



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Πλαίσιο για τη Συστημική Βελτιστοποίηση Διαχείρισης  
Δεδομένων και Επικοινωνίας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Γεώργιος Δ. Τσουκαλάς**

**Επιβλέπων:** Νεκτάριος Κοζύρης  
Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2005





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Πλαίσιο για τη Συστημική Βελτιστοποίηση Διαχείρισης  
Δεδομένων και Επικοινωνίας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ

**Γεώργιου Δ. Τσουκαλά**

**Επιβλέπων:** Νεκτάριος Κοζύρης  
Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 27 Οκτωβρίου 2005

---

Ν. Κοζύρης  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

---

Τ. Σελλής  
Καθηγητής ΕΜΠ

---

Π. Τσανάκας  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 27 Οκτωβρίου 2005

---

**Γεώργιος Δ. Τσουκαλάς**

© Γεώργιος Δ. Τσουκαλάς, 2005  
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιλαμβάνει αυτό το έγγραφο εκφράζουν  
απόψεις του συγγραφέα και δε θα πρέπει να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες  
θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Υπολογιστικά Συστήματα και Βελτιστοποίηση</b>	<b>23</b>
2.1	Ένα μοντέλο για τα Υπολογιστικά Συστήματα και τη λειτουργία τους	23
2.1.1	Χώρος: Διάταξη Τιμών . . . . .	23
2.1.2	Υπολογιστικά Συστήματα . . . . .	24
2.1.3	Ρόλος και Πράξη . . . . .	25
2.1.4	Συνθεσιμότητα: Αναφορές και Προορισμοί . . . . .	25
2.1.5	Σημασιολογία και Πρόθεση . . . . .	27
2.2	Αναφορική Οργάνωση Συστήματος . . . . .	29
2.2.1	Αναφορικό Βάθος Συστήματος . . . . .	29
2.2.2	Το παράδειγμα του Γραφείου Διανομής Αλληλογραφίας . .	31
2.2.3	Βελτιστοποίηση Κόστους . . . . .	33
2.2.4	Αναφορική Βελτιστοποίηση . . . . .	36
2.2.5	Δυναμική Σημασιολογία . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Χωροκράτορας: αναφορά δεδομένων και διαχείριση τιμών</b>	<b>39</b>
3.1	Σημειολογία . . . . .	39
3.2	Διευθυνσιοδότηση Δεδομένων . . . . .	40
3.2.1	Αναφορές, Ονόματα, Διευθύνσεις και Προορισμοί . . . . .	41
3.2.2	Χώρος Διευθύνσεων . . . . .	43
3.2.3	Απόδοση Τιμής σε Χώρο Δεδομένων . . . . .	45
3.3	Χώρος Διευθύνσεων Χωροκράτορα . . . . .	45
3.3.1	Η ψηφιακή διάταξη . . . . .	46
3.3.2	Ψηφιοποίηση . . . . .	47
3.4	Απόδοση Τιμών στον Χωροκράτορα . . . . .	48
3.4.1	Το πρόβλημα της πλεονάζουσας πληροφορίας . . . . .	48
3.4.2	Το πρόβλημα της μαζικής διαχείρισης τιμών . . . . .	49
3.4.3	Το πρόβλημα της επικοινωνίας μαζικών προορισμών . . . .	49
3.4.4	Το γενικό πρόβλημα της συνθεσιμότητας της αναφοράς . .	49
3.4.5	Ανάθεση τιμών στο Χωροκράτορα . . . . .	50

3.5	Το Δένδρο Απόδοσης Τιμών . . . . .	50
3.5.1	Ψηφιακές ιδιότητες . . . . .	51
3.5.2	Μείωση Δένδρου . . . . .	52
3.5.3	Ανάκτηση Τιμής Διεύθυνσης . . . . .	54
3.5.4	Ανάθεση Τιμής Διεύθυνσης . . . . .	55
3.6	Το Δένδρο Χωροκράτορα . . . . .	55
3.6.1	Εντοπισμός Κόμβου . . . . .	56
3.6.2	Διάσχιση . . . . .	56
3.6.3	Ανάκτηση τιμής . . . . .	56
3.6.4	Ανάθεση τιμής . . . . .	57
3.6.5	Μείωση . . . . .	57
3.6.6	Συγχώνευση δένδρων . . . . .	58
3.6.7	Σύνθεση χώρων . . . . .	59
3.6.8	Γραφική παρουσίαση ενός δένδρου . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Η διευθυνσιοδότηση: Ψηφιοφάσμα</b>	<b>65</b>
4.1	Ψηφιοφάσματα . . . . .	65
4.1.1	Μοναδιαία αναπαράσταση γραμμικών διαστημάτων . . . . .	65
4.1.2	Ιεραρχική διάταξη . . . . .	67
4.1.3	Ψηφιακή διάταξη . . . . .	68
4.2	Αλγόριθμοι Ψηφιοφασμάτων . . . . .	68
4.2.1	Φάσμα, Μήτρα και Φύλακας . . . . .	68
4.2.2	Συγχώνευση . . . . .	69
4.2.3	Έλεγχος ιεραρχικής διάταξης . . . . .	69
4.2.4	Έλεγχος γραμμικής διάταξης . . . . .	70
4.3	Ψηφιοφάσματα μεταβλητής λέξης . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Κατευθύνσεις</b>	<b>73</b>
5.1	Πολλαπλασιασμός πινάκων . . . . .	73
5.1.1	Βελτιστοποίηση κόστους . . . . .	74
5.1.2	Αναφορική βελτιστοποίηση . . . . .	77
5.2	Διαχείριση καταστάσεων αντικειμένων . . . . .	78
5.3	Γενικευμένες μνήμες ίχνους (trace caches) . . . . .	79
5.4	Υλικό . . . . .	79
5.5	Λειτουργικά Συστήματα . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Κατανεμημένα περιβάλλοντα</b>	<b>81</b>
6.1	Από την τοπικότητα στην κατανομή . . . . .	81
6.2	Εισαγωγή της κατανομής στο μοντέλο συστημάτων . . . . .	83
6.3	Κατανεμημένος Χώρος: Καθολικός Χώρος Διευθύνσεων . . . . .	83
6.4	Διασύνδεση: Σήματα . . . . .	84

---

6.5	Πρόσβαση κατανεμημένων προορισμών . . . . .	85
6.5.1	Δρομολόγηση Σημάτων . . . . .	85
6.6	Σύνθεση κατανεμημένων προορισμών . . . . .	86
6.6.1	Το πρόβλημα της αναφοράς κατανεμημένων προορισμών .	86
6.6.2	Εξαρτήσεις . . . . .	87
6.6.3	Ίχνη Διαδρομών . . . . .	87
6.7	Διαχείριση επικοινωνίας . . . . .	88
6.7.1	Το κόστος της συγκέντρωσης επικοινωνίας . . . . .	88
6.7.2	Αναφορική βελτιστοποίηση . . . . .	89
6.8	Διαχείριση κατανεμημένου χώρου . . . . .	89
6.8.1	Μαζική διαχείριση χαρακτηριστικών αντικειμένων . . . . .	90
6.8.2	Ιεραρχική διαχείριση αντικειμένων . . . . .	90
6.8.3	Εξαγωγή και επιβολή μακροσκοπικών ιδιοτήτων . . . . .	90
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>95</b>





# Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Προορισμοί . . . . .	27
2.2	Διασύνδεση συστημάτων . . . . .	28
2.3	Διασυνδεδεμένο σύστημα . . . . .	29
2.4	Λειτουργική ροή διαμέσου ενός υπολογιστικού συστήματος . . . . .	30
2.5	Αναφορική οργάνωση ενός υπολογιστικού συστήματος . . . . .	32
2.6	Τροφοδότηση μονής ομοχειρίας . . . . .	35
2.7	Τροφοδότηση πολλαπλής ομοχειρίας . . . . .	35
3.1	Κατασκευή δένδρου με ανύψωση τιμών. . . . .	51
3.2	Δένδρο απόδοσης τιμών. . . . .	51
3.3	Δένδρο απόδοσης τιμών με παραλειπόμενα φύλλα. . . . .	52
3.4	Δένδρο απόδοσης τιμών με πολλαπλότητα τιμών. . . . .	53
3.5	Δένδρο απόδοσης τιμών με εξάλειψη φύλλων. . . . .	53
3.6	Δένδρο απόδοσης τιμών με εξάλειψη φύλλων και συμπίεση διαδρομής. . . . .	54
3.7	Μειωμένο δένδρο απόδοσης τιμών. . . . .	54
3.8	Δένδρο Χωροκράτορα 10bit χώρου με τυχαίο ύψος φασμάτων 0 έως 6 bit . . . . .	63
3.9	Δένδρο Χωροκράτορα 12bit χώρου με τυχαίο ύψος φασμάτων 0 έως 6 bit . . . . .	64
4.1	Διάταξη Ψηφιοφασμάτων . . . . .	69
4.2	Εισαγωγή ψηφιοφασμάτων στη γραμμική διάταξη μέσω του φρουρού . . . . .	70



# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Παραδείγματα αντιμετώπισης αναφορικού κορεσμού. . . . .	34
2.2	Παραδείγματα αντιμετώπισης αναφορικής ανεπάρκειας. . . . .	36
2.3	Παραδείγματα αναφορικής βελτιστοποίησης. . . . .	37
3.1	Δένδρο Χωροκράτορα: εντοπισμός κόμβου. . . . .	57
3.2	Δένδρο Χωροκράτορα: διάσχιση. . . . .	58
3.3	Δένδρο Χωροκράτορα: ανάκτηση τιμής. . . . .	58
3.4	Δένδρο Χωροκράτορα: ανάθεση τιμής σε χωροδιεύθυνση . . . . .	59
3.5	Δένδρο Χωροκράτορα: μείωση με εξάλειψη φύλλων. . . . .	60
3.6	Δένδρο Χωροκράτορα: εξάλειψη φύλλων. . . . .	61
3.7	Δένδρο Χωροκράτορα: ανάθεση τιμών με συγχώνευση υποδένδρου	62
4.1	Η ανατομία ενός ψηφιοφάσματος ψηφιολέξης σταθερού μήκους . .	67
4.2	απομόνωση φάσματος, μήτρας και φρουρού ψηφιοφάσματος σταθερής λέξης . . . . .	69
5.1	Φωλιασμένοι βρόχοι για πολλαπλασιασμό πινάκων. . . . .	74
5.2	Πολλαπλασιασμός πινάκων με τμήση τοπικότητας και ανάπτυξη βρόχου. . . . .	75



## Περίληψη

Η παρούσα εργασία είναι ένα πρώιμο αποτέλεσμα της αναζήτησης για ένα θεωρητικό και πρακτικό πλαίσιο για τη μεθόδευση της βελτιστοποίησης της υλοποίησης σύνθετων υπολογιστικών συστημάτων που βασίζονται στη διασύνδεση επιμέρους δομικών συστατικών, με τελικό στόχο την θεώρηση των συστημάτων σε ένα γενικό, κατανεμημένο περιβάλλον μεγάλης κλίμακας.

Πρώτος στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση ενός μοντέλου για γενική θεώρηση της έννοιας και λειτουργίας των υπολογιστικών συστημάτων, το οποίο εξήχθη με βάση δεδομένα θεωρητικά αλλά και εμπειρικά παραδείγματα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, με τους όρους του μοντέλου περιγράφονται σημαντικά ελαττώματα που παρουσιάζονται στη σύνθεση των συστημάτων και υπονομεύουν τη βέλτιστη επίδοσή τους. Τα ελαττώματα εντοπίζονται στη μη βέλτιστη χρήση των δυνατοτήτων των δομικών συστατικών και τη μη βέλτιστη ή απύουσα προσαρμογή στις δυναμικές συνθήκες λειτουργίας. Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης είναι αύξηση της επίδοσης είτε μέσω αύξησης της ταχύτητας επεξεργασίας είτε μέσω περιορισμού του πλεονάζοντος όγκου δεδομένων και της επεξεργασίας του.

Παρουσιάζεται ένα υποσύστημα ιεραρχικής διαχείρισης αναφορών και τιμών δεδομένων, με την επωνομασία Χωροκράτορας, το οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για να αποτελέσει ενδεικτικό εργαλείο για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που προκύπτει με τη θεώρηση του μοντέλου. Η παρουσίαση συμπληρώνεται με μια ενδεικτική μελέτη περίπτωσης βελτιστοποίησης με τη συνδυασμένη χρήση του μοντέλου ως οδηγό και το υποσύστημα του Χωροκράτορα ως εργαλείο.

Στη συνέχεια, συζητούνται κατευθύνσεις γενίκευσης των ιδεών που αναπτύχθηκαν με κατάληξη την σκιαγράφηση της επέκτασης του πλαισίου για να περιλάβει βασικά ζητήματα του σχεδιασμού και βελτιστοποίησης συστημάτων σε κατανεμημένα περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας.



## **Abstract**

The present thesis is an initial result in search for a theoretical and practical framework for the optimization of the implementation of complex computing systems towards a general consideration of systems in large scale distributed environments, where larger systems are composed of simpler ones.

Initially, a general model for defining a computing system and its operation is presented. The model was formulated based on common theoretical and empirical paradigms for optimization. The process of system composition is examined under the model's terms and substantial flaws that undermine the optimality of performance are exposed.

Performance loss can be attributed to suboptimal exploitation of the capabilities of the underlying components, or inadequate adaption to dynamic conditions. The process of optimization involves either the increase of processing speed, or the elimination of redundancy in data volume and data processing.

A subsystem for the hierarchical management of data references and values is presented, under the name "Spacekeeper". The subsystem was designed and implemented as a prototype instrument for the application of model derived methodologies. A case study is presented where a system's optimization is guided by the theoretical model and assisted by the Spacekeeper.

Next, generalizations of the ideas developed are discussed leading to an outlining of a possible model extension to include basic issues of system design and optimization in large scale distribution.





# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υπολογιστικών Συστημάτων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Την επίβλεψη της εργασίας είχε ο κ. Νεκτάριος Κοζύρης, επίκουρος καθηγητής της Σχολής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κοζύρη, ο οποίος μου πρόσφερε μια θέση στο υπό την καθοδήγησή του περιβάλλον του Εργαστηρίου, εξασφαλίζοντάς μου πρόσβαση σε γνώση και τεχνολογία και επαφή με την επιστημονική κοινότητα.

Το περιβάλλον αυτό αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα που διαμόρφωσε τόσο το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας, όσο κι ένα ευρύτερο σύνολο γνώσεων, ενώ παράλληλα υπήρξε αιτία και τόπος πολύτιμων εμπειριών. Για το ρόλο τους στο περιβάλλον αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου, ενώ θα ήθελα να εκφράσω την ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη μου προς τον διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αριστείδη Σωτηρόπουλο, και τον υποψήφιο διδάκτορα Κορνήλιο Κούρτη, οι οποίοι με προσωπική διάθεση μου πρόσφεραν μια δημιουργική σχέση επικοινωνίας, κρίσιμη για την επεξεργασία γνώσεων και την έμπνευση ιδεών.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, που με την πολύπλευρη υποστήριξή της μου παρέχει ασφάλεια και ανεκτίμητη ελευθερία.

Γεώργιος Δ. Τσουκαλάς  
Οκτώβριος 2005



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### Προϊστορία

Το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας δεν αποτελεί αποκλειστικό αποτέλεσμα της ενασχόλησης με ένα απομονωμένο θέμα στα πλαίσια των φοιτητικών υποχρεώσεων, αλλά έχει κάποια προϊστορία. Η προϊστορία αυτή, σχετίζεται με το περιβάλλον του Εργαστηρίου Υπολογιστικών Συστημάτων του ΕΜΠ. Η συμμετοχή στις δραστηριότητες του εργαστηρίου παρείχε πρόσβαση σε τεχνολογία και επαφή με την επιστημονική κοινότητα.

Η πρώτη επαφή με τα υπολογιστικά συστήματα, τη διαχείριση και τον προγραμματισμό τους έγινε στο περιβάλλον UNIX και πιο συγκεκριμένα στο περιβάλλον του λειτουργικού συστήματος Linux. Το περιβάλλον αυτό περιλάμβανε και τις συστοιχίες των υπολογιστών του εργαστηρίου. Στη συνέχεια, το περιβάλλον του συστημικού προγραμματισμού επέδειξε περισσότερες διαστάσεις με τη θεώρηση τόσο του λογισμικού του ίδιου του λειτουργικού συστήματος όσο και του υλικού πάνω στο οποίο το λογισμικό εκτελείται. Μελετήθηκε στην πράξη και προγραμματίστηκε ο πυρήνας του Linux, παράλληλα με την εμβάθυνση στην αρχιτεκτονική των επεξεργαστών και την ενασχόληση με τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων του λογισμικού που εκτελούν. Η μελέτη περιλάμβανε όλη τη διαδικασία ανάπτυξης, από την αλγοριθμική σχεδίαση, το στάδιο του μεταγλωττισμού καθώς και τον απευθείας προγραμματισμό του επεξεργαστή. Σε περιβάλλον χρήστη, προγραμματίστηκαν εφαρμογές για τα δίκτυα υψηλών επιδόσεων που διασυνδέουν τις συστοιχίες του εργαστηρίου, με σκοπό τον πειραματισμό και την έρευνα. Σε συνδυασμό με τη μελέτη του λειτουργικού συστήματος και του λογισμικού υποστήριξης των συσκευών του δικτύου, προγραμματίστηκαν εφαρμογές επικοινωνίας σε επίπεδο λειτουργικού συστήματος.

### Κίνητρα και Στόχοι

Με την εμβάθυνση στον τρόπο λειτουργίας και τη φιλοσοφία του σχεδιασμού των υπολογιστικών συστημάτων και με την προσωπική εμπειρία της χρήσης, διαχείρισης και προ-

γραμματισμού τους, τα θέματα βελτιστοποίησης των επιδόσεων άρχισαν να παρουσιάζουν ομοιότητες. Η κρίσιμη παρατήρηση της κανονικότητας της διαδικασίας βελτιστοποίησης αποτέλεσε βασικό κίνητρο προς την κατεύθυνση της μεθόδευσης τέτοιων διαδικασιών.

Η ανάγκη ενός πλαισίου για τη μεθόδευση του βέλτιστου σχεδιασμού και υλοποίησης τονίζεται με ιδιαίτερο τρόπο όταν στην ίδια τη διαδικασία της βελτιστοποίησης παρατηρούνται τα ίδια ελαττώματα που παρατηρούνται και στη λειτουργία των προς βελτιστοποίηση συστημάτων. Η αντίδραση στη συνειδητοποίηση αυτή ήταν η αναζήτηση ενός τέτοιου πλαισίου, για τη μεθόδευση της βελτιστοποίησης των διαδικασιών μέσω των οποίων υλοποιείται ένα υπολογιστικό σύστημα.

Η αξία ενός τέτοιου πλαισίου δε περιορίζεται στο κέρδος του κόστους σε χρόνο μέσω της βελτιστοποίησης. Μέσω του μειωμένου κόστους, ο υψηλότερος στόχος είναι η ανίχνευση και επιδίωξη νέων προοπτικών που θα διαμορφώσουν όχι μόνο ποσοτικά, αλλά και ποιοτικά τα όρια των εκμεταλλεύσιμων δυνατοτήτων των υπολογιστικών συστημάτων.

Ο αιώτερος στόχος αυτός υπέδειξε και την έμφαση που δόθηκε στην παρουσίαση της προοπτικής έναντι της υλοποίησης στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

## **Άτυπη συλλογιστική αφετηρία**

Αν θεωρηθεί ότι ένα σύστημα έχει χαμηλότερη επίδοση από αυτήν που αποτελούσε στόχο ή επιθυμία του δημιουργού του, το ερώτημα που προκύπτει είναι ποιο είναι το αίτιο αυτής της αποτυχίας. Η αυθόρμητη απάντηση που δίνεται συνήθως είναι η άγνοια. Όμως, πέρα από την περίπτωση που ο δημιουργός δεν έχει πρόσβαση στους πόρους ώστε να επιτύχει, το αίτιο αυτό έχει ένα παράδοξο χαρακτήρα. Συχνά, ο δημιουργός κατέχει όλη τη γνώση που χρειάζεται αλλά παρόλα αυτά δεν είναι σε θέση να επιτύχει την επιθυμητή επίδοση. Αυτό που δε μπορεί να επιτύχει, είναι να επιλέξει από το σύνολο των γνώσεών του αυτές που απαιτούνται και στη συνέχεια να συνθέσει την επιθυμητή λύση. Αυτό μπορεί να συμβαίνει ακόμη κι όταν είναι μέρος της γνώσης του το ποιες είναι οι κατάλληλες γνώσεις. Πέρα από τις γνώσεις ως δυνατότητα διατύπωσης απαντήσεων σε ερωτήματα, προκύπτει ότι εξίσου σημαντική είναι η διαδικασία της επιλογής, δηλαδή της διατύπωσης των σωστών ερωτημάτων.

Η επίλυση του προβλήματος της σχεδίασης ενός συστήματος περιλαμβάνει κι ένα πολύ σημαντικό βήμα της αναγωγής της έννοιας του επιθυμητού αποτελέσματος σε κατάλληλες ερωτήσεις που θα επιλέξουν τις απαντήσεις που χρειάζονται για την κατασκευή της λύσης. Η έννοια του επιθυμητού αποτελέσματος μπορεί να αναφερθεί με την πρόθεση του δημιουργού, ενώ κάθε ερώτηση μπορεί να θεωρηθεί αναφορά της απαραίτητης απάντησης. Τελικά, η διαδικασία της επίλυσης των προβλημάτων απαιτεί εκτός από την κατοχή της απαραίτητης γνώσης και τον κατάλληλο μετασχηματισμό της αναφοράς του επιθυμητού αποτελέσματος σε αναφορά γνώσεων.

Επειδή τα συστήματα κατασκευάζονται από τους δημιουργούς τους σαν αυτόνομη λειτουργική προέκταση του εαυτού τους, η όποια αδυναμία επεξεργασίας των αναφορών

του δημιουργού αποτυπώνεται και στη λειτουργία του συστήματος. Αυτή η ιδέα βρίσκεται στον πυρήνα του αναφορικού μοντέλου λειτουργίας των υπολογιστικών συστημάτων που θα θεωρηθεί στη συνέχεια.

Από αυτή τη σκοπιά, το μοντέλο έχει στόχο την αντιστοίχιση της διαδικασίας της τυπικής ανάλυσης των συστημάτων με τη διαισθητική διαδικασία αντιμετώπισης προβλημάτων στα γενικότερα πλαίσια της κοινωνικής (και όχι μόνο επιστημονικής) πραγματικότητας. Η γεφύρωση ιδανικά είναι αμφίδρομη, καθώς θα μπορούν να σχηματοποιούνται λύσεις στο μοντέλο και να εφαρμόζονται στην πράξη, αλλά ταυτόχρονα να εξάγονται τα μοντελοποιημένα ανάλογα εφαρμοσμένων λύσεων, εμπλουτίζοντας το μοντέλο.



## Κεφάλαιο 2

# Υπολογιστικά Συστήματα και Βελτιστοποίηση

### 2.1 Ένα μοντέλο για τα Υπολογιστικά Συστήματα και τη λειτουργία τους

Η ανάπτυξη ενός γενικού πλαισίου για τη βελτιστοποίηση υπολογιστικών συστημάτων βασίστηκε σε ένα μοντέλο που ορίζει τι είναι υπολογιστικό σύστημα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να περιγράψει τη λειτουργία του αλλά ταυτόχρονα να μπορέσει να ενσωματώσει και τη λογική και μεθοδολογία των θεωρητικών και εφαρμοσμένων πρακτικών βελτιστοποίησης. Η ιδέα στον πυρήνα του μοντέλου είναι ότι τα υπολογιστικά συστήματα είναι κατασκευάσματα τα οποία σχεδιάζονται και υλοποιούνται για να αναλάβουν ως ανεξάρτητες οντότητες ένα λειτουργικό ρόλο στο περιβάλλον που εξυπηρετεί τους σκοπούς του δημιουργού τους. Η *πρόθεση* αυτή του δημιουργού είναι μια κεντρική έννοια που προσδιορίζει το νόημα της ύπαρξης του υπολογιστικού συστήματος. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των υπολογιστικών συστημάτων θα κατευθύνεται με βάση την πρόθεση αυτή και σε οποιαδήποτε στιγμή της ανάπτυξης ή της λειτουργίας του συστήματος, αυτό θα αξιολογείται σύμφωνα με το πόσο καλά την εξυπηρετεί.

#### 2.1.1 Χώρος: Διάταξη Τιμών

Η έννοια του συστήματος είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στις επιστήμες και δίνει έναν γενικό τρόπο περιγραφής των οντοτήτων που υπάρχουν στον εκάστοτε θεωρούμενο χώρο. Ο χώρος-πρότυπο που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια έχει χαρακτηριστικά που τον παραλληλίζουν με το φυσικό χώρο.

Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι η *ολική διάταξη*. Για οποιοδήποτε αντικείμενο στο χώρο είναι δυνατόν να ορισθεί η θέση του σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο.

Η σχέση αυτή εκφράζεται σαν "κάτω/πάνω από", "αριστερά/δεξιά από", "πιο κοντά/πέρα από", και γενικά σαν συγκρίσεις της σχετικής θέσης κατά μήκος των διαφόρων διαστάσεων. Ο αριθμός των διαστάσεων δεν θα θεωρηθεί σημαντικός για τη γενική ανάλυση καθώς οι διατάξεις κατά μήκος τους είναι ανεξάρτητες και όμοιες. Κατά συνέπεια, ό,τι περιγράφεται ή διατυπώνεται για μία διάσταση, μπορεί αμέσως να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε άλλη.

Με βάση τη διάταξη, δύο **τοποθεσίες** στο χώρο μπορούν να ορίσουν μια **περιοχή** του χώρου ως το σύνολο των τοποθεσιών που βρίσκονται ανάμεσα, μετά τη μία και πριν την άλλη. Οι τοποθεσίες αυτές αποτελούν τα **όρια** της περιοχής που ορίζουν.

Κάθε περιοχή έχει μια **τιμή** η οποία αντιπροσωπεύει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η περιοχή σε σχέση με τις πιθανές καταστάσεις όπου θα μπορούσε να βρίσκεται. Επειδή μπορούν να οριοθετηθούν αυθαίρετα περιοχές, η τιμή μιας περιοχής είναι ισοδύναμη με τη διάταξη των τιμών κάθε συνόλου ξένων μεταξύ τους υποπεριοχών της. Θεωρείται ότι κάθε περιοχή μπορεί να βρεθεί σε τουλάχιστον 2 καταστάσεις γιατί αλλιώς θα έπρεπε όλος ο χώρος να έχει πάντοτε την ίδια τιμή. Η ιδιότητα αυτή θα καλείται **συνθεσιμότητα**, και εκφράζει τη δυνατότητα ιεράρχησης του χώρου.

Για να είναι πλήρες το μοντέλο χρειάζεται και μια περιγραφή των δυνάμεων που αλλάζουν τις καταστάσεις του χώρου. Οι **δυνάμεις** αυτές εκφράζουν τη δυνατότητα του προγραμματισμού του χώρου. Ο χώρος τελικά παίρνει μια βολική μορφή που μοιάζει με ακολουθία διατεταγμένων ψηφίων, μαζί με μια μηχανή (Turing) έξω ή μέσα στο χώρο που επιβάλλει κανόνες για τις αλλαγές των καταστάσεων.

### 2.1.2 Υπολογιστικά Συστήματα

Χρησιμοποιώντας το χώρο που ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ένα **υπολογιστικό σύστημα** θα μπορούσε να περιγραφεί ως μια μηχανή ή γενικός μηχανισμός που επιβάλλει κανόνες για τις αλλαγές των τιμών σε ένα χώρο. Αν υποθεθεί ότι το σύστημα περιέχεται στο χώρο, με δεδομένους τους κανόνες μπορεί να εντοπιστεί η περιοχή που είναι υπεύθυνη για την επιβολή των κανόνων και να αναγνωρισθεί ως σύστημα. Αντίστροφα, δεδομένης μιας περιοχής, μπορούν να αναγνωρισθούν οι κανόνες αλλαγής που επιβάλλονται με αίτια περιορισμένα εντός της και να αναγνωρισθεί ένα σύστημα.

