

Tadeusz CZACHÓRSKI  
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN  
Politechnika Śląska, Instytut Informatyki

Jean-Michel FOURNEAU  
PRISM, Université de Versailles Saint-Quentin, Francja

Sławomir NOWAK  
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

## SYMULACYJNE BADANIE ROUTINGU W SIECIACH OPTYCZNYCH

**Streszczenie.** Artykuł omawia nową strategię routingu dla sieci w pełni optycznych. Strategia ta jest połączeniem algorytmu z odbijaniem oraz algorytmu z wyznaczoną ścieżką i gwarantuje skończony czas transmisji przez sieć przy zachowaniu wysokiej wydajności transmisji. Zostały opracowane modele symulacyjne sieci optycznych wykorzystujące pakiety QNAP II i OMNet++. Przedstawiono symulacyjne wyniki badania wydajności algorytmów routingu.

## SIMULATION-BASED PERFORMANCE EVALUATION OF ROUTING IN ALL-OPTICAL NETWORKS

**Summary.** We evaluate the performances of a new routing strategy for all-optical networks. This strategy combines deflection routing and convergence routing and it provides an ending guarantee (no deadlock and livelock) with a large goodput. We have designed the simulators with QNAP II modeling tool and OMNet++ package and we analyze by simulations the performance of routing algorithms.

### 1. Wprowadzenie

Sieci w pełni optyczne nie pozwalają na obecnym poziomie technologicznym na buforowanie pakietów. Istniejące pętle opóźniające umożliwiają jedynie dokonanie

niezbędnych obliczeń podczas przełączania pakietów. Wynika stąd potrzeba opracowania dla tych sieci specjalnych zasad routingu pakietów. Niniejsza praca bada efektywność rozwiązania polegającego na kombinacji dwóch algorytmów: routingu z odbijaniem pakietów i routingu z wyznaczoną stałą ścieżką.

Przy ocenie algorytmów routingu w sieciach optycznych bierze się pod uwagę dwa podstawowe kryteria: wydajność sieci (*goodput*) określaną jako średnia liczba pakietów opuszczających sieć w jednej szczelinie czasowej oraz gwarancję skończonego czasu transmisji przez sieć (*ending guarantee*) definiowaną jako maksymalna liczba kroków  $G_e$ , po której każdy pakiet osiągnie swój adres przeznaczenia.

Trasowanie „z odbijaniem” (*deflection routing*) pozwala na przełączanie pakietów bez buforowania, zapewniając jednocześnie bardzo wysoką wydajność. W strategii najkrótszej ścieżki (*shortest-path deflection routing*) przełączniki próbują kierować pakiety najkrótszą z możliwych ścieżek, w kierunku zgodnym z ich adresem przeznaczenia. Sieć przesyła pakiety w sposób synchroniczny. Przez każde z połączeń pomiędzy przełącznikami, w poszczególnych szczelinach (slotach) czasowych, może zostać przesłana określona liczba pakietów, zależnie od jego pojemności. Pakiety znajdujące się wewnątrz sieci nigdy nie są gubione, gdyż całkowita liczba pakietów nie przekracza pojemności sieci. Warunek ten jest sprawdzany podczas pobierania nowych pakietów z generatorów (źródeł) w poszczególnych przełącznikach.

