



Features of 2.5D Network-on-Chip Router

ΤΗΜΜΥ ΑΠΘ | ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Χαραλάμπους Νικόλαος | Επιβλέποντες: κ. Παυλίδης Βασίλειος, κ. Τσεκούρας
Αριστοτέλης

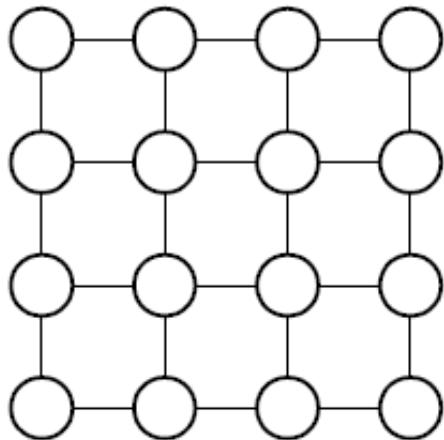
Εισαγωγή

Στο παρόν έγγραφο αναφέρονται επιγραμματικά **οι επιλογές σχεδίασης του 2.5D NoC Router** στα πλαίσια υλοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2025-2026 στον τομέα Ηλεκτρονικής & Υπολογιστών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ. Σκοπός της παρόντος εγγράφου είναι **η συγκέντρωση και παρουσίαση των σχεδιαστικών επιλογών** που θα εφαρμοστούν στην υλοποίηση του κυκλώματος σε κώδικα RTL: SystemVerilog. Αξίζει να επισημανθεί πως **είναι πιθανή η διαρκής αλλαγή κι ανανέωση των επιλογών** αυτών στη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους, λόγω των μεταβολών που μπορεί να προκύψουν στο εγχείρημα της υλοποίησης. Αυτές οι αλλαγές, ωστόσο, θα αντανακλώνται στο παρόν έγγραφο μετά από κάθε τυχούσα ανανέωση.

1. Τοπολογία

Η τοπολογία αποτελεί **το πιο θεμελιώδες χαρακτηριστικό** ενός δικτύου διασυνδέσεων και σημαντικό παράγοντα για την απόδοση, την ταχύτητα και την συνολική δομή του δικτύου. Κάποιοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη, κατά την επιλογή μιας τοπολογίας, είναι η **διάμετρος** (μέγιστη απόσταση ανάμεσα σε 2 κόμβους), ο **βαθμός διασύνδεσης** κάθε κόμβου, η **ποικιλία των μονοπατιών** (*path diversity*), το **μέσο μήκος ενός μονοπατιού** (εξαρτάται από τη διάμετρο), η **πολυπλοκότητα των διασυνδέσεων** και η **προσαρμογή σε διάφορες κλίμακες μεγέθους**. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, επιλέγουμε για την υλοποίηση του δικτύου την **τοπολογία πλέγματος** (*mesh topology*). Πιο συγκεκριμένα, επιλέγουμε ένα **2D (δισδιάστατο) 4x4 πλέγμα** (*mesh*) **με 16 κόμβους**, το οποίο θα αποτελεί την τοπολογία του δικτύου διασύνδεσης μας. Έχοντας αυτό ως δεδομένο, ένας **δρομολογητής-router** αντιστοιχίζεται σε κάθε κόμβο του πλέγματος και πρέπει να σχεδιαστεί με αυτή την προοπτική. Για αυτόν το λόγο, κάθε κόμβος θα έχει **5 θύρες εισόδου-εξόδου**

(4 προς κάθε κατεύθυνση – Βόρεια, Νότια, Ανατολικά, Δυτικά και 1 τοπική προς τον πυρήνα του στοιχείου με το οποίο συνδέεται ο router).