Στο σύστημα θα περιλαμβάνονται και η **είσοδος** και η **έξοδος**. Είσοδος είναι η περιοχή που μετασχηματίζει ανάλογα με την τιμή της τη μορφή των κανόνων που επιβάλλονται από τη μηχανή, και έξοδος είναι η περιοχή η τιμή της οποίας έχει αίτιο τη δράση της μηχανής. Επειδή η έξοδος ενός συστήματος μπορεί να επιβάλλει τιμές στην είσοδο ενός άλλου (ακόμη και του ίδιου), η αλληλεπίδραση του συστήματος με άλλα συστήματα είναι βασικό χαρακτηριστικό του. Οι μηχανισμοί με τους οποίους συμβαίνει αυτή η αλληλεπίδραση (ή επιτυγχάνεται, αν θεωρηθεί ότι τα συστήματα εξυπηρετούν κάποιο σκοπό) θα ονομάζονται **διάλογοι επικοινωνίας**.

Εάν η μηχανή βρίσκεται στον ίδιο χώρο στον οποίο αλληλεπιδρά, τότε θα πρέπει να υποθεθεί μια καθολική μηχανή (πχ. Universal Turing Machine) που θα αναλαμβάνει



να υλοποιεί τη λειτουργία των μηχανών που ορίζονται μέσα στο χώρο. Ουσιαστικά, ένα υπολογιστικό σύστημα ορίστηκε ως ένα αφηρημένης μορφής λογισμικό που τρέχει σε κάποιου είδους υπολογιστή. Γενικά υπολογιστικό σύστημα θα θεωρείται οποιαδήποτε οντότητα αλληλεπιδρά σε ένα περιβάλλον και μπορεί να προγραμματιστεί η συμπεριφορά της. Η συνθεσιμότητα του χώρου σημαίνει τη συνθεσιμότητα των συστημάτων. Δηλαδή κάθε σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ιεραρχική σύνθεση *υποσυστημάτων*.

Ο ορισμός δε διαφέρει από το αναμενόμενο: Παραδείγματα υπολογιστικών συστημάτων είναι οι υπολογιστές ως σύνολο αλλά και τα μέρη τους, όπως ο επεξεργαστής, οι μνήμες, οι συσκευές εισόδου/εξόδου. Αλλά περισσότερο θα απασχολήσουν τα συστήματα λογισμικού, καθώς βρίσκονται υψηλότερα στην ιεραρχία και ο σκοπός τους είναι ακριβώς να αποτελέσουν εργαλείο υλοποίησης προθέσεων. Συστήματα λογισμικού μπορούν να θεωρηθούν τα λειτουργικά συστήματα, οι διεργασίες που τρέχουν σε αυτά, οι κόμβοι σε ένα δίκτυο, οι εφαρμογές που τρέχουν ως διεργασίες σε κόμβους σε ένα δίκτυο.

### 2.1.3 Ρόλος και Πράξη

Όλα αυτά τα συστήματα δημιουργούνται με σκοπό να ενεργούν στο χώρο ανεξάρτητα και εξυπηρετώντας ένα σκοπό. Το *υποκείμενο* της *πρόθεσης* που σχετίζεται με την ύπαρξη του συστήματος δε χρειάζεται να προβαίνει σε ενέργειες για να την υλοποιήσει, καθώς το σύστημα λειτουργεί αυτόνομα και αναλαμβάνει αυτόν τον *ρόλο* αντί εκείνου. Οι ενέργειες που περιλαμβάνει ο ρόλος αυτός θα καλούνται *πράξεις (πρόθεσης)*. Τα αντικείμενα της πράξεων αυτών είναι οι τιμές των περιοχών που είναι αναγκαίο να προσπελαστούν για να εκπληρωθεί. Οι πράξεις αντιστοιχούν σε ενέργειες απόδοσης τιμών στο χώρο και έχουν το ανάλογο *κόστος*.

### 2.1.4 Συνθεσιμότητα: Αναφορές και Προορισμοί

Η συνθεσιμότητα των συστημάτων διευκολύνει το σχεδιασμό και την ανάπτυξή τους καθώς η δομή τους μπορεί να μελετηθεί και να υλοποιηθεί ιεραρχικά αρχίζοντας από απλά υποσυστήματα και συνθέτοντας πολυπλοκότερα. Η μεθοδολογία αυτή είναι πολύτιμη επίσης γιατί επιτρέπει τη δημιουργία αποθεμάτων υλοποιημένων συστημάτων, ή βιβλιοθηκών, που μπορούν να αποτελέσουν τα βασικά δομικά στοιχεία για ευκολότερη υλοποίηση ακόμη συνθετότερων συστημάτων.

Για να προκύψει ένα συνθετότερο σύστημα από απλούστερα είναι απαραίτητη η διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων με κατάλληλους δίαυλους επικοινωνίας. Η είσοδος του συνολικού συστήματος θα πρέπει να τροφοδοτηθεί στους κανόνες απόδοσης τιμής και να επιβάλλει τις επιθυμητές τιμές εξόδου. Η είσοδος, όμως, σε ένα σύνθετο σύστημα δε συνδέεται άμεσα με την έξοδο. Θα πρέπει να μετασηματισθεί σε κατάλληλες εισόδους κατάλληλων υποσυστημάτων και μετά από πολλά τέτοια βήματα να καταλήξει να σημαίνει την επιβολή της εξόδου.

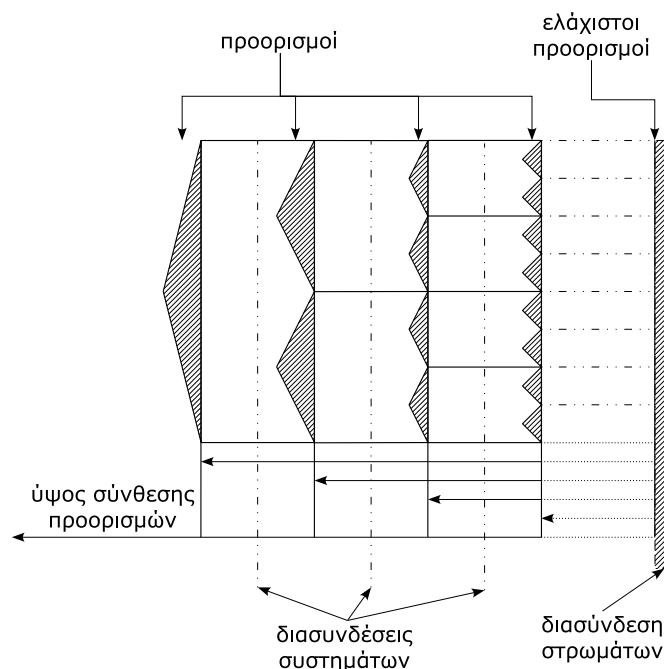
Η εσωτερική διασύνδεση των υποσυστημάτων μπορεί να πάρει πολλές μορφές ανάλογα το πώς εσωτερικά θα σηματοδοτούνται το ποιες πράξεις πρέπει να εκτελεστούν και το πώς θα αναπαρίστανται τα δεδομένα που χρειάζονται οι πράξεις αυτές, καθώς η ροή της λειτουργίας κατευθύνεται προς τα συστήματα των οποίων η έξοδος συνθέτει την έξοδο του συνολικού συστήματος.

Η ροή αυτή ξεκινά από την είσοδο και καταλήγει στην έξοδο μετά από σειρές πράξεων. Οι **προορισμοί** κατά μήκος αυτής της ροής με τελικούς προορισμούς την έξοδο, είναι οι περιοχές του χώρου που υπόκεινται στις πράξεις. Η έξοδος των προηγούμενων υποσυστημάτων γίνεται είσοδος στα επόμενα. Αυτή η είσοδος υποχρεώνει το επόμενο υποσύστημα να δώσει μια συγκεκριμένη έξοδο που θα κατευθύνει τη ροή σύμφωνα με την πρόθεση. Ουσιαστικά, το προηγούμενο σύστημα ονοματίζει την κατεύθυνση κατά την οποία πρέπει να κινηθεί η ροή και το επόμενο σύστημα τη δέχεται σαν εντολή. Αυτό το όνομα αποτελεί **αναφορά προορισμού** καθώς τον διακρίνει από τους υπόλοιπους πιθανούς Ως πράξη, η αναφορά είναι η ενέργεια της κατάλληλης τροφοδότησης της εισόδου του επόμενου υποσυστήματος όπως επιτάσσει η πρόθεση. Το πώς θα χαρακτηριστεί μια πράξη ως πράξη αναφοράς, ή μια έξοδος/είσοδος ως προορισμός ή αναφορά εξαρτάται από το ποιο θα οριστεί υποκείμενο και ποια θα οριστεί ως πρόθεσή του.

Οι αναφορές και οι προορισμοί έχουν την ίδια αντικειμενική υπόσταση, είναι περιοχές του χώρου. Η διαφοροποίηση έγκειται στη σημασιολογία που αποδίδεται στις περιοχές αυτές. Η αναφορά είναι μια περιοχή της οποίας η τιμή θα υποδείξει σε κάποιο σύστημα ένα επιθυμητό αποτέλεσμα, ως μέρος της εισόδου του. Επομένως το νόημα μιας αναφοράς δε μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητα με την πηγή της και τον προορισμό της. Προορισμός είναι μια περιοχή η οποία αποτελεί μέρος ενός επιθυμητού αποτελέσματος, όντας η έξοδος ενός συστήματος που το υλοποιεί. Καθώς τα συστήματα συντίθενται μεταξύ τους και σχηματίζονται λειτουργικές ροές κατά μήκος των διασυνδέσεων των εξόδων με εισόδους, οι περιοχές μπορούν να χαρακτηρισθούν είτε ως αναφορές, είτε ως προορισμοί, ανάλογα το είδος της σημασίας τους που μελετάται.

Οι προορισμοί αποτελούν περιοχές του χώρου που είναι αντικείμενα των ενεργειών των πράξεων. Η συνθεσιμότητα επιτρέπει την αποδόμηση μιας πολύπλοκης πράξης πάνω σε μια περιοχή, σε ένα σύνολο απλούστερων πράξεων σε επιμέρους προορισμούς. Οι αναφορές εξειδικεύονται αντίστοιχα, έτσι ώστε να αντιστοιχεί μία αναφορά σε ένα προορισμό. Άλλωστε, η ουσία της αναφοράς είναι να διαχωρίσει τους προορισμούς μεταξύ τους, ονοματίζοντάς τους. Η ιεράρχηση των προορισμών και των αναφορών τους κατά μήκος των ροών λειτουργίας ενός σύνθετου συστήματος ακολουθεί την ιεράρχηση που προκύπτει από τη συνθεσιμότητα. Για τους προορισμούς, το επίπεδο αναφοράς θα θεωρηθεί αυτό των **ελάχιστων** προορισμών εξόδου, δηλαδή των προορισμών στην περιοχή εξόδου που δεν μπορούν να αποσυντεθούν σε μικρότερους. Με τη σύνθεση των προορισμών από τους ελάχιστους σε ολοένα και συνθετότερους η ιεραρχική απόσταση από το επίπεδο αναφοράς αυξάνεται. Η απόσταση αυτή θα αναφέρεται ως το **ύψος σύνθεσης προορισμού**. Η πρόθεση που σχετίζεται με ένα σύστημα παρέχει ήδη μια αναφορά στην έξοδό του. Επομένως, η ιεράρχηση των αναφορών αρχίζει από τη μοναδιαία αναφορά του προορισμού πρόθεσης

και εξειδικεύεται καθώς προκύπτει η ανάγκη αναφοράς σε υποπροορισμούς. Η ιεραρχική απόσταση των εξειδικευμένων αναφορών από τη μοναδιαία αναφορά θα καλείται **βάθος εξειδίκευσης αναφοράς** ή **αναφορικό βάθος**.

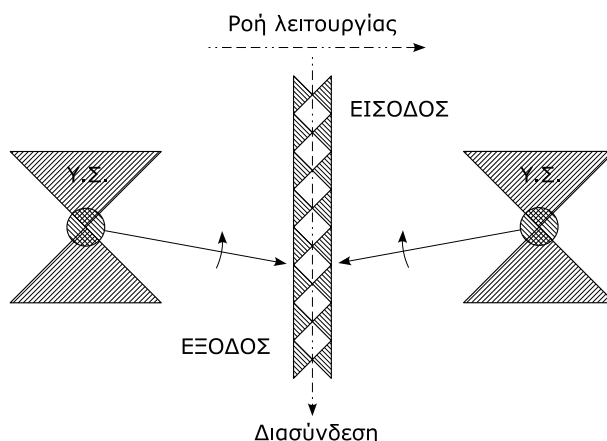


Σχήμα 2.1: Προορισμοί

### 2.1.5 Σημασιολογία και Πρόθεση

Στο χώρο που θεωρήθηκε αρχικά τοποθετήθηκαν συστήματα που αλληλεπιδρούν σχηματίζοντας ολοένα και συνθετότερα συστήματα. Πολλά όμοια συστήματα αναλαμβάνουν διαφορετικούς ρόλους, ενώ ένα σύστημα μπορεί να αποδομηθεί με πολλούς τρόπους σε υποσυστήματα. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον προκύπτει το πρόβλημα της οριοθέτησης των περιοχών και των συστημάτων με τρόπο που έχει νόημα. Η είσοδος των συστημάτων αποτελεί μια ολότητα η οποία κατακερματίζεται ιεραρχικά για να υλοποιηθεί ο μετασχηματισμός της στην επιθυμητή έξοδο, η οποία επίσης αποτελεί μια ολότητα. Το κοινό χαρακτηριστικό των τμημάτων ή των εκφάνσεων της επιθυμητής εξόδου είναι η πρόθεση, η οποία όντας μοναδιαία, ορίζει τους τελικούς προορισμούς σαν ενιαία οντότητα. Η είσοδος, που αποτελεί αναφορά των τελικών προορισμών, αποκτά ενιαία σημασία μέσω της σύνδεσης με την έξοδο και κατά συνέπεια την πρόθεση. Όταν κάποιος κληθεί να επέμβει σε ή να δημιουργήσει συστήματα, θα πρέπει να γνωρίζει τα όρια των συστημάτων, τη σημασία των εξόδων τους ως αναφορές και τις περιοχές των προορισμών που αποτελούν

σημασιολογικές ολότητες. Διαφορετικά, δε θα είναι δυνατή η σωστή διασύνδεση των νέων συστημάτων με το περιβάλλον τους και επομένως η λειτουργία τους θα αποτυγχάνει.

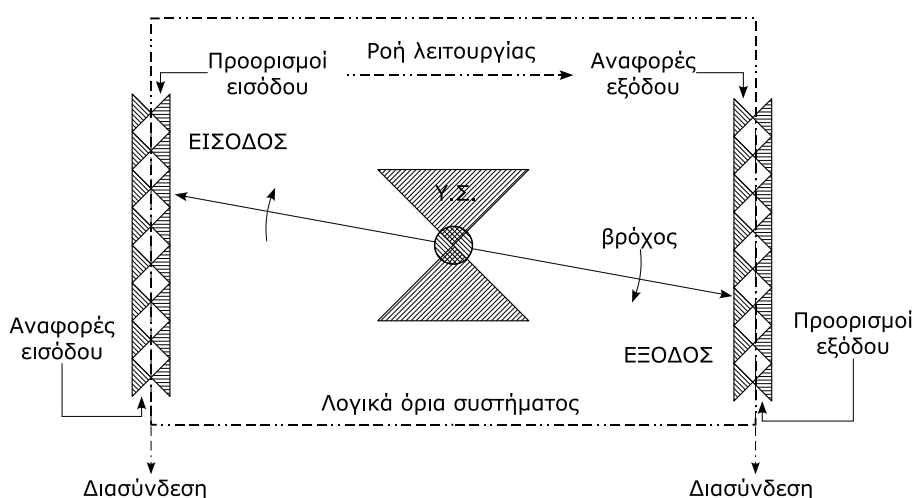


Σχήμα 2.2: Διασύνδεση συστημάτων

Συνεπώς, η σημασιολογία του περιβάλλοντος, καθώς και κάθε συστήματος υπό εξέταση, διαμορφώνεται από την πρόθεση που θα θεωρηθεί. Συχνά, η εμπειρία και η γνώση επιτρέπει την εξαγωγή της πραγματικής πρόθεσης από τη μελέτη του χώρου χωρίς η πρόθεση να είναι από πριν γνωστή, αλλά γενικά η πρόθεση που σχετίζεται με ένα σύστημα θεωρείται κοινωνικό δεδομένο. Σημαντικό μέρος του σχεδιασμού ενός σύνθετου συστήματος είναι ο ορισμός της σημασίας κάθε αναφοράς και κάθε προορισμού έτσι ώστε τα υποσυστήματα να μπορέσουν να διατηρήσουν το διακριτό ρόλο μέσα στο σύστημα τον οποίο προορίζονται να αναλάβουν.

Διαδεδομένη αρχή σχεδιασμού είναι ακριβώς αυτή η απομόνωση των επιπέδων και των κατευθύνσεων της εξειδίκευσης. Κάθε προκύπτον **στρώμα** διατηρεί τη δική του σημασιολογία τόσο στις αναφορές που δέχεται ως είσοδο, όσο και στις αναφορές που παράγει στους προορισμούς της εξόδου του. Έτσι η ανάπτυξη των υποσυστημάτων μπορεί να γίνει ξεχωριστά, ενώ η απομόνωση διασφαλίζει τη διατήρηση της σημασιολογίας των υποσυστημάτων όταν συντεθούν σε ένα υπερσύστημα. Αυτό το σχήμα της **διαστρωμάτωσης** απαιτεί τον κατάλληλο επιμερισμό της πρόθεσης σε υποπροθέσεις που θα καθοδηγήσουν τη λειτουργία των ροών μέσα στο σύστημα έτσι ώστε να συντεθεί τελικά το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ο επιμερισμός της πρόθεσης δεν είναι δεδομένος. Αντιθέτως, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα σχεδιασμού καθώς μπορεί να εισάγει σημασιολογικές αποκλίσεις στη λειτουργία των συστημάτων. Πέρα από την ορθότητα, όταν συμπεριληφθεί και το κόστος στην αξιολόγηση του συστήματος, ένας μη βέλτιστος επιμερισμός της πρόθεσης θα παράγει μη βέλτιστη λειτουργία ακόμη και στην περίπτωση που όλα τα υποσυστήματα θεωρηθούν ιδανικά. Αυτή η απώλεια μπορεί να εντοπιστεί ακόμη και στην είσοδο, αν εκείνη δεν αποτελεί βέλτιστη αναφορά του πραγματικού προορισμού που υποδεικνύει η πρόθεση.



Σχήμα 2.3: Διασυνδεδεμένο σύστημα

## 2.2 Αναφορική Οργάνωση Συστήματος

### 2.2.1 Αναφορικό Βάθος Συστήματος

Κάθε υποσύστημα ενός συνθετότερου συστήματος αποτελεί ένα κόμβο στη ροή της λειτουργίας του τελευταίου, συνδεδεμένο με την είσοδό του προς την πλευρά της γενικής εισόδου και με την έξοδό του προς την πλευρά της γενικής εξόδου. Κάθε κόμβος υπολογίζει την είσοδο των επόμενων κόμβων στη ροή. Εφόσον η είσοδος και η έξοδος σημασιολογικά αντιστοιχούν σε αναφορά και προορισμό, η καθολική λειτουργία του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί ως διαδικασία ιεραρχικής αποδόμησης της αναφοράς εισόδου σε επιμέρους αναφορές οι οποίες δίνουν εντολή στα υποσυστήματα που συνθέτουν την έξοδο να την θέσουν στην επιθυμητή κατάσταση. Δηλαδή το πρόβλημα του σχεδιασμού της λειτουργίας ενός συστήματος ανάγεται στον προσδιορισμό των ονομάτων των επιμέρους προορισμών που συνθέτουν την επιθυμητή έξοδο.

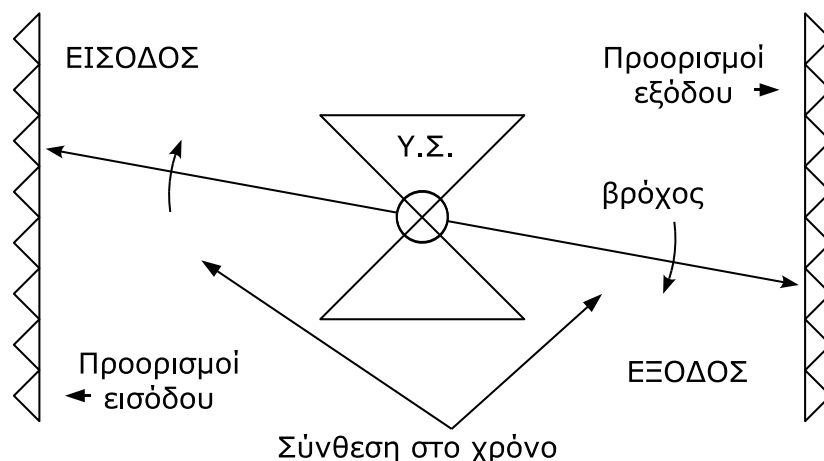
Δεδομένων των βασικών δομικών υποσυστημάτων που θα συνθέσουν την έξοδο, η κατασκευή και διαχείριση αναφορών είναι μέλημα ιδιαίτερης βαρύτητας. Στο λογισμικό περιβάλλον του προγραμματισμού των ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων κυριαρχούν εξ' ολοκλήρου οι αναφορές, είτε με τη μορφή αναπαραστάσεων εξωτερικών δεδομένων, είτε με τη συμβολική κωδικοποίηση εντολών και σημάτων για επικοινωνία. Με αξιοποίηση της συνθετικότητας, κάθε κόμβος στο σύστημα επιμερίζει την αναφορά στην είσοδό του σε αναφορές για την είσοδο των επόμενων κόμβων στη ροή. Στη συνέχεια παραδίδει τις αναφορές είτε με σειριακό τρόπο κατανεμημένο στο χρόνο, είτε παράλληλα κατανεμημένο στο χώρο. Με μια αντίστροφη έννοια, οι ροές όπως διακλαδίζονται στο χρόνο (σειριακά) ή στο χώρο (παράλληλα), αντίστοιχα μπορούν και να συντεθούν σειριακά ή παράλληλα. Η διακλάδωση στο χώρο (παράλληλη εκτέλεση των πράξεων) αυξάνει το κόστος του

χώρου αλλά μειώνει το κόστος του χρόνου. Το αντίστροφο ισχύει για τη διακλάδωση στο χρόνο (κάλυψη των προορισμών με σειριακή επανάληψη). Σύμφωνα με την αρχή της διαστρωμάτωσης, οι αναφορές έχουν αυστηρά μία κατεύθυνση και από τη στιγμή που διασχίζουν τα όρια των στρωμάτων χάνονται από τον έλεγχο του προηγούμενου στρώματος και αποτελούν αξιωματική (μη διαπραγματεύσιμη) είσοδο στο επόμενο.

Οι αναφορές των προορισμών θα πρέπει να εξειδικευθούν στο βάθος όπου θα συναντήσουν το ύψος των προορισμών που θα συνθέσουν την έξοδο. Η είσοδος αποτελείται από προορισμούς που η πρόσβασή τους είναι απαραίτητη για τον καθορισμό της εξόδου. Στη διαδικασία της εξειδίκευσης των αναφορών συμμετέχουν επομένως και οι προορισμοί εισόδου, ισοδύναμα με κάθε άλλο έμμεσο ή τελικό προορισμό.

Το βάθος των αναφορών (και επομένως το ύψος και το πλήθος των αναφερόμενων προορισμών) που κάθε στρώμα διατηρεί υπό τον έλεγχό του πριν τις παραδώσει στο επόμενο στρώμα ορίζει την ιεραρχική απόσταση της μοναδιαίας αναφοράς εισόδου με τις αναφορές εξόδου. Οι απόσταση αυτή θα οριστεί ως το **αναφορικό βάθος** διαστρωμάτωσης ενός συστήματος είναι βασική παράμετρος του σχεδιασμού και επηρεάζει τόσο τη σημασιολογία όσο και την επίδοση.

Η σημασιολογία επηρεάζεται άμεσα καθώς η εστίαση του αναφορικού βάθους καθορίζει τα όρια μεταξύ των στρωμάτων και χωρίζει το σύστημα σε αυτόνομα υποσυστήματα. Η διαστρωμάτωση αυτή με τη σειρά της προσδιορίζει τις συνθετικές δυνατότητες του συστήματος (modularity).



Σχήμα 2.4: Λειτουργική ροή διαμέσου ενός υπολογιστικού συστήματος

Εισάγοντας και την παράμετρο του κόστους των πράξεων που εφαρμόζονται στους προορισμούς, το αναφορικό βάθος επηρεάζει την απόδοση του συστήματος σε σχέση με τη βέλτιστη επίδοση που θα μπορούσε να έχει σε δεδομένες συνθήκες. Το πλήθος των αναφορών που ένα υποσύστημα παραδίδει στους επόμενους κόμβους της ροής, αυξάνει με το βάθος και αποτελεί ένα ελάχιστο όριο του αριθμού των πράξεων που θα εκτελεστούν

από το επόμενο στρώμα, αφού κάθε αναφορά αποτελεί είσοδο και δεν είναι δυνατόν να αγνοηθεί μια είσοδος.

Επομένως, το ύψος των υποχρεωτικά προσπελαστέων προορισμών που καθορίζει το βάθος των αναφορών πρέπει να αντιστοιχεί στο ύψος με τη βέλτιστη επίδοση, ή σε σημείο υψηλότερο από το βέλτιστο, γιατί τότε ένας νέος κύκλος αναφορών μπορεί να εστιάσει βαθύτερα, μέχρι να επιτευχθεί το βέλτιστο. Δεδομένου ενός βάθους δε γίνεται οπισθοδρόμηση χωρίς να παραβιαστεί η αρχή της διαστρωμάτωσης. Για αυτό, ένα σύστημα που επιθυμεί να διατηρήσει πλήρη έλεγχο στις αναφορές και το βάθος του θα πρέπει να είναι περιορισμένο εντός του ίδιου στρώματος. Δεδομένης μιας βαθύτερης της βέλτιστης **εστίασης των αναφορών**, η καλύτερη λύση είναι η οπισθοδρόμηση. Σε πολλές περιπτώσεις άλλωστε, οι συνθήκες είναι τέτοιες έτσι ώστε το ύψος των προορισμών της εισόδου επιβάλλει την εξειδίκευση των αναφορών σε σημείο ήδη βαθύτερο του βέλτιστου. Συχνά, η διαστρωμάτωση περιλαμβάνει **ευέλικτες διασυνδέσεις** που επιτρέπουν τη δυναμική αυξομείωση του βάθους των αναφορών.

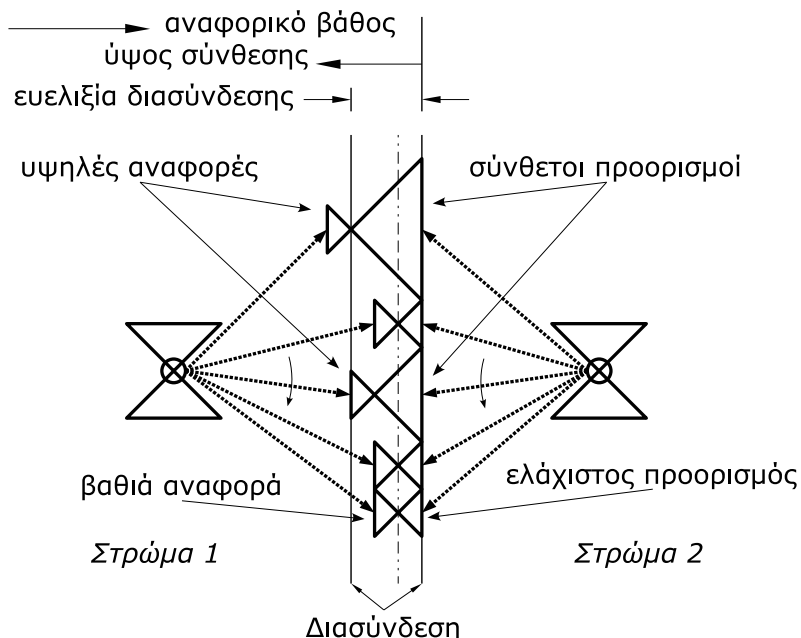
Το γενικό συμπέρασμα, τελικά, είναι ότι οι αναφορές θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερες, όσο το βέλτιστο βάθος παραμένει άγνωστο, ενώ όταν το βέλτιστο είναι γνωστό θα πρέπει να εστιαστούν αμέσως σε αυτό. Το σύνολο των προορισμών που αντιστοιχούν στο βέλτιστο βάθος θα ονομάζονται **βέλτιστοι προορισμοί** ή **προορισμοί μοναδιαίας απόδοσης** και το ύψος τους, **βέλτιστο ύψος**. Πρακτικά, το σύνολο των βέλτιστων προορισμών είναι το σύνολο των προορισμών η προσπέλαση (ή επεξεργασία) του οποίου δε μπορεί να γίνει γρηγορότερα, άρα καθορίζει και το μοναδιαίο κόστος με το οποίο θα εκφράζεται η πολυπλοκότητα της λειτουργίας του συστήματος και θα εκτιμάται η απόδοσή του. Ένας προορισμός μπορεί να καθίσταται βέλτιστος όχι λόγω κάποιας εγγενούς του ιδιότητας, αλλά επειδή λόγω των συνθηκών δεν είναι δυνατή η σύνθεση ή αποσύνθεσή του σε κάποιον αποδοτικότερο.

