



Węzły Internetu Nowej Generacji

Andrzej Jajszczyk

Katedra Telekomunikacji AGH

© A. Jajszczyk

Plan



- **Nagrody FNP**
- **Wielosekcyjne pola komutacyjne**
 - **Pola Closa**
 - **Własności kombinatoryczne pól komutacyjnych: przegląd wyników**
 - **Pola zbudowane z komutatorów cyfrowych**
 - **Pola wielopołączeniowe**
 - **Optymalizacja pól komutacyjnych**

© A. Jajszczyk

Nagrody FNP



- **Fundacja na rzecz Nauki Polskiej**
- **Nagrody indywidualne „za szczególne osiągnięcia i odkrycia naukowe, które stanowią istotny wkład w życie duchowe i postęp cywilizacyjny naszego kraju oraz zapewniają Polsce miejsce w nauce światowej”**
- **Nagrody przyznawane od 1992 roku**

© A. Jajszczyk

Nagrody FNP



- **Nagroda przyznawana jest w czterech obszarach:**
 - **nauk humanistycznych i społecznych**
 - **nauk przyrodniczych i medycznych**
 - **nauk ścisłych**
 - **nauk technicznych**
- **Wysokość nagrody: 200 000 zł**

© A. Jajszczyk

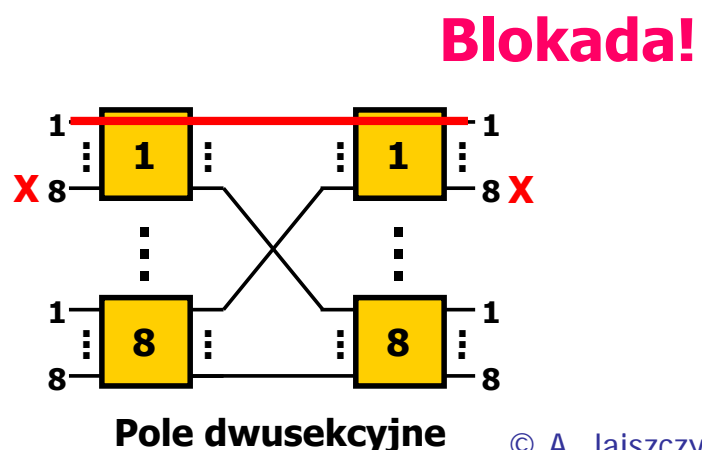
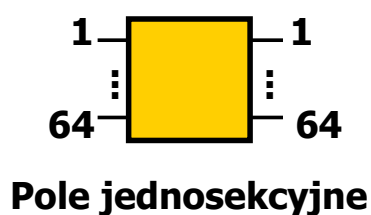
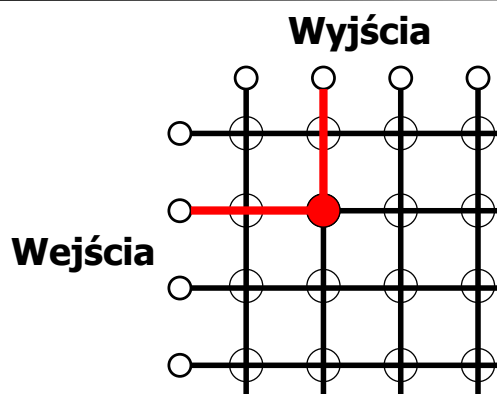
Za co otrzymałem nagrodę



- 6 książek
- Ponad 250 publikacji (w tym ponad 50 w czasopismach z listy filadelfijskiej)
- 19 patentów (w tym w USA i kilku krajach Europy Zachodniej)
- 228 cytowań wg. *Science Citation Index*
- Cytowania w kilkudziesięciu patentach (głównie USA)
- 40 tutoriali (Australia, Kanada, Chiny, Egipt, Francja, Grecja, Hiszpania, Indie, Kostaryka, Meksyk, Niemcy, Nowa Zelandia, Panama, Peru, Polska, Tajwan, Włochy, USA)

