



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI
Katedra Sieci Telekomunikacyjnych i Komputerowych

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Badania algorytmów heurystycznych dla połączeń rozgałęźnych w sieciach pakietowych

Maciej Piechowiak

Promotor:

prof. dr hab. inż. Maciej Stasiak

Poznań 2010

1 Wprowadzenie

W zagadnieniach routingu dla połączeń rozgałęźnych (ang. *multicast routing*) rozważany jest efektywny sposób transmisji między danym węzłem sieci (źródło ruchu) i określoną grupą odbiorców. Efektywność oznacza w tym przypadku minimalizację wykorzystania zasobów sieciowych w trakcie transmisji, przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganych parametrów jakościowych (np. przepływność, opóźnienie, koszt połączenia).

Model komunikacyjny dla połączeń rozgałęźnych (ang. *multicast connections*) pozwala na redukcję ruchu poprzez przekazywanie pojedynczych pakietów przez routery od nadawcy do gałęzi, w których znajdują się hosty zainteresowane odbiorem danych. Taki model komunikacyjny wymaga zastosowania specjalnych algorytmów routingu. Algorytmy te budują w sieci drzewa dystrybucyjne (zwane także drzewami typu *multicast*), służące do transportu pakietów w sieci. Koncepcja routingu rozgałęźnego wyróżnia drzewa typu *multicast* ze wspólnym rdzeniem (ang. *core-based trees*) oraz drzewa współdzielone (ang. *shared trees*).

Optymalizacja komunikacji typu *multicast* polega na konstrukcji efektywnych algorytmów routingu, których zadaniem jest budowa drzewa dystrybucyjnego o minimalnym koszcie między węzłem-nadawcą a grupą węzłów odbiorczych. Taki sposób komunikacji zapobiega nadmiernemu zwielokrotnianiu pakietów w sieci – wysyłane dane docierają tylko do tych węzłów (routerów), które są bezpośrednio połączone ze zdefiniowaną grupą odbiorców, tzw. członkami grupy *multicast*.

Konstrukcja drzewa łączącego nadawcę z grupą odbiorców w sieci, uwzględniająca odpowiednie parametry jakościowe transmisji, jest przedstawiana jako problem optymalizacyjny w grafie, zwany problemem Steinera (wierzchołki grafu reprezentują węzły sieci, natomiast krawędzie – łącza). Samo drzewo określa się natomiast jako minimalne drzewo Steinera. Z uwagi na złożoność czasową i obliczeniową problemu, który jest \mathcal{NP} -zupełny, w literaturze przedmiotu można znaleźć szereg rozwiązań heurystycznych. Na podstawie tych algorytmów konstruuje się drzewa rozgałęźne poprzez optymalizację jednego kryterium (bez ograniczeń) oraz poprzez uwzględnienie drugiego kryterium ograniczającego (najczęściej opóźnienia reprezentującego wymagania jakościowe transmisji).

Celem rozprawy doktorskiej było zaproponowanie nowych, efektywnych algorytmów heurystycznych dla realizacji połączeń rozgałęźnych w sieciach pakietowych oraz opracowanie skutecznej metodologii badań porównawczych algorytmów routingu rozgałęźnego.

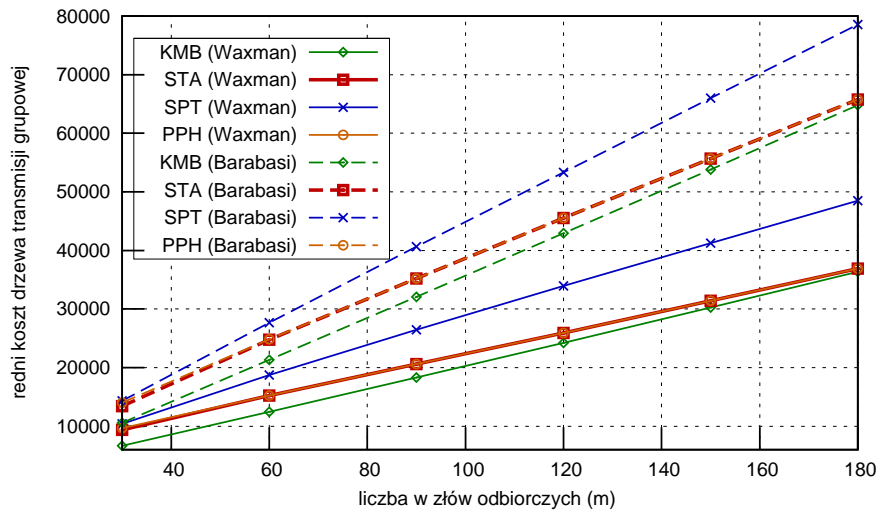
2 Algorytmy routingu rozgałęźnego bez ograniczeń

Metody heurystyczne mają szerokie zastosowanie w zagadnieniach routingu rozgałęźnego, przede wszystkim z powodu akceptowalnej złożoności obliczeniowej. Algorytmy heurystyczne nie gwarantują znalezienia rozwiązania dokładnego, jednak właściwy dobór metod optymalizacyjnych (w których najczęściej stosowane są algorytmy Dijkstry i Prima) pozwala wyznaczać drzewa transmisji grupowej o minimalnych kosztach w akceptowalnym czasie. Zastosowanie w algorytmach heurystycznych odpowiednich uproszczeń i powtarzalnych procedur pozwala ograniczyć zbiór przeszukiwanych stanów. W przypadku routingu rozgałęźnego ograniczeniu podlega zbiór możliwych ścieżek wchodzących w skład drzewa transmisji grupowej.

