

UNIVERZITA P. J. ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH

Prírodovedecká fakulta

František Galčík

Autoreferát dizertačnej práce

KOMUNIKÁCIA V RÁDIOVÝCH SIEŤACH

na získanie akademického titulu doktor
(„philosophiae doctor“)

v doktorandskom študijnom programe:

Informatika

v študijnom odbore

9.2.1 Informatika

Košice, máj 2009

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave informatiky Prírodovedeckej fakulty Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach.

Doktorand: František Galčík
Ústav informatiky
Prírodovedecká fakulta
Univerzita P.J. Šafárika v Košiciach
Jesenná 5, 040 01 Košice

Školiteľ: doc. RNDr. Gabriel Semanišin, PhD.
Ústav informatiky
Prírodovedecká fakulta
Univerzita P.J. Šafárika v Košiciach
Košice

Oponenti: doc. RNDr. Rastislav Královič, PhD.
Katedra informatiky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Bratislava

RNDr. Imrich Vrto, DrSc.
Oddelenie informatiky
Matematický ústav
Slovenská Akadémia Vied
Bratislava

Obhajoba dizertačnej práce sa koná 21.8.2009 o 9:15 hod.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v doktorandskom študijnom programe
Informatika

vymenovanou dekanom Prírodovedeckej fakulty UPJŠ v Košiciach

v miestnosti P/06 na Ústave informatiky PF UPJŠ, Jesenná 5, 040 01 Košice.

Predseda spoločnej odborovej komisie:
Prof. RNDr. Viliam Geffert, DrSc.
Ústav informatiky, PF UPJŠ
Jesenná 5, Košice

1 Úvod

Nové technológie a pokrok v oblasti informatiky a telekomunikačných technológií spôsobujú, že komunikačné siete sa stávajú neoddeliteľnou súčasťou ľudského života. Popri iných komunikačných sieťach narastá význam bezdrôtovej (rádiovkej) komunikácie, ktorá umožňuje množstvo nových aplikácií. Jednou z takýchto populárnych aplikácií sú aj bezdrôtové senzorové siete, ktoré pozostávajú z obrovského množstva jednoduchých senzorov navzájom komunikujúcich prostredníctvom rádiového vysielania. Rádiová komunikácia so sebou prináša nové špecifiká, s ktorými sa musia komunikačné protokoly vysporiadať. Hlavnými charakteristikami rádiovkej komunikácie sú limitovaný dosah použitých rádiových zariadení, všesmerovosť vysielania a vzájomná interferencia súčasného vysielania viacerých zariadení. Na druhej strane rádiová komunikácia umožňuje rýchle a lacné vybudovanie komunikačnej infraštruktúry.

Rádiová komunikácia a rádiové siete sa stali objektom intenzívneho výskumu elektrotechniky, aplikovanej informatiky, ako aj teoretickej informatiky. A práve výskum rádiových sietí z pohľadu teoretickej informatiky je predmetom dizertačnej práce. Práca sa zameriava na štúdium zložitostných a algoritmických aspektov komunikácie v rádiových sieťach. Rádiová sieť sa chápe ako kolekcia vysielaco-prijímacích zariadení - *uzlov* pracujúcich na rovnakej rádiovkej frekvencii. Uzly siete operujú v globálne synchronizovaných časových slotoch - *kolách*. V každom kole zariadenie funguje buď ako vysielateľ alebo ako prijímač. Vzhľadom na interferenciu rádiového vysielania platí, že uzol v prijímacom režime prijme odvysielanú správu práve vtedy, keď v jeho okolí v danom časovom kole vysielala práve jeden uzol. Súčasné vysielanie dvoch alebo viacerých uzlov v okolí prijímacieho uzla vedie k *interferencii* (kolízii vysielaní) a tým k znehodnoteniu obsahu odvysielaných správ na strane tohto prijímacieho uzla.

Jedným z štandardných spôsobov ako modelovať prostredie komunikačnej siete je modelovanie siete prostredníctvom grafu, ktorého vrcholy zodpovedajú uzlom siete a hrany komunikačným linkám. Tento prístup využíva *štandardný grafový model* rádiových sietí predstavený v práci [8]. V tomto modeli je rádiová sieť modelovaná orientovaným grafom $G = (V, E)$ nazývaným *graf dosiahnuteľnosti*. Pre množinu hrán grafu G platí, že $(u, v) \in E$ práve vtedy, ak uzol v je vo vysielacom dosahu uzla u . Vysielací dosah uzla u je množina tých uzlov siete, ktoré dokážu priamo prijať a dekodovať vysielanie z uzla u . Táto množina dosiahnuteľných uzlov závisí od vysielacej sily zariadenia a od geografickej charakteristiky jeho okolia. Ak je vysielacia sila všetkých uzlov siete rovnaká, sieť možno modelovať neorientovaným (symetrickým) grafom.