© A. Jajszczyk

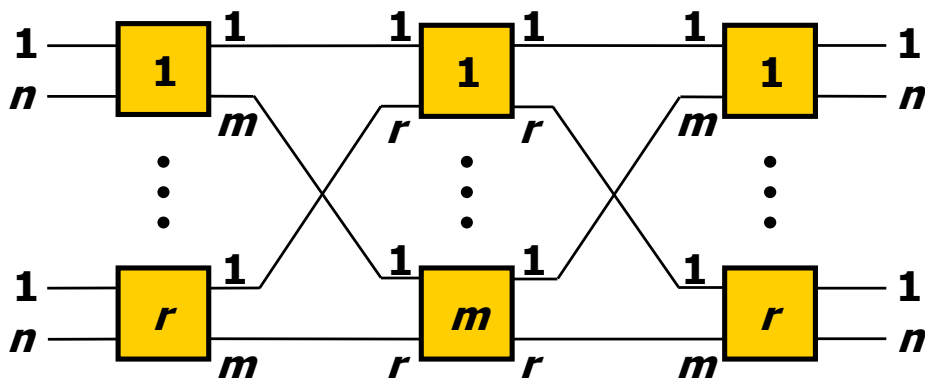
Wielosekcyjne pola komutacyjne



© A. Jajszczyk

Trzysekcyjne pole Closa

$v(m, n, r)$

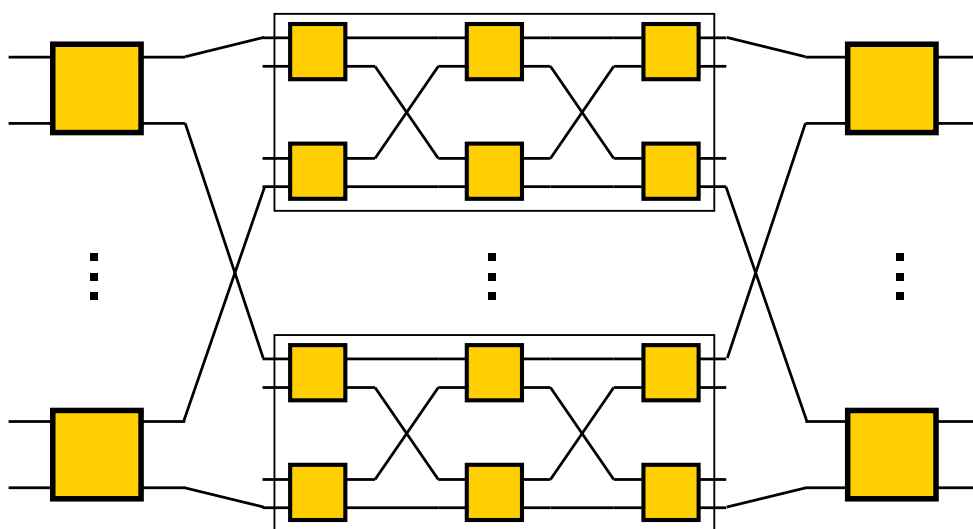


C. Clos, „A study of non-blocking switching networks”, *Bell System Technical Journal*, vol. 32, no. 2, 1953

A. Jajszczyk, „Nonblocking, repackable, and rearrangeable Clos networks: fifty years of the theory evolution”, *IEEE Commun. Mag.*, no. 10, 2003

© A. Jajszczyk

Zwiększanie pojemności pól Closa



© A. Jajszczyk

Podział pól ze względu na występowanie stanów blokady



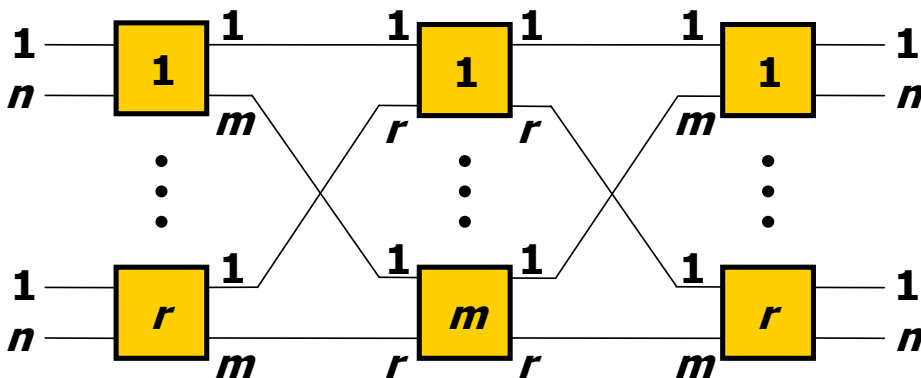
Stanem blokady pola komutacyjnego nazywamy stan, w którym nie można zestawić połączenia między dowolną parą: wolne wejście – wolne wyjście, a jednocześnie dla rozpatrywanego pola istnieją stany, w których zestawienie takiego połączenia jest możliwe (istnieje dostępność wejście – wyjście)

Rodzaje pól:

- pola nieblokowane w wąskim sensie
- pola nieblokowane w szerokim sensie
- pola przepakowalne
- pola przestrajalne
- pola blokowane

© A. Jajszczyk

Twierdzenie Closa



Twierdzenie Closa: Trzysekcyjne pole komutacyjne Closa $v(m, n, r)$ jest nieblokowane w wąskim sensie wtedy i tylko wtedy, gdy $m \geq 2n - 1$

© A. Jajszczyk

Ważna obserwacja



- Pole Closa może zawierać mniej punktów komutacyjnych niż komutator kwadratowy o tej samej pojemności
- Przykład: $N = 1000$

Komutator kwadratowy: $C = 1000\ 000$

Pole Closa: $C = 175\ 500$ (Clos: 186 737)

© A. Jajszczyk

Pola nieblokowlane w szerokim sensie



V. E. Beneš, *Mathematical Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic*, Academic Press, New York, 1965

W trzysekcyjnym polu Closa $v(\lfloor 3n/2 \rfloor, n, 2)$ można uniknąć stanów blokady stosując algorytm wyboru dróg połączeniowych, polegający na nie zajmowaniu całkowicie wolnego komutatora sekcji środkowej, o ile droga może być zestawiona przez komutator częściowo zajęty

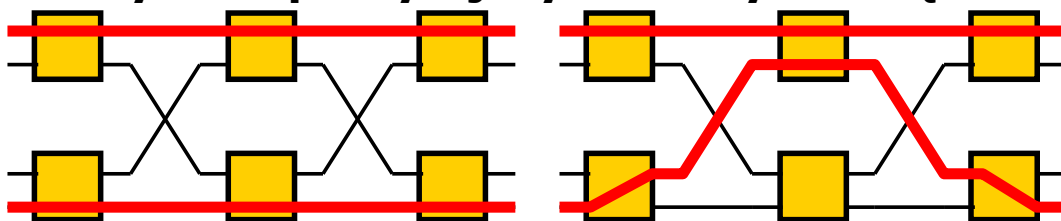
© A. Jajszczyk

Pola przepakowywalne



Definicja 1: Stanem **nietrwałym** pola komutacyjnego nazywamy stan, po którego osiągnięciu pole przechodzi natychmiast w inny stan

Definicja 2: Stanem **nierównowagi** pola komutacyjnego nazywamy stan, w którym istnieje droga połączeniowa, która może być rozłączona i zestawiona ponownie przez inny, bardziej obciążony komutator sekcji środkowej (obciążenia są porównywane po wyżej wymienionym rozłączeniu).