Algorytmy heurystyczne można podzielić na dwie kategorie: algorytmy konstruujące drzewa o minimalnych kosztach oraz algorytmy konstruujące drzewa, w których koszty ścieżek między węzłem źródłowym, a każdym z węzłów odbiorczych są minimalne.

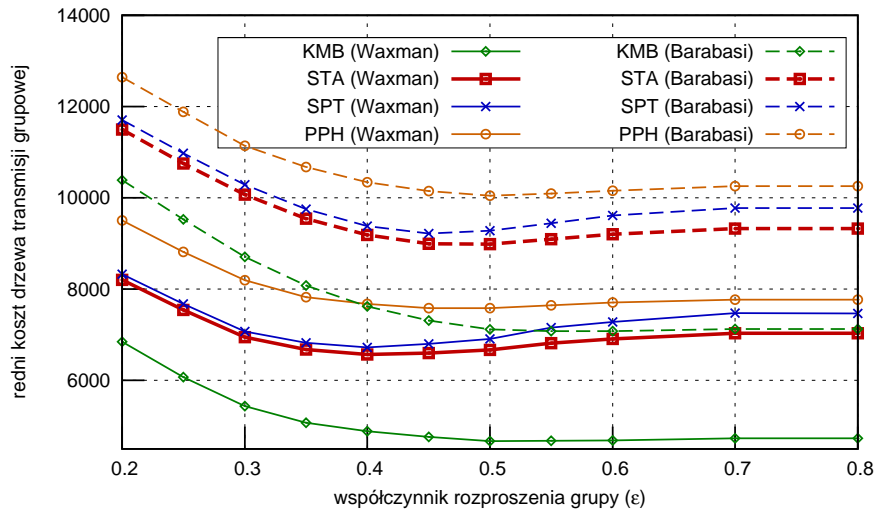
W rozprawie przedstawiono rozwiązania reprezentatywne dla obydwu kategorii: algorytm PPH (ang. *Pruned Prim Heuristic*), KMB (ang. *Kou, Markovsky, Bermann*), DDMC (ang. *Destination-Driven MultiCast*), PDH (ang. *Pruned Dijkstra Heuristic*) oraz algorytm SPT (ang. *Shortest Path Tree*). Na podstawie algorytmów SPT i PPH zaproponowany został własny algorytm heurystyczny STA (ang. *Switched Tree Algorithm*). Algorytm ten konstruuje drzewa transmisji grupowej o mniej-

szych kosztach niż algorytm SPT. Jego efektywność jest szczególnie widoczna w sieciach o dużej wartości parametru *gęstości grupy* (punkt 4).



Rysunek 1: Zależność średniego kosztu drzewa transmisji grupowej od liczby węzłów odbiorczych m (parametry sieci: $n = 200$, $D_{av} = 4$)

Wysoka efektywność algorytmu STA jest szczególnie widoczna na rys. 1 (n – liczba wierzchołków grafu, m – liczba wierzchołków odbiorczych, D_{av} – stopień grafu). Zbieżność wyników algorytmów STA i KMB dla dużej liczby węzłów odbiorczych występuje w sieciach generowanych na podstawie obydwu rozważanych modeli: Waxmana i Barabási-Alberta (opisanych w punkcie 4). Wzrost liczby węzłów odbiorczych powoduje wzrost średniego kosztu konstruowanych drzew (przy założeniu stałej liczby węzłów sieci). Wzrost ten ma charakter liniowy.



Rysunek 2: Zależność średniego kosztu drzewa transmisji grupowej od współczynnika rozproszenia grupy ϵ_m (parametry sieci: $n = 200$, $m = 20$, $D_{av} = 4$)

Przy założonych parametrach sieci zmniejszenie współczynnika rozproszenia grupy do wartości 0,2 powoduje wzrost średniego kosztu drzewa o 60% w przypadku modelu Waxmana i 48% w przypadku metody Barabási-Alberta (rys. 2). Dla proponowanego algorytmu STA różnica ta wynosi 27%. Minimalne koszty drzew generowanych przez algorytm STA otrzymuje się dla współczynnika rozproszenia grupy z przedziału od 0,4 do 0,45.