Komunikačná sieť sa vždy buduje s cieľom riešiť nejaké komunikačné úlohy. Na ich splnenie jednotlivé uzly siete realizujú nejaký komunikačný protokol, resp. algoritmus. Prirodzenou požiadavkou je, aby komunikačný algoritmus riešil komunikačnú úlohu efektívne. Za základné kritérium efektívnosti sa považuje čas (počet kôl) potrebných na riešenie komunikačnej úlohy. Keďže uzly reálnej rádiovkej siete sú často napájané batériami, ďalším uvažovaným kritériom efektívnosti je spotreba energie vyjadrená napríklad počtom vysielaní uzla. Jednou zo základných komunikačných úloh je *broadcasting*. Algoritmy pre broadcasting sú často kľúčovou procedúrou pre algoritmy riešiace komplexnejšie komunikačné úlohy. Cieľom broadcastingu je doručiť (zdrojovú) správu z jedného uzla siete, označovaného ako *zdroj*, do všetkých ostatných uzlov siete.

Pri návrhu efektívnych algoritmov realizujúcich komunikačné úlohy, konkrétne predpoklady a detaily modelu siete hrajú významnú úlohu (viď prehľad známych výsledkov [61] alebo [62]). Model rádiovkej siete tak vzniká kombináciou rôznych komunikačných sce-

nárov. Najvýraznejší vplyv na efektívnosť riešenia komunikačných úloh má predpoklad o iniciálnej informácii uzla. Väčšina prác uvažuje jeden z dvoch najextrémnejších predpokladov. V prvom z nich je iniciálna informácia uzla tvorená len jeho jedinečným číselným identifikátorom. V tomto prípade hovoríme o *plne distribuovanom modeli*, resp. o *rádiovej sieti s neznámou topológiou*. Naopak v druhom z nich sa predpokladá, že každý uzol siete pozná celú topológiu siete (prislúchajúci graf dosiahnuteľnosti) ako časť svojej iniciálnej informácie. V tomto prípade hovoríme o *centralizovanom modeli*, resp. o *rádiovej sieti so známou topológiou*. Zvyšná časť prác (napr. [2, 23, 45]) sa venuje modelom, v ktorých uzol siete pozná topológiu siete len v nejakom svojom blízkom okolí. Prevažná časť dizertačnej práce sa zaoberá problémom broadcastingu v rádiových sieťach so známou topológiou - *centralizovaným broadcastingom*. Vzhľadom na úplnú znalosť topológie siete, v prípade centralizovaného broadcastingu môže byť rozvrh vysielaní pre jednotlivé uzly vypočítaný vopred. Keďže problém nájdenia časovo optimálneho broadcastovacieho rozvrhu pre rádiové siete je NP-ťažký [8, 65], cieľom je navrhnúť polynomiálny algoritmus generujúci čo najkratšie (najrýchlejšie) broadcastovacie rozvrhy. Všimnime si, že vzhľadom na znalosť topológie, pri centralizovanom generovaní rozvrhu je treba prekonať len jediný problém: základné charakteristiky rádiového vysielania, t.j. všesmerovosť vysielania a vznik interferencií pri súčasnom vysielaní. Ďalším predpokladom, ktorý zohráva veľký význam pri komunikácii v rádiových sieťach s neznámou topológiou, je predpoklad o schopnosti uzlov siete *detekovať kolízie*, t.j. rozlíšiť, či v okolí prijímacieho uzla nevysiela žiaden uzol (uzol v prijímacom režime počuje *šum prostredia*) alebo vysielajú aspoň 2 uzly (uzol v prijímacom režime počuje *interferenčný šum*).

Poznamenajme, že okrem štandardného grafového modelu rádiových sietí, sú skúmané aj iné modely rádiových sietí ako geometrické modely [23, 24, 29], či SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) model [39, 40, 44, 57, 60, 64]. V porovnaní s grafovým modelom, tieto modely sú založené na euklidovskej vzdialenosti medzi uzlami alebo pravdepodobnostnom modelovaní komunikačného prostredia. Treba poznamenať, že vo väčšine prípadov tieto modely modelujú komunikačné prostredie reálnych sietí vernejšie než grafový model. Avšak grafový model si aj vďaka svojej abstraktnosti a jednoduchosti (a tak lepšej analyzovateľnosti) získal obľubu v algoritmickej komunite.

