

# Θεμελιώδεις Αρχές Συστημάτων Μεταγωγής πακέτου

---



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



# Γενικά

---

- Διαδικασίες μεταγωγέα
  - Δρομολόγηση πακέτων στην κατάλληλη θύρα εξόδου
  - Ενταμείευση πακέτων (ανταγωνισμός θύρας εξόδου)
- Κλασική τηλεφωνία
  - Μεταγωγή κυκλώματος (εγκατάσταση συνδέσεων)
  - Κεντρικός επεξεργαστής καθορίζει συνδέσεις μεταξύ θυρών εισόδου/εξόδου



# Κλασική τηλεφωνία

---

- Μέση διάρκεια κλήσης 3 min
- Μεταγωγέας  $N \times N$
- Για κάθε σύνδεση χρόνος  $180/N$  sec
- Αν  $N=1000$ , διάρκεια σύνδεσης 180 msec



# Μονάδες μεταγωγής πακέτου

---

- Όχι κεντρικός επεξεργαστής εγκατάστασης συνδέσεων, αλλά
- Αυτοδρομολόγηση (κατανεμημένη εγκατάσταση συνδέσεων)  
Δρομολόγηση με βάση την επικεφαλίδα  
(διεύθυνση θύρας εξόδου)



# Αντιμετώπιση ανταγωνισμού θύρας εξόδου

---

- Ενταμίευση στη θύρα εξόδου ( $N$  φορές ταχύτητα εισόδου)
- Ενταμίευση στη θύρα εισόδου
- Εναλλακτικά σχήματα
  - Κατανεμημένη  $\rightarrow$  επεκτάσιμη
  - Συγκεντρωτική  $\rightarrow$  χαμηλή πολυπλοκότητα, κόστος
- Διαχείριση ενταμιευτών
  - απόρριψη πακέτων
  - Κριτήρια (QoS, fairness)



# Σύνοψη

---

- 2 Θεμελιώδεις αρχές συστημάτων μεταγωγής πακέτου
  - 2.1 Βασικές έννοιες μεταγωγής
    - 2.1.1 Φραγή Εσωτερικού Διαύλου (Internal link blocking)
    - 2.1.2 Ανταγωνισμός θύρας εξόδου (Output port contention)
    - 2.1.3 Φραγή στη θύρα εισόδου (Head-of line blocking)
    - 2.1.4 Υπηρεσία Πολλαπλών Προορισμών (multicasting)
    - 2.1.5 Διαχωρισμός Κλήσης (Call Splitting)
  - 2.2 Ταξινόμηση αρχιτεκτονικών μεταγωγών
    - 2.2.1 Μεταγωγείς Διαίρεσης Χρόνου
    - 2.2.2 Μεταγωγείς Διαίρεσης Χώρου
    - 2.2.3 Πολιτικές ενταμίευσης
  - 2.3 Επίδοση Βασικών μεταγωγών
    - 2.3.1 Μεταγωγείς Ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου
    - 2.3.2 Μεταγωγείς Ενταμίευσης στις μονάδες εξόδου
    - 2.3.3 Μεταγωγείς πλήρως διαμοιραζόμενου Ενταμιευτή

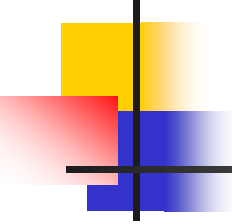




# Βασικές έννοιες μεταγωγής

---

- Φραγή εσωτερικού διαύλου (Internal link blocking)
- Ανταγωνισμός θύρας εξόδου (Output port contention)
- Φραγή στη θύρα εισόδου (Head-of line blocking)
- Υπηρεσία πολλαπλών προορισμών (Multicasting)
- Διαχωρισμός κλήσης (Call splitting)



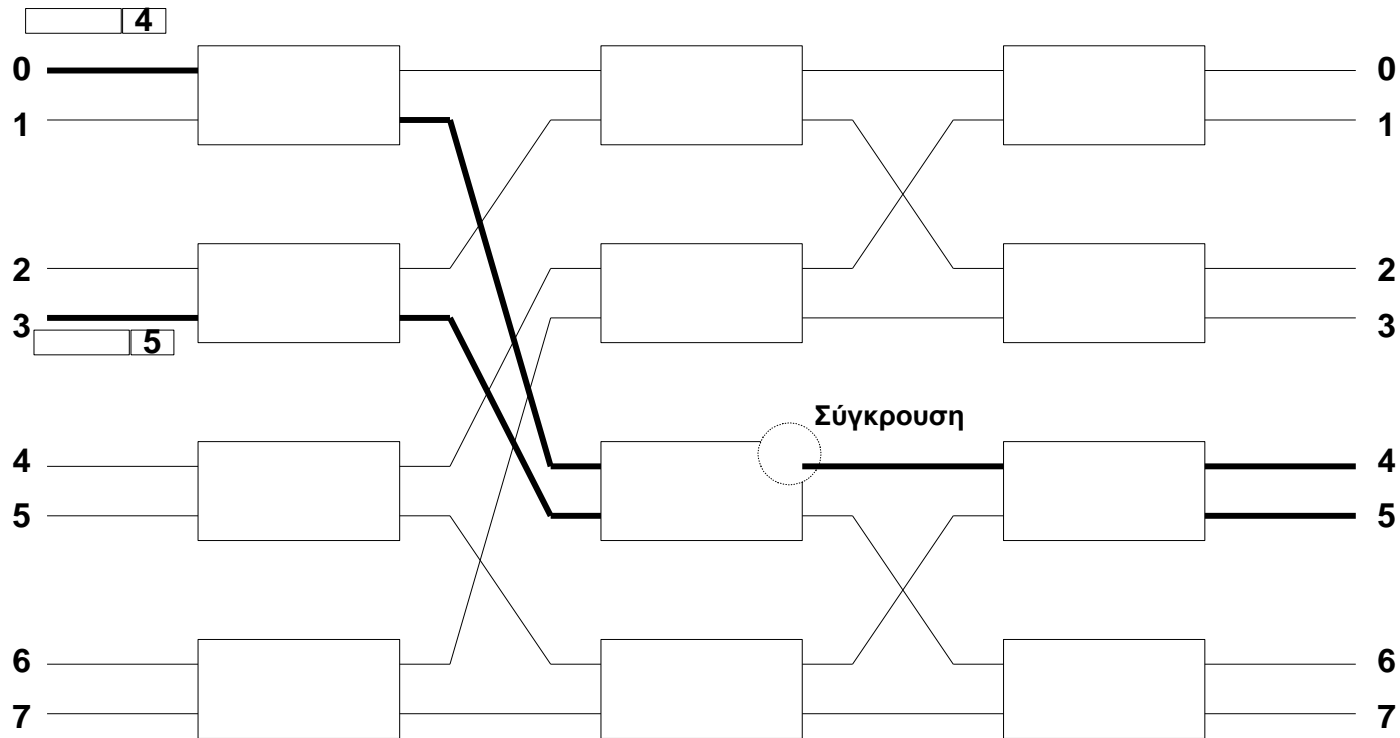
# Φραγή εσωτερικού διαύλου (1)

## (Internal link blocking)

---

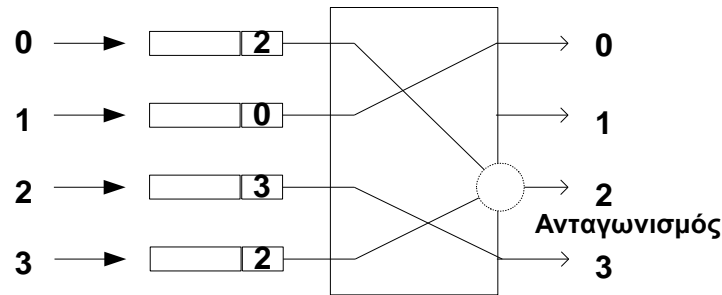
- Πολλαπλά πακέτα ανταγωνίζονται ταυτόχρονα για τον ίδιο εσωτερικό δίαυλο του μεταγωγέα
- Η Φραγή Εσωτερικού Διαύλου παρουσιάζεται σε αρχιτεκτονικές όπου ένας δίαυλος διαμοιράζεται σε πολλαπλές συνδέσεις μεταξύ των θυρών Εισόδου και Εξόδου (Μεταγωγείς Διαίρεσης Χώρου)
- Οι μεταγωγείς που παρουσιάζουν Φραγή Εσωτερικού Διαύλου καλούνται **Μεταγωγείς Φραγής** (blocking switches)
- Το πρόβλημα αποφεύγεται με την τοποθέτηση ενταμιευτών στα σημεία πιθανής σύγκρουσης
- Το γεγονός αυτό αυξάνει την καθυστέρηση μετάδοσης και προκαλεί ελάττωση του ρυθμού διέλευσης (throughput) του μεταγωγέα

# Φραγή εσωτερικού διαύλου (2) (Internal link blocking)



# Ανταγωνισμός θύρας εξόδου (1)

## (Output port contention)



- Η θύρα εξόδου μπορεί να μεταδώσει μόνο ένα πακέτο ανά χρονική θυρίδα
- Όταν δύο ή περισσότερα πακέτα προερχόμενα από διαφορετικές θύρες εισόδου κατευθύνονται στην ίδια θύρα εξόδου την ίδια χρονική θυρίδα προκαλείται ανταγωνισμός θύρας εξόδου
- Ένα εκ των πακέτων "ανταγωνιστών" μεταδίδεται
- Τα υπόλοιπα πακέτα απορρίπτονται ή αποθηκεύονται σε ενταμιευτές είτε στις μονάδες εισόδου είτε στις μονάδες εξόδου