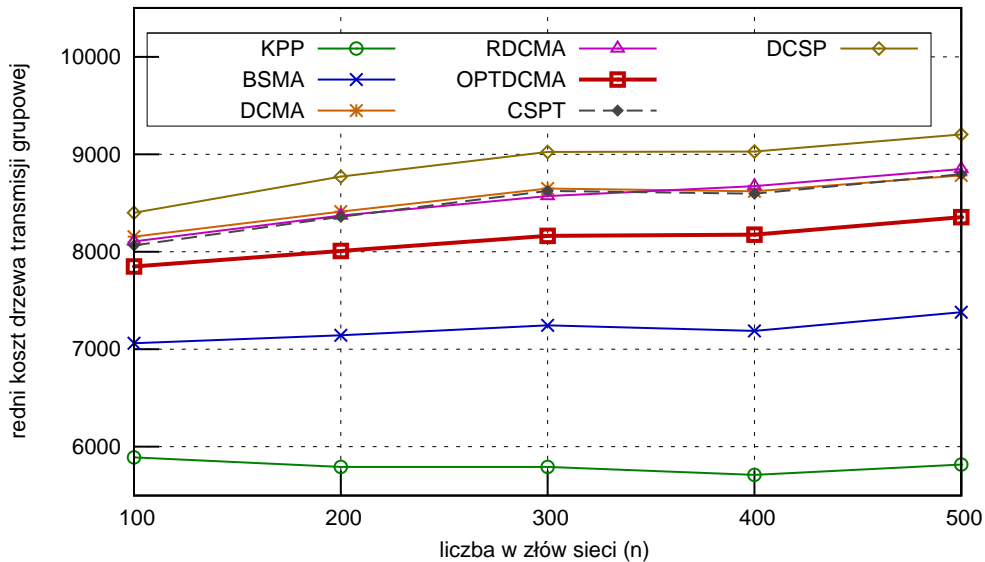
3 Algoritmy routingu rozgałęźnego z ograniczeniem

Działanie algorytmów z ograniczeniem (ang. *constrained algorithms*) polega na rozwiązaniu problemu DCLC (ang. *Delay Constrained Least Cost*), czyli znalezieniu minimalnego kosztu ścieżki (lub w przypadku wielu węzłów odbiorczych – drzewa) przy dodatkowym założeniu, że opóźnienie wzdłuż całej ścieżki nie przekroczy ustalonej wartości (Δ).

Problem DCLC jest problemem \mathcal{NP} -zupełnym. Istnieje jednak wiele algorytmów heurystycznych, które rozwiązują ten problem w czasie wielomianowym. Najważniejsze ujęto w rozprawie: algorytm KPP (ang. *Kompella, Pasquale, Polyzos*), CAO (ang. *Constrained Adaptive Ordering*), BSMA (ang. *Bounded Shortest Multicast Algorithm*), CDKS (ang. *Constrained DiJKStra heuristics*) oraz algorytm DCSP (ang. *Delay Constrained Shortest Path Multicast Algorithm*).

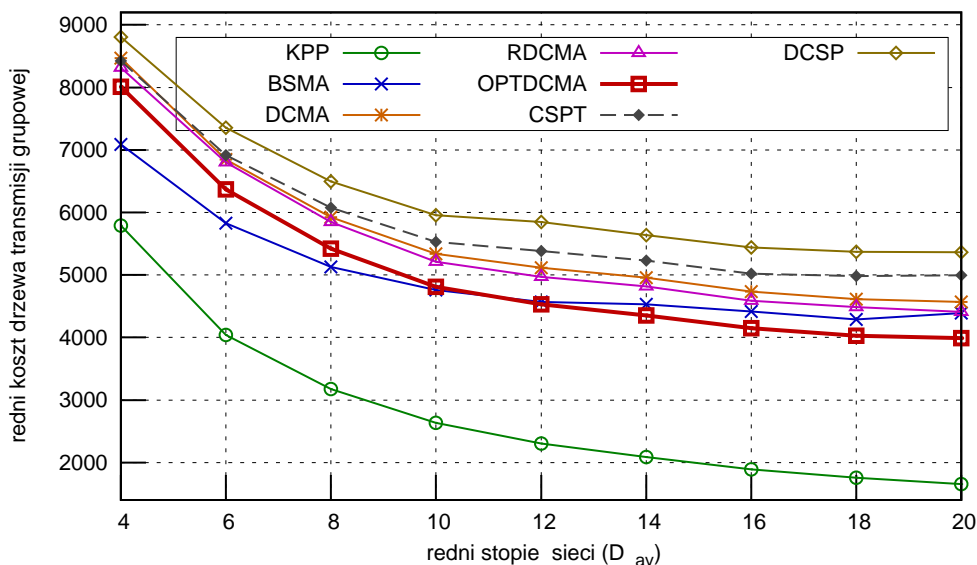
W rozprawie zaproponowano własny algorytm MLRA (ang. *Multicast Lagrange Relaxation Algorithm*), którego celem jest wyznaczenie drzewa najkrótszych ścieżek pomiędzy węzłem nadawczym, a każdym z węzłów odbiorczych. Koncepcja proponowanego algorytmu zakłada wyznaczenie najkrótszych ścieżek z wykorzystaniem relaksacji Lagrange’a. Kolejno wyznaczane ścieżki dodawane są do tworzonego drzewa.

Kolejnym zaproponowanym w rozprawie algorytmem jest KSPMA (ang. *K-Shortest Path Multicast Algorithm*), który pozwala na wyznaczenie drzewa najkrótszych ścieżek pomiędzy węzłem nadawczym a każdym z węzłów odbiorczych. Algorytm KSPMA wykorzystuje uogólniony algorytm Dijkstry (*K*-najkrótszych ścieżek) w celu wyznaczenia najkrótszych ścieżek w drzewie. Jeżeli przynajmniej jedna z dodawanych ścieżek nie spełnia wymagań dotyczących opóźnienia Δ , to drzewo multicast nie zostanie zbudowane.



