptEdgeI (Med) | 31,72 | 25,54 | Links (Med) | 37,00 | 2,00 |
| SPOptEdgeI (Min) | 18,85 | 15,06 | Links (Min) | 0,00 | 0,00 |
| SPOptEdgeI (Max) | 48,26 | 40,52 | Links (Max) | 48,00 | 15,00 |

Tabulka 5.7: Výsledky simulací pro algoritmus C2I-XTC (scénář G5)



Obrázek 5.15: Porovnání topologie vytvořené algoritmem C2I-XTC s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3).

Kapitola 6

Správa energie

Většina energie v bezdrátových ad-hoc sítích se spotřebuje na vysílání paketů. Tudíž snižování vysílacího výkonu znamená největší úsporu energie. V této kapitole se pokusíme zjistit, jaký by měl být optimální vysílací výkon uzlů.

6.1 Úroveň datové vrstvy

Bezdrátové ad-hoc sítě jsou kvůli mobilitě uzlů náchylné k poruchám spojů, protože náhodné okolnosti znemožňují zaručit stabilitu cest. Časté výpadky spojů vedou k menší propustnosti.

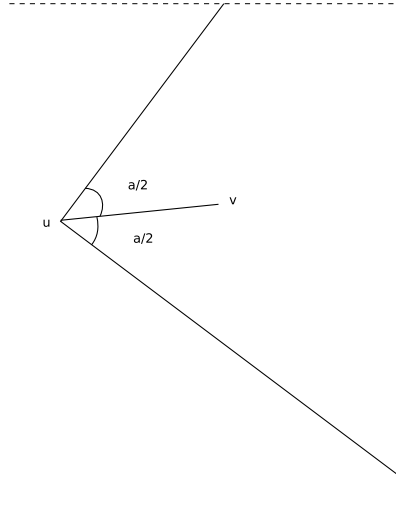
V [12] je popsán algoritmus, který vybírá cesty s nízkou pravděpodobností výpadku.

6.1.1 Distribuovaný mechanismus pro řízení topologie sítě

Algoritmus (popsaný v [13]) se skládá ze dvou částí:

V první fázi každý uzel u v síti - nezávisle na ostatních uzlech - hledá své sousedy. Začíná s malým výkonem a postupně ho zvyšuje. V každém stupni posílá broadcastem speciální zprávy. Všechny uzly, které tuto zprávu obdrží, na ní musí odesílateli u odpovědět. Po každé doručené odpovědi si u přidá daný uzel do množiny sousedů N_u a zapamatuje si směr, odkud informace přišla. Pomocí těchto údajů se rozhoduje, zda v každé kruhové výseči se středem v u a poloměrem délky dosahu jeho vysílače, existuje alespoň jeden uzel sítě. Tento postup se opakuje se zvýšeným výkonem až do doby, kdy výkon dosáhne maximální hodnotu P , nebo bude v každé výseči alespoň jeden uzel (obr. 6.1). To znamená, že každý uzel v množině $N(u)$ pokrývá jistou kruhovou výseč. Pokud sjednocení všech výsečí pokrývá úhel větší než 2π , začíná druhá fáze algoritmu.

Ve druhé fázi jsou odstraněny zbytečné hrany tak, aby toto odstranění nemělo vliv na souvislost sítě a aby zůstaly cesty s minimální spotřebou energie. Pokud jsou ve stejné výseči kruhu se středem v uzlu u dva sousedi v a w takoví, že $v, w \in N(u)$ a $w \in N(v)$



Obrázek 6.1: Určení pokrytí

a splňují

$$P(u, v) + P(v, w) \leq q \cdot P(u, w) \quad (6.1)$$

pak bude uzel w odstraněn z $N(u)$. Dále platí, že $q \geq 1$ a $P(u, w)$ označuje výkon potřebný k tomu, aby uzel u dosáhl uzel w .

6.2 Úroveň síťové vrstvy

Cílem této kapitoly je popsat nejzajímavější distribuované směrovací protokoly, které zvyšují životnost uzlů tím, že se snaží minimalizovat nároky na spotřebu energie. Využívají pouze informace, které jsou lokálně dostupné jednotlivým uzlům.

Dva uzly A a B jsou sousedící právě když splňují následující podmínku:

$$d(A, B) < \min(t(A), t(B)) \quad (6.2)$$

kde $t(x)$ označuje rozsah vysílání uzlu x a $d(A, B)$ vzdálenost mezi uzly A a B . S použitím vztahu 6.2 vznikají grafy minimalizující vysílací výkon uzlů. Pokud je $t(x)$ pevná hodnota pro všechny uzly x , můžeme graf normalizovat na jednotkový graf (def. 3).

Předtím, než se budeme věnovat jednotlivým algoritmům, podíváme se blíže na některé vlastnosti tohoto modelu.

1. Výkon, potřebný pro vysílání a přijímání paketů je $u(d) = \alpha d^\alpha + c$, kde c je konstanta, závislá na výkonu, který věnujeme šifrování a dešifrování. Parametr α je závislý na fyzickém prostředí.

2. Pokud vysílající uzel S posílá paket přímo cílovému uzlu D , definujeme vzdálenost mezi uzly S a D jako $|SD| = d$. Pokud jsou pakety doručeny přes mezilehlý uzel A , označme $|SA| = x$ a $|AD| = d - x$. Pro popsáný model platí následující vztahy [21]:

Tvrzení 14. *Pokud pro nějaký A uzel mezi vysílajícím uzlem S a cílovým uzlem D platí, že $d > (c/(\alpha(1 - 2^{1-\alpha})))^{1/\alpha}$, je z energetického hlediska výhodné posílat pakety přes tento uzel. Nejmenší výkon k odeslání paketu je potřeba, když je A umístěn přesně uprostřed hrany SD .*

Tvrzení 15. *Definujme n jako celé číslo, nejbližší k výrazu $d(\alpha(\alpha - 1)/c^{1/\alpha})$. Pokud platí, že $d > (c/(\alpha(1 - 2^{1-\alpha})))^{1/\alpha}$, pak rozdělením hrany SD do n stejných intervalů získáme největší úsporu výkonu. Minimální výkon je dán vztahem*

$$w(d) = dc \left(\frac{\alpha(\alpha - 1)}{c} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + da \left(\frac{\alpha(\alpha - 1)}{c} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \quad (6.3)$$

6.2.1 Power-Saving Localized Routing (SPOptPower)

Představme si centralizovaný algoritmus, který pomocí Dijkstrova algoritmu najde v grafu nejmenší váženou cestu. Funkci pro určování vah definujme jako $u(d) = \alpha d^\alpha + c$, kde d je délka hrany a α je parametr prostředí. Tento algoritmus se nazývá *SPOptPower*. V této kapitole si popíšeme jeho lokalizovanou verzi:

Chceme odvysílat paket z uzlu B do uzlu D . Ať A je sousedem B a $|AB| = r$, $|BD| = d$ a $|D| = s$. Výkon, který je potřeba na vysílání paketů z uzlu B do uzlu A můžeme vyjádřit jako $u(r) = \alpha r^\alpha + c$. S použitím vztahu 15 dostáváme

$$v(s) = sc \left(\frac{\alpha(\alpha - 1)}{c} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + sa \left(\frac{\alpha(\alpha - 1)}{c} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \quad (6.4)$$

Následuje samotný algoritmus pro směrování, kde S je vysílací uzel a D je cílový uzel.

Algoritmus 7.

1. $A := S$
2. $B := A$
3. **repeat**
4. B určí svého souseda A tak,
 aby minimalizoval výkon $p(B, A) = u(r) + tv(s)$
5. B přeošle zprávu svému sousedovi A
6. **until** není dosažen cílový uzel ($A = D$) nebo přenos selhal ($A = B$)

6.2.2 Cost-Saving Localized Routing (SP-Cost)

Algoritmus je založen na vztahu

$$f(A) = \frac{1}{g(A)} \quad (6.5)$$

kde $f(A)$ je cena uzlu A a $g(A)$ označuje životnost uzlu A , normalizovanou na interval $(0, 1)$.

Pokud se paket pohybuje z uzlu B do uzlu D přes mezilehlý uzel A , vypočítáme celkovou cenu $c(A)$ jako součet ceny uzlu A (vztah 6.5) a ceny cesty z A do D . Uzel B , sousedící s A , zná cenu uzlu A ($f(A)$). Cena ostatních uzlů na cestě je přímo úměrná počtu skoků mezi uzly A a D , což je přímo úměrné vzdálenosti $s = |AD|$ mezi uzly A a D a nepřímo úměrné poloměru vysílání R . Proto cena $f(A)$ je ts/R , kde t je konstanta. Celkovou cenu $c(A)$ vypočítáme jako $c(A) = ts/R = f(A)$ nebo $c(A) = tsf(A)/R$. Samotný směrovací algoritmus, ve kterém je vysílací uzel označen jako S a cílový jako D , je popsán v následující části:

Algoritmus 8.

1. $A := S$
2. $B := A$
3. **repeat**
4. **if** D je sousedem B **then**
5. $A := D$
6. **else**
7. B určí svého souseda A tak,
 aby minimalizoval cenu $c(A)$.
8. **end if**
8. B přepośle zprávu svému sousedovi A
9. **until** není dosažen cílový uzel ($A = D$) nebo přenos selhal ($A = B$)

6.2.3 Power-Cost-Saving Localized Routing (SPOptPower*Cost)

Abychom dostali algoritmus, který minimalizuje výkon i cenu, musíme definovat funkci, podle které budeme optimalizovat. Můžeme si vybrat ze dvou možností:

$$w(B, A) = f(A) \cdot u(r) \quad (6.6)$$

nebo

$$w(B, A) = \alpha u(r) + \beta f(A) \quad (6.7)$$

kde $|AB| = r$ a α a β jsou konstanty. Následuje samotný algoritmus, který hledá cestu z uzlu S do uzlu D :

Algoritmus 9.

1. $A := S$
2. $B := A$
3. **repeat**
7. B určí svého souseda A tak,
 aby minimalizoval funkci $pc(B, A) = w(B, A) + v(s)f(A)$
8. B přešle zprávu svému sousedovi A
9. **until** není dosažen cílový uzel ($A = D$) nebo přenos selhal ($A = B$)

Kapitola 7

Modely mobilních sítí

V mobilních sítích se mohou uzly pohybovat náhodným způsobem. Kvůli simulacím vzniklo mnoho různých modelů, které napodobují skutečný pohyb mobilních jednotek v síti, většinou však byly navrženy přímo k nějakému směrovacímu algoritmu. To s sebou přineslo dva hlavní problémy: z příliš zjednodušených a nerealistických modelů vycházejí chybné závěry a je těžké srovnat výsledky různých algoritmů, nasimulované na různých modelech mobility [24].

Proto si definujeme základní pojmy oblasti mobility, které ukazují vztahy mezi chováním jednotlivých uzlů sítě [6][8][5].

Označme vzdálenost uzlu i od uzlu j v čase t vztahem $d_{ij}(t) = |n_j(t) - n_i(t)|$. Odlehlost uzlu i a uzlu j v čase t pak definujeme jako

$$R_{ij} = F(d_{ij}(t)) \quad (7.1)$$

kde $F(\cdot)$ je funkce vzdálenosti. Nejjednodušší volba pro $F(\cdot)$ je identita, což znamená, že odlehlost je vzdálenost mezi uzly. V aplikacích jako MANET je ale rozumnější použít sofistikovanější definici odlehlosti.

Např. pokud máme vysílací uzel s rozpětím vysílání R a další uzel ve vzdálenosti $3R$ od něj, můžeme jej považovat za stejně vzdálený jako uzel ve vzdálenosti $10R$, protože oba jsou už mimo dosah vysílače. Podobně, když je uzel velmi blízko zdroje vysílání, nebude v dané metrice daleko, ani když tuto vzdálenost znásobíme. Pokud je ale uzel těsně u hranice vzdálenosti R , odlehlost uzlu se dramaticky změní spolu s pohybem uzlu přes tuto vzdálenost. Proto chceme, aby funkce $F(\cdot)$ splňovala tyto požadavky:

- a. $F(0) = 0$, $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$
- b. $\frac{dF(x)}{dx} \geq 0$ pro všechna $x \geq 0$
- c. $\left. \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0$

- d. $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{dF(x)}{dx} = 0$
- e. $\left| \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x=R} \geq \frac{dF(x)}{dx}$ pro všechna $x \geq 0$

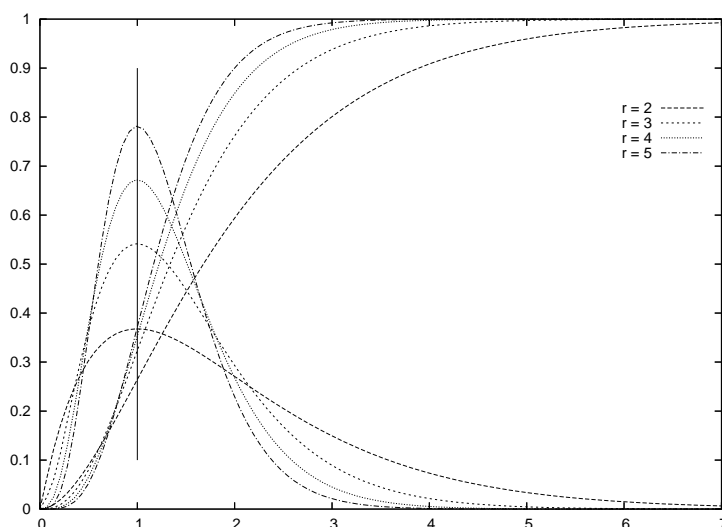
Požadavek (a) normalizuje $F(\cdot)$, aby měla jednotkovou maximální vzdálenost. Požadavek (b) zaručuje, že odlehlost je monotónní rostoucí funkce vzdálenosti, a jako výsledek $0 \leq F(\cdot) \leq 1$ z (a). Požadavek (c) a (d) zavádí omezující podmínky $F(\cdot)$, které zaručují, že odlehlost uzlu v extrémních lokacích se nemění s pohybem uzlu. Nakonec požadavek (e) dělá odlehlost nejcitlivější na pohyb uzlu na hranici komunikačního dosahu.

Jednou z funkcí, které splňují všechny tyto požadavky, je

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(r)} \int_0^x (\lambda\tau)^{r-1} \lambda e^{-\lambda\tau} d\tau, x \geq 0, r \geq 2 \quad (7.2)$$

kde $\lambda = (r-1)/R$, r nemusí být celé číslo. Důležité je, že $F(x)$ je kumulativní distribuční funkce (kap. 2.3.1) náhodné veličiny *gamma* s parametrem r a proto

$$f(x) = F'(x) = \frac{1}{\Gamma(r)} (\lambda x)^{r-1} \lambda e^{-\lambda x} \quad (7.3)$$



Obrázek 7.1: Graf pro funkce $F(x)$ a $f(x)$

Obr. 7.1 ukazuje průběh funkce $F(x)$ a její derivace $f(x)$ pro různé hodnoty r , kde vzdálenost R je normalizována na jednotkovou vzdálenost. Jako výsledek můžeme dát větší důraz na pohyb uzlů v blízkosti vzdálenosti komunikačního dosahu výběrem většího r .

Určení funkce $F(x)$ vztahem 7.2, je jen jedním z mnoha způsobů, jak ji definovat. Pro definici odlehlosti může být použita libovolná funkce, která splňuje výše popsané požadavky. Možnost výběru této funkce ilustruje pružnost navrženého měření mobility.

7.1 Navržené měření mobility

Pohyb uzlů mění vlastní odlehlost, zavedeme tedy míru mobility bezdrátové sítě, která se vypočítá jako časová derivace odlehlosti.

Označme $M_i(t)$ míru relativního pohybu z pohledu uzlu i jako

$$M_i(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left| \frac{d}{dt} F(d_{ij}(t)) \right| \quad (7.4)$$

Míra mobility $M(t)$ reprezentuje průměrnou velikost relativního pohybu všech N uzlů sítě v čase t .

$$M(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} M_i(t) \quad (7.5)$$

Pro síť v statickém stavu můžeme definovat průměrnou míru mobility následovně:

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt \quad (7.6)$$

Pokud definujeme $F(\cdot)$ vztahem 7.2, pak

$$M^G(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} M_i^G(t) \quad (7.7)$$

kde horní index G představuje náhodnou veličinu *gama*, $d'_{ij}(t) =$ derivace $d_{ij}(t)$ v čase a

$$M_i^G(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left| d'_{ij}(t) \cdot f(d_{ij}(t)) \right| \quad (7.8)$$

Na druhou stranu, pokud si vybereme pro $F(\cdot)$ funkci identity, míru mobility lze napsat jako

$$M_i^I(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} M_j^I(t) \quad (7.9)$$

kde index I představuje identitu a

$$M_i^I(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |d'_{ij}(t)| \quad (7.10)$$

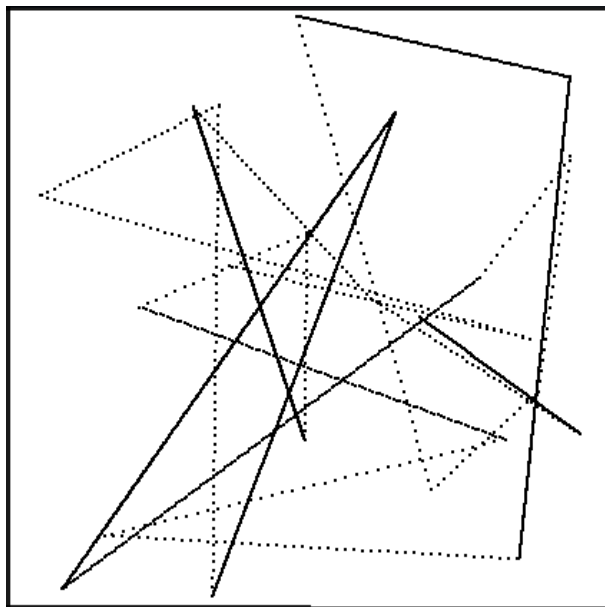
$M^G(t)$ a $M^I(t)$ jsou míry mobility normalizované počtem uzlů N . Jsou to spojité funkce času, které reprezentují kvantitativní měření relativního pohybu mezi uzly v čase t . Vztah 7.10 představuje funkci časové derivace odlehlosti. Jak ukazuje obrázek 7.1,

největší význam na vytváření topologie mají uzly ve vzdálenosti R (na obr. je to normalizovaná vzdálenost 1). To znamená, že $M^G(t)$ využívá informace o vzdálenostech mezi uzly a je vhodná pro aplikace typu MANET, víceskokové bezdrátové sítě, kde je komunikační rozpětí důležitým faktorem sítě. Funkce identity ale nesplňuje všechny požadavky definované v předešlé sekci. Vztah 7.10 je tedy funkcí časové derivace vzdálenosti mezi uzly a $M^I(t)$ reprezentuje normalizované celkové množství relativního pohybu uzlů v celé síti a nehodí se pro aplikace s víceskokovými bezdrátovými linkami.

7.2 Modely mobility

Jednou ze základních vlastností dobré míry mobility je konzistence. Používáme množství scénářů sítí, založené na stochastických modelech mobility, abychom vyčíslili konzistenci navržené míry mobility. Modely mobility, kterými se budu zabývat a použiji je v simulacích, jsou Random Waypoint (RWP), Random Gauss-Markov Model (RGM) a Reference Point Group Mobility Model (RPGM), Nomadic Community Mobility Model (NCM).

7.2.1 RWP - Random Waypoint Model



Obrázek 7.2: Model RWP

Model RWP obsahuje mezi jednotlivými změnami směru časové prodlevy. Na začátku je všem uzlům přiřazena náhodná pozice. Pro každý uzel se rovněž náhodně zvolí rychlost a cílový bod, ke kterému se bude uzel danou rychlostí pohybovat. Tyto cílové body jsou rovnoměrně rozloženy v předdefinovaném prostoru. Po dosažení cíle nastává určitá pauza,

pak si uzel vybere nový cíl a zvolí novou rychlost. Existují modifikace tohoto algoritmu - např. vynechání pauzy po dosažení cílové pozice.

Na začátku se všechny uzly náhodně rozmístí po simulační ploše. Toto náhodné rozložení mobilních uzlů ale neodpovídá způsobu, kterým se distribuuji uzly když se pohybují. Proto první měření začíná až po uplynutí dostatečně dlouhé doby a rozmístění uzlů na začátku dalších simulací bude odpovídat konečnému rozložení uzlů v předešlé simulaci.

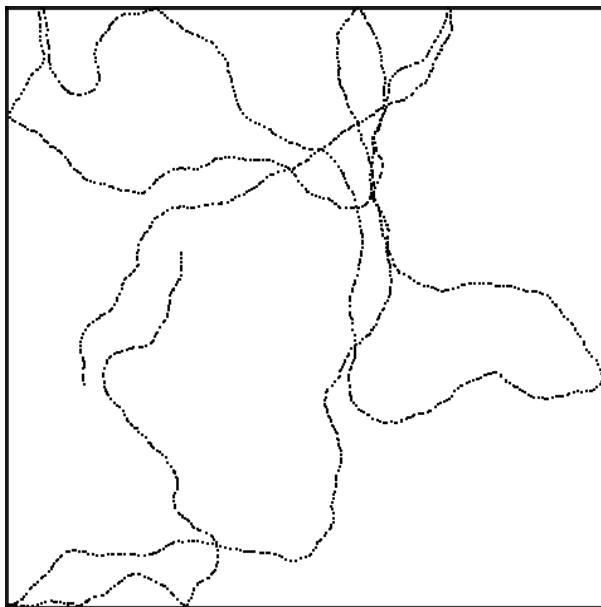
7.2.2 RGM - Random Gauss-Markov Model

V modelu RGM je každému uzlu přiřazena rychlost v a směr Θ a po každém uplynutí časového intervalu Δt jsou v a Θ aktualizovány následujícím způsobem:

$$v(t + \Delta t) = \min[\max(v(t) + \Delta v, V_{min}), V_{max}] \quad (7.11)$$

$$\Theta(t + \Delta t) = \Theta(t) + \Delta\Theta \quad (7.12)$$

kde V_{min} a V_{max} jsou minimální a maximální rychlost uzlu a Δv a $\Delta\Theta$ jsou náhodné veličiny s rovnoměrným rozložením nad intervaly $\langle -\Delta v_{max}, \Delta v_{max} \rangle$ a $\langle -\Delta\Theta_{max}, \Delta\Theta_{max} \rangle$. Když uzel dosáhne hranici vymezeného území, odrazí se od ní a vybere si nový náhodný směr. Aktualizace v a Θ může být implementována různými způsoby (více viz. [3]).

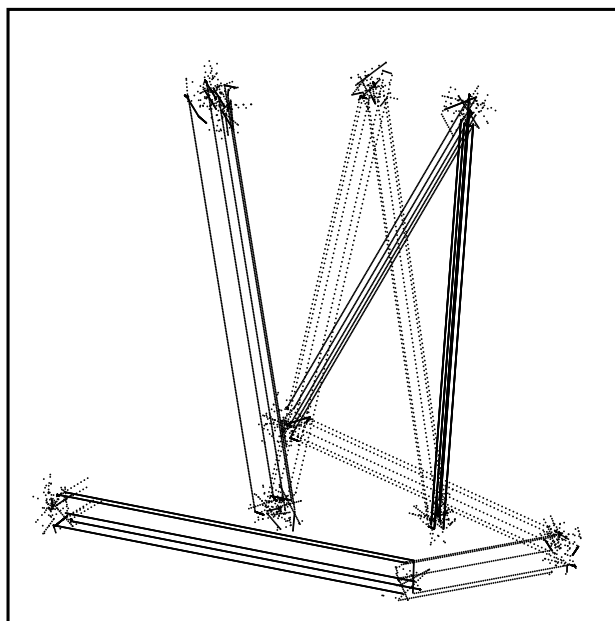


Obrázek 7.3: Model RGM

7.2.3 NCM - Nomadic Community Mobility Model

Model NCM reprezentuje skupinu mobilních uzlů, které se kolektivně pohybují z jednoho místa na druhé. V každé skupině se mohou jednotlivé uzly pohybovat náhodným způsobem

ve svých vlastních „prostorech“. Příkladem může být skupina studentů v muzeu. Třída se přesouvá z jednoho místa na druhé společně, ale studenti se mohou kolem těchto míst relativně volně pohybovat.



Obrázek 7.4: Model NCM

V modelu NCM se uzly ve skupině pohybují podle modelu RWP kolem logického středu skupiny. Pokud se změní poloha středu skupiny, všechny uzly ve skupině se přesunou na nové místo a pak se začnou pohybovat kolem tohoto nového středu. Parametry pro tento model definují maximální vzdálenost uzlů od jejich referenčních bodů.

7.2.4 RPGM - Reference Point Group Mobility

V modelu RPGM má každá skupina uzlů logický střed, který definuje pohyb skupiny - její polohu, rychlost, směr, atd. Trajektorie skupiny je určena trajektorií jejího logického středu, danou posloupností kontrolních bodů. Logický střed se tedy pohybuje z jednoho kontrolního bodu do dalšího. Kromě logického středu je v modelu RPGM pro každý uzel ve skupině definován i referenční bod a náhodný vektor pohybu. Referenční bod uzlu je bod, kolem kterého se tento uzel náhodně pohybuje a je předdefinovaný pro každý uzel pevným vektorem vzhledem k logickému středu. Pohyb uzlu je určen náhodným vektorem pohybu, který reprezentuje odchylku uzlu od referenčního bodu. Vektor náhodného pohybu se aktualizuje periodicky a je dán délkou a směrem, které mají rovnoměrná rozložení nad intervaly $\langle 0, RM_{max} \rangle$ a $\langle 0, 2\pi \rangle$. Ať je $n(t_0)$ vektor polohy uzlu v RPGM modelu a $t = t_0$. Pak

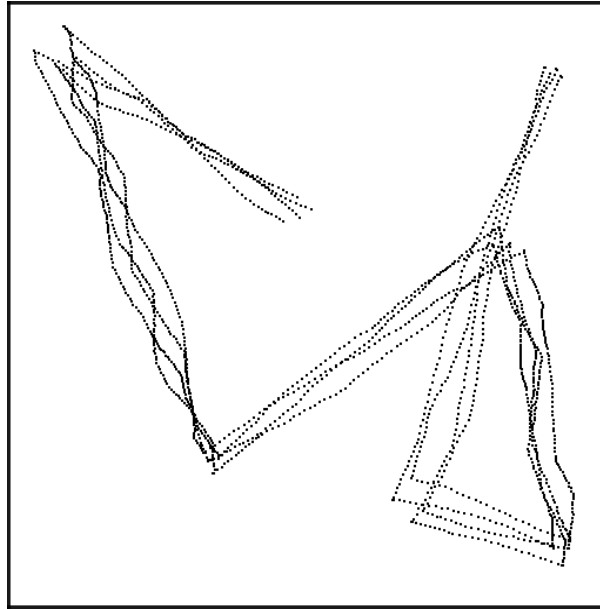
$$n(t_0) = c(t_0) + \overrightarrow{RP} + \overrightarrow{RM}(t_0) \quad (7.13)$$

kde $c(t_0)$ je polohový vektor logického středu skupiny a $t = t_0$, \overrightarrow{RP} je vektor z logického středu do referenčního bodu, $\overrightarrow{RM}(t_0)$ je náhodný vektor pohybu v $t = t_0$. Ať τ je aktualizací interval náhodného vektoru pohybu, pak v $t = t_0 + \tau$ platí:

$$n(t_0 + \tau) = c(t_0 + \tau) + \overrightarrow{RP} + \overrightarrow{RM}(t_0 + \tau) \quad (7.14)$$

Pro $t_0 \leq t \leq t_0 + \tau$, máme dané $n(t)$ následujícím vztahem:

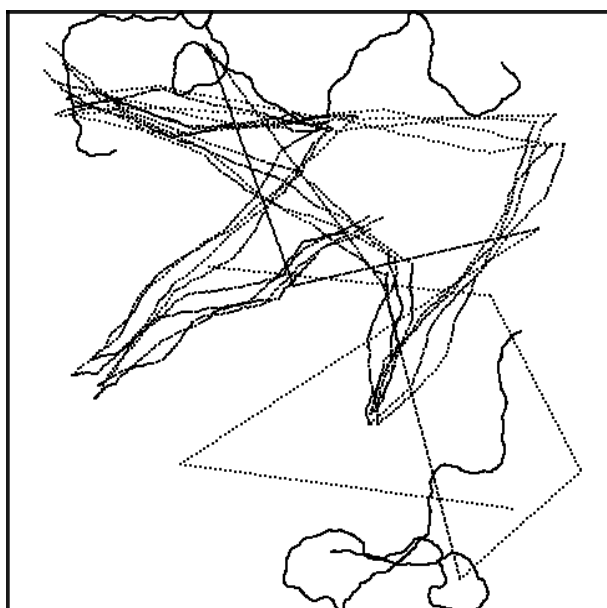
$$n(t) = \frac{(t_0 + \tau - t) \cdot n(t_0) + (t - t_0) \cdot n(t_0 + \tau)}{\tau} \quad (7.15)$$



Obrázek 7.5: Model RPGM

Obrázek 7.5 zobrazuje pohyb skupiny se čtyřmi uzly v modelu RPGM.