# Ανταγωνισμός θύρας εξόδου (2)

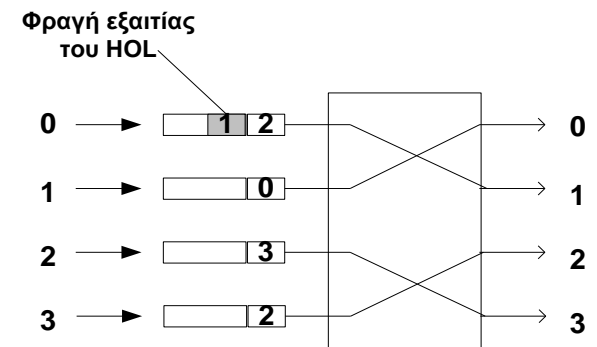
## (Output port contention)

- Με τοποθέτηση ενταμιευτών στις μονάδες εισόδου και με τη μετάδοση ενός πακέτου ανά χρονική θυρίδα προς τη μονάδα μεταγωγής, ο ανταγωνισμός θύρας εξόδου αντιμετωπίζεται
- Οι μεταγωγείς αυτοί καλούνται **Μεταγωγείς Ενταμίευσης στις μονάδες Εισόδου**
- Είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός ενός μηχανισμού διαιτησίας για να επιλέγει το πακέτο προς μετάδοση
- Η απόφαση λαμβάνεται βάσει του πεδίου προτεραιότητας της επικεφαλίδας
- Σε μερικές υλοποιήσεις μπορεί να είναι και τυχαία
- Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί διαιτησίας είναι:
  - Κράτηση δακτυλίου (ring reservation) (όλες οι θύρες εισόδου σε δακτύλιο)
  - Διαιτησία ταξινόμησης (sort-and-arbitrate) (ταξινόμηση πακέτων που κατευθύνονται στην ίδια θύρα εξόδου)
  - Διαιτησία δρομολόγησης (route-and-arbitrate) (εναλλακτική δρομολόγηση στα σημεία πιθανής σύγκρουσης)



# Φραγή στη θύρα εισόδου (Head-of line blocking)

- Ένα τυπικό πρόβλημα στους μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου με ουρές FIFO είναι η φραγή στη θύρα εισόδου εξαιτίας του πακέτου επικεφαλής (Head-of line blocking, HOL)
- Το 2ο πακέτο στην ουρά δεν μπορεί να μεταδοθεί προς την ελεύθερη θύρα εξόδου 1, επειδή εμποδίζεται από το 1ο πακέτο στην ουρά, που αναμένει μετάδοση προς τη θύρα εξόδου 2
- Το φαινόμενο HOL αποτελεί από τους κύριους παράγοντες περιορισμού του ρυθμού διελεύσης πρόβλημα στους μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου
- Ένας τέτοιος μεταγωγέας μπορεί να φθάσει μέγιστη τιμή throughput μόλις 58.6%





# Υπηρεσία πολλαπλών προορισμών (Multicasting)

---

- Για την υποστήριξη υπηρεσιών πολυμέσων οι μεταγωγείς πακέτου είναι εφοδιασμένοι με δυνατότητες πολλαπλής εκπομπής (multicasting) και καθολικής εκπομπής (broadcasting)
- Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία πακέτων αντιγράφων (replicates) από το μεταγωγέα
- Οι μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου και διαμοιραζόμενης μνήμης μπορούν να επιτύχουν broad / multicasting χωρίς τη δημιουργία πακέτων αντιγράφων εκμεταλλευόμενοι την ύπαρξη του κοινού μέσου μετάδοσης ή της κοινής μνήμης

# Διαχωρισμός κλήσης (1) (Call splitting)

- Για τη λειτουργία πολλαπλής εκπομπής έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός πολιτικών χρονοπρογραμματισμού, με κύριες τις παρακάτω:
  - Χρονοπρογραμματισμός σε μία χρονική θυρίδα
  - Αυστηρός Διαχωρισμός Κλήσης
  - Ελαστικός Διαχωρισμός Κλήσης
- Στην πρώτη περίπτωση όλα τα αντίγραφα του πακέτου πρέπει να μεταδοθούν σε μία χρονική θυρίδα, ενώ στις άλλες δύο επιτρέπεται ο διαχωρισμός της μετάδοσης αντιγράφων σε περισσότερες της μίας χρονικές θυρίδες
  - Η διαφορά μεταξύ του **αυστηρού** και του **ελαστικού** διαχωρισμού κλήσης είναι ότι στην πρώτη περίπτωση μεταδίδεται το πολύ ένα αντίγραφο του πακέτου ανά κάθε χρονική θυρίδα, ενώ στη δεύτερη περισσότερα του ενός αντίγραφα μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα, υπό την προϋπόθεση ότι οι θύρες εξόδου στις οποίες κατευθύνονται είναι ελεύθερες (Αν κάποια είσοδος έχει πακέτο προς ελεύθερη έξοδο, το μεταδίδει με προτεραιότητα).

Προσοχή!  
Δεν μπορεί  
να  
μεταδοθεί  
μόνο ένα  
από αυτά.



# Σύγκριση μεθόδων Διαχωρισμού κλήσης – Χαμηλό Φορτίο (1)

- Στον πίνακα απεικονίζεται η διαφορά καθυστέρησης μεταξύ των παραληπτών για εφαρμογή πολυμέσων εξαιτίας του διαχωρισμού κλήσης

Έξοδοι Είσοδοι	1	2	3	4	5
1	1	1	0	1	1
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

- Οι γραμμές αντιστοιχούν στις θύρες εισόδου του μεταγωγέα και οι στήλες στις γραμμές εξόδου
- Σε κάθε χρονική θυρίδα μόνο ένα πακέτο προς μετάδοση μπορεί να επιλεγεί από κάθε στήλη (αφού οι θύρες εξόδου μπορούν να μεταδώσουν ένα πακέτο ανά χρονική θυρίδα. )



# Σύγκριση μεθόδων Διαχωρισμού κλήσης – Χαμηλό Φορτίο (2)

Χρονοπρογραμματισμός	Αυστηρός	Ελαστικός
X X 0 X X	X 0 0 0 0	X X 0 X X
0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0
0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0
0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0
0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0

- Στη γραμμή εισόδου 1 αναμένουν 4 αντίγραφα ενός πακέτου κατευθυνόμενα προς τις θύρες εξόδου 1, 2, 4 και 5.
- Με το χρονοπρογραμματισμό σε μία χρονική θυρίδα όλα τα πακέτα μεταδίδονται.
- Στον αυστηρό διαχωρισμό κλήσης μόνο ένα πακέτο μεταδίδεται και τα υπόλοιπα αναμένουν να μεταδοθούν σε επόμενες χρονικές θυρίδας. Είναι προφανές ότι ο ρυθμός διέλευσης πακέτου είναι πολύ χαμηλός.
- Στον ελαστικό διαχωρισμό κλήσης, τα πακέτα μεταδίδονται όλα κατά τη διάρκεια μίας χρονικής θυρίδας, αφού οι αντίστοιχες θύρες εξόδου είναι ελεύθερες (δηλαδή δεν υπάρχει μοναδικό πακέτο από άλλη είσοδο προς κάποια έξοδο).



# Σύγκριση μεθόδων Διαχωρισμού κλήσης – Υψηλό Φορτίο (1)

Έξοδοι Είσοδοι	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	0
2	1	1	0	0	1
3	0	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0
5	0	0	1	1	0

Χρονοπρογραμματισμός

Αυστηρός

Ελαστικός

0 X 0 0 0	0 X 0 0 0	0 X 0 0 0
1 1 0 0 1	X 1 0 0 1	X 1 0 0 X
0 0 0 X 0	0 0 0 X 0	0 0 0 X 0
0 1 1 0 0	0 1 X 0 0	0 1 X 0 0
0 0 1 1 0	0 0 1 1 0	0 0 1 1 0

Δεν  
μπορούν  
και τα τρία,  
άρα κανένα





# Σύγκριση μεθόδων Διαχωρισμού κλήσης – Υψηλό Φορτίο (2)

---

- Από τις τρεις προαναφερθείσες πολιτικές χρονοπρογραμματισμού, ο χρονοπρογραμματισμός σε μία χρονική θυρίδα οδηγεί στο χαμηλότερο ρυθμό διέλευσης πακέτου του συστήματος. Έχει, όμως το πλεονέκτημα ότι είναι η ευκολότερη μέθοδος από πλευράς υλοποίησης. Ο χρονοπρογραμματισμός σε μια χρονική θυρίδα, ευνοεί τα πακέτα με τα λιγότερα αντίγραφα, γιατί αυξάνεται η πιθανότητα να μεταδοθούν.
- Ο αυστηρός διαχωρισμός κλήσης έχει καλύτερη επίδοση για υψηλό φορτίο, αλλά δεν ενδείκνυται σε περίπτωση χαμηλού φορτίου.
- Ο ελαστικός διαχωρισμός κλήσης χρησιμοποιεί πλήρως τις άδειες εξόδους, ενώ παράλληλα έχει ικανοποιητικές επιδόσεις τόσο για χαμηλό, όσο και για υψηλό φορτίο στο σύστημα.

