

Katedra Sieci
Telekomunikacyjnych i Komputerowych

Politechnika Poznańska
ul. Polanka 3, 60-965 Poznań

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Nowa architektura optycznego pola
komutacyjnego bazująca na strukturze
typu *baseline*

Autor:

mgr inż. Remigiusz Rajewski

Promotor:

dr hab. inż. Grzegorz Danilewicz, prof. PP

Poznań 2015

Spis treści

1	Cel i teza pracy	2
2	Struktura pola komutacyjnego typu <i>baseline</i>	3
2.1	Architektura pola komutacyjnego typu <i>baseline</i>	3
2.2	Przeniki w architekturze pola komutacyjnego typu <i>baseline</i>	4
2.3	Koszt architektury pola komutacyjnego typu <i>baseline</i>	5
3	Nowa architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$	6
3.1	Architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$	6
3.2	Rozbudowa architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$	6
3.3	Własność samosterowalności pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$	7
3.4	Przeniki w architekturze pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$	7
3.5	Koszt architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$	8
4	Warunki nieblokowalności	9
4.1	Wstęp	9
4.2	Struktury wielopłaszczyznowe	10
4.3	Nieblokowalność w wąskim sensie pól komutacyjnych typu <i>baseline</i>	10
4.4	Nieblokowalność w wąskim sensie pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$	11
4.5	Przestrzajalne pola komutacyjne typu <i>baseline</i>	12
4.6	Warunki przestrzajalności pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$	12
5	Porównanie struktur pól komutacyjnych	13
5.1	Porównanie przeników w polach komutacyjnych typu <i>baseline</i> oraz $\log_2 N - 1$	13
5.2	Porównanie kosztu budowy pól komutacyjnych typu <i>baseline</i> oraz $\log_2 N - 1$	13
5.3	Porównanie nieblokowalnych w wąskim sensie pól komutacyjnych typu <i>baseline</i> oraz $\log_2 N - 1$	14
5.4	Porównanie przestrzajalnych pól komutacyjnych typu <i>baseline</i> oraz $\log_2 N - 1$	18
6	Podsumowanie	21
7	Publikacje	23

Cel i teza pracy

Celem pracy jest przedstawienie nowej architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ zbudowanego z symetrycznych elementów komutacyjnych o rozmiarze 2×2 i 3×3 oraz niesymetrycznych komutatorów o rozmiarze 2×3 i 3×2 bazującej na, dobrze znanej w literaturze przedmiotu, strukturze pola komutacyjnego typu *baseline*. Dodatkowo, celem pracy jest porównanie nowej architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ z architekturą pól komutacyjnych typu *baseline* pod kątem przeników a także pod względem kosztu budowy struktury pola komutacyjnego, wyrażonego liczbą aktywnych i pasywnych elementów optycznych. Do porównania różnych struktur pól komutacyjnych niezbędne było wprowadzenie warunków nieblokowności w wąskim sensie i przestrajalności.

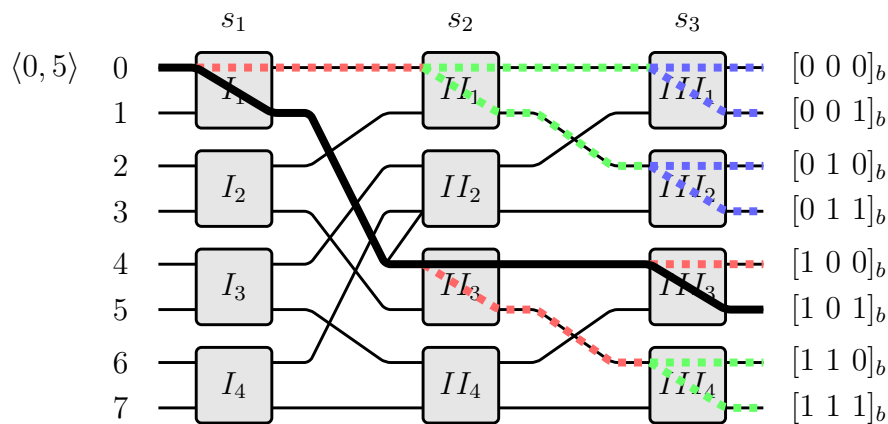
Teza rozprawy brzmi następująco: Możliwe jest zbudowanie struktury pola komutacyjnego o takiej samej pojemności i zapewniającej takie same własności kombinatoryczne jak architektura pola komutacyjnego typu *baseline*, ale charakteryzującej się mniejszym kosztem, wyrażonym w liczbie aktywnych i pasywnych elementów optycznych, oraz zapewniającej lepszą jakość sygnału optycznego na wyjściu nowej struktury pola komutacyjnego niż architektura pola komutacyjnego typu *baseline*.

Struktura pola komutacyjnego typu *baseline*

2.1. Architektura pola komutacyjnego typu *baseline*

Clos wykazał, że komutator prostokątny o x wejściach i y wyjściach nie jest rozwiązaniem optymalnym z punktu widzenia liczby punktów komutacyjnych w sytuacji gdy rośnie liczba wejść i wyjść. Clos zaproponował ponadto strukturę pola trzysekcyjnego i wykazał, że dla pól o określonych pojemnościach jest to rozwiązanie tańsze, bo zawiera ono mniejszą liczbę punktów komutacyjnych niż pojedynczy komutator. Inną, powszechnie rozważaną w literaturze przedmiotu, strukturą pola komutacyjnego jest architektura typu *banyan* przedstawiona na rysunku 2.1.

Pole typu *banyan* składa się z n sekcji komutatorów kwadratowych o rozmiarze $d \times d$ i ma



Rysunek 2.1. Trzysekcyjna architektura pola komutacyjnego typu *baseline* o pojemności $N = 8$ (struktura pola komutacyjnego $\log_2 8$) oraz przeniki w strukturze tego pola

pojemność $N = d^n$. W każdej sekcji jest $\frac{N}{d}$ komutatorów. Ponieważ $n = \log_d N$, pola takie nazywane są polami $\log_d N$. Przykład struktury pola komutacyjnego typu $\log_d N$ o pojemności $N = 8$, zbudowanego z komutatorów o rozmiarze 2×2 , jest przedstawiony na rysunku 2.1.

Komutatory sąsiednich sekcji są ze sobą odpowiednio łączone łączami międzysekcyjnymi. Można wyróżnić kilka podstawowych wzorów połączeń międzysekcyjnych. Są to: *baseline*, *omega* i *banyan*. W dalszej części pracy rozważane będą tylko połączenia typu *baseline*, jednak wnioski mają znaczenie ogólne, ponieważ struktury pól typu *banyan*, *omega* i *baseline* są topologicznie równoważne.

Połączenia typu *baseline* tworzą wzór doskonałego tasowania odwrotnego (ang. *perfect unshuffle*). Sekcje pola typu *baseline* są oznaczone przez s_i od lewej strony do prawej, gdzie i oznacza numer sekcji oraz $i = 1, 2, \dots, n - 1, n$. Wyjścia i wejścia pola komutacyjnego są numerowane z góry na dół od 0 do $N - 1$.

2.2. Przeniki w architekturze pola komutacyjnego typu *baseline*

Rozpatrując przeniki w kontekście architektury pola komutacyjnego należy uwzględnić fakt, że sygnał optyczny przechodzący przez dane optyczne pole komutacyjne przechodzi przez więcej niż jedną sekcję tego pola. Powoduje to, że przeniki pojawiają się nie tylko w jednym komutatorze ale w wielu komutatorach, przez które przechodzi rozpatrywane połączenie. Należy również uwzględnić fakt, że przeniki mogą pojawiać się także w komutatorach, przez które rozpatrywane połączenie nie przechodzi. Jeżeli przeniki pochodzą z innych połączeń zestawionych w danym komutatorze, to są to przeniki pierwszego rzędu (m). Jeżeli pochodzą one z połączeń zestawionych w komutatorach z poprzedniej sekcji, to nazywane są one przenikami drugiego rzędu (m^2). W najbardziej niekorzystnym przypadku takie przeniki mogą pojawiać się w każdej sekcji architektury pola komutacyjnego. Z punktu widzenia jakości sygnału optycznego, im mniejszy wpływ przeników na sygnał użyteczny tym lepiej. Zatem, jedną z metod na ograniczenie przeników jest zmniejszenie liczby sekcji w strukturze pola komutacyjnego.

Na rysunku 2.1 przedstawione jest przykładowe połączenie $\langle 0, 5 \rangle$ w polu $\log_2 8$. Jest ono oznaczone przez pogrubioną ciągłą czarną linię. Rozpatrywane połączenie $\langle 0, 5 \rangle$ przechodząc przez komutatory I_1 , II_3 oraz III_3 powoduje powstawanie w nich przeników. Przeniki te wprowadzają zakłócenia pojawiające się na, nieużywanych przez rozpatrywane połączenie, wyjściach wspomnianych komutatorów. Takie przeniki docierają także do kolejnych sekcji komutatorów pola komutacyjnego, co w efekcie powoduje, że na wszystkich wyjściach struktury pola komutacyjnego $\log_2 8$ pojawia się sygnał optyczny stanowiący część użytecznego sygnału optycznego rozpatrywanego połączenia zmieszanego z przenikami. Na wyjściu zajęтым przez rozpatrywane połączenie pojawia się sygnał użyteczny, na pozostałych wyjściach pojawia się szum. Przeniki oznaczone są przez pogrubione przerywane linie oznaczone kolorami: czerwonym, zielonym i niebieskim. Kolorem czerwonym oznaczono sygnał przeniku pierwszego rzędu (m), kolorem zielonym sygnał przeniku drugiego rzędu (m^2), a kolorem niebieskim przenik trzeciego rzędu (m^3).