Przybywające do przełącznika pakiety muszą w następnym slotie czasowym zostać skierowane do kolejnego przełącznika po ścieżce wyznaczonej zgodnie z zasadami działania algorytmu routingu. Jeśli liczba pakietów, które mają zostać wysłane przez pojedynczą ścieżkę przekroczy jej maksymalną pojemność, część pakietów będzie musiała zostać skierowana do innej, wolnej ścieżki. Następuje więc „odbicie” (defleksja) z właściwego kierunku. Odbite pakiety poruszają się dłuższą trasą, co stanowi wadę tej metody. W skrajnie niekorzystnym przypadku pakiet może nigdy nie osiągnąć swojego miejsca przeznaczenia (*deadlock problem*), co oznacza, że algorytm nie spełnia kryterium skończonego czasu transmisji przez sieć. Symulacje pokazują, że problem odbijania pakietów może być istotny, szczególnie w przypadku nierównomiernego rozłożenia ruchu w sieci. Średnia liczba odbić wszystkich pakietów nie jest duża, jednak część pakietów może z tego powodu być dostarczona ze znacznymi opóźnieniami. Podczas symulacji sieci o topologii siatki o rozmiarach  $10 \times 10$  węzłów obserwowano pakiety, które miały ponad 1000 odbić [2]. W przypadku tych pakietów można się więc spodziewać przekroczenia oczekiwanego czasu transmisji przez sieć. W celu wyeliminowania tego problemu zaproponowano nową strategię, będącą połączeniem algorytmu z odbijaniem oraz algorytmu z wyznaczoną stałą ścieżką. W badanym przypadku strategia z wyznaczoną ścieżką polega na zastosowaniu „ścieżki Eulera” (*Eulerian circuit*), obejmującej wszystkie przełączniki w sieci i stanowiącą zamknięty obwód. Ścieżką tą, w kolejnych slotach czasowych, poruszają się pakiety. W ten sposób można zagwarantować dla wszystkich pakietów

skończone opóźnienie, równe najdłuższej drodze pomiędzy dwoma przełącznikami. Wadą takiego rozwiązania jest znaczne obniżenie wydajności sieci. W przeprowadzonych symulacjach średnia liczba pakietów, dostarczonych w jednym slocie czasowym, wynosiła dla sieci z algorytmem odbijania ponad 32, podczas gdy dla tej samej sieci z routingiem ścieżką Eulera wynosiła 3 do 6 [2].

Połączenie obu strategii trasowania pozwala na zapewnienie skończonych opóźnień pakietów w połączeniu z wysoką przepustowością. W przeprowadzonych symulacjach zwrócono uwagę na opóźnienia podczas przesyłania pakietów przez sieć i badanie wydajności sieci.

## 2. Połączenie strategii odbijania i strategii wyznaczonej ścieżki

W sieci poruszają się dwa rodzaje pakietów, które różnią się stosowanym wobec nich algorytmem routingu. W każdym slocie czasowym routing przebiega w dwóch fazach: w pierwszej przesyłane są pakiety zgodnie ze ścieżką Eulera, w drugiej wobec pozostałych stosowany jest algorytm defleksji. Każdy nowo przychodzący do sieci pakiet oznaczony jest jako poruszający się zgodnie z algorytmem defleksji. Pakiety, jako jeden z atrybutów, posiadają licznik odbić, które nastąpiły przy ich przechodzeniu przez sieć. Jest to zgodne z implementacją technologii optycznej, w której nagłówek pakietu jest odświeżany w każdym przełączniku. Kiedy liczba odbić osiągnie określony próg  $s$ , pakiet jest przełączany w tryb drogi ścieżką Eulera. Dla poprawnego działania ścieżki Eulera wymagane jest, aby dla każdego przychodzącego pakietu ustawionego w tym trybie wolna była odpowiednia ścieżka wyjściowa.

Ograniczenie na łączne opóźnienie transmisji może być łatwo oszacowane za pomocą grafu. W [4] zostało wykazane, że ograniczenie to wynosi  $diam_G + 2 * s + stretchW_c - 3$ , gdzie  $diam_G$  jest średnicą (najdłuższą odległością w grafie  $G$ ), a  $stretchW_c$  długością najdłuższej ścieżki pomiędzy dwoma przełącznikami w ramach ścieżki Eulera.