Rysunek 3: Zależność średniego kosztu drzewa transmisji grupowej od liczby węzłów sieci n wygenerowanych na podstawie modelu Waxmana (parametry sieci: $m = 20$, $D_{av} = 4$, $\Delta = 2000$)

Algorytm heurystyczny RDCMA (ang. *Reverse DCMA*) jest własną modyfikacją prezentowanego w rozprawie algorytmu DCMA. Algorytm heurystyczny RDCMA wyznacza drzewo o minimalnym koszcie i maksymalnym opóźnieniu Δ , wyznaczając ścieżki łączące wierzchołek źródłowy z każdym z wierzchołków odbiorczych. W przeciwieństwie do algorytmu DCMA, poszukiwanie ścieżki rozpoczyna się w węźle odbiorczym i prowadzone jest w kierunku węzła nadawczego wzdłuż ścieżki o minimalnym koszcie. Proces optymalizacyjny polega na wyznaczeniu ścieżki o minimalnym koszcie z uwzględnieniem maksymalnej wartości opóźnienia Δ .



Rysunek 4: Zależność średniego kosztu drzewa transmisji grupowej od średniego stopnia sieci D_{av} wygenerowanych na podstawie modelu Waxmana (parametry sieci: $n = 200$, $m = 20$, $\Delta = 2000$)

Na podstawie algorytmów DCMA i RDCMA zaproponowano własny algorytm heurystyczny OPTDCMA (ang. *Optimal DCMA*), którego zadaniem jest wybór drzew o najmniejszych kosztach spośród drzew konstruowanych przez obydwa algorytmy heurystyczne. Działanie algorytmu OPTDCMA wynika z obserwacji, że nie zawsze koszty konstruowanych przez algorytm RDCMA drzew są niższe od kosztów drzew wyznaczanych przez algorytm heurystyczny DCMA.

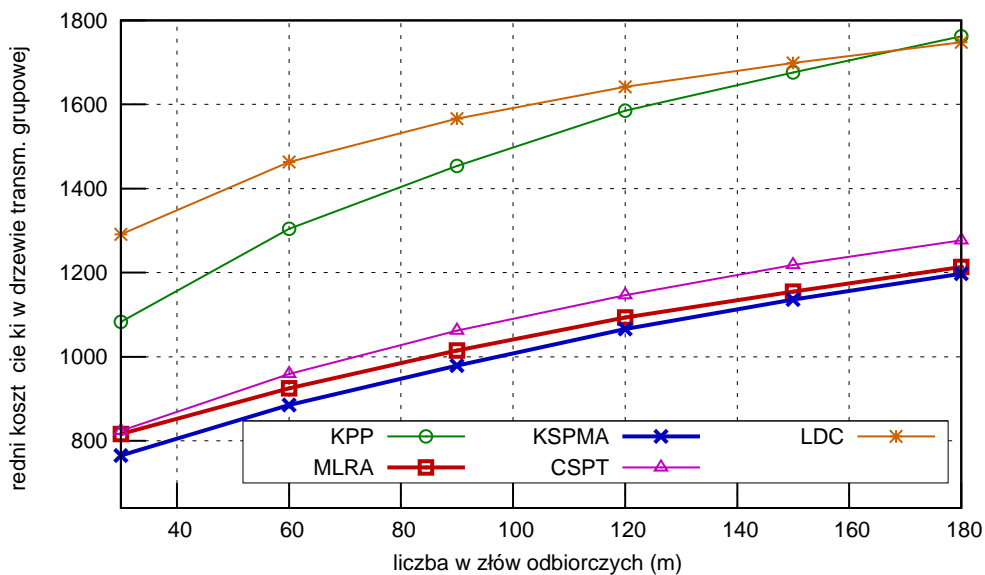
Proponowany algorytm OPTDCMA konstruuje drzewa, których koszt jest o 46% wyższy w stosunku do kosztów drzew konstruowanych przez algorytm KPP i 44% w stosunku do kosztów drzew konstruowanych przez algorytm BSMA dla $n = 400$ (rys. 3). Drzewa te charakteryzują się średnim kosztem o 9,5% mniejszym od kosztów drzew realizowanych przez algorytm DCMA i o 13% mniejszym od rezultatów algorytmu DCSP.

W eksperymentach symulacyjnych badano również zależność wyników otrzymanych na podstawie algorytmów heurystycznych od gęstości sieci, mierzonej parametrem *średniego stopnia grafu* D_{av} . Takie podejście pozwala oszacować efektywność algorytmów w sieciach o strukturze różnej od struktury sieci Internet, dla której D_{av} zawiera się w przedziale od 3 do 5. Powyżej wartości $D_{av} = 12$ proponowany algorytm OPTDCMA charakteryzuje się kosztami konstruowanych drzew większymi jedynie od kosztów otrzymanych na podstawie algorytmu KPP.

Wzrost liczby węzłów odbiorczych m przy stałej liczbie węzłów sieci n powoduje wzrost średniego kosztu ścieżek w drzewach (rys. 5). W przedziale m od 30 do 180 koszty drzew budowanych przez algorytm KPP wzrastają o 64%, podczas gdy w przypadku algorytmów MLRA i KSPMA – tylko o ok. 40% (dla modelu Waxmana). Algorytm KSPMA charakteryzuje się najlepszą efektywnością w sensie kosztów konstruowanych drzew. Różnice między KSPMA i klasycznym algorytmem CSPT to ok. 5–10% w całym przedziale zmienności parametru m (przy zastosowaniu sieci otrzymanych na podstawie modelu Barabási-Alberta).