Należy jednak uwzględnić fakt, że przeniki wyższych rzędów są na tyle małe, że można je pominąć w dalszych analizach uwzględniając w szumie jedynie przeniki pierwszego rzędu.

Dla struktury pola komutacyjnego typu *baseline* zbudowanego z komutatorów o rozmiarze 2×2 występuje jedynie jeden przenik w obrębie jednego OSE. Z tego też względu, odstęp optycznego sygnału użytecznego od szumu OSXR dla tego typu pola komutacyjnego w przypadku ogólnym wynosi:

$$OSXR(\log_2 N) = |X| - 10 \log_{10}(\log_2 N) \text{ [dB]}. \quad (2.1)$$

Można zauważyć, że wartość OSXR zależy wprost od liczby sekcji $n = \log_2 N$ pola komutacyjnego. Im więcej sekcji w polu tym mniejszy OSXR.

2.3. Koszt architektury pola komutacyjnego typu *baseline*

Pole komutacyjne typu *baseline* zbudowane jest w ogólnym przypadku z komutatorów $d \times d$, które zawierają w sobie d^2 wzmacniaczy SOA i $2d$ łączników i rozgałęźników optycznych. Każda z n sekcji pola typu $\log_d N$ zawiera $\frac{N}{d}$ komutatorów o pojemności $d \times d$. Stąd koszt pola typu $\log_d N$ wyrażony liczbą aktywnych elementów optycznych wynosi:

$$\alpha(\log_d N) = n \cdot \frac{N}{d} \cdot d^2 = nNd. \quad (2.2)$$

Liczba pasywnych elementów optycznych wyznaczona jest z kolei zależnością:

$$\beta(\log_d N) = n \cdot \frac{N}{d} \cdot 2d = 2nN. \quad (2.3)$$

Całkowity koszt pola wyrażony liczbą aktywnych i pasywnych elementów optycznych wynosi zatem:

$$C(\log_d N) = \{\alpha(\log_d N); \beta(\log_d N)\}. \quad (2.4)$$

Nowa architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$

3.1. Architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$

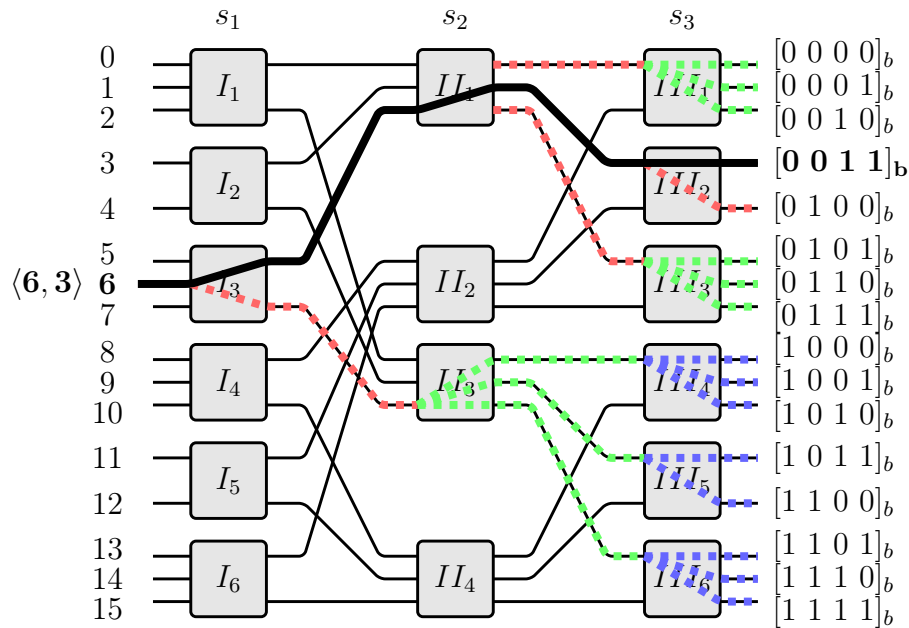
Architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ zbudowana jest zarówno z symetrycznych jak i niesymetrycznych elementów komutacyjnych odpowiednio połączonych ze sobą zgodnie ze wzorem doskonałego tasowania odwrotnego. Oba rodzaje komutatorów stosowane są w jednej strukturze pola komutacyjnego jednocześnie, w zależności od numeru sekcji s_i i od pojemności $N = 2^{n'+1}$ tego pola komutacyjnego, gdzie $i = 1, 2, \dots, n' - 1, n'$ oraz $n' = \log_2 N - 1$ jest liczbą sekcji w nowej architekturze pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$. Stąd też zaproponowano nazwę struktury nowego pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$.

Nowa struktura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ (rysunek 3.1), zaproponowana w rozprawie, bazuje na architekturze pola komutacyjnego typu $\log_2 N$, niemniej ma ona taką samą pojemność, ale jest zbudowana z jednej sekcji mniej niż pole typu *baseline*, co ma znaczenie dla jakości połączeń optycznych.

Komutatory, które są używane do budowy takiego pola komutacyjnego, mogą mieć rozmiar: 2×2 , 2×3 , 3×2 oraz 3×3 . Ich rozmiar przekłada się bezpośrednio na liczbę połączeń, które można zestawić w obrębie jednego OSE.

3.2. Rozbudowa architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$

Zgodnie z algorytmem rozbudowy, zaproponowanym w rozprawie, można otrzymać strukturę pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ ze struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 \left(\frac{N}{2}\right) - 1$. Czyli, architektura pola komutacyjnego $\log_2 8 - 1$ jest podstawą do rekurencyjnej budowy struktur pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$ o większych pojemności ($N \geq 16$). Struktura pola



Rysunek 3.1. Architektura pola komutacyjnego $\log_2 16 - 1$ wraz z zaznaczonymi przenikami: przenik pierwszego rzędu (kolor czerwony), przenik drugiego rzędu (kolor zielony) i przenik trzeciego rzędu (kolor niebieski)

komutacyjnego $\log_2 16 - 1$ powstaje z architektury pola komutacyjnego $\log_2 8 - 1$, struktura pola komutacyjnego $\log_2 32 - 1$ otrzymywana jest z rozbudowy architektury pola komutacyjnego $\log_2 16 - 1$, itd.

3.3. Własność samosterowalności pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$

W pracy opisano samosterowalność struktury pola komutacyjnego typu *baseline*. Wykazano ponadto, że nowa architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ także posiada cechę samosterowalności – czyli dowolne połączenie może być kierowane w polu komutacyjnym na podstawie numeru wyjścia, do którego jest ono kierowane.

3.4. Przeniki w architekturze pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$

Na rysunku 3.1 przedstawiony jest przykład zestawionego przykładowego połączenia $\langle 6, 3 \rangle$, reprezentowanego przez pogrubioną ciągłą czarną linię w polu $\log_2 16 - 1$. Pojawiające się przeniki w danym komutatorze będą się propagować do jego innych wyjść, a co za tym idzie, przez łącza międzysekcyjne do innych komutatorów z kolejnych sekcji struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$. Odpowiednie przeniki są zaznaczone również na rysunku 3.1 przez pogrubione

linie przerywane w kolorze czerwonym, zielonym i niebieskim. Linia czerwona oznacza przenik pierwszego rzędu występujący w strukturze pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$, linia zielona oznacza przenik drugiego rzędu, natomiast kolor niebieski oznacza przenik trzeciego rzędu. Należy jednak uwzględnić, że przeniki wyższych rzędów są na tyle małe, że można je pominąć w dalszych analizach uwzględniając w szumie jedynie przeniki pierwszego rzędu (co zostało przeanalizowane dogłębnie w rozprawie).

Miarą jakości użytecznego sygnału optycznego na wyjściu struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ jest odstęp sygnału użytecznego od szumu OSXR, podobnie jak to było dla struktury pola komutacyjnego typu *baseline*. Wyznaczając OSXR dla architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ należy rozpatrywać dwa przypadki wynikające bezpośrednio z tego z jakich elementów komutacyjnych jest zbudowana struktura pola o zadanej pojemności N . Z tego też względu odstęp optycznego sygnału użytecznego od szumu dla struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ wynosi:

$$OSXR(\log_2 N - 1) = \begin{cases} |X| - 10 \log_{10}(4) & \text{dla } N = 8, 16 \\ |X| - 10 \log_{10}(\log_2 N - 1) & \text{dla } N \geq 32 \end{cases} \quad (3.1)$$

3.5. Koszt architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$

Pole komutacyjne typu $\log_2 N - 1$ w ogólnym przypadku zbudowane jest z komutatorów o rozmiarze 3×3 , 3×2 , 2×3 oraz 2×2 , które zawierają w sobie xy wzmacniaczy SOA i $x + y$ łączników i rozgałęźników optycznych, gdzie x i y oznaczają liczbę wejść i wyjść OSE. W zależności od konkretnej pojemności N pola typu $\log_2 N - 1$, każda z n' sekcji zawiera różną liczbę wspomnianych komutatorów. Stąd liczba optycznych elementów aktywnych wynosi:

$$\alpha(\log_2 N - 1) = \begin{cases} 6 \cdot N & \text{dla } N = 8 \\ \frac{25}{4} \cdot N & \text{dla } N = 16 \\ 7 \cdot N & \text{dla } N = 32 \\ (2 + \log_2 N) \cdot N & \text{dla } N \geq 64 \end{cases}, \quad (3.2)$$

a liczba optycznych elementów pasywnych wynosi:

$$\beta(\log_2 N - 1) = \begin{cases} \frac{17}{4} \cdot N & \text{dla } N = 8 \\ 5 \cdot N & \text{dla } N = 16 \\ 6 \cdot N & \text{dla } N = 32 \\ (1 + \log_2 N) \cdot N & \text{dla } N \geq 64 \end{cases}. \quad (3.3)$$

Całkowity koszt pola wyrażony liczbą aktywnych i pasywnych elementów optycznych wynosi zatem:

$$C(\log_2 N - 1) = \{\alpha(\log_2 N - 1); \beta(\log_2 N - 1)\}, \quad (3.4)$$

Warunki nieblokowania w wąskim sensie oraz przestrajalności

4.1. Wstęp

Podczas zestawiania większej liczby połączeń w polu komutacyjnym może zaistnieć sytuacja, gdy nie można zestawić nowego połączenia ze względu na zajęte zasoby danego pola przez zestawione już wcześniej inne połączenia. Taki stan nazywany jest blokadą wewnętrzną w polu komutacyjnym. Blokada zewnętrzna zaistnieje natomiast w przypadku, gdy nowe połączenie ma być zestawione do wyjścia zajętego przez inne już wcześniej zestawione połączenie. Taki stan blokady nie jest jednak rozpatrywany w rozprawie, ponieważ odpowiednie sterowanie węzłem pozwala uniknąć stanu blokady zewnętrznej.