## 3. Badania symulacyjne

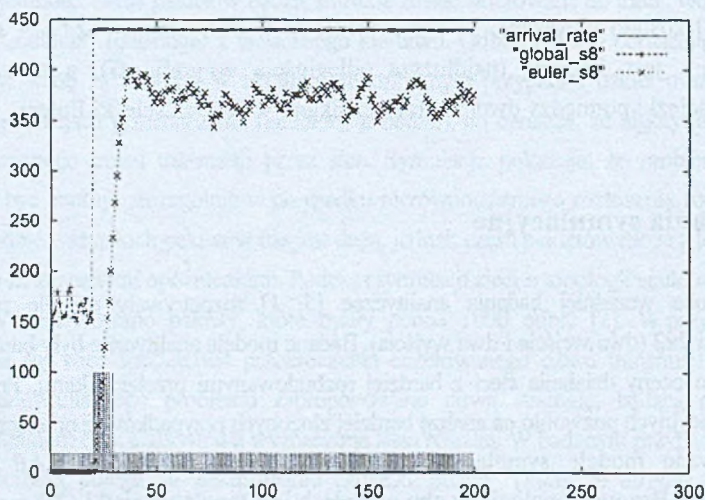
Prowadzone wcześniej badania analityczne [5, 1] rozpatrywały modele sieci w oparciu o przełączniki 2x2 (dwa wejścia i dwa wyjścia). Badane modele analityczne były bardzo proste i nie podejmowano oceny działania sieci z bardziej rozbudowanymi przełącznikami. Przeprowadzenie badań symulacyjnych pozwoliło na analizę bardziej złożonych przypadków, z przełącznikami 4x4.

Opracowano modele symulacyjne z wykorzystaniem pakietów QNAP II [10] oraz Omnet++ [11]. Bazową topologią w obu modelach jest topologia siatki (*2D mesh*), uważanej za najbardziej wydajną dla sieci optycznych. Wyróżniona jest część optyczna, związana z ruchem pakietów przez sieć i routingiem, w której pakiety nie są buforowane, lecz w sposób

synchroniczny przesyłane pomiędzy przełącznikami, oraz część elektroniczna, związana z generacją pakietów, które oczekują w kolejce na wprowadzenia do sieci. Każdy przełącznik posiada wejście z kolejki (bufora), do którego trafiają pakiety z generatora, odbiorcę pakietów (*sink*), oraz połączenia w czterech kierunkach z sąsiadującymi przełącznikami.

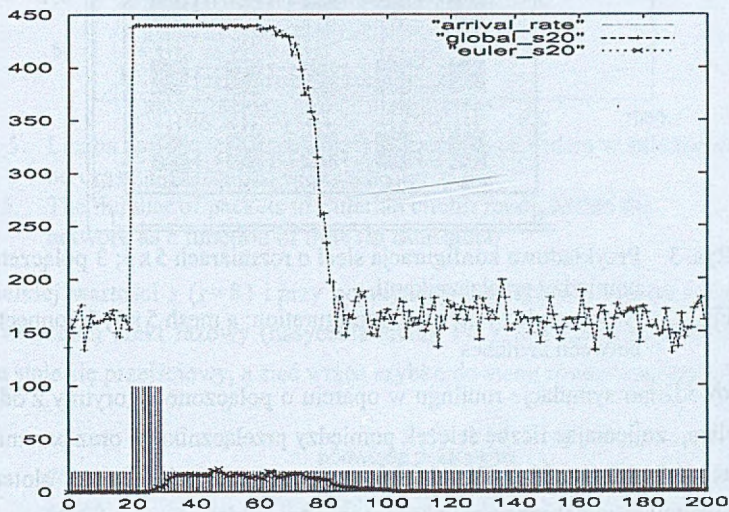
### 3.1. Symulacje z wykorzystaniem pakietu QNAP II

Korzystając z opracowanego symulatora, zbadano wpływ parametru  $s$  na wydajność sieci. Badana sieć miała topologię siatki o wymiarach  $11 \times 11$  węzłów, pojemność pojedynczej ścieżki pomiędzy przełącznikami odpowiadała transmisji jednego pakietu w szczelinie czasowej. Pakiety przybywały do całej sieci z rozkładem Poissona o parametrze 20, który podczas symulacji zwiększał swoją wartość do 100 (tryb *burst*) i powracał do wartości początkowej. Wartość progu wynosiła  $s = 8$ . Przed wystąpieniem trybu *burst* obciążenie sieci było niewielkie, rzadko występowały odbicia pakietów (defleksje) i nie zaobserwowano pakietów poruszających się w trybie z algorytmem ze ścieżką Eulera (symulacja obejmowała  $10^7$  slotów czasowych). Przy gwałtownym zwiększeniu liczby generowanych pakietów sieć wchodzi w stan nasycenia. Po ponownym zmniejszeniu szybkości generacji pakietów sieć pozostawała w stanie nasycenia. Jest to tak zwany efekt fazowy (*phase effect*). Powodem była duża liczba pakietów poruszających się po ścieżce Eulera i związane z tym trybem znaczne opóźnienia. Przebieg symulacji pokazuje rys. 1, na którym zaznaczono zmiany natężenia strumienia wpływającego do sieci i odpowiadające im przebiegi łącznej liczby pakietów w sieci liczby pakietów na ścieżce Eulera.