2 Ciele práce

- Analýza známych výsledkov a algoritmov pre komunikačné úlohy v rádiových sieťach.
- Zlepšenie známych výsledkov a návrh nových algoritmov pre štandardné komunikačné primitívy v rádiových sieťach so špecifickou (odmedzenou) topológiou prislúchajúceho grafu dosiahnuteľnosti rádiovkej siete.
- Skúmanie komplexnejších komunikačných úloh (napr. výpočet agregáčnych funkcií) v rádiových sieťach aj za predpokladu doplňujúcich vlastností rádiovkej siete ako sú schopnosť uzlov detekovať kolízie, či špecifický graf dosiahnuteľnosti.
- Skúmanie modifikovaných modelov rádiových sietí, v ktorých vysielanie uzla spôsobuje interferenciu aj v takých uzloch, ktoré nie sú vo vysielacom dosahu uzla, t.j. skúmať prípad, kedy interferenčný a vysielací dosah uzla sú rôzne.

3 Hlavné výsledky dizertačnej práce

Výsledky dizertačnej práce uvedieme podľa ich členenia do kapitol práce, ktoré zodpovedajú jednotlivým cieľom práce.

3.1 Centralizovaný broadcasting v rádiových sieťach

V tejto kapitole skúmame problém broadcastingu v rádiových sieťach so známou topológiou. Zameriavame sa na broadcasting v sieťach, ktorých topológia je nejakým spôsobom obmedzená, t.j. prislúchajúci graf dosiahnuteľnosti rádiovkej siete patrí do nejakej triedy grafov. Východiskom tejto kapitoly je nami navrhnuté zovšeobecnenie broadcastovacieho algoritmu z práce [36]. Algoritmus je zovšeobecnený do formy schémy, ktorá je vhodná pre generovanie broadcastovacích rozvrhov pre ľubovoľné grafy dosiahnuteľnosti, ktoré patria do istej triedy grafov. Schéma pri generovaní rozvrhu využíva ako podprocedúru ľubovoľný algoritmus generujúci rozvrhy vysielaní, ktoré realizujú rozšírenie informácie v bipartitných grafoch dosiahnuteľnosti. Efektívnosť vygenerovaných rozvrhov vychádza zo skutočnosti, že využitá podprocedúra môže byť špecializovaná iba na bipartitné podgrafy určitej triedy grafov, vďaka čomu môže využiť ich špecifické vlastnosti. Táto schéma, okrem využitia pri štúdiu grafov dosiahnuteľnosti so špecifickou topológiou, zjednodušuje dôkazy a algoritmy niektorých známych výsledkov. V tejto kapitole skúmame komunikáciu v rádiových sieťach s planárnym a k -degenerovaným grafom dosiahnuteľnosti. Pre niektoré topológie podávame aj dolné odhady ukazujúce asymptotickú optimálnosť niektorých navrhnutých algoritmov. Hlavné výsledky prezentované v tejto kapitole sú:

- schéma generujúca rozvrhy rádiového broadcastingu s dĺžkou $D + O(\text{time}_b(G) \cdot \log n)$ kôl, kde $\text{time}_b(G)$ je maximálna dĺžka rozvrhu vygenerovaného algoritmom \mathcal{A}_b , ktorý realizuje rozšírenie informácie v bipartitnom podgrafe grafu G
- zjednodušený algoritmus generujúci broadcastovacie rozvrhy dĺžky $D + O(\Delta \cdot \log n)$ pre ľubovoľné grafy dosiahnuteľnosti a rozvrhy dĺžky $D + O(\log n)$ pre planárne grafy dosiahnuteľnosti
- dolné ohraničenia $2 \cdot \text{ecc}(s)$, $3/2 \cdot D$ a $D + \Omega(\log n)$ pre planárne grafy
- algoritmus generujúci broadcastovacie rozvrhy dĺžky $D + O_k(\log^2 n)$ kôl pre siete, ktorých graf dosiahnuteľnosti je k -degenerovaný.

3.2 Centralizovaná komunikácia v rádiových sieťach s interferenciou dlhšieho dosahu

Táto kapitola práce sa venuje komunikácii v novom, nami navrhnutom grafovom modeli rádiových sietí, v ktorom sa vysielací a interferenčný dosah uzla môžu líšiť. Tento model zovšeobecňuje štandardný grafový model rádiových sietí. Za účelom zachytenia prítomnosti a štruktúry interferenčných hrán definujeme nové parametre charakterizujúce rádiovú sieť. Výskum komunikácie v tomto interferenčnom modeli začíname štúdiom efektívnej komunikácie v bipartitných grafoch. Ako užitočný kombinatorický nástroj definujeme *interferenčné výberové množiny* a skúmame možnosti ich algoritmickej konštrukcie. Neskôr navrhujeme aj ďalšie algoritmy generujúce rozvrhy pre časovo a energeticky efektívne rozšírenie informácie v bipartitných grafoch. Tie sú následne využité ako základné stavebné kamene pre algoritmy generujúce broadcastovacie rozvrhy pre ľubovoľné