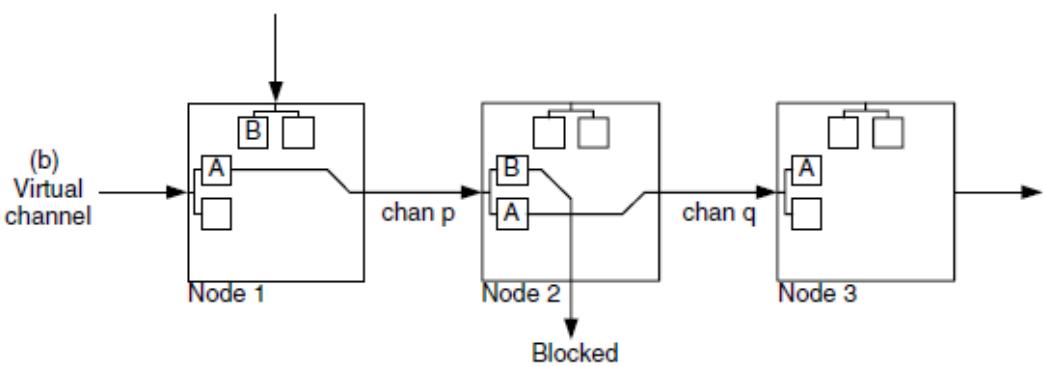


(b) A 4-ary 2-mesh

Εικόνα 1 - 2D 4×4 Τοπολογία Πλέγματος

2. Flow Control (Έλεγχος Ροής)

Το επόμενο βήμα στο πλαίσιο των σχεδιαστικών επιλογών, είναι να αποφασίσουμε με ποιον τρόπο θα πραγματοποιείται η ροή (αποστολή και λήψη) δεδομένων. Υπάρχουν αρκετές πολιτικές ροής ανάλογα με τη χρήση ή μη χρήση τοπικών *buffers* (σε κάθε κόμβο) για τη συγκράτηση δεδομένων και αρκετές βελτιωτικές πολιτικές προκειμένου αποφεύγεται το **blocking** ανάμεσα στα πακέτα. Αποφασίζοντας να προχωρήσουμε με μια *buffering* πολιτική και λαμβάνοντας υπόψη την δημιουργία *blocking* ανάμεσα στα πακέτα, επιλέγουμε την υλοποίηση ελέγχου ροής με τη χρήση **εικονικών καναλιών (Virtual Channels)**.