Rys. 1. Efekt fazowy,  $s = 8$ , pojedyncze ścieżki między przełącznikami  
Fig. 1. Phase effect,  $s = 8$ , single path between switches

Przy odpowiednio większym zadanym progu  $s$  chwilowe zwiększenie intensywności generacji pakietów również może wprowadzić sieć w chwilowy stan nasycenia, jednak po okresie proporcjonalnym do długości ścieżki Eulera sieć powraca do stanu równowagi: na rys. 2 przedstawiono liczbę pakietów w sieci, liczbę pakietów poruszających się w trybie Eulera i natężenie strumienia wejściowego do sieci. Problemem pozostaje dobór parametru  $s$  na optymalnym poziomie w zależności od rozmiaru sieci, pojemności ścieżek, rozkładu ruchu w sieci i wymagań jakości transmisji.

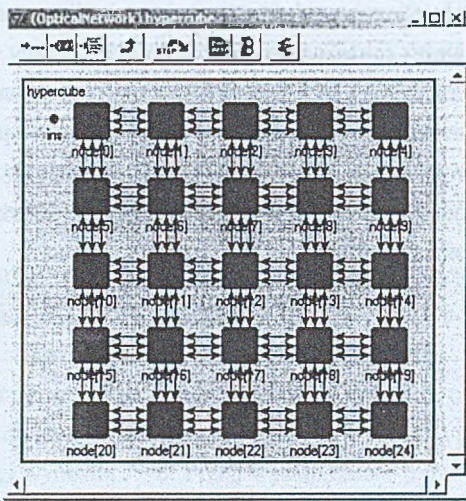


Rys. 2. Liczba pakietów w sieci w funkcji czasu; tryb *burst*,  $s=20$ , pojedyncze ścieżki między przełącznikami

Fig. 2. Number of packets in network as a function of time; *burst* mode,  $s=20$ , single path between switches

### 3.2. Symulacje z wykorzystaniem pakietu OMNET++

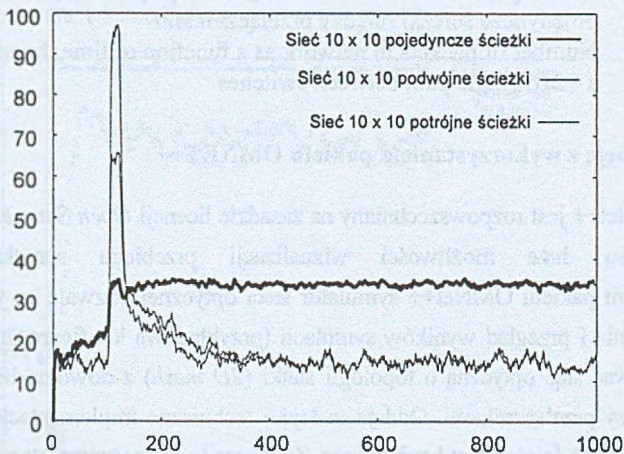
Pakiet OMNet++ jest rozpowszechniany na zasadzie licencji *Open Source*. Szczególnie warto podkreślić są duże możliwości wizualizacji przebiegu symulacji. Opracowany z wykorzystaniem pakietu OMNet++ symulator sieci optycznej pozwala na wydajną symulację, łatwe generowanie i przegląd wyników symulacji (przykładowa konfiguracja modelu na rys. 3). Można symulować sieć optyczną o topologii siatki (*2D mesh*) z dowolną liczbą (pojemnością) ścieżek pomiędzy przełącznikami. Oddaje to lepiej techniczne implementacje sieci optycznych, w których pojemność ścieżek jest bardzo duża. Zwiększa to w znacznym stopniu pojemność całej sieci, w której każdy z przełączników może przestać  $4 \cdot \text{pojemność\_ścieżki}$  pakietów. Algorytm routingu dla większej liczby ścieżek połączeń pomiędzy sąsiadującymi przełącznikami opracowane zostały na zasadzie uogólnienia algorytmów dla pojedynczych połączeń.