Οι προορισμοί που μεταδίδονται ή προσπελούνται σε ένα χρονικό βήμα θα καλούνται **μοναδιαίοι προορισμοί**. Οι αναφορές προορισμών αποτελούν και αυτές προορισμούς και αντίστοιχα, μια αναφορά που μεταδίδεται σε ένα χρονικό βήμα θα καλείται **μοναδιαία αναφορά**. Οι προορισμοί που δεν μπορούν να αποσυντεθούν θα καλούνται **ελάχιστοι προορισμοί**, και οι αναφορές που δε μπορούν να εξειδικευθούν θα καλούνται **ελάχιστες αναφορές**.

### 2.2.2 Το παράδειγμα του Γραφείου Διανομής Αλληλογραφίας

Για να διευκολυνθεί η σύνδεση των όρων και των εννοιών που χρησιμοποιούνται στο υπό παρουσίαση μοντέλο με γνώριμα νοήματα και καταστάσεις, σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα από την καθημερινότητα, που αποτελεί λειτουργικό ανάλογο ενός ενδεικτικού συστήματος όπως έχει ήδη περιγραφεί.

Έστω ο οργανισμός Όμικρον που στεγάζεται σε ένα κτιριακό σύμπλεγμα στην οδό Ίωνος, αριθμό 9. Το κτιριακό σύμπλεγμα στεγάζει το χώρο απασχόλησης των εργαζομένων του σε τομείς, ορόφους και γραφεία, και διαθέτει κοινό γραμματοκιβώτιο για όλο το



Σχήμα 2.5: Αναφορική οργάνωση ενός υπολογιστικού συστήματος

σύμπλεγμα. Το **Γραφείο Διανομής Αλληλογραφίας** είναι υπεύθυνο για την εσωτερική διανομή της αλληλογραφίας που φθάνει στο κτιριακό γραμματοκιβώτιο που στεγάζεται στον ίδιο χώρο. Το Γραφείο απασχολεί 2 άτομα, τον Δρομολογητή και τον Διανομέα. Ο ρόλος του **Δρομολογητή** είναι να σημειώνει πάνω στους φακέλους της αλληλογραφίας τη διεύθυνση όπου απασχολείται ο παραλήπτης, βάσει των καταλόγων του προσωπικού. Ο ρόλος του **Διανομέα** είναι να παραδίδει τις επιστολές αλληλογραφίας στο γραφείο που έχει σημειώσει πάνω τους ο Δρομολογητής.

Το Γραφείο Διανομής θα θεωρηθεί ως το υποκείμενο σύστημα, με απλή ροή λειτουργίας διαμέσου των υποσυστημάτων του Δρομολογητή και του Διανομέα. Είσοδος του συστήματος είναι η είσοδος του Δρομολογητή, οι επιστολές με τιμή τον παραλήπτη τους. Έξοδος του συστήματος είναι η έξοδος του Διανομέα, οι επιστολές με τιμή τη γραμματοθυρίδα του γραφείου του παραλήπτη. Η πρόθεση που σχετίζεται με το ρόλο του Γραφείου Διανομής είναι η παράδοση κάθε εισερχόμενης επιστολής στον παραλήπτη της.

Η πρόθεση αυτή, δεδομένων των συνθηκών, υλοποιείται με την εκτέλεση της πράξης της παράδοσης των επιστολών που βρίσκονται στο κτιριακό γραμματοκιβώτιο στις γραμματοθυρίδες των γραφείων όπου απασχολούνται οι παραλήπτες τους. Η πράξη αυτή δεν είναι, προφανώς, άμεσα εκτελέσιμη. Για αυτό το λόγο αποσυντίθεται σε 2 υποπράξεις, τη δρομολόγηση και τη διανομή. Την εκτέλεση κάθε φάσης στη ροή αναλαμβάνει το ανάλογο υποσύστημα, δηλαδή αντίστοιχα, ο Δρομολογητής και ο Διανομέας.



Η διασύνδεση των συστημάτων γίνεται μέσω της εσωτερικής διευθυνσιοδότησης που σημειώνει ο δρομολογητής πάνω στους φακέλους. Οι σημειώσεις αυτές αποτελούν την τιμή των προορισμών εξόδου για τον δρομολογητή και αναφορά εισόδου για τον διανομέα. Δηλαδή ο ρόλος του δρομολογητή είναι να υποδείξει στον διανομέα τους προορισμούς του μέσω των αναφορών που του παραδίδει στην είσοδό του.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται η βασική αστοχία της αναφορικής οργάνωσης των συστημάτων που υπονομεύει την επίδοσή τους, με παραδείγματα. Δύο κατηγορίες βελτιστοποίησης θα ορισθούν και θα απασχολήσουν. Ουσιαστικά το πρόβλημα είναι το ίδιο: οι αναφορές καταλήγουν να υποχρεώνουν το σύστημα σε πράξεις που κοστίζουν συνολικά περισσότερο από αυτές μιας βέλτιστης υλοποίησης. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο περιπτώσεων γίνεται με βάση την προέλευση του πλεονάζοντος κόστους. Η **βελτιστοποίηση κόστους** επιτίθεται στο πλεονάζων κόστος το οποίο προέρχεται από την αναφορά σε μη βέλτιστους προορισμούς, δηλαδή από τη μη αποδοτική χρήση των υποσυστημάτων που θα εκτελέσουν τις πράξεις που θα συνθέσουν την έξοδο. Η **αναφορική βελτιστοποίηση** επιτίθεται στο το πλεονάζων κόστος που προέρχεται από τη μη βέλτιστη αναφορά των προορισμών, δηλαδή πολλαπλή αναφορά σε ισοδύναμους προορισμούς, ή αναφορά προορισμών που δε συμμετέχουν στην έξοδο.

Η αναφορική βελτιστοποίηση θα αποτελέσει και το κύριο αντικείμενο της υπόλοιπης εργασίας, στην προσπάθεια της θεμελίωσης ενός αρχιτεκτονικού πλαισίου για την βελτιστοποίηση υπολογιστικών συστημάτων, που θα επιτρέψει ταυτόχρονα και τη θεωρητική μελέτη του θέματος αλλά και την πρακτική εφαρμογή των αποτελεσμάτων σε πραγματικές συνθήκες.

### 2.2.3 Βελτιστοποίηση Κόστους

Ο **αναφορικός κορεσμός** παρατηρείται όταν το αναφορικό βάθος είναι μεγαλύτερο από αυτό των βέλτιστων προορισμών. Τότε ο πλεονάζων κατακερματισμός των προορισμών που επιβάλλεται από το αναφορικό βάθος υποχρεώνει το σύστημα σε λειτουργία μειωμένης απόδοσης. Η μειωμένη απόδοση οφείλεται στη μη εκμετάλλευση του παραλληλισμού που μπορεί να συνθέσει τους υποπροορισμούς σε βέλτιστο προορισμό. Ο λόγος για το πλεονάζων βάθος των αναφορών συνήθως σχετίζεται με τη σημασιολογική μονάδα προορισμού στο θεωρητικό μοντέλο στο οποίο βασίστηκε ο σχεδιασμός του συστήματος. Σπανιότερα, το πλεονάζων βάθος προκύπτει από εγγενείς ιδιότητες της εισόδου, ή από το βέλτιστο βάθος σε προηγούμενο βήμα της ροής λειτουργίας. Η αντιμετώπιση του κορεσμού είναι σχετικά απλή και έγκειται κυρίως στο να ρυθμιστεί κατάλληλα το βάθος των αναφορών. Η κυριότερη δυσκολία σε ένα σωστά δομημένο σύστημα θα έπρεπε να είναι η αναγνώριση του βέλτιστου βάθους.

Αν και το συχνότερο ελάττωμα είναι ο κορεσμός των αναφορών, συναντάται και το αντίστροφο πρόβλημα, η **αναφορική ανεπάρκεια**. Το αναμενόμενο είναι ότι με την αύξηση του ύψους σύνθεσης των προορισμών ο παραλληλισμός θα αυξήσει την απόδοση. Ακόμη κι αν δεν είναι υλοποιήσιμος, οι υψηλότεροι προορισμοί μπορούν να συντεθούν με

νέο αναφορικό κύκλο σε βαθύτερους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όμως, η απόκριση των συστημάτων σε αύξηση του ύψους μπορεί να είναι διαφορετική. Τα δυναμικά συστήματα δεν μπορούν να γνωρίζουν τις συνθήκες εκ των προτέρων και λόγω της δυναμικότητάς τους η χωρητικότητά τους έχει ένα όριο. Όταν με κάποιο τρόπο, αυτά τα δυναμικά συστήματα υπερφορτωθούν, τότε η αποδοτικότητά τους χάνεται. Έτσι προκύπτει το πρόβλημα της αναφορικής ανεπάρκειας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου δυναμικού συστήματος είναι οι λανθάνουσες μνήμες.

Στο παράδειγμα του Γραφείου Διανομής Αλληλογραφίας, στη διασύνδεση μεταξύ του δρομολογητή και του διανομέα, ο αναφορικός κορεσμός θα μπορούσε να προκύψει ως εξής: Ο ελάχιστος προορισμός του δρομολογητή είναι 1 (ένας) φάκελος. Άρα η βαθύτερη αναφορά που μπορεί να παραδώσει στον διανομέα είναι αυτή του 1 (ενός) φακέλου. Ο τελικός προορισμός όμως δεν έχει τις διαστάσεις ενός φακέλου αλλά πολλών, καθώς η εισερχόμενη αλληλογραφία περιλαμβάνει πολλούς φακέλους. Ο δρομολογητής συνθέτει στο χρόνο τον συνολικό προορισμό από τους μοναδιαίους προορισμούς του. Αν μοναδιαίος προορισμός (δηλαδή, προορισμός που παραδίδεται σε 1 χρονικό βήμα) επιλεγεί ο ελάχιστος, τότε ο διανομέας θα παραλαμβάνει 1 φάκελο κάθε φορά, θα τον διανέμει και θα επιστρέφει για νέα παραλαβή.

Σε αυτήν την περίπτωση είναι προφανές ότι σπαταλάται πολύς χρόνος και το σύστημα του διανομέα λειτουργεί με πολύ χαμηλή απόδοση. Το βάθος των αναφορών είναι μεγαλύτερο από το βάθος των βέλτιστων προορισμών. Το βάθος των βέλτιστων προορισμών θα μπορούσε να καθορίζεται από το πόσους φακέλους μπορεί να χειριστεί ο διανομέας, για παράδειγμα 10. Με 10 φακέλους ανά κύκλο, μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν 10πλάσια επίδοση καθώς ο χρόνος της διαδρομής του διανομέα είναι περίπου ίδιος για 1 και για 10 φακέλους.

Το σύστημα του δρομολογητή αποτυγχάνει να χρησιμοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες του διανομέα και ενώ στο παράδειγμα η αστοχία είναι προφανής, σε πολύπλοκα συστήματα όπου δεν υπάρχει γνώση της συνολικής αρχιτεκτονικής και του τρόπου λειτουργίας των υποσυστημάτων, ο αναφορικός κορεσμός είναι πολύ συχνός.

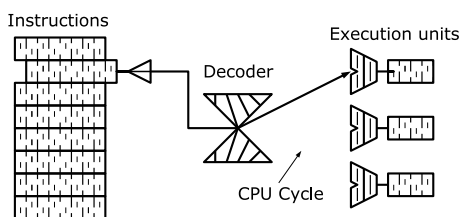
Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα αναφορικού κορεσμού και οι τεχνικές για την αντιμετώπισή τους.

<b>Αναφορικός Κορεσμός</b>		
<b>Χώρος</b>	<b>Αιτία</b>	<b>Αντιμετώπιση</b>
δικτυακή σύνδεση	καθυστέρηση	buffering (sockets)
δικτυακό πρωτόκολλο	καθυστέρηση	windowing (TCP)
πρόσβαση system (bus)	καθυστέρηση	bursts
CPU's	υποεκμετάλλευση υλικού	superscalar design
superscalar CPU's	αδρανής δέσμευση πόρων	register renaming
πολλαπλασιασμός πινάκων	υποεκμετάλλευση cache	tiling

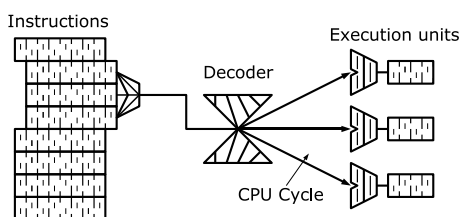
Πίνακας 2.1: Παραδείγματα αντιμετώπισης αναφορικού κορεσμού.

Για τον αναφορικό κορεσμό υπάρχει πάντοτε η λύση της οπισθοδρόμησης στην ιεραρχία από μέρους του συστήματος που πλήττεται (πχ. του διανομέα) εάν η διασύνδεση της εισόδου του επιτρέπει να ζητήσει τον επόμενο κύκλο. Έτσι μπορεί να συνθέσει τους προορισμούς στο χρόνο (buffering). Αν και μη συνολικά βέλτιστη, αυτή η τεχνική είναι αρκετή για να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του συστήματος.

Ένα τυπικό παράδειγμα αναφορικού κορεσμού είναι η υποεκμετάλλευση των μονάδων εκτέλεσης των επεξεργαστών, που οδήγησε στην τώρα δεδομένη αρχιτεκτονική πολλαπλής ομοχειρίας (multiple pipeline, superscalar design). Η περίπτωση είναι απλή. Ο επεξεργαστής, στην περίπτωση της μίας ομοχειρίας αναφέρει τις εντολές προς εκτέλεση σε βάθος της μίας εντολής καθώς συνθέτει στο χρόνο το συνολικό προορισμό που είναι το σύνολο των εκτελεστέων εντολών. Όμως βάσει των δυνατοτήτων του υλικού και των ιδιοτήτων της αρχιτεκτονικής, η εξειδίκευση των αναφορών θα έπρεπε να σταματήσει στο βάθος των τριών εντολών. Βέβαια, οι προορισμοί της αναφοράς εισόδου τοποθετούνται στο ύψος της μιας εντολής, επομένως αυτές θα πρέπει να συντεθούν σε ύψος των τριών εντολών πριν παραδοθούν στις ομοχειρίες.



Σχήμα 2.6: Τροφοδότηση μόνης ομοχειρίας



Σχήμα 2.7: Τροφοδότηση πολλαπλής ομοχειρίας

Όσον αφορά την αναφορική ανεπάρκεια, το ανάλογο στο παράδειγμα του Γραφείου Διανομής, θα ήταν ο δρομολογητής να παραδίδει στον διανομέα περισσότερους φακέλους από όσους μπορεί να κρατήσει καλά ενώ κινείται γρήγορα. Το σύστημα του διανομέα παρουσιάζει δυναμική συμπεριφορά καθώς έχει την ευελιξία προσαρμόζεται σε διαφορετικούς αριθμούς φακέλων. Αυτή η ευελιξία, η οποία είναι θετική για την απόδοση του συστήματος, έχει και τα όρια της λειτουργίας της. Εάν ο διανομέας κρατούσε ένα κουτί, τότε ο δρομολογητής θα ήταν σχεδιασμένος να υπακούει τα όρια. Η ευελιξία πολλές φορές θεωρείται ότι είναι αρκετή για την πλειοψηφία των περιπτώσεων.

Η λύση της αναφορικής ανεπάρκειας είναι ακόμη απλούστερη από του κορεσμού, καθώς απλά απαιτείται ένας νέος κύκλος αναφορών για να αποσυντεθούν οι προορισμοί σε διαχειρίσιμο βάθος. Συχνά ένα ολόκληρο υποσύστημα είναι διασυνδεδεμένο στη ροή και αυξάνει το αναφορικό βάθος και πιθανόν η καλύτερη λύση είναι παράκαμψή του.

<b>Αναφορική Ανεπάρκεια</b>		
<b>Χώρος</b>	<b>Αιτία</b>	<b>Αντιμετώπιση</b>
πρόσβαση περιφερειακών συσκευών	overhead	DMA
streaming memory access	optimization overhead	cache bypass
ταχέα δίκτυα	κόστος κλήσης Λ.Σ.	OS-bypass

Πίνακας 2.2: Παραδείγματα αντιμετώπισης αναφορικής ανεπάρκειας.

Γενικά, η χαρακτηριστικότερη ένδειξη του αναφορικού κορεσμού είναι η υποεκμετάλλευση δυνατοτήτων, ενώ για την αναφορική ανεπάρκεια είναι η πέρα των ορίων αύξηση του λειτουργικού κόστους της ιεραρχίας.

#### 2.2.4 Αναφορική Βελτιστοποίηση

Η **αναφορική βελτιστοποίηση** διαφοροποιείται από την βελτιστοποίηση κόστους στο ότι η αναζήτηση του βέλτιστου βάθους αναφορών λαμβάνει υπόψη και τη δυναμική σημασιολογία του συστήματος που προκύπτει από τα δεδομένα. Η διαδικασία της εξειδίκευσης των αναφορών είναι μια ουσιαστικά δυναμική διαδικασία που αρχίζει με τη θεώρηση της αναφοράς εισόδου και την υπολογισμένη εξειδίκευσή της που θα εκδώσει τις αναφορές που απαιτούνται για τη σύνθεση του τελικού προορισμού από τους επιμέρους.

Επειδή η είσοδος δεν είναι γνωστή τη στιγμή του σχεδιασμού, είναι κοινή πρακτική να θεωρείται μια στατική επεξεργασία της έτσι ώστε οποιαδήποτε και να είναι το σύστημα να μπορεί να τη χειριστεί. Δεδομένης της εισόδου, όμως, οι προορισμοί της θα μπορούσαν να θεωρηθούν στατικά χαρακτηριστικά του συστήματος και το κυριότερο, όσοι από αυτούς είναι ισοδύναμοι, θα μπορούσαν να τύχουν ενιαίας μεταχείρισης.

Αλλά με μια στατική επεξεργασία μιας δυναμικής εισόδου, η δυνατότητα της ενιαίας μεταχείρισης των προορισμών της χάνεται. Για αυτό το λόγο, πολλά συστήματα διατηρούν ένα ευέλικτο σχεδιασμό των διασυνδέσεών τους έτσι ώστε Το ύψος των αναφερόμενων προορισμών να είναι και αυτό δεδομένο της εισόδου. Η αναφορική βελτιστοποίηση, ως διαδικασία είναι πολυπλοκότερη από τη βελτιστοποίηση κόστους καθώς περιλαμβάνει την υλοποίηση ενός δυναμικού συστήματος πρόσβασης τιμών. Επίσης είναι πιο δυσδιάκριτη η ανάγκη της καθώς το βέλτιστο ύψος των προορισμών είναι άγνωστο αν δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι δυναμικές συνθήκες. Επομένως δεν υπάρχει άμεσο μέτρο σύγκρισης της απόδοσης ενός μη αναφορικά βελτιστοποιημένου συστήματος. Η ανάγκη αυτή, όμως, τονίζεται χαρακτηριστικά καθώς κλιμακώνονται οι διαστάσεις του συστήματος και τα κέρδη από τη βελτιστοποίηση αρχίζουν και ξεπερνούν πολλές τάξεις μεγέθους το κόστος της υλοποίησής της.

Στο παράδειγμα του Γραφείου Διανομής Αλληλογραφίας μια περίπτωση αναφορικής βελτιστοποίησης θα ήταν το εξής: Ας θεωρηθεί ότι ο δρομολογητής αναφέρει 10 φακέλους στον διανομέα για παράδοση. Ας θεωρηθεί επίσης ότι οι 10 φάκελοι είναι σύνολο βέλτιστων προορισμών καθώς επιτρέπουν την εύκολη και ακούραστη κίνηση του διανομέα καθώς και τον εύκολο και γρήγορο χειρισμό τους κατά την παράδοση στις θυρίδες. Φαίνεται πώς αυτό το σχήμα της διανομής είναι βέλτιστο. Εδώ έγκειται και η δυσκολία του προβλήματος του πλεονασμού, καθώς ο βέλτιστος προορισμός μας είναι άγνωστος. Έχουμε ήδη βελτιστοποιήσει την απόδοση βάσει των γνωστών παραμέτρων αλλά αυτό δε σημαίνει ότι το σύστημα δε μπορεί να έχει ακόμη καλύτερες επιδόσεις.

Για παράδειγμα, αν οι 10 φάκελοι περιέχουν από ένα αντίγραφο της ίδιας ανακοίνωσης και προορίζονται σε 10 διαφορετικά γραφεία, τότε γίνεται φανερό ότι θα μπορούσε το σύστημα να αποδώσει καλύτερα. Αν κάθε θυρίδα είχε μια ειδική είσοδο από όπου θα κρατούσε αντίγραφο του παραδιδόμενου εγγράφου ενώ το ίδιο θα το επέστρεφε, ο διανομέας θα μπορούσε να κάνει κάνει ισοδύναμη διανομή των 10 φακέλων κρατώντας μόνο ένα χαρτί. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσε να κάνει σε 1 κύκλο ως και 10πλάσιες διανομές.

Στην καθημερινή ενασχόληση με τον προγραμματισμό συστημάτων, η βελτιστοποίηση κόστους θεωρείται απαραίτητη για ένα σύστημα που σέβεται την επίδοσή του. Η ανάγκη της αναφορικής βελτιστοποίησης παραμένει κρυμμένη πίσω από τη δυναμική σημασιολογία των περιστάσεων, την οποία τα συστήματα συνηθίζουν να αντιμετωπίζουν ως σκοτεινά, άγνωστα δεδομένα. Σιωπηλά, το κόστος του πλεονασμού που εμφανίζεται δυναμικά θεωρείται αναγκαίο και η αναφορική βελτιστοποίηση δε περιλαμβάνεται τόσο συχνά ως παράμετρος στο σχεδιασμό συστημάτων.

Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται παραδείγματα αναφορικής βελτιστοποίησης με σύνθεση προορισμών.

<i>Αναφορική Βελτιστοποίηση</i>		
<b>Χώρος</b>	<b>Αιτία</b>	<b>Αντιμετώπιση</b>
πρόσβαση (μνήμης, ...)	τοπικότητα της αναφοράς	cached
πρόσβαση Ε/Ε (I/O)	επικαλυπτόμενες προσβάσεις	write combining
δυναμικός προγραμματισμός	επαναχρησιμοποιήσιμα αποτελέσματα	memoization
βάσεις δεδομένων	μεταφορά πλεοναζόντων δεδομένων	semi-join
λειτουργικά συστήματα	εκτέλεση πλεοναζόντων αντιγραφών	zero-copy
ΔΣ: δημιουργία διεργασιών	δημιουργία αδρανούς περιεχομένου	copy-on-write

Πίνακας 2.3: Παραδείγματα αναφορικής βελτιστοποίησης.

### 2.2.5 Δυναμική Σημασιολογία

Η αναφορική βελτιστοποίηση, πέρα από το κόστος της υλοποίησής της και της εξάρτησής της από τα δεδομένα, περιορίζεται και από άλλον έναν παράγοντα. Όταν ένα σύστημα βελτιστοποιείται αναφορικά, αυτό προϋποθέτει την αλλαγή της διασύνδεσης στην

είσοδό του, που επιβάλλει και την αναφορική βελτιστοποίηση της εξόδου του προηγούμενου συστήματος. Ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση, όταν η ροή περιλαμβάνει δεκάδες συστήματα μέχρι την έξοδο, η σύνθεση των δεδομένων σε ένα σημείο της δεν είναι αρκετή για να επηρεάσει την απόδοση. Λογικό είναι ότι αν τα συστήματα, ανακαλύπτουν στην είσοδό τους την ομοιογένεια των δεδομένων αλλά δεν την επικοινωνούν στην έξοδό τους, οι βέλτιστοι προορισμοί θα συντίθεται ξανά και ξανά χωρίς νόημα.

Επομένως, η αναφορική βελτιστοποίηση θα πρέπει να λαμβάνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερες διαστάσεις. Αυτό φαίνεται να δημιουργεί παραβίαση της αρχής της διαστρωμάτωσης. Η διακίνηση δεδομένων μεταξύ συστημάτων με δρομολόγηση μέσω τρίτων υπακούει τυπικά στην αρχή της διαστρωμάτωσης, όπως φαίνεται και στην σχετική ιεραρχία των δικτυακών στρωμάτων. Το να μπορεί κάθε στρώμα να διαχειρίζεται τα δεδομένα που δεν του ανήκουν στα πλαίσια της βελτιστοποίησης είναι κάτι που υπονομεύει τόσο το σχεδιασμό όσο και την απλότητα της σύνθεσης.

Παρόλα αυτά η αναφορική βελτιστοποίηση *δεν απαιτεί γνώση της σημασίας* ή διαχείριση δεδομένων που δεν ανήκουν στο στρώμα. Το στρώμα που αναλαμβάνει τη διακίνηση δεδομένων, όμως, *έχει δικαίωμα στη γνώση και τη διαχείριση της ποσότητας της πληροφορίας* των δεδομένων υπ' ευθύνη του.

Το πρόβλημα που προκύπτει αμέσως είναι το πώς μπορεί να απομονωθεί η πληροφορία της ποσότητας της πληροφορίας από την πληροφορία της σημασιολογίας των δεδομένων. Η απάντηση δίνεται από τη θεωρία πληροφορίας. Ήδη έχει θεωρηθεί ότι ο βασικός τρόπος αναφοράς δεδομένων ενός χώρου είναι η διευθυνσιοδότησή τους με βάση τη διάταξή τους. Η ακριβής διάταξη αυτή, όμως, θεωρείται αυθαίρετη: δε θα δοθεί σημασία στο ποιο γραφείο θα έχει ποιον αριθμό, αρκεί όλα να έχουν διαφορετικό. Ήδη αυτή η πολλαπλότητα των επιλογών καταδεικνύει την ύπαρξη αναφορικού πλεονασμού. Η αυθαίρετη αυτή διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κωδικοποίηση της ποσότητας της πληροφορίας που περιέχεται, χωρίς να απαιτείται καμία γνώση της σημασιολογίας της. Για παράδειγμα, μπορεί κάποιος να μην γνωρίζει τη σημασιολογία του τριψήφιου αριθμού τηλεφώνου 911, αλλά μπορεί να είναι βέβαιος ότι προορίζεται για συχνή και εύκολη πρόσβαση. Με τον ίδιο τρόπο λειτουργεί η συμπίεση δεδομένων.

Στο επόμενο κεφάλαιο, με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε και με κεντρικό στόχο την αναφορική βελτιστοποίηση, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός εργαλείου για την ευέλικτη ιεραρχική αναφορά δεδομένων και της διαχείρισης των τιμών τους.

# Κεφάλαιο 3

## Χωροκράτορας: αναφορά δεδομένων και διαχείριση τιμών

### 3.1 Σημειολογία

Σύνολα  $A, B, C, T, G$

Τα σύνολα θα συμβολίζονται με κεφαλαία καλλιγραφικά στοιχεία.

Δυναμοσύνολο του  $S$

Το σύνολο όλων των υποσυνόλων του  $S$  θα συμβολίζεται με  $\mathcal{P}(S) \equiv 2^S$

Συναρτήσεις  $A(a), B(a), T(a), f(x), g(x)$

Οι συναρτήσεις θα συμβολίζονται με ορθά κεφαλαία στοιχεία εάν δεν είναι ορισμένες στους ακεραίους ή πραγματικούς, διαφορετικά θα χρησιμοποιούνται τα συμβατικά σύμβολα  $f, g, \dots$

#### Λογικές πράξεις

$a \wedge b$ :  $a$  και  $b$ .

$a \vee b$ :  $a$  ή  $b$  ή και τα δύο.

$a \oplus b$ : ή  $a$  ή  $b$  αλλά όχι και τα δύο.

$\neg a$ : όχι  $a$ .

#### Διατακτικές σχέσεις

μερική διάταξη είναι μια ιεραρχική διάταξη. Δύο στοιχεία για τα οποία δεν ορίζεται σχετική σχέση στην ιεραρχία (πχ. στο ίδιο επίπεδο ή σε διαφορετικές υπο-ιεραρχίες),

θα καλούνται *μη ιεραρχικά συσχετισμένα* ή θα λέγεται ότι *δε συνδέονται ιεραρχικά*. Αντίστοιχες είναι και οι εκφράσεις για τις ιδιότητες των υπολοίπων ζευγών.