Obrázky 7.2, 7.3, 7.5 ukazují typický pohyb uzlů v modelech RWP, RGM a RPGM. Větší vzdálenosti mezi tečkami představují vyšší rychlost uzlů. Model RWP má větší prostorovou distribuci uzlů ve středu sítě než blízko hranic [6]. Model RGM má relativně rovnoměrnou prostorovou distribuci po celé síti. Pokud se uzly pohybují stejnou rychlostí, dostanou se v modelu RWP do větší vzdálenosti než v modelu RGM. Obrázek 7.6 ilustruje skupinu uzlů v modelu RPGM s logickým středem, který se posouvá podle modelu RWP, 3 uzly pohybující se podle modelu RWP a 2 uzly představující model RGM.



Obrázek 7.6: Scénář uzlů s různými modely pohybu

Kapitola 8

Simulace

8.1 Popis programu

K účelům simulace jsem napsala program (přiložen na CD), který se skládá ze dvou částí. Spodní vrstva programu simuluje pohyb uzlů, horní vrstva představuje mechanismy řízení topologie. Jsou implementovány podle algoritmů, vysvětlených v kapitole 5. Program je detailněji představen v kapitole A.

8.1.1 Implementace pohybu

Pohyby, které jsem se rozhodla v programu simulovat, jsou popsány v kapitole 7.2.

Pro vyčíslení míry mobility použiji dva různé typy scénářů sítě. Jsou navrženy tak, aby reprezentovaly velké množství druhů sítí s různými pohybovými charakteristikami.

Pro zjednodušení budeme uvažovat všechny fyzikální rozměry normalizované vzhledem k poloměru R , vyjadřujícímu dosah vysílačů. Takže „vzdálenost 2“ znamená vzdálenost $2 \cdot R$, podobně „rychlost 0.5“ znamená rychlost $0.5R$ za jednotku času. Pro oba modely (RWP a RGM) je použita minimální rychlost $V_{min} = 0.001$ a maximální rychlost $V_{max} = 0.02$. Pro model RGM se každý časový okamžik aktualizuje rychlost v ($\Delta v_{max} = 0.0005$) a směr θ ($\Delta\theta_{max} = 0.1\pi$).

První skupina scénářů sítě zahrnuje skupinu uzlů, které se náhodně pohybují po čtvercové ploše. Různými kombinacemi modelů mobility, dimenze prostoru, počtu uzlů a délky přestávek (v případě RWP), vzniká velké množství různých scénářů sítí.

Např. v tabulce 8.1 má scénář S6 40 uzlů pohybujících se v RWP modelu na ploše 6x6 s délkou přestávek 2 sekundy a scénář T4 má 50 uzlů pohybujících se v RGM modelu v prostoru 6x6.

Druhý typ scénáře sítě používá RPGM model, pohybující se ve čtvercovém prostoru 6x6. Pro trajektorii logických středů každé skupiny je použit RWP model s již popsány parametry. Doba, po kterou se uzly nepohybují, je rovnoměrně rozložena na intervalu

| Random Waypoint | | | | Random Gauss-Markov | | |
|-----------------|-------------|----|----------------|---------------------|-------------|----|
| | rozměr sítě | N | doba přestávky | | rozměr sítě | N |
| <i>S1</i> | 4x4 | 40 | 0 | <i>T1</i> | 5x5 | 30 |
| <i>S2</i> | 6x6 | 40 | 0 | <i>T2</i> | 5x5 | 40 |
| <i>S3</i> | 6x6 | 50 | 0 | <i>T3</i> | 5x5 | 50 |
| <i>S4</i> | 5x5 | 50 | 0 | <i>T4</i> | 6x6 | 50 |
| <i>S5</i> | 3x3 | 30 | 0 | <i>T5</i> | 3x3 | 30 |
| <i>S6</i> | 6x6 | 40 | 2 | | | |
| <i>S7</i> | 6x6 | 30 | 4 | | | |

Tabulka 8.1: Typ 1 (Náhodně se pohybující uzly ve čtvercové oblasti)

$< 0, 100 >$ jednotek času. Tabulka 8.2 popisuje druhý typ scénáře sítě. V scénáři G1 je 5 skupin, každá obsahuje 7 uzlů. V každé skupině je jeden z referenčních bodů umístěn v logickém středu skupiny a zbylých 6 referenčních uzlů je umístěných v rozích pravidelného šestiúhelníku se středem v logickém středu skupin a s délkou strany 0.25. Délka náhodného vektoru pohybu má rovnoměrné rozložení $U < 0, 0.25 >$, což je $RM_{max} = 0.25$. Scénář G2 má 7 skupin a každá z nich obsahuje 5 uzlů. Všechny referenční body těchto pěti uzlů jsou umístěny v logickém středu skupiny, do které dané uzly patří. Scénář G2 dovoluje v porovnání s G1 větší pohyb uvnitř skupiny, protože má $RM_{max} = 0.5$. Scénář G3 pozůstává ze tří skupin (převzatých) ze scénáře G1 a čtyř skupin ze scénáře G2. Úhrnem má 41 uzlů. Scénáře G4 a G5 se skládají ze tří skupin modelu RPGM ze scénáře G1, spojených s dvaceti uzly z RWP a RGM modelů.

8.2 Výpočet změn hran v topologii

Na rozdíl od měření mobility jsou změny hran v topologii události, které se vyskytují v diskrétních časových okamžicích. Abychom stanovili průměrný počet změn na jednu hranu, definujme $L(t)$ jako počet změn hran, vyskytujících se během časového intervalu $< 0, t >$ [5]. Pak

$$l(t) = \frac{L(t)}{t} = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t (L(t_k) - L(t_{k-1})) \quad (8.1)$$

kde t_k je časová vzdálenost od k-té změny hran. Časový průměr počtu změn na jednu hranu je dán vztahem

$$\bar{l} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{l(t)}{\frac{N(t)(N(t)-1)}{2}} dt \quad (8.2)$$

Pokud je $N(t)$ konstantou (N), předešlý vztah lze přepsat na

$$\bar{l} = \frac{2}{N(N-1)} \frac{L(T)}{T} \quad (8.3)$$

| | Popis |
|----|---|
| G1 | <p>plocha 4x4, 5 skupin, 7 uzlů/skupinu (celkově 35 uzlů), $\vec{RP} = 0$ pro uzel $n = 0$, $\vec{RP} = 1$, $\angle \vec{RP} = n \cdot 60$, $n = 1, \dots, 6$, $RM_{max} = 0.25$ (malý pohyb uvnitř skupiny).</p> |
| G2 | <p>plocha 6x6 7 skupin, 5 uzlů/skupinu (celkově 35 uzlů), $\vec{RP} = 0$ pro všechny uzly, $RM_{max} = 0.5$ (velký pohyb uvnitř skupiny).</p> |
| G3 | <p>plocha 6x6 20 uzlů pohybujících se podle modelu RWP 5 skupin s 5 uzly s pohybem podle NCM, $\vec{RP} = 1$, $\vec{Rm} = 0.25$ (celkově 45 uzlů)</p> |
| G4 | <p>plocha 6x6 7 3 skupiny z G1 a 20 bodů RWP (celkově 41 uzlů).</p> |
| G5 | <p>plocha 6x6 3 skupiny NCM z G3 3 skupiny RPGM z G1 3 uzly pohybujících se podle modelu RWP 3 uzly pohybujících se podle modelu RGM (celkové 36 uzlů)</p> |

Tabulka 8.2: Typ 2 (Náhodně se pohybující skupiny v RPGM modelu)

V případě, že je $N(t)$ funkcí času, ze vztahů 8.1 a 8.2 dostaneme

$$\bar{l} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{L(t)} \frac{2}{N(t_k)(N(t_k) - 1)} \quad (8.4)$$

Pro výpočet průměrného poměru počtu změn na jednu hranu u scénářů 1 a 2 (S1, S2, ..., S7, T1, T2, ..., T5 a G1, G2, ..., G5) použijeme vztah 8.3 a pro scénář třetího typu (C1) vztah 8.4.

Pokud síť není v stabilním stavu, pro poměr počtu změn na jednu hranu v čase t platí

$$\bar{l}(t) = \frac{1}{2\Delta t} \int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \frac{l(\tau)}{N(\tau)(N(\tau)-1)} d\tau \quad (8.5)$$

pro nějaké Δt . Výběr vhodného Δt je důležitý. Pokud je Δt příliš velké, $\bar{l}(t)$ nebude reprezentovat závislost na poměru změn linek přesně. Pokud je Δt příliš malé, $\bar{l}(t)$ může být slabým odhadem tohoto poměru.

8.3 Výsledky simulace

Tuto kapitulu věnujeme statistickému vyhodnocení naměřených dat. Tato data jsou výstupem programu InterSim (příloha A) na vstupech definovaných v kapitole 8.1.1. Pro každý definovaný scénář následuje statistické vyhodnocení a grafické znázornění časového průběhu sledovaných veličin. Analýza výsledků je popsána v kapitole 9.

Zkratky, použité pro jednotlivé veličiny, jsou následující:

MaxI - maximální hranové pokrytí, jak je definované ve vztahu 4.2

AvgI - průměrné hranové pokrytí (vztah 4.5)

SPOptPathI - pro každé dva spojené uzly vypočítáme velikost množiny uzlů, které jsou pokryty alespoň jednou hranou nejkratší cesty mezi těmito dvěma body. Veličina *SOOptPathI* určuje průměrnou velikost této množiny.

SPOptEdgeI - pro každé dva spojené uzly vypočítáme interferenci nejkratší cesty mezi těmito dvěma body jako součet interference hran. Veličina *SOOptEdgeI* určuje průměrnou velikost této množiny.

MaxP - maximální výkon vysílače v topologii

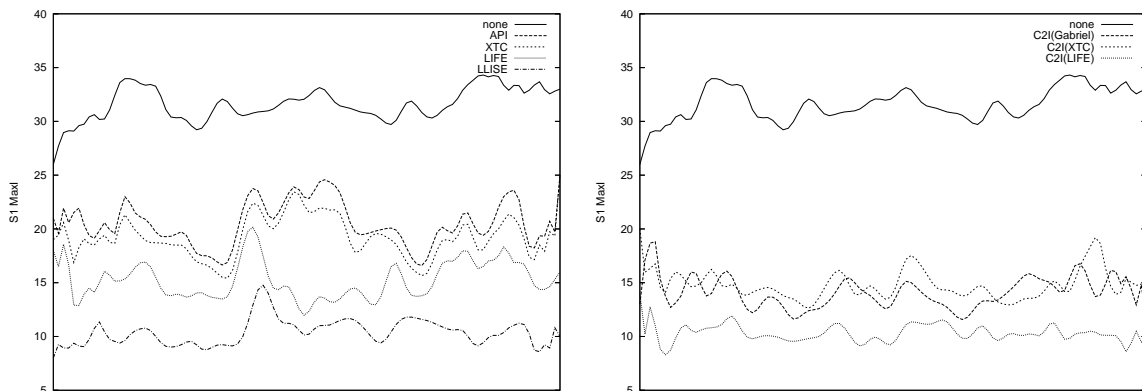
AvgP - průměrný výkon vysílače

SPOptP - pro každé dva spojené uzly vypočítáme výkon potřebný pro odeslání paketu mezi těmito dvěma uzly, *SPOptP* určuje průměrnou hodnotu těchto výkonů.

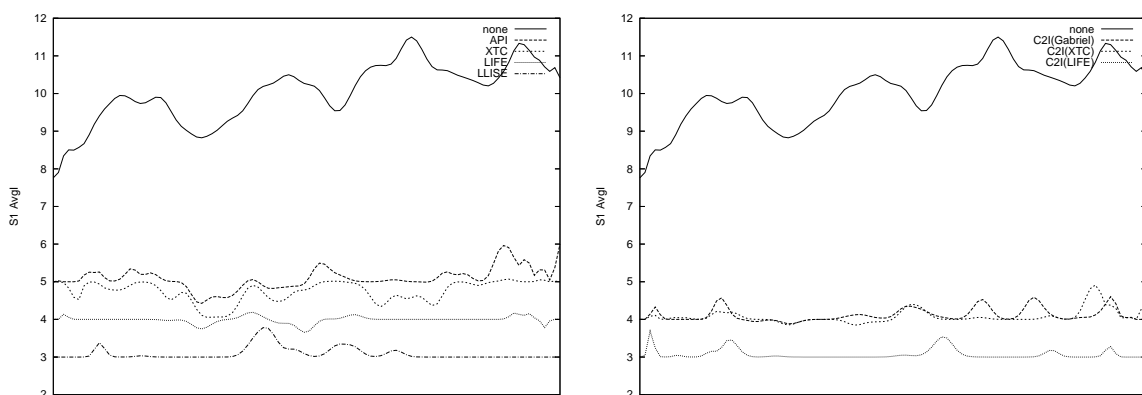
Links - počet změn hran v topologii za jednotku času (počítá se zrušení hrany, přidání hrany nebo změna frekvence hrany).

| Scénář S1 4x4, 40 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 31,61 | 19,19 | 15,22 | 10,38 | 14,13 | 14,78 | 10,29 | 7,83 |
| MaxI (Med) | 31 | 19 | 15 | 10 | 14 | 15 | 10 | 8 |
| MaxI (Min) | 26 | 12 | 9 | 7 | 9 | 9 | 6 | 6 |
| MaxI (Max) | 36 | 31 | 24 | 18 | 22 | 23 | 17 | 14 |
| AvgI (Avg) | 10,04 | 5,23 | 4,46 | 3,74 | 4,62 | 4,61 | 3,68 | 3,25 |
| AvgI (Med) | 10,18 | 5,24 | 4,45 | 3,74 | 4,6 | 4,61 | 3,67 | 3,23 |
| AvgI (Min) | 7,75 | 4,28 | 3,53 | 3,35 | 3,86 | 3,83 | 3,12 | 2,71 |
| AvgI (Max) | 11,84 | 6,08 | 5,12 | 4,23 | 5,51 | 5,69 | 4,34 | 3,87 |
| SPOptPathI (Avg) | 16,86 | 12,98 | 12,79 | 14,25 | 12,85 | 11,24 | 10,96 | 12,97 |
| SPOptPathI (Med) | 16,91 | 12,93 | 12,78 | 14,19 | 12,83 | 11,25 | 10,91 | 12,99 |
| SPOptPathI (Min) | 14,42 | 11,01 | 10,66 | 11,3 | 10,86 | 9,48 | 9,27 | 10,1 |
| SPOptPathI (Max) | 19,71 | 15,37 | 15,62 | 17,28 | 15,58 | 13,26 | 13,91 | 15,82 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 28,03 | 26,59 | 28,98 | 36,6 | 27,24 | 22,01 | 24,04 | 31,59 |
| SPOptEdgeI (Med) | 27,72 | 26,61 | 28,75 | 36,41 | 26,93 | 21,88 | 23,75 | 31,67 |
| SPOptEdgeI (Min) | 24,58 | 22,09 | 23,51 | 26,68 | 22,09 | 18,01 | 19,7 | 22,85 |
| SPOptEdgeI (Max) | 33,86 | 32,23 | 39,4 | 47,56 | 34,13 | 27,97 | 32,47 | 41,47 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,89 | 0,81 | 0,77 | 0,83 | 0,9 | 0,81 | 0,77 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,91 | 0,85 | 0,79 | 0,86 | 0,92 | 0,85 | 0,79 |
| MaxP (Min) | 0,95 | 0,49 | 0,44 | 0,41 | 0,44 | 0,49 | 0,44 | 0,41 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,46 | 0,23 | 0,19 | 0,17 | 0,2 | 0,25 | 0,19 | 0,17 |
| AvgP (Med) | 0,46 | 0,24 | 0,2 | 0,17 | 0,2 | 0,25 | 0,2 | 0,17 |
| AvgP (Min) | 0,39 | 0,14 | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,11 | 0,11 |
| AvgP (Max) | 0,51 | 0,33 | 0,27 | 0,23 | 0,28 | 0,36 | 0,27 | 0,23 |
| SPOptP (Avg) | 2,66 | 2,04 | 2,07 | 3,15 | 2,27 | 2 | 2,07 | 3,15 |
| SPOptP (Med) | 2,66 | 2,05 | 2,09 | 2,97 | 2,25 | 2,01 | 2,09 | 2,97 |
| SPOptP (Min) | 2,17 | 1,54 | 1,57 | 1,7 | 1,58 | 1,51 | 1,57 | 1,7 |
| SPOptP (Max) | 3,19 | 2,6 | 2,74 | 6,24 | 3,15 | 2,57 | 2,74 | 6,24 |
| Links (Avg) | 53,01 | 3,52 | 39,49 | 36,51 | 5,09 | 3,52 | 2,76 | 3,6 |
| Links (Med) | 53 | 3 | 40 | 37 | 4 | 3 | 2 | 3 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 72 | 12 | 49 | 43 | 17 | 19 | 14 | 14 |

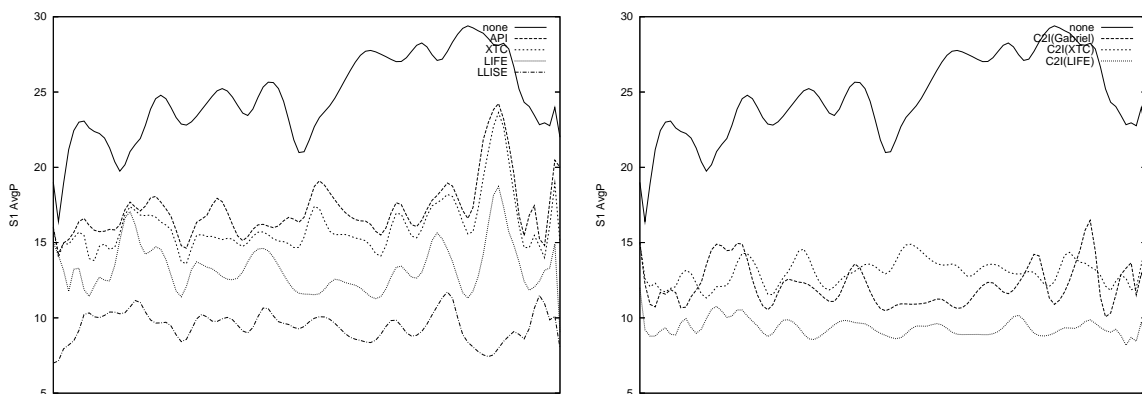
Tabulka 8.3: Scénář S1 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

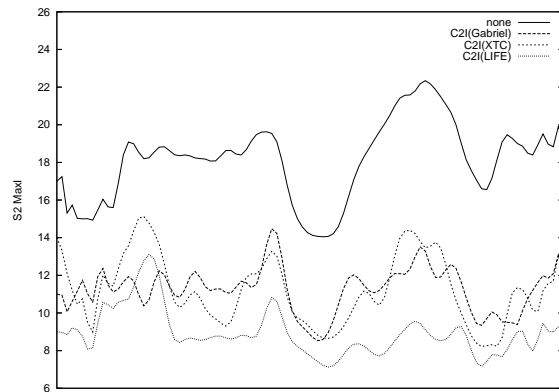
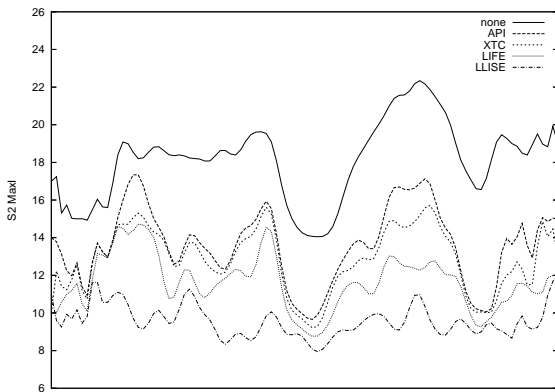


Průměrný vysíací výkon AvgP.

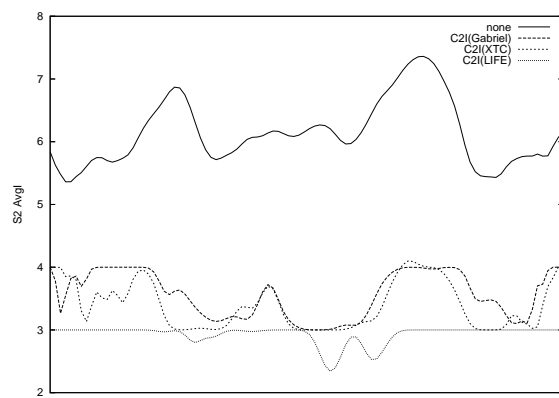
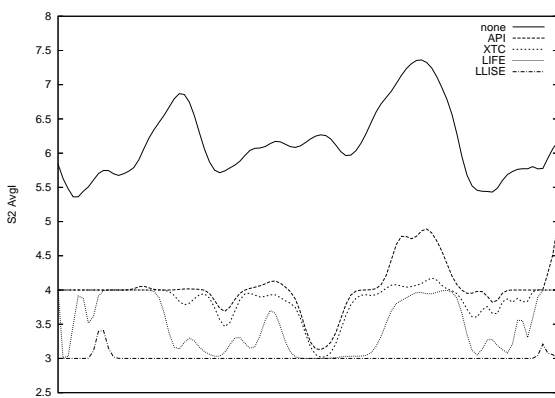
Obrázek 8.1: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S1).

| Scénář S2 6x6, 40 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 18,13 | 11,66 | 9,57 | 11,26 | 11,22 | 8,94 | 7,01 | 9,07 |
| MaxI (Med) | 18 | 11 | 9 | 11 | 11 | 9 | 7 | 9 |
| MaxI (Min) | 13 | 7 | 7 | 8 | 7 | 6 | 5 | 6 |
| MaxI (Max) | 25 | 18 | 17 | 20 | 19 | 15 | 12 | 14 |
| AvgI (Avg) | 6,14 | 3,97 | 3,58 | 4,03 | 3,89 | 3,33 | 3 | 3,66 |
| AvgI (Med) | 6,02 | 3,97 | 3,58 | 4,03 | 3,84 | 3,35 | 3 | 3,63 |
| AvgI (Min) | 5,24 | 3,33 | 3,18 | 3,41 | 3,15 | 2,82 | 2,63 | 3 |
| AvgI (Max) | 7,69 | 4,54 | 4,14 | 4,78 | 5,12 | 3,9 | 3,54 | 4,41 |
| SPOptPathI (Avg) | 12,39 | 11,23 | 12,12 | 11,18 | 10,03 | 9,76 | 10,57 | 8,91 |
| SPOptPathI (Med) | 12,72 | 11,57 | 12,51 | 11,5 | 10,39 | 10,08 | 10,95 | 9,01 |
| SPOptPathI (Min) | 7,62 | 6,35 | 6,38 | 6,4 | 5,56 | 5,16 | 5,41 | 4,62 |
| SPOptPathI (Max) | 15,3 | 14,31 | 15,47 | 14,17 | 12,69 | 12,52 | 13,95 | 13,7 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 24,32 | 26,37 | 30,73 | 25,26 | 21,21 | 21,9 | 25,13 | 19,93 |
| SPOptEdgeI (Med) | 25,22 | 27,13 | 31,73 | 26,21 | 22,02 | 22,58 | 26,14 | 20,1 |
| SPOptEdgeI (Min) | 10,96 | 12,14 | 12,76 | 11,5 | 9,26 | 9,62 | 9,89 | 8,88 |
| SPOptEdgeI (Max) | 33,91 | 39,03 | 43 | 36,05 | 29,09 | 30,53 | 36,52 | 34,07 |
| MaxP (Avg) | 0,98 | 0,94 | 0,93 | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,92 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,96 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,94 |
| MaxP (Min) | 0,92 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,72 | 0,67 | 0,67 | 0,7 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,49 | 0,34 | 0,33 | 0,35 | 0,38 | 0,34 | 0,33 | 0,37 |
| AvgP (Med) | 0,48 | 0,35 | 0,34 | 0,35 | 0,39 | 0,35 | 0,34 | 0,37 |
| AvgP (Min) | 0,41 | 0,24 | 0,25 | 0,25 | 0,27 | 0,24 | 0,25 | 0,26 |
| AvgP (Max) | 0,56 | 0,42 | 0,41 | 0,42 | 0,45 | 0,42 | 0,41 | 0,5 |
| SPOptP (Avg) | 4,07 | 3,72 | 4,82 | 3,99 | 3,59 | 3,72 | 4,82 | 3,69 |
| SPOptP (Med) | 4,21 | 3,83 | 4,93 | 4,09 | 3,69 | 3,83 | 4,93 | 3,79 |
| SPOptP (Min) | 1,74 | 1,53 | 1,63 | 1,57 | 1,52 | 1,53 | 1,63 | 1,25 |
| SPOptP (Max) | 5,78 | 5,18 | 7,99 | 5,81 | 5,05 | 5,18 | 7,99 | 6,11 |
| Links (Avg) | 37,95 | 31,85 | 30,66 | 2,44 | 2,03 | 1,74 | 2,37 | 1,37 |
| Links (Med) | 39 | 32 | 31 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 60 | 42 | 40 | 12 | 12 | 13 | 12 | 10 |

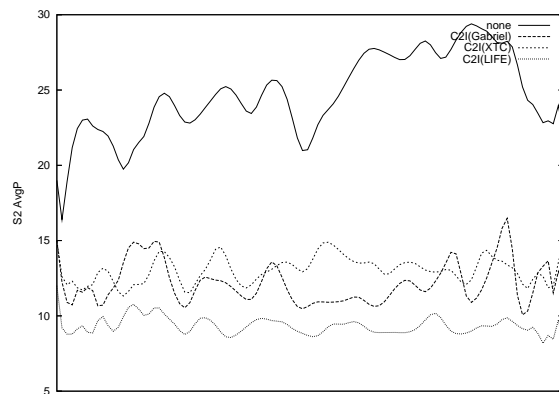
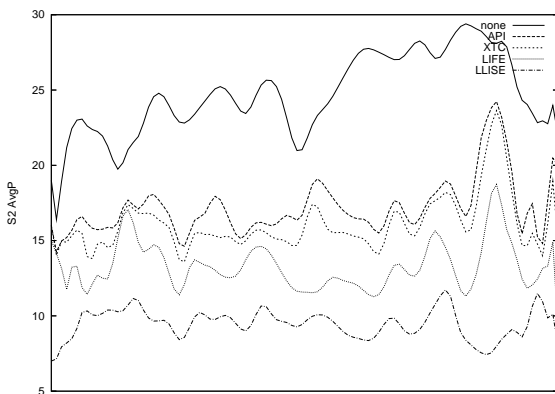
Tabulka 8.4: Scénář S2 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

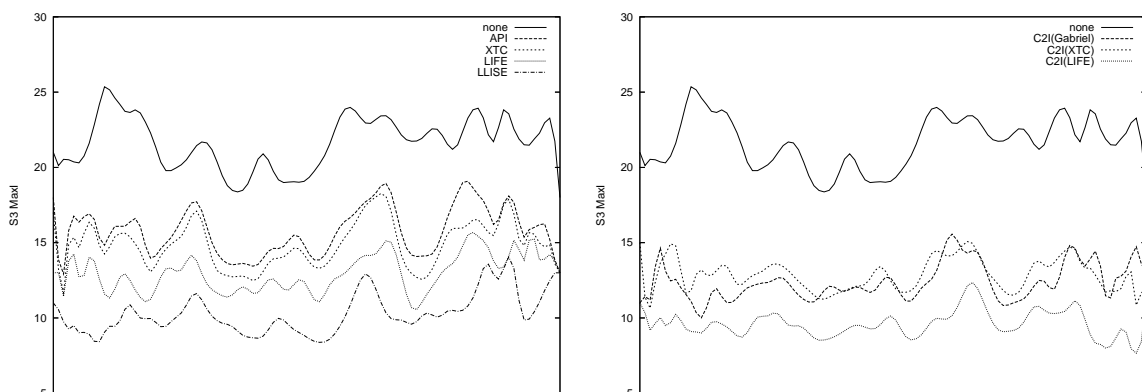


Průměrný vysílací výkon AvgP.