interferenčné grafy dosiahnuteľnosti. Podobne, ako v predchádzajúcej kapitole, prezentujeme schému, ktorá generuje broadcastovacie rozvrhy s využitím iného algoritmu pre rozšírenie informácie v bipartitných grafoch. V záverečnej časti tejto kapitoly podávame ďalší algoritmus, ktorý zoberúc do úvahy parameter zvaný interferenčná vzdialenosť v sieti generuje časovo a energeticky efektívne broadcastovacie rozvrhy. Tento algoritmus založený na clusteringu generuje broadcastovacie rozvrhy, v ktorých každý uzol siete vysiela nanajvyš v jednom kole. Hlavné výsledky tejto kapitoly práce sú:

- nový model rádiových sietí zovšeobecňujúci štandardný grafový model a modelujúci rádiové siete, v ktorých sa vysielač a interferenčný dosah uzlov líšia
- deterministický polynomiálny algoritmus generujúci interferenčné výberové množiny veľkosti $O((1 + r(\mathcal{F})) \cdot ((1 + \log(\Delta_{max}/\Delta_{min}))) \cdot \log |\mathcal{F}|)$, kde $r(\mathcal{F})$ je interferenčný pomer (lokálna miera interferencie) kolekcie \mathcal{F}
- algoritmus generujúci rozvrh vysielať pre rozšírenie informácie v bipartitných interferenčných grafoch dosiahnuteľnosti, v ktorom každý uzol vysiela nanajvyš raz a ktorého dĺžka je $O(\Delta^2)$, resp. $O(\Delta \cdot \log n)$ kôl
- všeobecná schéma generujúca broadcastovacie rozvrhy pre ľubovoľné interferenčné grafy dosiahnuteľnosti. Schéma vyúsťuje do algoritmov generujúcich broadcastovacie rozvrhy s nanajvyš 2 vysielaťmi každého uzla, ktorých dĺžky sú $O(\Delta \cdot D_T + \Delta^2 \cdot \log n)$ a $O(\Delta \cdot (D_T + \log^2 n))$ kôl
- algoritmus generujúci časovo a energeticky efektívne broadcastovacie rozvrhy s nanajvyš jedným vysielaťm každého uzla, ktorých dĺžka je $D_T + O(\Delta \cdot d_I(G) \cdot \log^4 n)$ kôl, kde $d_I(G)$ je interferenčná vzdialenosť v grafe G
- dolný odhad $ecc_T(s) + \Omega\left(\Delta \cdot \frac{\log n}{\log \Delta}\right)$ kôl pre čas broadcastingu v interferenčných grafoch dosiahnuteľnosti s interferenčnou vzdialenosťou 2.

Poznamenajme, že navrhnuté algoritmy ide využiť aj v sieťach modelovaných štandardným grafovým modelom. Dokonca v niektorých prípadoch vedú aj k zlepšeniu známych výsledkov pre štandardný grafový model.

3.3 Komplexnejšie komunikačné úlohy v rádiových sieťach s neznámou topológiou

Narozdiel predchádzajúcich 2 kapitol, v tejto záverečnej kapitole skúmame komunikáciu v rádiových sieťach, ktorých uzly nemajú žiadnu iníciaľnu informáciu o topológii siete, t.j. venujeme sa komunikácii v rádiových sieťach v plne distribuovanom modeli. Našu pozornosť upriamujeme na komunikačné úlohy, ktoré doposiaľ neboli predmetom samostatného výskumu. Konkrétne študujeme komplexnejšie komunikačné úlohy ako výpočet maximálnej hodnoty v sieti, výpočet neznámych parametrov siete, či výpočet mriežkových súradníc uzlov siete. V prvej časti tejto kapitoly sa venujeme komunikácii v symetrických rádiových sieťach s uzlami schopnými detekcie kolízií. Skúmame, ako vplýva možnosť zakódovať informáciu do detekovateľných kolízií na návrh rýchlych deterministických komunikačných protokolov, ktoré korektné pracujú dokonca aj v anonymných rádiových sieťach. Druhá časť tejto kapitoly sa naopak venuje sieťam bez možnosti detekcie kolízií, avšak za predpokladu, že topológiou (uzlom neznámeho) grafu dosiahnuteľnosti je

2-rozmerná mriežka. Prirodzene, uzly nepoznajú svoju pozíciu v mriežke. Za týchto predpokladov skonštruujeme časovo efektívne komunikačné protokoly realizujúce v tejto sieti broadcasting a výpočet súradníc uzlov siete. Hlavné výsledky predstavené v tejto kapitole sú:

- pre anonymné symetrické rádiové siete s možnosťou detekcie kolízií:
 - asymptoticky optimálny protokol, ktorý vypočíta excentricitu vyznačeného uzla s v čase $O(ecc(s))$ kôl
 - asymptoticky optimálny protokol, ktorý vypočíta vzdialenosť každého uzla siete k vyznačenému uzlu s v čase $O(ecc(s))$ kôl
 - asymptoticky optimálny protokol, ktorý vypočíta maximum Max spomedzi celočíselných hodnôt umiestnených v uzloch siete v čase $O(ecc(s) + \log Max)$ kôl, pričom s je uzol aktivujúci výpočet
- pre rádiové siete s mriežkovou topológiou
 - asymptoticky optimálny broadcastovací algoritmus pracujúci v čase $O(ecc(s) + \log N)$ kôl, kde N je horné ohraničenie maximálneho identifikátora prideleného nejakému uzlu siete
 - komunikačný protokol, ktorý vypočíta mriežkové súradnice uzlov siete v čase $O(ecc(s) + \log N)$ kôl.

Literatúra

- [1] N. Alon, A. Bar-Noy, N. Linial, and D. Peleg. A lower bound for radio broadcast. *J. Comput. Syst. Sci.*, 43(2):290–298, 1991.
- [2] R. Bar-Yehuda, O. Goldreich, and A. Itai. On the time-complexity of broadcast in multi-hop radio networks: An exponential gap between determinism and randomization. *J. Comput. Syst. Sci.*, 45(1):104–126, 1992.
- [3] P. Berenbrink, C. Cooper, and Z. Hu. Energy efficient randomised communication in unknown adhoc networks. In P. B. Gibbons and C. Scheideler, editors, *SPAA*, pages 250–259. ACM, 2007.
- [4] J.-C. Bermond, J. Galtier, R. Klasing, N. Morales, and S. Pérennes. Hardness and approximation of gathering in static radio networks. *Parallel Processing Letters*, 16(2):165–183, 2006.
- [5] A. D. Bonis, L. Gasieniec, and U. Vaccaro. Generalized framework for selectors with applications in optimal group testing. In J. C. M. Baeten, J. K. Lenstra, J. Parrow, and G. J. Woeginger, editors, *ICALP*, volume 2719 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 81–96. Springer, 2003.
- [6] M. Borowiecki, I. Broere, M. Frick, P. Mihók, and G. Semanišin. Survey of hereditary properties of graphs. *Discuss. Math. Graph Theory*, 17:5–50, 1997.
- [7] D. Bruschi and M. D. Pinto. Lower bounds for the broadcast problem in mobile radio networks. *Distributed Computing*, 10(3):129–135, 1997.
- [8] I. Chlamtac and S. Kutten. On broadcasting in radio networks - problem analysis and protocol design. *COM-33(12)*:1240–1246, 1985.
- [9] I. Chlamtac and O. Weinstein. The wave expansion approach to broadcasting in multihop radio networks. *COM-39(3)*:426–433, 1991.
- [10] B. S. Chlebus, L. Gasieniec, A. Gibbons, A. Pelc, and W. Rytter. Deterministic broadcasting in unknown radio networks. In *SODA*, pages 861–870, 2000.
- [11] B. S. Chlebus and D. R. Kowalski. Almost optimal explicit selectors. In M. Liskiewicz and R. Reischuk, editors, *FCT*, volume 3623 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 270–280. Springer, 2005.
- [12] B. S. Chlebus, D. R. Kowalski, and M. A. Rokicki. Average-time complexity of gossiping in radio networks. In P. Flocchini and L. Gasieniec, editors, *SIROCCO*, volume 4056 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 253–267. Springer, 2006.
- [13] B. S. Chlebus and M. A. Rokicki. Asynchronous broadcast in radio networks. In Královič and Sýkora [50], pages 57–68.
- [14] M. Christersson, L. Gasieniec, and A. Lingas. Gossiping with bounded size messages in ad hoc radio networks. In P. Widmayer, F. T. Ruiz, R. M. Bueno, M. Hennesy, S. Eidenbenz, and R. Conejo, editors, *ICALP*, volume 2380 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 377–389. Springer, 2002.
- [15] M. Chrobak, L. Gasieniec, and W. Rytter. Fast broadcasting and gossiping in radio networks. *J. Algorithms*, 43(2):177–189, 2002.