Εικόνα 2 - Παράδειγμα χρήσης VCs

Channels ~ VCs), τα οποία αποτελούν οντότητες με ξεχωριστούς buffers που έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιούν από κοινού μια φυσική ζεύξη (φυσικό κανάλι) έτσι ώστε, σε περίπτωση παύσης αποστολής δεδομένων τα οποία αφορούν ένα συγκεκριμένο **πακέτο**, να μπορεί να εκμεταλλευτεί τη φυσική ζεύξη ένα εικονικό κανάλι του οποίου τα δεδομένα μπορούν να προχωρήσουν στο δίκτυο. Πρακτικά, η πολιτική ροής ελέγχου με τη χρήση εικονικών καναλιών, αποτελεί μια πολιτική σε επίπεδο **flit** (καθώς οι buffers μπορεί να έχουν μέγεθος μικρότερο από ένα πακέτο, δηλαδή μερικών μόνο flit) και δημιουργήθηκε ακριβώς για να αντιμετωπιστεί η αεργία των φυσικών ζεύξεων που οφείλεται σε *blocking* ενός πακέτου από ένα άλλο που χρησιμοποιεί την ίδια ζεύξη αλλά δεν σημειώνει προσωρινά πρόοδο. Ωστόσο έως τώρα δεν διευκρινίστηκε με ποιον τρόπο θα είναι σε θέση να γνωρίζει ένας **κόμβος αποστολής** ότι ένας **κόμβος λήψης** θα διαθέτει ελεύθερο χώρο στους τοπικούς του buffer προκειμένου να υποδεχθεί τα απεσταλμένα flits. Για αυτόν τον λόγο χρειαζόμαστε έναν **μηχανισμό** ή μια πολιτική **προς-τα-πίσω πίεσης** (*backpressure mechanism*). Ανάμεσα σε πολλούς που χρησιμοποιούνται σε **buffered flow control**, επιλέγουμε τον **credit-based backpressure mechanism**. Σύμφωνα με αυτή την πολιτική, κάθε κόμβος αποστολής έχει καταχωρημένο σε *registers* τον αριθμό των ελεύθερων flits στους buffer υποδοχής των εικονικών καναλιών στον κόμβο λήψης. Αν αυτός ο αριθμός είναι μεγαλύτερος του μηδενός, τότε ο κόμβος αποστολής δύναται να αποστέλλει flits μέχρι ο μετρητής αυτός να μηδενιστεί. Ωστόσο, πρέπει με κάποιον τρόπο οι δύο κόμβοι να επικοινωνούν προκειμένου όταν ελευθερώνεται μια θέση flit στον buffer λήψης, να ανανεώνεται ο μετρητής του προηγούμενου κόμβου. Για αυτό τον λόγο, ο κόμβος λήψης, οποτεδήποτε συμβαίνει αυτό, αποστέλλει ένα **credit** (ειδικό flit ελέγχου για αυτόν το σκοπό) προς τα πίσω στον κόμβο αποστολής, προκειμένου να αυξηθεί κατά 1 η τιμή του μετρητή και να είναι σε θέση να αποστείλει ξανά κάποιο flit. Αυτές οι 2 πολιτικές δίνουν ευελιξία στο σχεδιασμό μας, αν και δημιουργούν εν γένει μεγάλη προς-τα-πίσω σηματοδότηση, αλλά και θα χρησιμοποιηθούν όπως θα δούμε παρακάτω για την αναγνώριση της **συμφόρησης** του δικτύου με τη χρήση της προς-τα-πίσω πίεσης. Τέλος, το μέγεθος των flits, των πακέτων αλλά και ο αριθμός και το βάθος των buffers, όπως και ο αριθμός των VCs ανά ζεύξη, μπορούν να **παραμετροποιηθούν** για να έχουμε μια γενική εποπτεία του κυκλώματος.

Συμπερασματικά, επιλέγουμε :

- **Virtual Channel Flow Control**
- **Credit-Based Backpressure Mechanism**

3. Δρομολόγηση (Routing)