Rys. 3. Przykładowa konfiguracja sieci o rozmiarach 5 x 5; 3 połączenia pomiędzy przełącznikami.

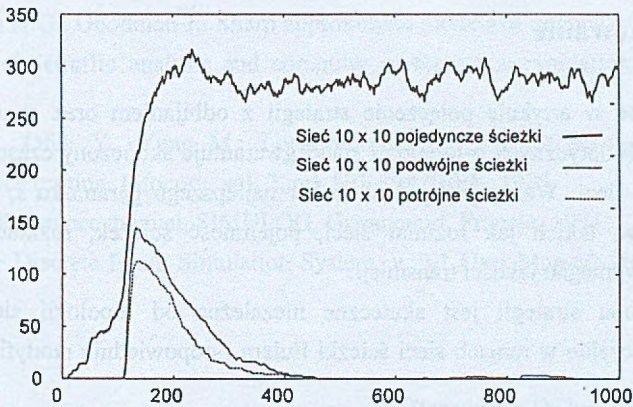
Fig. 3. An example of network configuration: a mesh 5 x 5; 3 connections between switches

Przeprowadzono symulacje routingu w oparciu o połączone algorytmy z odbijaniem i ze ścieżką Eulera, zmieniając liczbę ścieżek pomiędzy przełącznikami oraz parametr  $s$ , dla sieci o wymiarach 10x10 węzłów. W odcinku czasu pomiędzy 100 a 120 slotem czasowym następuje gwałtowne zwiększenie szybkości generacji pakietów.



Rys. 4. Liczba pakietów w sieci w zależności od czasu, wyrażonego w slotach czasowych

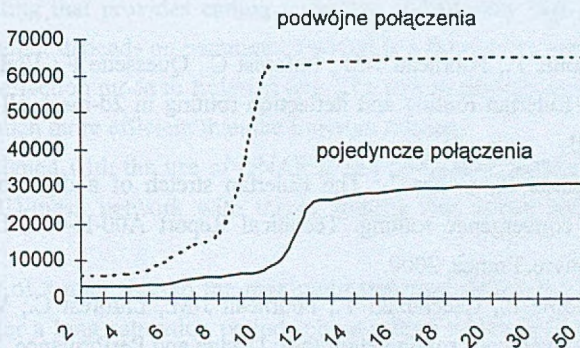
Fig. 4. The number of packets within the network as a function of time (in time slots)



Rys. 5. Liczba pakietów poruszających się po ścieżce Eulera w zależności od czasu, wyrażonego w slotach czasowych

Fig. 5. The number of packets in Eulerian circuit mode within the network as a function of time (in time slots)

Dla niewielkiej wartości  $s$  ( $s=8$ ) i przy pojedynczym połączeniu można zaobserwować wspomniany wcześniej efekt fazowy (nasylenia sieci). Po zwiększeniu pojemności ścieżek stan nasylenia staje się przejściowy, a sieć wraca szybko do stanu równowagi (rys. 4, 5).



Rys. 6. Liczba przesłanych przez sieć pakietów w zależności od parametru  $s$

Fig. 6. The number of packets transmitted through the network as a function of  $s$

Niska wartość  $s$ , utrzymując stan wysokiego obciążenia sieci, we wszystkich przypadkach powoduje znaczny spadek wydajności. Badając liczbę odebranych pakietów w stałej liczbie cykli ( $T=1000$ ) w zależności od parametru  $s$  obserwuje się przegięcie charakterystyki w okolicach  $s=16$  (rys. 6). Powyżej tej wartości wpływ pakietów poruszających się ścieżką Eulera jest niewielki i wykorzystanie sieci można uznać za optymalne.