**ολική διάταξη** είναι μια γραμμική διάταξη. Μια ολική διάταξη είναι ταυτόχρονα και μερική.

$$a \preceq_r b \leftrightarrow (a, b) \in r$$

Το στοιχείο  $a$  βρίσκεται χαμηλότερα ή στο ίδιο σημείο με το  $b$  στην ιεραρχία που ορίζει η μερική διάταξη  $r$  ( $\preceq_r$ ).

$$a \prec_r b \leftrightarrow (a, b) \in r$$

Το στοιχείο  $a$  βρίσκεται αυστηρά χαμηλότερα από το  $b$  στην ιεραρχία που ορίζει η μερική διάταξη  $r$  ( $\preceq_r$ ).

$$a \leq_t b$$

Το στοιχείο  $a$  είναι μικρότερο ή ίσο με το  $b$  στην ανισοτική σχέση που ορίζει η ολική διάταξη  $t$  ( $\leq_t$ ).

$$a \leq_t b$$

Το στοιχείο  $a$  είναι αυστηρά μικρότερο από το  $b$  στην ανισοτική σχέση που ορίζει η ολική διάταξη  $t$  ( $\leq_t$ ).

$$(a \succ_r b) \leftrightarrow (a \preceq_r b) \vee (b \preceq_r a)$$

Τα στοιχεία  $a, b$  συνδέονται ιεραρχικά μέσω της μερικής διάταξης  $\preceq_r$ .

$$(a \vdash_r b) \leftrightarrow (a \prec_r b) \wedge (\nexists c (a \prec_r c \prec_r b))$$

Το στοιχείο  $a$  είναι άμεσος πρόγονος (πατέρας) του  $b$  στην ιεραρχία που ορίζεται από τη μερική διάταξη  $\preceq_r$ .

$$(a \dashv_r b) \leftrightarrow (b \vdash_r a) \quad \text{Το στοιχείο } a \text{ είναι άμεσος απόγονος (παιδί) του } b \text{ στην ιεραρχία που ορίζεται από τη μερική διάταξη } \preceq_r$$

Όροι που χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά ή ορίζονται από τα συμφραζόμενα θα γράφονται με *έντονη πλάγια γραφή*.

## 3.2 Διευθυνσιοδότηση Δεδομένων

Με τη συλλογιστική αφετηρία του ότι κάθε εφαρμογή διαχειρίζεται ένα σύνολο δεδομένων, το *Χώρο Δεδομένων* της, και ότι για τη διαχείρισή τους απαιτείται ένας τρόπος αναφοράς στα δεδομένα, θα παρουσιαστεί ένα θεωρητικό μοντέλο αναφοράς δεδομένων και διαχείρισης των τιμών τους.



### 3.2.1 Αναφορές, Ονόματα, Διευθύνσεις και Προορισμοί

Το σύνολο των δεδομένων που απασχολεί (πχ. στα πλαίσια μιας εφαρμογής) αποτελεί το *Χώρο Δεδομένων*. Ο χώρος δεδομένων θα θεωρείται διατεταγμένος και οποιαδήποτε διαμέριση αυτού θα παράγει ειδικότερους χώρους δεδομένων. Κάθε δεδομένο που έχει ανεξάρτητη υπόσταση, που μπορεί να λάβει τιμή διαφορετική από τα άλλα δεδομένα, απαιτεί και τη δική του ανεξάρτητη αναφορά, ένα τρόπο αναφοράς σε αυτό και μόνο σε αυτό. Οι μεθοδολογίες που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια βασίζονται σε αυτές τις δύο ιδιότητες, τη διάταξη του χώρου δεδομένων και την συνθεσιμότητά του. Για παράδειγμα, έστω μια ομάδα ανθρώπων που υπάρχει μόνο ένα όνομα για αυτούς,

*"Ομάδα X".*

Δεν είναι δυνατή η ανεξάρτητη αναφορά στον καθένα. Δε μπορεί, δηλαδή, να διατυπωθεί ερώτηση για μια ιδιότητα κάποιου συγκεκριμένου ατόμου,

π.χ. *"Τί μέταλλα έχει ο X;"*

ούτε μπορεί να διατυπωθεί εντολή απόδοσης μιας ιδιότητας σε κάποιον συγκεκριμένο,

π.χ. *"Να αποδοθεί μέταλλο στον X."*

Πάντοτε προκύπτει η αναπάντητη ερώτηση

*"Σε ποιόν από όλους τους X αναφέρεται η πρόταση;"*

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού της αναφοράς θα πρέπει να αποδοθεί ένα μοναδικό όνομα στον αναφερόμενο, το οποίο θα γίνει κατανοητό από τον παραλήπτη της αναφοράς. Για να επιτευχθεί αυτό, θα χρειαστεί επίκληση σε εγγενείς και μοναδικές ιδιότητες του ατόμου όπως η εμφάνισή του ή η θέση του στο χώρο (π.χ. *"ο ψηλότερος"*, *"ο τρίτος από αριστερά"*). Ας σημειωθεί ότι σε ένα περιβάλλον όπου μπορεί να υπάρξει επικοινωνία μεταξύ όλων, αρκεί ο καθένας να γνωρίζει μόνο το όνομά του και να απαντάει σε όλες τις αναφορές σε αυτόν για να μπορέσει να οποιοσδήποτε να αναφερθεί σε οποιονδήποτε.

Τα ονόματα των δεδομένων, συνεπώς, είναι οι οντότητες που παρέχουν τη δυνατότητα αναφοράς σε αυτά και τις τιμές τους. Τα ονόματα μπορεί να μην περιέχουν καθόλου πληροφορία σχετικά με αυτό στο οποίο αναφέρονται (*κύρια ονόματα*). Όπως, όμως, στην περίπτωση της Ομάδας X, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η αντιστοιχία των ιδιοτήτων των ονομάτων και των δεδομένων για να αντιστοιχηθούν μεταξύ τους. Αυτά τα ονόματα που συστηματοποιούν την αναφορά, είναι γνωστά ως διευθύνσεις και η διαδικασία ονοματοδότησης, *διευθυνσιοδότηση*.

Στα πλαίσια του προγραμματισμού υπολογιστικών συστημάτων και της επικοινωνίας μεταξύ τους, τα ονόματα που αντιστοιχίζονται στα δεδομένα συμφέρει να έχουν τη μορφή διευθύνσεων για να μπορεί να αναχθεί η διαχείρισή τους σε λειτουργίες που τα υπολογιστικά συστήματα μπορούν εγγενώς να εκτελέσουν.

Σύμφωνα με τη μέχρι τώρα παρουσίαση, τα δεδομένα μπορούν να θεωρηθούν ως ζεύγη αναφορών και τιμών. Αν θεωρηθεί επιπλέον ότι η μόνη εγγενής ιδιότητα ενός δεδομένου είναι η θέση του σε κάποιο χώρο, κάθε δεδομένο αποκτά ένα εγγενές όνομα – τη θέση του στο χώρο αυτό, καθώς και διαχειρίσιμη τιμή. Στην περίπτωση που τα δεδομένα δεν

έχουν καμία αξιοποιήσιμη εγγενή ιδιότητα, μπορεί να τους δοθεί αυθαίρετα η επιθυμητή ιδιότητα αναφοράς, από την οποία θα προκύψει και η διευθυνσιοδότησή τους. Στον προγραμματισμό των υπολογιστικών συστημάτων, αυτή η διαδικασία είναι δυνατή και μάλιστα απαραίτητη για την μοντελοποίηση και λειτουργική υλοποίηση πραγματικών ή νοητικών συστημάτων.

Τελικά, τα δεδομένα θα θεωρούνται ανεξάρτητες οντότητες με εγγενή ιδιότητά τους τη θέση τους σε ένα χώρο και διαχειρίσιμη τιμή. Η αναφορά σε αυτά θα γίνεται μέσω της αντιστοίχισης των ιδιοτήτων των θέσεων τους με ιδιότητες διευθύνσεων (δηλαδή, με αντιστοίχιση των τοπολογιών τους).

Στο παράδειγμα με την *Ομάδα X*, αν επιπλέον δοθεί όνομα σε κάθε μέλος της (π.χ. *X1*, *X2*, ...) ανάλογα με τη θέση τους σε ένα χώρο, παρατηρούμε τα εξής:

- Με ένα μόνο όνομα (π.χ. "*X*") μπορεί να γίνει αναφορά σε πολλές οντότητες. Μπορούν να δημιουργηθούν κι άλλα τέτοια ονόματα, όπως "*X1 μέχρι X11*", "*Οι μελαχρινές της X*", "*Όποιοι της X προσφέρονται*".
- Για την αναφορά σε πολλές οντότητες, όταν αυτές δεν έχουν αξιοποιήσιμες κοινές εγγενείς ιδιότητες ώστε να προκύψει κοινό όνομα, απαιτούνται πολλαπλά ονόματα όπως "*X1 και X2 και X7 και X10 και X11*".

Ωστόσο, η πρόθεση του αναφέροντα μπορεί να είναι κοινή για όλα τα αναφερόμενα δεδομένα σε κάθε περίπτωση, είτε αυτά είναι ένα ή πολλά, ή έχουν ένα ή πολλά ονόματα. Με σημείο αναφοράς την πρόθεση του αναφέροντα, μία αναφορά θα καλείται **μοναδιαία αναφορά** όταν περιέχει μόνο ένα όνομα, διαφορετικά θα καλείται **πολλαπλή αναφορά**.

Αντίστοιχα, ο προορισμός της αναφοράς θα καλείται **μοναδιαίος προορισμός** όταν η αναφερόμενη οντότητα είναι μία, διαφορετικά θα καλείται **πολλαπλός προορισμός** ή **σύνθετος προορισμός**.

Για παράδειγμα, στην πρόταση

"Οι 3 παλαιότεροι να πάρουν τα εργαλεία τους και να με ακολουθήσουν".

"Οι 3 παλαιότεροι" είναι μια μοναδιαία αναφορά σε 3 προορισμούς, "να με ακολουθήσουν" είναι η πράξη πρόθεσης και "τα εργαλεία τους" αποτελεί μοναδιαία αναφορά πολλαπλών σύνθετων προορισμών, καθώς ο καθένας έχει τα εργαλεία του και τα εργαλεία του καθενός είναι προσβάσιμα όλα μαζί στη θήκη τους.

Όπως συζητήθηκε, είναι δυνατόν μέσω προγραμματισμού να μετατραπούν όλες οι αναφορές και οι προορισμοί σε μοναδιαία αντίστοιχα. Μια τέτοια διαδικασία απλοποιεί τον παραπέρα προγραμματισμό αλλά δε μειώνει κατ' ανάγκην το υπολογιστικό κόστος. Ίδανικά, η συγχώνευση αναφορών και προορισμών πρέπει να γίνει με βάση εγγενείς ιδιότητες του χώρου των δεδομένων, έτσι ώστε η υλοποίησή τους να μη βαραίνει το υπολογιστικό σύστημα. Τέτοιες ιδιότητες είναι οι ιδιότητες των αριθμών ή ιδιότητες που ήδη έχουν υλοποιηθεί οπότε δεν υπεισέρχεται νέο κόστος υλοποίησης.

### 3.2.2 Χώρος Διευθύνσεων

Οι μοναδιαίοι προορισμοί, δηλαδή τα υποσύνολα του χώρου διευθύνσεων που αποκτούν το δικό τους όνομα, θα καλούνται **Τοποθεσίες Δεδομένων**. Αντιστοιχίζοντας ονόματα σε όλες τις τοποθεσίες δεδομένων που το απαιτούν προκύπτει το απαραίτητο σύστημα αναφοράς των δεδομένων. Η αντιστοιχία αυτή πρέπει να είναι 1 προς 1 για επιτευχθεί η ισοδυναμία του ονόματος και της τοποθεσίας όπου αυτό αναφέρεται.

Οι διευθυνσιοδοτήσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τις ιδιότητες του χώρου που εκμεταλλεύονται.

- **Επίπεδες.** Αυτή είναι η απλούστερη μορφή διευθυνσιοδότησης με μοναδική ιδιότητα του χώρου, την ολική διάταξη των θέσεων σε αυτόν.
- **Ιεραρχικές.** Αυτή η κατηγορία απαιτεί μια μερική διάταξη στο χώρο, που αποτελεί την ιεραρχία. Από εκεί και πέρα οι υπόλοιπες ιδιότητες καθορίζουν την ακριβή δομή της.
- **Δομημένες.** Με αυτήν την κατηγορία θα αντιπροσωπευθούν οι γενικές περιπτώσεις διευθυνσιοδότησης, βάσει πολύπλοκων δομών στο χώρο. Με αυτήν την έννοια και η κατηγορία των ιεραρχικών είναι δομημένες.

Αφού η μόνη εγγενής ιδιότητα που θεωρούμε είναι η ολική διάταξη του χώρου, με την εισαγωγή ενός ιεραρχικού συστήματος ονοματοδότησης επιτυγχάνεται επεκτάσιμη (scalable) οργάνωση των δεδομένων και απλοποίηση της αναφοράς σε τοπικό επίπεδο. Σε ένα τέτοιο σύστημα ονοματίζονται γενικότερες τοποθεσίες που αναδρομικά περιέχουν άλλες ειδικότερες. Το πλήρες όνομα μιας τοποθεσίας σχηματίζεται με την παράθεση των ονομάτων όλων των γενικότερων τοποθεσιών που την περιέχουν (συμπεριλαμβανομένου, στο τέλος, του εαυτού της). Επειδή πρέπει να διατηρηθεί η 1 προς 1 αντιστοίχιση ονομάτων και τοποθεσιών, απαιτείται για οποιοσδήποτε 2 τοποθεσίες, είτε να περιέχει η μία την άλλη είτε να είναι ξένες μεταξύ τους. Μια τέτοια ονοματολογία, αποτελεί ένα σύστημα διευθυνσιοδότησης, ακριβώς με την έννοια της διευθυνσιοδότησης των αστικών κατοικιών στους δρόμους, στις πόλεις, στις επαρχίες, και τελικά στις χώρες όπου αυτές βρίσκονται.

Το σύνολο των ονομάτων των τοποθεσιών θα ονομάζεται **Χώρος Διευθύνσεων** πάνω στο χώρο των δεδομένων και κάθε στοιχείο του χώρου αυτού, **Διεύθυνση**. Τυπικά ορίζονται:

**Ορισμός 3.2.1 (Χώρος Διευθύνσεων).** Έστω το σύνολο δεδομένων  $\mathcal{D}$  ως χώρος δεδομένων. Ορίζεται μια τοποθεσία  $t$ :

$$t \subseteq \mathcal{D} \quad (3.1)$$

Έστω σύνολο  $\mathcal{A}$  και μια μερική διάταξη του,  $\prec_D$ . Με μια 1 - 1 συνάρτηση διευθυνσιοδότησης  $A : \mathcal{A} \rightarrow 2^{\mathcal{D}}$ , το  $\mathcal{A}$  ορίζεται ως **Χώρος Διευθύνσεων** πάνω στο  $\mathcal{D}$ :

$$(a \prec_D b) \leftrightarrow (A(a) \subseteq A(b)) \quad , \quad \exists (a_M \in \mathcal{A}) (A(a_M) = \mathcal{D}) \quad (3.2)$$

Επειδή ο όρος "διεύθυνση" μπορεί έμμεσα να παραπέμπει σε μια επίπεδη διευθυνσιοδότηση (πχ. της μνήμης των υπολογιστών) θα χρησιμοποιείται ο όρος **Χωροδιεύθυνση** για τα στοιχεία του εγγενώς ιεραρχικού χώρου διευθύνσεων  $\mathcal{A}$ .

Το στοιχείο  $a_M$  θα καλείται **Μέγιστο** του  $\mathcal{A}$ .

Η μερική διάταξη  $\prec_D$  του  $\mathcal{A}$ , που το καθιστά χώρο διευθύνσεων, θα καλείται **μερική διάταξη διευθυνσιοδότησης**.

**Ορισμός 3.2.2 (Υποχώρος Χώρου Διευθύνσεων).** Από τον ορισμό προκύπτει ότι οποιοδήποτε υποσύνολο του  $\mathcal{A}$  τέτοιο ώστε:

$$\mathcal{A}_T = \{a \in \mathcal{A} : a \leq a_T \in \mathcal{A}\} \quad (3.3)$$

είναι επίσης χώρος διευθύνσεων, πάνω στο  $\mathcal{D}_T = A[\mathcal{A}_T]$ , με μέγιστο στοιχείο το  $a_T$ .

Το  $\mathcal{A}_T$  θα καλείται **Υποχώρος** του χώρου διευθύνσεων  $\mathcal{A}$ .

Ορίζεται επίσης η **συνάρτηση υποχώρου** που δίνει τον υποχώρο που ορίζει ένα μέγιστο στοιχείο  $a_T$ :

$$A_T(a_T) = \mathcal{A}_T \quad (3.4)$$

**Ορισμός 3.2.3 (Βάση Χώρου Διευθύνσεων).** Έστω χώρος διευθύνσεων  $\mathcal{A}$ . Το σύνολο των ελάχιστων στοιχείων του  $\mathcal{A}$  σύμφωνα με τη μερική διάταξη διευθυνσιοδότησής του θα καλείται **Βάση  $\mathcal{B}$  του Χώρου Διευθύνσεων  $\mathcal{A}$** :

$$\mathcal{B} = \left\{ b \in \mathcal{A} : \nexists (a \in \mathcal{A}) \left( (a \leq b) \wedge (a \neq b) \right) \right\} \quad (3.5)$$

Ορίζεται επίσης η **συνάρτηση βάσης** που δίνει τη βάση ενός χώρου διευθύνσεων:

$$B(\mathcal{A}_T) = \mathcal{B}_T, \quad \text{όπου } \mathcal{A}_T \text{ υποχώρος του } \mathcal{A} \text{ και } \mathcal{B}_T \text{ η βάση του } \mathcal{A}_T. \quad (3.6)$$

Από τους ορισμούς ισχύει ότι η βάση ενός υποχώρου με μέγιστο  $a_T$  ισοδυναμεί με την τοποθεσία των δεδομένων του  $a_T$ :

$$A(B(A_T(a_T))) = A(B(\mathcal{A}_T)) = A(a_T) \quad (3.7)$$

Θα χρησιμοποιούνται ισοδύναμα οι συμβολισμοί  $B(a_T) \equiv B(A(a_T))$ .

Από τους ορισμούς ισχύει επίσης ότι η βάση μιας χωροδιεύθυνσης περιέχει τις βάσεις όλων των χωροδιευθύνσεων που περιέχει:

$$\forall (a \preceq_T a_T) B(a) \subseteq B(a_T) \quad (3.8)$$

### 3.2.3 Απόδοση Τιμής σε Χώρο Δεδομένων

Τα δεδομένα έχουν κάποια τιμή, η οποία πρέπει να είναι ανακτήσιμη και τροποποιήσιμη. Οι λειτουργίες της ανάκτησης και τροποποίησης εκτελούνται αφού εντοπισθεί η θέση τους μέσω της διεύθυνσής τους. Στην περίπτωση της επίπεδης διευθυνσιοδότησης είναι ευθέως εκτελέσιμες αυτές οι λειτουργίες. Ένας δομημένος χώρος διευθύνσεων χρειάζεται και έναν τρόπο απόδοσης τιμής σε κάθε σημείο του χώρου δεδομένων. Σε ένα ιεραρχικό χώρο διευθύνσεων, όπου κάθε διεύθυνση αποτελεί έγκυρη αναφορά σε δεδομένα, οι διευθύνσεις περιέχουν πολλές θέσεις ταυτόχρονα και κάποιες ίδιες θέσεις μπορούν να αναφερθούν από πολλές διευθύνσεις. Με την τυπική έννοια της διευθυνσιοδότησης, κάθε αναφορά που δεν αντιστοιχεί σε άμεσα προσβάσιμη θέση δεδομένων προωθείται προς τα κάτω στην ιεραρχία μέχρι να φθάσει σε μοναδιαίους προορισμούς.

Έστω ο χώρος δεδομένων  $\mathcal{D}$ . Η *τιμή του χώρου δεδομένων* είναι η συγκεκριμένη κατάσταση  $v$  στην οποία βρίσκεται ο χώρος σε σχέση με το σύνολο  $\mathcal{V}_{\mathcal{D}}$  όλων των πιθανών καταστάσεων. Ας οριστεί μια συνάρτηση  $H_{\mathcal{D}}$  με όρισμα το χώρο και τιμή την κατάστασή του:

$$H_{\mathcal{D}} : \{\mathcal{D}\} \rightarrow \mathcal{V}_{\mathcal{D}},$$

ή για συντομία  $H(\mathcal{D}) = v, \quad v \in \mathcal{V}_{\mathcal{D}}$  (3.9)

Αν θεωρηθεί η *σύνθεση χώρων* ως μια διάταξή τους, η συνάρτηση απόδοσης τιμής του νέου χώρου είναι:

$$H(\mathcal{AB}) = (H(\mathcal{A}), H(\mathcal{B})), \quad \mathcal{V}_{\mathcal{AB}} = \mathcal{V}_{\mathcal{A}} \times \mathcal{V}_{\mathcal{B}} \quad (3.10)$$

Επομένως, για την απόδοση τιμής σε ένα χώρο δεδομένων, αρκεί να διαταχθούν κάπως οι περιοχές του και να αποδοθούν τιμές σε αυτές. Για την αναπαράσταση δεδομένων και τιμών σε υπολογιστικά συστήματα, αφού αντιστοιχηθεί ο χώρος δεδομένων με ένα χώρο διευθύνσεων, ο χώρος διευθύνσεων παρέχει τη διάταξη που απαιτείται για την απόδοση τιμών.

## 3.3 Χώρος Διευθύνσεων Χωροκράτορα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η διευθυνσιοδότηση και το δένδρο του Χωροκράτορα, το οποίο διαχειρίζεται τις τιμές των δεδομένων ενός χώρου δεδομένων  $\mathcal{D}$ , βάσει του χώρου διευθύνσεων  $\mathcal{A}$ , όπως ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα (3.2), με μερικές επιπλέον παραδοχές.

### Ορισμός 3.3.1 (Χώρος Διευθύνσεων Χωροκράτορα).

Έστω  $A_{\chi}$  μια συνάρτηση διευθυνσιοδότησης από το χώρο διευθύνσεων  $A_{\chi}$  στο χώρο δεδομένων  $\mathcal{D}$ :

$$A_{\chi} : A_{\chi} \rightarrow \mathcal{D}$$

έτσι ώστε:

(i) Υπάρχει χωροδιεύθυνση  $a_M$  που περιλαμβάνει όλο το χώρο διευθύνσεων:

$$\exists(a_M \in \mathcal{A}_X) A_X(a_M) = \mathcal{D} \quad (3.11)$$

(ii) Υπάρχει μια μερική διάταξη (**ιεραρχική**)  $\preceq_T$  του  $\mathcal{A}_X$  που ισοδυναμεί με μια ιεράρχηση του  $\mathcal{D}$ :

$$\forall(a, b \in \mathcal{A}_X) (a \preceq_T b) \leftrightarrow (\mathcal{A}_X(a) \subseteq \mathcal{A}_X(b)) \quad (3.12)$$

(iii) (**μη επικάλυψη**) Για οποιοσδήποτε δύο χωροδιευθύνσεις, είτε η μία περιέχει την άλλη, είτε είναι ξένες μεταξύ τους. Ισοδύναμα, το σύνολο των χωροδιευθύνσεων που περιέχουν μια χωροδιεύθυνση είναι ολικά διατεταγμένο. Επίσης ισοδύναμα, κάθε δύο ιεραρχικά ασυσχέτιστες χωροδιευθύνσεις είναι ξένες μεταξύ τους:

$$\begin{aligned} & \forall(a, b \in \{c \in \mathcal{A}_X : c_0 \preceq_T c\}) (a \succ_T b) \\ & \quad \text{ή} \\ & \forall(a, b \in \mathcal{A}_X : a \not\preceq_T b) A(a) \cap A(b) = \emptyset \end{aligned} \quad (3.13)$$

(iv) Υπάρχει μια ολική διάταξη (**ψηφιακή**)  $\leq_L$  του  $\mathcal{A}_X$  με την ιδιότητα ότι δύο μη ιεραρχικά συσχετισμένες διευθύνσεις  $a_1, b_1$  κληροδοτούν τη σχετική τους θέση στην ολική διάταξη  $\leq_L$  σε όλα τα ζεύγη των διευθύνσεων που ιεραρχικά περιέχουν.

$$\forall\left((a_1 \not\preceq_T b_1) \wedge (a_0 \preceq_T a_1) \wedge (b_0 \preceq_T b_1)\right) (a_1 \leq_L b_1) \rightarrow (a_0 \leq_L b_0) \quad (3.14)$$

(v) Κάθε χωροδιεύθυνση του  $\mathcal{A}_X$  θεωρείται ότι έχει μοναδιαίο κόστος διαχείρισης δεδομένης κάποιας συνάρτησης κόστους  $C$ . Δηλαδή, κάθε χωροδιεύθυνση αποτελεί μοναδιαία αναφορά και μοναδιαίο προορισμό για τις πράξεις της διαχείρισης:

$$\forall(a \in \mathcal{A}_X) C(a) = 1 \quad (3.15)$$

Ο χώρος διευθύνσεων  $\mathcal{A}_X$  θα καλείται **Χώρος Διευθύνσεων Χωροκράτορα**.

### 3.3.1 Η ψηφιακή διάταξη

Η ψηφιακή διάταξη που απαιτείται από την (3.14) είναι η σημαντικότερη δομική ιδιότητα του  $\mathcal{A}_X$ . Ουσιαστικά του δίνει την μορφή ενός λεξικού, που δίνει τη δυνατότητα να είναι γνωστή από πριν η διαδρομή από έναν κόμβο σε έναν άλλον. Πρακτικά, η κατασκευή και η επαλήθευση ψηφιακών διατάξεων υποβοηθάται με την παρακάτω πρόταση.

**Πρόταση 3.3.2 (Κατασκευή ψηφιακής διάταξης).**

Σε χώρο διευθύνσεων  $\mathcal{A}_\chi$  ιεραρχημένο με τη διάταξη  $\preceq_T$  (3.12) και χωρίς επικαλύψεις ασυσχέτιστων χωροδιευθύνσεων (3.13),

αν για την ολική (γραμμική) διάταξη  $\leq_L$  του  $\mathcal{A}_\chi$  ισχύει ότι κάθε χωροδιεύθυνση διατάσσεται (οπουδήποτε) ανάμεσα στα παιδιά της (άμεσους απογόνους), τότε η διάταξη  $\leq_L$  ικανοποιεί την ψηφιακή ιδιότητα (3.14).