W węzłach sieci można stosować nieblokowane pola komutacyjne. Można wyróżnić kilka rodzajów nieblokowania. W literaturze przedmiotu omawiane były warunki nieblokowania w wąskim sensie, warunki nieblokowania w szerokim sensie, warunki przestrajalności czy też warunki przepakowywalności różnych struktur pól komutacyjnych. W tym rozdziale omawiane są jedynie warunki nieblokowania w wąskim sensie (ang. *Strict Sense Nonblocking* – *SSNB*) oraz przestrajalności (ang. *Rearrangeable Nonblocking* – *RRNB*) porównywanych w pracy struktur pól typu *baseline* oraz typu $\log_2 N - 1$.

Pole komutacyjne jest nieblokowane w wąskim sensie wtedy i tylko wtedy gdy, niezależnie od użytego algorytmu wyboru drogi połączeniowej, między wolnym wejściem a wolnym wyjściem można zestawić nowe połączenie.

Pole przestrajalne jest nieblokowane, jednakże aby zapewnić możliwość zestawienia połączenia między wolnym wejściem a wolnym wyjściem, w niektórych stanach pola niezbędne jest rozłączenie i ponowne połączenie istniejącego już w polu połączenia lub połączeń. Zazwyczaj pola przestrajalne wymagają mniejszej liczby zasobów sprzętowych niż pole nieblokowane w wąskim sensie. Okupione jest to jednak bardziej złożonym układem sterowania wyborem dróg połączeniowych w polu. Bardziej zaawansowane mechanizmy sterowania daną strukturą pola

komutacyjnego przekładają się na wydłużenie czasu zestawiania połączeń. Stąd też przestrzalne pola komutacyjne używane są w węzłach, gdzie czas zestawiania nowego połączenia nie gra najistotniejszej roli (na przykład w przełącznicach optycznych).

Nieblokwalne struktury pól typu *baseline* i $\log_2 N - 1$ można uzyskać przez równoległe połączenie kilku kopii pola tworząc tym samym struktury wielopłaszczyznowe.

4.2. Struktury wielopłaszczyznowe

W polach komutacyjnych można zastać taki stan zestawionych połączeń, że zestawione już połączenie lub połączenia uniemożliwiają zestawienie nowego połączenia. Rozwiązaniem tego problemu jest, na przykład, dodanie równoległe kolejnej kopii struktury pola komutacyjnego i zestawienie nowego połączenia w dodatkowej kopii pola. Przykład tworzenia struktury pola komutacyjnego przez równoległe łączenie kopii pola typu *baseline* został przedstawiony na rysunku 4.1. Każda kopia, jak i oryginał danej struktury pola komutacyjnego nazywane są płaszczyzną. W ogólnym przypadku może być $p > 1$ takich płaszczyzn. Wszystkie płaszczyzny są odpowiednio połączone z wejściami i wyjściami danej architektury pola komutacyjnego. Przy realizacji optycznej architektury pola komutacyjnego elementami łączącymi są optyczne rozgałęźniki sygnału optycznego po stronie wejściowej oraz optyczne łączniki sygnału optycznego po stronie wyjściowej pola komutacyjnego. Utworzona w ten sposób struktura nazywana jest wielopłaszczyznowym polem komutacyjnym na przykład typu *baseline* i oznaczana jest jako $\text{multi-}\log_2 N$ lub $\log_2(N, 0, p)$.

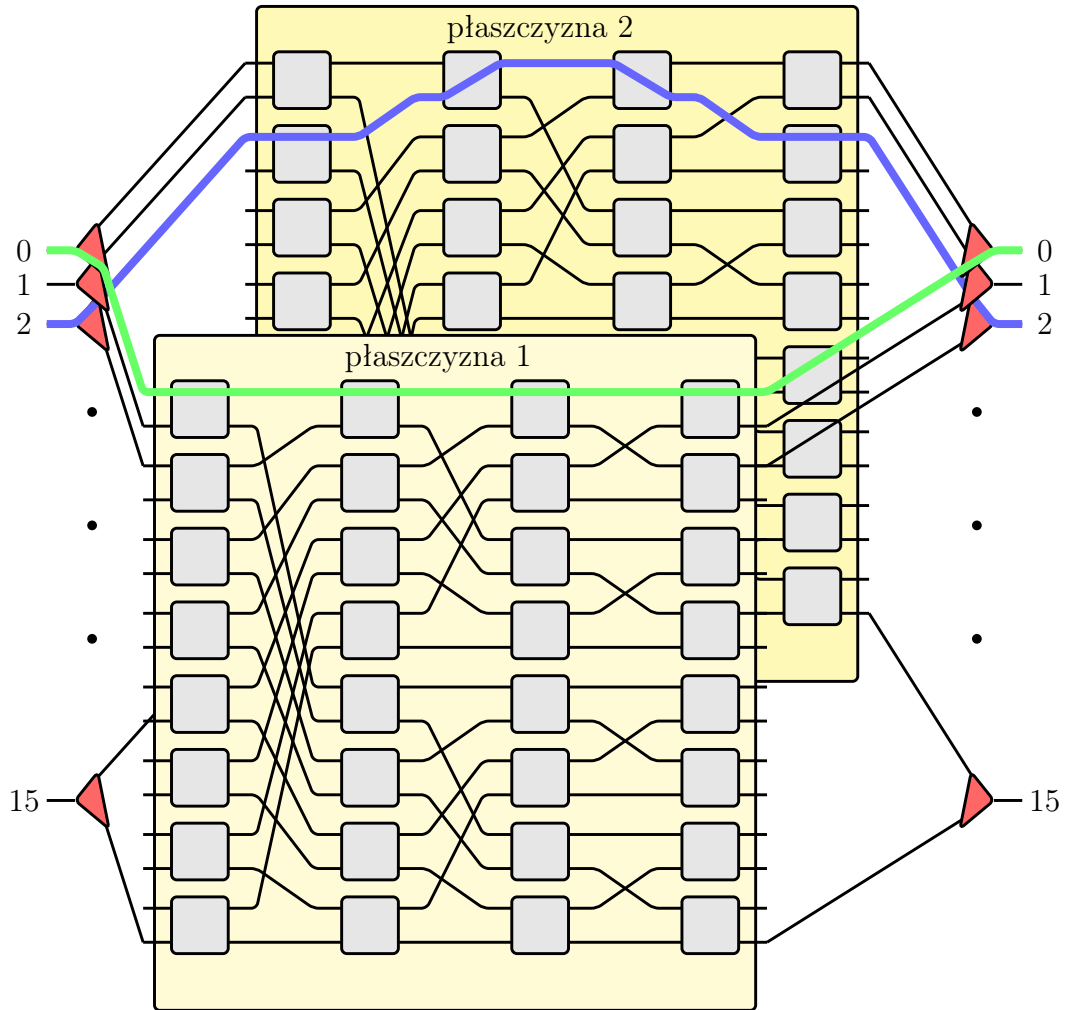
Na rysunku 4.1 przedstawiono przykład konieczności użycia więcej niż jednej płaszczyzny. W polu $\log_2(16, 0, 2)$ zestawione jest połączenie $\langle 0, 0 \rangle$ w płaszczyźnie 1 (oznaczone kolorem zielonym). Załóżmy, że w tym samym polu ma być zestawione nowe połączenie $\langle 2, 2 \rangle$. W płaszczyźnie 1 połączenie to jest blokowane przez połączenie $\langle 0, 0 \rangle$ w łączu międzysekcyjnym między komutatorami drugiej i trzeciej sekcji. Połączenie $\langle 2, 2 \rangle$ można jednak zestawić w płaszczyźnie 2 (oznaczone kolorem niebieskim).

4.3. Nieblokwalność w wąskim sensie pól komutacyjnych typu *baseline*

Architektura pola komutacyjnego typu *baseline* może być strukturą nieblokwalną jeżeli będzie się składać z p płaszczyzn, gdzie $p > 1$. Warunki nieblokwalności wyznaczają konieczną i wystarczającą liczbę płaszczyzn p , dla której pole jest nieblokwalne.