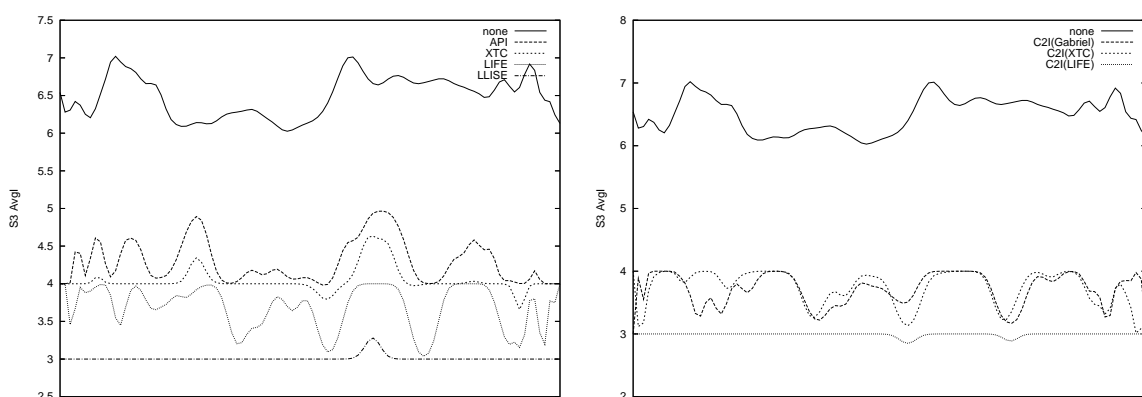
Obrázek 8.2: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S2).

| Scénář S3 6x6, 50 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 21,67 | 14,84 | 12,96 | 10,30 | 12,39 | 12,85 | 9,60 | 7,56 |
| MaxI (Med) | 22,00 | 15,00 | 13,00 | 10,00 | 12,00 | 13,00 | 9,00 | 7,00 |
| MaxI (Min) | 17,00 | 10,00 | 8,00 | 7,00 | 9,00 | 8,00 | 7,00 | 6,00 |
| MaxI (Max) | 27,00 | 22,00 | 20,00 | 17,00 | 18,00 | 18,00 | 16,00 | 12,00 |
| AvgI (Avg) | 6,49 | 4,52 | 4,10 | 3,59 | 4,11 | 4,15 | 3,41 | 3,02 |
| AvgI (Med) | 6,50 | 4,52 | 4,08 | 3,59 | 4,10 | 4,13 | 3,41 | 3,00 |
| AvgI (Min) | 5,83 | 3,58 | 3,39 | 3,22 | 3,45 | 3,25 | 2,82 | 2,69 |
| AvgI (Max) | 7,37 | 5,52 | 4,67 | 4,08 | 4,73 | 4,88 | 3,93 | 3,52 |
| SPOptPathI (Avg) | 14,63 | 13,09 | 13,10 | 14,85 | 13,06 | 11,79 | 11,27 | 13,12 |
| SPOptPathI (Med) | 14,61 | 13,11 | 13,05 | 14,79 | 13,00 | 11,77 | 11,24 | 12,99 |
| SPOptPathI (Min) | 11,30 | 10,24 | 10,16 | 11,64 | 10,08 | 9,12 | 8,40 | 9,84 |
| SPOptPathI (Max) | 16,98 | 15,94 | 15,94 | 17,90 | 15,95 | 14,74 | 13,69 | 17,01 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 29,01 | 29,22 | 31,21 | 39,18 | 29,93 | 25,03 | 25,77 | 32,47 |
| SPOptEdgeI (Med) | 28,81 | 29,03 | 31,04 | 39,04 | 29,65 | 24,72 | 25,65 | 32,20 |
| SPOptEdgeI (Min) | 19,84 | 20,59 | 21,64 | 29,25 | 19,74 | 18,03 | 17,47 | 22,02 |
| SPOptEdgeI (Max) | 34,94 | 35,24 | 40,80 | 51,67 | 37,79 | 31,99 | 32,91 | 47,51 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,96 | 0,94 | 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,94 | 0,93 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,97 | 0,95 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,95 | 0,94 |
| MaxP (Min) | 0,95 | 0,79 | 0,69 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,69 | 0,78 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,50 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 0,34 | 0,38 | 0,33 | 0,31 |
| AvgP (Med) | 0,50 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 0,34 | 0,38 | 0,33 | 0,31 |
| AvgP (Min) | 0,44 | 0,25 | 0,23 | 0,24 | 0,26 | 0,26 | 0,23 | 0,24 |
| AvgP (Max) | 0,55 | 0,46 | 0,39 | 0,40 | 0,42 | 0,48 | 0,39 | 0,40 |
| SPOptP (Avg) | 4,40 | 3,92 | 4,03 | 5,69 | 4,36 | 3,83 | 4,03 | 5,69 |
| SPOptP (Med) | 4,34 | 3,88 | 3,98 | 5,48 | 4,34 | 3,80 | 3,98 | 5,48 |
| SPOptP (Min) | 3,02 | 2,70 | 2,88 | 3,71 | 2,96 | 2,69 | 2,88 | 3,71 |
| SPOptP (Max) | 5,91 | 5,50 | 5,72 | 9,19 | 6,18 | 5,46 | 5,72 | 9,19 |
| Links (Avg) | 50,91 | 2,62 | 41,68 | 38,83 | 3,42 | 2,93 | 2,56 | 3,25 |
| Links (Med) | 51,00 | 2,00 | 42,00 | 39,00 | 3,00 | 2,00 | 2,00 | 2,50 |
| Links (Min) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Links (Max) | 66,00 | 10,00 | 52,00 | 52,00 | 18,00 | 15,00 | 18,00 | 21,00 |

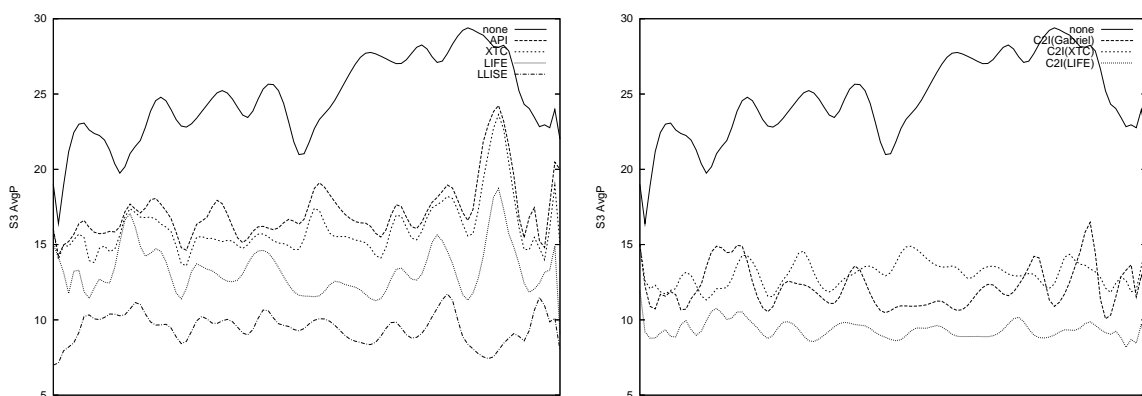
Tabulka 8.5: Scénář S3 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

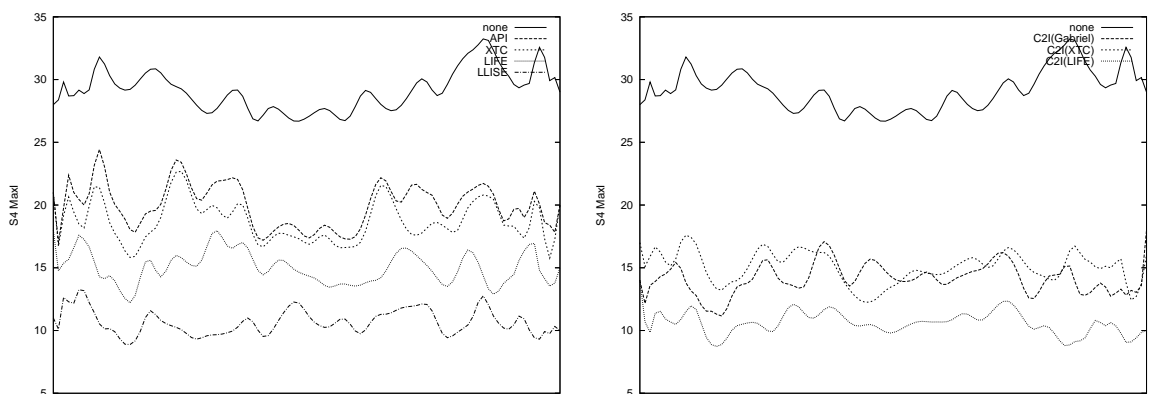


Průměrný vysílací výkon AvgP.

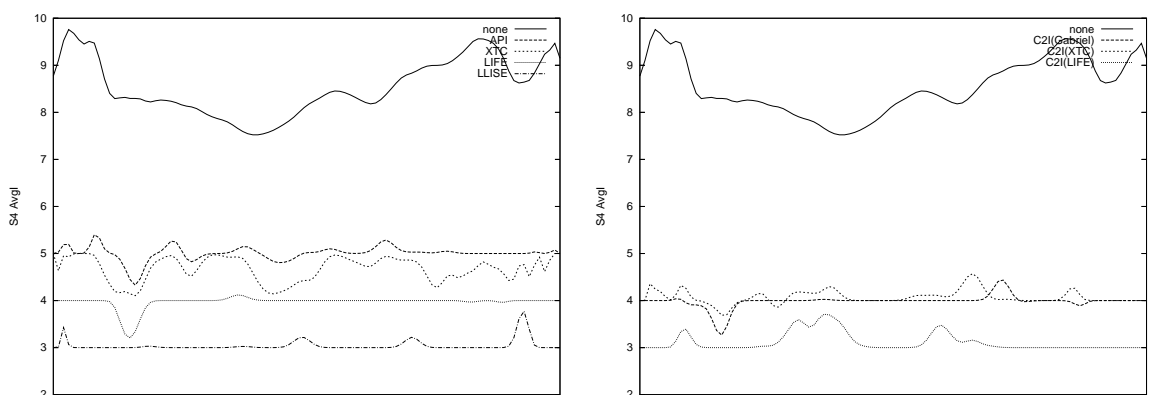
Obrázek 8.3: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S3).

| Scénář S4 5x5, 50 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 29,14 | 18,66 | 15,02 | 10,67 | 14,11 | 15,04 | 10,57 | 8,11 |
| MaxI (Med) | 29 | 18 | 15 | 10 | 14 | 15 | 11 | 8 |
| MaxI (Min) | 23 | 13 | 10 | 8 | 9 | 10 | 7 | 6 |
| MaxI (Max) | 35 | 27 | 24 | 17 | 22 | 21 | 15 | 12 |
| AvgI (Avg) | 8,55 | 5,1 | 4,44 | 3,74 | 4,45 | 4,62 | 3,71 | 3,26 |
| AvgI (Med) | 8,41 | 5,08 | 4,46 | 3,73 | 4,44 | 4,61 | 3,7 | 3,25 |
| AvgI (Min) | 7,41 | 4,33 | 3,72 | 3,39 | 3,69 | 3,69 | 3,07 | 2,75 |
| AvgI (Max) | 9,92 | 5,98 | 5,17 | 4,16 | 5,35 | 5,5 | 4,41 | 3,83 |
| SPOptPathI (Avg) | 17,12 | 14,17 | 14,11 | 15,98 | 14,17 | 12,51 | 12,12 | 14,46 |
| SPOptPathI (Med) | 17,05 | 14,12 | 13,95 | 15,92 | 14,02 | 12,41 | 12,03 | 14,29 |
| SPOptPathI (Min) | 15,35 | 12,32 | 11,99 | 12,91 | 11,96 | 11 | 10,45 | 11,27 |
| SPOptPathI (Max) | 19,95 | 17,43 | 17,43 | 19,75 | 18,3 | 15,5 | 14,94 | 18,94 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 31,34 | 30,14 | 32,73 | 42 | 31,51 | 25,37 | 27,06 | 35,97 |
| SPOptEdgeI (Med) | 31,17 | 29,92 | 32,38 | 41,88 | 31,04 | 25,18 | 26,88 | 34,805 |
| SPOptEdgeI (Min) | 27,96 | 25,46 | 27,14 | 30,82 | 25,69 | 21,22 | 22,71 | 25,11 |
| SPOptEdgeI (Max) | 37,51 | 40,93 | 42,82 | 57,19 | 46,24 | 31,95 | 34,81 | 56,91 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,95 | 0,9 | 0,88 | 0,9 | 0,95 | 0,9 | 0,88 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,96 | 0,92 | 0,9 | 0,93 | 0,96 | 0,92 | 0,9 |
| MaxP (Min) | 0,96 | 0,71 | 0,63 | 0,6 | 0,6 | 0,72 | 0,63 | 0,6 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,48 | 0,29 | 0,25 | 0,23 | 0,25 | 0,31 | 0,25 | 0,23 |
| AvgP (Med) | 0,48 | 0,29 | 0,25 | 0,23 | 0,25 | 0,31 | 0,25 | 0,23 |
| AvgP (Min) | 0,42 | 0,22 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,24 | 0,19 | 0,18 |
| AvgP (Max) | 0,52 | 0,37 | 0,31 | 0,29 | 0,31 | 0,39 | 0,31 | 0,29 |
| SPOptP (Avg) | 3,56 | 2,91 | 2,97 | 4,35 | 3,29 | 2,87 | 2,97 | 4,35 |
| SPOptP (Med) | 3,56 | 2,9 | 2,93 | 4,12 | 3,22 | 2,86 | 2,93 | 4,12 |
| SPOptP (Min) | 3,09 | 2,44 | 2,42 | 2,9 | 2,6 | 2,45 | 2,42 | 2,9 |
| SPOptP (Max) | 4,38 | 3,83 | 3,64 | 7,14 | 5,29 | 3,63 | 3,64 | 7,14 |
| Links (Avg) | 64,46 | 3,51 | 49,06 | 45,09 | 4,74 | 3,48 | 2,7 | 3,76 |
| Links (Med) | 65 | 3 | 49 | 45 | 4 | 3 | 2 | 3 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 83 | 14 | 60 | 57 | 20 | 16 | 15 | 17 |

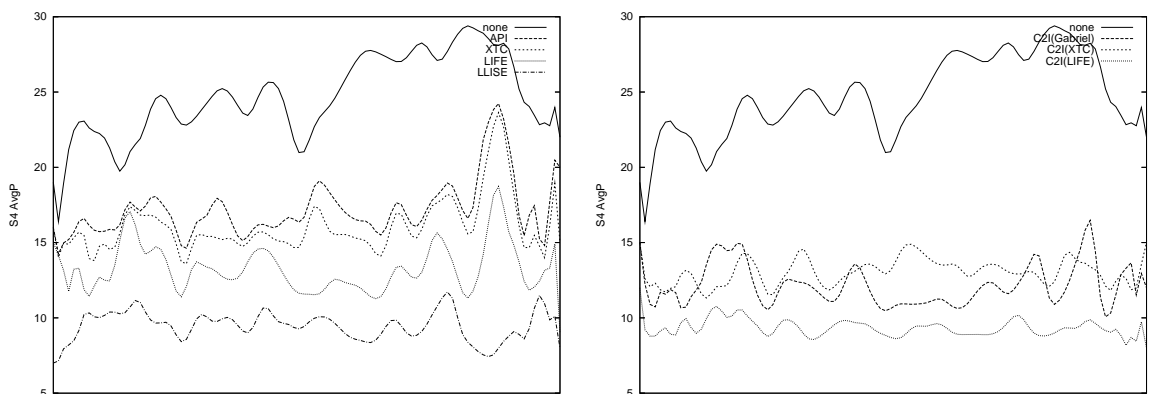
Tabulka 8.6: Scénář S4 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

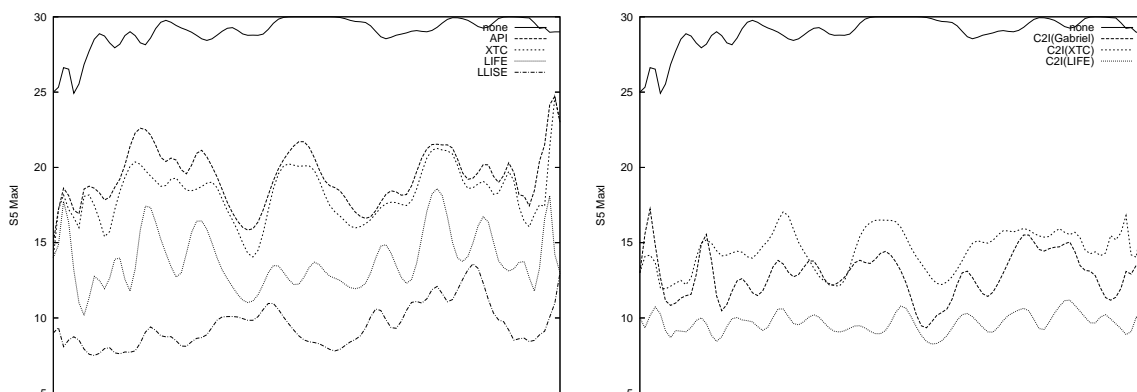


Průměrný vysíací výkon AvgP.

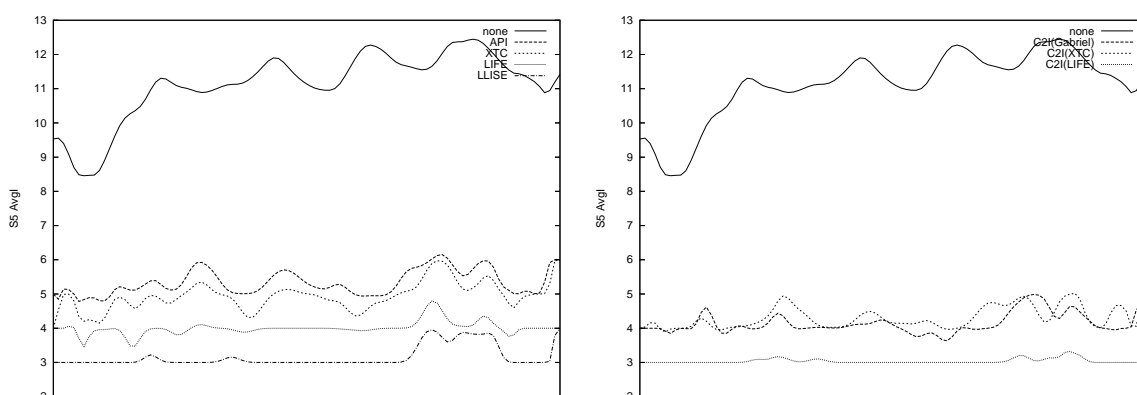
Obrázek 8.4: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S4).

| Scénář S5 3x3, 30 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 29,05 | 18,25 | 13,85 | 9,51 | 12,88 | 14,55 | 9,67 | 7,12 |
| MaxI (Med) | 29 | 18 | 13 | 9 | 13 | 15 | 10 | 7 |
| MaxI (Min) | 23 | 10 | 9 | 7 | 8 | 10 | 7 | 5 |
| MaxI (Max) | 30 | 27 | 20 | 17 | 22 | 21 | 15 | 13 |
| AvgI (Avg) | 11,12 | 5,41 | 4,42 | 3,7 | 4,57 | 4,79 | 3,61 | 3,12 |
| AvgI (Med) | 11,26 | 5,38 | 4,36 | 3,65 | 4,5 | 4,78 | 3,6 | 3,1 |
| AvgI (Min) | 8,33 | 4,35 | 3,81 | 3,31 | 3,67 | 3,92 | 3,15 | 2,62 |
| AvgI (Max) | 12,66 | 6,79 | 5,5 | 4,27 | 5,59 | 6,22 | 4,31 | 3,62 |
| SPOptPathI (Avg) | 15,49 | 11,11 | 10,77 | 11,96 | 10,78 | 9,7 | 9,21 | 10,74 |
| SPOptPathI (Med) | 15,62 | 11,05 | 10,74 | 11,94 | 10,8 | 9,68 | 9,19 | 10,72 |
| SPOptPathI (Min) | 13,16 | 8,95 | 8,99 | 9,5 | 8,82 | 8,07 | 7,65 | 8,69 |
| SPOptPathI (Max) | 16,84 | 13,28 | 12,84 | 14,15 | 12,83 | 11,56 | 10,99 | 13,15 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 22,85 | 21,26 | 23,24 | 29,45 | 21,54 | 17,82 | 19,14 | 24,56 |
| SPOptEdgeI (Med) | 22,92 | 21,31 | 23,14 | 29,49 | 21,51 | 17,75 | 19,14 | 24,24 |
| SPOptEdgeI (Min) | 20,33 | 17,5 | 18,45 | 22,26 | 17,25 | 14,74 | 14,82 | 17,99 |
| SPOptEdgeI (Max) | 25,06 | 25,31 | 30,32 | 38,98 | 25,9 | 21,2 | 23,96 | 33,17 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,79 | 0,6 | 0,55 | 0,62 | 0,8 | 0,6 | 0,55 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,81 | 0,58 | 0,52 | 0,6 | 0,83 | 0,58 | 0,52 |
| MaxP (Min) | 0,94 | 0,37 | 0,24 | 0,23 | 0,24 | 0,37 | 0,24 | 0,23 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,46 | 0,2 | 0,15 | 0,14 | 0,16 | 0,22 | 0,15 | 0,14 |
| AvgP (Med) | 0,46 | 0,2 | 0,15 | 0,14 | 0,16 | 0,22 | 0,15 | 0,14 |
| AvgP (Min) | 0,43 | 0,13 | 0,1 | 0,09 | 0,1 | 0,13 | 0,1 | 0,09 |
| AvgP (Max) | 0,51 | 0,27 | 0,23 | 0,18 | 0,27 | 0,29 | 0,23 | 0,18 |
| SPOptP (Avg) | 1,89 | 1,36 | 1,37 | 2,09 | 1,53 | 1,33 | 1,37 | 2,09 |
| SPOptP (Med) | 1,85 | 1,34 | 1,36 | 1,97 | 1,49 | 1,31 | 1,36 | 1,97 |
| SPOptP (Min) | 1,56 | 0,98 | 0,96 | 1,06 | 1,03 | 0,94 | 0,96 | 1,06 |
| SPOptP (Max) | 2,31 | 1,87 | 1,86 | 3,64 | 2,38 | 1,82 | 1,86 | 3,64 |
| Links (Avg) | 37,07 | 2,57 | 28,27 | 25,72 | 3,39 | 2,58 | 1,94 | 2,74 |
| Links (Med) | 37 | 2 | 28 | 26 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 51 | 9 | 36 | 34 | 15 | 12 | 10 | 16 |

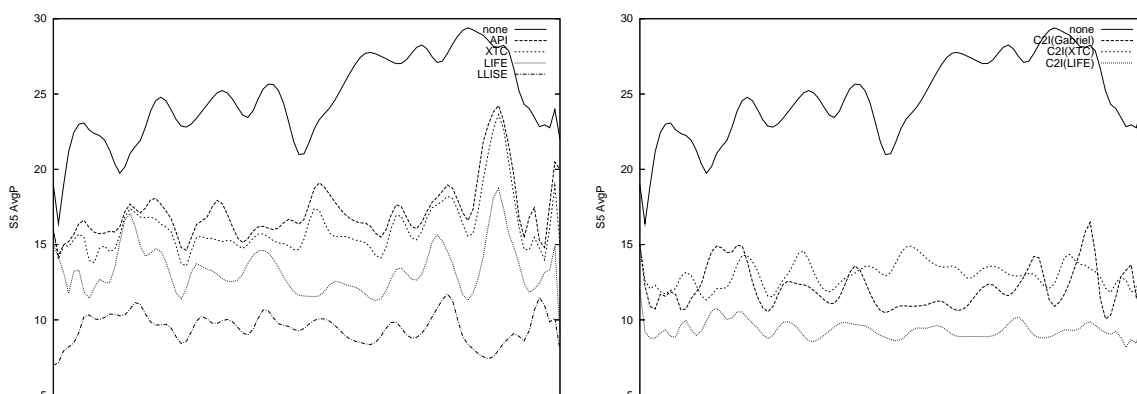
Tabulka 8.7: Scénář S5 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

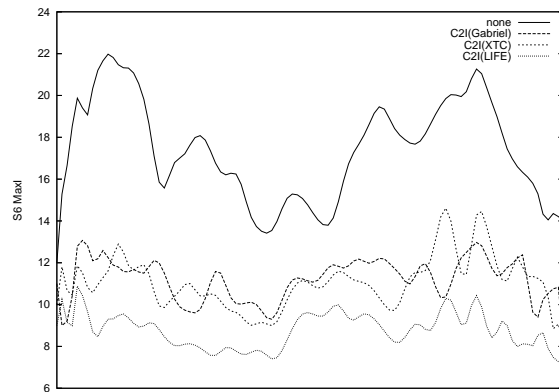
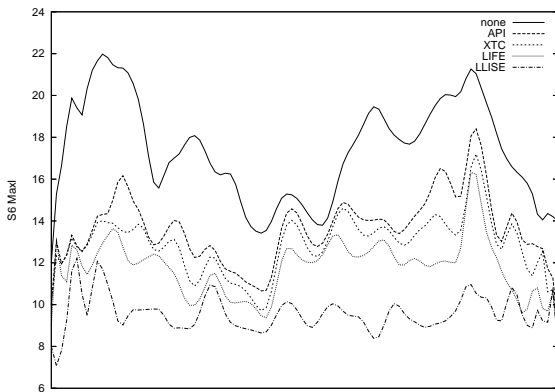


Průměrný vysílací výkon AvgP.