*Απόδειξη.* Αφού ο γονέας βρίσκεται διατεταγμένος ανάμεσα στα παιδιά του και τα παιδιά του με τη σειρά τους ανάμεσα στα παιδιά τους, κάθε διεύθυνση βρίσκεται ανάμεσα στη διάταξη της βάσης της. Έστω 2 ιεραρχικά ασυσχέτιστες διευθύνσεις  $a_1, b_1 \in \mathcal{A}_\chi$  : ( $a_1 \not\preceq_T b_1$ ) και 2 απόγονοί τους  $a_0 \preceq_T a_1, b_0 \preceq_T b_1$ . Η βάσεις των απογόνων περιέχονται στις βάσεις των προγόνων τους άρα οι απόγονοι βρίσκονται και αυτοί ανάμεσα στη διάταξη των βάσεων των προγόνων τους:

$$B(x_0) \subseteq B(x_1) \rightarrow x_0 \in B(x_1)$$

Έστω  $a_1 \leq_L b_1$  και  $a_M = \max B(a_1), b_m = \min B(b_1)$ . Τότε

$$a_1, a_0 \leq_L a_M \text{ και } b_m \leq_L b_1, b_0$$

αλλά  $a_1 \leq_L b_1$  άρα  $a_M \leq_L b_m$  κι επειδή οι βάσεις ασυσχέτιστων χωροδιευθύνσεων είναι ξένες μεταξύ τους (3.13),

$$a_1 \leq_L a_M <_L b_m \leq_L b_1$$

□

**3.3.2 Ψηφιοποίηση**

Σε ένα χώρο διευθύνσεων κατασκευασμένο με βάση την πρόταση 3.3.2, έστω μια χωροδιεύθυνση βάσης  $b \in B(a_T)$  και το σύνολο των χωροδιευθύνσεων που την περιέχουν:

$$\mathcal{G}_b = \{a \in \mathcal{A}_\chi : b \preceq_T a\}$$

Το σύνολο αυτό είναι ολικά διατεταγμένο (3.13) με τη σχέση ιεραρχίας. Άρα μπορούν να αριθμηθούν τα στοιχεία του:

$$G_b[i] \in \mathcal{G}_b, i \in \mathcal{N}, G_b[0] = a_T$$

αν οριστεί το σύνολο των αδερφών (κοινός γονέας) μιας χωροδιεύθυνσης

$$\mathcal{K}_a = \{x \in A(a_T) : a \vdash x\}$$

τότε αυτό είναι διατεταγμένο ψηφιακά και μπορεί να αριθμηθεί:

$$K_a[j] \in \mathcal{K}_a, j \in \mathcal{N}$$

Αν για κάθε πρόγονο  $g = G_b[i]$  του  $b$ ,  $b \preceq_T G_b[i]$  οριστεί

$$g = G_b[i] = K_g[j] \leftrightarrow d_{g,i} = j$$

τότε για κάθε χωροδιεύθυνση βάσης  $a \preceq_T g$  θα ισχύει

$$\forall (a \preceq_T g, i : g \preceq_T G_g[i]) G_a[i] = G_g[i], d_{a,i} = d_{g,i} \quad (3.16)$$

Δηλαδή όλοι οι απόγονοι της χωροδιεύθυνσης  $g$  έχουν την ίδια διάταξη  $d_{g,i}$  ανάμεσα στα αδέρφια του  $g$  και κάθε πρόγονού της. Δηλαδή τα στοιχεία  $d_{g,i}$  αποτελούν τα ψηφία που σχηματίζουν μια ψηφιολέξη που αναπαριστά τη διαδρομή από το  $a_T$  στο  $g$ . Αν ο αριθμός των παιδιών είναι το πολύ  $k$  για κάθε χωροδιεύθυνση στο  $\mathcal{A}_T$

$$\forall (a \in \mathcal{A}_T) |K_a| < k$$

τότε ο χώρος διευθύνσεων  $\mathcal{A}_T$  ψηφιοποιείται στο  $k$ -δικό σύστημα αρίθμησης με  $|\mathcal{G}_b|, b \in B(\mathcal{A}_T)$  ψηφία.

## 3.4 Απόδοση Τιμών στον Χωροκράτορα

Έστω χώρος δεδομένων  $\mathcal{D}$ . Τα στοιχεία του  $\mathcal{D}$  θεωρηθούν όμοια, δηλαδή με κοινό σύνολο τιμών:

$$d_i \in \mathcal{D}, H(d_i) = v_i \in \mathcal{V}, i = 0, 1, \dots, l-1 \quad (3.17)$$

Αν  $|\mathcal{V}| = 2$  και ειδικότερα  $\mathcal{V} = \{0, 1\}$ , ο χώρος  $\mathcal{D}$  δεν είναι τίποτε άλλο από μια διατεταγμένη ακολουθία με  $l$  bits. Τα προγραμματιζόμενα υπολογιστικά συστήματα διαχειρίζονται τέτοιους χώρους δεδομένων για να συνθέσουν τις αναπαραστάσεις των δεδομένων που επεξεργάζονται. Στους σύγχρονους ψηφιακούς υπολογιστές δίνεται πρόσβαση στην (φυσική) μνήμη τους με ένα τέτοιο μοντέλο, όπου  $d_i$  είναι μια ψηφιολέξη (cpu word) και  $|\mathcal{V}| = 2^{2^w}$ . Συνήθως είναι  $w = 3, \dots, 8$ . Τα προγράμματα διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη ευελιξία καθώς μπορούν να συνθέτουν και να διαχειρίζονται πολλαπλούς χώρους δεδομένων με αυθαίρετο μέγεθος στοιχείου  $|\mathcal{V}| = 2^{2^w}$ .

### 3.4.1 Το πρόβλημα της πλεονάζουσας πληροφορίας

Για ένα τυπικό πρόβλημα απόδοσης τιμών όπως στην (3.17), πρώτα διευθυνοδοτείται ο  $\mathcal{D}$ :

$$A : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{D}, A(i) = d_i, i \in \mathcal{A}, h(i) = H(A(i)) = v_i \quad (3.18)$$

Στη συνέχεια δεσμεύονται  $l$  τμήματα μνήμης μεγέθους  $|\mathcal{V}|$  τα οποία είναι προσβάσιμα μέσω της διάταξης του  $\mathcal{A}$ , και αποθηκεύονται οι τιμές  $v_i$ . Με αυτόν τον τρόπο δεσμεύονται  $l$  τμήματα μνήμης ανεξάρτητα από την τιμή των δεδομένων. Αν πολλά στοιχεία του  $\mathcal{D}$  έχουν



την ίδια τιμή, αποθηκεύεται πλεονάζουσα πληροφορία. Ο πλεονασμός αυτός μπορεί να ανέρχεται σε πολλές τάξεις μεγέθους, ανάλογα τη φύση των δεδομένων ή τη φύση των συνθηκών.

### 3.4.2 Το πρόβλημα της μαζικής διαχείρισης τιμών

Πέρα από τη γραμμική διάταξη του  $\mathcal{A}$  που αναγνωρίζει μοναδικά τα στοιχεία του  $\mathcal{D}$  και τις τιμές τους, η σημασιολογία των δεδομένων μπορεί να περιλαμβάνει και κάποια ιεράρχηση ή σύνθεση δεδομένων σε μεγαλύτερες μονάδες. Ένα παράδειγμα είναι ένας χώρος που περιλαμβάνει κανάλια επικοινωνίας (κάποιου είδους) προς διαχείριση. Εκτός από την ένα προς ένα αναφορά σε καθένα για ιδιωτικές υποθέσεις του, η πρόθεση της διαχειριστικής λογικής μπορεί να αναφέρεται ενιαία και σε σύνολα καναλιών. Η ομαδοποίηση αυτή γίνεται είτε βάσει στατικών χαρακτηριστικών, όπως ο κάτοχος χρήστης του καναλιού και ο δικτυακός προορισμός του, είτε βάσει δυναμικών χαρακτηριστικών, όπως η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το πρωτόκολλο και η κατάσταση των διαφόρων ουρών. Το πρόγραμμα παρόλο που χρειάζεται να αντιμετωπίσει πολλαπλά στοιχεία του χώρου δεδομένων ανεξάρτητα και με τον ίδιο τρόπο, είναι αναγκασμένο να τα προσπελάσει σειριακά.

### 3.4.3 Το πρόβλημα της επικοινωνίας μαζικών προορισμών

Στο ίδιο παράδειγμα με τη διαχείριση καναλιών επικοινωνίας, ας υποθεθεί ότι το πρόγραμμα διαχείρισης απαιτείται να προωθεί πληροφορίες από απομακρυσμένους κόμβους σε απομακρυσμένους κόμβους. Μια τέτοια περίπτωση θα ήταν η προώθηση εντολών κάποιου πρωτοκόλλου p2p ή η διακίνηση δεδομένων σε δίκτυο πολλαπλών προορισμών (multicast). Η πληροφορία για κάθε ζεύγος αποστολέα-παραλήπτη είναι ιδιωτική για το κάθε κανάλι. Στην περίπτωση, όμως, που είτε για σχεδιαστικούς είτε για συγκυριακούς λόγους συμπέσουν πολλές πανομοιότυπες πληροφορίες από πολλούς αποστολείς προς πολλούς αποδέκτες, το πρόγραμμα και πάλι θα πρέπει να διαχειριστεί και να διακινήσει σειριακά και ατομικά τα μηνύματα.

### 3.4.4 Το γενικό πρόβλημα της συνθεσιμότητας της αναφοράς

Στη γενική περίπτωση, ο βασικός περιορισμός ενός επίπεδου (γραμμικού) μοντέλου διευθυνσιοδότησης και απόδοσης τιμών είναι η αδυναμία του να συνθέτει κατά συνθήκη, μοναδιαίες αναφορές και μοναδιαίους προορισμούς που θα ανταποκρίνονται στις σημασιολογικές προθέσεις των προγραμμάτων για την αναφορά και την απόδοση τιμών στα δεδομένα τους. Προς αναζήτηση ενός ισχυρότερου μοντέλου, αναπτύχθηκε ένα σύστημα ιεραρχικής διευθυνσιοδότησης και ανάθεσης τιμών δεδομένων με την προσωνυμία *Χωροκράτορας*.

Σε αντίθεση με τις κλασικές ιεραρχικές δομές που αποτελούν ιδιωτική οργάνωση πάνω στη βασική κοινή επίπεδη διευθυνσιοδότηση, ο Χωροκράτορας στοχεύει σε ένα κοινό, ιεραρχικό και συνθέσιμο δομικό υπόστρωμα πάνω στο οποίο οι εφαρμογές θα υλοποιούν τη διαχείριση των δεδομένων τους.

### 3.4.5 Ανάθεση τιμών στο Χωροκράτορα

Η βασική αρχή του Χωροκράτορα είναι απλή. Αν για το χώρο δεδομένων  $\mathcal{D}$  και το χώρο διευθύνσεων Χωροκράτορα  $\mathcal{A}_\chi$  σε αυτόν είναι:

$$H(D) = (v_i : i \in \mathcal{B}_\chi) \in \mathcal{V}_D \equiv \underbrace{\mathcal{V} \times \dots \times \mathcal{V}}_l, \quad l = |\mathcal{B}_\chi|, \quad |\mathcal{V}_D| = |\mathcal{V}|^l. \quad (3.19)$$

και  $\exists (a \in \mathcal{A}_\chi) B(a) = \{i : j \leq_L i \leq_L k\} : \forall (i \in B(a))(v_i = v)$

δηλαδή αν υπάρχουν  $k - j + 1$  συνεχόμενα δεδομένα που έχουν την ίδια τιμή και αποτελούν τη βάση της χωροδιεύθυνσης  $a$ , τότε η συνάρτηση απόδοσης τιμής είναι να ορισθεί:

$$H(D) = (v_i : i \in \mathcal{B}_\chi, i \leq_L j, k <_L i) \in \mathcal{V}_D \equiv \underbrace{\mathcal{V} \times \dots \times \mathcal{V}}_j \times \{v\} \times \underbrace{\dots \times \mathcal{V}}_{l-k}, \quad (3.20)$$

$$l = |\mathcal{B}_\chi|, \quad |\mathcal{V}_D| = |\mathcal{V}|^{l-(k-j)} \cdot |\{v\}| = |\mathcal{V}|^{l-(k-j)}$$

που δίνει μειωμένο χώρο αποθήκευσης.

Καθώς η ιεραρχία του  $\mathcal{A}_\chi$  επιτρέπει αναφορά βαθμιαία σε μαζικότερους προορισμούς, είναι δυνατή η πολυεπίπεδη ομαδοποίηση που παίρνει τη μορφή μιας δενδρικής δομής που αποδίδει τιμή στον χώρο.

Στην αμέσως επόμενη ενότητα περιγράφεται μια δενδρική δομή με ακριβώς αυτήν την προέλευση.

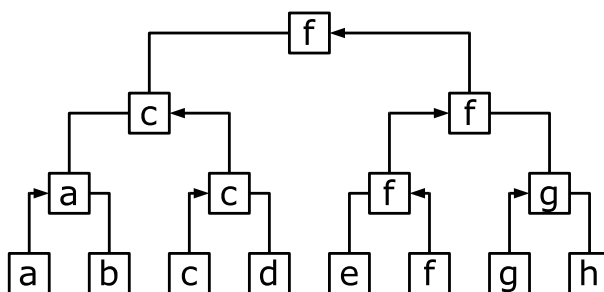
## 3.5 Το Δένδρο Απόδοσης Τιμών

Ο χώρος διευθύνσεων  $\mathcal{A}_\chi$  μέσω της μερικής διάταξης  $\preceq_T$  μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα δένδρο με κορυφή το στοιχείο  $a_M \in \mathcal{A}_\chi$  το οποίο αντιστοιχεί στο σύνολο του χώρου δεδομένων  $\mathcal{D}$ . Οι υποχώροι του  $\mathcal{A}_\chi$  αναπαριστώνται με υποδέντρα στο αρχικό δένδρο.

Το **δένδρο απόδοσης τιμών**  $\mathcal{T}_\chi$  είναι το δένδρο που αντιστοιχεί στην ιεραρχική διάταξη του  $\mathcal{A}_\chi$  αν τα φύλλα του έχουν την τιμή των δεδομένων και κάθε άλλος κόμβος έχει τιμή που εξαρτάται από τα παιδιά του. Το δένδρο απόδοσης τιμών ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την ιεραρχική απόδοση τιμών στο χώρο δεδομένων (βάση του χώρου διευθύνσεων) ή ισοδύναμα, την απόδοση τιμών στο χώρο διευθύνσεων. Το δένδρο αυτό είναι πλήρες και έχει περισσότερους κόμβους από όσα δεδομένα. Η αναπαράστασή του όμως μπορεί να μειωθεί σημαντικά καθώς δεν είναι απαραίτητοι όλοι οι κόμβοι για την ανακατασκευή

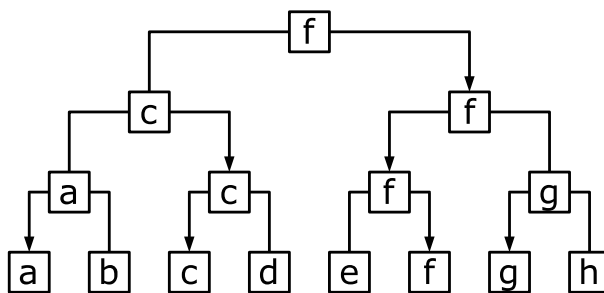
του. Το γεγονός ότι έχει περισσότερους κόμβους και ιεραρχικά συσχετισμένους μεταξύ τους, δίνει τη δυνατότητα της απόδοσης τιμών σε μεγάλα υποσύνολα ομότιμων δεδομένων με πολύ λίγους κόμβους. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί εποπτικά μαζί με τις κυριότερες διαδικασίες που σχετίζονται με την αναπαράστασή του. Οι ακριβείς ορισμοί και αλγόριθμοι ενός δένδρου για την αναπαράσταση της απόδοσης τιμών θα ακολουθήσουν σε επόμενη ενότητα.

Ας θεωρηθεί ότι οι εσωτερικοί κόμβοι της απόδοσης τιμών αποκτούν την τιμή του ενός από τα παιδιά τους. Με τις ίδιες τιμές για τα δεδομένα μπορούν να σχηματιστούν πολλά δένδρα, ανάλογα με το ποιες τιμές θα επιλεγούν για να "*ανυψωθούν*". Προς το παρόν, δε θα δοθεί σημασία στο ακριβές δένδρο, αρκεί οι τιμές των φύλλων (δεδομένων) να είναι ίδιες και τότε οι αποδόσεις τιμών είναι ισοδύναμες.



Σχήμα 3.1: Κατασκευή δένδρου με ανύψωση τιμών.

Αν ακολουθηθεί η αντίστροφη διαδικασία, οι τιμές των δεδομένων στα φύλλα καθορίζονται από τις τιμές των εσωτερικών κόμβων του δένδρου. Με αυτή την έννοια το δένδρο "αποδίδει" τιμές στα φύλλα, όπως φαίνεται στο δένδρο του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2: Δένδρο απόδοσης τιμών.

### 3.5.1 Ψηφιακές ιδιότητες

Η ψηφιακή διάταξη του δένδρου απόδοσης τιμών συνδυάζει τη γραμμική και την ιεραρχική διάταξή του όπως απαιτεί η σχετική ιδιότητα του χώρου διευθύνσεων Χωροκράτορα

(3.14). Τα παιδιά ενός κόμβου είναι διατεταγμένα και μεταξύ τους αλλά και με τον γονέα τους.

Το όνομα (διεύθυνση) ενός κόμβου αρκεί για να μπορέσει να τοποθετηθεί στο σωστό κάθετο ύψος αλλά και τη σωστή οριζόντια σειρά, ανεξάρτητα με το υπόλοιπο δένδρο. Αυτό καθιστά το δένδρο ισοζυγισμένο σε κάθε περίπτωση με μέγιστο μήκος διαδρομής  $O(\log |\mathcal{B}_\chi|)$ , όπου  $\mathcal{B}_\chi$  το σύνολο των διευθύνσεων των δεδομένων, που αντιστοιχεί στα φύλλα.

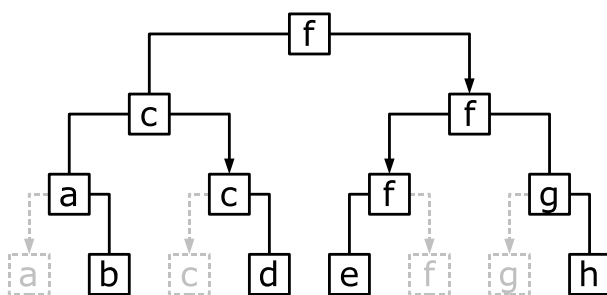
Η διεύθυνση ενός κόμβου περιγράφει επίσης την πλήρη *διαδρομή* από τη ρίζα σε αυτόν. Συνεπώς η διαδικασία εύρεσης ενός κόμβου δεν περιλαμβάνει αναζήτηση στα παιδιά αλλά κάθε περίπτωση είναι σαφές το ποια κατεύθυνση πρέπει να ακολουθηθεί, όπως στη διαδικασία εύρεσης μιας λέξης σε λεξικό.

### 3.5.2 Μείωση Δένδρου

Σκοπός είναι να αποδοθούν τιμές στα δεδομένα περιορίζοντας την πλεονάζουσα πληροφορία. Στην περίπτωση αυτή, αυτό σημαίνει *μείωση* του δένδρου απόδοσης τιμών, ή ακριβέστερα, μείωση της αναπαράστασής του, καθώς το ζητούμενο είναι η ανακατασκευή του δένδρου απόδοσης τιμών. Δηλαδή, απόδοση τιμής στα φύλλα με τη χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων κόμβων για αναπαράσταση του δένδρου.

#### Εξάλειψη Φύλλων

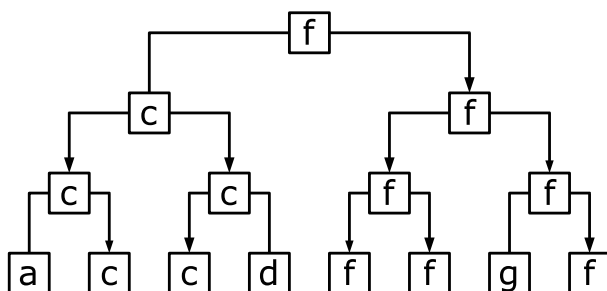
Στο σχήμα 3.2 τα φύλλα  $a$   $c$   $f$   $g$  λαμβάνουν την τιμή τους από τους γονείς τους. Μπορούν να παραληφθούν χωρίς να χαθεί πληροφορία, αν συμφωνηθεί ότι τα φύλλα που δεν υπάρχουν έχουν την ίδια τιμή με τον γονέα τους. Το δένδρο που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Δένδρο απόδοσης τιμών με παραλειπόμενα φύλλα.

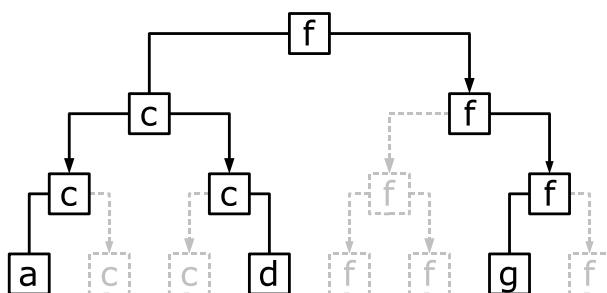
Παρόλο που κανένα δεδομένο δεν έχει ίδια τιμή με άλλο, ήδη μείωση του δένδρου είναι εφικτή.

Η περίπτωση ενός δένδρου 8 φύλλων με 5 διαφορετικές τιμές φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Δένδρο απόδοσης τιμών με πολλαπλότητα τιμών.

Όπως και προηγουμένως, μπορούν να αφαιρεθούν τα φύλλα που έχουν την ίδια τιμή με τον γονέα τους. Μετά την αφαίρεση, ο κόμβος  $f$  που είχε 2 φύλλα με την ίδια τιμή γίνεται και ο ίδιος φύλλο, κι επειδή και ο γονέας του έχει την ίδια τιμή μπορεί και αυτός να αφαιρεθεί. Δηλαδή η διαδικασία αφαίρεσης των φύλλων που έχουν την ίδια τιμή με τον πατέρα τους γίνεται αναδρομικά και ανεβαίνει στο δένδρο. Ας ονομαστεί η διαδικασία αυτή *εξάλειψη φύλλων*. Το δένδρο που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 3.5.

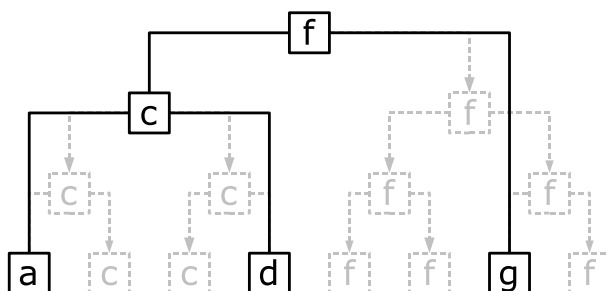


Σχήμα 3.5: Δένδρο απόδοσης τιμών με εξάλειψη φύλλων.

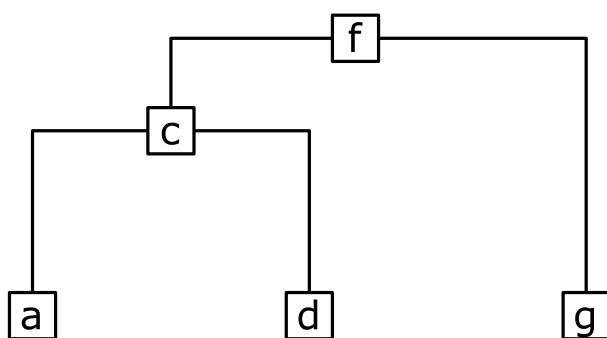
### Συμπύεση Διαδρομής

Η ψηφιακή διάταξη των χωροδιευθύνσεων που αποτελούν τα ονόματα των κόμβων επιτρέπει την αναγνώριση ενός κόμβου χωρίς να απαιτείται ο γονέας του. Δηλαδή, στην περίπτωση που ένας κόμβος έχει την ίδια τιμή με τον γονέα του και έχει μόνο ένα παιδί, το παιδί μπορεί να αναρτηθεί απευθείας με τον γονέα του γονέα του χωρίς να χάνεται η δυνατότητα να αναγνωριστεί επακριβώς η θέση του στο δένδρο, αφού η πληροφορία της τελευταίας βρίσκεται στο όνομά του. Τέτοιοι κόμβοι στο σχήμα 3.5 είναι οι κόμβοι που περιέχουν τα φύλλα  $a$   $c$   $g$ . Ας ονομαστεί η διαδικασία αυτή *συμπύεση διαδρομής*. Η συμπύεση διαδρομής μειώνει εκ νέου το δένδρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.

Το τελικό δένδρο (σχήμα 3.7) έχει μόνο 5 κόμβους για να αναπαραστήσει 5 διαφορετικές τιμές σε 8 συνολικές.



Σχήμα 3.6: Δένδρο απόδοσης τιμών με εξάλειψη φύλλων και συμπίεση διαδρομής.



Σχήμα 3.7: Μειωμένο δένδρο απόδοσης τιμών.

### 3.5.3 Ανάκτηση Τιμής Διεύθυνσης

Σε ένα μειωμένο δένδρο η ανάκτηση της τιμής μιας διεύθυνσης γίνεται ως εξής:

1. αν η διεύθυνση του προορισμού είναι ίδια με του τρέχοντος κόμβου, αυτός έχει τη ζητούμενη τιμή. Τέλος.
2. αν η διεύθυνση του προορισμού είναι μικρότερη από αυτή του τρέχοντος κόμβου τότε κατέβα αριστερά – αν είναι μεγαλύτερη, κατέβα δεξιά.
3. αν δεν υπάρχει κόμβος στην κατεύθυνση της κατάβασης, η ζητούμενη τιμή είναι αυτή του τρέχοντος κόμβου. Τέλος.
4. αν η διεύθυνση του καινούριου κόμβου δεν περιέχει τον κόμβο προορισμού, τότε ο τελευταίος δεν αναπαρίσταται στο δένδρο, άρα η ζητούμενη τιμή είναι αυτή του προηγούμενου κόμβου. Τέλος.
5. επανάληψη.

### 3.5.4 Ανάθεση Τιμής Διεύθυνσης

Η ανάθεση τιμής είναι πολυπλοκότερη διαδικασία καθώς μεταβάλλει το δένδρο και απαιτούνται επιπλέον έλεγχοι και διαδικασίες για την ενδεχόμενη παραπέρα μείωσή του. Ο πλήρης αλγόριθμος θα δοθεί σε επόμενη ενότητα. Γενικά, η διαδικασία έχει ως εξής:

1. βρες τον κόμβο προορισμού, όπως και στην ανάκτηση τιμής.
2. αν υπάρχει, δώσε του τη νέα τιμή και εξάλειψε όλους τους κόμβους που περιέχει (αφού η ανάθεση τιμής γίνεται στο σύνολο των διευθύνσεων που έχει μοναδιαία αναφορά την εν λόγω διεύθυνση προορισμού)
3. αν δεν υπάρχει, δημιουργήσε τον και συνέχισε όπως στο προηγούμενο βήμα.
4. έλεγξε αν μπορεί να μειωθεί το δένδρο και μείωσε το. Τέλος.

## 3.6 Το Δένδρο Χωροκράτορα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η δομή και οι αλγόριθμοι για την εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών στο δένδρο του Χωροκράτορα. Το δένδρο αυτό είναι μια αναπαράσταση του πλήρους δένδρου απόδοσης τιμών για ένα χώρο διευθύνσεων  $\mathcal{A}_x$ , που περιλαμβάνει μείωση με εξάλειψη φύλλων και συμπίεση διαδρομής καθώς και λειτουργίες αναζήτησης και ανάθεσης τιμών.

**Ορισμός 3.6.1 (Δένδρο Χωροκράτορα).** Έστω χώρος διευθύνσεων Χωροκράτορα  $\mathcal{A}_x$  με τις ιδιότητες του ορισμού 3.3.1.

- **Κόμβος.**

Κάθε χωροδιεύθυνση του  $\mathcal{A}_x$  διευθυνσιοδοτεί ένα **κόμβο**. Επομένως ο κόμβος και η χωροδιεύθυνση θα θεωρούνται ισοδύναμα στις εκφράσεις "περιέχει", "αριστερότερα".

Κάθε κόμβος περιέχει διατεταγμένους συνδέσμους στους οποίους συνδέονται άλλοι κόμβοι.

Η αρίθμηση των συνδέσμων ενός κόμβου αντιστοιχεί στο επόμενο ψηφίο της ψηφιολέξης που οδηγεί στον κόμβο σύμφωνα την ανάλυση που καταλήγει στην (3.16).

- **Διαδρομή.**

Κάθε διαδρομή στο δένδρο μπορεί να αναπαρασταθεί με την ακολουθία των ψηφίων που αντιστοιχούν σε κάθε επιλογή σύνδεσμου που ακολουθείται.

- **Μείωση.**

Το δένδρο του Χωροκράτορα δεν είναι πλήρες όπως το πλήρες δένδρο απόδοσης τιμών από το οποίο κατασκευάζεται. Κάποιοι κόμβοι αναπαρίστανται και κάποιοι όχι, ανάλογα με ποιοι είναι απαραίτητοι για την αναπαράσταση των τιμών. Το δένδρο μειώνεται με βάση τις αρχές:

1. **Κάθε κόμβος έχει την ίδια τιμή με έναν από τους άμεσους απογόνους του.** Η επιλογή του απογόνου δεν έχει σημασία για την ορθή λειτουργία του δένδρου, αλλά παίζει ρόλο στην αποτελεσματικότητα της μείωσης. Θα συζητηθεί αργότερα.
2. **Κάθε κόμβος που έχει την ίδια τιμή με τον άμεσο γονέα του και έχει το πολύ 1 παιδί, δεν αναπαρίσταται.** Στην περίπτωση αυτή, το παιδί του εν λόγω κόμβου καταλαμβάνει το σύνδεσμο που καταλάμβανε ο ίδιος ο κόμβος, πριν αφαιρεθεί από την αναπαράσταση.