- [16] M. Chrobak and T. H. Payne. A linear-time algorithm for drawing a planar graph on a grid. *Inf. Process. Lett.*, 54(4):241–246, 1995.
- [17] F. Cicalese, F. Manne, and Q. Xin. Faster centralized communication in radio networks. In S. K. Madria, K. T. Claypool, R. Kannan, P. Uppuluri, and M. M. Gore, editors, *ISAAC*, volume 4317 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 339–348. Springer, 2006.
- [18] A. E. F. Clementi, P. Crescenzi, A. Monti, P. Penna, and R. Silvestri. On computing ad-hoc selective families. In M. X. Goemans, K. Jansen, J. D. P. Rolim, and L. Trevisan, editors, *RANDOM-APPROX*, volume 2129 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 211–222. Springer, 2001.
- [19] A. E. F. Clementi, A. Monti, and R. Silvestri. Distributed multi-broadcast in unknown radio networks. In *PODC*, pages 255–264, 2001.
- [20] A. E. F. Clementi, A. Monti, and R. Silvestri. Selective families, superimposed codes, and broadcasting on unknown radio networks. In *SODA*, pages 709–718, 2001.
- [21] T. Cormen, C. Leiserson, and R. Rivest. *Introduction to Algorithms*, chapter Section 8.2: Counting sort, page 168–170. The MIT Press, Cambridge, MA, 1990.
- [22] A. Czumaj and W. Rytter. Broadcasting algorithms in radio networks with unknown topology. In *FOCS*, pages 492–501. IEEE Computer Society, 2003.
- [23] A. Dessmark and A. Pelc. Tradeoffs between knowledge and time of communication in geometric radio networks. In *SPAA*, pages 59–66, 2001.
- [24] A. Dessmark and A. Pelc. Broadcasting in geometric radio networks. *Journal of Discrete Algorithms*, (5):187–201, 2007.
- [25] K. Diks, E. Kranakis, D. Krizanc, and A. Pelc. The impact of knowledge on broadcasting time in radio networks. In J. Nešetřil, editor, *ESA*, volume 1643 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 41–52. Springer, 1999.
- [26] M. Elkin and G. Kortsarz. Logarithmic inapproximability of the radio broadcast problem. *J. Algorithms*, 52(1):8–25, 2004.
- [27] M. Elkin and G. Kortsarz. Improved schedule for radio broadcast. In *SODA*, pages 222–231. SIAM, 2005.
- [28] R. Elsässer and L. Gąsieniec. Radio communication in random graphs. *J. Comput. Syst. Sci.*, 72(3):490–506, 2006.
- [29] Y. Emek, L. Gąsieniec, E. Kantor, A. Pelc, and D. Peleg. Upper bounds on broadcasting time in udg radio networks with unknown topology. Technical report, Computer Science and Applied Mathematics, Weizmann Institute of Science, Israel, 2006.
- [30] G. Fertin, E. Godard, and A. Raspaud. Acyclic and k-distance coloring of the grid. *Inf. Process. Lett.*, 87(1):51–58, 2003.
- [31] I. Gaber and Y. Mansour. Centralized broadcast in multihop radio networks. *J. Algorithms*, 46(1):1–20, 2003.

- [32] F. Galčík. Complexity aspects of radio networks. Master's thesis, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University in Bratislava, Slovakia, 2005.
- [33] L. Gašieniec, E. Kantor, D. R. Kowalski, D. Peleg, and C. Su. Time efficient k-shot broadcasting in known topology radio networks. *Distributed Computing*, 21(2):117–127, 2008.
- [34] L. Gašieniec and A. Lingas. On adaptive deterministic gossiping in ad hoc radio networks. *Inf. Process. Lett.*, 83(2):89–93, 2002.
- [35] L. Gašieniec, A. Pagourtzis, and I. Potapov. Deterministic communication in radio networks with large labels. In R. H. Möhring and R. Raman, editors, *ESA*, volume 2461 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 512–524. Springer, 2002.
- [36] L. Gašieniec, D. Peleg, and Q. Xin. Faster communication in known topology radio networks. In M. K. Aguilera and J. Aspnes, editors, *PODC*, pages 129–137. ACM, 2005.
- [37] L. Gašieniec, I. Potapov, and Q. Xin. Time efficient gossiping in known radio networks. In Kráľovič and Sýkora [50], pages 173–184.
- [38] L. Gašieniec, T. Radzik, and Q. Xin. Faster deterministic gossiping in directed ad hoc radio networks. In T. Hagerup and J. Katajainen, editors, *SWAT*, volume 3111 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 397–407. Springer, 2004.
- [39] O. Goussevskaia, T. Moscibroda, and R. Wattenhofer. Local broadcasting in the physical interference model. In M. Segal and A. Kesselman, editors, *DIALM-POMC*, pages 35–44. ACM, 2008.
- [40] P. Gupta and P. R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2):388–404, 2000.
- [41] J. Hopcroft and R. Tarjan. Efficient planarity testing. *J. ACM*, 21(4):549–568, 1974.
- [42] P. Indyk. Explicit constructions of selectors and related combinatorial structures, with applications. In *SODA*, pages 697–704, 2002.
- [43] C.-Y. Koo, V. Bhandari, J. Katz, and N. H. Vaidya. Reliable broadcast in radio networks: the bounded collision case. In *PODC '06: Proceedings of the twenty-fifth annual ACM symposium on Principles of distributed computing*, pages 258–264, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.
- [44] K. Kothapalli, C. Scheideler, M. Onus, and A. W. Richa. Constant density spanners for wireless ad-hoc networks. In P. B. Gibbons and P. G. Spirakis, editors, *SPAA*, pages 116–125. ACM, 2005.
- [45] D. R. Kowalski and A. Pelc. Deterministic broadcasting time in radio networks of unknown topology. In *FOCS*, pages 63–72. IEEE Computer Society, 2002.
- [46] D. R. Kowalski and A. Pelc. Broadcasting in undirected ad hoc radio networks. In *PODC*, pages 73–82, 2003.
- [47] D. R. Kowalski and A. Pelc. Faster deterministic broadcasting in ad hoc radio networks. In H. Alt and M. Habib, editors, *STACS*, volume 2607 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 109–120. Springer, 2003.