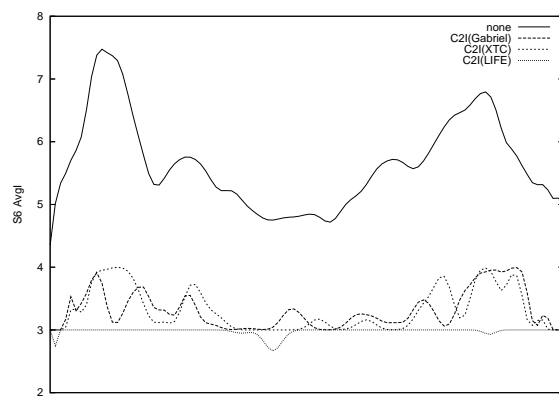
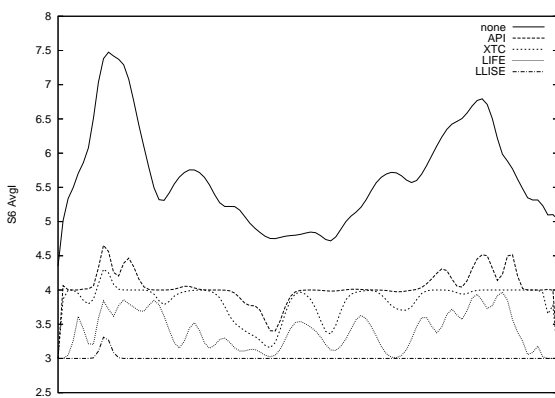
Obrázek 8.5: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S5).

| Scénář S6 6x6, 40 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 17,42 | 12,9 | 11,83 | 9,6 | 11,22 | 11,06 | 8,79 | 6,96 |
| MaxI (Med) | 17 | 13 | 12 | 9 | 11 | 11 | 9 | 7 |
| MaxI (Min) | 12 | 8 | 7 | 7 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| MaxI (Max) | 23 | 20 | 19 | 15 | 15 | 19 | 14 | 10 |
| AvgI (Avg) | 5,65 | 4,25 | 3,94 | 3,52 | 3,92 | 3,87 | 3,3 | 2,97 |
| AvgI (Med) | 5,57 | 4,24 | 3,92 | 3,5 | 3,88 | 3,83 | 3,29 | 2,97 |
| AvgI (Min) | 4,35 | 3,5 | 3,33 | 3,18 | 3,36 | 3,19 | 2,88 | 2,6 |
| AvgI (Max) | 7,76 | 5,12 | 4,58 | 4,13 | 4,58 | 4,84 | 3,82 | 3,39 |
| SPOptPathI (Avg) | 12,5 | 11,32 | 11,4 | 12,2 | 11,33 | 10,1 | 9,81 | 10,74 |
| SPOptPathI (Med) | 12,44 | 11,31 | 11,38 | 12,2 | 11,31 | 10,13 | 9,75 | 10,65 |
| SPOptPathI (Min) | 9,96 | 9,22 | 9,13 | 9,26 | 8,87 | 7,23 | 7,31 | 7,68 |
| SPOptPathI (Max) | 15,12 | 14,07 | 14,25 | 15,51 | 14,35 | 12,57 | 12,28 | 14,16 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 24,79 | 25,1 | 26,61 | 31,14 | 25,68 | 21,48 | 21,98 | 25,78 |
| SPOptEdgeI (Med) | 24,82 | 25,03 | 26,49 | 31,06 | 25,28 | 21,4 | 21,83 | 25,38 |
| SPOptEdgeI (Min) | 18,25 | 18,03 | 19 | 20,97 | 17,93 | 14,79 | 15,08 | 16,69 |
| SPOptEdgeI (Max) | 33,47 | 33,76 | 35,16 | 43,08 | 34,5 | 28,93 | 28,71 | 36,18 |
| MaxP (Avg) | 0,98 | 0,95 | 0,93 | 0,92 | 0,94 | 0,96 | 0,93 | 0,92 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,96 | 0,94 | 0,93 | 0,95 | 0,97 | 0,94 | 0,93 |
| MaxP (Min) | 0,92 | 0,72 | 0,7 | 0,68 | 0,7 | 0,78 | 0,7 | 0,68 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,51 | 0,39 | 0,36 | 0,34 | 0,36 | 0,41 | 0,36 | 0,34 |
| AvgP (Med) | 0,51 | 0,39 | 0,35 | 0,34 | 0,37 | 0,41 | 0,35 | 0,34 |
| AvgP (Min) | 0,43 | 0,31 | 0,27 | 0,25 | 0,27 | 0,32 | 0,27 | 0,25 |
| AvgP (Max) | 0,58 | 0,51 | 0,48 | 0,44 | 0,47 | 0,53 | 0,48 | 0,44 |
| SPOptP (Avg) | 4,27 | 3,86 | 3,94 | 5,15 | 4,27 | 3,8 | 3,94 | 5,15 |
| SPOptP (Med) | 4,3 | 3,9 | 3,99 | 4,99 | 4,24 | 3,84 | 3,99 | 4,99 |
| SPOptP (Min) | 3,01 | 2,52 | 2,55 | 3 | 2,73 | 2,51 | 2,55 | 3 |
| SPOptP (Max) | 6,65 | 6,01 | 6,03 | 9,16 | 7,68 | 5,99 | 6,03 | 9,16 |
| Links (Avg) | 38,75 | 2,1 | 32,91 | 30,56 | 2,64 | 2,49 | 2,2 | 2,85 |
| Links (Med) | 39 | 2 | 33 | 30 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 53 | 13 | 45 | 42 | 14 | 17 | 12 | 16 |

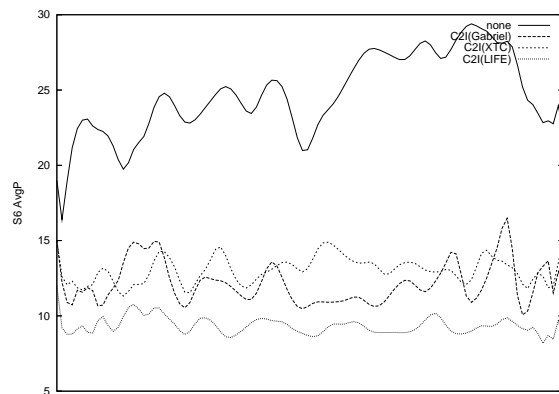
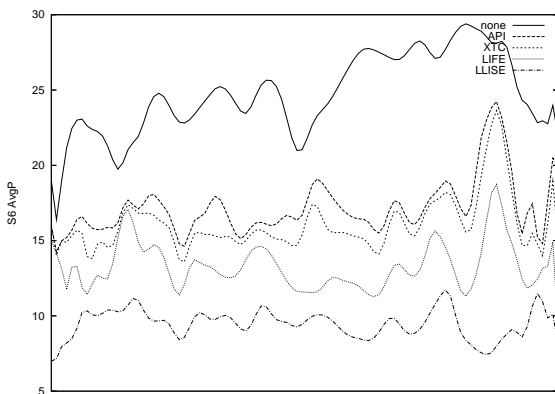
Tabulka 8.8: Scénář S6 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

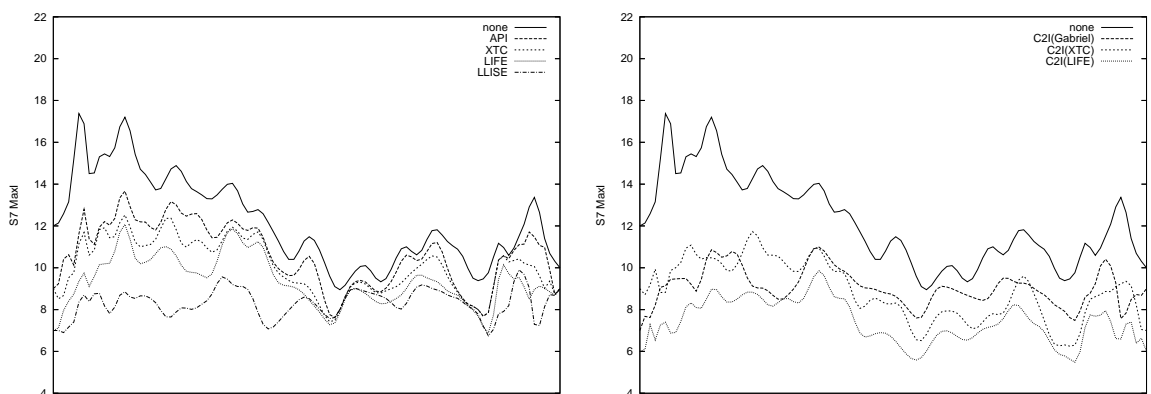


Průměrný vysílací výkon AvgP.

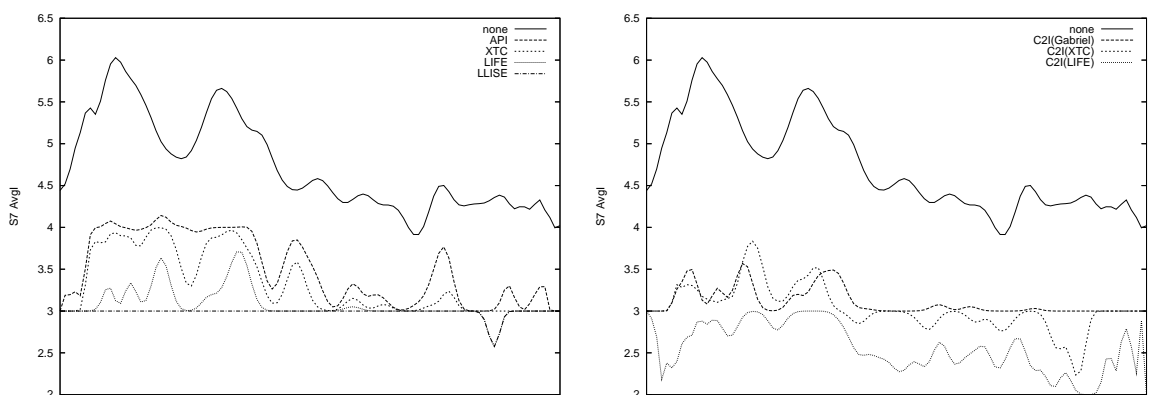
Obrázek 8.6: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S6).

| Scénář S7 6x6, 30 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 12,2 | 10,07 | 9,38 | 8,32 | 9,07 | 8,87 | 7,43 | 6,367 |
| MaxI (Med) | 12 | 10 | 9 | 8 | 9 | 9 | 7 | 6 |
| MaxI (Min) | 8 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 4 | 4 |
| MaxI (Max) | 21 | 17 | 15 | 13 | 14 | 14 | 12 | 9 |
| AvgI (Avg) | 4,73 | 3,83 | 3,61 | 3,39 | 3,66 | 3,48 | 3,05 | 2,85 |
| AvgI (Med) | 4,52 | 3,81 | 3,6 | 3,39 | 3,63 | 3,44 | 3 | 2,86 |
| AvgI (Min) | 3,6 | 3,2 | 2,8 | 2,8 | 3 | 2,79 | 2,45 | 2,45 |
| AvgI (Max) | 6,27 | 4,66 | 4,39 | 3,88 | 4,41 | 4,61 | 3,72 | 3,23 |
| SPOptPathI (Avg) | 9,55 | 8,88 | 8,96 | 9,25 | 8,91 | 8,05 | 7,85 | 8,07 |
| SPOptPathI (Med) | 9,63 | 8,99 | 9,03 | 9,32 | 9,01 | 8,09 | 7,85 | 8,01 |
| SPOptPathI (Min) | 5,48 | 4,78 | 4,58 | 4,58 | 4,62 | 4,25 | 4,21 | 4,14 |
| SPOptPathI (Max) | 13,8 | 13,48 | 13,59 | 13,71 | 13,7 | 12,23 | 12,61 | 11,69 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 18,86 | 19,6 | 20,78 | 22,45 | 19,93 | 16,84 | 17,41 | 18,55 |
| SPOptEdgeI (Med) | 19,4 | 20,25 | 21,12 | 22,25 | 20,1 | 17,26 | 17,57 | 18,31 |
| SPOptEdgeI (Min) | 8,18 | 8,55 | 8,94 | 9,08 | 8,88 | 7,54 | 7,74 | 7,74 |
| SPOptEdgeI (Max) | 29,29 | 32,84 | 35,59 | 36,4 | 34,07 | 27,09 | 31,13 | 30,5 |
| MaxP (Avg) | 0,97 | 0,92 | 0,9 | 0,9 | 0,92 | 0,93 | 0,9 | 0,9 |
| MaxP (Med) | 0,98 | 0,94 | 0,92 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,92 | 0,92 |
| MaxP (Min) | 0,85 | 0,67 | 0,59 | 0,59 | 0,7 | 0,69 | 0,59 | 0,59 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,48 | 0,38 | 0,36 | 0,35 | 0,37 | 0,4 | 0,36 | 0,35 |
| AvgP (Med) | 0,48 | 0,38 | 0,36 | 0,35 | 0,37 | 0,4 | 0,36 | 0,35 |
| AvgP (Min) | 0,35 | 0,25 | 0,24 | 0,26 | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,26 |
| AvgP (Max) | 0,61 | 0,57 | 0,51 | 0,48 | 0,5 | 0,59 | 0,51 | 0,48 |
| SPOptP (Avg) | 3,7 | 3,43 | 3,52 | 4,06 | 3,69 | 3,36 | 3,52 | 4,06 |
| SPOptP (Med) | 3,78 | 3,49 | 3,62 | 4,12 | 3,79 | 3,43 | 3,62 | 4,12 |
| SPOptP (Min) | 1,47 | 1,16 | 1,17 | 1,17 | 1,25 | 1,15 | 1,17 | 1,17 |
| SPOptP (Max) | 5,64 | 5,28 | 5,55 | 7,03 | 6,11 | 5,2 | 5,55 | 7,03 |
| Links (Avg) | 23,01 | 1,1 | 20,17 | 19,97 | 1,37 | 1,52 | 1,33 | 1,68 |
| Links (Med) | 23 | 1 | 20 | 20 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 37 | 7 | 29 | 30 | 10 | 12 | 9 | 11 |

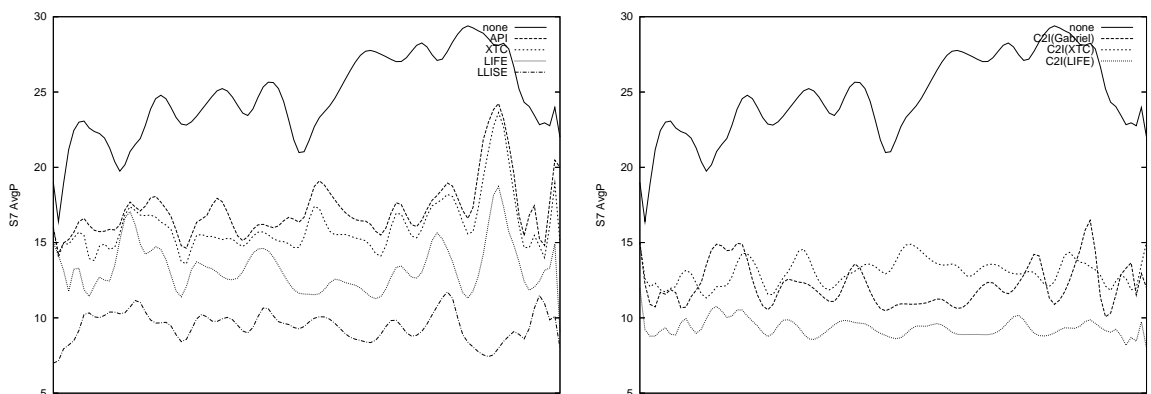
Tabulka 8.9: Scénář S7 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

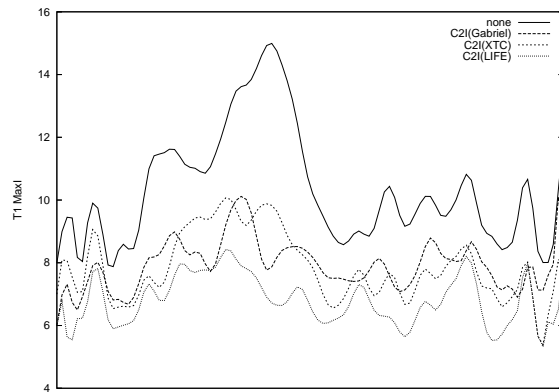
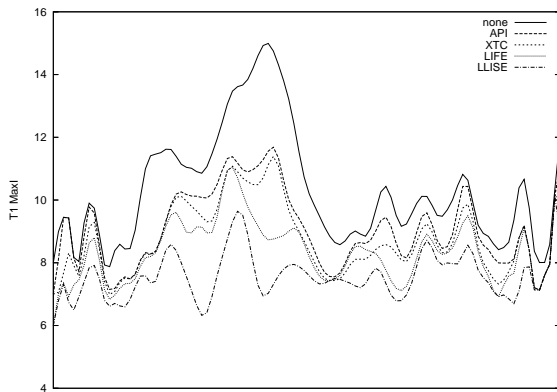


Průměrný vysílací výkon AvgP.

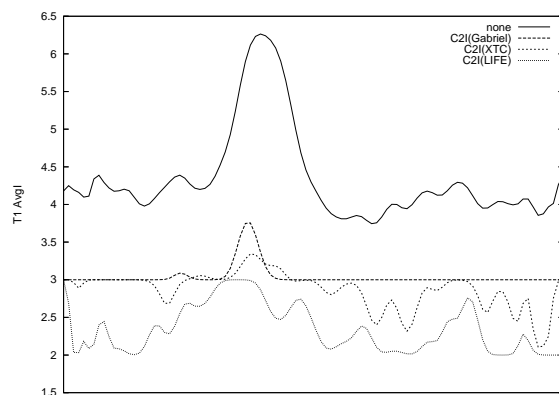
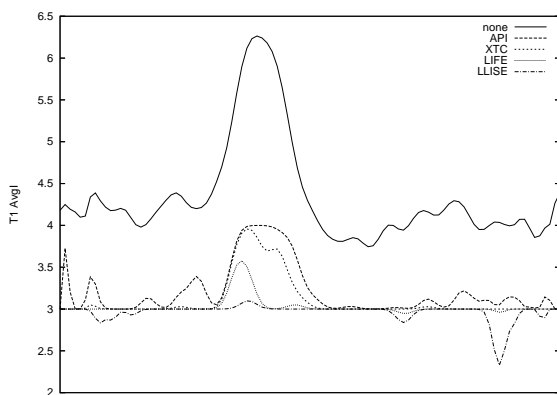
Obrázek 8.7: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S7).

| Scénář T1 5x5, 30 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 10,31 | 8,74 | 8,36 | 7,58 | 7,94 | 7,87 | 6,81 | 6,09 |
| MaxI (Med) | 10 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 7 | 6 |
| MaxI (Min) | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| MaxI (Max) | 16 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | 11 | 10 |
| AvgI (Avg) | 4,34 | 3,61 | 3,43 | 3,27 | 3,5 | 3,3 | 2,92 | 2,77 |
| AvgI (Med) | 4,17 | 3,55 | 3,4 | 3,26 | 3,48 | 3,25 | 2,885 | 2,76 |
| AvgI (Min) | 3,51 | 3 | 2,95 | 2,86 | 3 | 2,66 | 2,45 | 2,36 |
| AvgI (Max) | 6,46 | 4,6 | 4,34 | 4,04 | 4,59 | 4,37 | 3,75 | 3,47 |
| SPOptPathI (Avg) | 7,59 | 7,15 | 7,21 | 7,23 | 7,13 | 6,51 | 6,34 | 6,33 |
| SPOptPathI (Med) | 7,65 | 7,11 | 7,15 | 7,2 | 7,07 | 6,44 | 6,26 | 6,37 |
| SPOptPathI (Min) | 4,14 | 4,05 | 4,05 | 4,05 | 4,05 | 3,53 | 3,46 | 3,41 |
| SPOptPathI (Max) | 11,48 | 11,01 | 11,11 | 11 | 10,93 | 10,23 | 9,85 | 9,82 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 14,47 | 15,14 | 15,93 | 16,56 | 15,32 | 13,18 | 13,52 | 13,97 |
| SPOptEdgeI (Med) | 13,94 | 14,855 | 15,67 | 16,475 | 15,07 | 12,73 | 13,155 | 13,94 |
| SPOptEdgeI (Min) | 5,94 | 6,39 | 6,96 | 7,17 | 6,03 | 5,43 | 5,73 | 5,65 |
| SPOptEdgeI (Max) | 26,6 | 28,35 | 28,86 | 29,24 | 28,21 | 24,79 | 24,54 | 25,17 |
| MaxP (Avg) | 0,97 | 0,94 | 0,92 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,92 | 0,92 |
| MaxP (Med) | 0,98 | 0,95 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,94 | 0,94 |
| MaxP (Min) | 0,85 | 0,73 | 0,59 | 0,59 | 0,68 | 0,75 | 0,59 | 0,59 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,48 | 0,4 | 0,38 | 0,38 | 0,39 | 0,41 | 0,38 | 0,38 |
| AvgP (Med) | 0,48 | 0,4 | 0,38 | 0,38 | 0,4 | 0,41 | 0,38 | 0,38 |
| AvgP (Min) | 0,32 | 0,24 | 0,24 | 0,25 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,25 |
| AvgP (Max) | 0,63 | 0,58 | 0,56 | 0,55 | 0,57 | 0,61 | 0,56 | 0,55 |
| SPOptP (Avg) | 3,19 | 3,01 | 3,07 | 3,41 | 3,2 | 2,95 | 3,07 | 3,41 |
| SPOptP (Med) | 2,9 | 2,785 | 2,8 | 3,33 | 3 | 2,71 | 2,8 | 3,33 |
| SPOptP (Min) | 1,16 | 1,03 | 1,1 | 1,22 | 1,08 | 1,02 | 1,1 | 1,22 |
| SPOptP (Max) | 7,09 | 6,99 | 6,99 | 7,2 | 7,02 | 6,72 | 6,99 | 7,2 |
| Links (Avg) | 20,03 | 1,13 | 18,31 | 17,99 | 1,42 | 1,66 | 1,56 | 1,96 |
| Links (Med) | 20 | 1 | 19 | 18 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 31 | 6 | 28 | 28 | 8 | 13 | 14 | 12 |

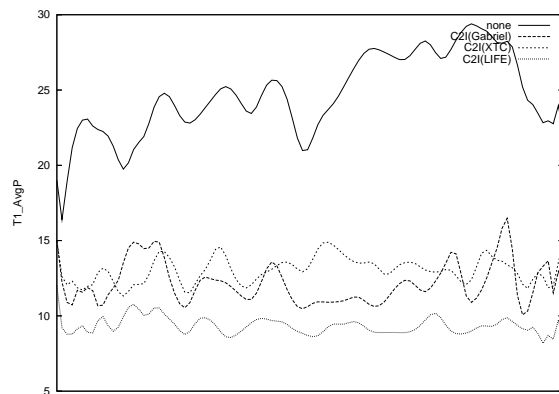
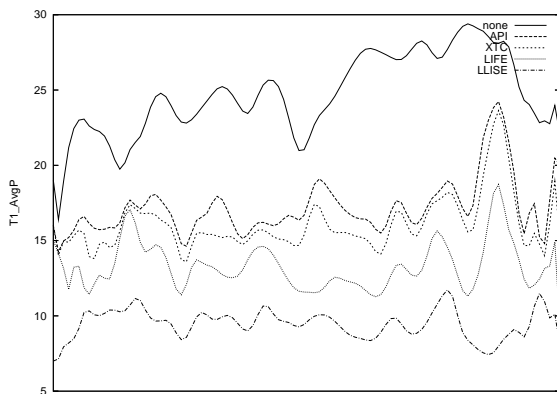
Tabulka 8.10: Scénář T1 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

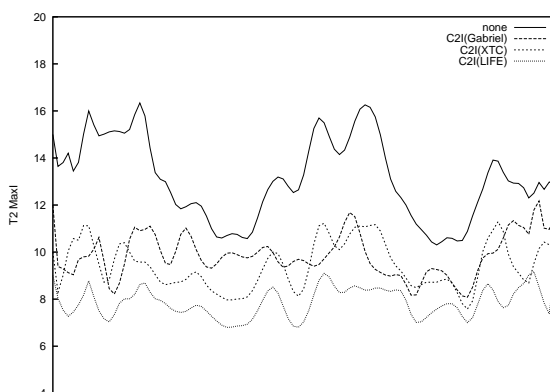
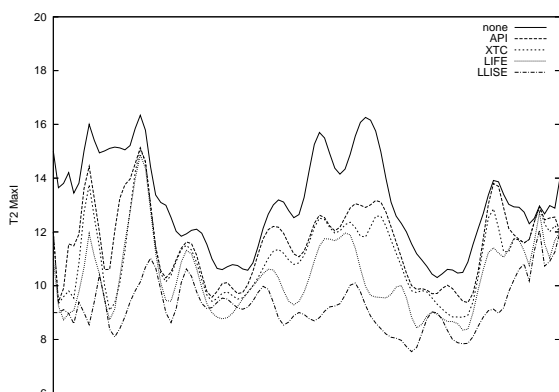


Průměrný vysílací výkon AvgP.