Stan nierównowagi

Stan równowagi

© A. Jajszczyk

Pola przepakowywalne, c.d.



Twierdzenie: W trzysekcyjnym polu Closa $v(m, n, r)$ blokada nie występuje wtedy i tylko wtedy, gdy

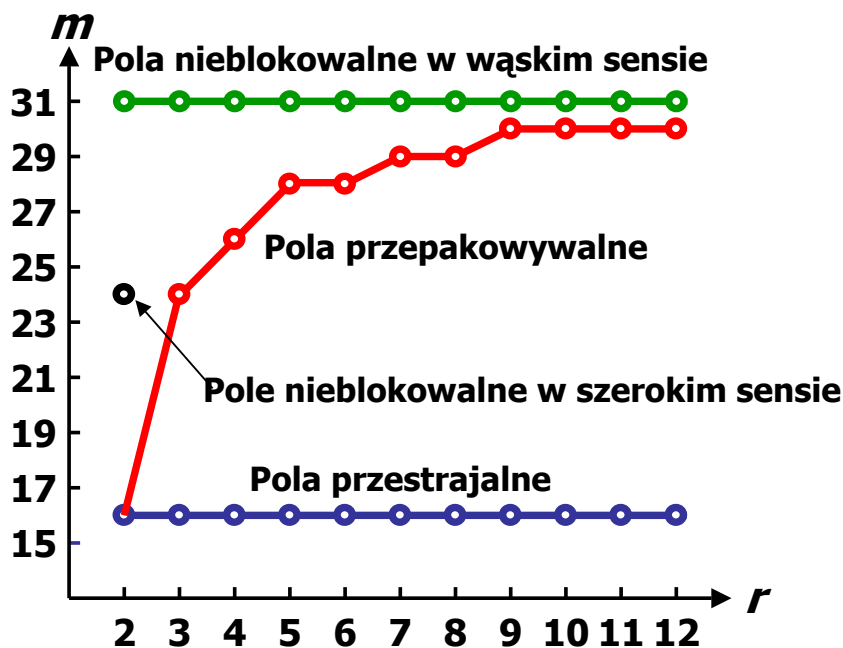
$$m \geq 2n - \left\lceil \frac{n}{r-1} \right\rceil$$

a pole jest sterowane w taki sposób, że każdy stan nierównowagi jest stanem nietrwałym

A. Jajszczyk, G. Jekel, „A new concept — repackable networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 41, August 1993