- [48] D. R. Kowalski and A. Pelc. Centralized deterministic broadcasting in undirected multi-hop radio networks. In K. Jansen, S. Khanna, J. D. P. Rolim, and D. Ron, editors, *APPROX-RANDOM*, volume 3122 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 171–182. Springer, 2004.
- [49] D. R. Kowalski and A. Pelc. Optimal deterministic broadcasting in known topology radio networks. *Distributed Computing*, 19(3):185–195, 2007.
- [50] R. Kráľovič and O. Sýkora, editors. *Structural Information and Communication Complexity, 11th International Colloquium, SIROCCO 2004, Smolenice Castle, Slovakia, June 21-23, 2004, Proceedings*, volume 3104 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2004.
- [51] E. Kranakis, D. Krizanc, and A. Pelc. Fault-tolerant broadcasting in radio networks. *J. Algorithms*, 39(1):47–67, 2001.
- [52] D. Lick and A. White. k -degenerate graphs. *Canad. J. Math*, 22:1082–1096, 1970.
- [53] F. Manne, S. Wang, and Q. Xin. Faster radio broadcasting in planar graphs. In *4th Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services*, 2007.
- [54] G. D. Marco. Distributed broadcast in unknown radio networks. In S.-H. Teng, editor, *SODA*, pages 208–217. SIAM, 2008.
- [55] G. D. Marco and A. Pelc. Faster broadcasting in unknown radio networks. *Inf. Process. Lett.*, 79(2):53–56, 2001.
- [56] C. U. Martel. Maximum finding on a multiple access broadcast network. *Inf. Process. Lett.*, 52(1):7–15, 1994.
- [57] T. Muetze, P. Stuedi, F. Kuhn, and G. Alonso. Understanding radio irregularity in wireless networks. In *SECON*, pages 82–90. IEEE, 2008.
- [58] K. Nakano and S. Olariu. *Handbook of wireless networks and mobile computing*, chapter Leader election protocols for radio networks, pages 219–242. In Stojmenovic [66], 2002.
- [59] T. Okuwa, W. Chen, and K. Wada. An optimal algorithm of acknowledged broadcasting in ad hoc radio networks. In *ISPDC*, pages 178–184. IEEE Computer Society, 2003.
- [60] M. Onus, A. W. Richa, K. Kothapalli, and C. Scheideler. Efficient broadcasting and gathering in wireless ad-hoc networks. In *ISPAN*, pages 346–351. IEEE Computer Society, 2005.
- [61] A. Pelc. *Handbook of wireless networks and mobile computing*, chapter Broadcasting in radio networks, pages 509–528. In Stojmenovic [66], 2002.
- [62] D. Peleg. Time-efficient broadcasting in radio networks: A review. In T. Janowski and H. Mohanty, editors, *ICDCIT*, volume 4882 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–18. Springer, 2007.
- [63] L. Petrú and J. Wiedermann. A model of an amorphous computer and its communication protocol. In J. van Leeuwen, G. F. Italiano, W. van der Hoek, C. Meinel, H. Sack, and F. Plasil, editors, *SOFSEM*, volume 4362 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 446–455. Springer, 2007.