# Παράδειγμα

Έξοδοι Είσοδοι	1	2	3	4	5
1	1	1	0	0	1
2	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0
5	0	0	1	1	0

**Χρονοπρογραμματισμός**

X X 0 0 X  
0 1 0 0 0  
0 0 0 X 0  
0 1 1 0 0  
0 0 1 1 0

**Αυστηρός**

X 1 0 0 1  
0 X 0 0 0  
0 0 0 X 0  
0 1 X 0 0  
0 0 1 1 0

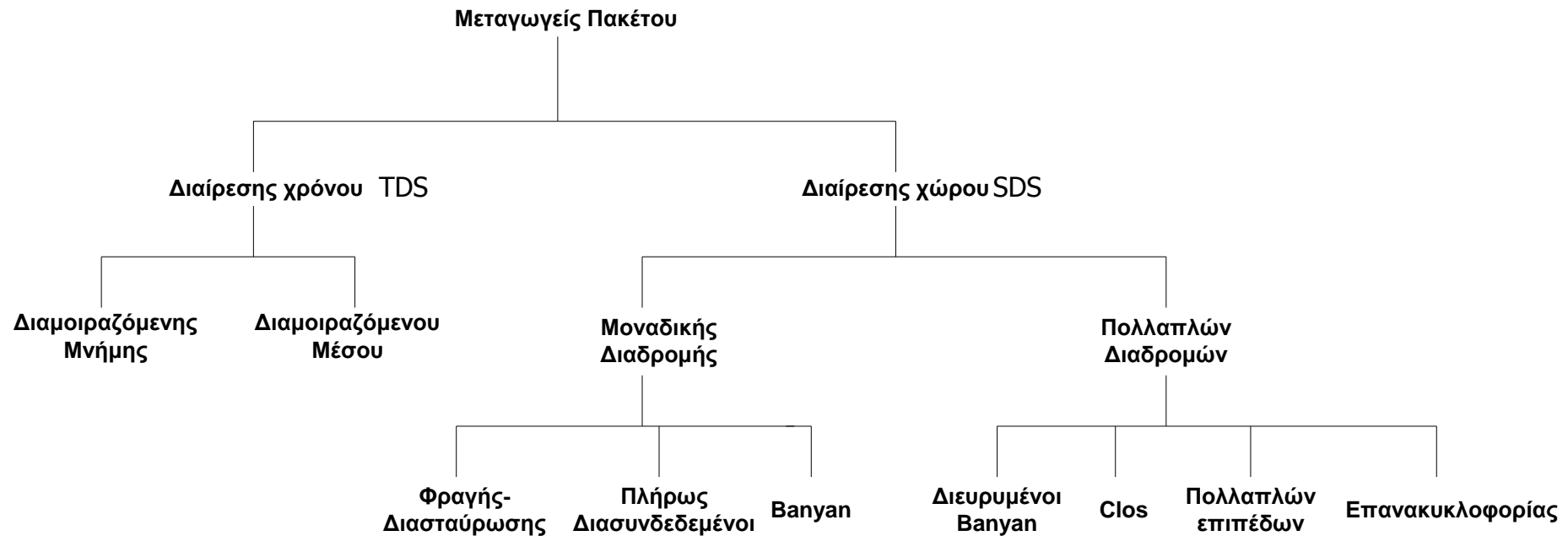
**Ελαστικός**

X 1 0 0 X  
0 X 0 0 0  
0 0 0 X 0  
0 1 X 0 0  
0 0 1 1 0

Μοναδικό  
προς  
ελεύθερη  
έξοδο



# Ταξινόμηση Αρχιτεκτονικών Μεταγωγέων





# Μεταγωγείς Διαίρεσης Χρόνου

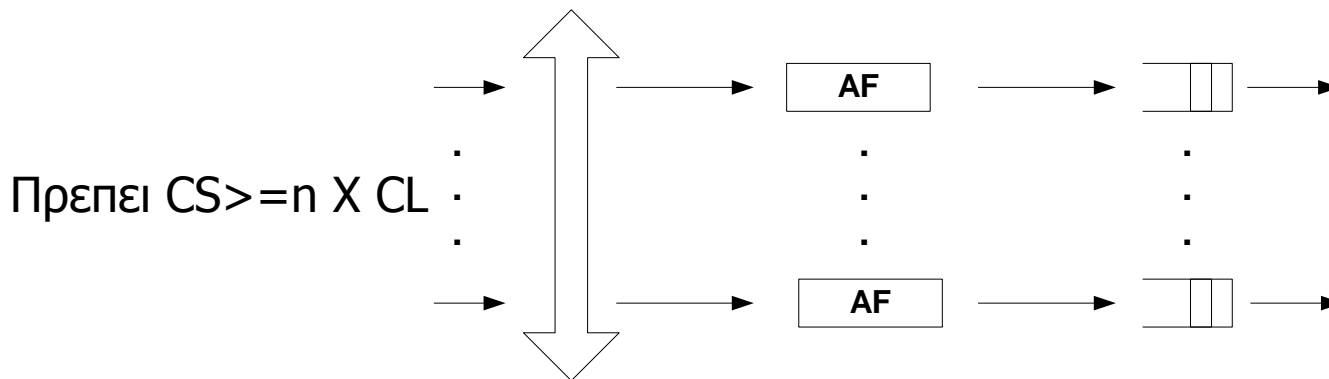
---

- Μοναδική εσωτερική υποδομή επικοινωνίας που διαμοιράζεται από όλα τα πακέτα που κατευθύνονται από τις θύρες εισόδου στις θύρες εξόδου
- Η εσωτερική υποδομή μπορεί να είναι δίαυλος, δακτύλιος ή μνήμη
- Κύριο μειονέκτημα οι περιορισμοί εξαιτίας της χωρητικότητας της εσωτερικής υποδομής
- Πλεονέκτημα η εύκολη υποστήριξη υπηρεσιών πολλαπλής / καθολικής εκπομπής
- Βασικές Κατηγορίες Μεταγωγέων Διαίρεσης Χρόνου
  - Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενου Μέσου
  - Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενης Μνήμης



# Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενου Μέσου (1)

- Τα εισερχόμενα πακέτα πολυπλέκονται σε κοινό μέσο υψηλής ταχύτητας (δίαυλος ή δακτύλιος)
- Το εύρος ζώνης του κοινού μέσου είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το άθροισμα των ευρών ζώνης των εισερχόμενων ζευξέων
- Η συνολική χωρητικότητα του μεταγωγέα καθορίζεται από το ρυθμό διέλευσης του διαμοιραζόμενου μέσου





# Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενου Μέσου (2)

---

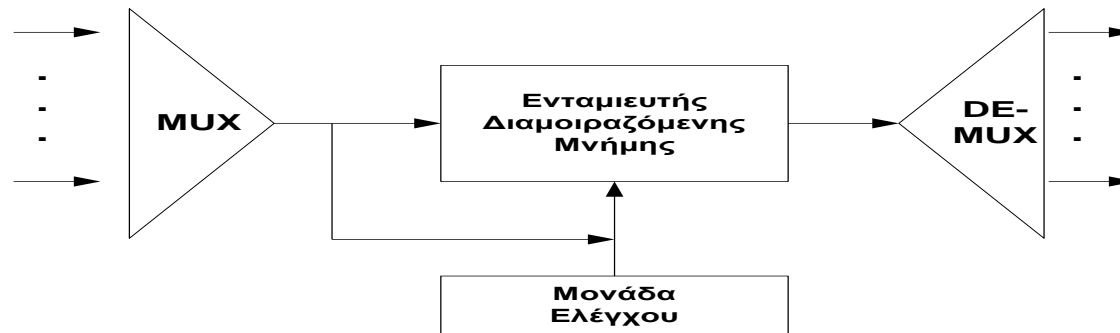
- Κάθε ζεύξη εξόδου συνδέεται στο κοινό μέσο μέσω μιας διεπαφής
- Η διεπαφή περιέχει ένα φίλτρο διεύθυνσης (Address Filter, AF) και έναν ενταμιευτή FIFO
- Το AF αποδέχεται μόνο τα πακέτα που κατευθύνονται προς την αντίστοιχη θύρα εξόδου βάσει της πληροφορίας επικεφαλίδας
- Κάθε χρονική θυρίδα διαιρείται σε  $N$  μικροθυρίδες ( $N$  ο αριθμός των εισερχόμενων ζεύξεων)
- Στη διάρκεια μιας μικροθυρίδας, ένα πακέτο εκπέμπεται προς όλες τις θύρες εξόδου και τελικά καταλήγει στον ενταμιευτή μίας εξ αυτών, αφού έχει απορριφθεί από τα AF των υπόλοιπων
- Αυτή η λογική μπορεί να επεκταθεί εύκολα για την υποστήριξη εκπομπής προς πολλαπλές θύρες εξόδου

# Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενου Μέσου (3)

- Πλεονεκτήματα
  - Αυτόνομη λειτουργία και σχεδιασμός για κάθε μία από τις θύρες εξόδου
  - Εύκολη υποστήριξη για υπηρεσίες πολλαπλής / καθολικής εκπομπής
- Μειονεκτήματα
  - Απαιτείται μεγάλος αριθμός ενταμιευτών
  - Αξιοσημείωτη πολυπλοκότητα του υλικού για την κατασκευή της αντίστοιχης διεπαφής για κάθε θύρα εξόδου
  - Το μέγεθος  $N$  του μεταγωγέα περιορίζεται από την ταχύτητα της μνήμης, π.χ. αν  $N$  εισερχόμενα πακέτα σε μια χρονική θυρίδα κατευθύνονται όλα στην ίδια θύρα εξόδου, ενδέχεται να υπερχειλίσουν τον ενταμιευτή σε περίπτωση που το  $N$  είναι πολύ μεγάλο ή ταχύτητα της ζεύξης εισόδου πολύ υψηλή (άρα πολύ μικρή διάρκεια χρονικής θυρίδας)
  - Αδυναμία διαμοιρασμού της συνολικής μνήμης μεταξύ των ενταμιευτών, π.χ. όταν ένας ενταμιευτής γεμίσει απορρίπτει τα επερχόμενα πακέτα και δεν είναι δυνατή η χρήση της μνήμης άλλων ενταμιευτών που ενδεχομένως είναι διαθέσιμη



# Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενης Μνήμης (1)



- Τα εισερχόμενα πακέτα πολυπλέκονται χρονικά σε ένα ρεύμα δεδομένων εισόδου και γράφονται σειριακά στην κοινή μνήμη
- Η δρομολόγηση επιτυγχάνεται δημιουργώντας ένα ρεύμα δεδομένων εξόδου, που αποπολυπλέκεται στις ζεύξεις εξόδου
- Η μονάδα ελέγχου παρέχει της διευθύνσεις μνήμης για την εγγραφή / ανάγνωση των πακέτων βάσει της πληροφορίας δρομολόγησης της επικεφαλίδας



# Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενης Μνήμης (2)

- Προσεγγίσεις στο Διαμοιρασμό της μνήμης:
  - **Καθολικός Διαμοιρασμός** : Η μνήμη διαιρείται σε  $N$  ίσα τμήματα, καθένα εκ των οποίων ανατίθεται σε μια θύρα εξόδου
    - Ένα πακέτο απορρίπτεται όταν το τμήμα μνήμης της θύρας εξόδου που κατευθύνεται είναι γεμάτο, ακόμα και όταν υπάρχει διαθέσιμος χώρος σε άλλο σημείο της μνήμης
  - **Πλήρης Διαμοιρασμός**: Όλη η μνήμη διαμοιράζεται σε όλες τις θύρες εξόδου
    - Πακέτο απορρίπτεται μόνο στην περίπτωση που η συνολική μνήμη είναι γεμάτη
    - Πιο αποδοτική μέθοδος στη διαχείριση της μνήμης
    - Δεν είναι δίκαια, αφού ο καταγιγισμός δεδομένων προς μία θύρα εξόδου μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα υπηρεσίας για τις υπόλοιπες
    - Αποτροπή μονοπωλιακής χρήσης της μνήμης





# Μεταγωγείς Διαμοιραζόμενης Μνήμης (3)

---

- Πλεονεκτήματα
  - Βέλτιστη χρήση της μνήμης, σε αντίθεση με τους μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου =>
    - Στενωπός επίδοσης του συστήματος η ταχύτητα με την οποία προσπελαύνουν τη μνήμη τα εισερχόμενα και εξερχόμενα πακέτα
    - Το μέγεθος της μνήμης μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε ο ρυθμός απώλειας πακέτων να διατηρείται κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι
- Μειονεκτήματα
  - Όπως και στους μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου, το μέγεθος  $N$  του μεταγωγέα περιορίζεται από την ταχύτητα της μνήμης
  - Το κόστος αυξάνει λόγω των περίπλοκων διαδικασιών ελέγχου στη μονάδα ελέγχου



# Μεταγωγείς Διαίρεσης Χώρου

---

- Πολλαπλά φυσικά κανάλια μεταξύ των θυρών Εισόδου και Εξόδου, σε αντίθεση με τους μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου
- Τα κανάλια λειτουργούν ταυτόχρονα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση κατά μήκος του μεταγωγέα
- Η συνολική χωρητικότητα προκύπτει από το άθροισμα του εύρους ζώνης των φυσικών καναλιών
- Βασικές Κατηγορίες Μεταγωγέων Διαίρεσης Χώρου (με βάση τον αριθμό των διαθέσιμων διαδρομών μεταξύ εισόδων – εξόδων)
  - **Μεταγωγείς Μοναδικής Διαδρομής:** μοναδική διαδρομή μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού Εισόδου / Εξόδου
    - Απλούστερη δρομολόγηση
  - **Μεταγωγείς Πολλαπλών Διαδρομών:** πολλαπλές διαδρομές μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού Εισόδου / Εξόδου
    - Μεγαλύτερη ευελιξία





# Μεταγωγείς Μοναδικής Διαδρομής

---

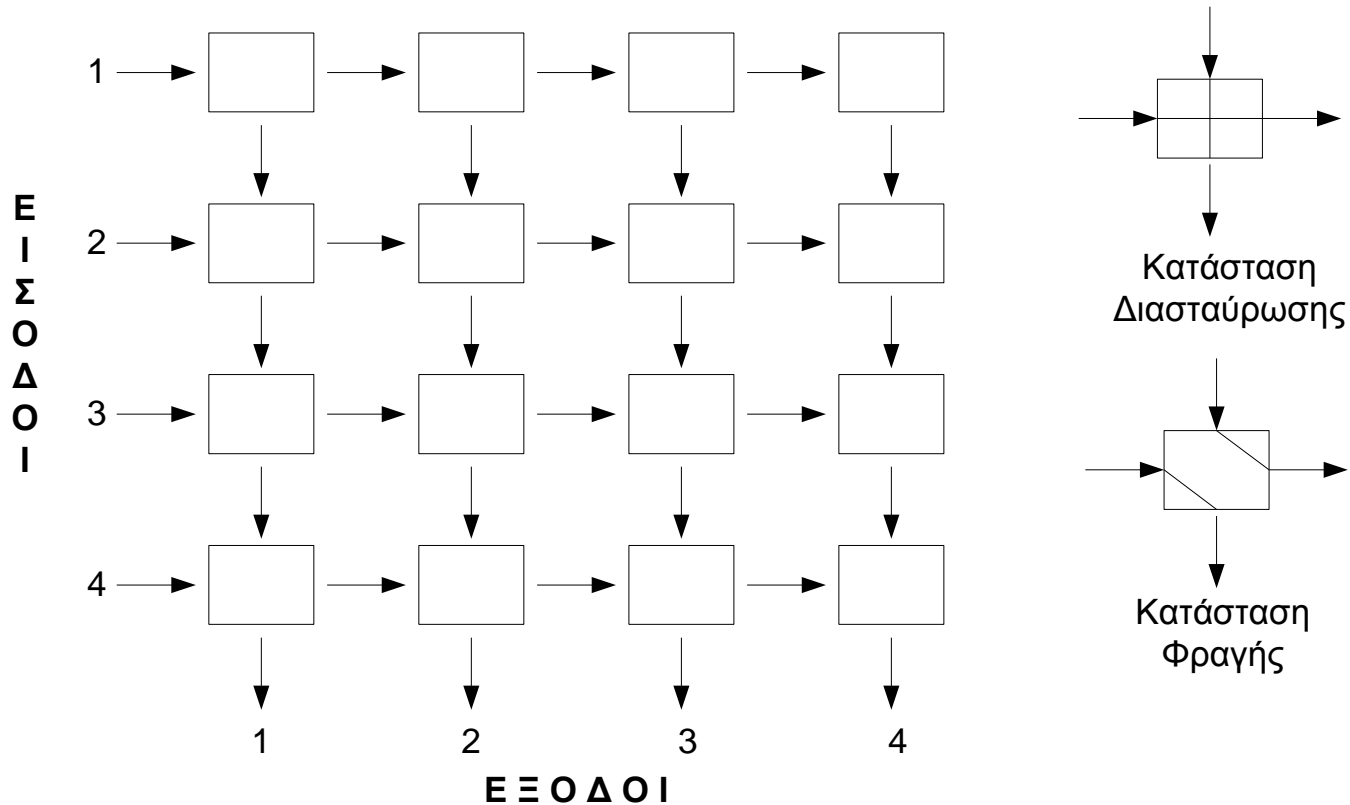
- Κύριες Κατηγορίες
  - Μεταγωγείς Φραγής – Διασταύρωσης (Crossbar Switches)
  - Πλήρως Διασυνδεδεμένοι μεταγωγείς
  - Μεταγωγείς Banyan