4 Metodologia badań

Rzetelna analiza algorytmów routingu dla połączeń rozgałęźnych wymaga opracowania odpowiedniej metodologii badań symulacyjnych. Powinna ona uwzględniać, poprzez analizę porównawczą, następujące elementy:



Rysunek 5: Zależność średniego kosztu ścieżki w drzewie transmisji grupowej od liczby węzłów odbiorczych m w sieciach wygenerowanych na podstawie modelu Waxmana (parametry sieci: $n = 200$, $D_{av} = 4$, $\Delta = 2000$)

- zbiór wyników zwracanych przez algorytm heurystyczny, (Zbiór wyników, np. koszt drzewa, koszt ścieżki w drzewie, określa parametry jakościowe drzew multicast i jest głównym kryterium ich oceny).
- parametry algorytmu heurystycznego, (Algorytm pobiera dane w ustalonym formacie reprezentujące sieć teleinformatyczną (np. reprezentacja grafu G przez macierz sąsiedztwa). Następnie konstruuje w niej drzewo dystrybucyjne i zwraca zbiór wyników. Algorytm pobiera również liczbę m i zbiór węzłów odbiorczych M . W przypadku algorytmów z ograniczeniem parametrem jest również maksymalna wartość opóźnienia Δ).
- sposób generowania topologii sieci, (Metoda generowania sieci określa sposób rozmieszczenia węzłów na płaszczyźnie, sposób łączenia węzłów sieci w spójną strukturę oraz sposób generowania parametrów łączy (metryk). Podstawowym parametrem topologii jest liczba węzłów sieci n . Każda metoda posiada własne parametry. Przykładowo w modelu Waxmana definiowane są parametry α i β , które wpływają na liczbę krawędzi w grafie reprezentującym sieć).
- sposób rozmieszczenia węzłów multicast w sieci, (Odpowiednia metoda rozmieszczania węzłów odbiorczych pozwala skonstruować zbiór M , zawierający indeksy węzłów stanowiących grupę multicast w danej sieci. Węzły mogą być wybierane w sposób losowy lub na podstawie innych parametrów sieci, np. stopnia węzła).
- parametry symulacji. (Podstawowym parametrem jest liczba symulowanych sieci N . Badany algorytm konstruuje drzewa multicast w N różnych sieciach).

Współczesny Internet jest zbiorem połączonych ze sobą domen, czyli zgrupowanych węzłów sieci (routerów). Są one objęte wspólną administracją i współdzielą informacje dotyczące routingu. Internet składa się z tysięcy domen administracyjnych, z których każda zawiera przynajmniej jeden system

autonomiczny (AS). Budowa sieci Internet pozwala, z pewnymi uproszczeniami, na reprezentację jej struktury za pomocą grafu. W rozprawie wykorzystano dwie metody generowania grafów losowych modelujących właściwości rzeczywistej sieci.

Metoda Waxmana zakłada rozmieszczenie grafu losowego na płaszczyźnie kwadratowej, a krawędzie są dodawane do grafu z prawdopodobieństwem będącym funkcją odległości między jego wierzchołkami. Parametry α i β metody wpływają na liczbę krawędzi w grafie oraz na stosunek liczby krawędzi długich do krótkich.

W metodzie Barabási-Alberta założono dwie przyczyny występowania zależności potęgowej (ang. *power laws*) w rozkładzie liczby krawędzi wychodzących z danego wierzchołka: stopniowy wzrost sieci oraz preferencyjne przyłączanie. Wzrost sieci wynika z przyłączania nowych wierzchołków do istniejącej struktury, co powoduje stopniowe zwiększanie rozmiaru sieci. Przyłączanie nowych krawędzi odbywa się w sposób preferencyjny, tj. nowy wierzchołek połączy się z większym prawdopodobieństwem z istniejącymi wierzchołkami o dużym stopniu (*wierzchołki preferowane*).

Inny sposób generowania topologii sieci polega na wykorzystaniu algorytmów heurystycznych, których podstawą jest odpowiednia analiza właściwości sieci Internet. Analizę rzeczywistej sieci przeprowadzono w *National Laboratory for Applied Network Research* (USA), gromadząc informacje z tablic routingu routerów BGP (ang. *Border Gateway Protocol*). Zebrane dane pozwoliły określić tzw. zależności potęgowe (ang. *power-laws*) między parametrami sieci. Zależności te wykorzystano w projekcie Inet, który został wykorzystany w rozprawie.

W celu uzależnienia wyników badanych algorytmów połączeń rozgałęźnych od topologii sieci wymagane jest zdefiniowanie podstawowych parametrów topologicznych struktur sieciowych reprezentowanych za pomocą grafu. Najważniejsze, przyjęte w literaturze parametry opisu sieci, reprezentowanej za pomocą grafu to: średni stopień grafu (D_{av}), liczba wierzchołków (n), liczba krawędzi (k), średnica i współczynnik gronowania (γ_v).

Szeroko prezentowane w literaturze parametry pozwalają na opisanie sieci o dowolnej topologii. Biorąc pod uwagę specyfikę problemu optymalizacyjnego, w rozprawie zaproponowano wprowadzenie nowych parametrów topologii sieci, które uwzględniają sposób budowy drzewa multicast w danej sieci oraz rozmieszczenie wierzchołków odbiorczych. Do takich parametrów należy liczba wierzchołków multicast (członków grupy), oznaczana symbolem m oraz parametr *gęstość grupy*, zdefiniowany jako stosunek liczby wierzchołków odbiorczych m do liczby wierzchołków sieci n .