Warunki nieblokwalności w wąskim sensie w architekturach pól komutacyjnych typu *baseline* stanowiły temat badań prowadzonych przez Kaczmarka w latach osiemdziesiątych oraz przez Lea i Shyy na początku lat dziewięćdziesiątych. W pracy Lea i Shyy z 1990 roku zostało sformułowane i udowodnione następujące twierdzenie:

Twierdzenie 4.1. *Architektura pola komutacyjnego typu $\log_2(N, 0, p)$ jest nieblokwalna w wą-*



Rysunek 4.1. Dwupłaszczyznowa architektura pola komutacyjnego $\log_2(16, 0, 2)$

skim sensie dla połączeń typu punkt-punkt wtedy i tylko wtedy, gdy liczba płaszczyzn p wynosi:

$$p \geq \begin{cases} \frac{3}{2} \cdot 2^{\frac{n}{2}} - 1 & \text{dla parzystej liczby sekcjin} \\ 2^{\frac{n+1}{2}} - 1 & \text{dla nieparzystej liczby sekcjin.} \end{cases} \quad (4.1)$$

4.4. Niekowalność w wąskim sensie pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$

Nowa struktura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ może być rozbudowana do struktury wielopłaszczyznowej podobnie jak ma to miejsce w przypadku pola typu *baseline*. Nowe pole wielopłaszczyznowe oznaczone jest jako *multi- $\log_2 N - 1$* . Pole to może być nielokowalne w wąskim sensie dla odpowiedniej liczby płaszczyzn p . Twierdzenie i dowód zostały po raz pierwszy zaprezentowane przez autora rozprawy.

Twierdzenie 4.2. *Pole komutacyjne typu $\text{multi-}\log_2 N - 1$ jest nielokowalne w wąskim sensie*

dla połączeń typu punkt-punkt wtedy i tylko wtedy, gdy liczba płaszczyzn p wynosi:

$$p \geq \begin{cases} 3 & \text{dla } N = 8 \\ 5 & \text{dla } N = 16 \\ 10 & \text{dla } N = 32 \\ (4 - k) \cdot 2^{\lfloor \frac{\log_2 N - 1}{2} \rfloor} - 1 & \text{dla } N \geq 64 \end{cases} \quad (4.2)$$

Dowód. Szczegółowy dowód tego twierdzenia zamieszczony jest w rozprawie doktorskiej oraz stosownych publikacjach autora niniejszego autoreferatu. \square

4.5. Przestrzajalne pola komutacyjne typu *baseline*

Zagadnienie przestrzajalności pól komutacyjnych typu $\log_2(N, 0, p)$ rozważane było przez Lea na początku lat dziewięćdziesiątych. Zaproponowane zostało w niej i udowodnione następujące twierdzenie:

Twierdzenie 4.3. *Pole komutacyjne typu $\log_2(N, 0, p)$ jest przestrzajalne dla połączeń typu punkt-punkt wtedy i tylko wtedy, gdy liczba płaszczyzn p wynosi:*

$$p \geq 2^{\lfloor \frac{\log_2 N}{2} \rfloor}. \quad (4.3)$$

4.6. Warunki przestrzajalności pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$

W rozdziale wyprowadzono warunki przestrzajalności pól typu multi- $\log_2 N - 1$ po raz pierwszy zaproponowane przez autora rozprawy. Warunki przestrzajalności wyrażone są w następującym twierdzeniu:

Twierdzenie 4.4. *Pole typu multi- $\log_2 N - 1$ jest polem przestrzajalnym dla połączeń typu punkt-punkt wtedy i tylko wtedy, gdy liczba płaszczyzn p wynosi:*

$$p \geq \begin{cases} 3 & \text{dla } N = 8, 16 \\ 2^{\lfloor \frac{\log_2 N}{2} \rfloor} & \text{dla } N \geq 32 \end{cases} \quad (4.4)$$

Dowód. Szczegółowy dowód tego twierdzenia zamieszczony jest w rozprawie doktorskiej oraz stosownych publikacjach autora niniejszego autoreferatu. \square

Porównanie struktur pól komutacyjnych

5.1. Porównanie przeników w polach komutacyjnych typu *baseline* oraz $\log_2 N - 1$

Na wykresie z rysunku 5.1 przedstawione są wartości odstepu sygnału optycznego od szumu dla struktur pól komutacyjnych typu $\log_2 N$ (rozdział 2.2) oraz typu $\log_2 N - 1$ (rozdział 3.4) dla zadanych pojemności N . Im większa jest wartość OSXR, tym lepsza jest jakość sygnału optycznego na wyjściu danej struktury pola komutacyjnego.

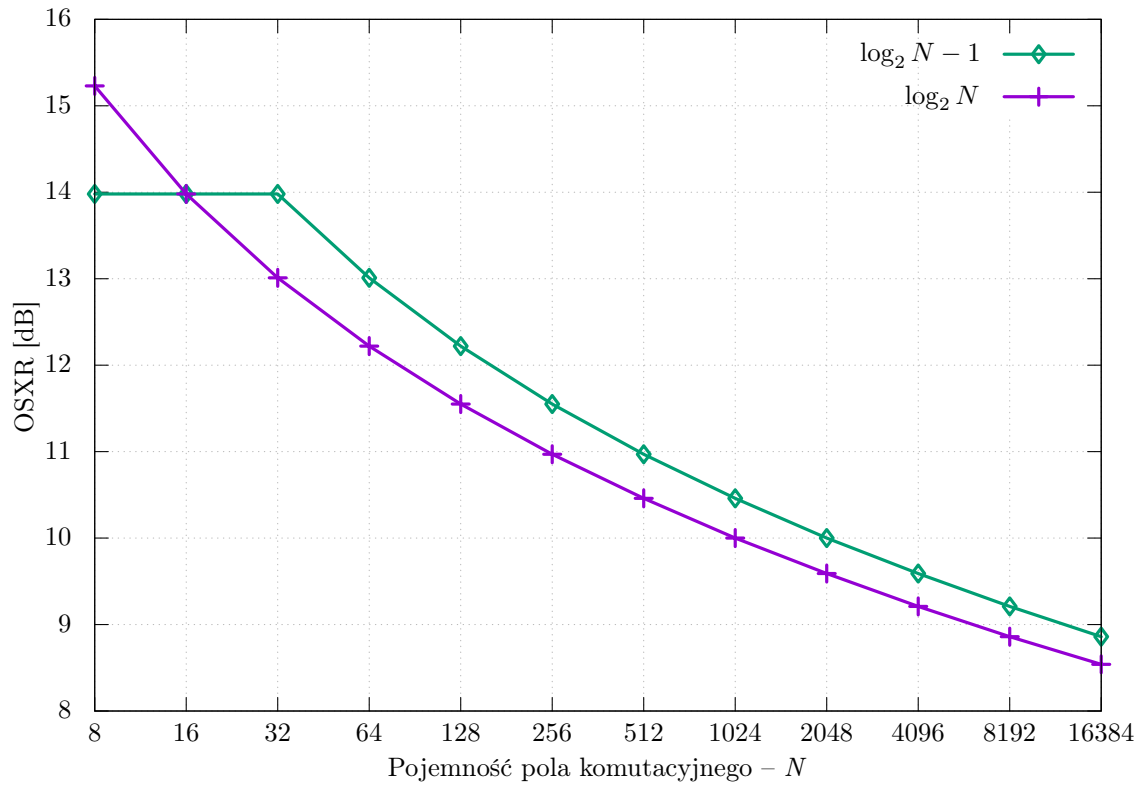
Z danych przedstawionych na rysunku 5.1 można zauważyć, że przeniki w nowej strukturze pola typu $\log_2 N - 1$ są mniejsze niż w polu typu *baseline* w prawie całym przedziale pojemności. Wyjątek stanowi pole o pojemności $N = 8$, dla którego zakłócenia są mniejsze w polu typu *baseline*. Dla pól o pojemności $N = 16$ przeniki mają taki sam wpływ na sygnał użyteczny w obu strukturach.

Zaletą nowej architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$, w porównaniu do struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N$, jest ograniczenie liczby sekcji, co przekłada się także na zmniejszenie wartości przeników zakłócających użyteczny sygnał optyczny. Z tego też względu, optyczny sygnał w strukturze pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ jest lepszej jakości niż w polu komutacyjnym typu *baseline*.

Zatem, nowa zaproponowana w niniejszej rozprawie struktura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ może być uznana za atrakcyjną pod względem odstepu użytecznego sygnału optycznego od szumu OSXR, a co za tym idzie, również i pod kątem jakości sygnału optycznego.

5.2. Porównanie kosztu budowy pól komutacyjnych typu *baseline* oraz $\log_2 N - 1$

Koszty budowy pól komutacyjnych typu $\log_2 N$ oraz typu $\log_2 N - 1$ dla różnych pojemności N zamieszczone zostały na wykresach przedstawionych na rysunkach 5.2 i 5.3.



Rysunek 5.1. Odstęp użytecznego sygnału optycznego od szumu (OSXR) dla struktur pól komutacyjnych typu $\log_2 N$ oraz typu $\log_2 N - 1$ (wyrażony w dB)

Na rysunku 5.2 przedstawione są koszty obu wspomnianych struktur pól komutacyjnych wyrażone w liczbie optycznych elementów pasywnych β . Natomiast na rysunku 5.3 przedstawione są koszty tych struktur pól komutacyjnych wyrażony w liczbie optycznych elementów aktywnych α . Architektura pola komutacyjnego mająca mniej optycznych elementów dla danej pojemności N jest tańszym rozwiązaniem.