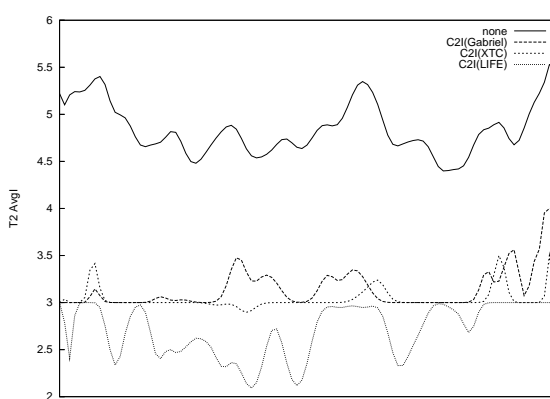
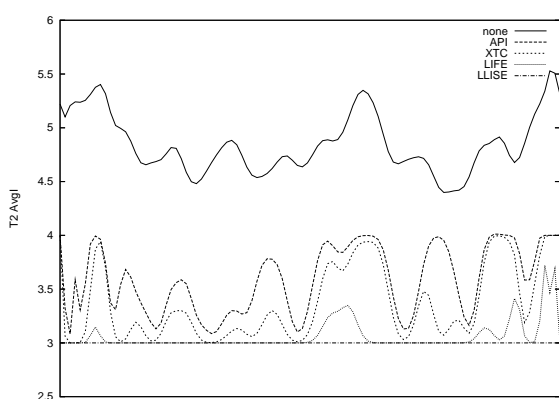
Obrázek 8.8: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T1).

| Scénář T2 5x5, 40 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 13,08 | 11,07 | 10,33 | 9,25 | 9,87 | 9,45 | 7,88 | 6,85 |
| MaxI (Med) | 13 | 11 | 10 | 9 | 10 | 9 | 8 | 7 |
| MaxI (Min) | 9 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 |
| MaxI (Max) | 19 | 19 | 18 | 16 | 17 | 14 | 13 | 12 |
| AvgI (Avg) | 4,85 | 3,91 | 3,66 | 3,45 | 3,78 | 3,51 | 3,09 | 2,90 |
| AvgI (Med) | 4,79 | 3,88 | 3,64 | 3,44 | 3,76 | 3,48 | 3,09 | 2,88 |
| AvgI (Min) | 4,23 | 3,29 | 3,22 | 3,06 | 3,16 | 2,92 | 2,64 | 2,50 |
| AvgI (Max) | 5,65 | 4,54 | 4,15 | 3,97 | 4,79 | 4,19 | 3,63 | 3,46 |
| SPOptPathI (Avg) | 10,51 | 9,92 | 9,99 | 10,32 | 9,89 | 8,84 | 8,69 | 8,99 |
| SPOptPathI (Med) | 10,42 | 9,89 | 10,02 | 10,38 | 9,87 | 8,85 | 8,68 | 8,87 |
| SPOptPathI (Min) | 6,15 | 5,67 | 5,62 | 5,59 | 5,63 | 4,60 | 4,69 | 4,59 |
| SPOptPathI (Max) | 16,10 | 14,94 | 15,40 | 15,52 | 14,81 | 14,10 | 14,06 | 14,30 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 21,41 | 22,51 | 24,00 | 25,88 | 22,75 | 18,99 | 19,89 | 21,25 |
| SPOptEdgeI (Med) | 20,94 | 21,62 | 23,17 | 25,80 | 22,14 | 18,41 | 19,25 | 20,99 |
| SPOptEdgeI (Min) | 9,43 | 10,32 | 10,86 | 11,06 | 10,05 | 8,07 | 8,66 | 8,71 |
| SPOptEdgeI (Max) | 36,83 | 39,11 | 40,99 | 44,41 | 40,22 | 32,79 | 36,98 | 38,48 |
| MaxP (Avg) | 0,98 | 0,95 | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,93 | 0,93 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,96 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 0,94 | 0,94 |
| MaxP (Min) | 0,84 | 0,75 | 0,66 | 0,69 | 0,78 | 0,76 | 0,66 | 0,69 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,47 | 0,37 | 0,34 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | 0,34 | 0,34 |
| AvgP (Med) | 0,47 | 0,37 | 0,34 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | 0,34 | 0,34 |
| AvgP (Min) | 0,39 | 0,25 | 0,23 | 0,22 | 0,25 | 0,27 | 0,23 | 0,22 |
| AvgP (Max) | 0,55 | 0,50 | 0,45 | 0,45 | 0,50 | 0,51 | 0,45 | 0,45 |
| SPOptP (Avg) | 4,12 | 3,83 | 3,95 | 4,60 | 4,16 | 3,77 | 3,95 | 4,60 |
| SPOptP (Med) | 3,86 | 3,61 | 3,71 | 4,36 | 3,95 | 3,53 | 3,71 | 4,36 |
| SPOptP (Min) | 1,67 | 1,53 | 1,57 | 1,63 | 1,64 | 1,48 | 1,57 | 1,63 |
| SPOptP (Max) | 8,01 | 7,67 | 7,80 | 8,95 | 8,14 | 7,49 | 7,80 | 8,95 |
| Links (Avg) | 35,62 | 1,96 | 30,38 | 29,77 | 2,57 | 2,55 | 2,23 | 2,92 |
| Links (Med) | 36 | 2 | 30 | 30 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 48 | 8 | 42 | 40 | 13 | 19 | 18 | 18 |

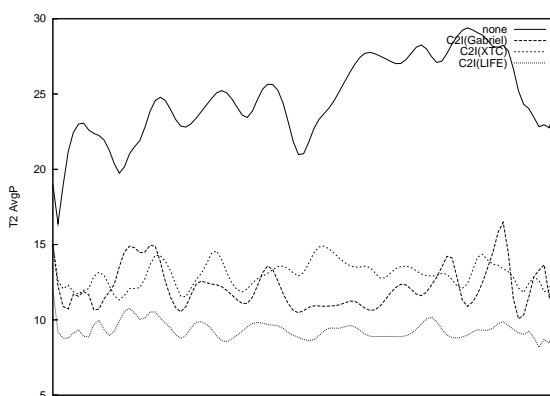
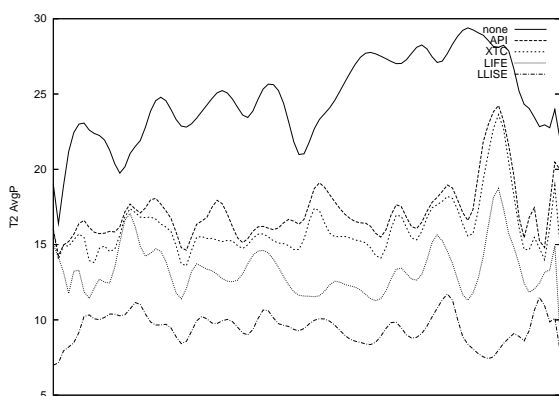
Tabulka 8.11: Scénář T2 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

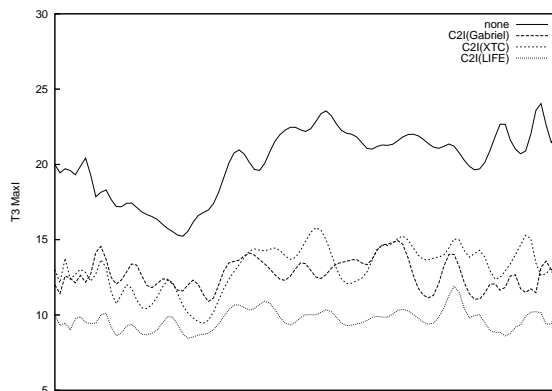
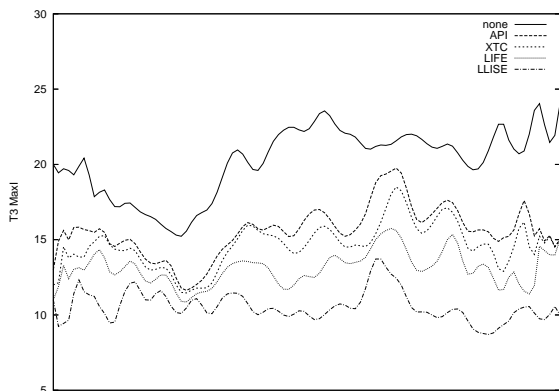


Průměrný vysílací výkon AvgP.

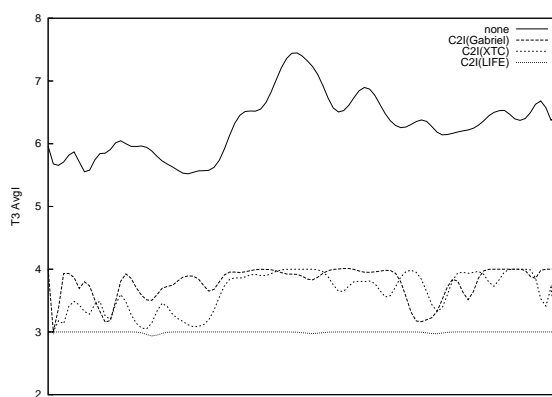
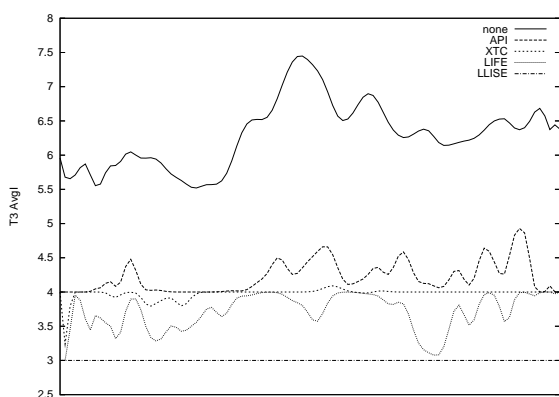
Obrázek 8.9: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T2).

| Scénář T3 5x5, 50 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 20,18 | 14,64 | 13,09 | 10,58 | 12,70 | 13,07 | 9,69 | 7,46 |
| MaxI (Med) | 21,00 | 14,00 | 13,00 | 10,00 | 12,00 | 13,00 | 10,00 | 7,00 |
| MaxI (Min) | 14,00 | 9,00 | 9,00 | 7,00 | 8,00 | 7,00 | 7,00 | 5,00 |
| MaxI (Max) | 27,00 | 21,00 | 20,00 | 18,00 | 19,00 | 19,00 | 17,00 | 11,00 |
| AvgI (Avg) | 6,29 | 4,47 | 4,09 | 3,64 | 4,18 | 4,10 | 3,36 | 3,00 |
| AvgI (Med) | 6,30 | 4,50 | 4,09 | 3,63 | 4,18 | 4,10 | 3,36 | 2,97 |
| AvgI (Min) | 5,31 | 3,74 | 3,62 | 3,29 | 3,59 | 3,27 | 2,85 | 2,71 |
| AvgI (Max) | 7,79 | 5,14 | 4,65 | 3,97 | 5,02 | 4,90 | 3,94 | 3,48 |
| SPOptPathI (Avg) | 14,94 | 13,52 | 13,61 | 14,99 | 13,60 | 12,22 | 11,74 | 13,06 |
| SPOptPathI (Med) | 14,92 | 13,65 | 13,67 | 15,32 | 13,68 | 12,31 | 11,63 | 13,28 |
| SPOptPathI (Min) | 9,31 | 8,02 | 8,11 | 8,31 | 8,11 | 6,98 | 6,90 | 6,80 |
| SPOptPathI (Max) | 18,90 | 17,92 | 18,07 | 19,04 | 18,09 | 16,30 | 15,76 | 17,82 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 30,22 | 30,88 | 33,09 | 39,44 | 31,59 | 26,46 | 27,14 | 31,94 |
| SPOptEdgeI (Med) | 30,26 | 30,42 | 32,35 | 40,01 | 31,18 | 26,54 | 26,63 | 32,20 |
| SPOptEdgeI (Min) | 16,25 | 17,37 | 17,96 | 18,72 | 17,08 | 14,19 | 14,67 | 14,89 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,35 | 46,51 | 50,37 | 54,85 | 45,80 | 39,08 | 40,80 | 45,95 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,95 | 0,93 | 0,91 | 0,94 | 0,96 | 0,93 | 0,91 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,97 | 0,95 | 0,93 | 0,96 | 0,97 | 0,95 | 0,93 |
| MaxP (Min) | 0,93 | 0,71 | 0,69 | 0,61 | 0,69 | 0,72 | 0,69 | 0,61 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,48 | 0,34 | 0,31 | 0,29 | 0,32 | 0,36 | 0,31 | 0,29 |
| AvgP (Med) | 0,48 | 0,34 | 0,31 | 0,29 | 0,32 | 0,36 | 0,31 | 0,29 |
| AvgP (Min) | 0,41 | 0,25 | 0,23 | 0,21 | 0,24 | 0,27 | 0,23 | 0,21 |
| AvgP (Max) | 0,54 | 0,43 | 0,39 | 0,37 | 0,41 | 0,45 | 0,39 | 0,37 |
| SPOptP (Avg) | 4,65 | 4,14 | 4,25 | 5,68 | 4,54 | 4,06 | 4,25 | 5,68 |
| SPOptP (Med) | 4,63 | 4,11 | 4,22 | 5,63 | 4,54 | 4,00 | 4,22 | 5,63 |
| SPOptP (Min) | 2,45 | 2,07 | 2,08 | 2,43 | 2,19 | 2,01 | 2,08 | 2,43 |
| SPOptP (Max) | 7,47 | 6,72 | 6,74 | 8,90 | 7,05 | 6,69 | 6,74 | 8,90 |
| Links (Avg) | 49,06 | 3,60 | 41,08 | 40,40 | 4,92 | 4,25 | 3,48 | 4,63 |
| Links (Med) | 49,00 | 3,00 | 41,00 | 40,00 | 4,00 | 4,00 | 3,00 | 4,00 |
| Links (Min) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Links (Max) | 67,00 | 12,00 | 54,00 | 53,00 | 18,00 | 20,00 | 18,00 | 18,00 |

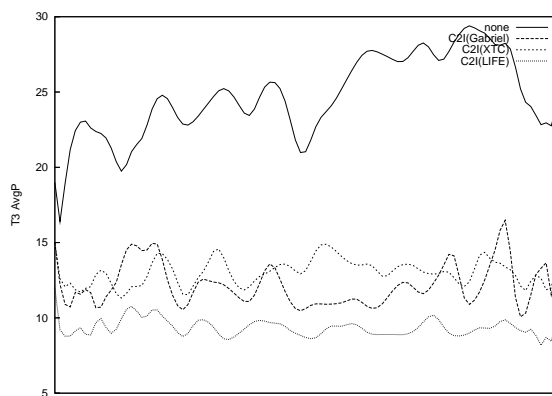
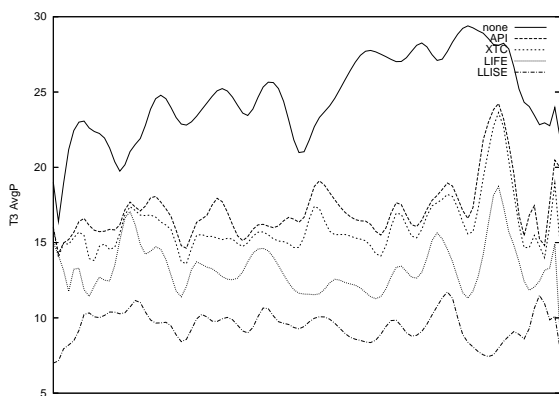
Tabulka 8.12: Scénář T3 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

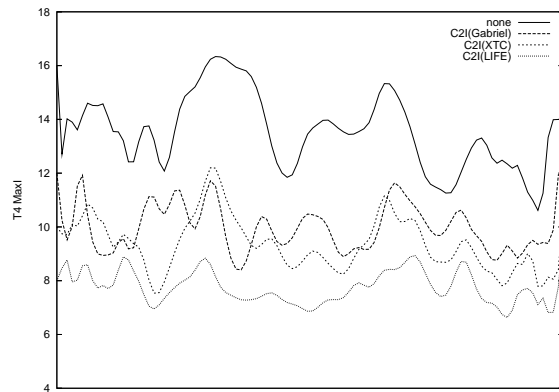
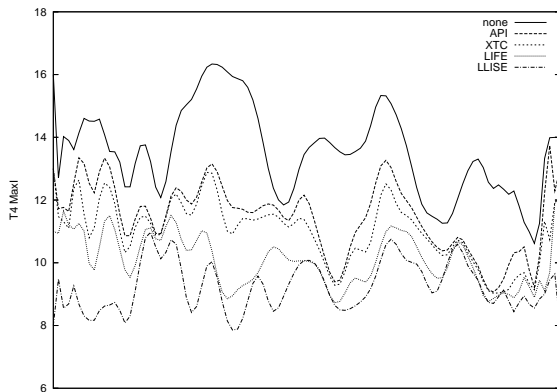


Průměrný vysílací výkon AvgP.

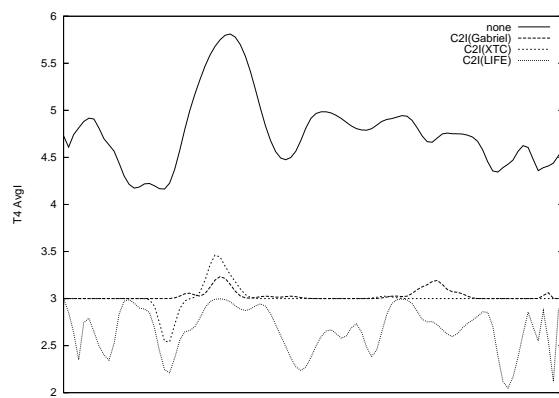
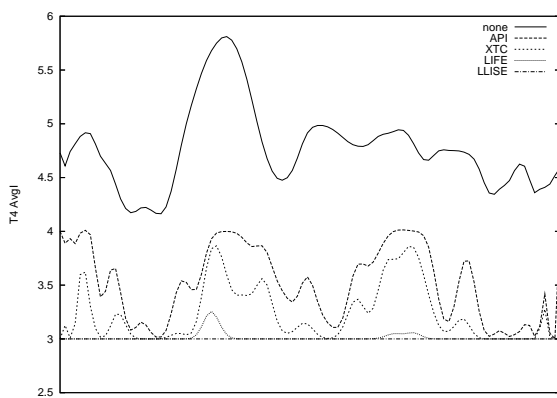
Obrázek 8.10: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T3).

| Scénář T4 6x6, 50 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 13,54 | 10,99 | 10,09 | 9,25 | 9,98 | 9,36 | 7,76 | 6,80 |
| MaxI (Med) | 14,00 | 11,00 | 10,00 | 9,00 | 10,00 | 9,00 | 8,00 | 7,00 |
| MaxI (Min) | 9,00 | 8,00 | 7,00 | 6,00 | 7,00 | 6,00 | 5,00 | 5,00 |
| MaxI (Max) | 18,00 | 15,00 | 14,00 | 14,00 | 15,00 | 15,00 | 12,00 | 11,00 |
| AvgI (Avg) | 4,77 | 3,84 | 3,61 | 3,42 | 3,69 | 3,47 | 3,05 | 2,88 |
| AvgI (Med) | 4,73 | 3,83 | 3,58 | 3,42 | 3,70 | 3,44 | 3,04 | 2,86 |
| AvgI (Min) | 4,04 | 3,21 | 3,05 | 3,02 | 3,27 | 2,82 | 2,71 | 2,59 |
| AvgI (Max) | 5,98 | 4,38 | 4,08 | 3,79 | 4,21 | 4,19 | 3,63 | 3,33 |
| SPOptPathI (Avg) | 10,96 | 10,35 | 10,44 | 10,62 | 10,37 | 9,35 | 9,13 | 9,26 |
| SPOptPathI (Med) | 10,98 | 10,36 | 10,44 | 10,65 | 10,41 | 9,46 | 9,16 | 9,30 |
| SPOptPathI (Min) | 6,01 | 5,74 | 5,66 | 5,74 | 5,54 | 4,80 | 4,99 | 4,80 |
| SPOptPathI (Max) | 18,33 | 16,99 | 17,17 | 18,39 | 17,87 | 16,19 | 15,67 | 16,76 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 23,12 | 24,17 | 25,46 | 26,88 | 24,33 | 20,63 | 21,19 | 22,07 |
| SPOptEdgeI (Med) | 23,08 | 24,06 | 25,15 | 26,68 | 24,05 | 20,78 | 21,17 | 21,97 |
| SPOptEdgeI (Min) | 9,76 | 10,40 | 11,27 | 11,67 | 10,72 | 8,14 | 9,24 | 8,98 |
| SPOptEdgeI (Max) | 45,96 | 44,54 | 47,11 | 53,53 | 47,77 | 40,05 | 40,98 | 44,51 |
| MaxP (Avg) | 0,98 | 0,96 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,94 | 0,95 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,96 | 0,96 |
| MaxP (Min) | 0,91 | 0,80 | 0,77 | 0,73 | 0,79 | 0,83 | 0,77 | 0,73 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,48 | 0,38 | 0,35 | 0,35 | 0,37 | 0,39 | 0,35 | 0,35 |
| AvgP (Med) | 0,48 | 0,38 | 0,35 | 0,35 | 0,37 | 0,39 | 0,35 | 0,35 |
| AvgP (Min) | 0,39 | 0,27 | 0,26 | 0,27 | 0,29 | 0,28 | 0,26 | 0,27 |
| AvgP (Max) | 0,57 | 0,51 | 0,47 | 0,48 | 0,50 | 0,53 | 0,47 | 0,48 |
| SPOptP (Avg) | 4,61 | 4,30 | 4,38 | 4,93 | 4,58 | 4,22 | 4,38 | 4,93 |
| SPOptP (Med) | 4,59 | 4,20 | 4,25 | 4,74 | 4,39 | 4,16 | 4,25 | 4,74 |
| SPOptP (Min) | 1,70 | 1,53 | 1,56 | 1,78 | 1,66 | 1,52 | 1,56 | 1,78 |
| SPOptP (Max) | 9,13 | 8,99 | 9,60 | 10,21 | 10,06 | 8,63 | 9,60 | 10,21 |
| Links (Avg) | 43,76 | 2,42 | 37,27 | 36,72 | 3,10 | 3,35 | 2,95 | 3,80 |
| Links (Med) | 44,00 | 2,00 | 37,00 | 37,00 | 3,00 | 3,00 | 2,00 | 3,00 |
| Links (Min) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Links (Max) | 61,00 | 11,00 | 49,00 | 50,00 | 14,00 | 36,00 | 22,00 | 22,00 |

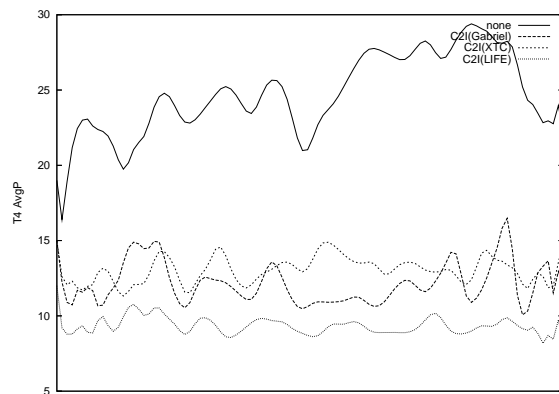
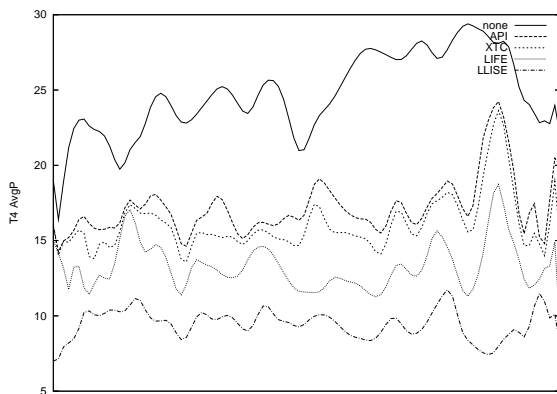
Tabulka 8.13: Scénář T4 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

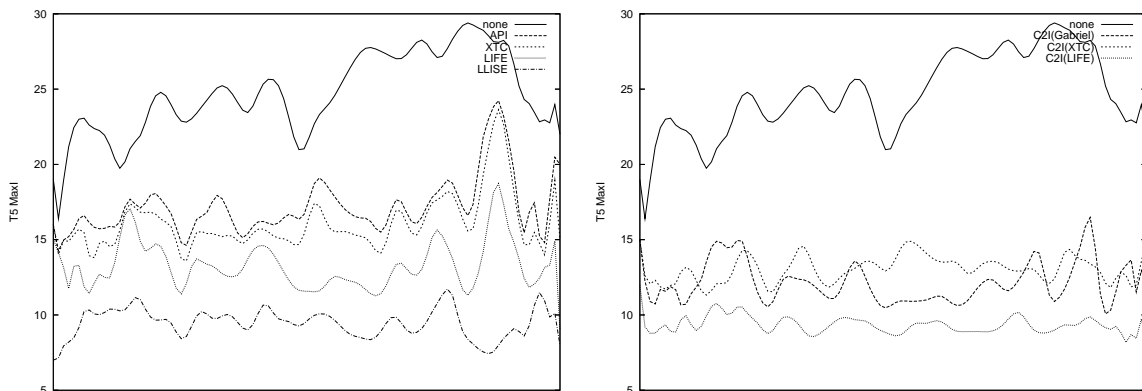


Průměrný vysílací výkon AvgP.