W rozprawie zdefiniowano nowy parametr – tzw. *współczynnik rozproszenia grupy* (ang. *group scattering coefficient*), który ogranicza rozmieszczenie wierzchołków odbiorczych do określonego obszaru ograniczonego okręgiem. Obszar ten usytuowany jest centralnie w obszarze ograniczonym kwadratem, wewnątrz którego określono sieć (rys. 6). Współczynnik *rozproszenia grupy* został zdefiniowany jako stosunek średnicy obszaru ograniczonego okręgiem d_m do wymiaru boku obszaru kwadratowego P :

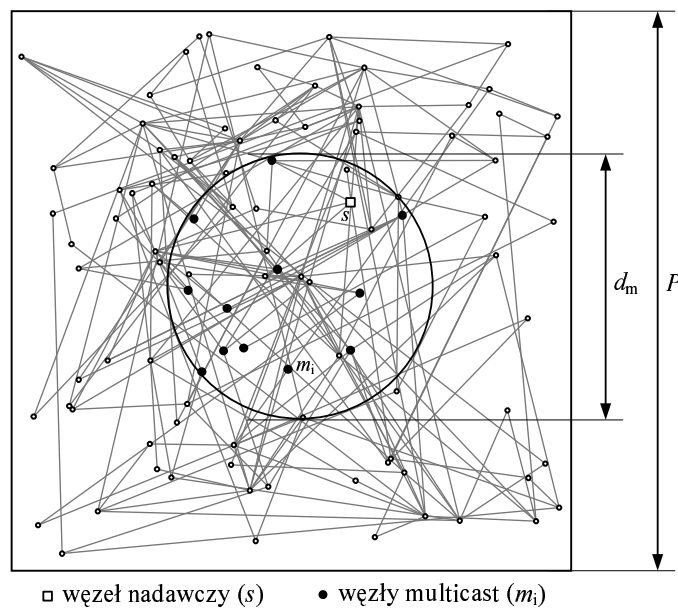
$$\varepsilon_m = \frac{d_m}{P}. \quad (1)$$

Ważnym elementem procesu badawczego algorytmów routingu rozgałęźnego jest uwzględnienie rozmieszczenia członków grupy multicast w sieci. W związku z tym opracowano specjalne metody, które lokalizują wierzchołki odbiorcze w sieci według ustalonych z góry kryteriów, takich jak stopień grafu czy zadany obszar.

W pracach poświęconych badaniom symulacyjnym algorytmów routingu rozgałęźnego grupa wierzchołków odbiorczych M określona jest poprzez losowy wybór m wierzchołków sieci spośród wszystkich n wierzchołków ($n = |N|$). Wierzchołek źródłowy s również wybierany jest losowo spośród n wierzchołków sieci. W rozprawie podejście takie nazwano metodą *GroupRandom*. Zaproponowano również następujące metody rozmieszczania wierzchołków odbiorczych:

- metoda *GroupRadius*,

(Wierzchołki tworzące grupę multicast M oraz wierzchołek źródłowy s są wybierane spośród



Rysunek 6: Interpretacja graficzna współczynnika rozproszenia grupy (parametry sieci: $n = 100$, $m = 12$, $D_{av} = 4$)

N_r wierzchołków znajdujących się wewnątrz okręgu o promieniu $r = \frac{d_m}{2}$. Metoda odzwierciedla rozmieszczenie węzłów w rzeczywistej sieci).

- metoda *GroupHighDegree*.

(Zastosowany algorytm wyznacza *stopień wierzchołka* (ang. *outdegree*), tj. liczbę krawędzi wychodzących z każdego wierzchołka grafu (łączy w sieci). Następnie wierzchołki są sortowane według malejącej liczby wychodzących z nich krawędzi. Zbiór $\{M \cup s\}$ tworzony jest z $m + 1$ wierzchołków najbardziej preferowanych (o największej liczbie krawędzi). Wierzchołkiem nadawczym s jest wierzchołek o największym stopniu).

W rezultacie badaniach symulacyjnych przyjęto następujące założenia:

- w procesie generowania topologii sieci węzły sieci rozmieszczane są na płaszczyźnie kwadratowej o rozmiarze boku $P = 1000$ ze skokiem siatki równym 1,
- węzły sieci lokalizowane są losowo na podstawie rozkładu jednostajnego, co zapewnia ich równomierne rozmieszczenie na płaszczyźnie,
- sposób łączenia węzłów sieci wynika z przyjętych modeli, zastosowanych w generatorach topologii sieci,
- każdemu łączu przypisano dwie metryki: koszt c_{ij} i opóźnienie d_{ij} ,
- metryka kosztu jest losową wartością z przedziału od 10 do 1000 generowaną na podstawie rozkładu jednostajnego – różnica dwóch rzędów wielkości pozwala modelować rzeczywiste obciążenia łączy,
- opóźnienie jest wprost proporcjonalne do odległości euklidesowej $|i, j|$ między węzłami na płaszczyźnie ($d_{ij} = |i, j|$),
- do badań sieci o kilkuset węzłach wykorzystano modele Waxmana i Barabási-Alberta,
- przyjęte parametry modelu Waxmana ($\alpha = 0,15$, $\beta = 0,2$) pozwalają na generowanie sieci o rozkładzie długości łączy zbliżonym do rozkładu otrzymanego w modelu Barabási-Alberta.