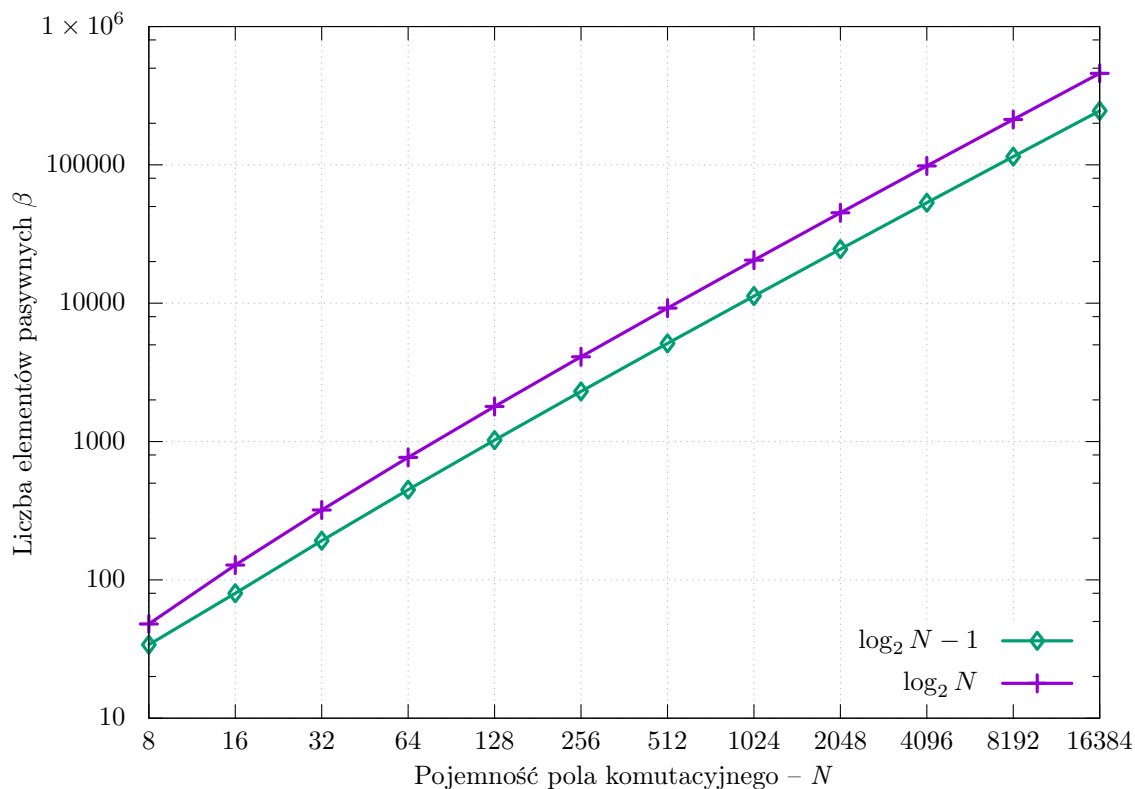
Z danych umieszczonych na rysunku 5.3 można zauważyć, że jedynie w polach o pojemności $N = 8$ liczba aktywnych elementów optycznych jest taka sama dla obu struktur. W pozostałych przypadkach nowa struktura zawiera zawsze mniej elementów aktywnych niż pole typu *baseline*.

Dla pojemności pól $N > 8$ koszt budowy nowej struktury pola jest zawsze mniejszy niż koszt budowy pól typu *baseline* o tej samej pojemności.

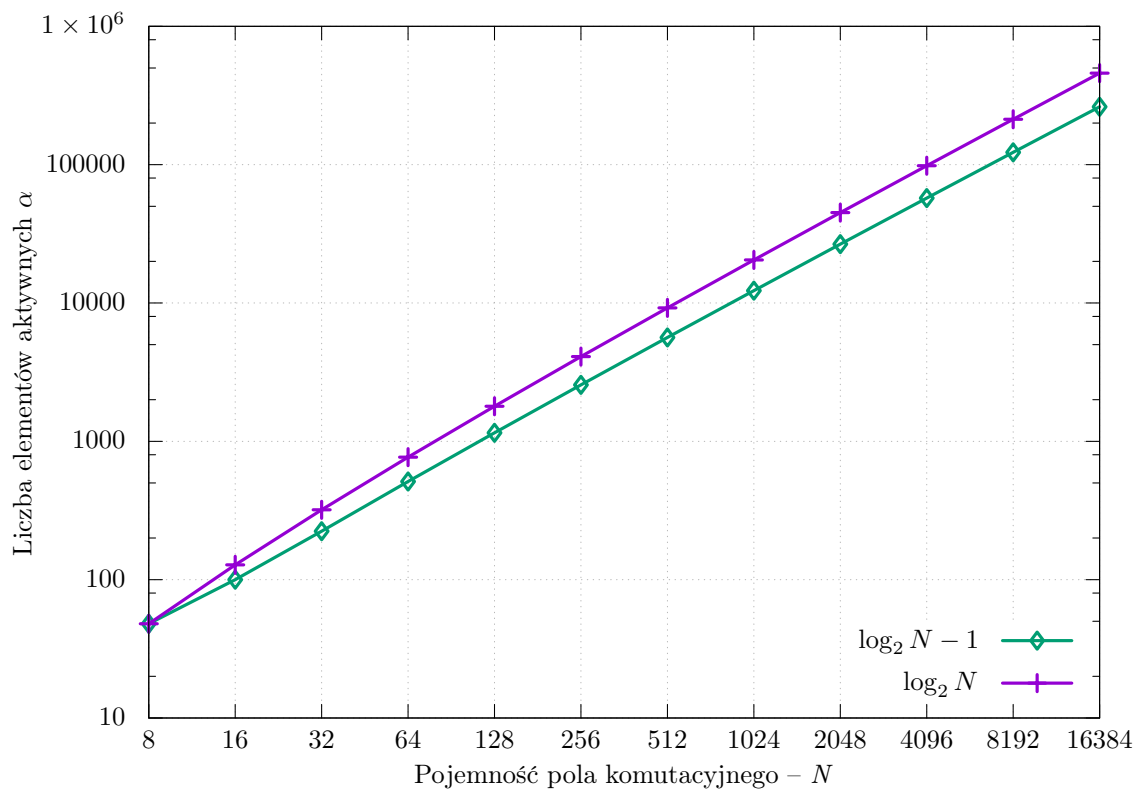
Natomiast z danych zamieszczonych na rysunkach 5.2 i 5.3 można zauważyć, że ogólny koszt budowy nowej struktury pola stanowi około 60% całkowitego kosztu budowy pola typu *baseline* o tej samej pojemności.

5.3. Porównanie nieblokownych w wąskim sensie pól komutacyjnych typu *baseline* oraz $\log_2 N - 1$

Koszt całej architektury pola wielopłaszczyznowego będzie iloczynem liczby płaszczyzn p , z których dana struktura pola komutacyjnego jest zbudowana, oraz kosztu pojedynczej płaszczyzny pola.



Rysunek 5.2. Koszt pól komutacyjnych typu $\log_2 N$ oraz typu $\log_2 N - 1$ wyrażony w liczbie pasywnych elementów optycznych β



Rysunek 5.3. Koszt pól komutacyjnych typu $\log_2 N$ oraz typu $\log_2 N - 1$ wyrażony w liczbie aktywnych elementów optycznych α

Koszt wielopłaszczyznowej architektury pola komutacyjnego typu *baseline* wynosi:

$$\begin{aligned} C_{SSNB}(\log_2(N, 0, p)) &= p \cdot C(\log_2 N) + 2 \cdot N \cdot C_{s/c}(1 \times p) = \\ &= \left\{ \alpha_{SSNB}(\log_2(N, 0, p)); \beta_{SSNB}(\log_2(N, 0, p)) \right\}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

gdzie liczba optycznych elementów aktywnych wynosi:

$$\alpha_{SSNB}(\log_2(N, 0, p)) = 2nN \left((3 - k) \cdot 2^{\lfloor \frac{\log_2 N - 1}{2} \rfloor} - 1 \right), \quad (5.2)$$

a liczba optycznych elementów pasywnych wynosi:

$$\beta_{SSNB}(\log_2(N, 0, p)) = 2N \left(n \left((3 - k) \cdot 2^{\lfloor \frac{\log_2 N - 1}{2} \rfloor} - 1 \right) + 1 \right), \quad (5.3)$$

oraz $k = n \bmod 2$.