## 4. Podsumowanie

Przedstawione w artykule połączenie strategii z odbijaniem oraz strategii ze ścieżką Eulera w sieciach optycznych o topologii siatki gwarantuje skończony czas transmisji oraz dużą wydajność sieci. Ważny jest jednak dobór najlepszego parametru  $s$ , który zależy od wielu czynników, takich jak rozmiar sieci, pojemność ścieżek, rozkład ruchu w sieci i ewentualnych wymagań jakości transmisji.

Połączenie obu strategii jest skuteczne niezależnie od topologii sieci. Problemem pozostaje wyznaczenie w ramach sieci ścieżki Eulera i odpowiednia modyfikacja algorytmu odbijania pakietów.

Dalsze prace w tym kierunku mogą dotyczyć badania algorytmów routingu dla różnych rodzajów ruchu i nierównomiernym rozkładzie obciążeń oraz optymalizacji algorytmów.

## LITERATURA

1. Bannister J., Borgonovo F., Fratta L., Gerla M.: A versatile model for predicting the performance of deflection routing networks. *Performance Evaluation*, V17, pp 201-222, 1992.
2. Barth D., Berthome P., Fourneau J-M., Laforest C., Quessette F.: Vial S., Performance comparisons of Eulerian routing and deflection routing in 2d-mesh all optical network. *EMS'2001*, 2001.
3. Barth D., Berthome P., Cohen J.: The Eulerian stretch of a digraph and the ending guarantee of a convergence routing. *Technical Report A00-R-400, LORIA, BP 239-F54506 Vandoeuvre, France, 2000.*
4. Barth D., Berthome P., Czachórski T., Fourneau J-M., Laforest C., Vial S.: A mixed deflection and convergence routing algorithm: Design and Performance, Submitted, 2002.
5. Bonnoni A., Prucnal P.P.: Analytical evaluation of improved access techniques in deflection routing networks. *IEEE/ACM Trans. On Networking*, V4, N5, 1996.
6. Gravey P., Gosselin S., Guillemot C., Chiaroni D., Le Sauze N., Jourdan A., Dotaro E., Barth D., Berthome P., Laforest C., Vial S., Atmaca T., Hebuterne G., El Biaze H., Laalaoua R., Gangloff E., Kotuliak I.: Multiservice optical network: Main concepts and first achievements of the ROM program. *Journal of Lightwave Technology*, 19:23-31, January 2001.
7. Laforest C., Vial S.: Short cut Eulerian routing datagrams in all optical point-to-point networks. In. *IPDPS 2002.*



8. Greenberg A.G., Goodman J.: Sharp approximate models of adaptative routing in mesh networks. Teletraffic analysis and computer performance evaluation, North Holland, 1996.
9. Mayer A., Ofek Y., Yung M.: Local fairness in general-topology networks with convergence routing. Infocom, vol. 2, pp. 891-899, IEEE, 1995.
10. QNAP II Reference manual, SIMULOG, Guyancourt, Francja, 1994.
11. OMNet++ Discrete Event Simulation System, v. 2.1 User Manual, Budapeszt, Węgry, 2001.

Recenzent: Dr inż. Marcin Skowronek

Wpłynęło do Redakcji 4 kwietnia 2002 r.

## Abstract

The paper discusses a mixed routing strategy based on deflection and eulerian convergence routing that provides ending guarantee and ensures high network throughput. The network goodput depends on parameter  $s$  which is a threshold used to switch the routing of packet from deflection mode to Eulerian one. The mixed strategy only slightly reduces the goodput and is much more efficient than the Eulerian routing.

We have designed with the use of QNAP II and OMNet++ packages several simulation models of the 2D-mesh network with mixed routing and drawn some conclusions from simulation runs.

Small values of  $s$  may shorten the maximum transport delays but at the same time the network may enter a long saturation period (phase effect) which is illustrated in Fig. 1. For larger values of  $s$  the saturation is only temporary (Fig. 2). The influence of  $s$  parameter weakens for larger values of the link bandwidth (Fig 4, 5). Over a certain value of  $s$ , the number of packets transmitted through the network in high load is close to maximum performance of a network.

The results will be extended to cases of unbalanced traffic and other types of deflection and convergence routing strategies.