5 Podsumowanie

Najbardziej reprezentatywne rezultaty rozprawy można ująć w następujących punktach:

1. Zaproponowano algorytm mieszany STA bez kryterium ograniczającego, konstruujący drzewa transmisji grupowej o efektywności wyższej od klasycznych algorytmów konstruujących drzewa o najkrótszych ścieżkach między węzłem nadawczym a każdym z węzłów odbiorczych. Uzyskane drzewa charakteryzują się niskim kosztem w sieciach z dużą gęstością grupy multicast.
2. Zmodyfikowano heurystyczny algorytm DCMA, uzyskując lepszą efektywność nowego rozwiązania przy małych wartościach maksymalnego opóźnienia wzdłuż ścieżki w drzewie transmisji grupowej oraz w sieciach o dużej średniej wartości stopnia węzła.
3. Zaproponowano dwa algorytmy realizujące drzewa transmisji grupowej z uwzględnieniem kryterium ograniczającego. W algorytmach wykorzystano relaksację Lagrange'a, algorytm Dijkstry oraz algorytm Prima. Otrzymane rezultaty cechują się mniejszym kosztem drzewa transmisji grupowej w porównaniu do rezultatów działania istniejących algorytmów budujących drzewa najkrótszych ścieżek. Proponowane w rozprawie algorytmy charakteryzują się również konstrukcją drzew transmisji grupowej o najmniejszym średnim koszcie ścieżki w drzewie.
4. Zdefiniowano nowe parametry sieci, określające efektywność drzew transmisji grupowej w sieciach teleinformatycznych. Zaproponowano również parametry charakteryzujące grupę odbiorców i sposoby rozmieszczenia węzłów odbiorczych w sieci.
5. Zaproponowano metodologię badań algorytmów rozgałęźnych, umożliwiającą porównanie proponowanych i istniejących rozwiązań. Uwzględniono różne modele generowania topologii sieci, różne parametry opisu sieci i grupy *multicast*. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie, tzn. od małych sieci liczących kilkadziesiąt węzłów do sieci zawierających kilka tysięcy węzłów. Określono zależności statystyczne pomiędzy otrzymanymi kosztami drzew i metodami generowania topologii sieci.
6. Opracowano środowisko symulacyjne do analizy efektywności algorytmów routingu rozgałęźnego oraz generowania i wizualizacji topologii sieci teleinformatycznych.

Spis publikacji

- [1] M. Piechowiak, T. Bartczak, P. Zwierzykowski. On the Efficiency of Multicast Connections in Packet Networks. *Proceedings of The 6-th Annual International Conference on Computer Science and Information Systems*, Athens, Greece, June 2010. przyjęto do publikacji.
- [2] M. Piechowiak, T. Bartczak, P. Zwierzykowski. The Evaluation of the Quality of Multicast Routing Algorithms in Packet Networks. *Proceedings of The 7-th International Symposium - Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Newcastle, U.K., July 2010. przyjęto do publikacji.
- [3] M. Piechowiak, M. Stasiak, P. Zwierzykowski. On the Methodology for the Evaluation of Unconstrained Multicast Routing Algorithms. *Proceedings of 16-th International Conference on Telecommunications ICT*, May, strony 82–87, 2009.
- [4] M. Piechowiak, M. Stasiak, P. Zwierzykowski. Analysis of the Influence of Group Members Arrangement on the Multicast Tree Cost. *Proceedings of The Fifth Advanced International Conference on Telecommunications AICT 2009*, Venice, Italy, May, strony 429–434, 2009. best paper award.
- [5] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. A New Delay-Constrained Multicast Routing Algorithm for Packet Networks. *Proceedings of The IEEE Africon 2009*, Namibia, Kenya, September 2009.
- [6] M. Piechowiak, M. Stasiak, P. Zwierzykowski. The Application of K-Shortest Path Algorithm in Multicast Routing. *Journal of Theoretical and Applied Informatics*, 21(2):69–82, 2009.
- [7] M. Piechowiak, M. Stasiak, P. Zwierzykowski. The Influence of Group Members Arrangement on the Multicast Tree Cost. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, 2(2-3):248–257, 2009.
- [8] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, T. Bartczak. The Efficiency of Multicast Trees in Packet Networks. *Information Systems Architecture and Technology, Service Oriented Distributed Systems: Concepts and Infrastructure*, strony 303–312, 2009. best paper award.
- [9] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, T. Szewczyk, T. Bartczak. Exploring Multicast IP in Linux. *Linux Magazine, UK/USA edition*, (102):55–59, May 2009.
- [10] M. Piechowiak, A. Chojnacki, P. Zwierzykowski. Genetic Routing Algorithm for Multicast Connections in Packet Networks. *International Journal of Image Processing & Communications*, 13(1-2):13–20, 2008.
- [11] M. Piechowiak, A. Chojnacki, P. Zwierzykowski. Porównanie wydajności operatorów genetycznych na tle liczby generacji w problemie trasowania połączeń rozgałęźnych. *Przegląd Telekomunikacyjny*, (8-9):1107–1114, 2008.
- [12] M. Piechowiak, P. Szymaniak, P. Zwierzykowski. New Genetic Multicast Routing Algorithm for Ad-hoc Networks. *International Journal of Image Processing & Communications*, 13(1-2):3–11, 2008.
- [13] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, T. Bartczak. An Application of the Switched Tree Mechanism in the Multicast Routing Algorithms. *1-st Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists InterTech 2008*, strony 282–286, 2008. best paper award.