Podobnie można wyznaczyć koszt pola komutacyjnego typu $\text{multi-}\log_2 N - 1$:

$$\begin{aligned} C_{SSNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) &= p \cdot C(\log_2 N - 1) + 2 \cdot N \cdot C_{s/c}(1 \times p) = \\ &= \left\{ \alpha_{SSNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1); \right. \\ &\quad \left. \beta_{SSNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) \right\}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

gdzie liczba optycznych elementów aktywnych wynosi:

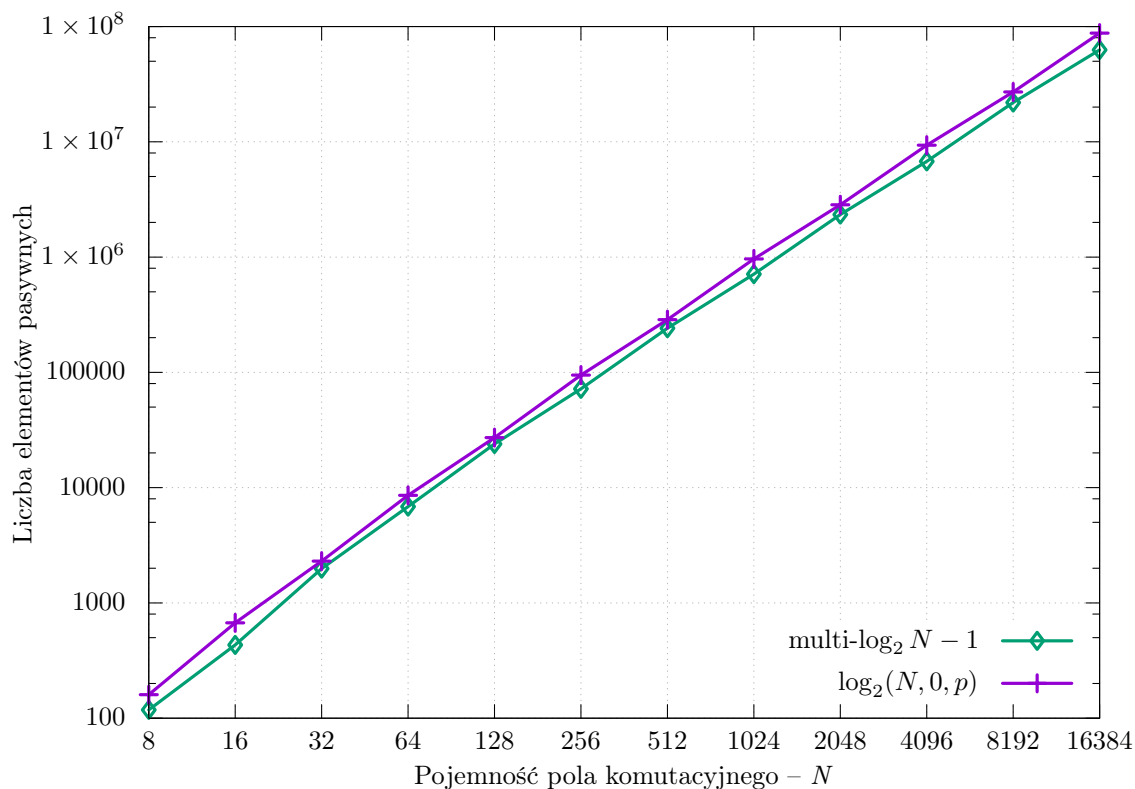
$$\alpha_{SSNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) = \begin{cases} 18 \cdot N & \text{dla } N = 8 \\ \frac{125}{4} \cdot N & \text{dla } N = 16 \\ 70 \cdot N & \text{dla } N = 32 \\ (\log_2 N + 2) \left((4 - k) \cdot 2^{\lfloor \frac{\log_2 N - 1}{2} \rfloor} - 1 \right) \cdot N & \text{dla } N \geq 64 \end{cases} \quad (5.5)$$

a liczba optycznych elementów pasywnych wynosi:

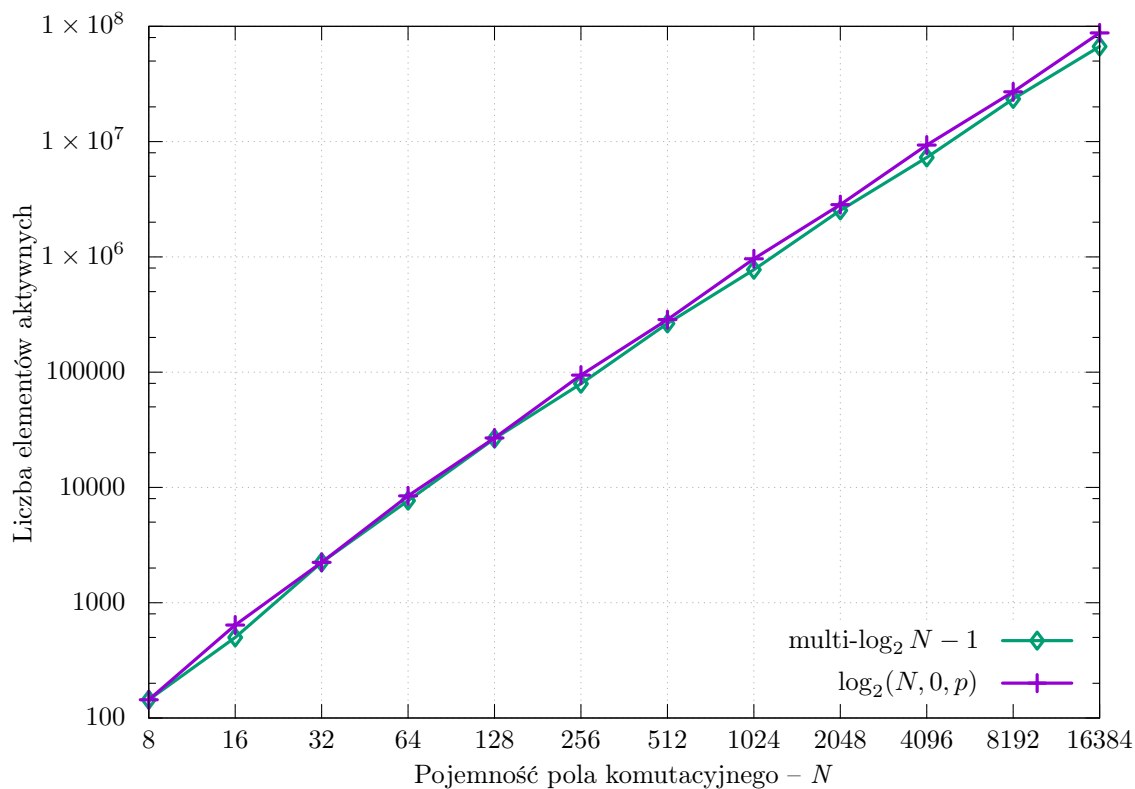
$$\beta_{SSNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) = \begin{cases} \frac{58}{4} \cdot N & \text{dla } N = 8 \\ 27 \cdot N & \text{dla } N = 16 \\ 62 \cdot N & \text{dla } N = 32 \\ \left((\log_2 N + 1) \left((4 - k) \cdot 2^{\lfloor \frac{\log_2 N - 1}{2} \rfloor} - 1 \right) + 2 \right) \cdot N & \text{dla } N \geq 64 \end{cases} \quad (5.6)$$

oraz $k = (n' + 1) \bmod 2$.

Na wykresach 5.4 i 5.5 przedstawiono koszt wielopłaszczyznowych, nieblokownych w wąskim sensie pól typu $\log_2(N, 0, p)$ i $\text{multi-}\log_2 N - 1$ wyrażony odpowiednio w liczbie pasywnych (β) i aktywnych (α) elementów optycznych. Na obu wykresach można zauważyć, że zarówno liczba elementów pasywnych jak i elementów aktywnych jest zawsze mniejsza lub co najwyżej równa w nowej strukturze pola wielopłaszczyznowego SSNB w całym zakresie pojemności pól. Warto zwrócić uwagę na fakt, że w nowej strukturze pola typu $\text{multi-}\log_2 N - 1$ liczba płaszczyzn wyznaczona z warunków nieblokowności (Twierdzenie 4.2) jest większa bądź równa liczbie płaszczyzn w polach typu $\log_2(N, 0, p)$ (wyznaczonej z Twierdzenia 4.1). Pomimo nie mniejszej liczby płaszczyzn nowa struktura zawiera mniej (lub co najwyżej tyle samo) elementów optycznych.



Rysunek 5.4. Koszt wielopłaszczyznowych pól komutacyjnych SSNB wyrażony w liczbie pasywnych elementów optycznych β



Rysunek 5.5. Koszt wielopłaszczyznowych pól komutacyjnych SSNB wyrażony w liczbie aktywnych elementów optycznych α

Pomimo tej samej liczby elementów aktywnych nowa struktura wielopłaszczyznowa pola SSNB jest tańsza ze względu na mniejszą liczbę elementów pasywnych. Mniejszy koszt nowej struktury wynika bezpośrednio z kosztu pojedynczej płaszczyzny – nowa struktura pola komutacyjnego typu $\text{multi-}\log_2 N - 1$ zbudowana jest z większej liczby tańszych płaszczyzn niż tradycyjna struktura pola komutacyjnego typu *baseline*, która jest zbudowana z mniejszej liczby droższych płaszczyzn.

5.4. Porównanie przestrzajalnych pól komutacyjnych typu *baseline* oraz $\log_2 N - 1$

Koszt całej struktury pola komutacyjnego, wyrażony w liczbie optycznych elementów aktywnych i pasywnych, będzie iloczynem liczby płaszczyzn p , wyznaczonej z warunków przestrzajności i z jakich dana struktura pola komutacyjnego jest zbudowana, oraz kosztu pojedynczej płaszczyzny struktury pola komutacyjnego.