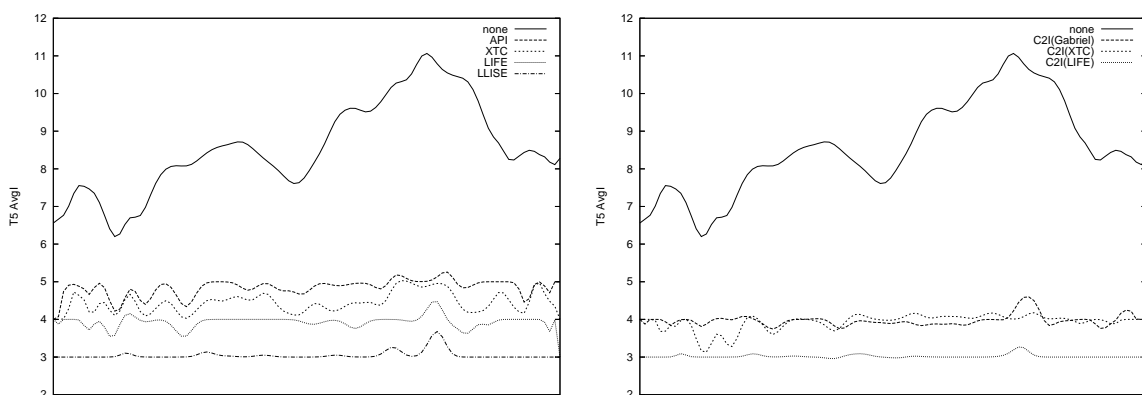
Obrázek 8.11: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T4).

| Scénář T5 3x3, 30 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 24,72 | 16,08 | 13,31 | 9,49 | 12,17 | 13,03 | 9,34 | 6,91 |
| MaxI (Med) | 25 | 16 | 13 | 9 | 12 | 13 | 9 | 7 |
| MaxI (Min) | 14 | 9 | 8 | 6 | 8 | 8 | 7 | 5 |
| MaxI (Max) | 30 | 26 | 22 | 14 | 22 | 19 | 15 | 10 |
| AvgI (Avg) | 8,58 | 4,95 | 4,3 | 3,67 | 4,38 | 4,43 | 3,51 | 3,04 |
| AvgI (Med) | 8,41 | 4,95 | 4,27 | 3,65 | 4,33 | 4,45 | 3,5 | 3,03 |
| AvgI (Min) | 5,82 | 3,89 | 3,65 | 3,27 | 3,71 | 3,09 | 2,96 | 2,6 |
| AvgI (Max) | 11,48 | 6,12 | 5,38 | 4,55 | 5,49 | 5,31 | 4,25 | 3,48 |
| SPOptPathI (Avg) | 13,95 | 11,16 | 11,05 | 11,98 | 11,15 | 9,74 | 9,29 | 10,47 |
| SPOptPathI (Med) | 14,02 | 11,12 | 11,02 | 12 | 11,04 | 9,68 | 9,26 | 10,49 |
| SPOptPathI (Min) | 11,73 | 9,34 | 9,18 | 10,05 | 9,08 | 8,2 | 7,81 | 8,59 |
| SPOptPathI (Max) | 16,34 | 13,19 | 13,3 | 14,81 | 13,81 | 11,73 | 11,63 | 13,17 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 22,68 | 22,23 | 24,22 | 29,69 | 23,32 | 18,54 | 19,66 | 24,15 |
| SPOptEdgeI (Med) | 22,7 | 22,24 | 24,27 | 29,62 | 23,13 | 18,4 | 19,59 | 24,06 |
| SPOptEdgeI (Min) | 19,98 | 17,77 | 19,04 | 22,89 | 18,12 | 15,14 | 15,72 | 17,91 |
| SPOptEdgeI (Max) | 27,02 | 28,59 | 31,41 | 39,8 | 30,5 | 24,43 | 26,15 | 31,7 |
| MaxP (Avg) | 0,98 | 0,87 | 0,79 | 0,71 | 0,78 | 0,89 | 0,79 | 0,71 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,9 | 0,81 | 0,71 | 0,81 | 0,92 | 0,81 | 0,71 |
| MaxP (Min) | 0,94 | 0,44 | 0,36 | 0,31 | 0,4 | 0,44 | 0,36 | 0,31 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,46 | 0,24 | 0,2 | 0,18 | 0,21 | 0,26 | 0,2 | 0,18 |
| AvgP (Med) | 0,46 | 0,24 | 0,19 | 0,17 | 0,21 | 0,25 | 0,19 | 0,17 |
| AvgP (Min) | 0,37 | 0,16 | 0,13 | 0,12 | 0,13 | 0,16 | 0,13 | 0,12 |
| AvgP (Max) | 0,53 | 0,36 | 0,3 | 0,26 | 0,33 | 0,39 | 0,3 | 0,26 |
| Links (Avg) | 35,24 | 3,28 | 27,31 | 25,3 | 3,99 | 3,48 | 2,75 | 3,22 |
| Links (Med) | 35 | 3 | 27 | 26 | 4 | 3 | 2 | 3 |
| Links (Min) | 21 | 0 | 18 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 52 | 12 | 36 | 34 | 16 | 15 | 12 | 16 |

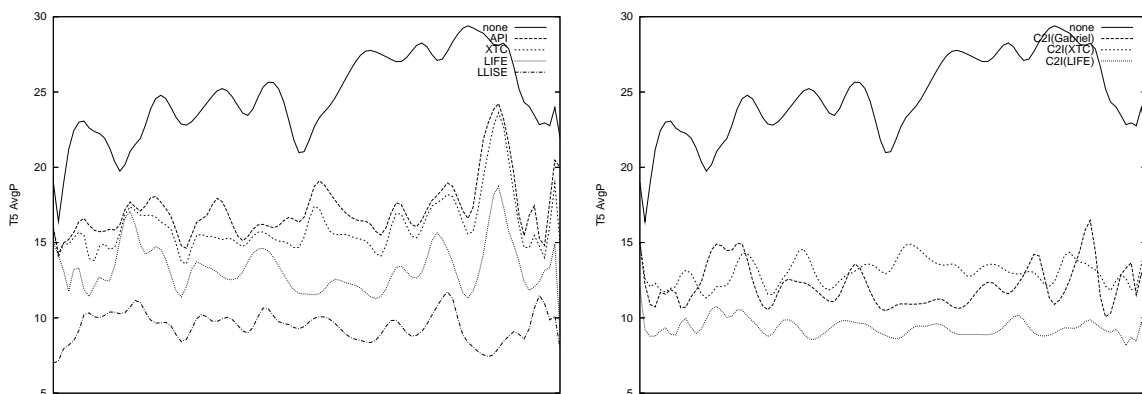
Tabulka 8.14: Scénář T5 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

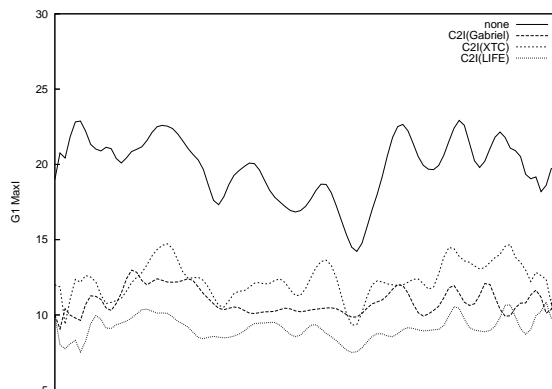
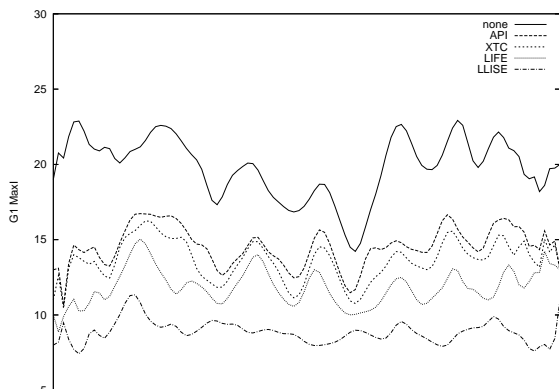


Průměrný vysílací výkon AvgP.

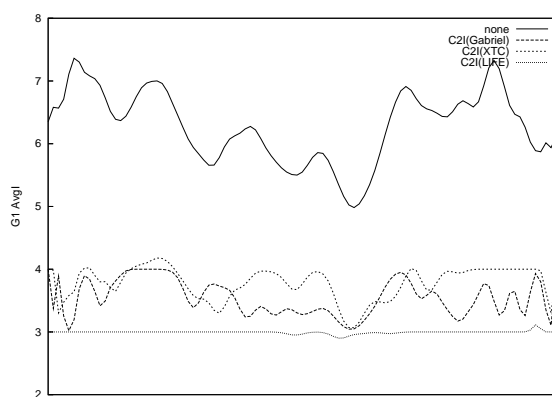
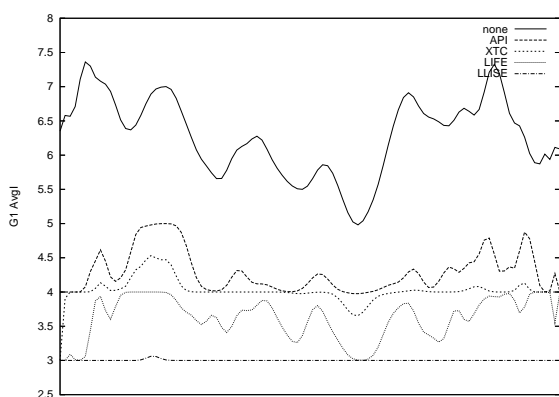
Obrázek 8.12: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T5).

| Scénář G1 4x4, 30 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 19,85 | 13,64 | 11,86 | 8,88 | 10,92 | 12,34 | 9,13 | 6,85 |
| MaxI (Med) | 20 | 14 | 12 | 9 | 11 | 12 | 9 | 7 |
| MaxI (Min) | 12 | 9 | 8 | 6 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| MaxI (Max) | 27 | 19 | 17 | 13 | 17 | 19 | 13 | 10 |
| AvgI (Avg) | 6,29 | 4,51 | 4,08 | 3,53 | 4,02 | 4,25 | 3,44 | 2,98 |
| AvgI (Med) | 6,39 | 4,50 | 4,06 | 3,51 | 4,02 | 4,25 | 3,42 | 2,94 |
| AvgI (Min) | 4,63 | 3,72 | 3,51 | 3,15 | 3,40 | 3,30 | 2,84 | 2,62 |
| AvgI (Max) | 7,66 | 5,46 | 4,84 | 4,03 | 4,62 | 5,18 | 4,07 | 3,64 |
| SPOptPathI (Avg) | 11,89 | 10,44 | 10,48 | 11,62 | 10,38 | 9,62 | 9,14 | 10,25 |
| SPOptPathI (Med) | 11,88 | 10,39 | 10,43 | 11,57 | 10,34 | 9,59 | 9,11 | 10,22 |
| SPOptPathI (Min) | 10,11 | 8,50 | 8,48 | 9,21 | 8,23 | 8,10 | 7,51 | 7,63 |
| SPOptPathI (Max) | 13,93 | 12,69 | 12,55 | 14,55 | 12,94 | 11,09 | 11,03 | 12,99 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 22,45 | 22,16 | 23,57 | 29,35 | 22,92 | 19,53 | 19,94 | 24,53 |
| SPOptEdgeI (Med) | 22,30 | 21,95 | 23,55 | 29,22 | 22,74 | 19,45 | 19,92 | 24,26 |
| SPOptEdgeI (Min) | 17,00 | 16,63 | 17,40 | 20,25 | 16,53 | 15,14 | 15,03 | 15,42 |
| SPOptEdgeI (Max) | 27,56 | 28,15 | 30,43 | 38,81 | 29,43 | 23,87 | 27,04 | 36,68 |
| MaxP (Avg) | 0,98 | 0,95 | 0,92 | 0,91 | 0,93 | 0,96 | 0,92 | 0,91 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,96 | 0,94 | 0,92 | 0,95 | 0,97 | 0,94 | 0,92 |
| MaxP (Min) | 0,92 | 0,73 | 0,67 | 0,61 | 0,65 | 0,74 | 0,67 | 0,61 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,54 | 0,41 | 0,37 | 0,35 | 0,37 | 0,43 | 0,37 | 0,35 |
| AvgP (Med) | 0,54 | 0,40 | 0,37 | 0,34 | 0,37 | 0,43 | 0,37 | 0,34 |
| AvgP (Min) | 0,48 | 0,30 | 0,28 | 0,26 | 0,27 | 0,33 | 0,28 | 0,26 |
| AvgP (Max) | 0,61 | 0,54 | 0,50 | 0,47 | 0,48 | 0,56 | 0,50 | 0,47 |
| SPOptP (Avg) | 3,66 | 3,31 | 3,41 | 4,76 | 3,66 | 3,25 | 3,41 | 4,76 |
| SPOptP (Med) | 3,68 | 3,33 | 3,42 | 4,59 | 3,69 | 3,26 | 3,42 | 4,59 |
| SPOptP (Min) | 2,51 | 2,18 | 2,20 | 2,67 | 2,33 | 2,13 | 2,20 | 2,67 |
| SPOptP (Max) | 4,76 | 4,33 | 4,67 | 8,26 | 5,20 | 4,14 | 4,67 | 8,26 |
| Links (Avg) | 34,98 | 2,48 | 28,96 | 26,73 | 3,09 | 2,94 | 2,45 | 3,18 |
| Links (Med) | 35 | 2 | 29 | 27 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 52 | 13 | 41 | 36 | 13 | 16 | 15 | 17 |

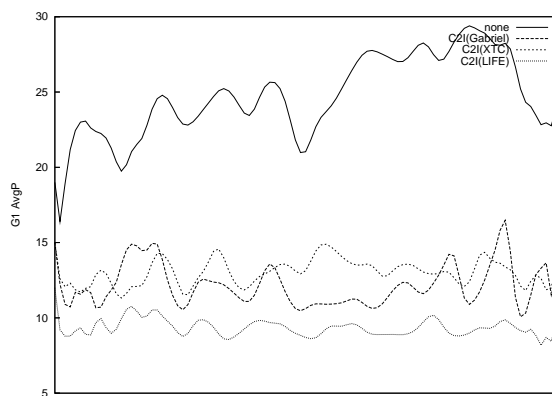
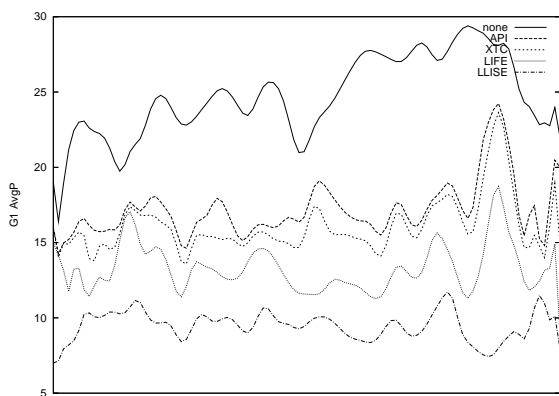
Tabulka 8.15: Scénář G1 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

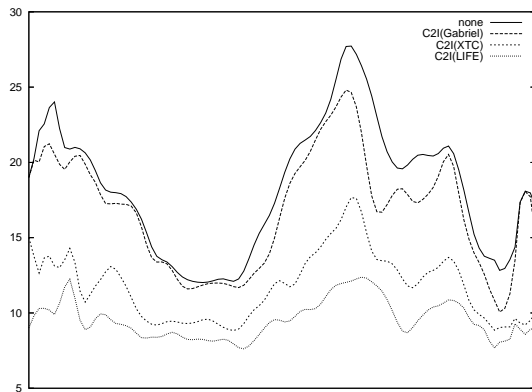
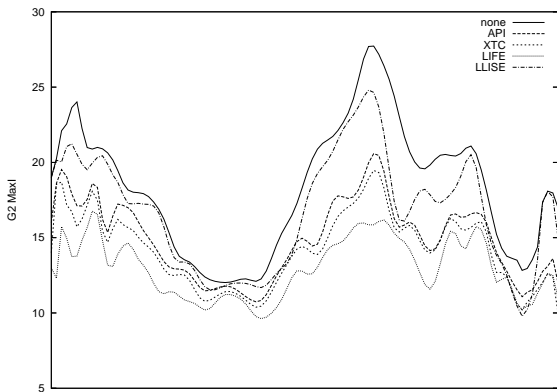


Průměrný vysílací výkon AvgP.

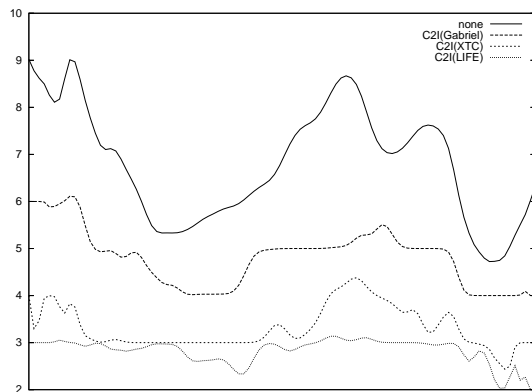
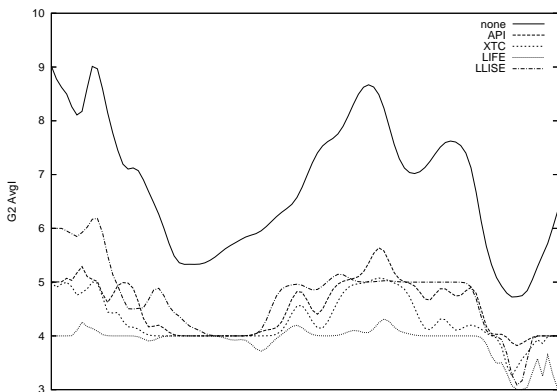
Obrázek 8.13: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G1).

| Scénář G2 6x6, 35 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 18,31 | 14,25 | 12,99 | 16,73 | 16,79 | 11,76 | 9,59 | 9,11 |
| MaxI (Med) | 18 | 14 | 13 | 17 | 17 | 11 | 9 | 9 |
| MaxI (Min) | 10 | 9 | 8 | 9 | 9 | 7 | 6 | 6 |
| MaxI (Max) | 30 | 23 | 22 | 28 | 28 | 21 | 15 | 20 |
| AvgI (Avg) | 6,79 | 4,78 | 4,39 | 5,22 | 5,32 | 3,78 | 3,24 | 3,16 |
| AvgI (Med) | 6,94 | 4,75 | 4,35 | 5,18 | 5,23 | 3,73 | 3,20 | 3,10 |
| AvgI (Min) | 4,62 | 3,74 | 3,62 | 3,84 | 4,00 | 2,71 | 2,57 | 2,47 |
| AvgI (Max) | 9,36 | 6,11 | 5,39 | 7,16 | 7,13 | 5,57 | 4,27 | 4,59 |
| SPOptPathI (Avg) | 13,18 | 11,85 | 11,91 | 12,03 | 11,85 | 10,12 | 9,98 | 10,20 |
| SPOptPathI (Med) | 13,51 | 12,31 | 12,29 | 12,33 | 12,26 | 10,46 | 10,11 | 10,50 |
| SPOptPathI (Min) | 6,88 | 6,16 | 6,08 | 6,12 | 6,14 | 5,05 | 4,90 | 4,94 |
| SPOptPathI (Max) | 19,77 | 17,90 | 18,00 | 18,08 | 17,89 | 15,98 | 15,32 | 16,08 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 24,50 | 25,18 | 26,75 | 28,54 | 25,68 | 19,95 | 20,85 | 22,21 |
| SPOptEdgeI (Med) | 24,87 | 25,95 | 27,15 | 29,46 | 26,28 | 20,76 | 21,77 | 22,49 |
| SPOptEdgeI (Min) | 9,56 | 10,27 | 11,21 | 11,25 | 10,65 | 7,79 | 8,50 | 9,27 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,47 | 42,27 | 44,35 | 50,32 | 42,45 | 34,30 | 35,72 | 38,94 |
| MaxP (Avg) | 0,98 | 0,91 | 0,87 | 0,87 | 0,90 | 0,92 | 0,87 | 0,87 |
| MaxP (Med) | 0,98 | 0,94 | 0,90 | 0,90 | 0,92 | 0,94 | 0,90 | 0,90 |
| MaxP (Min) | 0,89 | 0,63 | 0,51 | 0,41 | 0,41 | 0,65 | 0,51 | 0,41 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,45 | 0,31 | 0,28 | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,28 | 0,27 |
| AvgP (Med) | 0,45 | 0,31 | 0,28 | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,28 | 0,27 |
| AvgP (Min) | 0,36 | 0,20 | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,20 | 0,18 | 0,18 |
| AvgP (Max) | 0,53 | 0,44 | 0,41 | 0,40 | 0,43 | 0,45 | 0,41 | 0,40 |
| SPOptP (Avg) | 3,46 | 3,04 | 3,10 | 3,54 | 3,33 | 3,00 | 3,10 | 3,54 |
| SPOptP (Med) | 3,53 | 3,08 | 3,12 | 3,59 | 3,38 | 3,04 | 3,12 | 3,59 |
| SPOptP (Min) | 1,38 | 1,21 | 1,23 | 1,36 | 1,31 | 1,16 | 1,23 | 1,36 |
| SPOptP (Max) | 6,56 | 5,97 | 5,90 | 6,66 | 6,54 | 5,97 | 5,90 | 6,66 |
| Links (Avg) | 36,52 | 2,49 | 29,99 | 29,24 | 3,50 | 2,92 | 2,42 | 3,41 |
| Links (Med) | 37 | 2 | 30 | 29 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 48 | 12 | 40 | 38 | 13 | 14 | 11 | 14 |

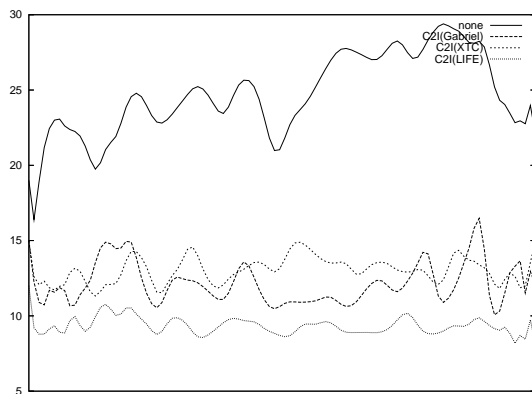
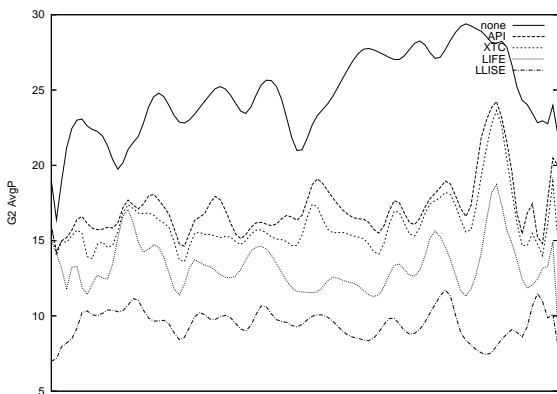
Tabulka 8.16: Scénář G2 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

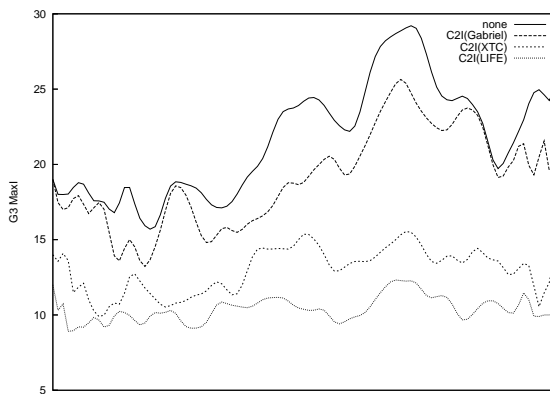
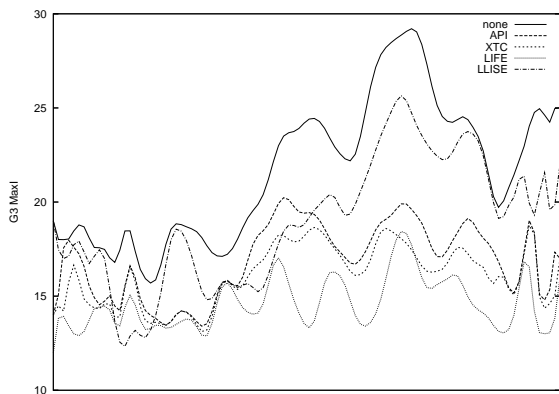


Průměrný vysílací výkon AvgP.

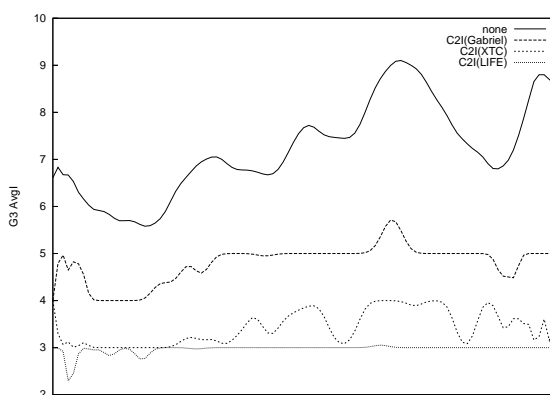
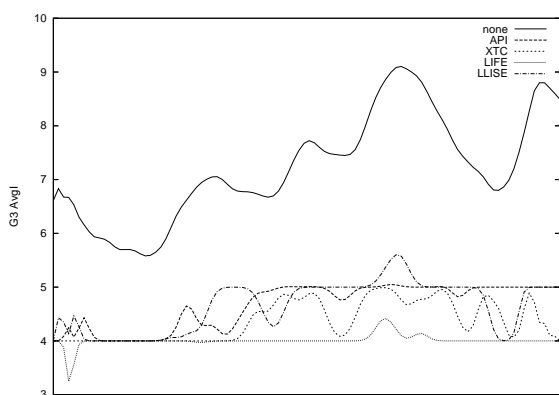
Obrázek 8.14: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G2).

| Scénář G3 6x6, 45 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 21,67 | 16,08 | 14,62 | 18,91 | 19,06 | 12,97 | 10,38 | 9,72 |
| MaxI (Med) | 22 | 16 | 14 | 19 | 19 | 13 | 10 | 10 |
| MaxI (Min) | 15 | 10 | 10 | 10 | 12 | 8 | 7 | 6 |
| MaxI (Max) | 30 | 24 | 21 | 29 | 29 | 20 | 16 | 16 |
| AvgI (Avg) | 7,22 | 4,89 | 4,49 | 5,15 | 5,29 | 3,90 | 3,37 | 3,15 |
| AvgI (Med) | 7,08 | 4,88 | 4,49 | 5,13 | 5,27 | 3,92 | 3,38 | 3,08 |
| AvgI (Min) | 5,44 | 4,17 | 3,81 | 4,31 | 4,45 | 3,13 | 2,91 | 2,56 |
| AvgI (Max) | 9,36 | 5,87 | 5,26 | 6,25 | 6,21 | 4,62 | 4,01 | 4,11 |
| SPOptPathI (Avg) | 15,28 | 13,52 | 13,60 | 14,00 | 13,54 | 11,58 | 11,54 | 12,11 |
| SPOptPathI (Med) | 15,70 | 13,35 | 13,36 | 13,83 | 13,28 | 11,49 | 11,31 | 12,01 |
| SPOptPathI (Min) | 8,96 | 8,14 | 8,05 | 8,06 | 8,00 | 6,63 | 6,59 | 6,85 |
| SPOptPathI (Max) | 20,51 | 18,08 | 18,30 | 18,25 | 18,03 | 16,15 | 16,00 | 16,26 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 29,37 | 30,63 | 32,88 | 35,68 | 31,13 | 23,53 | 25,28 | 27,60 |
| SPOptEdgeI (Med) | 29,12 | 29,27 | 30,79 | 34,73 | 29,78 | 22,78 | 24,47 | 26,90 |
| SPOptEdgeI (Min) | 14,74 | 15,91 | 16,65 | 17,87 | 15,64 | 11,66 | 12,25 | 13,65 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,60 | 45,44 | 50,62 | 51,47 | 46,98 | 34,81 | 38,53 | 41,30 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,93 | 0,91 | 0,90 | 0,91 | 0,93 | 0,91 | 0,90 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,94 | 0,91 | 0,91 | 0,93 | 0,95 | 0,91 | 0,91 |
| MaxP (Min) | 0,99 | 0,74 | 0,74 | 0,68 | 0,68 | 0,74 | 0,74 | 0,68 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,44 | 0,29 | 0,26 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,26 | 0,26 |
| AvgP (Med) | 0,44 | 0,30 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,30 | 0,26 | 0,26 |
| AvgP (Min) | 0,37 | 0,21 | 0,18 | 0,18 | 0,21 | 0,23 | 0,18 | 0,18 |
| AvgP (Max) | 0,49 | 0,38 | 0,35 | 0,37 | 0,37 | 0,38 | 0,35 | 0,37 |
| SPOptP (Avg) | 3,81 | 3,25 | 3,33 | 3,98 | 3,55 | 3,18 | 3,33 | 3,98 |
| SPOptP (Med) | 3,67 | 3,06 | 3,17 | 4,00 | 3,36 | 3,00 | 3,17 | 4,00 |
| SPOptP (Min) | 1,73 | 1,35 | 1,34 | 1,46 | 1,39 | 1,31 | 1,34 | 1,46 |
| SPOptP (Max) | 6,92 | 6,32 | 6,29 | 7,03 | 6,53 | 6,21 | 6,29 | 7,03 |
| Links (Avg) | 46,93 | 1,53 | 37,01 | 35,47 | 2,32 | 1,94 | 1,70 | 2,09 |
| Links (Med) | 47 | 1 | 37 | 36 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Links (Min) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Links (Max) | 62 | 8 | 46 | 44 | 11 | 17 | 21 | 12 |

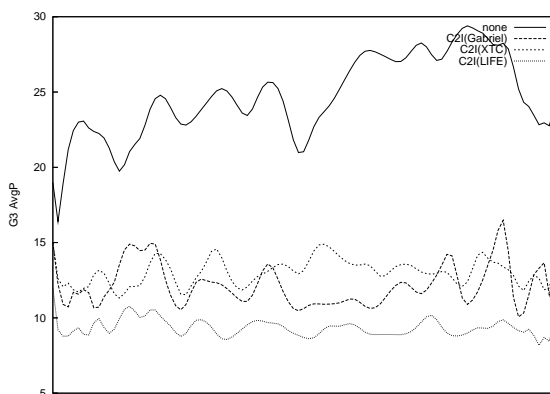
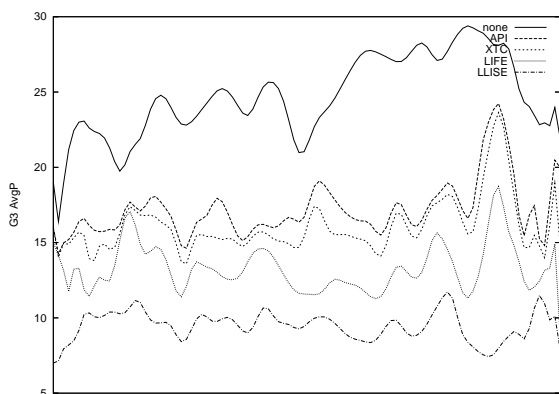
Tabulka 8.17: Scénář G3 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

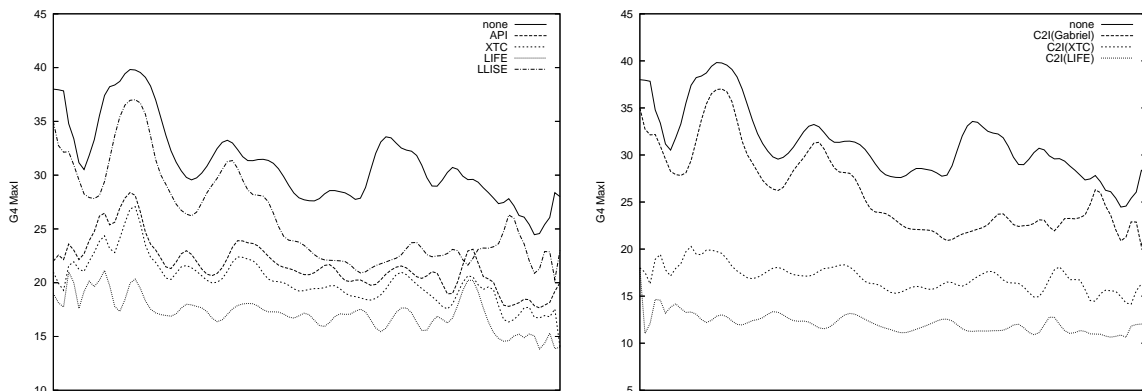


Průměrný vysílací výkon AvgP.