Ο τρόπος με τον οποίο θα αποφασίζεται η διαδρομή των flits και άρα των δεδομένων ενός πακέτου μέσω του δικτύου αφορά το κομμάτι της δρομολόγησης. Υπάρχει μια πληθώρα επιλογών σχετικά με τις πολιτικές δρομολόγησης, οι οποίες επηρεάζουν την **καθυστέρηση (latency)** του δικτύου, αλλά και την **διεκπεραιωτικότητά** του (*throughput* ~ βαθμός χρήσης των ζεύξεων) όπως και μια σειρά από άλλους παράγοντες που με τη σειρά τους επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και την προσπάθεια αποφυγής **deadlock** στο δίκτυο, στην υλοποίηση μας, θα ακολουθήσουμε το θεωρητικό πλαίσιο του *Duato*. Πιο συγκεκριμένα, θα εισάγουμε την έννοια των **εικονικών καναλιών διαφυγής (escape VCs)**, και κατόπιν θα χρησιμοποιούμε τα συγκεκριμένα εικονικά κανάλια ως **υποδίκτυο** προς αποφυγή ενός πιθανού *deadlock*. Με λίγα λόγια, μπορούμε να έχουμε, π.χ. δύο κλάσεις καναλιών (1 και 2) με την 1 να περιέχει τα εικονικά κανάλια διαφυγής και την 2 να περιέχει τα κανάλια στα οποία γίνεται μια πιο «ελεύθερη» δρομολόγηση. Δηλαδή, επιλέγουμε μέσω των καναλιών της κλάσης 2 να γίνεται μια **προσαρμοστική ελάχιστη δρομολόγηση (minimal adaptive routing)**, επιλογή σχεδίασης που ευθυγραμμίζεται με τις συνθήκες του *Duato* αλλά δεν αποτελεί απαίτησή του. Η δρομολόγηση αυτή αφενός δεν θα επιτρέπει το **misrouting** (αλλαγή πορείας και προσαύξηση απόστασης από τον προορισμό) κι αφετέρου θα είναι προσαρμοστική λαμβάνοντας υπόψη την διαθεσιμότητα των **downstream VC buffers** στους γειτονικούς κόμβους (μέσω του μηχανισμού των *credits*), άρα και τη συμφόρηση του δικτύου. Αυτού του είδους η δρομολόγηση θα λαμβάνει αποκλειστικά μέρος στα κανάλια κλάσης 2, ενώ οποτεδήποτε η διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη, τα flits μπορούν να μεταβαίνουν από την κλάση 2 στην κλάση 1, αλλά όχι αντίστροφα. Από εκείνη τη στιγμή κι έπειτα θα δρομολογούνται αποκλειστικά μέσω της τελευταίας κλάσης μόνο με **XY Routing**, όπου έχει αποδειχτεί πως αποτελεί μια **deadlock-free** δρομολόγηση σε τοπολογία πλέγματος. Επομένως η κλάση 1 θα επιτελεί την απορρόφηση του δικτύου σε μια **deadlock-free** εγγυημένη δρομολόγηση, οποτεδήποτε η συμφόρηση δεν επιτρέπει την ελάχιστη προσαρμοστική δρομολόγηση στην κλάση 2. Όλα αυτά για την καταπολέμηση του *deadlock*, βασιζόμενοι στην γενικότερη θεωρητική θεμελίωση του πρωτοκόλλου του *Duato*. Επίσης, απαιτώντας η δρομολόγησή μας να είναι ελάχιστη, δημιουργούμε μια **livelock-free** δρομολόγηση. Στη θεωρία του *Duato* δεν απαιτείται η μόνιμη παραμονή ενός πακέτου στην κλάση διαφυγής. Ωστόσο, στην παρούσα υλοποίηση επιλέγεται η παραμονή στα *escape VCs* μέχρι την παράδοση του πακέτου. Έτσι απλοποιείται ο σχεδιασμός και διατηρείται χωρίς αμφιβολίες το **deadlock-free** χαρακτηριστικό του **υποδίκτυου διαφυγής**. Τέλος, η δρομολόγηση ενός πακέτου δεν βασίζεται σε στατικούς πίνακες διαδρομών, αλλά υπολογίζεται **δυναμικά** και **αλγορίθμικά**.

μέσω κάποιου αλγόριθμου δρομολόγησης, ο οποίος αποφασίζει την επόμενη μετάβαση σε κάποιον γειτονικό κόμβο (*hop*).

Συμπερασματικά, επιλέγουμε :

- **Minimal Adaptive Routing** (κλάση 2)
- **XY Routing μέσω escape VCs** (κλάση 1)