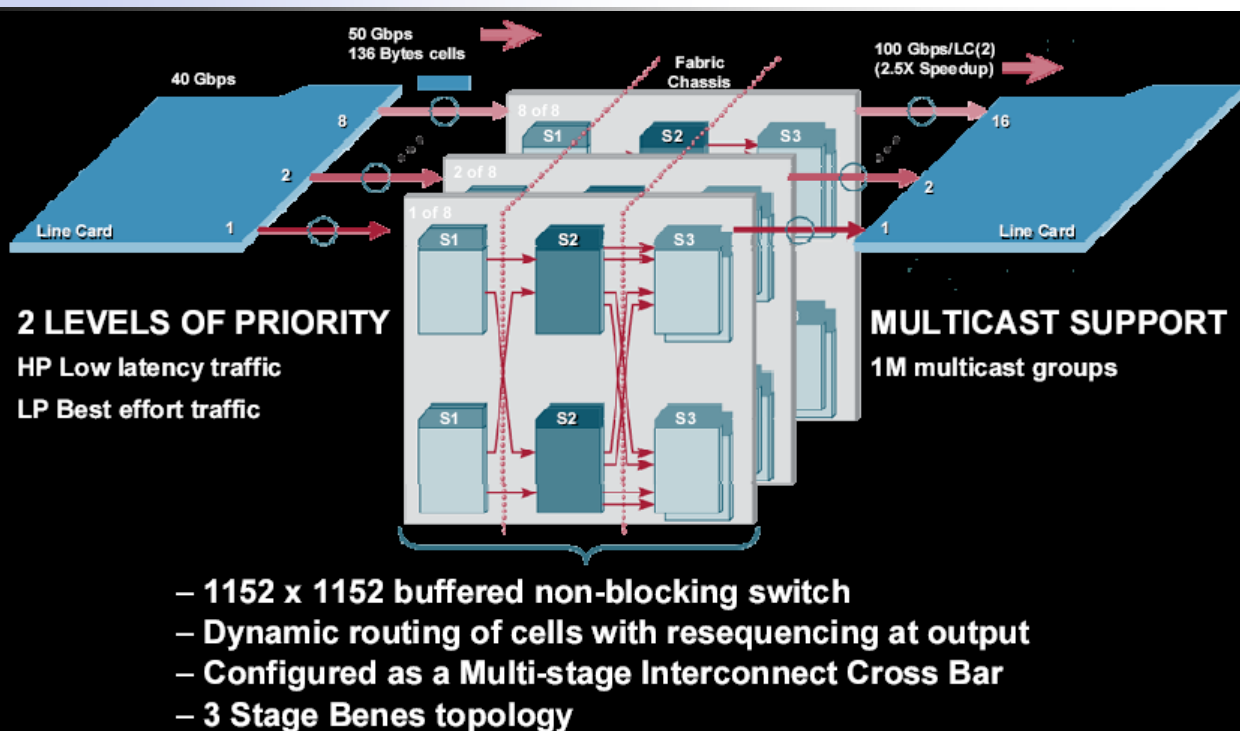
© A. Jajszczyk

Porównanie pól komutacyjnych Closa, $n = 16$



© A. Jajszczyk

Przykład praktyczny: CRS-1



Source: Cisco Systems

© A. Jajszczyk

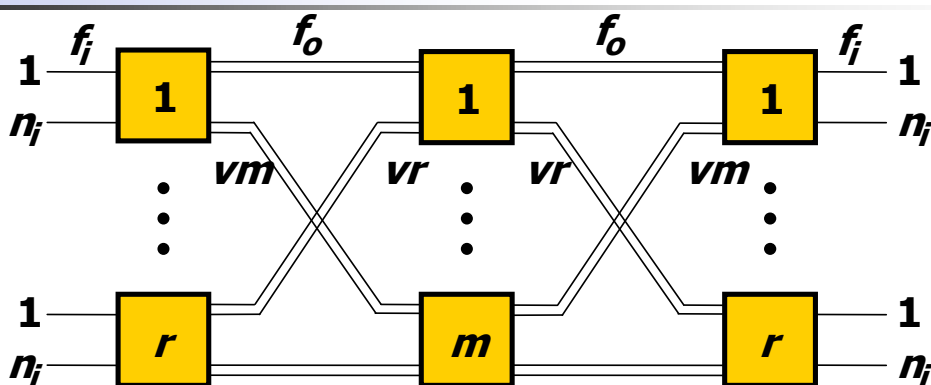
CRS-1: Podstawowe dane



- Szybki ruter dla sieci szkieletowych
- Do 1024 kart liniowych (do 40 Gbit/s każda)
- Programowane przekazywanie pakietów
- 3-sekcyjne przestrajalne pole Closa o przepustowości 46 Tbit/s
- Koszt opracowania: ~ 500 mln US\$
- Cena karty liniowej: ~ 1 mln US\$

© A. Jajszczyk

Pola z komutatorów scalonych: Warunki nieblokowania



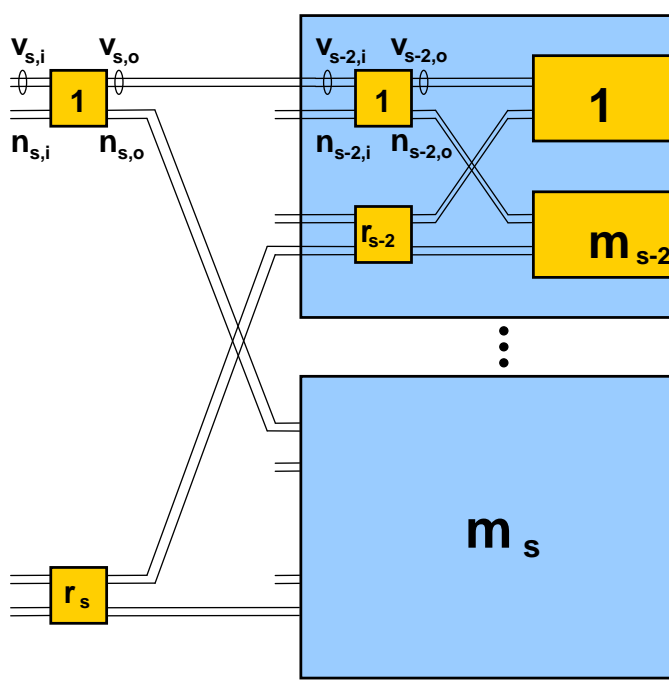
Warunek nieblokowania w wąskim sensie:

$$m \geq 2 \left\lfloor \frac{n_i f_i - 1}{v f_o} \right\rfloor + 1$$

A. Jajszczyk, „On nonblocking switching networks composed of digital symmetrical matrices”, *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 31, Jan. 1983

© A. Jajszczyk

Pola wielosekcyjne

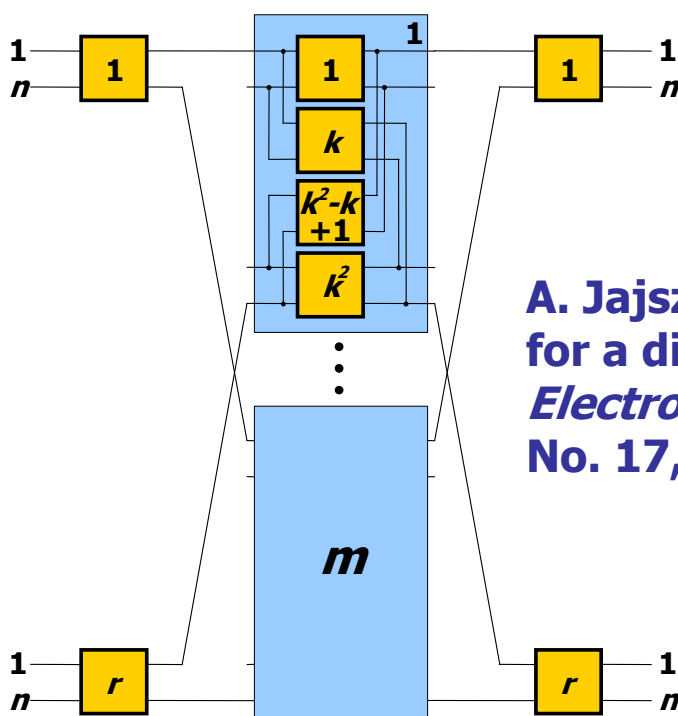


Maksymalna pojemność pola zbudowanego z komutatorów $n \times n$:

$$L_{s,\max} = n^{\frac{s+1}{2}}$$

© A. Jajszczyk

Pole zmodyfikowane



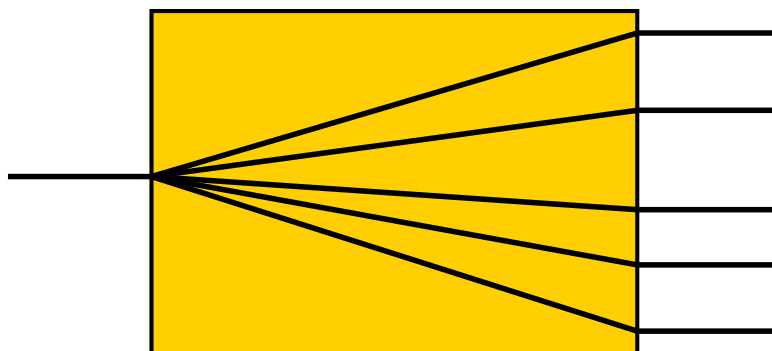
A. Jajszczyk, "Novel architecture for a digital switching network", *Electronics Letters*, vol. 20, No. 17, 1984

© A. Jajszczyk

Pole rozgałęźne (typu *multicast*)



- W połączeniu rozgałęźnym wejście jest połączone z więcej niż jednym wyjściem



© A. Jajszczyk

Pola (q_1, q_2) -połączeniowe

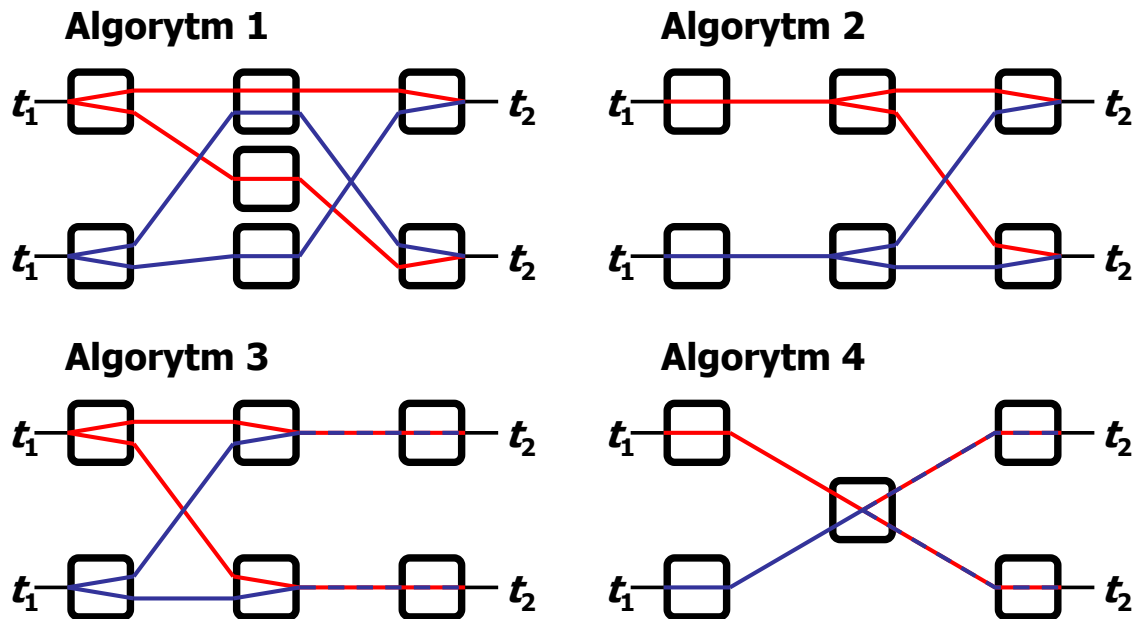


Niech I oznacza zbiór wejść, a O zbiór wyjść. Parą połączeniową jest para (T_1, T_2) : $T_1 \subseteq I$, $T_2 \subseteq O$, taka że każde wejście należące do zbioru T_1 ma być połączone z każdym z wyjść należących do zbioru T_2 .

W polu komutacyjnym (q_1, q_2) -połączeniowym mamy do czynienia z parami połączeniowymi (T_1, T_2) , $|T_1| \leq q_1$, $|T_2| \leq q_2$.

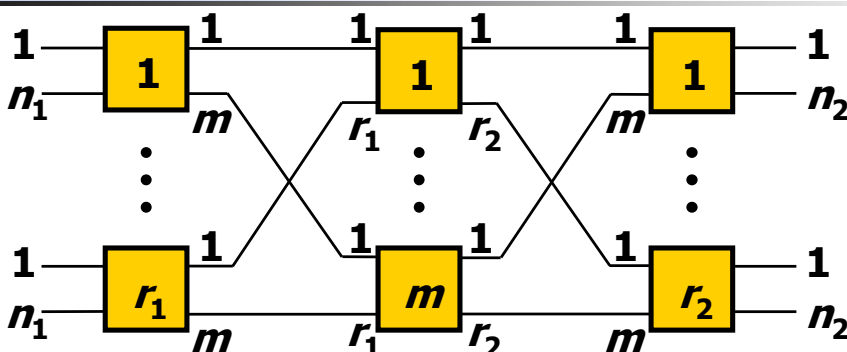
© A. Jajszczyk

Pola wielopołączeniowe — algorytmy sterowania



© A. Jajszczyk

Pola wielopołączeniowe — warunki nieblokowania



Założenie: $r_1 \geq q_1 q_2 n_1$
 $r_2 \geq q_1 q_2 n_2$

Twierdzenie 1*: Trzysekcyjne pole $v(m, n_1, r_1, n_2, r_2)$ jest nieblokowane jako pole (q_1, q_2) -połączeniowe przy zastosowaniu algorytmu 1 wtedy i tylko wtedy, gdy $m \geq n_1 q_2 + n_2 q_1 - 1$