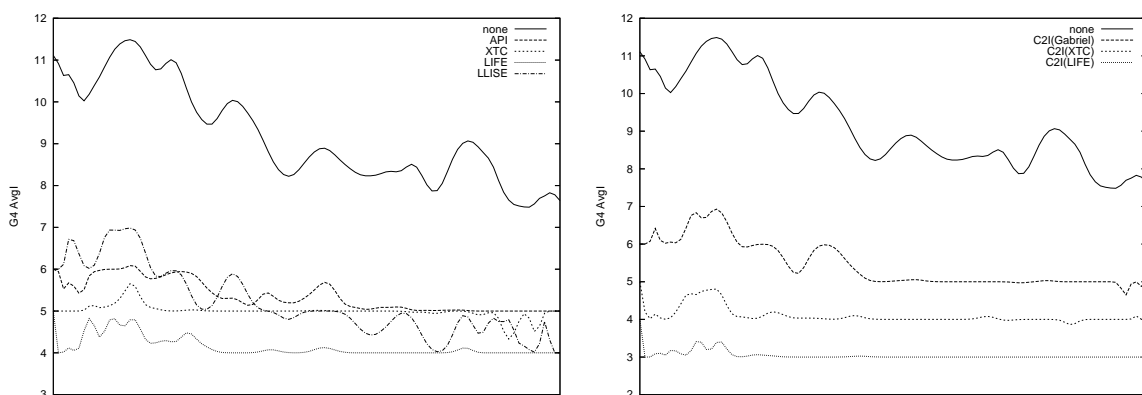
Obrázek 8.15: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G3).

| Scénář G4 6x6, 65 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------|--------------------|---------------------|
| MaxI (Avg) | 31,19 | 20,23 | 17,22 | 26,11 | 26,12 | 16,97 | 12,08 | 9,80 |
| MaxI (Med) | 31,00 | 20,00 | 17,00 | 25,00 | 25,00 | 17,00 | 12,00 | 9,00 |
| MaxI (Min) | 21,00 | 13,00 | 12,00 | 18,00 | 18,00 | 12,00 | 8,00 | 7,00 |
| MaxI (Max) | 43,00 | 33,00 | 26,00 | 39,00 | 39,00 | 26,00 | 19,00 | 18,00 |
| AvgI (Avg) | 9,20 | 5,44 | 4,77 | 5,69 | 5,88 | 4,62 | 3,67 | 3,15 |
| AvgI (Med) | 8,88 | 5,42 | 4,76 | 5,51 | 5,73 | 4,59 | 3,66 | 3,11 |
| AvgI (Min) | 7,36 | 4,73 | 4,25 | 4,57 | 4,90 | 3,88 | 3,19 | 2,68 |
| AvgI (Max) | 11,76 | 6,86 | 5,70 | 7,53 | 7,47 | 5,73 | 4,31 | 4,65 |
| SPOptPathI (Avg) | 21,54 | 18,28 | 18,29 | 20,87 | 18,16 | 15,94 | 15,41 | 18,41 |
| SPOptPathI (Med) | 21,40 | 18,20 | 18,14 | 20,75 | 18,01 | 15,84 | 15,27 | 18,34 |
| SPOptPathI (Min) | 17,50 | 15,12 | 15,30 | 16,40 | 14,54 | 12,94 | 12,49 | 14,11 |
| SPOptPathI (Max) | 26,45 | 22,81 | 22,67 | 26,35 | 22,90 | 19,93 | 19,88 | 23,68 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 42,04 | 39,98 | 42,92 | 55,57 | 41,76 | 32,63 | 34,43 | 46,25 |
| SPOptEdgeI (Med) | 41,68 | 39,48 | 42,57 | 54,81 | 41,26 | 32,45 | 34,30 | 45,87 |
| SPOptEdgeI (Min) | 32,34 | 31,82 | 34,28 | 41,47 | 32,97 | 26,47 | 27,23 | 32,55 |
| SPOptEdgeI (Max) | 52,91 | 52,28 | 57,39 | 76,83 | 57,42 | 45,39 | 50,40 | 61,46 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,96 | 0,93 | 0,91 | 0,94 | 0,97 | 0,93 | 0,91 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,97 | 0,95 | 0,93 | 0,96 | 0,98 | 0,95 | 0,93 |
| MaxP (Min) | 0,97 | 0,81 | 0,75 | 0,64 | 0,76 | 0,86 | 0,75 | 0,64 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,50 | 0,34 | 0,30 | 0,27 | 0,30 | 0,36 | 0,30 | 0,27 |
| AvgP (Med) | 0,50 | 0,34 | 0,29 | 0,27 | 0,30 | 0,36 | 0,29 | 0,27 |
| AvgP (Min) | 0,46 | 0,25 | 0,21 | 0,19 | 0,20 | 0,27 | 0,21 | 0,19 |
| AvgP (Max) | 0,57 | 0,43 | 0,39 | 0,34 | 0,39 | 0,47 | 0,39 | 0,34 |
| SPOptP (Avg) | 4,89 | 4,26 | 4,35 | 6,46 | 4,72 | 4,16 | 4,35 | 6,46 |
| SPOptP (Med) | 4,97 | 4,36 | 4,46 | 6,34 | 4,79 | 4,25 | 4,46 | 6,34 |
| SPOptP (Min) | 3,08 | 2,29 | 2,26 | 2,98 | 2,34 | 2,25 | 2,26 | 2,98 |
| SPOptP (Max) | 6,57 | 5,97 | 6,36 | 11,65 | 6,97 | 5,82 | 6,36 | 11,65 |
| Links (Avg) | 96,96 | 7,80 | 72,79 | 65,56 | 10,02 | 8,18 | 6,32 | 7,99 |
| Links (Med) | 98,00 | 7,00 | 73,00 | 66,00 | 10,00 | 8,00 | 6,00 | 8,00 |
| Links (Min) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Links (Max) | 117,00 | 24,00 | 85,00 | 78,00 | 27,00 | 25,00 | 22,00 | 27,00 |

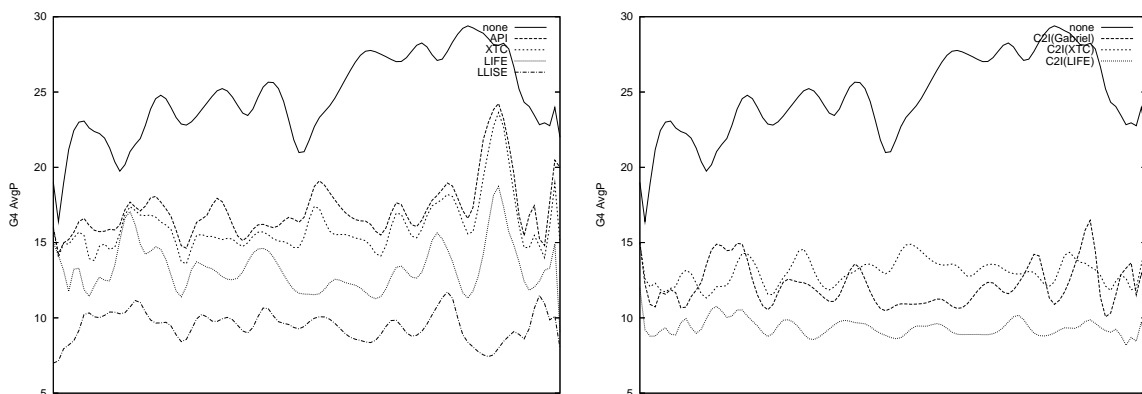
Tabulka 8.18: Scénář G4 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.

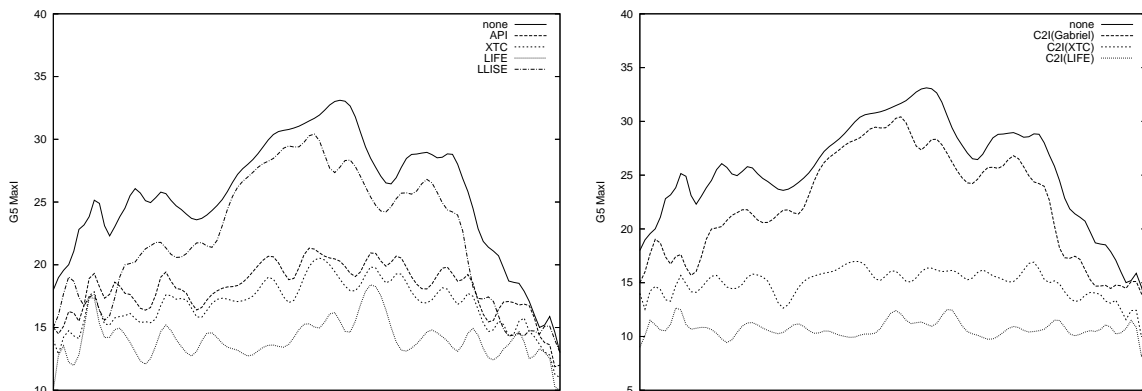


Průměrný vysílací výkon AvgP.

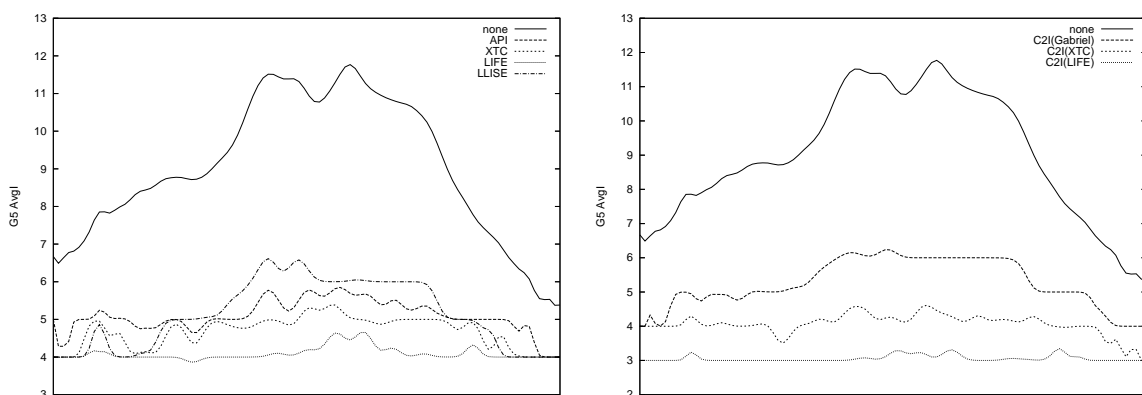
Obrázek 8.16: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G4).

| Scénář G5 5x5, 39 uzlů | None | API | XTC | LIFE | LLISE | C2I Gabriel | C2I XTC | C2I LIFE |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| MaxI (Avg) | 25,59 | 16,86 | 14,08 | 22,33 | 22,35 | 14,94 | 10,72 | 9,93 |
| MaxI (Med) | 26,00 | 17,00 | 14,00 | 23,00 | 23,00 | 15,00 | 10,00 | 9,00 |
| MaxI (Min) | 13,00 | 11,00 | 10,00 | 13,00 | 13,00 | 9,00 | 7,00 | 6,00 |
| MaxI (Max) | 36,00 | 25,00 | 24,00 | 33,00 | 33,00 | 22,00 | 15,00 | 17,00 |
| AvgI (Avg) | 9,04 | 5,17 | 4,58 | 5,65 | 5,77 | 4,56 | 3,61 | 3,48 |
| AvgI (Med) | 8,81 | 5,17 | 4,57 | 5,64 | 5,76 | 4,57 | 3,59 | 3,40 |
| AvgI (Min) | 5,29 | 4,28 | 3,94 | 4,08 | 4,23 | 3,40 | 3,01 | 2,73 |
| AvgI (Max) | 12,37 | 6,39 | 5,59 | 7,31 | 7,11 | 5,80 | 4,37 | 4,70 |
| SPOptPathI (Avg) | 16,47 | 13,67 | 13,78 | 14,94 | 13,64 | 12,25 | 11,83 | 13,10 |
| SPOptPathI (Med) | 16,72 | 13,66 | 13,75 | 15,13 | 13,56 | 12,27 | 11,83 | 13,23 |
| SPOptPathI (Min) | 12,44 | 9,12 | 9,24 | 9,85 | 8,98 | 8,08 | 7,89 | 8,16 |
| SPOptPathI (Max) | 21,43 | 17,05 | 17,15 | 18,06 | 17,53 | 16,26 | 16,03 | 17,54 |
| SPOptEdgeI (Avg) | 30,50 | 29,36 | 32,14 | 38,54 | 30,57 | 24,30 | 25,62 | 31,16 |
| SPOptEdgeI (Med) | 30,43 | 29,08 | 31,72 | 38,63 | 30,06 | 24,43 | 25,54 | 31,38 |
| SPOptEdgeI (Min) | 19,29 | 17,07 | 18,85 | 22,67 | 17,39 | 14,21 | 15,06 | 16,71 |
| SPOptEdgeI (Max) | 42,20 | 43,30 | 48,26 | 52,60 | 45,59 | 36,63 | 40,52 | 43,97 |
| MaxP (Avg) | 0,99 | 0,94 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,95 | 0,91 | 0,92 |
| MaxP (Med) | 0,99 | 0,96 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,94 | 0,94 |
| MaxP (Min) | 0,99 | 0,61 | 0,52 | 0,60 | 0,61 | 0,73 | 0,52 | 0,60 |
| MaxP (Max) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| AvgP (Avg) | 0,49 | 0,32 | 0,29 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,29 | 0,28 |
| AvgP (Med) | 0,49 | 0,32 | 0,28 | 0,27 | 0,29 | 0,34 | 0,28 | 0,27 |
| AvgP (Min) | 0,44 | 0,24 | 0,20 | 0,19 | 0,20 | 0,25 | 0,20 | 0,19 |
| AvgP (Max) | 0,57 | 0,48 | 0,46 | 0,43 | 0,44 | 0,50 | 0,46 | 0,43 |
| SPOptP (Avg) | 3,73 | 3,26 | 3,36 | 4,60 | 3,62 | 3,18 | 3,36 | 4,60 |
| SPOptP (Med) | 3,57 | 3,07 | 3,18 | 4,39 | 3,41 | 3,01 | 3,18 | 4,39 |
| SPOptP (Min) | 1,88 | 1,46 | 1,55 | 1,91 | 1,56 | 1,44 | 1,55 | 1,91 |
| SPOptP (Max) | 8,42 | 8,47 | 8,94 | 10,41 | 9,17 | 8,20 | 8,94 | 10,41 |
| Links (Avg) | 49,17 | 2,89 | 37,09 | 34,61 | 3,58 | 3,29 | 2,79 | 3,49 |
| Links (Med) | 49,00 | 3,00 | 37,00 | 35,00 | 3,00 | 3,00 | 2,00 | 3,00 |
| Links (Min) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Links (Max) | 64,00 | 11,00 | 48,00 | 43,00 | 13,00 | 16,00 | 15,00 | 16,00 |

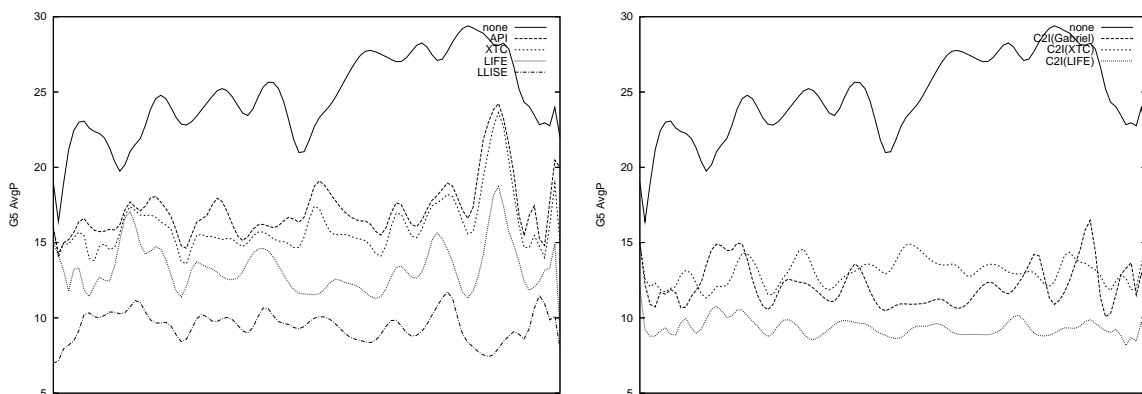
Tabulka 8.19: Scénář G5 - statistické vyhodnocení



Hodnota Maxi (maximální hranové pokrytí).



Průměrné hranové pokrytí AvgI.



Průměrný vysílací výkon AvgP.

Obrázek 8.17: Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G5).

Kapitola 9

Závěr

Tato práce je pouze vstupem do široké a zatím důkladně neprozkoumané oblasti. Bezdrátové sítě obecně nabývají na oblibě. Hlavními důvody jsou snadná instalace a mobilita uzlů. Díky tomu odborníci předpokládají v oblasti sítí podobný vývoj jako u hlasové služby, kde mobilní telefony postupně nahrazují pevné linky. V blízké budoucnosti budou sítě s metalickým vedením částečně nahrazeny bezdrátovými sítěmi.

V současné době je patrný rychlý vývoj technologií bezdrátových sítí. Kromě vojenského použití však mohou být bezdrátové sensorové sítě použity i v civilních oblastech, od kontroly znečištění prostředí, až po detekci zrychlení. Jedním z mnoha příkladů jsou sensorové sítě, jejichž úkolem je sběr dat, např. o teplotě a tlaku vzduchu, a následně je s minimálním zpracováním odesílat sběrnému serveru. Podle profesora Cullera z Berkeley, který se zabývá vývojem bezdrátových sensorů, se během deseti let sensorové sítě rozšíří natolik, že se budou používat i v komerční oblasti.

Vývoj stále brzdí zejména interference mezi jednotlivými vysílači a životnost uzlů, daná limitovaným zdrojem energie. Účelem práce proto bylo porovnat vlastnosti algoritmů pro řízení topologie sítě. Existuje mnoho kritérií, podle kterých lze algoritmy porovnávat. I když sleduji více vypočtených veličin, největší důraz kladu na výpočet maximální interference, průměrné hranové interference a průměrného výkonu vysílače. Pro zajímavost jsem implementovala i výpočet průměrné interference a výkonu pro nejkratší cesty v grafu.

Kromě problematiky interference se věnuji i mobilitě uzlů. Existuje mnoho modelů mobilit, které více či méně odpovídají realitě. Dosud nebyly algoritmy pro minimalizaci interference porovnávány za použití stejných vstupních dat.

Analýza výsledků simulací vede k následujícím závěrům:

Všechny sledované algoritmy (kromě C2I) odstraňují z původního grafu vhodně zvolené hrany, a tím redukuje interference (MaxI a AvgI). V původním grafu jsou totiž spojeny všechny uzly, které jsou v dosahu svých vysílačů. Proto jsou hodnoty veličiny MaxP dané nejvzdálenějšími sousedy těchto uzlů a přibližují se maximálnímu výkonu vysílače, což je v naší normalizované metrice 1.

Algoritmy pro řízení topologie odstraňují hrany, a tím nutně zvyšují průměrnou délku nejkratších cest mezi uzly v grafu. Proto není vidět velké zlepšení u veličin, které jsou závislé na hledání nejkratších cest (SPOptPathI, SPOptEdge, SPOptP).

Největší rozdíly ve vlastnostech algoritmů podle rozložení uzlů jsou právě pro algoritmy C2I. Jejich hlavní myšlenkou je rozdělit hrany do dvou skupin a těm přidělit různé vysílací frekvence. Kritériem pro toto dělení u algoritmu pro výpočet 2-interference je pokrytí jednotlivých hran. Nejvýhodnější rozmístění uzlů pro tento algoritmus je rozdělení na několik vzájemně oddělených skupin. Komunikace uvnitř skupin bude probíhat na jiné frekvenci než komunikace mezi skupinami (s použitím delších hran). V takovém případě tyto dlouhé hrany neinterferují s komunikací v rámci skupin. Použití druhé frekvence snižuje maximální interferenci MaxI o 30 – 50% v porovnání se stejnou topologií s jednou frekvencí, AvgI zhruba o 20%.

I když u algoritmu LIFE vychází nejnižší hodnoty maximální i průměrné hranové interference, není to optimální algoritmus. Topologie LIFE totiž tvoří kostru grafu, a protože mezi každou dvojicí uzlů existuje právě jedna cesta, jsou tyto hrany přetěžovány. Nevhodné rozložení uzlů, např. topologie hvězdy, může způsobit, že jeden uzel bude zprostředkovávat veškerou komunikaci. To povede k rychlému vyčerpání energetického zdroje takto exponovaného uzlu.

Algoritmus LLISE je vhodný zejména pro nehomogenní rozmístění uzlů. Výsledná topologie totiž obsahuje všechny hrany, které nezpůsobí zvýšení maximální interference grafu. Kvalita algoritmu je závislá na parametru, který určuje, kolik sousedních uzlů bude prohledáno pro nalezení lepší cesty vzhledem k interferenci (zjišťování k -sousedství hran). Tento parametr ale zároveň prudce zvyšuje výpočetní náročnost (v simulacích byla použita hodnota $k = 4$).

Algoritmus XTC výrazně snižuje interferenci (MaxI, AvgI), aniž by se příliš zvýšil výkon potřebný na doručení zprávy mezi dvěma libovolnými uzly. Tyto vlastnosti byly potvrzeny simulacemi na všech druzích scénářů. Naměřené hodnoty nejsou optimální, ale narozdíl od ostatních implementovaných algoritmů se jeho vlastnosti nezhoršují s žádnou změnou rozmístění nebo hustoty uzlů. Proto tvoří vhodný základ pro další snižování interference pomocí algoritmu C2I.

Na tuto práci lze navázat různými způsoby. Představili jsme si algoritmus k výpočtu 2-interference, který využívá druhou frekvenci a minimalizuje tím interferenci topologie. Zajímavé by bylo pokračovat v této myšlence a prozkoumat algoritmy pro výpočet p -interference pro obecné p a najít hranici, kdy už je přidávání nových frekvencí nevhodné kvůli zvýšeným nákladům a limitované technickými možnostmi.

Modely, se kterými jsem pracovala, byly v porovnání s reálným světem dosti zjednodušené. Proto by bylo možné navázat na tuto práci s realističtější modelem pohybu (uvažovat překážky, nerovný povrch, vcházení a vycházení uzlů do plochy) a vlastnostmi uzlů. Model lze rozšířit o směrové vysílače, o vysílače s různým vysílacím výkonem a o pomocné statické uzly.

Zajímavý matematický problém vzniká, když vyžadujeme, aby byla výsledná topologie spojitá. Protože nemůžeme nijak ovlivnit náhodné rozmístění uzlů, jsou řešením pomocné uzly, které se pohybují po ploše a pokud dojde k vzniku nesouvislého grafu, spojuje komponenty. Postaví se na vhodné místo tak, aby ležely v dosahu obou komponent, a zůstanou tam během celého spojení.

Další rozšíření by mohly představovat úvahy o orientovaných grafech. Model, který jsem používala já, předpokládá symetrické hrany. V praxi se může stát, že optimální cesty nejsou symetrické. Datový tok bývá v jednom směru mohutnější než v druhém. Proto by měla smysl i metrika, kde se u měření pokrytí orientované hrany neuvažuje pokrytí cílového uzlu.

Ukazuje se, že s problémem interference úzce souvisejí otázky koexistence různých sítí. Jedná se o buňkové mobilní rádiové sítě (GSM/GPRS, UMTS) pro globální komunikaci, WLAN sítě pro lokální i globální komunikaci a Bluetooth a jiné sítě s malým dosahem pro lokální komunikaci. Problém vzniká hlavně mezi sítěmi WLAN a WPAN, protože obě používají stejné pásmo ISM¹. Řada algoritmů je založena na kmitočtovém multiplexu[18]. Na tomto principu fungují směrovací mechanismy např. u Bluetooth (FHSS - frequency hopping spread spectrum)[17] nebo Wi-Fi² (DSSS - direct sequence spread spectrum).

¹ISM - Industrial, Scientific and Medical band. V tomto nelicencovaném pásmu pracuje mnoho různých bezdrátových zařízení, například produkty bluetooth, ale i mikrovlnné trouby a v zahraničí i bezdrátové telefony.