4. Πολιτικές Δέσμευσης εικονικών καναλιών

Διακρίνουμε τις πολιτικές (*επανα*)δέσμευσης ενός εικονικού καναλιού σε 2 βασικές κατηγορίες : **άμεση (aggressive)** και **συντηρητική (conservative)**. Ας υποθέσουμε ότι ένας buffer εικονικού καναλιού μπορεί να περιέχει flits από δύο διαφορετικά πακέτα, π.χ. τα A και B. Επίσης, ας υποθέσουμε πως το πακέτο A έχει flits στον *upstream input VC buffer* του τρέχοντος κόμβου, όπως και το πακέτο B άλλωστε, αλλά έχει επιτυχώς δεσμεύσει το *downstream input VC* ενός γειτονικού κόμβου κι επομένως ένα μέρος των flits του πακέτου A βρίσκεται σε αυτόν τον buffer. Η **άμεση επαναδέσμευση** επιτρέπει τη δέσμευση του *downstream input VC* για λογαριασμό του πακέτου B, αμέσως μόλις η ουρά του πακέτου A αφήσει τον *upstream input VC buffer* και μεταβεί στο στάδιο της μεταγωγής. Τότε, αμέσως το πακέτο B μπορεί να δεσμεύσει το εικονικό κανάλι του γειτονικού κόμβου για λογαριασμό του. Βέβαια αυτό μπορεί να προκαλέσει περεταίρω προβλήματα αν το πακέτο A στον επόμενο κόμβο αντιμετωπίσει *blocking*, με συνέπεια να «σταματήσει» η αποστολή και του πακέτου B. Επιπρόσθετα, επειδή το εικονικό κανάλι θα περιέχει και τα 2 πακέτα, αλλά πρακτικά η κατάστασή του θα είναι δεσμευμένη από ένα μόνο πακέτο, θα πρέπει να έχει πραγματοποιήσει σύζευξη με το αντίστοιχο **εικονικό κανάλι εξόδου (output VC)**, στο οποίο θέλει να μεταβεί το κάθε πακέτο. Επομένως, αυτό απαιτεί διπλασιασμό των διανυσμάτων κατάστασης του κάθε τρέχοντος *input VC*, γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στον χειρισμό. Ωστόσο αν επιτρέψουμε τη χρήση ενός *input VC buffer* από ένα μοναδικό πακέτο, τότε η χρονική στιγμή που το επόμενο πακέτο μπορεί να δεσμεύσει ένα *downstream input VC*, είναι μόλις η ουρά π.χ. του πακέτου A αφήσει τον *downstream VC buffer* εξ ολοκλήρου άδειο κι έτοιμο για επαναδέσμευση από το πακέτο B, του οποίου η κεφαλή, εκείνη τη χρονική στιγμή θα βρίσκεται στον *upstream input VC buffer* του τρέχοντος κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να έχουμε μεγαλύτερη καθυστέρηση (latency), ωστόσο επιτυγχάνουμε μια πιο ασφαλή δέσμευση με περιθώρια για ευκολότερο χειρισμό. Επομένως στη σχεδίασή μας θα προχωρήσουμε με :

- **Συντηρητική επαναδέσμευση εικονικού καναλιού**

5. Πρόσθετες Επιλογές

- Χρήση ξεχωριστών φυσικών ζεύξεων ανάμεσα σε flits & credits
- Χρήση ξεχωριστών κυκλικών buffer ανά εικονικό κανάλι
- Βασική αρχιτεκτονική 5×5 Crossbar με Separable Switch Allocator (Speedup = 1), με προοπτική επέκτασης
- Πιθανή χρήση Speculation (βελτίωση κατά την υλοποίηση)
- Round-Robin Arbiters
- Κλασσική δομή Router με διοχέτευση σταδίων (RC,VA,SA,ST)

6. Υλοποίηση Σταδίων

Όπως προαναφέρθηκε η δομή του δρομολογητή θα αποτελείται από 4 στάδια διοχέτευσης :

- RC – Routing Computation (Υπολογισμός Δρομολόγησης)
- VA – Virtual Channel Allocation (Δέσμευση Εικονικού Καναλιού)
- SA – Switch Allocation (Δέσμευση Μεταγωγέα)
- ST – Switch Traversal (Μεταγωγή)

Τα στάδια RC,VA εκτελούνται μόνο για το Head Flit ενός πακέτου, ενώ τα SA,ST για κάθε flit ξεχωριστά.

RC – ROUTING COMPUTATION

- 1) **Σκοπός:** Ο καθορισμός του συνόλου των "νόμιμων" θυρών εξόδου ενός πακέτου στο τρέχον router
- 2) Πραγματοποιείται μόνο σε Head Flits
- 3) Λαμβάνει ως είσοδο :
 - a) Τις τρέχουσες συντεταγμένες ενός Router
 - b) Τις συντεταγμένες του προορισμού
 - c) Την κλάση εικονικού καναλιού στην οποία βρίσκεται το flit (*adaptive* ή *escape VC*)
- 4) Κανόνες δρομολόγησης
 - a) Αν βρίσκεται σε *adaptive* VC
 - i) Βρίσκει όλες τις θύρες με κριτήριο την ελάχιστη δρομολόγηση
 - b) Αν βρίσκεται σε *escape* VC
 - i) Επιλέγει την μοναδική θύρα εξόδου μέσω Deterministic XY Routing
- 5) Παράγει ως έξοδο το σύνολο των υποψήφιων θυρών εξόδου.