# Μεταγωγείς Φραγής – Διασταύρωσης (1)

- Σε ένα  $N \times N$  μεταγωγέα:
  - Έχουμε  $N^2$  ανεξάρτητα στοιχεία διασταύρωσης (ή συνδέσμους), καθένα εκ των οποίων αντιστοιχεί σε ένα συνδυασμό των θυρών  $E / E$
  - Κάθε σύνδεσμος βρίσκεται σε δύο δυνατές καταστάσεις: **φραγής** (η προκαθορισμένη) και **διασταύρωσης**
  - Η σύνδεση μιας θύρας εισόδου  $i$  με τη θύρα εξόδου  $j$ , εγκαθίστανται θέτοντας τον  $(i, j)$  σύνδεσμο σε κατάσταση φραγής και αφήνοντας τους υπόλοιπους σε κατάσταση διασταύρωσης
  - Η διαδικασία αυτή γίνεται ανεξάρτητα για κάθε πακέτο, ανεξάρτητα της θύρας εισόδου από την οποία προήλθαν
  - Ιδιότητα αυτοδρομολόγησης  $\Rightarrow$  μειωμένη πολυπλοκότητα στη μονάδα μεταγωγής, αφού οι λειτουργίες ελέγχου κατανέμονται μεταξύ των συνδέσμων



# Μεταγωγείς Φραγής – Διασταύρωσης (2)



# Μεταγωγείς Φραγής – Διασταύρωσης (3)

## ■ Πλεονεκτήματα

- Δεν προκαλούν φραγή εσωτερικά της μονάδας μεταγωγής (internal link blocking)
- Έχουν πολύ απλή αρχιτεκτονική
- Έχουν την ιδιότητα της κλιμάκωσης => μεταγωγείς μεγαλύτερης κλίμακας μπορούν να κατασκευαστούν από τη σύνθεση ανεξάρτητων μεταγωγέων μικρότερης κλίμακας

## ■ Μειονεκτήματα

- Απαιτείται Μεγάλος αριθμός συνδέσμων
- Αναγκαία η ύπαρξη μηχανισμών διαιτησίας για την επιλογή του πακέτου που θα μεταδοθεί σε μια συγκεκριμένη θύρα εξόδου σε κάθε χρονική θυρίδα (στενωπός επίδοσης ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές του μεγέθους  $N$  του μεταγωγέα)





# Μεταγωγείς Φραγής – Διασταύρωσης (4)

---

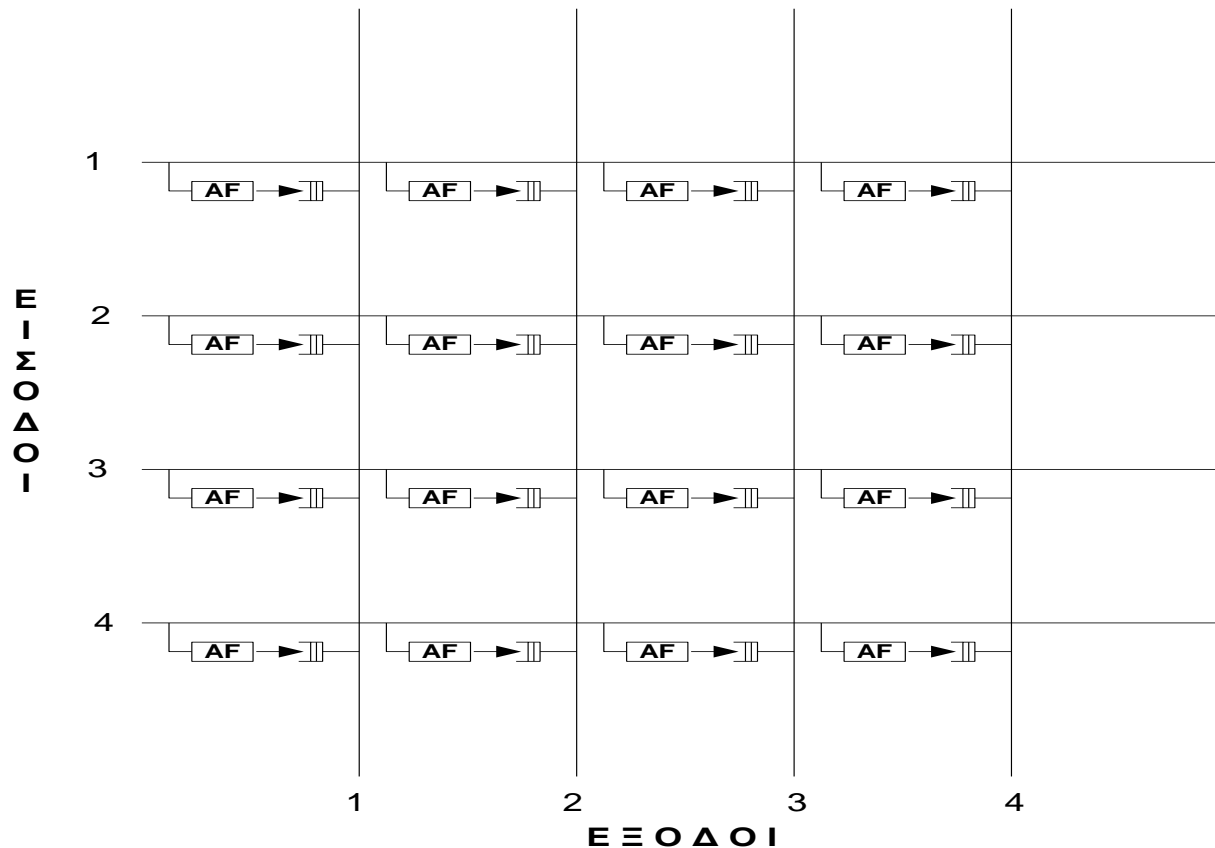
- Πολιτικές ενταμίευσης μεταγωγέων Φραγής – Διασταύρωσης
  - Ενταμίευση στους συνδέσμους του μεταγωγέα
  - Ενταμίευση στις μονάδες εισόδου του μεταγωγέα

# Ενταμίευση στους συνδέσμους Μεταγωγέα Crossbar (1)

- Σε κάθε σύνδεσμο υπάρχει ένα φίλτρο διεύθυνσης (AF) και ένας ενταμιευτής
- Το AF αποδέχεται μόνο τα πακέτα που κατευθύνονται προς την αντίστοιχη θύρα εξόδου (δηλ. τη θύρα  $j$ ) βάσει της πληροφορίας επικεφαλίδας
- Τα πακέτα που διέρχονται από το AF αποθηκεύονται στους ενταμιευτές
- Τα αποθηκευμένα στην ίδια στήλη πακέτα μεταδίδονται προς τις θύρες εξόδου, ένα ανά χρονική θυρίδα
- Η ύπαρξη ενταμιευτή σε κάθε σύνδεσμο αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το χώρο του συνδέσμου στο ολοκληρωμένο κύκλωμα => δραματικός περιορισμός του αριθμού των συνδέσμων για δεδομένο μέγεθος του ολοκληρωμένου κυκλώματος
- Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει περιορισμός διέλευσης, όπως στην ενταμίευση στην είσοδο. Όμως απαιτείται μεγαλύτερος συνολικός χώρος ενταμίευσης γιατί δεν υπάρχει διαμοιρασμός χώρου μεταξύ των  $N$  ενταμιευτών των συνδέσμων