Koszt wielopłaszczyznowego przestrzajnego pola komutacyjnego typu $\log_2(N, 0, p)$ wynosi:

$$\begin{aligned} C_{RRNB}(\log_2(N, 0, p)) &= p \cdot C(\log_2 N) + 2 \cdot N \cdot C_{s/c}(1 \times p) = \\ &= \left\{ \alpha_{RRNB}(\log_2(N, 0, p)); \beta_{RRNB}(\log_2(N, 0, p)) \right\}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

gdzie liczba optycznych elementów aktywnych wynosi:

$$\alpha_{RRNB}(\log_2(N, 0, p)) = 2nN \left(2^{\lfloor \frac{\log_2 N}{2} \rfloor} \right), \quad (5.8)$$

a liczba optycznych elementów pasywnych wynosi:

$$\beta_{RRNB}(\log_2(N, 0, p)) = 2N \left(2^{\lfloor \frac{\log_2 N}{2} \rfloor} \cdot n + 1 \right). \quad (5.9)$$

Podobnie można wyznaczyć koszt pola RRNB $\text{multi-}\log_2 N - 1$:

$$\begin{aligned} C_{RRNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) &= p \cdot C(\log_2 N - 1) + 2 \cdot N \cdot C_{s/c}(1 \times p) = \\ &= \left\{ \alpha_{RRNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1); \right. \\ &\quad \left. \beta_{RRNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) \right\}, \end{aligned} \quad (5.10)$$

gdzie liczba aktywnych elementów optycznych wynosi:

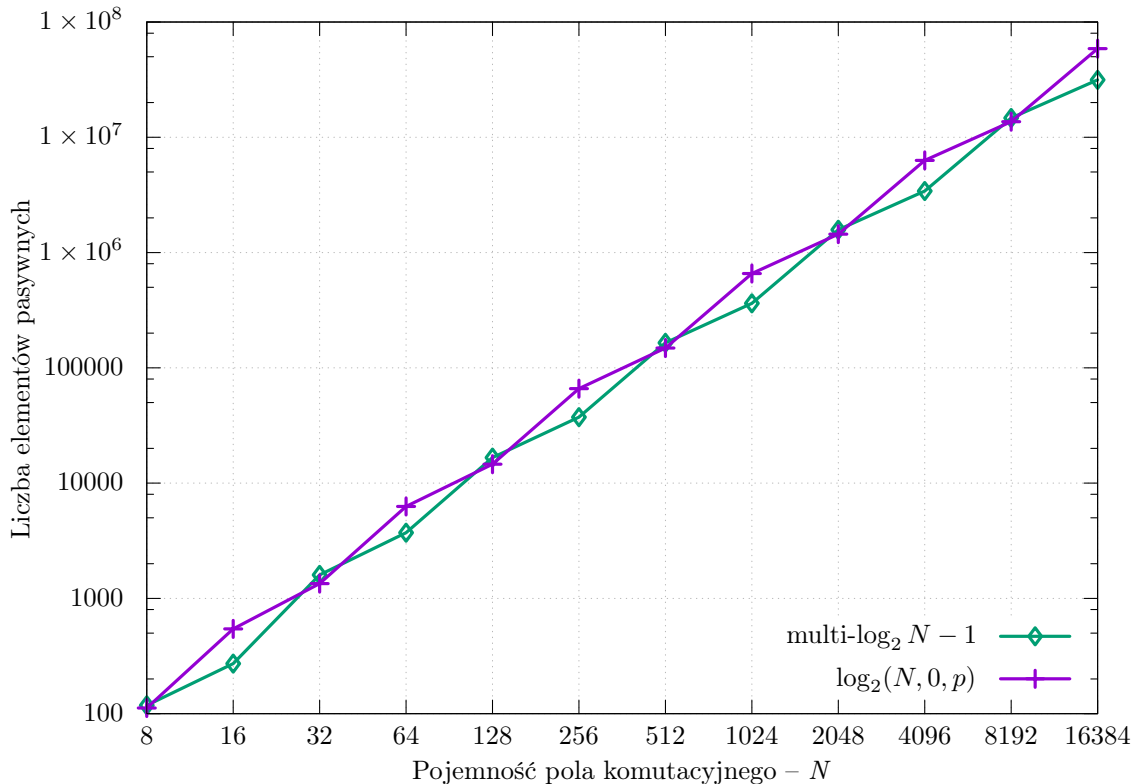
$$\alpha_{RRNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) = \begin{cases} 18 \cdot N & \text{dla } N = 8 \\ \frac{75}{4} \cdot N & \text{dla } N = 16 \\ 56 \cdot N & \text{dla } N = 32 \\ (\log_2 N + 2) 2^{\lfloor \frac{\log_2 N}{2} \rfloor} \cdot N & \text{dla } N \geq 64 \end{cases} \quad (5.11)$$

a liczba pasywnych elementów optycznych jest równa:

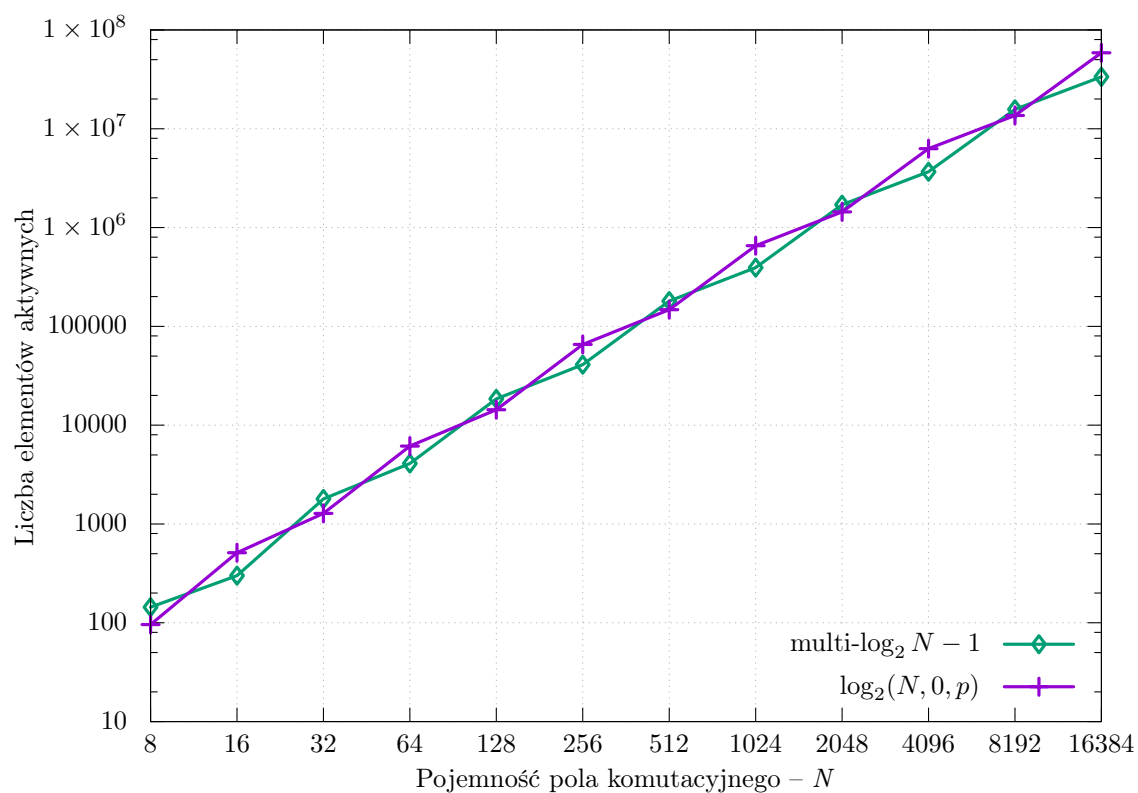
$$\beta_{RRNB}(\text{multi-}\log_2 N - 1) = \begin{cases} \frac{55}{4} \cdot N & \text{dla } N = 8 \\ 17 \cdot N & \text{dla } N = 16 \\ 50 \cdot N & \text{dla } N = 32 \\ \left((\log_2 N + 1) 2^{\lfloor \frac{\log_2 N}{2} \rfloor} + 2 \right) \cdot N & \text{dla } N \geq 64 \end{cases} \quad (5.12)$$

Koszt wielopłaszczyznowych, przestrajalnych pól typu $\log_2(N, 0, p)$ i $\text{multi-log}_2 N - 1$ wyrażony w liczbie pasywnych i aktywnych elementów optycznych został przedstawiony na wykresach na rysunkach 5.6 i 5.7. Nowa struktura pola komutacyjnego typu $\text{multi-log}_2 N - 1$, zaproponowana w rozprawie, dla nieparzystej liczby sekcji n' jest zawsze zbudowana z mniejszej liczby optycznych elementów aktywnych (półprzewodnikowych wzmacniaczy optycznych SOA) oraz z mniejszej liczby optycznych elementów pasywnych (łączników optycznych i rozgałęźników optycznych) niż struktura pola komutacyjnego typu $\log_2(N, 0, p)$ o tej samej pojemności N . Z kolei, gdy w nowej architekturze pola komutacyjnego typu $\text{multi-log}_2 N - 1$ liczba sekcji n' jest parzysta, koszt tej struktury pola komutacyjnego, wyrażony zarówno w liczbie optycznych elementów aktywnych jak i optycznych elementów pasywnych, jest zawsze większy niż koszt struktury pola komutacyjnego typu $\log_2(N, 0, p)$ o tej samej pojemności N .

Koszt pojedynczej płaszczyzny w nowej strukturze pola typu $\text{multi-log}_2 N - 1$ jest mniejszy niż koszt pojedynczej płaszczyzny w strukturze pola komutacyjnego typu $\log_2(N, 0, p)$. Z tego też względu, koszt całego pola wielopłaszczyznowego typu $\text{multi-log}_2 N - 1$ jest mniejszy niż koszt architektury pola komutacyjnego typu *baseline*. Stąd struktura pola komutacyjnego typu $\text{multi-log}_2 N - 1$ dla pojemności $N = 64$ jest tańszym rozwiązaniem.