- [14] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, T. Bartczak. Efficiency of QoS-oriented Multicast Routing Algorithms. *Information Systems Architecture and Technology, Information Systems and Computer Communication Networks*, strony 113–124, 2008.
- [15] M. Piechowiak, A. Chojnacki, P. Zwierzykowski. Nowy algorytm genetyczny dla połączeń rozgałęźnych w sieciach pakietowych. *Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*. Politechnika Poznańska, Grudzień 2007.
- [16] M. Piechowiak, P. Szymaniak, P. Zwierzykowski. The Implementation of Genetic Multicast Algorithms in Ad-hoc Networks. *Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*. Politechnika Poznańska, Grudzień 2007.
- [17] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. A New Multicast Routing Algorithm with Lagrange Relaxation. *Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*. Politechnika Poznańska, Grudzień 2007.
- [18] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Efficiency Analysis of Multicast Routing Algorithms in Large Networks. *Poznan University of Technology Academic Journals*, (54):173–180, 2007.
- [19] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Efficiency Analysis of Multicast Routing Algorithms in Large Networks. *Proceedings of The Third International Conference on Networking and Services ICNS 2007*, strony 101–106, Athens, Greece, June 2007. IEEE. best paper award.
- [20] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Heuristic Algorithm for Multicast Connections in Packet Networks. *Proceedings of EUROCON 2007 The International Conference on: Computer as a tool*, strony 948–955, Warsaw, Poland, September 2007. IEEE.
- [21] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Performance of Fast Multicast Algorithms in Real Networks. *Proceedings of EUROCON 2007 The International Conference on: Computer as a tool*, strony 956–961, Warsaw, Poland, September 2007. IEEE.
- [22] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, A. Żoź. A New Heuristic Algorithm for Multicast Connections in Packet Networks. *Poznan University of Technology Academic Journals*, (54):213–220, 2007.
- [23] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, T. Szewczyk, T. Bartczak. Multicast IP technologia przyszłości. *Networld*, (6):65–68, Czerwiec 2007.
- [24] M. Piechowiak, P. Żmudziński. The Influence of Network Topology on the Efficiency of Multicast Heuristic Algorithms. *International Journal of Image Processing & Communications*, 11(1):41–51, 2006.
- [25] M. Piechowiak, T. Bartczak, T. Szewczyk, P. Zwierzykowski. Międzydomenowe protokoły routingu rozgałęźnego. *XI Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*, strony 91–96, Poznań, Grudzień 2006. Politechnika Poznańska.
- [26] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Badanie efektywności algorytmów routingu rozgałęźnego w dużych sieciach. *XI Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*, strony 154–159, Poznań, Grudzień 2006. Politechnika Poznańska.
- [27] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. The Application of Network Generation Methods in the Study of Multicast Routing Algorithms. *Proceedings of 4th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks HET-NETs 2006*, strony P24/1–8, Ilkley, UK, September 2006. Networks UK Publishers.

- [28] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. The Influence of Network Topology on the Efficiency of Multicast Heuristic Algorithms. M. Logothetis, redaktor, *Proceedings of The 5-th International Symposium - Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, strony 115–119, July 2006.
- [29] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Zastosowanie metod generowania topologii sieci w badaniu efektywności algorytmów routingu rozgałęźnego. *XXII Krajowe Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki*, Bydgoszcz, Wrzesień 2006. Instytut Telekomunikacji Politechniki Warszawskiej.
- [30] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Analiza efektywności algorytmów heurystycznych dla połączeń rozgałęźnych w sieciach pakietowych. *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji 2005*, strony 192–200, Bydgoszcz, Wrzesień 2005. Instytut Telekomunikacji Politechniki Warszawskiej.
- [31] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Quantitative Comparison of Multicast Heuristic Algorithms. *Proceedings of the 12th Polish Teletraffic Symposium*, strony 101–110. Polish Society for Theoretical and Applied Electrical Engineering, September 2005.
- [32] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Wpływ parametrów topologii sieci na efektywność algorytmów połączeń rozgałęźnych. *X Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne 2005*, strony 220–225, Poznań, Grudzień 2005. Politechnika Poznańska, Instytut Elektroniki i Telekomunikacji.
- [33] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, S. Hanczewski. Performance Analysis of Multicast Heuristic Algorithms. D. Kouvatsos, redaktor, *Third International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks*, strony 41/1–41/8. Networks UK Publishers, July 2005.
- [34] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Algorytmy typu multicast w sieciach pakietowych. *IX Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*, strony 219–224, Poznań, Grudzień 2004. Politechnika Poznańska, Instytut Elektroniki i Telekomunikacji.
- [35] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Modelowanie topologii Internetu. *IX Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne 2004*, strony 213–218, Poznań, Grudzień 2004. Politechnika Poznańska, Instytut Elektroniki i Telekomunikacji.
- [36] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. IP Multicast - przegląd protokołów routingu. *VIII Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*, strony 147–152, Poznań, Grudzień 2003. Politechnika Poznańska, Instytut Elektroniki i Telekomunikacji.