Αν  $\mathcal{G}_\chi$  το σύνολο των κόμβων που αναπαριστούν χωροδιευθύνσεις του  $\mathcal{A}_\chi$  και  $\preceq_T$  η ιεραρχική σχέση διάταξης του  $\mathcal{A}_\chi$ , τότε ορίζεται το **Δένδρο Χωροκράτορα**  $\mathcal{T}_\chi$ :

$$\mathcal{T}_\chi = (\mathcal{G}_\chi, \preceq_T) \quad (3.21)$$

Οι κυριότερες λειτουργίες του δένδρου παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

### 3.6.1 Εντοπισμός Κόμβου

**Εντοπισμός κόμβου** είναι η εύρεση του βαθύτερου κόμβου που περιέχει μια δεδομένη χωροδιεύθυνση. Ο αλγόριθμος διατρέχει το δένδρο από τη ρίζα και σταματά στον βαθύτερο κόμβο που περιέχει τη χωροδιεύθυνση (πίνακας 3.1). Αν απαιτείται ο κόμβος να περιέχει γνησίως τη χωροδιεύθυνση προορισμού, τότε θα χρησιμοποιείται ο όρος **προσεκτικός εντοπισμός**

### 3.6.2 Διάσχιση

Η **διάσχιση** ενός (υποδένδρου ενός) κόμβου είναι η επαναληπτική επίσκεψη κάθε περιεχόμενου κόμβου. Η τεχνική είναι τυπική λειτουργία ενός δένδρου. Ο αλγόριθμος δίνεται στον πίνακα 3.2.

### 3.6.3 Ανάκτηση τιμής

**Ανάκτηση τιμής** είναι η διαδικασία εύρεσης της τιμής ενός κόμβου στο πλήρες δένδρο απόδοσης τιμών. Λόγω της μείωσης ενδέχεται ο κόμβος αυτός να μην αναπαρίσταται στο δένδρο του Χωροκράτορα. Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή του είναι η ίδια με τον βαθύτερο κόμβο που τον περιέχει. Ο αλγόριθμος δίνεται στον πίνακα 3.3.



**Εντοπισμός Κόμβου**

0. Αρχισε από τη ρίζα.
1. Αποφάσισε προς ποια κατεύθυνση από τον τρέχοντα κόμβο περιέχεται ο προορισμός.
2. Αν ο επόμενος κόμβος περιέχει (γνησίως) τον προορισμό ακολούθησε την κατεύθυνση και κάνε τον τρέχοντα. Επανάληψη του βήματος 1.
3. Αν ο επόμενος κόμβος δεν περιέχει (γνησίως) τον προορισμό τότε ο ζητούμενος κόμβος είναι ο τρέχων. Τέλος.

Σημείωση: το (γνησίως) είναι απαίτηση του προσεκτικού εντοπισμού.

Πίνακας 3.1: Δένδρο Χωροκράτορα: εντοπισμός κόμβου.

**3.6.4 Ανάθεση τιμής**

*Ανάθεση τιμής* είναι η τροποποίηση του δένδρου ώστε να αναπαριστά το δένδρο απόδοσης τιμών με νέα τιμή στον κόμβο με τη δεδομένη διεύθυνση. Η διαδικασία είναι πολύπλοκη καθώς υπάρχουν αρκετά ενδεχόμενα:

- Η ανάθεση μιας τιμής στον κόμβο προορισμού ισοδυναμεί με ανάθεση της ίδιας τιμής σε όλους τους κόμβους που αυτός περιέχει. Συνεπώς ενδέχεται να χρειάζεται διαγραφή ενός ολόκληρου υποδένδρου.
- Ο κόμβος προορισμού μπορεί να μην αναπαρίσταται, οπότε και πρέπει να δημιουργηθεί. Αν στην κατεύθυνση που θα τοποθετηθεί ο κόμβος προορισμού υπάρχει ήδη κόμβος (που δεν επισκιάζεται) τότε απαιτείται η δημιουργία ενός κοινού γονέα καθώς δεν είναι δυνατή η σύνδεση 2 κόμβων στην ίδια κατεύθυνση.
- Μετά την ανάθεση της τιμής στον κόμβο προορισμού το δένδρο πρέπει να ελεγχθεί αν επιδέχεται μείωση. Αν μείωση είναι δυνατή, τότε αυτή εκτελείται και επαναλαμβάνεται ο έλεγχος.

Ο αλγόριθμος της μείωσης παρουσιάζεται χωριστά στην αντίστοιχη ενότητα, στους πίνακες 3.6 και 3.5. Ο υπόλοιπος αλγόριθμος της ανάθεσης παρουσιάζεται στον πίνακα 3.4.

**3.6.5 Μείωση**

Η *μείωση* του δένδρου του Χωροκράτορα είναι η διαδικασία της εξάλειψης των κόμβων που δεν είναι απαραίτητοι για την αναπαράσταση του πλήρους δένδρου απόδοσης

**Διάσχιση Υποδένδρου Κόμβου**

0. Αρχισε από τον δεδομένο κόμβο.
1. Επίλεξε το πρώτο παιδί του τρέχοντος κόμβου.
2. Αν υπάρχει το παιδί πήγαινε στο βήμα 5.
3. Αν υπάρχει επόμενο παιδί επέλεξέ το και πήγαινε στο βήμα 5.
4. Επισκέψου τον τρέχοντα κόμβο και επέλεξε τον γονέα του τρέχοντος κόμβου.
5. Κάνε τρέχοντα τον επιλεγμένο κόμβο και πήγαινε στο βήμα 1.

Πίνακας 3.2: Δένδρο Χωροκράτορα: διάσχιση.

**Ανάκτηση Τιμής**

1. Εντόπισε τον κόμβο με τη δεδομένη διεύθυνση (πίνακας 3.1)
2. Η ζητούμενη τιμή είναι η τιμή του κόμβου στον οποίο σταμάτησε το βήμα 1. Τέλος.

Πίνακας 3.3: Δένδρο Χωροκράτορα: ανάκτηση τιμής.

τιμών. Αυτό είναι δυνατό επειδή πολλές χωροδιευθύνσεις μπορεί να έχουν την ίδια τιμή και να αντικατασταθούν από μια χωροδιεύθυνση υψηλότερα στην ιεραρχία. Η μείωση, όπως παρουσιάστηκε και προηγούμενα, μπορεί να χωρισθεί σε δύο είδη: στη μείωση με *εξάλειψη φύλλων* και στη μείωση με συμπίεση διαδρομής. Οι αλγόριθμοι, που παρουσιάζονται αντίστοιχα στους πίνακες 3.5 και 3.6, κατασκευάστηκαν με σκοπό να εκτελούνται στον βαθύτερο κόμβο του οποίου άλλαζαν οι σύνδεσμοι μετά από μια ανάθεση, με τη συγκεκριμένη σειρά: 1. εξάλειψη φύλλων και 2. συμπίεση διαδρομής.

**3.6.6 Συγχώνευση δένδρων**

Κάθε δένδρο αποτελεί μια αναπαράσταση των τιμών του χώρου δεδομένων και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αναφορική μονάδα ολόκληρου το χώρου και των τιμών του. Με μικρή τροποποίηση, η διαδικασία ανάθεσης τιμών μπορεί να υποστηρίξει την ανάθεση τιμής σε ένα σύνολο χωροδιευθύνσεων (ένα *χωροσύνολο*), αντί σε μεμονωμένες χωροδιευθύνσεις. Η διαδικασία αυτή εκτός του ότι κάνει απλούστερη τη διαχείριση, παρέχει και καλύτερη επίδοση. Ουσιαστικά, πρόκειται για τη συγχώνευση ενός *υποδέν-*

**Ανάθεση Τιμής**

1. Εντόπισε προσεκτικά τον κόμβο προορισμού (πίνακας 3.1).
2. Έλεγξε ποια περίπτωση ισχύει από αυτές των βημάτων 3 μέχρι 6 και ακολούθησε το βήμα αυτό.
3. Αν ο κόμβος αναπαρίσταται τότε ανάθεσέ του τη δεδομένη τιμή και διέγραψε τους απογόνους του. Τέλος.
4. Αν ο κόμβος δεν αναπαρίσταται και δεν υπάρχει κόμβος στην κατεύθυνσή του και η νέα τιμή είναι διαφορετική από την παλαιά, τότε δημιούργησε έναν κόμβο με τη δεδομένη τιμή και σύνδεσέ τον στην κατεύθυνση αυτή. Τέλος.
5. Αν ο κόμβος προορισμού δεν αναπαρίσταται και περιέχει τον κόμβο που υπάρχει στην κατεύθυνσή του, τότε δημιούργησε τον κόμβο προορισμού και αντικατέστησε τον περιεχόμενο κόμβο στο σύνδεσμο με τον γονέα. Τέλος.
6. Αν ο κόμβος προορισμού δεν αναπαρίσταται και δεν περιέχει τον κόμβο που υπάρχει στην κατεύθυνσή του, τότε δημιούργησε τον κόμβο και έναν νέο γονέα. Στο νέο γονέα θα συνδεθεί ο κόμβος προορισμού και ο υπάρχοντας κόμβος (ο γονέας θα έχει χωροδιεύθυνση που περιέχει και τους 2 σε διαφορετική κατεύθυνση και θα περιέχεται από τον παλαιό γονέα). Ο νέος γονέας θα συνδεθεί στον παλαιό γονέα. Τέλος.

Πίνακας 3.4: Δένδρο Χωροκράτορα: ανάθεση τιμής σε χωροδιεύθυνση

**δρου ανάθεσης** που περιέχει τις τιμές προς ανάθεση στο δένδρο του Χωροκράτορα. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στον πίνακα 3.7

**3.6.7 Σύνθεση χώρων**

Στην ενότητα 3.4.5 κατασκευάστηκε το δένδρο απόδοσης τιμών θεωρώντας ότι κάθε κόμβος λαμβάνει την τιμή του ενός από τα παιδιά του. Στη γενική περίπτωση η τιμή ενός κόμβου είναι αυθαίρετη συνάρτηση της τιμής των παιδιών του. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αποδόσεις τιμών που εξειδικεύουν τις τιμές όσο βαθαινουν οι αναφορές, παραθέτοντας τις τιμές των κόμβων ως ψηφία σε μια ψηφιολέξη.

**Μείωση: Εξάλειψη Φύλλων**

1. Άρχισε από τον κόμβο όπου έγινε η τελευταία αλλαγή στους σύνδεσμους.
2. Αν δεν αναπαρίστανται όλοι οι άμεσοι απόγονοι της διεύθυνσής του, τότε δεν εκτελείται μείωση. Τέλος.
3. Βρες όλα τα παιδιά που δεν έχουν παιδιά, και έχουν την ίδια τιμή (μεταξύ τους). Αν δεν υπάρχει τέτοιο παιδί, δεν εκτελείται μείωση. Τέλος.
4. Δώσε στον τρέχοντα κόμβο την κοινή τιμή των παιδιών που επιλέχθηκαν στο βήμα 4 και εξάλειψε τα παιδιά αυτά. Τέλος.

Πίνακας 3.5: Δένδρο Χωροκράτορα: μείωση με εξάλειψη φύλλων.

**3.6.8 Γραφική παρουσίαση ενός δένδρου**

Η απόδοση της μείωσης εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από την ομοιογένεια των τιμών των δεδομένων. Στα σχήματα 3.8 και 3.9, παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση του δένδρου του Χωροκράτορα μετά την εισαγωγή 100 ψηφιοφασμάτων. Ο χώρος έχει διαστάσεις των 10 bit για το πρώτο σχήμα και των 12 bit για το δεύτερο. Η επιλογή των ψηφιοφασμάτων και στις δύο περιπτώσεις έγινε με τυχαία επιλογή του ύψους του ψηφιοφάσματος (δηλαδή του μήκους της μήτρας) από 0 έως 6 και στη συνέχεια τυχαία επιλογή των φασμάτων ώστε να συμπληρωθούν τα bits του κάθε χώρου. Οι τιμές των διευθύνσεων είναι 0 ή 1, αντιπροσωπεύοντας περίληψη ή μη περίληψη στο δένδρο. Οι σκουρόχρωμοι σύνδεσμοι οδηγούν σε κόμβους με τιμή 0 ενώ οι ανοιχτόχρωμοι σε κόμβους με τιμή 1.

Οι γραφικές παραστάσεις εξήχθησαν με αυτοματισμένο τρόπο με τον κατάλληλο προγραμματισμό μιας πλήρως λειτουργικής υλοποίησης του Χωροκράτορα και κατάλληλης διευθυνσιοδότησης (ψηφιοφάσματα μεταβλητού μήκους).

**Μείωση: Συμπύεση Διαδρομής**

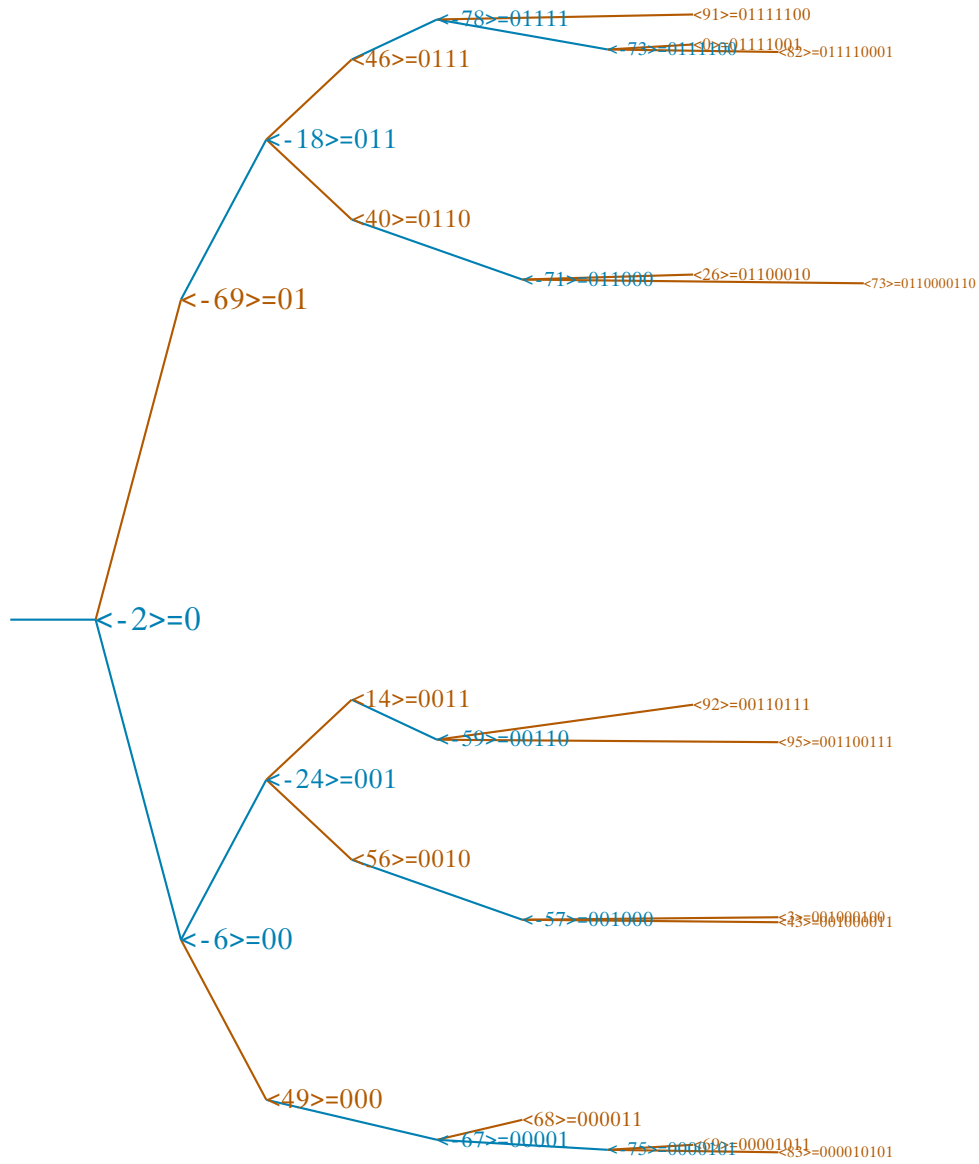
1. Αρχισε από τον κόμβο όπου έγινε η τελευταία αλλαγή στους σύνδεσμους.
2. Αν ο κόμβος δεν έχει πρόγονο (είναι ρίζα) ή ο πρόγονός του έχει διαφορετική τιμή από αυτόν, τότε δεν εκτελείται μείωση. Τέλος.
3. Αν ο κόμβος έχει παραπάνω από έναν απογόνους, τότε δεν εκτελείται μείωση. Τέλος.
4. Αν ο κόμβος δεν έχει απογόνους, τότε εξαλείφεται. Τέλος.
5. Αν ο κόμβος έχει ακριβώς έναν απόγονο, τότε αυτός συνδέεται με τον πρόγονο του τρέχοντος κόμβου και ο τρέχων κόμβος εξαλείφεται. Τέλος.

Πίνακας 3.6: Δένδρο Χωροκράτορα: εξάλειψη φύλλων.

**Συγχώνευση δένδρων**

1. Εντόπισε προσεκτικά τον κόμβο προορισμού στο δένδρο (πίνακας 3.1) που έχει τη διεύθυνση της ρίζας του υποδένδρου ανάθεσης.
2. Έλεγξε ποια περίπτωση ισχύει από αυτές των βημάτων 3 μέχρι 5 και ακολούθησε το βήμα αυτό.
3. Αν ο κόμβος προορισμού αναπαρίσταται ή δεν αναπαρίσταται αλλά περιέχει τον κόμβο που είναι συνδεδεμένος στην κατεύθυνση αυτή, τότε αντικατέστησε ολόκληρο το υποδένδρο στην κατεύθυνση με το υποδένδρο ανάθεσης, και αναδρομικά εκτέλεσε εισαγωγή των υποδένδρων του υποδένδρου που αντικαταστάθηκε. τη δεδομένη τιμή και διέγραψε τους απογόνους του. Τέλος.
4. Αν ο κόμβος δεν αναπαρίσταται και δεν υπάρχει κόμβος στην κατεύθυνσή του και η νέα τιμή είναι διαφορετική από την παλαιά, τότε σύνδεσε στην κατεύθυνση αυτή ολόκληρο το υποδένδρο ανάθεσης. Τέλος.
5. Αν ο κόμβος προορισμού δεν αναπαρίσταται και δεν περιέχει τον κόμβο που υπάρχει στην κατεύθυνσή του, τότε δημιούργησε τον κόμβο και έναν νέο γονέα. Στο νέο γονέα θα συνδεθεί το υποδένδρο ανάθεσης και ο υπάρχοντας κόμβος (ο νέος γονέας θα έχει χωροδιεύθυνση που περιέχει και τους 2 σε διαφορετική κατεύθυνση και θα περιέχεται από τον παλαιό γονέα). Ο νέος γονέας θα συνδεθεί στον παλαιό γονέα. Τέλος.

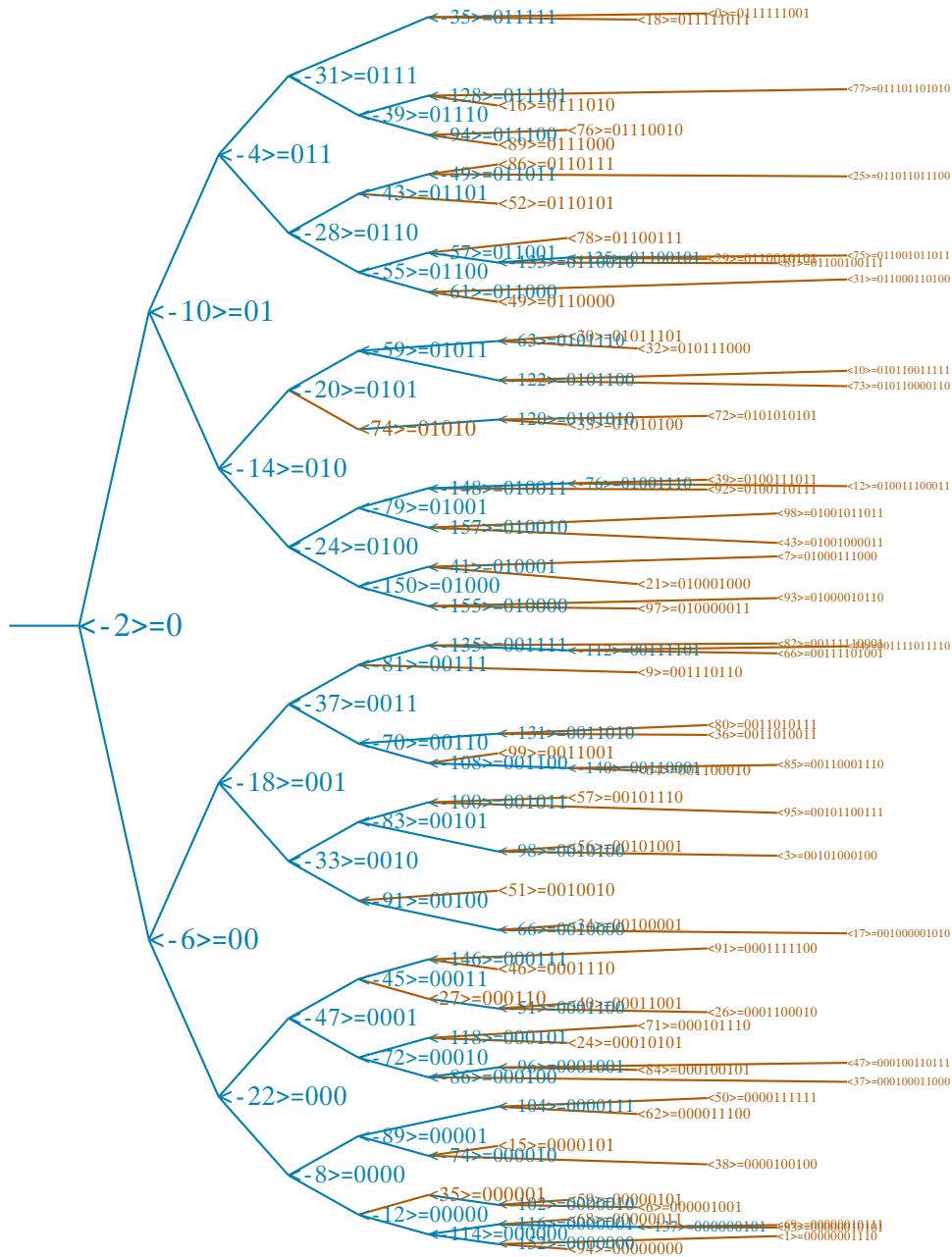
Πίνακας 3.7: Δένδρο Χωροκράτορας: ανάθεση τιμών με συγχώνευση υποδένδρου



+<100>=0001101

18/101 entries, 29 inodes.

Σχήμα 3.8: Δένδρο Χωροκράτορα 10bit χώρου με τυχαίο ύψος φασμάτων 0 έως 6 bit



+<100>=000001101

69/101 entries, 134 inodes.

Σχήμα 3.9: Δένδρο Χωροκράτορα 12bit χώρου με τυχαίο ύψος φασμάτων 0 έως 6 bit



# Κεφάλαιο 4

## Η διευθυνσιοδότηση: Ψηφιοφάσμα

Στον ορισμό 3.3.1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες μιας διευθυνσιοδότησης έτσι ώστε ο χώρος διευθύνσεων να είναι ψηφιοποιήσιμος και να είναι δυνατή η διαχείρισή του από τον Χωροκράτορα. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η προγραμματιστική υλοποίηση μιας τέτοιας διευθυνσιοδότησης, της διευθυνσιοδότησης Ψηφιοφασμάτων. Ψηφιοφάσματα ονομάστηκαν οι ψηφιολέξεις που αποτελούν στοιχεία αυτού του χώρου διευθύνσεων.

### 4.1 Ψηφιοφάσματα

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε ένα μοντέλο του χώρου οι περιοχές του οποίου αποτελούν τους προορισμούς όπου δρουν ή και ορίζονται τα υπολογιστικά συστήματα. Η βασική ιδιότητα του χώρου που θεωρήθηκε για τη διάκριση των περιοχών μεταξύ τους είναι η ολική του διάταξη. Σε αυτήν την ολική διάταξη θα βασισθεί και η διευθυνσιοδότηση Ψηφιοφασμάτων για να ονοματίσει τα δεδομένα, δηλαδή να αναφερθεί στις διαφορετικές περιοχές της μνήμης.

#### 4.1.1 Μοναδιαία αναπαράσταση γραμμικών διαστημάτων

Με δεδομένη την αναπαράσταση μιας γραμμικής διάταξης διευθύνσεων ως μια ακολουθία bit, θα αναζητηθεί ένας τρόπος μοναδιαίας αναφοράς και αναπαράστασης συνόλων διευθύνσεων.

Έστω ότι ο χώρος  $\mathcal{D}$  χωρίζεται σε 2 ισοδύναμες περιοχές και κάθε μια από αυτές τις περιοχές δίδεται το όνομα του N-bit αριθμού που αντιστοιχεί στη διάταξή της στο χώρο. Θα απαιτηθεί κάθε περιοχή από αυτές να μπορεί να πάρει μόνο 2 τιμές, (0, 1). Αυτή αποτελεί τη γνωστή διευθυνσιοδότηση (απλοποιημένη) που χρησιμοποιούν οι υπολογιστές για την πρόσβαση στη μνήμη τους.

Το επόμενο βήμα είναι να αναπαρασταθεί και ολόκληρη η ιεραρχία που ορίζεται στις διευθυνσιοδοτήσεις Χωροκράτορα. Δεδομένου ότι ήδη έχει κατασκευασθεί η βάση  $\mathcal{B}$  ενός χώρου διευθύνσεων Χωροκράτορα  $\mathcal{A}_x$ , και αυτή αποτελείται από μια γραμμική διάταξη ψηφιολέξεων δυαδικών ψηφίων, η κατασκευή του χώρου διευθύνσεων είναι άμεση. Αντί, όμως, να δοθεί αξιωματικά, θα ακολουθηθεί η κατασκευή του ακολουθώντας το νόημα των επιλογών και παρουσιάζοντας την προέλευση του σχεδιασμού.

Ο φυσικός τρόπος να οριοθετηθεί μια περιοχή που θα περιλαμβάνει πολλές διευθύνσεις, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 είναι μέσω των ορίων του. Στην παρούσα περίπτωση της γραμμικής διευθυνσιοδότησης  $\mathcal{B}$ , αρκούν 2 διευθύνσεις, η αρχή και το τέλος, για να ορίσουν ένα γραμμικό διάστημα κι έτσι να συμπεριλάβουν όλες τις διευθύνσεις ανάμεσά τους. Επομένως, μία αναπαράσταση περιοχών του  $\mathcal{D}$  είναι με ένα ζεύγος διευθύνσεων (αρχή, τέλος).

Η αναπαράσταση αυτή δεν είναι ικανοποιητική, όμως. Οι σύνθετες διευθύνσεις που αναπαριστούν περιοχές έχουν διαφορετική αναπαράσταση από τις βασικές διευθύνσεις και ακόμη και αν αναπαρασταθούν οι βασικές διευθύνσεις ως ζεύγη με ταυτόσημη αρχή και τέλος, η αναπαράσταση δεν είναι οικονομική.

Μια διαφορετική αναπαράσταση μπορεί να προκύψει από ένα εναλλακτικό μέτρο του μεγέθους του διαστήματος ανάμεσα σε 2 διευθύνσεις, η τάξη μεγέθους του XOR της αρχής και του τέλους. Όσο μακρύτερη είναι η ακολουθία των bits που έχουν κοινά στην αρχή τους (most significant bits) η αρχή και το τέλος, τόσο μικρότερη είναι η απόστασή τους. Θα μπορούσε να συντεθεί η αναπαράσταση ενός διαστήματος διατηρώντας έναν αριθμό bits από την αρχή (most significant bits) σταθερό και επιτρέποντας στα υπόλοιπα να πάρουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τιμών. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αναπαραχθεί οποιαδήποτε διεύθυνση έχει πρόθεμα την επιλεγμένη ακολουθία από bits. Αυτή η τεχνική, να θεωρούνται τα αρχικά (most significant) bits μιας ψηφιολέξης κρίσιμα ενώ τα υπόλοιπα αδιάφορα είναι γνώριμη από τον τρόπο δημιουργίας υποδικτύων στη διευθυνσιοδότηση IP.

Συνήθως χρησιμοποιείται μια μήτρα από bits (bitmask) για να υποδηλώσει το ποια bits μιας ψηφιολέξης είναι κρίσιμα και ποια αδιάφορα. Στην προκειμένη περίπτωση, θα μπορούσε να εξοικονομηθεί χώρος ενσωματώνοντας το πρόθεμα και τη μήτρα σε μία ψηφιολέξη.