Δηλαδή, αν το *Head Flit* βρίσκεται σε κάποιο εικονικό κανάλι **διαφυγής** (κλάση *των escape VCs*) παραμένει σε αυτή την κλάση και προωθείται μέσω *XY Routing* μέχρι να **παραδοθεί** στον προορισμό. Με λίγα λόγια, επιτρέπονται οι μεταβάσεις:

- ✓ **adaptive -> adaptive**
- ✓ **adaptive -> escape**
- ✓ **escape -> escape**

Αλλά **απαγορεύεται** η μετάβαση :

- * escape -> adaptive**

Η παραπάνω επιλογή διασφαλίζει την αποφυγή **Deadlock** μέσω δρομολόγησης, ενώ η επιλογή της ελάχιστης δρομολόγησης διασφαλίζει την αποφυγή **Livelock**.

VA – VIRTUAL CHANNEL ALLOCATION

- 1) **Σκοπός:** Η αποκλειστική ανάθεση ενός downstream VC σε ένα και μόνο πακέτο
- 2) Πραγματοποιείται μόνο σε *Head Flits*
- 3) Εκτελείται μετά το στάδιο *RC* και ύστερα από το φιλτράρισμα με τα κριτήρια επιλεξιμότητας στα υποψήφια downstream VCs
- 4) **Διαδικασία:**
 - a) Απαρίθμηση όλων των downstream VCs που αντιστοιχούν στο σύνολο των υποψήφιων θυρών εξόδου
 - b) Φιλτράρισμα εικονικών καναλιών μέσω των παρακάτω **κριτηρίων επιλεξιμότητας**. Για να χαρακτηριστεί ένα VC ως **επιλέξιμο**, πρέπει :
 - i) Να είναι **ΑΝΕΝΕΡΓΟ**
 - ii) Το **πλήθος των credits** του καναλιού που “βλέπει” ο upstream κόμβος να είναι > 0 .
 - iii) Το εικονικό κανάλι να ανήκει σε **επιτρεπόμενη κλάση** για το συγκεκριμένο πακέτο (**adaptive** ή **escape class**)
 - c) Αν τα επιλέξιμα downstream εικονικά κανάλια είναι **περισσότερα από ένα** :
 - i) Επιλέγουμε **ένα και μοναδικό** μέσω **Round-Robin** διαιτησίας **ανάμεσα στα επιλέξιμα κανάλια**
 - d) Άλλιως αν **δεν υπάρχει κανένα κανάλι** με τα παραπάνω κριτήρια επιλεξιμότητας
 - i) Το *head flit* **σταματάει** αναμένοντας και **το στάδιο VA επαναλαμβάνεται** στον επόμενο κύκλο ρολογιού
- 5) Στην περίπτωση **επιτυχούς δέσμευσης**, το επιλεγμένο κανάλι

- a) Μεταβαίνει σε ΕΝΕΡΓΟ
- b) Κλειδώνει και ανήκει στο συγκεκριμένο πακέτο μέχρι την αναχώρηση της ουράς του πακέτου (*Tail Flit*) προς τον μεταγωγέα (switch)

Χρησιμοποιούμε τα παραπάνω (3) κριτήρια επιλεξιμότητας, καθώς :

- Η διαθεσιμότητα των *credits* εγγυάται ελεύθερο χώρο, με ασφάλεια, στους *buffers*
- Η κατάσταση ενός καναλιού εγγυάται αποκλειστική δέσμευση για χρήση από ένα και μόνο πακέτο
- Η καθυστέρηση επιστροφής των *credits* "κρύβεται" (ή γίνεται ανεκτή), αφού απαιτούμε μόνο ένα διαθέσιμο credit κι όχι όλα