Twierdzenie 2:** Trzysekcyjne pole $v(m, n_1, r_1, n_2, r_2)$ jest nieblokowane jako pole (q_1, q_2) -połączeniowe przy zastosowaniu algorytmu 2 wtedy i tylko wtedy, gdy $m \geq q_1 q_2 (n_2 - 1) + q_1 + n_1 - 1$

© A. Jajszczyk

Pola wielopołączeniowe — warunki nieblokowania



Twierdzenie 3:** Trzysekcyjne pole $v(m, n_1, r_1, n_2, r_2)$ jest nieblokowane jako pole (q_1, q_2) -połączeniowe przy zastosowaniu algorytmu 3 wtedy i tylko wtedy, gdy $m \geq q_1 q_2 (n_1 - 1) + q_2 + n_2 - 1$

Twierdzenie 4*: Trzysekcyjne pole $v(m, n_1, r_1, n_2, r_2)$ jest nieblokowane jako pole (q_1, q_2) -połączeniowe przy zastosowaniu algorytmu 4 wtedy i tylko wtedy, gdy $m \geq n_1 q_1 + n_2 q_2 - q_1 - q_2 + 1$

* F. K. Hwang, „Three-stage multiconnection networks which are nonblocking in the wide sense”, *Bell System Technical Journal*, no. 10, 1979

** A. Jajszczyk, „Comments on three-stage multiconnection networks which are nonblocking in the wide sense”, *Bell System Technical Journal*, no. 7, 1983

© A. Jajszczyk

Warunki nieblokowania dla dowolnych r



Cztery twierdzenia, np.:

Twierdzenie 2: Pole $v(m, n_1, r_1, n_2, r_2)$ jest nieblokowane jako pole (q_1, q_2) -połączeniowe przy zastosowaniu algorytmu 2 wtedy i tylko wtedy, gdy

$$m \geq \max_{1 \leq y_2 \leq q_2} \left\{ \min \left\{ n_1 - 1 + y_2 (n_2 - 1) \min \{ q_1, r_1 - 1 \} + q_1, n_1 r_1, (r_2 - y_2) n_2 + y_2 (n_2 - 1) q_1 + q_1 \right\} \right\}$$

F. K. Hwang, A. Jajszczyk, „On nonblocking multiconnection networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 34, Oct. 1986

© A. Jajszczyk

Przestrzalność rozgałęźnych pól Closa



- Geneza: konkretna potrzeba (Alcatel SEL, Stuttgart, Niemcy)
- Trzysekcyjne rozgałęźne $(1 : q)$ pole Closa $v(m, n, r)$, przy założeniu, że rozgałęzienia są możliwe tylko w środkowej sekcji, jest przestrzalne wtedy i tylko wtedy, gdy

$$m \geq 2n - \left\lceil \frac{n}{q} \right\rceil$$

A. Jajszczyk, „Rearrangeability of multicast Clos networks with middle-stage fan-out”,
IEEE Communications Letters, vol. 7, Dec. 2003 © A. Jajszczyk

Pola wielopołączeniowe z DSM Warunki nieblokowania



A. Jajszczyk, „On nonblocking multiconnection networks composed of digital switching matrices”, *Journal of Australian Mathematical Society, Ser. B*, vol. 31, 1989, pp. 188-203

Pola wielopołączeniowe z DSM: warunki nieblokowania



Twierdzenie 2: Trzysekcyjne pole zbudowane z DSM jest nieblokowane jako pole (q_1, q_2) -połączeniowe przy zastosowaniu algorytmu 2 wtedy i tylko wtedy, gdy

$$m \geq \max_{1 \leq y_2 \leq q_2} \left\{ \min \left\{ \lfloor (u_i f_i - 1) / (v f_o) \rfloor + y_2 \lfloor (q_1 (u_i f_i - 1)) / (v f_o) \rfloor + \min \{d_1, d_2\}, \right. \right. \\ \left. \left. \lfloor (r u_i f_i - q_1) / (v f_o) \rfloor + d_1, \lfloor ((r - y_2) u_i f_i + q_1 y_2 (u_i f_i - 1)) / (v f_o) \rfloor + d_2 \right\} \right\},$$

gdzie:

$$d_1 = \begin{cases} \lfloor (q_1 - 1) / (v f_o - R_1) \rfloor + 1, & \text{for } q_1 \leq \lceil R_2 / R_1 \rceil v f_o - R_2, R_1 \neq 0, \text{ and} \\ y_2 \lfloor (q_1 (u_i f_i - 1)) / (v f_o) \rfloor \leq \lfloor (u_i f_i (r - 1) - q_1 + R + 1) / (v f_o) \rfloor; \\ \lfloor (q_1 + R_2 - 1) / (v f_o) \rfloor + 1, & \text{for } q_1 > \lceil R_2 / R_1 \rceil v f_o - R_2, R_1 \neq 0 \\ \text{or } y_2 \lfloor (q_1 (u_i f_i - 1)) / (v f_o) \rfloor > \lfloor (u_i f_i (r - 1) - q_1 + R + 1) / (v f_o) \rfloor \\ \text{or } R_1 = 0; \end{cases}$$

Pola wielopołączeniowe z DSM: warunki nieblokowania, cd.