Η αναπαράσταση του διαστήματος έχει ως εξής:

**Ορισμός 4.1.1 (ψηφιοφάσμα).** Γραμμικά διαστήματα δυαδικών αριθμών μπορούν να αναπαρασταθούν με μια ψηφιολέξη ως εξής:

- Η ψηφιολέξη αρχίζει (most significant bit) με την ακολουθία των bits που είναι δεδομένα. Η ακολουθία αυτή θα ονομάζεται **φάσμα** του διαστήματος.
- Τα υπόλοιπα ψηφία αποτελούν τη **μήτρα** του διαστήματος, και μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή, ορίζοντας έτσι μαζί με το φάσμα τις διευθύνσεις που περιέχονται στο διάστημα.

- Για να διαχωριστεί το φάσμα με τη μήτρα ακολουθείται η εξής σύμβαση: Όλα τα bits της μήτρας είναι μηδενικά εκτός από το πρώτο (most significant). Έτσι το πρώτο μη μηδενικό bit από την αρχή της ψηφιολέξης καθορίζει το όριο της μήτρας και του φάσματος. Το bit που διαχωρίζει το φάσμα και τη μήτρα θα ονομάζεται **φρουρός**.
- Λόγω της ύπαρξης του φρουρού, δε μπορεί η μήτρα να μην έχει καθόλου bits, άρα είναι διαθέσιμο ένα bit λιγότερο στην ψηφιολέξη για να αναπαραστήσει διαστήματα.

τέλος: 1101001	τέλος: 0101110
αρχή: 1100101	αρχή: 0101010
---    -----	---    -----
Φάσμα: 110XXXX	Φάσμα: 1101XXX
Μήτρα: 0001111	Μήτρα: 0000111
Φρουρός: 0001000	Φρουρός: 0000100
Ψηφιοφάσμα: 1101000	Ψηφιοφάσμα: 0101100
----+	----+
/    \	/    \
Φάσμα    Φρουρός	Φάσμα    Φρουρός

Πίνακας 4.1: Η ανατομία ενός ψηφιοφάσματος ψηφιολέξης σταθερού μήκους

Σημαντικό χαρακτηριστικό των ψηφιοφασμάτων είναι ότι ταυτόχρονα αποτελούν και δυαδικούς αριθμούς και αυτό κάνει πολύ εύκολη την διαχείρισή τους. Αυτή η ευελιξία, όμως, έχει κόστος. Τα διαστήματα που μπορούν να αναπαρασταθούν με ψηφιοφάσματα αυτής της μορφής είναι έχουν μήκος υποχρεωτικά δύναμη του 2 και η διεύθυνση της αρχής (και του τέλους) είναι στοιχισμένα στο μήκος τους (η αρχή του είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους του). Αυτό όμως δεν είναι σημαντικό πρόβλημα αν ληφθεί υπόψη ότι οποιοδήποτε διάστημα μπορεί να αναπαρασταθεί το πολύ με  $\log(2^N) = N$  ψηφιοφάσματα, όπου  $N$  ο αριθμός των ψηφίων της ψηφιολέξης.

#### 4.1.2 Ιεραρχική διάταξη

Τα ψηφιοφάσματα ορίστηκαν με βάση το κοινό πρόθεμα όλων των διευθύνσεων του συνόλου που αναπαριστούν. Επομένως, η ιεραρχική διάταξη προκύπτει αμέσως. Ένα ψηφιοφάσμα περιέχει μια διεύθυνση όταν και μόνο όταν το φάσμα του ψηφιοφάσματος αποτελεί πρόθεμα της ψηφιολέξης της διεύθυνσης.

Το σύνολο των ψηφιοφασμάτων σε μια ψηφιολέξη  $N$  ψηφίων που έχουν το ίδιο μήκος φάσματος, έστω  $M < N$ , αποτελούν μια νέα γραμμική διευθυνσιοδότηση με ψηφιολέξη

των  $M$  ψηφίων. Σε αυτή τη νέα διάταξη μπορούν να ορισθούν επίσης ψηφιοφάσματα. Αλλά όλα αυτά τα ψηφιοφάσματα είναι ένα προς ένα ισοδύναμα στην αναπαράστασή τους με τα ψηφιοφάσματα της προηγούμενης διάταξης. Είναι, βέβαια, λιγότερα καθώς εξαιρέθηκαν τα ψηφιοφάσματα που δημιούργησαν τη νέα διάταξη και όλα τα ψηφιοφάσματα που περιείχαν

Αν τα νέα επίπεδα διατάξεων κατασκευασθούν από την αρχική διάταξη αναδρομικά και ανά ένα ψηφίο μέχρι να εξαντληθούν τα  $N$  ψηφία, προκύπτει ότι κάθε ψηφιοφάσμα μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με τη διεύθυνση της ψηφιολέξης του φάσματός του. Αντίστροφα, μπορεί να θεωρηθεί ψηφιοφάσμα οποιασδήποτε διάταξης ψηφιολέξεων με μήκος μεγαλύτερο από αυτό του φάσματός του.

Αφού όλα τα ψηφιοφάσματα που μπορούν να κατασκευασθούν πάνω στη διάταξη των ψηφιολέξεων των  $N$  ψηφίων, μπορούν να θεωρηθούν διευθύνσεις για τα ψηφιοφάσματα που τα περιέχουν, τότε είναι δυνατή η ιεράρχηση όλων των ψηφιοφασμάτων και των ψηφιολέξεων με τον ίδιο κανόνα:

Ένα ψηφιοφάσμα περιέχει ένα άλλο όταν και μόνο όταν το φάσμα του πρώτου αποτελεί πρόθεμα στο φάσμα του δεύτερου. (Αρχή θεωρείται το σημαντικότερο ψηφίο των λέξεων).

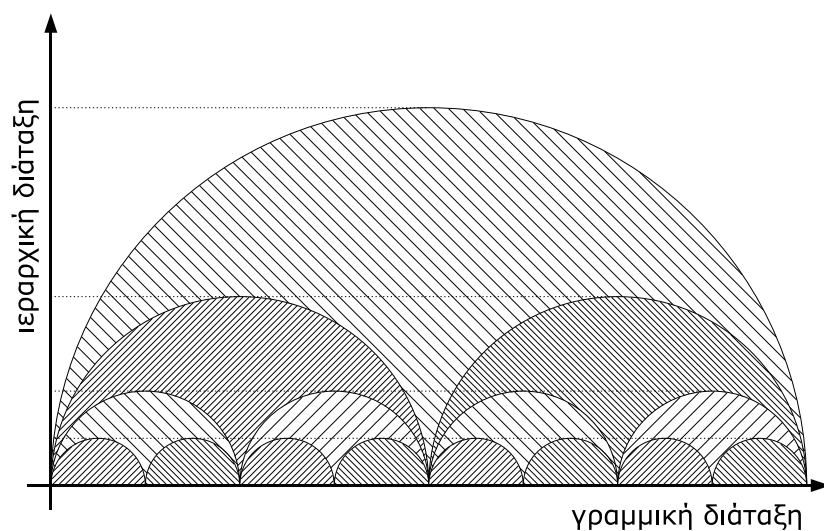
### 4.1.3 Ψηφιακή διάταξη

Η ψηφιακή διάταξη που απαιτείται για ένα χώρο διευθύνσεων Χωροκράτορα (3.14) προκύπτει με τη σύνθεση της γραμμικής διάταξης της βάσης των διευθύνσεων και της ιεραρχικής διάταξης των ψηφιοφασμάτων που ορίζονται πάνω σε αυτήν. Σύμφωνα με την πρόταση 3.3.2, αρκεί κάθε ψηφιοφάσμα να εισαχθεί οπουδήποτε ανάμεσα στη γραμμική διάταξη των διευθύνσεων που περιέχει. Στην προκείμενη περίπτωση, η αναπαράσταση του ψηφιοφάσματος περιέχει τον φρουρό, ο οποίος τοποθετεί το ψηφιοφάσμα στα  $3/4$  της διάταξης των διευθύνσεων που περιέχει (σχήμα 4.2). Άρα τα ψηφιοφάσματα όπως ορίστηκαν αποτελούν μια έγκυρη διευθυνσιοδότηση Χωροκράτορα και η διαχείρισή τους μπορεί να γίνει όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

## 4.2 Αλγόριθμοι Ψηφιοφασμάτων

### 4.2.1 Φάσμα, Μήτρα και Φύλακας

Δεδομένης της αναπαράστασης των ψηφιοφασμάτων όπως στον πίνακα 4.1, Η απομόνωση του φάσματος, της μήτρας και του φρουρού μπορούν να γίνουν όπως περιγράφεται στον πίνακα 4.2



Σχήμα 4.1: Διάταξη Ψηφιοφασμάτων

έστω ψηφιοφάσμα σταθερής λέξης  $a$ . Από το  $a$  εξάγονται:

φάσμα  $r$ ,  $r = a \& (a-1)$   
 μήτρα  $m$ ,  $m = a \wedge (a-1)$   
 φρουρός  $g$ ,  $g = (m \gg 1) + 1$

Πίνακας 4.2: απομόνωση φάσματος, μήτρας και φρουρού ψηφιοφάσματος σταθερής λέξης

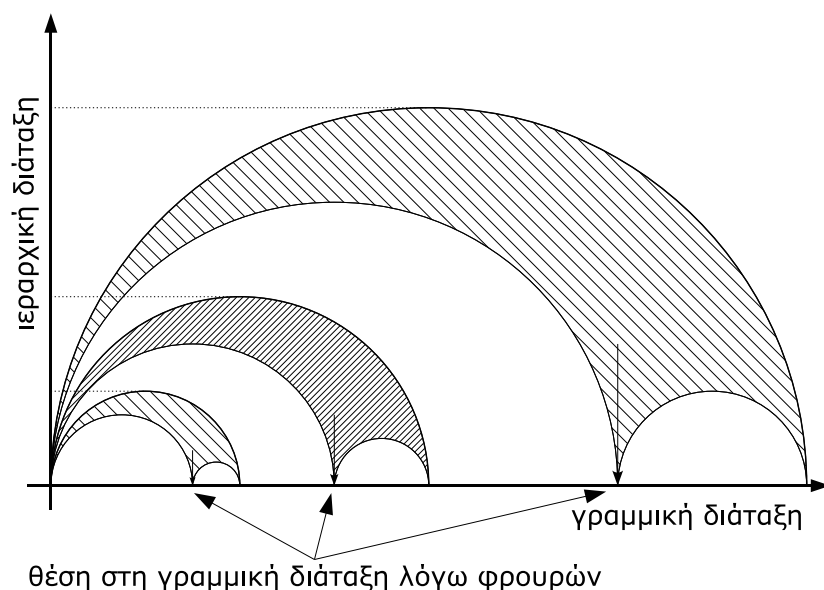
### 4.2.2 Συγχώνευση

Η *συγχώνευση* 2 ψηφιοφασμάτων είναι το ψηφιοφάσμα με το μεγαλύτερο μήκος φάσματος το οποίο τα περιέχει. Εάν η συγχώνευση περιέχει μόνο τα ψηφιοφάσματα και καμία άλλη διεύθυνση τότε θα καλείται *ένωση*. Η ένωση είναι δυνατή μόνο αν τα φάσματα διαφέρουν μόνο στο τελευταίο ψηφίο (least significant). Η το φάσμα της συγχώνευσης 2 ψηφιοφασμάτων είναι το κοινό πρόθεμα των φασμάτων τους.

### 4.2.3 Έλεγχος ιεραρχικής διάταξης

Ένα ψηφιοφάσμα περιέχει ένα άλλο αν και μόνο εάν το φάσμα του πρώτου αποτελεί πρόθεμα του φάσματος του δεύτερου.

Ισοδύναμα, ένα ψηφιοφάσμα περιέχει ένα άλλο αν και μόνο εάν το πρώτο είναι ταυτόχρονα και η συγχώνευσή τους.



Σχήμα 4.2: Εισαγωγή ψηφιοφασμάτων στη γραμμική διάταξη μέσω του φρουρού

#### 4.2.4 Έλεγχος γραμμικής διάταξης

Η σχετική θέση δύο ψηφιοφασμάτων που κανένα δε περιέχει το άλλο δίνεται από την απλή αριθμητική σύγκριση των αναπαράστασών τους.

### 4.3 Ψηφιοφάσματα μεταβλητής λέξης

Μια εναλλακτική αναπαράσταση των ψηφιοφασμάτων αποτελείται μόνο από το φάσμα, συμπεριλαμβανομένης και της πληροφορίας του μήκους του. Πληροφορία για το ιεραρχικό βάθος του ψηφιοφάσματος δε συμπεριλαμβάνεται στην αναπαράσταση. Το μέγεθος του ψηφιοφάσματος (το ιεραρχικό του ύψος ή το πλήθος των διευθύνσεων που περιέχει) εξαρτάται από το που θα τοποθετηθεί η βασική γραμμική διάταξη. Για παράδειγμα, για ισοδύναμη αναπαράσταση των ψηφιοφασμάτων σταθερής λέξης μήκους  $N$  ψηφίων με ψηφιοφάσματα μεταβλητής λέξης, θα πρέπει να "επεκταθούν" φυσικά ή νοητά όλες οι μεταβλητού μήκους λέξεις σε λέξεις  $N$  ψηφίων για να επιτευχθεί η απόλυτη ιεραρχική τοποθέτησή τους.

Η υλοποίηση μεταβλητής λέξης παρέχει περισσότερη ευελιξία από αυτήν της σταθερής λέξης. Πολύ μεγάλοι χώροι (πάρα πολλά ψηφία) μπορούν να σχηματισθούν με αυξητικό τρόπο, δεσμεύοντας μόνο όση μνήμη χρειάζεται. Επίσης ήδη υπάρχοντες χώροι διευθύνσεων μπορούν να επεκταθούν απλά αλλάζοντας το βάθος αναφοράς. Οι εξειδικεύσεις των ψηφιοφασμάτων μπορούν να γίνουν απλά και γρήγορα και σε πολύ μεγάλο βάθος,

με την παράθεση των φασμάτων στη μνήμη.

Τα ψηφιοφάσματα μεταβλητής λέξης είναι αναγκαία για την αυξητική εκδοχή του δένδρου του Χωροκράτορα που παρουσιάζεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.





# Κεφάλαιο 5

## Κατευθύνσεις

### 5.1 Πολλαπλασιασμός πινάκων

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 για να καθοδηγήσει τη συστηματική βελτιστοποίηση ενός προγράμματος υπολογιστή που υπολογίζει το γινόμενο δύο πινάκων. Στόχος είναι η ενδεικτική παρουσίαση της εφαρμογής της μεθοδολογίας και όχι η παρουσίαση μιας βελτιστοποιημένης υλοποίησης και για αυτό οι τεχνικές θα παρουσιασθούν ενδεικτικά ή και μόνο κατ' αναφορά.

Έστω ότι η πρόθεση είναι να προσδιοριστούν και να γίνουν διαθέσιμες οι τιμές των στοιχείων ενός πίνακα  $C$  τέτοιον ώστε  $C = AB$ , όπου  $A, B$  δύο δεδομένοι πίνακες. Οι ελάχιστοι προορισμοί εξόδου σε αυτήν την περίπτωση είναι τα στοιχεία του πίνακα  $C$ , ενώ οι ελάχιστοι προορισμοί εισόδου είναι τα στοιχεία των πινάκων  $A, B$ .

Ένα πρώτο βήμα για την υλοποίηση ενός υποσυστήματος που θα αναλάβει την υλοποίηση αυτής της πρόθεσης υποδεικνύεται από την ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 2. Θα σχεδιαστεί ένας μηχανισμός που θα προσπελαύνει τους προορισμούς εισόδου θα εκτελεί τις αναγκαίες πράξεις από το αποτέλεσμα των οποίων θα σχηματίζει τις αναφορές εξόδου, δηλαδή την είσοδο που θα πρέπει να δοθεί στο επόμενο υποσύστημα στη ροή έτσι ώστε αυτό να κάνει διαθέσιμες τις τιμές του αποτελέσματος. Στην περίπτωση που το υποσύστημα αυτό βρίσκεται στο τέλος της ροής, τότε οι προορισμοί της εξόδου του θα πρέπει να αποτελούν αναπαράσταση του επιθυμητού αποτελέσματος.

Για την αναφορά στους προορισμούς εισόδου και εξόδου, την αναπαράσταση δηλαδή των δεδομένων, θα χρειαστεί μια διευθυνσιοδότησή τους. Το ίδιο το μαθηματικό πρόβλημα διευθυνσιοδοτεί τα στοιχεία των πινάκων διατάσσοντάς τα γραμμικά σε 2 διαστάσεις. Έτσι το όνομα κάθε στοιχείου αποτελείται από τη θέση του στη διάταξη των σειρών και από τη θέση του στη διάταξη των στηλών, κατά τα γνωστά. Ο χώρος πάνω στον οποίο λειτουργεί το σύστημα, η μνήμη του υπολογιστή, αποτελεί γραμμική διάταξη σε μία διάσταση. Το πρόβλημα λύνεται με την ιεράρχηση των διαστάσεων. Αν θεωρηθούν οι γραμμές ως

σύνθετες περιοχές στη γραμμική διάταξη με κάθε τέτοια περιοχή να περιέχει διατεταγμένα στοιχεία που αντιστοιχούν στις στήλες, προκύπτει η διαδομένη αναπαράσταση των διδιάστατων πινάκων σε υπολογιστές, την οποία υιοθετεί και η γλώσσα C.

Ο τελικός προορισμός της πρόθεσης, η έξοδος, όπως και η αρχική αναφορά του προορισμού αυτού, η είσοδος, δεν είναι άμεσα προσπελάσιμοι. Για αυτό το υποσύστημα θα πρέπει να αποσυνθέσει την αναφορά εισόδου σε προσπελάσιμους προορισμούς και ταυτόχρονα να συνθέσει τον τελικό προορισμό από τους επιμέρους προσπελάσιμους προορισμούς τις εξόδου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στο χρόνο, με ένα βρόχο, θα προσπελαύνονται σειριακά οι μοναδιαίοι προορισμοί της εισόδου, ένα στοιχείο του **A** και ένα του **B** που συνδέονται με ένα μοναδιαίο προορισμό εξόδου, ένα στοιχείο του **C**.

Το υποσύστημα προς υλοποίηση μπορεί να βασισθεί σε ένα πρόγραμμα του οποίου το βασικό τμήμα της σύνθεσης της εξόδου παρατίθεται στον πίνακα 5.1.

```
for (k = 0; k < N; k++) {
    for (r = 0; r < N; r++) {
        for (c = 0; c < N; c++) {
            C[r][c] += A[r][k] * B[k][c];
        }
    }
}
```

Πίνακας 5.1: Φωλιασμένοι βρόχοι για πολλαπλασιασμό πινάκων.

Όπως φαίνεται από τους βρόχους στον πίνακα 5.1, Το ύψος σύνθεσης του προορισμού εξόδου είναι 3 επίπεδα, (ή αλλιώς, το βάθος της αποσύνθεσης αναφοράς εισόδου) με τη λεπτομέρεια ότι οι προορισμοί των πινάκων **C**, **B** βρίσκονται στο τρίτο και βαθύτερο επίπεδο ενώ οι προορισμοί του πίνακα **A** βρίσκονται στο δεύτερο επίπεδο. Ελάχιστος προορισμός στο βαθύτερο επίπεδο είναι το ένα στοιχείο πίνακα, το οποίο ας θεωρηθεί ότι είναι ένας αριθμός στη μνήμη του υπολογιστή.

### 5.1.1 Βελτιστοποίηση κόστους

Οι πράξεις που εκτελούνται για την αποτίμηση της εξόδου είναι πολλαπλασιασμοί και προσθέσεις αριθμών, με τους πολλαπλασιασμούς να έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος εκτέλεσης. Ενδέχεται το κόστος της σύνθεσης του συνολικού προορισμού να αποτελεί συνάρτηση του ύψους σύνθεσης των μοναδιαίων προορισμών από τους οποίους αυτός συντίθεται. Σε αυτήν την περίπτωση στόχος της βελτιστοποίησης είναι ρυθμιστεί το ύψος των προορισμών έτσι ώστε το συνολικό κόστος να είναι ελάχιστο. Για να γίνει ο προσδιορισμός του ύψους θα πρέπει να είναι γνωστή η δομή και η λειτουργία των υποσυστημάτων τα οποία συνθέτουν το σύστημα πολλαπλασιασμού πινάκων. Το συνθετικό ύψος των στοιχείων είναι ήδη ελάχιστο, άρα το βέλτιστο θα αναζητηθεί σε μεγαλύτερο ύψος.

Δεδομένης της αρχιτεκτονικής των επεξεργαστών πολλαπλών ομοχειριών (multiple pipelines, superscalars), μια πρώτη βελτιστοποίηση θα παρείχε η τεχνική της ανάπτυξης του εσωτερικού βρόχου (loop unrolling). Ομαδοποιώντας τους ελάχιστους προορισμούς του ενός στοιχείου σε συνθετότερους, τυπικά των 4 ή 8 στοιχείων, το συνολικό κόστος της σύνθεσης του προορισμού εξόδου ελαττώνεται. Το πρόγραμμα εκμεταλλεύεται την δυνατότητα του επεξεργαστή για παράλληλη εκτέλεση χρήσιμων εντολών με το να φροντίζει να μη παρεμβάλλει εντολές βρόχων που ούτε παράγουν έξοδο αλλά ούτε διευκολύνουν την ομαλή παράλληλη λειτουργία των ομοχειριών.