Rysunek 5.6. Koszt wielopłaszczyznowych pól komutacyjnych RRNB wyrażony w liczbie pasywnych elementów optycznych β



Rysunek 5.7. Koszt wielopłaszczyznowych pól komutacyjnych RRNB wyrażony w liczbie aktywnych elementów optycznych α

Podsumowanie

W pracy przedstawiono nową, samosterowalną architekturę optycznych pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$. Zaproponowany został sposób budowy struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ oraz sposób jego rozbudowy do architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 2N - 1$ mającego dwukrotnie większą pojemność niż wyjściowa struktura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$. Ponadto, opierając się na znanej w telekomutacji metodzie wyznaczania odstepu sygnału optycznego od szumu zaproponowanej po raz pierwszy przez Lu i Thompson'a w roku 1994, określono w rozprawie sposób wyznaczania wartości odstepu optycznego sygnału użytecznego od szumu (OSXR) dla nowego pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$. Na podstawie tak wyznaczonej wartości OSXR można określić jakość sygnałów optycznych pojawiających się na wyjściu danej architektury pola komutacyjnego, co ma istotne znaczenie w komutacji optycznej. Zdefiniowano również sposób liczenia kosztu struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ aby móc ją porównać do architektury pola komutacyjnego typu *baseline*, na której bazuje zaproponowana w rozprawie nowa struktura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$. Jako koszt pola komutacyjnego przyjęto liczbę optycznych elementów aktywnych (reprezentowanych przez półprzewodnikowe wzmacniacze optyczne SOA) oraz liczbę optycznych elementów pasywnych (reprezentowanych przez rozgałęźniki i łączniki optyczne), z których dana struktura pola komutacyjnego jest zbudowana. W celu bardziej kompleksowego porównania nowej architektury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ z architekturą pola komutacyjnego typu *baseline*, wprowadzono i udowodniono dodatkowo warunki nieblokowności w wąskim sensie (SSNB) i warunki przestrajalności (RRNB) dla połączeń typu punkt-punkt dla wielopłaszczyznowych pól komutacyjnych typu multi- $\log_2 N - 1$. Tym samym cel pracy został osiągnięty a teza rozprawy została udowodniona.

Zaproponowana architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ została po raz pierwszy opisana w literaturze przedmiotu przez autora rozprawy, dra hab. inż. G. Danilewicza, prof. PP i prof. dra hab. inż. W. Kabacińskiego. Do określenia warunków nieblokowności w wąskim sensie oraz warunków przestrajalności dla nowego pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ wykorzystana została metoda wyznaczania najbardziej niekorzystnego stanu w polu za pomocą grafów dwudzielnych stosowana przy określaniu warunków nieblokowności dla pól komutacyjnych

typu *baseline*.

Do najważniejszych rezultatów rozprawy można zaliczyć następujące rozwiązania:

1. Zdefiniowanie nowej architektury optycznych pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$ realizujących połączenia typu punkt-punkt. Nowa struktura pola komutacyjnego jest zawsze zbudowana z jednej sekcji mniej niż odpowiadająca jej architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N$ o tej samej pojemności. Ma to niebagatelne znaczenie w komutacji optycznej.
2. Zdefiniowanie samosterowalności w architekturach pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$.
3. Określenie sposobu wyznaczania wartości odstepu optycznego sygnału użytecznego od szumu OSXR dla nowej struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$. Nowa architektura jedynie dla pojemności $N = 8$ ma mniejszy odstęp optycznego sygnału użytecznego od szumu OSXR niż tradycyjna struktura pola komutacyjnego typu $\log_2 N$, dobrze znana z literatury przedmiotu. Dla pojemności $N = 16$, architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ ma dokładnie taką samą wartość odstepu optycznego sygnału użytecznego od szumu jak struktura pola komutacyjnego typu $\log_2 N$. Warto zauważyć, iż nowa architektura pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ w pozostałym zakresie pojemności ($N \geq 32$) ma zawsze lepszą (większą) wartość odstepu optycznego sygnału użytecznego od szumu OSXR niż typowa struktura pola komutacyjnego typu *baseline*.
4. Sformułowanie i udowodnienie warunków nieblokwalności w wąskim sensie (SSNB) struktur pól komutacyjnych typu multi- $\log_2 N - 1$ realizujących połączenia typu punkt-punkt (twierdzenie 4.2). Nowa architektura pola komutacyjnego typu multi- $\log_2 N - 1$ w całym zakresie pojemności pola komutacyjnego wymaga do budowy mniejszej liczby optycznych elementów aktywnych i pasywnych niż architektura pola komutacyjnego typu *baseline* o tej samej pojemności.
5. Sformułowanie i udowodnienie warunków przestrajalności (RRNB) struktur pól komutacyjnych typu multi- $\log_2 N - 1$ realizujących połączenia typu punkt-punkt (twierdzenie 4.4). Nowa architektura pola komutacyjnego typu multi- $\log_2 N - 1$ w całym zakresie pojemności pola komutacyjnego wymaga mniejszej liczby optycznych elementów aktywnych i pasywnych niż struktura pola komutacyjnego typu *baseline* o tej samej pojemności gdy liczba sekcji jest nieparzysta. Dla parzystej liczby sekcji, nowa struktura pola komutacyjnego typu multi- $\log_2 N - 1$ zbudowana jest z większej liczby optycznych elementów aktywnych i pasywnych niż architektura pola komutacyjnego typu *baseline* o tej samej pojemności.

Rozprawa nie wyczerpuje zagadnień budowy samosterowalnych optycznych pól komutacyjnych, jak również i opisu własności kombinatorycznych struktur pól komutacyjnych typu $\log_2 N - 1$. Badania i opracowanie nowej struktury pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$, opisanego w rozprawie, zostały przez autora pracy wykorzystane do opracowania bardziej ogólnego przypadku pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$. Wyniki tych badań omówiono w kolejnych publikacjach i zgłoszeniu patentowym. Badania przedstawione w pracy stanowią punkt wyjścia dla dalszych, zarówno tych przeprowadzanych obecnie jak i przyszłych, badań oraz rozwiązań.

Publikacje

Publikacje z listy JCR:

1. G. Danilewicz, R. Rajewski, „The Architecture and Strict-Sense Nonblocking Conditions of a New Baseline-Based Optical Switching Network Composed of Symmetrical and Asymmetrical Switching Elements”, *IEEE Transactions on Communications*, t. 62, nr 3, str. 1058–1069, marzec 2014.
2. G. Danilewicz, W. Kabaciński, R. Rajewski, „The $\log_2 N - 1$ Optical Switching Fabrics”, *IEEE Transactions on Communications*, t. 59, nr 1, str. 213–225, styczeń 2011.

Rozdziały w książkach krajowych:

3. R. Rajewski, „Quality of Optical Connections in the $MBA(N, e, 2)$ Switching Network”, *Information Systems Architecture and Technology. Selected Aspects of Communication and Computational Systems*, Biblioteka Informatyki Szkół Wyższych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, str. 55–64, 2014.
4. R. Rajewski, „Quality of Optical Connections in the $\log_2 N - 1$ Switching Network”, *Information Systems Architecture and Technology. Networks Design and Analysis*, Biblioteka Informatyki Szkół Wyższych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, str. 181–189, 2012.

Konferencje międzynarodowe:

5. R. Rajewski, „The Rearrangeable Nonblocking Conditions in the multi- $MBA(N, e, 2)$ Switching Network”, *IEEE 16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, IEEE NETWORKS '14*, Funchal, Madera, Portugalia, str. 1–6, wrzesień 2014.

6. G. Danilewicz, W. Kabaciński, R. Rajewski, „The New Banyan-Based Switching Fabric Architecture Composed of Asymmetrical Optical Switching Elements”, *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '09*, Honolulu, HI, USA, str. 1–6, grudzień 2009.
7. R. Rajewski, „Nonblocking Switching Network Composed of Optical Switching Elements with Different Sizes”, *BONE Master and BONE-TIGER2 joint Summer School 2010*, Budapeszt, Węgry, str. 84–86, wrzesień 2010.

Czasopisma krajowe:

8. R. Rajewski, „Warunki przestrajalności dla pola komutacyjnego typu $MBA(N, e, 2)$ ”, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, t. 8–9, str. 1108–1117, wrzesień 2014. [II nagroda w Konkursie Młodych Naukowców]
9. R. Rajewski, „Warunki nieblokwalności w wąskim sensie dla pola komutacyjnego typu $MBA(N, e, 2)$ ”, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, t. 8–9, str. 671–680, wrzesień 2013. [III nagroda w Konkursie Młodych Naukowców]
10. R. Rajewski, „Nowa architektura optycznego pola komutacyjnego typu $MBA(N, e, 2)$ zbudowana z symetrycznych i niesymetrycznych elementów komutacyjnych”, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, t. 8–9, str. 725–736, wrzesień 2012. [III nagroda w Konkursie Młodych Naukowców]
11. R. Rajewski, „Przestrajalność pola typu $\log_2 N - 1$ ”, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, t. 8–9, str. 1338–1343, wrzesień 2011.
12. R. Rajewski, „Nieblokwalność w wąskim sensie pola typu $\log_2 N - 1$ ”, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, t. 8–9, str. 1344–1349, wrzesień 2011.
13. G. Danilewicz, W. Kabaciński, R. Rajewski, „Nowa architektura pól komutacyjnych zbudowanych z niesymetrycznych komutatorów optycznych”, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, t. 8–9, str. 1593–1603, wrzesień 2009.

Zgłoszenia patentowe:

14. G. Danilewicz, R. Rajewski, „Sposób budowy pola komutacyjnego typu $MBA(N, e, 2)$ oraz optyczne pole komutacyjne typu $MBA(N, e, 2)$ ”, *Zgłoszenie patentowe nr P.393361*, grudzień 2010.
15. W. Kabaciński, R. Rajewski, „Sposób budowy pola komutacyjnego typu $\log_2 N - 1$ oraz optyczne pole komutacyjne typu $\log_2 N - 1$ ”, *Zgłoszenie patentowe nr P.389766*, grudzień 2009.