- [64] C. Scheideler, A. W. Richa, and P. Santi. An $o(\log n)$ dominating set protocol for wireless ad-hoc networks under the physical interference model. In X. Jia, N. B. Shroff, and P.-J. Wan, editors, *MobiHoc*, pages 91–100. ACM, 2008.
- [65] A. Sen and M. L. Huson. A new model for scheduling packet radio networks. *Wireless Networks*, 3(1):71–82, 1997.
- [66] I. Stojmenovic, editor. *Handbook of wireless networks and mobile computing*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2002.
- [67] A. N. Strahler. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 63:1117–1142, 1952.
- [68] X. G. Viennot. A strahler bijection between dyck paths and planar trees. *Discrete Mathematics*, 246(1-3):317–329, 2002.
- [69] D. Welsh and M. Powell. An upper bound for the chromatic number of a graph and its application to timetabling problems. *The Computer Journal* 10, 1(10):85–86, 1967.
- [70] Q. Xin. *Time Efficient Communication in Multi-hop Radio Networks*. PhD thesis, Department of Computer Science, The University of Liverpool, United Kingdom, 2004.

Autorove publikácie chronologicky

- [A] F. Galčík and G. Semanišin, *Centralized broadcasting in radio networks with k -degenerate reachability graphs*, ITAT 2006 Information Technologies - Applications and Theory, Bystrá dolina, Slovakia, 26.9.- 1.10.2006, (2006), pp. 41-46.
- [B] F. Galčík and G. Semanišin, *Maximum finding in the symmetric radio networks with collision detection*, SOFSEM 2007: Theory and Practice of Computer Science, Harrachov, Czech Republic, January 20-26, 2007, LNCS 4362 , (2007), pp. 284-294.
- [C] F. Galčík, *On radio communication in grid networks*, ITAT 2007 Information Technologies - Applications and Theory, Poľana, Slovakia, 21.9.- 27.9.2007, (2007), pp. 47-54.
- [D] F. Galčík, *Centralized communication in radio networks with strong interference*, SIROCCO 2008: 15th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, Villars-sur-Ollon, Switzerland, June 17-20, 2008, LNCS 5058, (2008), pp. 277-290.
- [E] F. Galčík, *A note on the lower bound of centralized radio broadcasting for planar reachability graphs*, Discrete Applied Mathematics, Volume 157, Issue 4, (2009), pp. 853-857.
- [F] F. Galčík, L. Gąsieniec, and A. Lingas, *Efficient broadcasting in known topology radio networks with long-range interference*, accepted to PODC 2009: 28th Annual ACM SIGACT-SIGOPS Symposium on Principles of Distributed Computing, Canada, August 10-12, 2009.

Citácie

F. Galčík and G. Semanišin, *Maximum finding in the symmetric radio networks with collision detection*, SOFSEM 2007: Theory and Practice of Computer Science, Harrachov, Czech Republic, January 20-26, 2007, LNCS 4362 , (2007), pp. 284-294.

citovaná v

- N. Mittal, S. Krishnamurthy, R. Chandrasekaran, S. Venkatesan, and Y. Zeng, *On neighbor discovery in cognitive radio networks*, Journal of Parallel and Distributed Computing, In Press, Corrected Proof:–, 2009.

Summary

The thesis is devoted to complexity and algorithmical aspects of communication in multi-hop radio networks modelled by graph-based models. Primary focus is on scenarios (topologies, models, and communication tasks) that have not been in the center of attention of the research community. We investigate how restricted topology of radio networks can help to design more efficient communication algorithms and protocols in both centralized and distributed settings. Time, the number of rounds required to accomplish a communication task, is considered as the main efficiency criterion. However, the majority of proposed algorithms are designed in such a way that minimizes the number of transmissions per node, i.e., the energy consumption is considered as another efficiency criterion.

We deal with intensively investigated centralized broadcasting in the case when an underlying reachability graph belongs to a certain graph class (e.g., class of planar graphs, class of k -degenerate graphs, etc.). In the fully distributed setting, we consider radio broadcasting in networks with the grid topology. Although, we deal with special topologies, some results are directly related to broadcasting in radio networks with arbitrary topology. Moreover, in the fully distributed setting with nodes capable of collision detection, we explore the concept of encoding information into collisions. We focus on more complex communication tasks like maximum finding and computation of some network parameters as well.

The standard graph model of radio networks adopted by the algorithmic community is often criticized due to its simplifications that do not reflect communication environment of some real-world radio networks properly. In order to treat this problem, we propose a new graph-based model of radio networks that generalizes the standard graph model. The new model is based on the concept of interference reachability graphs that allow to model radio networks with long-range interference, i.e., radio networks where interference range of a node exceeds its transmission range. We study how presence of long-range interference influences time efficiency of centralized broadcasting. As a result, we design several algorithms generating radio broadcasting schedules for radio networks of arbitrary topology with long-range interference.