$$d_2 = \begin{cases} \lfloor (q_1 - 1) / (v f_o - R_1) \rfloor + 1, & \text{for } q_1 \leq \lceil R_3 / R_1 \rceil v f_o - R_3, R_1 \neq 0; \\ \lfloor (q_1 + R_3 - 1) / (v f_o) \rfloor + 1, & \text{for } q_1 > \lceil R_3 / R_1 \rceil v f_o - R_3, R_1 \neq 0 \\ \lfloor (q_1 - 1) / (v f_o) \rfloor + 1, & \text{for } R_1 = 0. \end{cases}$$

$$R = (u_i f_i - 1) \bmod (v f_o);$$

$$R_1 = (q_1 (u_i f_i - 1)) \bmod (v f_o);$$

$$R_2 = u_i f_i (r - 1) - q_1 + 1 + R +$$

$$- \min \{ y_2 \lfloor (q_1 (u_i f_i - 1)) / (v f_o) \rfloor, \lfloor (u_i f_i (r - 1) - q_1 + R + 1) / (v f_o) \rfloor \} v f_o;$$

$$R_3 = \{ y_2 R_1, (r - y_2) u_i f_i + y_2 R_1 +$$

$$- \min \{ \lfloor (u_i f_i - 1) / (v f_o) \rfloor, \lfloor ((r - y_2) u_i f_i + y_2 R_1) / (v f_o) \rfloor \} v f_o \};$$

Optymalizacja ciągła pól komutacyjnych



Optymalne parametry pola Closa $v(m, n, r)$

Liczba punktów komutacyjnych:

$$C_N = 2mnr + mr^2$$

Podstawiając $m = 2n - 1$, $r = N/n$ otrzymujemy

$$C_N = (2n - 1)(2N + N^2/n^2)$$

Przyrównując do zera pochodną funkcji C_N względem n otrzymujemy

$$2n^3 - nN + N = 0$$

© A. Jajszczyk

Błędy metody ciągłej



N	n_{con}	n_{opt}
1000	21.8	20
10000	70.2	69
20000	99.5	100
50000	157.6	152
100000	223.1	216
500000	499.5	500

© A. Jajszczyk

Optymalne pola Beneša*



Wymiary komutatorów sekcji środkowej

N	n
2	2
3	3
$2^x, x \geq 2$	4 lub 8
$3^y, y \geq 2$	3 lub 9
$2^x 3^y, x \geq 1, y \geq 1$	4 lub 6 lub 8

Wymiary komutatorów wszystkich sekcji zewnętrznych (względem sekcji środkowej) powinny być wyrażone przez liczby pierwsze lub liczbę 4

*A. Jajszczyk, „Optimal structures of Benes switching networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-27, Feb. 1979

© A. Jajszczyk

Optymalizacja dyskretna



Optymalizacja ciągła i związane z nią zaokrąglanie wyników mogą być źródłem błędów

Ponieważ pole wielosekcyjne ma strukturę hierarchiczną, zagadnienie optymalizacji można potraktować jako wielostopniowy problem decyzyjny i rozwiązać wykorzystując metodę programowania dynamicznego. Metoda ta jest oparta na zasadzie optymalności Bellmana:

Strategia optymalna ma tę właściwość, że jakkolwiek byłby stan początkowy i decyzja początkowa, pozostałe decyzje muszą tworzyć strategię optymalną z punktu widzenia stanu wynikłego z pierwszej decyzji.

© A. Jajszczyk

Optymalizacja dyskretna



Np. w przypadku pól komutacyjnych Closa zagadnienie można sprowadzić do zestawiania tablic optymalnych pól o i sekcjach korzystając z wcześniej obliczonych tablic pól optymalnych o $i-2$ sekcjach.

A. Jajszczyk, „A dynamic programming approach to optimization of switching networks composed of digital switching matrices”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-35, Dec. 1987

© A. Jajszczyk

Metoda pełnego przeglądu



Czasy obliczeń struktur nieblokowlanych w wąskim sensie optymalnych pól Closa 3-, 5-, oraz 7-sekcyjnych na typowym komputerze PC

N	t_{c3} [s]	t_{c5} [s]	t_{c7} [s]
1000	<0.01	<0.01	0.02
10000	0.01	0.03	0.18
100000	0.05	0.42	2.50
1000000	0.54	4.99	32.60

A. Jajszczyk, R. Wójcik „The enumeration method for selecting optimum switching network structures”, *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 1, Jan. 2005 © A. Jajszczyk

Długość ciągów przestrojeń w polach Closa



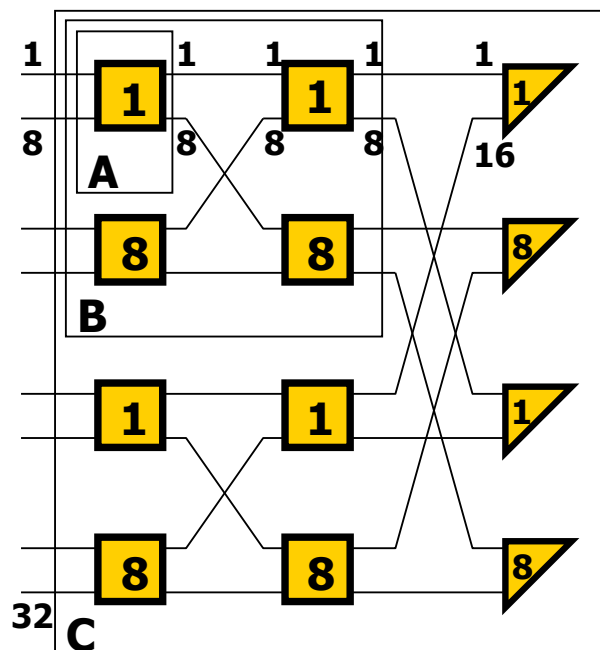
$\varphi(m, n, r)$ — długość ciągu przestrojeń wystarczająca w każdym przypadku do dokonania nowego połączenia w polu komutacyjnym $v(m, n, r)$