²IEEE 802.11b WLAN

Literatura

- [1] M. Burkhart, P. von Rickenbach, R. Wattenhofer, A. Zollinger. *Does topology control reduce interference?* Proceedings of the 5th ACM Int. Symposium on Mobile Ad-hoc Networking and Computing (MobiHoc), strany 9-19, 2004
- [2] P. von Rickenbach, S. Schmid, R. Wattenhofer, A. Zollinger. *A robust interference model for wireless ad-hoc networks.* 2005
- [3] Z. Wang, J. Crowcroft. *Quality of service routing for supporting multimedia applications.* IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, str. 1228-1234, Sept. 1996
- [4] K. Jain, J. Padhye, V. N. Padmanabhan, L. Qiu. *Impact of Interference on Multi-hop Wireless Network Performance.* Proceedings ACM Mobicom 2003, San Diego, USA, September 2003
- [5] T. Camp, J. Boleng, V. Davies. *A survey of mobility for ad hoc network research, Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC).* Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, str. 483 - 502, 2002
- [6] C. Bettstetter, C. Wagner. *The spatial node distribution of the random waypoint mobility model.* Proc. 1st German Workshop on Mobile Ad-Hoc Network, Ulm, Germany, March 2002
- [7] R. Rajaraman. *Topology Control and Routing in Ad hoc Networks: A Survey.* Collage of Computer Science, Northeastern University, Boston
- [8] T. Camp, J. Boleng, V. Davies. *A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research.* Dept. of Math. and Computer Sciences, Colorado School of Mines, 2002
- [9] R. Wattenhofer, A. Zollinger. *XTC: A Practical Topology Control Algorithm for Ad-Hoc Networks.* Department of Computer Science, ETH Zurich
- [10] B. Karp, H. T. Kung. *GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks.* Harvard University, MobiCom 2000

- [11] F.Kuhn, R.Wattenhofer, Y. Zhang, A. Zollinger. *Geometric Ad-Hoc Routing:Of Theory and Practice*. Department of Computer Science, Zurich
- [12] V. Sekrar, B.S. Manoj, C.Siva Ram Murthy. *Routing for a Single Interface MCN Architecture and Pricing Schemes for Data Traffic in Multi-Hop Cellular Networks*. Proceegings of IEEE ICC 2003, 2003
- [13] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, Y.M. Wang. *Distributed Topology Control for Power-Efficient Operation in Multi-Hop Wireless Ad-Hoc Networks*. Proceegings of IEEE INFOCOM 2001, 2001
- [14] C. Comaniciu, N. Mandayam, H.V. Poor. *Multiuser Detection in Cross-Layer Design*. Hardcover, 2005
- [15] D. Bossert. *Statistics*
<http://it.e-technik.uni-ulm.de/World/Teaching/ce/handout/hilf16.pdf>
- [16] Z. Walczak. *Interference and Topology Control in Wireless Networks with Scale-Free Distribution of Nodes*. SOFSEM 2006, 2. díl, str. 44-53, Ústav informatiky AV, 2006
- [17] N. Golmie, O. Rebala, N.Chevrollier. *Bluetooth Adaptive Frequency Hopping and Scheduling*. National Institute of Standards and Technology
- [18] Z. Kostic, X. Qiu, J. Chuang, I.F. Chang, K. Chawla, N. Sollenberger. *Dynamic frequency hopping in cellular systems with network assisted resource allocation*. Proc. IEEEVTC'00, 2000
- [19] T. Johansson, L.Carr-Motyčková. *Reducing Interference in Ad hoc Networks through Topology Control*. EISLAB, Sweden
- [20] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3671.htm>
- [21] C. Siva Ram Murthy, B. S. Manoj. *Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols*. Prentice Hall, 2004
- [22] T. Cormen, C. Leieron, R. Rivest. *Introduction to Algorithms* MIT Press, Cambridge, 1990
- [23] D.Peleg. *Distributed Computing: A locality-Sensitive Approach*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2000
- [24] D.Tan, S. Zhou, J. Ho, J. Mehta, H. Tanabe. *Design and evaluation of an individually simulated mobility model in wireless ad hoc networks*. Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference 2002

Seznam obrázků

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | a) Gabrielův graf b) RNG | 9 |
| 2.2 | Gabrielův graf | 10 |
| 4.1 | Uspořádání uzlů ve vybrané topologii | 16 |
| 4.2 | Použití algoritmu RNG s interferencí $\Theta(n)$ | 17 |
| 4.3 | Optimální řešení s konstantní interferencí | 17 |
| 4.4 | Optimální topologie pro síť ve tvaru hvězdy | 18 |
| 4.5 | Speciální typ rozložení uzlů v síti | 19 |
| 4.6 | Exponenciální řetězec uzlů | 19 |
| 5.1 | Algoritmus API na scénáři G5 (kap. 8.1.1) | 23 |
| 5.2 | Porovnání topologie vytvořené algoritmem API s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3). | 24 |
| 5.3 | Algoritmus LIFE na scénáři G5 (kap. 8.1.1) | 27 |
| 5.4 | Porovnání topologie vytvořené algoritmem LIFE s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3). | 28 |
| 5.5 | Algoritmus LLISE na scénáři G5 (kap. 8.1.1) | 33 |
| 5.6 | Porovnání topologie vytvořené algoritmem LLISE s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a shora dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3). | 34 |
| 5.7 | Pomocný obrázek k důkazu tvrzení 10 | 39 |
| 5.8 | Algoritmus XTC na scénáři G5 (kap. 8.1.1) | 39 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.9 | Porovnání topologie vytvořené algoritmem XTC s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3). | 40 |
| 5.10 | Algoritmus 2-interference nad Gabrielovým grafem na scénáři G5 (kap. 8.1.1) | 44 |
| 5.11 | Porovnání topologie vytvořené algoritmem C2I-Gabriel s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3). | 45 |
| 5.12 | Algoritmus 2-interference nad LIFE na scénáři G5 (kap. 8.1.1) | 47 |
| 5.13 | Porovnání topologie vytvořené algoritmem C2I-LIFE s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3). | 48 |
| 5.14 | Algoritmus 2-interference nad algoritmem XTC na scénáři G5 (kap. 8.1.1) | 49 |
| 5.15 | Porovnání topologie vytvořené algoritmem C2I-XTC s topologií bez redukce hran. Postupně zleva doprava a směrem dolů jsou zobrazeny grafy pro hodnoty MaxI, AvgI, SPOptPathI, SPOptEdgeI, AvgP, SPOptP (definovány v kap. 8.3). | 50 |
| 6.1 | Určení pokrytí | 52 |
| 7.1 | Graf pro funkce $F(X)$ a $f(x)$ | 57 |
| 7.2 | Model RWP | 59 |
| 7.3 | Model RGM | 60 |
| 7.4 | Model NCM | 61 |
| 7.5 | Model RPGM | 62 |
| 7.6 | Scénář uzlů s různými modely pohybu | 63 |
| 8.1 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S1). | 69 |
| 8.2 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S2). | 71 |
| 8.3 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S3). | 73 |
| 8.4 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S4). | 75 |
| 8.5 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S5). | 77 |

| | | |
|------|---|-----|
| 8.6 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S6). | 79 |
| 8.7 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace S7). | 81 |
| 8.8 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T1). | 83 |
| 8.9 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T2). | 85 |
| 8.10 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T3). | 87 |
| 8.11 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T4). | 89 |
| 8.12 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace T5). | 91 |
| 8.13 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G1). | 93 |
| 8.14 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G2). | 95 |
| 8.15 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G3). | 97 |
| 8.16 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G4). | 99 |
| 8.17 | Porovnání časového průběhu sledovaných veličin pro jednotlivé algoritmy (simulace G5). | 101 |
| B.1 | Časový průběh veličiny MaxI ve scénáři S1 - bez úpravy křivek | 115 |
| B.2 | Časový průběh veličiny MaxI ve scénáři S1 - s vyhlazováním křivek s použitím splines | 116 |
| B.3 | Časový průběh veličiny MaxI ve scénáři S1 - s vyhlazováním křivek s použitím Bézierových křivek | 116 |

Seznam tabulek

| | | |
|------|--|-----|
| 5.1 | Výsledky simulací pro algoritmus API (scénář G5) | 25 |
| 5.2 | Výsledky simulací pro algoritmus LIFE (scénář G5) | 29 |
| 5.3 | Výsledky simulací pro algoritmus LLISE (scénář G5) | 35 |
| 5.4 | Výsledky simulací pro algoritmus XTC (scénář G5) | 41 |
| 5.5 | Výsledky simulací pro algoritmus C2I-Gabriel (scénář G5) | 46 |
| 5.6 | Výsledky simulací pro algoritmus C2I-LIFE (scénář G5) | 47 |
| 5.7 | Výsledky simulací pro algoritmus C2I-XTC (scénář G5) | 49 |
| 8.1 | Typ 1 (Náhodně se pohybující uzly ve čtvercové oblasti) | 65 |
| 8.2 | Typ 2 (Náhodně se pohybující skupiny v RPGM modelu) | 66 |
| 8.3 | Scénář S1 - statistické vyhodnocení | 68 |
| 8.4 | Scénář S2 - statistické vyhodnocení | 70 |
| 8.5 | Scénář S3 - statistické vyhodnocení | 72 |
| 8.6 | Scénář S4 - statistické vyhodnocení | 74 |
| 8.7 | Scénář S5 - statistické vyhodnocení | 76 |
| 8.8 | Scénář S6 - statistické vyhodnocení | 78 |
| 8.9 | Scénář S7 - statistické vyhodnocení | 80 |
| 8.10 | Scénář T1 - statistické vyhodnocení | 82 |
| 8.11 | Scénář T2 - statistické vyhodnocení | 84 |
| 8.12 | Scénář T3 - statistické vyhodnocení | 86 |
| 8.13 | Scénář T4 - statistické vyhodnocení | 88 |
| 8.14 | Scénář T5 - statistické vyhodnocení | 90 |
| 8.15 | Scénář G1 - statistické vyhodnocení | 92 |
| 8.16 | Scénář G2 - statistické vyhodnocení | 94 |
| 8.17 | Scénář G3 - statistické vyhodnocení | 96 |
| 8.18 | Scénář G4 - statistické vyhodnocení | 98 |
| 8.19 | Scénář G5 - statistické vyhodnocení | 100 |

Příloha A

Program InterSim

A.1 Popis programu

Program InterSim slouží pro simulaci chování uzlů a mechanismů pro řízení topologie sítě. Je to zjednodušený model skutečných ad-hoc sítí.

Generalizace spočívá v těchto předpokladech:

1. Plocha, po které se uzly pohybují má obdélníkový tvar, je bez povrchových nerovností a bez jakýchkoli překážek.
2. Uzly se pohybují ve dvojdimenzionálním prostoru.
3. Počet uzlů je konstantní, žádné uzly nepřicházejí ani neodcházejí z plochy. Šíření signálu je rovnoměrné ve všech směrech.

Uzly využívají pro vysílání nejvýše dvě různé frekvence (algoritmus pro výpočet 2-interference, viz kapitola 5.6, ve většině případů však vysílají na stejnou frekvenci (všechny ostatní implementované algoritmy).

Cílem programu je ukázat, jak fungují jednotlivé mechanismy pro řízení topologie na různých rozloženích uzlů a srovnat jejich vlastnosti podle různých metrik interference (maximální hranové pokrytí, interference cest, průměrné hranové pokrytí, max. vyzářený výkon...). Toto rozložení vzniká náhodným pohybem podle vybraných modelů mobility.

A.2 Ovládání programu

Po spuštění je program ve stavu, kdy je pro zobrazení i výpočet vybrán implicitně algoritmus API (popsán v kapitole 5.1). Plocha ale zatím neobsahuje žádné uzly, proto neprobíhají žádné výpočty. Uzly lze přidávat dvěma různými způsoby: postupným přidáváním pomocí položek menu nebo načtením předdefinovaného scénáře. Postupně popíšeme obě tyto možnosti.

Kliknutím na **Nodes/Add RWP** se přidá jeden uzel, pohybující se podle modelu

RWP (kap. 7.2.1). Parametry modelu jsou popsány v kapitole 8.1.1.

Nodes/Add RGM přidává uzel v modelu RGM (kap. 7.2.2).

Skupinu typu RPGM lze přidat kliknutím na **Nodes/Add RPGM** (kap. 7.2.4).

Kliknutím na **Nodes/NCM** vytvoříme skupinu typu NCM (kap. 7.2.3).

Druhou možností je načíst již existující scénář. Klikněte na **Nodes/Load** a vyberte soubor sestrojený podle pravidel popsaných v kapitole A.3. Scénáře, které jsou popsány v kap. 8.1.1, jsou uloženy v adresáři scenarios jako soubory se jménem vytvořeným názvem scénáře a příponou **script**.

Po přidání uzlů začíná program simulovat jejich pohyb a chování vybraných mechanismů pro řízení topologie sítě. Topologie, která se má vykreslovat, je daná algoritmem vybraným v menu s názvem **Draw**. Jednotlivé algoritmy jsou popsány v kapitole 5:

None - tento algoritmus neeliminuje žádné hrany, pouze redukuje vysílací výkon tak, aby dosáhl právě na nejbližšího souseda

Gabriel - vytvoří Gabrielovy grafy

API - algoritmus API je popsán v kapitole 5.1 (algoritmus 1)

XTC - algoritmus API je popsán v kapitole 5.5 (algoritmus 5)

LIFE - algoritmus LIFE je popsán v kapitole 5.2 (algoritmus 2)

LLISE - algoritmus LLISE je popsán v kapitole 5.4 (algoritmus 4)

C2I Gabriel - tento algoritmus nejdříve sestrojí Gabrielův graf a na něj aplikuje algoritmus pro výpočet 2-interference (kap. 5.6, algoritmus 6).

C2I LIFE - tento algoritmus nejdříve sestrojí graf LIFE a na něj aplikuje algoritmus pro výpočet 2-interference

C2I XTC - tento algoritmus nejdříve sestrojí graf LLISE a na něj aplikuje algoritmus pro výpočet 2-interference

Pro vybraný algoritmus se v každé časové jednotce vykresluje výsledná topologie (zobrazuje se poloha uzlů a hrany, které je spojují).

Nezávisle na výběru algoritmu pro vykreslování lze zvolit libovolnou množinu algoritmů, pro které se budou počítat statistická data. Nastavují se v menu **Compute** a význam jednotlivých položek je stejný jako u výše popsaného menu **Draw**. Položka **None** odznačí všechny položky, kliknutím na **All** se označí všechny algoritmy a budou zahrnuty do výpočtu. Kromě vybraného výpočtu se vždy počítají hodnoty i pro algoritmus **None**, který představuje důležité hodnoty pro srovnávání efektivity algoritmů.

Vzhledem k náročnosti výpočtů pro jednotlivé algoritmy a jejich množství je po označení všech algoritmů výpočet pomalý.

V menu **Options** si lze zvolit metriku interference a výkonu, podle které se budou zobrazovat průběžné výsledky na horním panelu.

Max. Coverage - maximální pokrytí hran

Avg. Coverage - průměrné pokrytí hran

SPOptEdge Interference - průměrné pokrytí cesty (součet pokrytí hran) pro nejkratší

cesty mezi uzly

SPOptPath Interference - průměrné pokrytí cesty (počet uzlů v množině vrcholů, pokrytých alespoň jednou hranou cesty) pro nejkratší cesty. Tato položka se od předešlé liší tím, že v případě SPOptEdge mohou být některé uzly započítány vícekrát (celou cestu rozdělíme na několik nezávislých hran a spočteme součet interferencí. Má to smysl pro přeposílání dat, kde uvažujeme časovou prodlevu mezi přijetím a odesláním zprávy pomocným uzlem).

Max. Power - maximální výkon

IOpt Interference - průměrný výkon na jednu hranu

IOpt Power - průměrný výkon vysílačů potřebný na doručení zprávy po cestě, optimální vzhledem k interferenci

Menu **Export** je určeno pro ukládání grafů funkcí do textového nebo **.eps** souboru. Menu obsahuje tyto položky:

ScreenShot - do souboru se jménem **ScreenShot_XX.eps** uloží grafické znázornění topologie v daném časovém okamžiku

Interference - ukládá průběh interference a výkonu (do souboru **Interference_XX.eps**)

Distribution - kliknutím na tuto položku uložíme rozložení hodnot funkce pro výpočet interference a výkonu

Start Movement Recording - tímto okamžikem začneme zaznamenávat pohyb všech uzlů

Stop Movement Recording - ukončíme zaznamenávání pohybu uzlů. Data budou v souboru **Record_XX.eps**

Start Data Saving - po kliknutí na tuto položku začneme pro všechny algoritmy, označené v menu **Compute**, ukládat do souboru **data_XX.eps** vypočítané hodnoty.

Stop Data Saving - tato položka ukončí ukládání dat a uzavře soubor.

Během ukládání dat (**Data Saving**) se do souboru zapisují všechny vypočtené hodnoty (Max. Coverage, Avg. Coverage, SPOptEdge Interference, SPOptPath Interference, Max. Power, Avg Power, SPOpt Power (kap. 4) a počet změn hran za časovou jednotku) (kap. 8.2).

A.3 Syntaxe scénáře

Scénář je popis plochy, na níž se pohybují uzly a zároveň skript, určující pohyb uzlů. Lze používat následující příkazy (parametry musí být navzájem odděleny právě jednou mezerou):

WORLD x y w h - definuje výřez "světa", který budeme sledovat na obrazovce. Parametry **x**, **y** udávají počátečnou pozici, **w** je šířka a **h** výška tohoto okna. Implicitní hodnoty jsou

0 0 10 10.

AREA *x y w h* - určuje oblast, v níž se budou pohybovat všechny uzly, uvedené po této definici (až do dalšího příkazu **AREA**). Parametry mají stejný význam jako u **WORLD**. Implicitní hodnoty jsou 0 0 10 10.

CLR - odstraní všechny dosud doby definované uzly. Pokud nechceme skládat několik scénářů dohromady, je vhodné začít skript právě tímto příkazem.

SUB *x y w h* - prostor (subarea) pro „satelitní“ uzly ve skupinách uzlů. Implicitní hodnoty jsou -0.25 -0.25 0.5 0.5.

REF - poslední definovaný uzel bude použit jako referenční uzel pro všechny následující uzly (až po příkaz **UNREF** nebo další **REF**)

UNREF - uzly, následující po tomto příkazu, nebudou závislé na žádném uzlu (implementačně je to reference na bod [0, 0])

HIDE - poslední definovaný uzel bude mít nastaven atribut na skrytý. Má to v podstatě význam jen pro **REF** uzly, ale tento příkaz lze použít kdykoliv.

PROP - propagate delay. Pokud je referenční uzel ve stavu, když má přestávku v pohybu, přestanou se pohybovat i všechny uzly na něm závislé.

NPROP - negative propagate delay. Závislé uzly se pohybují pouze tehdy, kdy jejich referenční bod stojí. Opět se vztahuje pouze k posledně definovanému uzlu.

STATIC *x y* - statický uzel, který je umístěn na souřadnicích [*x*, *y*].

RWP [*count* [*maxDelay*]] - přidává *count* uzlů, který se pohybuje podle modelu RWP (kap. 7.2.1) se zadanou maximální délkou přestávky v pohybu. Implicitní hodnoty jsou *count* = 1, *maxDelay* = 100.

ROUND [*r*] | [*count* *r*] - přidává uzel typu RWP, který se pohybuje kolem referenčního bodu v kruhové oblasti s poloměrem *r*. Implicitní hodnoty jsou *count* = 1, *r* = (šířka plochy definované příkazem **AREA**)/2.

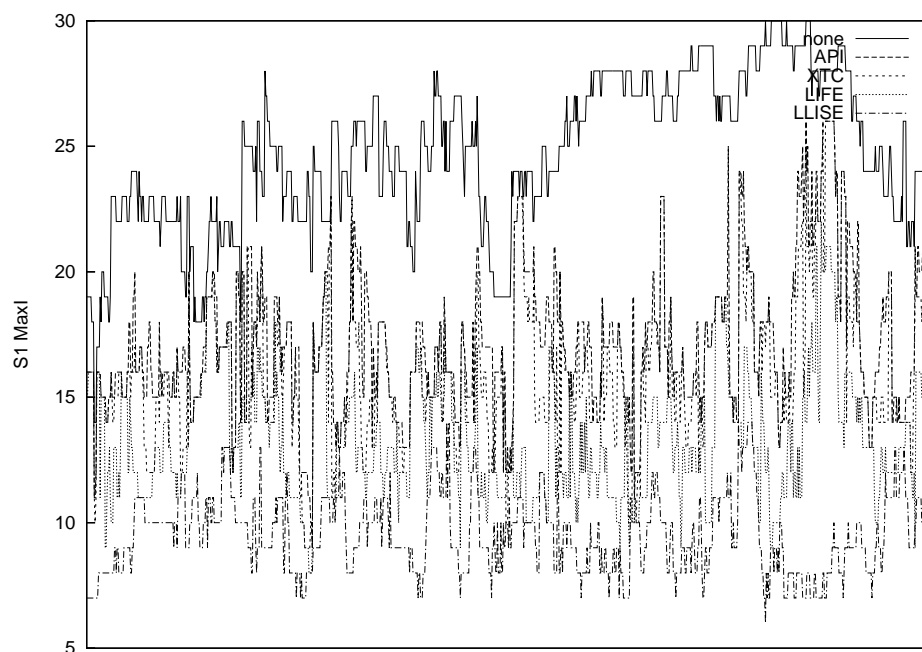
RPGM [*count* [*r* [*delay* [*subCount* [*randomized* [*visibleCenter*]]]]]] - tento příkaz vytváří skupinu uzlů, pohybujících se podle modelu RPGM (kap. 7.2.4). Parametr *count* vyjadřuje počet takto vytvořených skupin, *r* je vzdálenost referenčních bodů „satelitních“ uzlů od středového uzlu. *delay* je velikost přestávky pro středový bod. Parametr *subCount* je počet satelitních bodů. Hodnota *randomized* může být buď 1 nebo 0. Pokud je 0, jsou referenční body satelitních uzlů rozmístěny pravidelně kolem středového uzlu. Pokud je hodnota 1, mají referenční body náhodně zvolený úhel k x-ové ose. Parametr *visibleCenter* určuje, zda je středový uzel zobrazený (1) nebo skrytý (0). Implicitní hodnoty jsou **RPGM** 1 0.5 1000 5 0 0.

NCM [*count* [*r* [*subCount* [*randomized*]]]] - vytváří skupinu bodů, pohybujících se podle modelu NCM (kap. 7.2.3). Parametr *count* je počet generovaných skupin, *r* vzdálenost referenčních bodů satelitních uzlů od středového uzlu. *subCount* vyjadřuje počet satelitních uzlů a parametr *randomized* udává, jestli je rozmístění referenčních bodů satelitních uzlů pravidelné nebo náhodné.

Příloha B

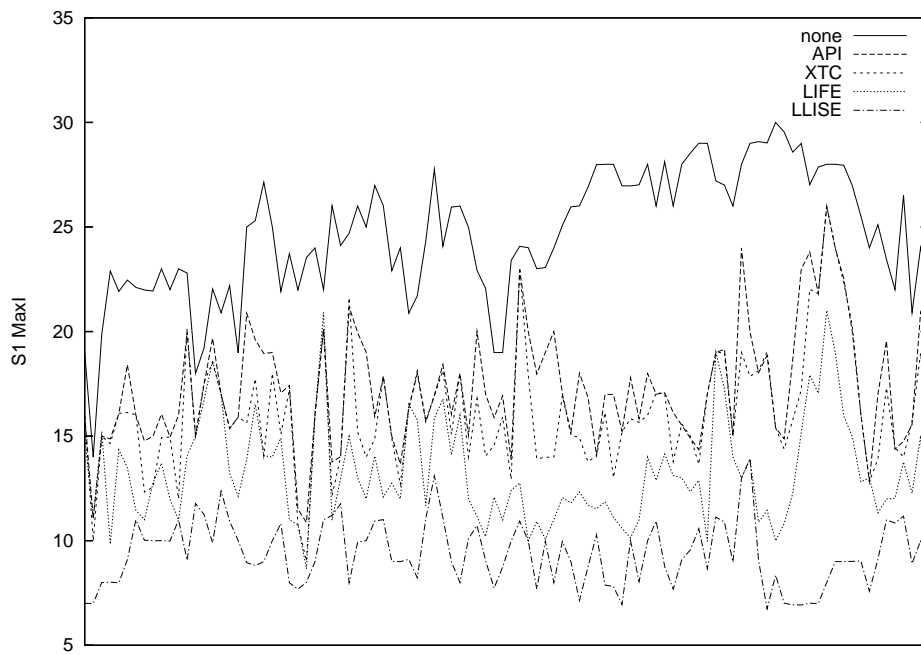
Kreslení grafů

Grafy funkcí, které popisují jednotlivé veličiny z dat, naměřených programem Intersim (příloha A), mají v některých případech diskrétní hodnoty v malém rozmezí a u jednotlivých algoritměch se protínají.

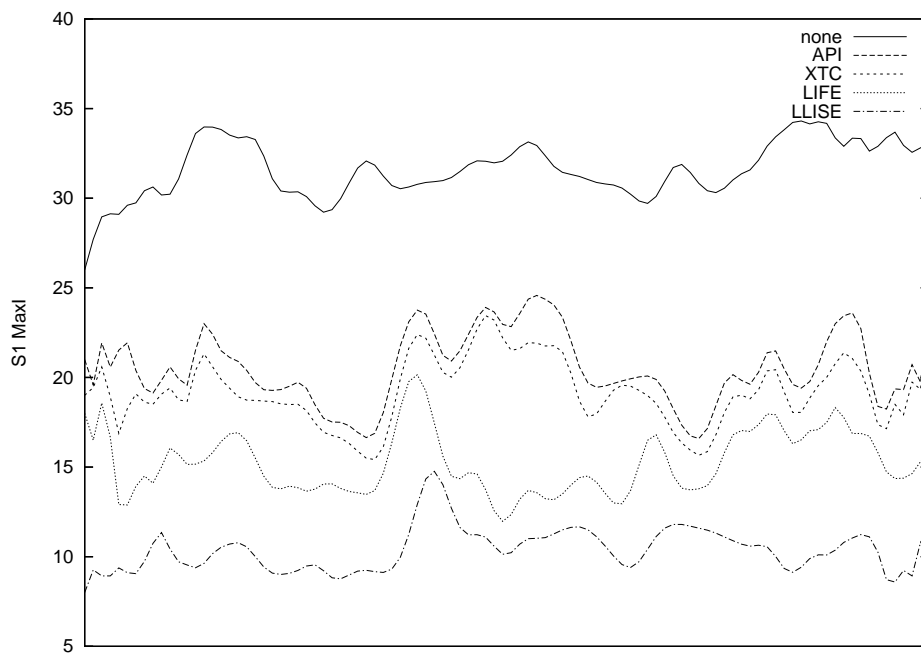


Obrázek B.1: Časový průběh veličiny MaxI ve scénáři S1 - bez úpravy křivek

Vezměme si např. veličinu MaxI ve scénáři S1. Na obr. B.1 nelze rozeznat křivky jednotlivých algoritměch. S použitím metody spline (obr. B.2) vypadá graf lépe, ale stále není čitelný, když je obor hodnot funkce menší. Kvůli větší názornosti a zachycení trendu funkcí, jsem zvolila metodu vyhlazování pomocí Bézierových křivek (obr. B.3).



Obrázek B.2: Časový průběh veličiny MaxI ve scénáři S1 - s vyhlazováním křivek s použitím splines



Obrázek B.3: Časový průběh veličiny MaxI ve scénáři S1 - s vyhlazováním křivek s použitím Bézierových křivek