# Ενταμίευση στους συνδέσμους μεταγωγέα Crossbar (2)



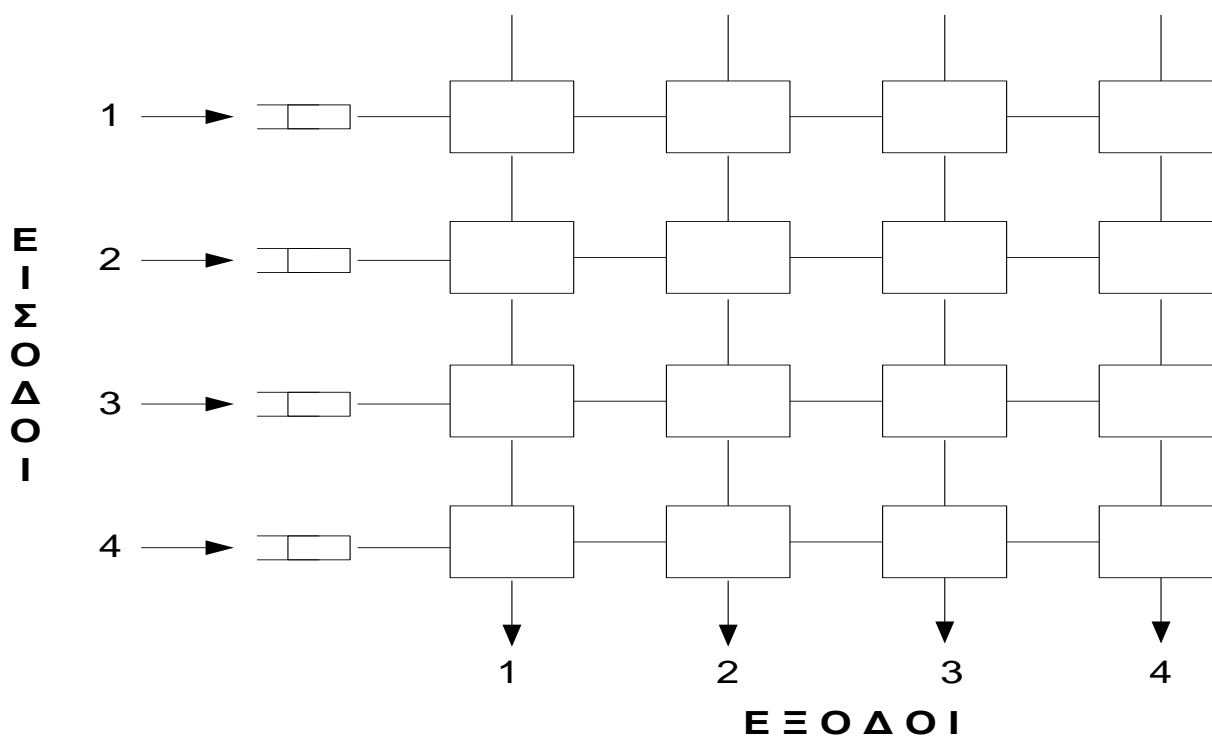


# Ενταμίευση στις Μονάδες Εισόδου Μεταγωγέα Crossbar (1)

- Διαχωρισμός ενταμιευτών και συνδέσμων (επιθυμητός από άποψη κατανάλωσης χώρου στο ολοκληρωμένο κύκλωμα)
- Τα εισερχόμενα πακέτα αποθηκεύονται στον ενταμιευτή της αντίστοιχης μονάδας εισόδου και αναμένουν τη σειρά τους για να μεταδοθούν
- Οι συγκρούσεις διευθετούνται ανεξάρτητα στους συνδέσμους, με κατανομημένη επίλυση του προβλήματος του ανταγωνισμού
- Σε περίπτωση που ένα πακέτο αφιχθεί σε σύνδεσμο, ο οποίος έχει τεθεί σε κατάσταση φραγής από προηγούμενο πακέτο, ένα σήμα φραγής στέλνεται στην αντίστοιχη θύρα εισόδου
- Αυτό προκαλεί διακοπή της μετάδοσης και το πακέτο διατηρείται στον ενταμιευτή για μελλοντικές προσπάθειες μετάδοσης
- Είναι περίπτωση συγκεντρωτικής επίλυσης ανταγωνισμού, από μηχανισμό διαιτησίας σε κάθε θύρα εξόδου (μόνο ένα πακέτο προς τη ΜΜΠ ανά χρονική θυρίδα).

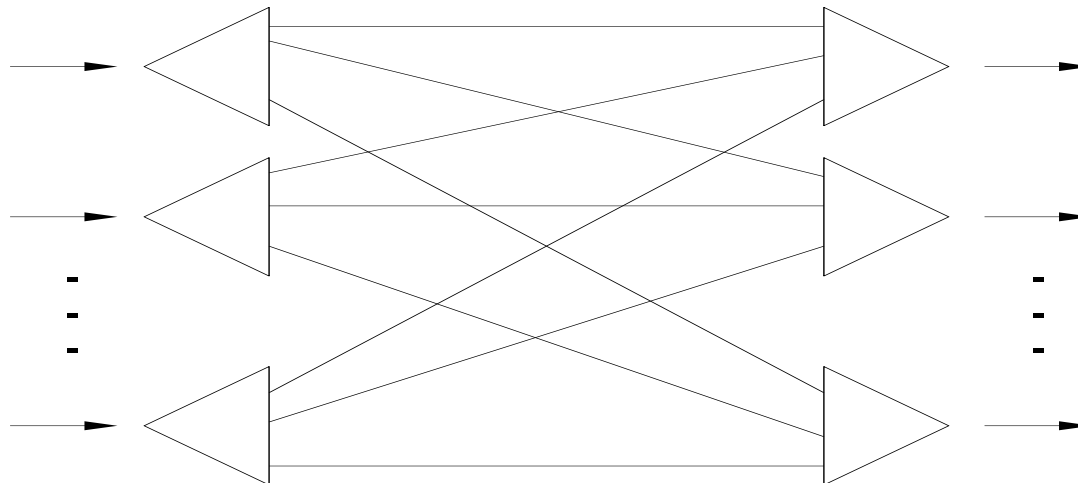


# Ενταμίευση στις Μονάδες Εισόδου Μεταγωγέα Crossbar (2)



# Πλήρως Διασυνδεδεμένοι μεταγωγείς (1)

- Πλήρης διασύνδεση μεταξύ των θυρών εισόδου και εξόδου με χρήση  $N$  δίαυλων καθολικής εκπομπής από κάθε θύρα εισόδου σε όλες τις θύρες εξόδου
- Αναγκαιότητα ύπαρξης  $N$  ενταμιευτών, ένας σε κάθε θύρα εξόδου
- Επειδή κάθε τέτοιος ενταμιευτής διαμοιράζεται μεταξύ των  $N$  θυρών εισόδου έχουμε στην ουσία  $N^2$  ενταμιευτές  $\Rightarrow$  η τοπολογία γίνεται ταυτόσημη με τους μεταγωγείς φραγής - διασταύρωσης



# Πλήρως Διασυνδεδεμένοι μεταγωγείς (2)

- Οι πλήρως διασυνδεδεμένοι μεταγωγείς λειτουργούν παρόμοια με τους μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου
- Ένα πακέτο από οποιαδήποτε θύρα εισόδου εκπέμπεται προς όλες τις θύρες εξόδου
- Γι αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενταμιευτων και φίλτρων AF στις θύρες εξόδου
- Η βασική διαφορά είναι ότι η χρονική επιβάρυνση στους μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου (εξαιτίας της σειριακής μετάδοσης των πακέτων), αντισταθμίζεται στους πλήρως διασυνδεδεμένους μεταγωγείς από την επιβάρυνση χώρου (εξαιτίας της ύπαρξης  $N^2$  διαδρομών εκπομπής)
- Πλεονεκτήματα (όπως ακριβώς και στους crossbar switches)
  - Μη ύπαρξη φραγής εσωτερικά της μονάδας μεταγωγής
  - Απλή αρχιτεκτονική





# Μεταγωγείς Banyan

---

- Πλεονεκτήματα

- Ιδιότητα αυτοδρομολόγησης
- Η πολυπλοκότητα διαδρομών και στοιχείων μεταγωγής είναι της τάξης  $N \log N$ , γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας μεταγωγέων (η πολυπλοκότητα στους μεταγωγείς φραγής – διασταύρωσης και στους πλήρως διασυνδεδεμένους μεταγωγείς ήταν της τάξης  $N^2$ )

- Μειονεκτήματα

- Προκαλούν φραγή εσωτερικά της μονάδας μεταγωγής => δραματική μείωση της επίδοσης με την αύξηση του μεγέθους  $N$



# Μεταγωγείς Πολλαπλών Διαδρομών

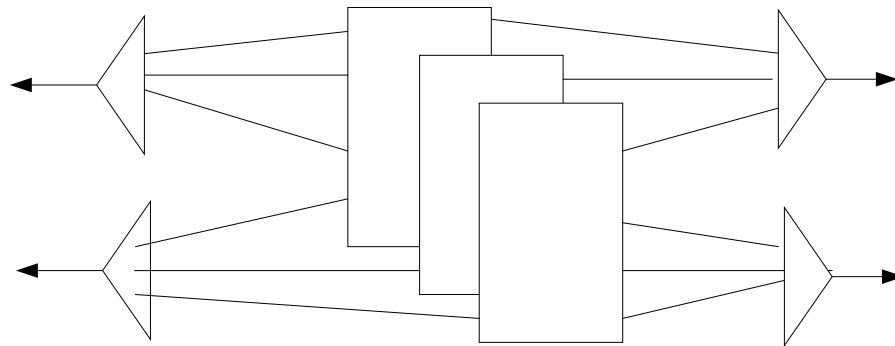
---

- Κύριες Κατηγορίες
  - Μεταγωγείς πολλαπλών επιπέδων
  - Μεταγωγείς επανακυκλοφορίας



# Μεταγωγείς πολλαπλών επιπέδων

- Έχουν προταθεί ως μία μέθοδος βελτίωσης του ρυθμού διέλευσης
- Αποτελούνται από πολλαπλά επίπεδα μεταγωγής, τα οποία είναι, συνήθως, πανομοιότυπα
- Πλεονεκτήματα
  - Παρέχουν μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας, αφού ακόμα και αν ένα ολόκληρο επίπεδο τεθεί εκτός λειτουργίας, το σύστημα εξακολουθεί να λειτουργεί (με μικρότερο φυσικά ρυθμό διέλευσης)
- Μειονεκτήματα
  - Δε διατηρούν την ορθή σειρά παράδοσης των πακέτων, όταν αυτά μεταδίδονται από διαφορετικά επίπεδα του μεταγωγέα



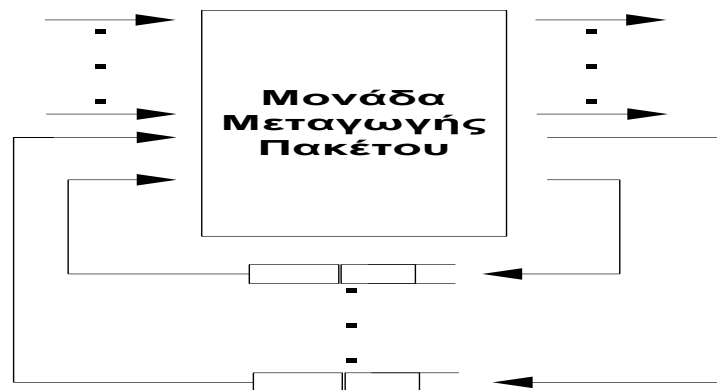
# Μεταγωγείς επανακυκλοφορίας (1)

- Έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση του ανταγωνισμού θύρας εξόδου
- Περιέχει ειδικές θύρες επανακυκλοφορίας επιπλέον των κλασικών θυρών Εισόδου / Εξόδου
- Σε περίπτωση ανταγωνισμού θύρας εξόδου, τα “ηττημένα” πακέτα αποθηκεύονται στους ενταμιευτές επανακυκλοφορίας και δοκιμάζουν ξανά την επόμενη χρονική θυρίδα
- Για να διατηρηθεί η σειρά των πακέτων, μια τιμή προτεραιότητας ανατίθεται σε καθένα από αυτά
- Σε περίπτωση ήττας στη διαδικασία ανταγωνισμού, η προτεραιότητα αυξάνεται κατά ένα, ώστε τα συγκεκριμένα πακέτα να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα μετάδοσης την επόμενη χρονική θυρίδα
- Αν ένα πακέτο φθάσει στο ανώτερο επίπεδο προτεραιότητας και δεν έχει μεταδοθεί ακόμα, απορρίπτεται για την αποφυγή ενδεχόμενου λάθους απώλειας της ορθής σειράς



# Μεταγωγείς επανακυκλοφορίας

## (2)



- Ο αριθμός των θυρών επανακυκλοφορίας επιλέγεται έτσι ώστε να επιτευχθεί αποδεκτός ρυθμός απώλειας πακέτων
  - π.χ. για την επίτευξη ρυθμού απώλειας πακέτων  $10^{-6}$  σε φορτίο 80% και αφίξεις Poisson, ο λόγος των θυρών επανακυκλοφορίας προς τις θύρες εισόδου πρέπει να είναι 2.5
- Ο αριθμός των θυρών επανακυκλοφορίας μπορεί να μειωθεί δραστικά, αν επιτραπεί σε περισσότερα του ενός πακέτα να καταφθάνουν σε μια θύρα εξόδου την ίδια χρονική θυρίδα
  - π.χ. για πιθανότητα απώλειας πακέτου  $10^{-6}$  σε φορτίο 100% και αφίξεις Poisson, ο λόγος των θυρών επανακυκλοφορίας προς τις θύρες εισόδου μπορεί να μειωθεί στην τιμή 0.1, αν επιτραπεί σε 3 πακέτα να καταφθάνουν σε μια πόρτα εξόδου κατά την ίδια χρονική θυρίδα





# Πολιτικές ενταμίευσης

---

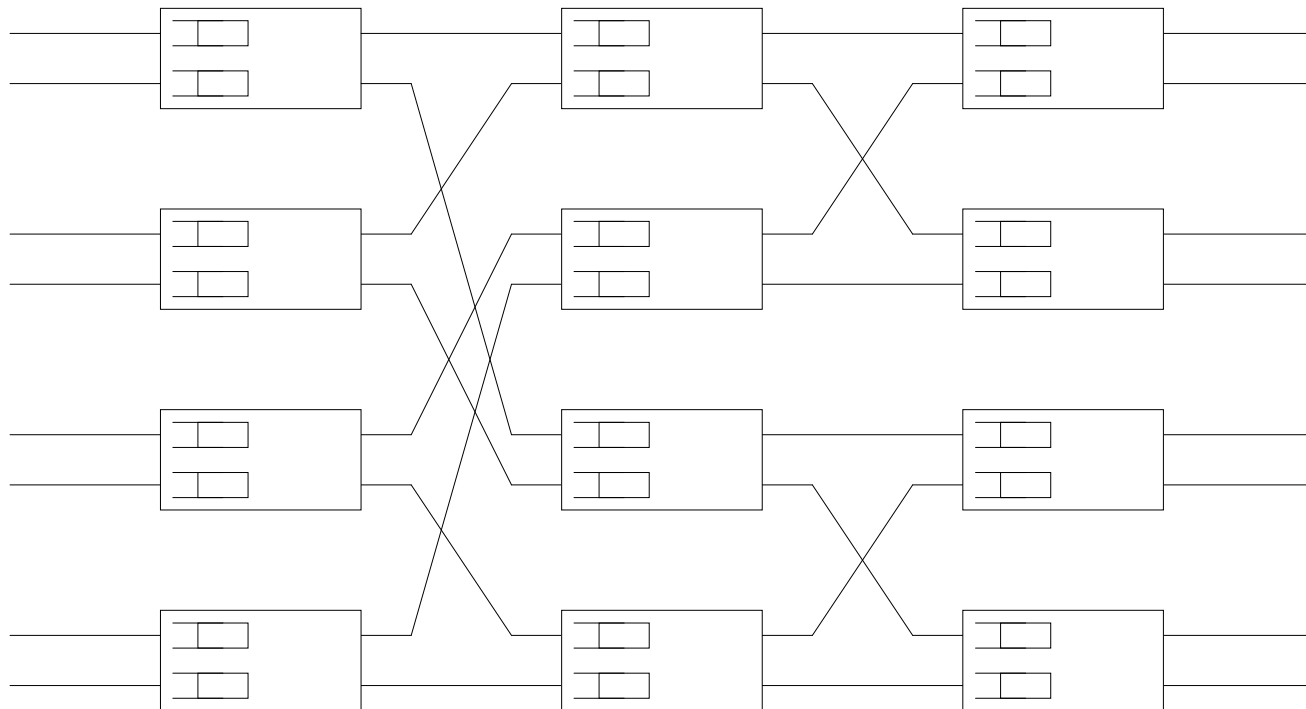
- Μεταγωγείς εσωτερικής ενταμίευσης
- Μεταγωγείς ενταμίευσης επανακυκλοφορίας
- Μεταγωγείς ενταμίευσης διασταυρούμενου σημείου
- Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εισόδου
- Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εξόδου
- Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου ενταμιευτή
- Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου ενταμιευτή πολλαπλών επιπέδων
- Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εισόδου & Εξόδου
- Μεταγωγείς εικονικής ουράς αναμονής εξόδου



# Μεταγωγείς εσωτερικής ενταμίευσης (1)

- Υλοποιούν τους ενταμιευτές εντός των στοιχείων μεταγωγής (εσωτερικά στη Μονάδα Μεταγωγής Πακέτου)
- Παράδειγμα αποτελούν οι μεταγωγείς Banyan με ενταμιευτές (όπου αποθηκεύονται τα πακέτα που υφίστανται φραγή εσωτερικού διαύλου)
- Μπορούν εύκολα να κλιμακωθούν για τη δημιουργία συστημάτων μεγαλύτερης κλίμακας
- Ωστόσο, πάσχουν από χαμηλό ρυθμό διέλευσης πακέτου και μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, εξαιτίας της μεσολάβησης πολλών βαθμίδων
- Για τη βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μηχανισμών διαχείρισης των ενταμιευτών
- Με αυτόν τον τρόπο, όμως, αυξάνει το κόστος υλοποίησης

# Μεταγωγείς εσωτερικής ενταμίευσης (2)





# Μεταγωγείς ενταμίευσης επανακυκλοφορίας

---

- Η λειτουργία τους περιγράφηκε σε προηγούμενη διαφάνεια





# Μεταγωγείς ενταμίευσης διασταυρούμενου σημείου

---

- Είναι ο ίδιος τύπος με τους μεταγωγείς Φραγής – Διασταύρωσης (Crossbar Switches)
- Η λειτουργία τους περιγράφηκε σε προηγούμενη διαφάνεια

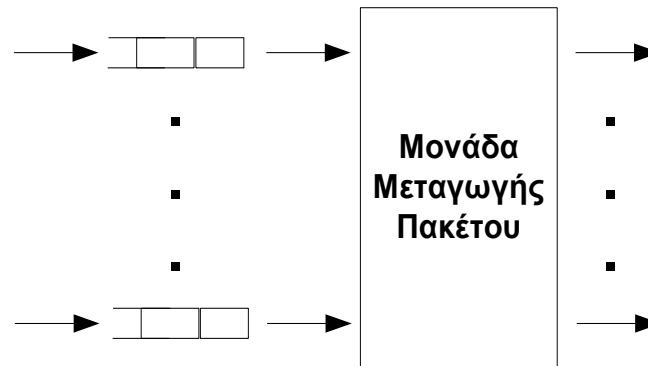
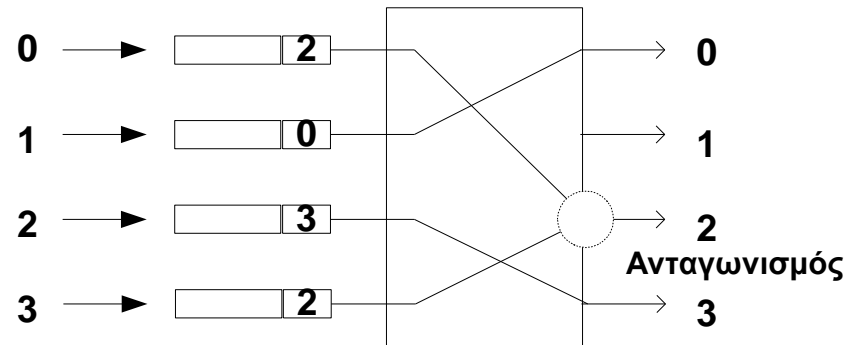


# Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εισόδου (1)

- Παρουσιάζουν το πρόβλημα φραγής στη θύρα εισόδου εξαιτίας του πακέτου επικεφαλής (Head-of Line blocking)
- Σημαντικός περιορισμός του ρυθμού διέλευσης πακέτου, με μέγιστη τιμή μόλις 58.6%
- Για τη βελτίωση του ρυθμού διέλευσης, χρησιμοποιείται η τεχνική της ενπαραθύρωσης (windowing)
- Πολλαπλά πακέτα από κάθε ενταμιευτή εισόδου (και όχι μόνο το πρώτο στην ουρά) καθίστανται υποψήφια προς μετάδοση
- Φυσικά μόνο ένα εξ αυτών μεταδίδεται προς τη μονάδα μεταγωγής
- Το μέγεθος του παραθύρου καθορίζει τον αριθμό των υποψηφίων προς μετάδοση πακέτων
- Για μέγεθος παραθύρου 2, ο ρυθμός διέλευσης φτάνει ακόμα και 70%
- Αυξάνει η πολυπλοκότητα, αφού η ιδέα του απλού ενταμιευτή FIFO εγκαταλείπεται

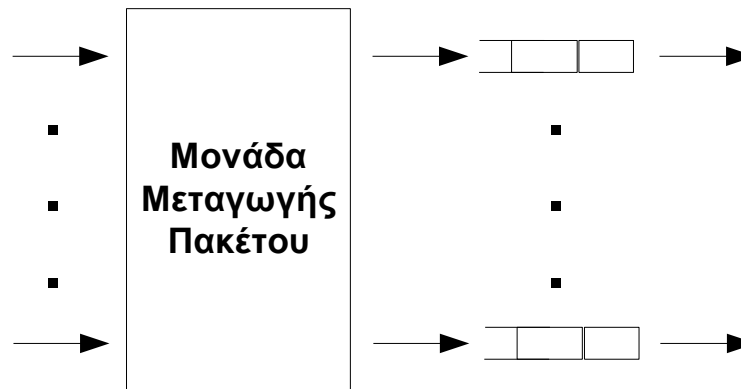


# Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εισόδου (2)



# Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εξόδου (1)

- Επιτρέπουν σε όλα τα εισερχόμενα πακέτα να φτάσουν στις θύρες εξόδου, όπου αποθηκεύονται σε ενταμιευτές
- Επειδή το φαινόμενο της φραγής στη θύρα εισόδου εξαιτίας του πακέτου επικεφαλής δεν υφίσταται (λόγω απουσίας ενταμιευτών στις μονάδες εισόδου) ο ρυθμός διέλευσης μπορεί θεωρητικά να φτάσει το 100%



# Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εξόδου (2)

- Εντούτοις, το μέγεθος  $N$  του μεταγωγέα περιορίζεται από την ταχύτητα της μνήμης
- Οι ενταμιευτές στις μονάδες εξόδου πρέπει να είναι σε θέση να αποθηκεύσουν  $N$  πακέτα ανά χρονική θυρίδα
- Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί εν μέρει με χρήση συγκεντρωτή (concentrator)
- Το μειονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι η αναπόφευκτη απώλεια πακέτων στο συγκεντρωτή





# Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου ενταμιευτή

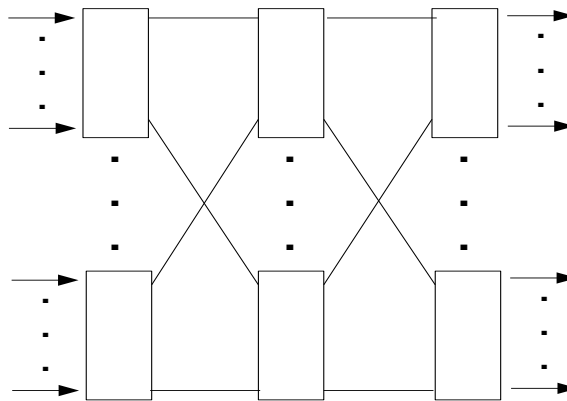
---

- Είναι οι λεγόμενοι μεταγωγείς διαμοιραζόμενης μνήμης
- Η λειτουργία τους περιγράφηκε σε προηγούμενη διαφάνεια



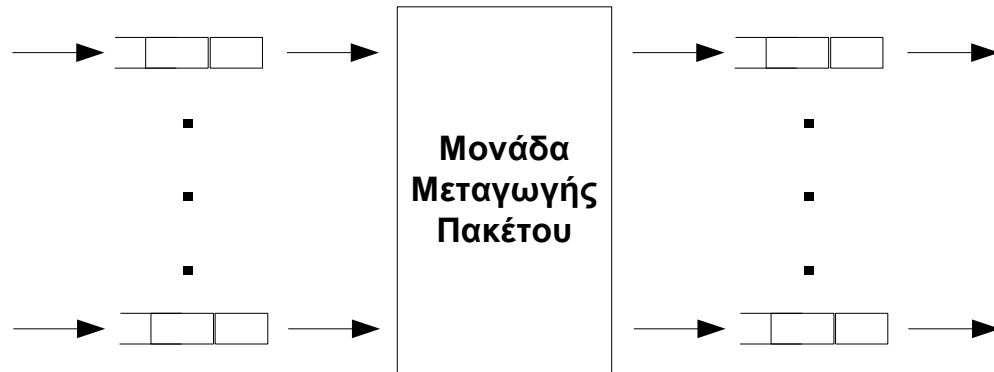
# Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου ενταμιευτή πολλαπλών επιπέδων

- Αποτελούν ένα βελτιωμένο τύπο μεταγωγών διαμοιραζόμενης μνήμης
- Χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή συστημάτων μικρής κλίμακας λόγω του υψηλού ρυθμού διέλευσης, της μικρής καθυστέρησης διάδοσης και της υψηλής χρησιμοποίησης της μνήμης που παρουσιάζουν
- Ένας μεταγωγέας μεγάλης κλίμακας μπορεί να κατασκευαστεί με τη διασύνδεση πολλών τέτοιων μεταγωγών
- Η επίδοση ενός τέτοιου συστήματος μειώνεται λόγω της φραγής εσωτερικού διαύλου
- Επιπλέον, η πολυπλοκότητα υλοποίησης είναι ιδιαίτερως αυξημένη



# Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εισόδου & Εξόδου (1)

- Έχουν σκοπό να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα της ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου και της ενταμίευσης στις μονάδες εξόδου
- Κάθε θύρα εξόδου μπορεί να δεχτεί το πολύ μέχρι  $k$  πακέτα ανά χρονική θυρίδα, όπου  $1 < k < N$ .
- Αν περισσότερα από  $k$  πακέτα κατευθύνονται προς την ίδια θύρα εξόδου, τα επιπλέον από αυτά αποθηκεύονται στους ενταμιευτές εισόδου.
- Για την επίτευξη του επιθυμητού ρυθμού διέλευσης, ο παράγοντας  $k$  μπορεί να τεθεί με βάση την κατανομή της εισερχόμενης κίνησης.





# Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες Εισόδου & Εξόδου (2)

---

- Μεταγωγείς μεγάλης κλίμακας μπορούν να κατασκευαστούν με βάση αυτή την αρχιτεκτονική, μιας και οι ενταμιευτές στη έξοδο απαιτείται να λειτουργούν με ταχύτητα το πολύ  $k$  φορές την ταχύτητα εισόδου.
- Εντούτοις, οι μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου & εξόδου απαιτούν περίπλοκους μηχανισμούς διαιτησίας για την επιλογή των  $k$  από τα  $N$  πακέτα που θα κατευθυνθούν προς τις θύρες εξόδου.

# Μεταγωγείς εικονικής ουράς αναμονής εξόδου (1)

- Οι μεταγωγείς εικονικής ουράς αναμονής εξόδου (Virtual-Output-Queue, VOQ) έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση της φραγής στη θύρα εισόδου εξαιτίας του πακέτου επικεφαλής (Head-of-Line Blocking), που παρουσιάζεται στους μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου.
- Κάθε ενταμιευτής εισόδου διαιρείται σε  $N$  λογικές ουρές αναμονής
- Οι λογικές ουρές μοιράζονται την ίδια φυσική μνήμη και κάθε μία από αυτές περιέχει τα πακέτα προς την αντίστοιχη έξοδο.
- Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ο ρυθμός διέλευσης.
- Οι μηχανισμοί διαιτησίας που απαιτούνται, όμως, πρέπει να είναι ιδιαίτερα ευφυείς και ταχείς, αφού πρέπει να λάβουν υπόψιν  $N^2$  πακέτα ( $N$  λογικές ουρές σε  $N$  θύρες εισόδου) σε κάθε χρονική θυρίδα.

# Μεταγωγείς εικονικής ουράς αναμονής εξόδου (2)