$$\varphi(m, n, r) = r - 1 \text{ [Beneš]}$$

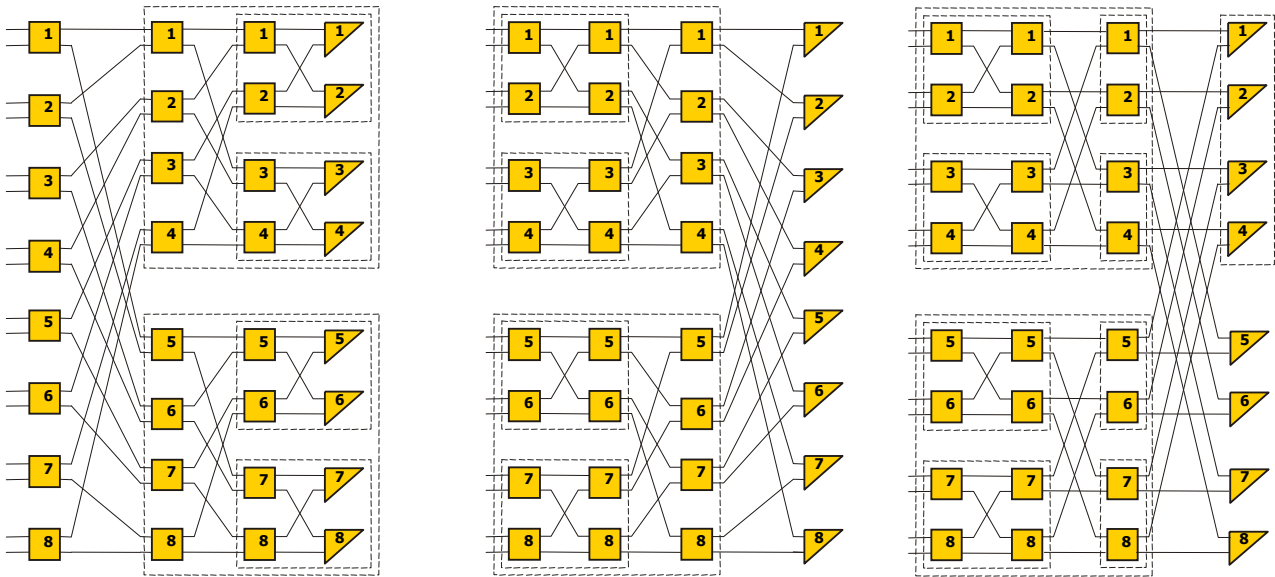
Twierdzenie: Niech $v(m, n, r)$ będzie trzysekcyjnym polem Closa z $m \geq n$. Niech A i B będą komutatorami sekcji środkowej, wybranymi do przestrojeń i niech a, b będą liczbami dróg połączeniowych przechodzących odpowiednio przez komutatory A, B . Liczba istniejących dróg połączeniowych, którą wystarczy przestroić, aby połączyć wolną parę wejście-wyjście, jest nie większa niż $\min\{a, b\}$.

A. Jajszczyk, J. Rajski, „The effect of choosing the switches for rearrangements in switching networks”, *IEEE Trans. on Commun.*, Oct. 1980

Zwiększanie pojemności pól komutacyjnych: System 12



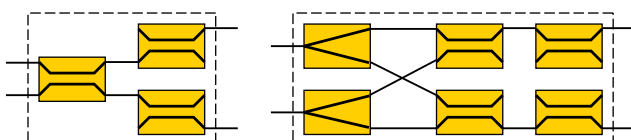
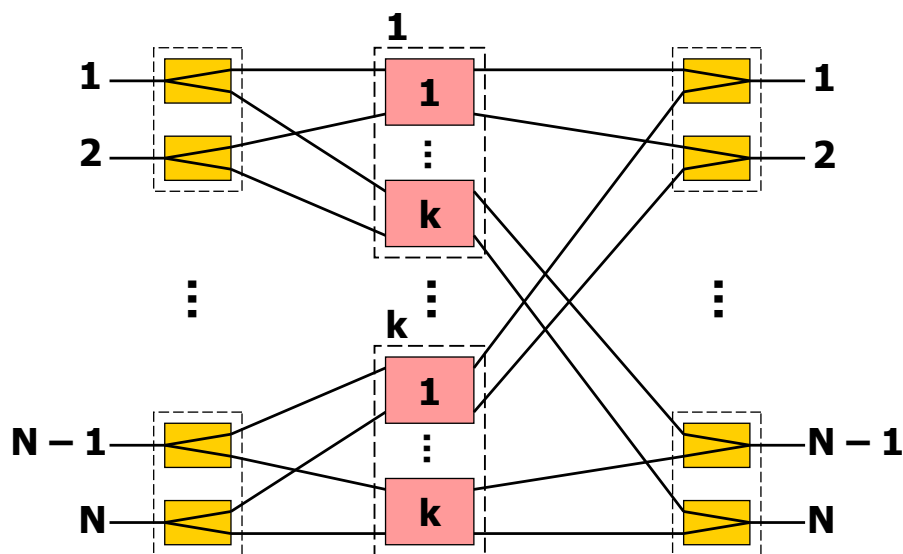
Topologiczna równoważność pól komutacyjnych



A. Jajszczyk, „On combinatorial properties of broadband time-division switching networks”, *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 20, 1990

© A. Jajszczyk

Pole optyczne o dwóch aktywnych sekcjach



A. Jajszczyk, „A class of directional-coupler-based photonic switching networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 41, April 1993

© A. Jajszczyk



**Dziękuję bardzo
za uwagę**