Το νέο ύψος των συνθετότερων προορισμών, παρότι καλύτερο, δεν αποτελεί βέλτιστο. Αυτή τη φορά, η λειτουργία του υποσυστήματος πρόσβασης της μνήμης είναι που θα απαιτήσει ένα νέο επίπεδο σύνθεσης των προορισμών. Η λανθάνουσα μνήμη που επιταχύνει σημαντικά την πρόσβαση των δεδομένων της κεντρικής μνήμης έχει περιορισμένη χωρητικότητα. Η χωρητικότητα αυτή προσδιορίζει μέχρι πιο ύψος σύνθεσης ενός προορισμού μπορεί η έκτασή του να θεωρηθεί "τοπική" και άρα αποδοτικά προσπελάσιμη. Αυτός ο περιορισμός υποδεικνύει την αποσύνθεση της αναφοράς εισόδου σε τμήματα τα οποία μπορούν να θεωρηθούν τοπικότητες, τα οποία θα αντιστοιχούν σε σύνθετους προορισμούς που ως μεγέθη θα καλύπτονται από την χωρητικότητα της λανθάνουσας μνήμης. Αυτή η τεχνική είναι διαδεδομένη για την αύξηση της τοπικότητας της αναφοράς αλγορίθμων που επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες δεδομένων (tiling, block layouts). Οι προορισμοί που σχηματίστηκαν στο πρώτο βήμα, συντέθηκαν εκ νέου στα τμήματα τοπικότητας στο δεύτερο βήμα. Ενδεικτικά, η μορφή του προκύπτοντος προγράμματος παρατίθεται στον πίνακα 5.2.

```

for (bk = 0; bk < N; bk += rstep) {
    for (br = 0; br < N; br += rstep) {
        for (bc = 0; bc < N; bc += cstep) {
            for (k = bk; (k < bk+rstep && k < N); k++) {
                for (r = br; (r < br+rstep && r < N); r++) {
                    for (c = bc; (c < (bc+cstep) && c < N); c += 4) {
                        C[r][c + 0] += A[r][k] * B[k][c + 0];
                        C[r][c + 1] += A[r][k] * B[k][c + 1];
                        C[r][c + 2] += A[r][k] * B[k][c + 2];
                        C[r][c + 3] += A[r][k] * B[k][c + 3];
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

Πίνακας 5.2: Πολλαπλασιασμός πινάκων με τμήση τοπικότητας και ανάπτυξη βρόχου.

Ο χωρισμός σε τμήματα τοπικότητας έγινε με τον χωρισμό σε τμήματα της κάθε διάστασης. Επειδή οι διαστάσεις είναι δύο αλλά η αναπαράστασή τους ανάγεται σε μία,

τα επίπεδα της σύνθεσης που εισάγονται με τη διαδικασία είναι δύο. Αυτό σημαίνει ότι η ίδια διαδικασία αυτή αποτελεί ένα μικρό σύστημα από μόνης της και θα έπρεπε να εξεταστεί ως σύστημα προς τη βελτιστοποίηση κόστους. Το σύστημα αυτό ουσιαστικά υπολογίζει υποπίνακες του αρχικού, που απλά καθορίζεται το μέγεθός τους να μην ξεπερνά τη χωρητικότητα της λανθάνουσας μνήμης. Οι διαστάσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι οι υποπίνακες αυτοί μπορούν να λάβουν οποιοδήποτε ορθογώνιο τμήμα. Εκ πρώτης όψης μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν έχει σημασία το σχήμα, εφόσον το μέγεθος είναι αυτό που παίζει ρόλο στον καθορισμό του κόστους και να επιλεγούν τετράγωνα τμήματα. Αλλά η ανάλυση του συστήματος δείχνει ότι οι προορισμοί που αντιστοιχούν σε κάθε διάσταση δεν είναι ισότιμοι αλλά ιεραρχικά διατεταγμένοι λόγω της αναγωγής των δύο διαστάσεων σε μία. Η διάσταση της οποίας η σύνθεση ακολουθεί τους μοναδιαίους (βαθύτερους) προορισμούς εξόδου είναι αυτή των στηλών. Άρα θα πρέπει να διερευνηθεί αν το βάθος τους είναι βέλτιστο.

Πράγματι, η σύνθεση των προορισμών στο χαμηλότερο επίπεδο διασχίζει τη διάταξη της μνήμης γραμμικά. Οι επεξεργαστές και τα υποσυστήματα μνήμης είναι βελτιστοποιημένα για τέτοιου είδους προσβάσεις καθώς αυτές αποτελούν την απλούστερη και βασικότερη μέθοδο σύνθεσης προορισμών. Ο προγραμματιστής μπορεί να προγραμματίσει τον επεξεργαστή να εκμεταλλευθεί αυτή τη γραμμικότητα (preloading). Σε συγκεκριμένους σύγχρονους επεξεργαστές αυτή τη λειτουργία αναλαμβάνει να εκτελέσει από μόνο του το ίδιο το υποσύστημα μνήμης προφορτώνοντας (hardware prefetching) στη λανθάνουσα μνήμη τις επόμενες θέσεις της κεντρικής μνήμης από αυτές που προσπελούνται από τις τρέχουσες εντολές.

Επομένως η σύνθεση των στοιχείων που προσπελούνται στο βαθύτερο επίπεδο θα δημιουργήσει έναν σύνθετο προορισμό ο οποίος θα εκτείνεται σε περιοχή της μνήμης που θα έχει προφορτωθεί πριν ζητηθεί η πρόσβασή του. Επειδή η προφόρτωση είναι μια γραμμική διαδικασία χωρίς τέλος, δηλαδή όσο συνεχίζεται η γραμμική πρόσβαση τόσο θα συνεχίζεται και η διαδικασία, η σύνθεση των προορισμών θα πρέπει να γίνει όσο πιο υψηλή είναι δυνατόν. Τελικά, το βέλτιστο σχήμα των ορθογωνίων τμημάτων τοπικότητας προκύπτει όσο το δυνατόν πιο μακρύ στην κατεύθυνση της διάστασης που βρίσκεται βαθύτερα στην ιεραρχία της σύνθεσης, αυτής των στηλών.

Στο ίδιο παράδειγμα, στην πράξη, υπεισέρχονται ακόμη περισσότεροι παράγοντες που ιεραρχούν τους προορισμούς, όπως η πολλαπλή ιεραρχία της μνήμης, η ιεραρχία της κρυφής μνήμης σε γραμμές (cachelines) ακόμη και ο τρόπος δεικτοδότησης των δεδομένων (pointer[index++] και \*pointer++). Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να συμπεριληφθούν στη μελέτη για βελτιστοποίηση με την ίδια μεθοδολογία.

Η περίπτωση που μελετήθηκε είναι ένα καλό παράδειγμα της πολυπλοκότητας που προκύπτει από τη σύνθεση απλών συστημάτων. Η βελτιστοποίηση εξαρτάται από ολόένα περισσότερες παραμέτρους με αποτέλεσμα να διακρίνεται δύσκολα προς ποια κατεύθυνση πρέπει να κινηθεί και ακόμη πιο δύσκολα ποιες άλλες κατευθύνσεις υπάρχουν προς διερεύνηση. Τη διαδικασία αυτή στόχο έχει να διευκολύνει το μοντέλο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, προσφέροντας ένα τρόπο οργάνωσης της λειτουργίας σύνθετων συστημάτων

και αφετηρίες και κατευθύνσεις για τη συστηματική εξεύρεση και διερεύνηση παραμέτρων που βελτιστοποιούν την απόδοση της συνολικής συνεργασίας των υποσυστημάτων με στόχο ένα μεγαλύτερης κλίμακας επιθυμητό αποτέλεσμα.

### 5.1.2 Αναφορική βελτιστοποίηση

Στην προηγούμενη ενότητα περιγράφηκε μια διαδικασία βελτιστοποίησης του κόστους της πρόσβασης (συμπεριλαμβανομένων των πράξεων) των προορισμών εξόδου. Σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφεί μια μέθοδος αναφορικής βελτιστοποίησης του ίδιου προβλήματος. Στόχος, τώρα δεν είναι η ταχύτητα με την οποία θα γίνει η πρόσβαση των προορισμών, αλλά το πλήθος των προορισμών που θα προσπελαστούν.

Για να γίνει η βελτιστοποίηση θα πρέπει οι προορισμοί που συνθέτουν το συνολικό προορισμό εξόδου να διευθυνσιοδοτηθούν ψηφιακά. Αυτό μπορεί να γίνει ως εξής:

Έστω πίνακες εισόδου  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ . Η πρόθεση είναι ο καθορισμός εξόδου  $\mathbf{C}$  τέτοιος ώστε να επιτρέπει την ανάκτηση της τιμής οποιαδήποτε στοιχείου του πίνακα  $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ . Αν έχουμε  $\mathbf{C} = \mathbf{A} \times \mathbf{B}$ , οι πίνακες μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \times \mathbf{B} \rightarrow$$

$$[\mathbf{C}_0 \ \mathbf{C}_1] = [\mathbf{A}_0 \ \mathbf{A}_1] \times [\mathbf{B}_0 \ \mathbf{B}_1]$$

όπου οι δείκτες υποδηλώνουν τους αντίστοιχους αριστερούς και δεξιούς υποπίνακες που προκύπτουν από τη διχοτόμηση των πινάκων κατά μήκος των γραμμών τους. Θα μπορούσαν να τμηθούν οι πίνακες και στις δύο διαστάσεις σε αυθαίρετα τμήματα, χωρίς να αλλάζει κάτι ουσιαστικό πέρα από την πολυπλοκότητα της παρουσίασης. Ισχύει:

$$\mathbf{C}_0 = \mathbf{A}_0 \times \mathbf{B}_0, \quad \mathbf{C}_1 = \mathbf{A}_1 \times \mathbf{B}_1$$

Οι υποπίνακες  $\mathbf{C}_0$ ,  $\mathbf{C}_1$  μπορούν να διχοτομηθούν κατά τον ίδιο τρόπο:

$$\mathbf{C}_0 = [\mathbf{C}_{00} \ \mathbf{C}_{01}] = [\mathbf{A}_{00} \ \mathbf{A}_{01}] \times [\mathbf{B}_{00} \ \mathbf{B}_{01}]$$

$$\mathbf{C}_1 = [\mathbf{C}_{10} \ \mathbf{C}_{11}] = [\mathbf{A}_{10} \ \mathbf{A}_{11}] \times [\mathbf{B}_{10} \ \mathbf{B}_{11}]$$

και

$$\mathbf{C}_{00} = \mathbf{A}_{00} \times \mathbf{B}_{00}$$

$$\mathbf{C}_{01} = \mathbf{A}_{01} \times \mathbf{B}_{01}$$

$$\mathbf{C}_{10} = \mathbf{A}_{10} \times \mathbf{B}_{10}$$

$$\mathbf{C}_{11} = \mathbf{A}_{11} \times \mathbf{B}_{11}$$

Επαναλαμβάνοντας αναδρομικά τη διαδικασία συμπεραίνουμε ότι

$$C_x = A_x \times B_x \quad (5.1)$$

όπου  $x$  είναι η ψηφιολέξη που προκύπτει από την ιεραρχική αποσύνθεση των πινάκων. Η ψηφιολέξη  $x$  αποτελεί μια ψηφιακή διευθυνσιοδότηση των στοιχείων των πινάκων, άρα η διαχείριση των τιμών των πινάκων μπορεί να γίνει με τον Χωροκράτορα.

Η αναφορική βελτιστοποίηση προκύπτει στην περίπτωση που κάποιο τμήμα των πινάκων που αντιστοιχεί σε μια χωροδιεύθυνση  $x$  αποτελείται εξολοκλήρου από ίδιους προορισμούς, (π.χ. είναι μηδενικό) τότε η αναπαράστασή του μπορεί να γίνει στο δένδρο του Χωροκράτορα μόνο με ένα κόμβο, αυτόν του  $x$ . Το δένδρο θα χρησιμοποιηθεί κατά το στάδιο της αναφοράς των προορισμών για τη δημιουργία του αποτελέσματος. Θα χρειαστούν αναφορές στους προορισμούς εισόδου των  $A$ ,  $B$  και στους προορισμούς εξόδου του  $C$ . Ο βρόχος της σύνθεσης στο χρόνο θα περιλαμβάνει ανάκτηση του προορισμού από τον Χωροκράτορα. Όμως, ο Χωροκράτορας μπορεί να αναφέρει πολλαπλούς προορισμούς με τη χρήση των ίδιων κόμβων, κι έτσι το κόστος της αποθήκευσης των πινάκων στην περίπτωση που αυτοί παρουσιάζουν ομοιογένεια στις τιμές τους, μειώνεται σημαντικά.

Το δεύτερο και φυσικά επόμενο βήμα είναι να υιοθετηθεί μια εναλλακτική αναπαράσταση για τους πίνακες. Εφόσον οι τιμές των δεδομένων είναι ανακτήσιμες μέσω της αναφορικής διαχείρισής τους από τον Χωροκράτορα, δεν υπάρχει λόγος στην ύπαρξη ενός βρόχου που θα συνθέτει αδρανείς ή ισοδύναμους προορισμούς. Η διαδικασία της σύνθεσης μπορεί να ακολουθήσει ιεραρχικά το δένδρο των αναφορών των προορισμών. Ο βρόχος σύνθεσης των προορισμών θα διατρέχει τις ιεραρχίες των πινάκων εισόδου και θα συνθέτει ιεραρχικά τον πίνακα εξόδου. Στην περίπτωση που θα συναντηθούν υψηλές αναφορές, δεν απαιτείται παραπέρα εξειδίκευση και η πράξη του πολλαπλασιασμού μπορεί να γίνει σε υψηλό επίπεδο.

Έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία της αναφορικής βελτιστοποίησης. Το σύστημα, ανάλογα τη δυναμική σημασιολογία της εισόδου, μπορεί να παρουσιάσει τάξεις μεγέθους βελτιωμένες επιδόσεις. Αυτές οι επιδόσεις είναι θεωρητικά αδύνατες στην περίπτωση στην περίπτωση του περιορισμού στη στατική βελτιστοποίηση κόστους.

Επιπλέον αυτή η βελτιστοποίηση χώρου και χρόνου μειώνει και τον όγκο της επικοινωνίας των υποσυστημάτων μεταξύ τους και ταυτόχρονα βελτιώνει και την ταχύτητα πρόσβασης στα δεδομένα.

## 5.2 Διαχείριση καταστάσεων αντικειμένων

Το υποσύστημα του χωροκράτορα είναι ιδανικό για τη διαχείριση αραιών δεδομένων και δεδομένων που παίρνουν μόνο λίγες τιμές. Είναι συνηθισμένη ανάγκη στις δομές με τις οποίες αναπαριστώνται αντικείμενα προς διαχείριση, να εισάγονται πεδία τα οποία

μπορούν όμως να έχουν περιορισμένες τιμές. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που απλά ένα bit αρκεί (flags).

Αν αυτά τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων δε διαχειρίζονταν τοπικά, αλλά κεντρικά, με τη χρήση μιας κοινής διευθυνσιοδότησης, η αναφορική βελτιστοποίηση θα μπορούσε να μειώσει δραστικά το κόστος αποθήκευσης, αλλά κυρίως το κόστος πρόσβασης.

Για παράδειγμα, όταν μια διεργασία στέλνει ένα σήμα σε ένα σύνολο νημάτων, η ειδοποίηση γίνεται για καθένα ξεχωριστά. Θα μπορούσε η διαδικασία της ειδοποίησης να γίνεται σχεδόν ακαριαία, αν υιοθετούνταν μια ιεραρχική διαχείριση που θα επέτρεπε την αναφορική βελτιστοποίηση.

## 5.3 Γενικευμένες μνήμες ίχνους (trace caches)

Η μεγάλη ευελιξία του Χωροκράτορα στη σύνθεση και εξειδίκευση του χώρου θα μπορούσε να έχει εφαρμογή στην μνημοποίηση (memoization) ροών εκτέλεσης πράξεων. Ένα πρόγραμμα θα μπορούσε να διευθυνσιοδοτήσει τα δεδομένα του και τις πιθανές κατευθύνσεις της ροής του και να διαχειριστεί τα αποτελέσματα μέσω του Χωροκράτορα. Το μέγεθος του πιθανού χώρου των ροών δεν είναι πρόβλημα γιατί με τη συμπίεση διαδρομής και την υλοποίηση ψηφιοφασμάτων μεταβλητού μεγέθους, το κόστος διαχείρισης είναι ελάχιστο. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα μπορεί πολύ γρήγορα να ελέγχει αν μια διαδικασία που πρόκειται να εκτελέσει έχει ήδη καταχωρημένο στο δένδρο αποτέλεσμα.

Αν τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σημαντική ομοιογένεια, θα είναι δυνατή η μερική αντικατάσταση της λειτουργίας του συστήματος από μια απλή απεικόνιση.

## 5.4 Υλικό

Αν μια ιεραρχική διευθυνσιοδότηση υλοποιούνταν στο υλικό των υπολογιστών για γενική χρήση, ακόμη και για περιορισμένο όγκο μνήμης, θα μπορούσε να εκμηδενίσει πολύ από το κόστος διαχείρισης ενός δένδρου. Αυτή η μνήμη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ταχύτερη ιεραρχική διαχείριση δεδομένων.

Με τέτοιο υλικό, η αρχικοποίηση της μνήμης με μια τιμή θα ήταν ακαριαίος, ενώ θα μπορούσε ο επεξεργαστής να εκτελεί πράξεις σε μεταβλητού μεγέθους λέξεις δίνοντας νέα διάσταση στις δυνατότητες προγραμματισμού του συστήματος.

## 5.5 Λειτουργικά Συστήματα

Τα λειτουργικά συστήματα είναι κατ' εξοχήν χώρος διασύνδεσης πολλών και διαφορετικών συστημάτων τα οποία προσφέρουν υπηρεσίες σε εφαρμογές. Το λειτουργικό σύστημα αναλαμβάνει τη διαχείριση πολλών διαφορετικών πόρων. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η κύρια μνήμη, η μνήμη δίσκου, ο χρόνος επεξεργαστή και το δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση στα υποσυστήματα εφαρμόζονται εξειδικευμένες βελτιστοποιήσεις. Πολλές μάλιστα βελτιστοποιήσεις δεν υλοποιήθηκαν παρά μόνο πρόσφατα.

Τα λειτουργικά συστήματα θα μπορούσαν να επωφεληθούν από ένα ώριμο σύστημα ιεραρχικής διαχείρισης τιμών καθώς εκτός του ότι θα βελτιστοποιούσε την απόδοση και θα αποτελούσε πλαίσιο για την αποδοτική υλοποίηση νέων λειτουργιών, θα μπορούσε να δώσει και ένα ενιαίο τρόπο διασύνδεσης των υποσυστημάτων.

Η διαχείριση της μνήμης στην οποία έχουν πρόσβαση οι διεργασίες γίνεται με στατικό βάθος αναφοράς τη σελίδα. Η γρήγορη δέσμευση και αποδέσμευση μεγάλων ποσοτήτων μνήμης είναι δύσκολη διαδικασία, ενώ ήδη μεγάλο μέρος της μνήμης καταλαμβάνεται μόνο και μόνο για τη διαχείριση σελίδων. Ενδεικτικό της ανάγκης αναφορικής βελτιστοποίησης είναι ότι πλέον άρχισαν να εφαρμόζεται και σελιδοποίηση με πολύ μικρότερο βάθος αναφοράς (4MiB).



# Κεφάλαιο 6

## Κατανεμημένα περιβάλλοντα

### 6.1 Από την τοπικότητα στην κατανομή

Στην παρουσίαση του μοντέλου για τα υπολογιστικά συστήματα στο κεφάλαιο 2, θεωρήθηκε ένας κοινός χώρος στον οποίο τα συστήματα έχουν πρόσβαση. Η έξοδος του ενός αποτελούσε είσοδο του άλλου και αυτή η αντιστοιχία εξασφαλιζόταν από την φυσική ταύτιση των περιοχών του χώρου που αποτελούσαν έξοδο και είσοδο, αντίστοιχα. Ας κληθεί αυτό το είδος της διασύνδεσης *τοπική διασύνδεση*. Ορίστηκε, επίσης, σαν χαρακτηριστικό ενός συστήματος και ο διάυλος επικοινωνίας. Σαν έννοια δεν συζητήθηκε καθώς το ρόλο των διαύλων αυτών είχε ο κοινός χώρος της διασύνδεσης. Όσο ο αριθμός των συστημάτων επεκτείνονται στο χώρο, όμως, τόσο μειώνεται η δυνατότητα της διασύνδεσης των συστημάτων με αυτόν τον τρόπο. Η φυσική απόσταση επιβάλλει τη χρήση διαύλων που δεν εκφυλίζονται σε μια κοινή περιοχή χώρου αλλά αποτελούν αυτόνομα συστήματα τα οποία μεταφέρουν τις τιμές των περιοχών από το ένα άκρο τους στο άλλο, δημιουργώντας έτσι ένα ανάλογο της τοπικής διασύνδεσης. Τα συστήματα διασυνδέονται μέσω των διαύλων και ο διάυλος αναλαμβάνει να δημιουργήσει μια εικόνα, ένα αντίγραφο της εξόδου του ενός συστήματος στην είσοδο του άλλου. Με αυτόν τον τρόπο, η σύνθεση των συστημάτων μπορεί να κλιμακωθεί πέρα από τα φυσικά όρια του χώρου που μπορούν να μοιραστούν για την τοπική διασύνδεσή τους. Με τη νέα αυτή *κατανεμημένη διασύνδεση* και σε αντίθεση με τα *τοπικά συστήματα*, προκύπτουν *κατανεμημένα συστήματα*.

Η τοπική και η κατανεμημένη διασύνδεση δεν είναι ισοδύναμες, αν και αυτός φαίνεται να είναι ένας στόχος του σχεδιασμού ενός κατανεμημένου συστήματος. Η κατανεμημένη διασύνδεση παρουσιάζει εγγενείς διαφορές με την τοπική διασύνδεση που κάνουν την ισοδυναμία δυνατή μόνο κατά προσέγγιση και υπό συνθήκες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά βασικά τέτοια ζητήματα.

#### **Χρόνος πρόσβασης.**

Λόγω της πεπερασμένης ταχύτητας της μετάδοσης των αντιγράφων των εξόδων στις εισό-

δους μέσω των διαύλων, υπεισέρχεται ο πολύ σημαντικός παράγοντας της καθυστέρησης της επικοινωνίας των συστημάτων. Παρόλο που το φαινόμενο υπάρχει και στα τοπικά συστήματα, οι διαστάσεις του εκεί είναι σταθερές και περιορισμένες στις διαστάσεις της τοπικότητας. Η καθυστέρηση της πρόσβασης σε όλο τον τοπικό χώρο είναι ομοιογενής. Αντίθετα, σε ένα κατανεμημένο σύστημα ο χρόνος της πρόσβασης κλιμακώνεται με την απόσταση. Επειδή οι διαστάσεις ενός κατανεμημένου συστήματος είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές ενός τοπικού, η καθυστέρηση της πρόσβασης δε μπορεί να θεωρηθεί ούτε σταθερή, ούτε ομοιογενής.

Στα τοπικά συστήματα η καθυστέρηση της επικοινωνίας έχει χρονική διάρκεια συγκρίσιμη με όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες. Επομένως είναι δυνατόν να αγνοηθεί ως ένα ισοδύναμο λειτουργικό βήμα με τα υπόλοιπα. Σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον μια τέτοια παραδοχή θα οδηγούσε το σύστημα σε μια λειτουργία που θα βημάτιζε ακόμη και σε τοπικό επίπεδο με κύκλους χρόνου ανάλογου των συνολικών διαστάσεων της κατανομής.

Ο χρόνος της πρόσβασης δε μπορεί να αγνοηθεί στα κατανεμημένα συστήματα.

#### **Ατομικότητα πρόσβασης.**

Ιδανικά, ο δίαυλοι θα συγχρόνιζαν τις τιμές των εξόδων και των εισόδων με τέτοιο τρόπο ώστε η τοπική και η κατανεμημένη διασύνδεση να είναι ισοδύναμες. Στην πραγματικότητα, η παράλληλη σύνθεση των προορισμών, δηλαδή η τροφοδότηση πολλαπλών εισόδων στο χώρο με ταυτόσημη έξοδο, σε ένα κατανεμημένο σύστημα είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα. Σε μια τοπική διασύνδεση, η φυσική ταύτιση όλων των περιοχών εισόδου εξασφαλίζει την ταυτόχρονη και ταυτόσημη τροφοδότηση όλων των εισόδων. Σε ένα κατανεμημένο σύστημα οι εισοδοί τροφοδοτούνται με αντίγραφα της εξόδου τα οποία λόγω καθυστέρησης δεν παραλαμβάνονται ταυτόχρονα από τις εισόδους. Το αποτέλεσμα είναι, μετά από μια σειρά τέτοιων ασυγχρόνιστων μεταδόσεων, η σειρά των πράξεων που θα εκτελεσθούν στο σύστημα να μην είναι ούτε καθορίσιμη ούτε προβλέψιμη και συνεπώς δε μπορεί να προγραμματιστεί η λειτουργία του συστήματος.

#### **Κλιμακοθετησιμότητα.**

Ένα κατανεμημένο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτει από ένα τοπικό σύστημα αν κάποιες διαστάσεις του θεωρηθούν αντί για σταθερές, μεταβλητές με την προοπτική να πάρουν πολύ μεγάλες τιμές. Τυπικά παραδείγματα είναι οι διαστάσεις της εισόδου και εξόδου και ο παραλληλισμός που προκύπτει με τη διακλάδωση στο χώρο των ροών λειτουργίας του. Ένα σύστημα θεωρείται κλιμακοθετήσιμο (scalable) όταν η επίδοσή του παραμένει τουλάχιστον ανάλογη με τις διαστάσεις του.

Για τη σύνθεση κλιμακοθετήσιμων κατανεμημένων συστημάτων θα πρέπει να εξασφαλισθεί ότι τα επιμέρους δομικά συστατικά και η διασύνδεσή τους είναι κλιμακοθετήσιμα.

## 6.2 Εισαγωγή της κατανομής στο μοντέλο συστημάτων

Μετά τη συνοπτική παρουσίαση της έννοιας του κατανεμημένου συστήματος, θα δοθούν κάποιες κατευθύνσεις για την επέκταση του μοντέλου των υπολογιστικών συστημάτων του κεφαλαίου 2 ώστε να συμπεριληφθεί σε αυτό και η κατανομή. Ο σκοπός του επεκτεταμένου μοντέλου παραμένει ο ίδιος: η οργάνωση της γνώσης της λειτουργίας των συστημάτων και η διευκόλυνση της συστηματικής βελτιστοποίησής τους. Η επέκταση αυτή είναι λιγότερο περιγραφή καθεστώτος, όπως το μέχρι τώρα μοντέλο, και περισσότερο πρόταση κατευθύνσεων.

Τα θέματα που με τα οποία θα ασχοληθούν οι επόμενες ενότητες αντιστοιχούν σε βασικές λειτουργίες που σχετίζονται με τη διασύνδεση των συστημάτων. Οι λειτουργίες αυτές αποτελούν δομικά συστατικά κατά τη σύνθεση κατανεμημένων συστημάτων και η κλιμακοθετησιμότητά τους είναι απαραίτητη.

## 6.3 Κατανεμημένος Χώρος: Καθολικός Χώρος Διευθύνσεων

Μια καλή αφετηρία για μια κατανεμημένη θεώρηση των συστημάτων είναι η άρση της τοπικότητας. Τα συστήματα πλέον δε θα έχουν άμεση πρόσβαση σε όλο το χώρο αλλά για καθολική πρόσβαση θα πρέπει να απευθυνθούν σε άλλα συστήματα. Αυτό μπορεί να συστηματοποιηθεί με τις εξής παραδοχές:

1. Κάθε υποσύστημα έχει πρόσβαση μόνο σε μια περιοχή του συνολικού χώρου, που ορίζει την τοπικότητά του. Αν δύο υποσυστήματα έχουν κοινές περιοχές πρόσβασης τότε αυτά είναι *διασυνδεδεμένα*.
2. Αν ένας προορισμός ενός υποσυστήματος βρίσκεται εντός τοπικότητας τότε είναι δεν είναι *τοπικός*. Αν ανήκει στην τοπικότητα άλλου συστήματος τότε είναι *απομακρυσμένος*. Η πρόσβαση σε απομακρυσμένους προορισμούς γίνεται μόνο με την περίληψη κατάλληλων διασυνδεδεμένων υποσυστημάτων στη ροή λειτουργίας, που προωθούν την πρόσβαση προς τον προορισμό.
3. Το σύνολο των υποσυστημάτων με στην ίδια τοπικότητα, δηλαδή με την ίδια περιοχή πρόσβασης θα θεωρείται ειδικό υποσύστημα και θα καλείται *κόμβος*.
4. Ένα σύστημα που συντίθεται από κόμβους σε ένα χώρο, θα θεωρείται *κατανεμημένο* σύστημα και ο χώρος κατανεμημένος.

Στα τοπικά συστήματα, για τις ανάγκες της αναφοράς στους προορισμούς, ο χώρος διευθυνσιοδοτήθηκε με βάση τη διάταξή του. Η πρώτη προσέγγιση ήταν η γραμμική

διευθυνσιοδότηση, όπως αυτή που χρησιμοποιείται στην πρόσβαση της μνήμης των υπολογιστών. Στη συνέχεια, μέσω της συνθεσιμότητας του χώρου ορίστηκε μια ιεραρχική διάταξή του. Στη συνέχεια, με συνδυασμό της γραμμικής και ιεραρχικής διάταξης ορίστηκε η ψηφιακή διάταξη του χώρου στην οποία βασίστηκε και η ιεραρχική διευθυνσιοδότηση του Χωροκράτορα για τη διαχείριση αναφορών και τιμών. Ο ορισμός του κατανεμημένου χώρου δεν έγινε με βάση κάποια εγγενή του ιδιότητα, αλλά με βάση την απομόνωση των συστημάτων που θεωρήθηκαν σε αυτόν. Επομένως, με φυσικό τρόπο, η ίδια διαδικασία διάταξης μπορεί να ακολουθηθεί και σε έναν κατανεμημένο χώρο και να οδηγήσει στην παραδοχή ενός *καθολικού χώρου διευθύνσεων*.

Η διαχείριση του καθολικού χώρου διευθύνσεων θα ακολουθεί τις ίδιες αρχές με αυτήν ενός τοπικού με τις απαραίτητες τροποποιήσεις που επιβάλλονται από τους περιορισμούς πρόσβασης σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον. Τα συστήματα θα προγραμματίζονται με την ίδια λογική, την αποσύνθεση των προορισμών εισόδου, τον υπολογισμό των αναφορών εξόδου και τη σύνθεση των προορισμών εξόδου. Αλλά τώρα, οι διαδικασίες αυτές θα πρέπει όλες να είναι κλιμακοθετήσιμες.

## 6.4 Διασύνδεση: Σήματα

Σε ένα τοπικό σύστημα, η έξοδος ενός υποσυστήματος ταυτίζεται φυσικά με την είσοδο ενός άλλου. Με αυτήν την έννοια η πράξη της αναφοράς, δεν έχει κάποια διακρίσιμη φυσική υπόσταση. Σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον, η έξοδος θα πρέπει να ακολουθήσει μια διαδρομή ως την είσοδο του διασυνδεδεμένου συστήματος. Από τη στιγμή που ο προορισμός εξόδου θα εγκαταλείψει την τοπικότητα του συστήματος τότε αυτός αποτελεί αναφορά προορισμού μέχρι να βρεθεί στην τοπικότητα του διασυνδεδεμένου συστήματος ως προορισμός εισόδου. Οι ενδιάμεσοι προορισμοί της διαδρομής αντιπροσωπεύουν τη φυσική υπόσταση της αναφοράς και δίνουν διάσταση στην έννοια της πράξης αναφοράς. Στη σύνθεση τοπικών συστημάτων, ανάλογη θεώρηση προκύπτει με τη διαστρωμάτωση, η οποία ουσιαστικά είναι μια μέθοδος τεχνητής απομόνωσης των συστημάτων. Δεδομένης αυτής της φυσικής υπόστασης της αναφοράς και της πράξης αναφοράς, η διασύνδεση δύο συστημάτων χάνει τον ακαριαίο χαρακτήρα της. Η απομόνωση της πρόσβασης καλλιεργεί ένα ύφος αλληλεπίδρασης το οποίο καθιστά την επικοινωνία των συστημάτων εγγενώς διαπραγματεύσιμη.

Η κινούμενη προς τον προορισμό εισόδου αναφορά μπορεί να θεωρηθεί ως μήνυμα με αποστολέα την έξοδο του προηγούμενου και παραλήπτη την είσοδο του επόμενου. Τα μηνύματα αυτά πρέπει με κάποιο τρόπο να φθάνουν στους παραλήπτες τους. Αυτό το μοντέλο είναι αρκετά διαδεδομένο στο σχεδιασμό κατανεμημένων συστημάτων, ακόμη και συστημάτων που δεν επιβάλλεται να είναι κατανεμημένα αλλά στα οποία υιοθετείται αυστηρή διαστρωμάτωση.

Στον κατανεμημένο χώρο με την καθολική διευθυνσιοδότηση που θεωρήθηκε, αυτά τα

μηνύματα θα ανταλλάσσονται μεταξύ των αναφορών εξόδου και των προορισμών εισόδου των συστημάτων. Οι αναφορές και οι προορισμοί σύνθετοι και μπορούν να θεωρηθούν σε οποιοδήποτε βάθος αναφοράς ή ύψος σύνθεσης. Σε κάθε περίπτωση, όμως, σχετίζονται με μια περιοχή του χώρου. Επομένως, προκύπτει ότι οι αποστολείς και οι παραλήπτες των μηνυμάτων διασύνδεσης θα είναι αυθαίρετες περιοχές του χώρου. Αν επιπλέον, για την αναφορά του χώρου χρησιμοποιηθεί η καθολική διευθυνσιοδότηση, τα μηνύματα αυτά θα ονομάζονται σήματα. Ένα **σήμα** θα έχει μια διεύθυνση ως αποστολέα, μια διεύθυνση ως παραλήπτη και μια αναφορά ως περιεχόμενο.

Ο διαπραγματεύσιμος χαρακτήρας της επικοινωνίας με σήματα, δίνει στη διασύνδεση των απομακρυσμένων συστημάτων τη μορφή πρωτοκόλλων αίτησης και παραχώρησης πόρων. Το προγραμματιστικό μοντέλο που περιλάμβανε την "κλήση" μιας συνάρτησης, στο περισσότερο δυναμικό καταναμημένο περιβάλλον παίρνει τη μορφή της "αίτησης" ενός πόρου.

## 6.5 Πρόσβαση καταναμημένων προορισμών

### 6.5.1 Δρομολόγηση Σημάτων

Η πράξη της αναφοράς, που εκτελείται με την αποστολή σημάτων, ουσιαστικά ολοκληρώνεται με την πρόσβαση του προορισμού εισόδου του παραλήπτη. Η πρόσβαση των προορισμών σε καταναμημένο περιβάλλον γίνεται έμμεσα, μέσω μιας αλυσίδας τοπικά διασυνδεδεμένων υποσυστημάτων που καταλήγει στον προορισμό. Το πρόβλημα της δρομολόγησης των σημάτων προς τον προορισμό τους είναι σημαντικό μέρος του σχεδιασμού ενός καταναμημένου συστήματος καθώς η διαδικασία θα πρέπει να είναι κλιμακοθετήσιμη.

Το μέχρι στιγμής μοντέλο για τα καταναμημένα συστήματα υποδεικνύει ήδη μια κατεύθυνση προς τη δρομολόγηση. Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, τα συστήματα συνθέτουν στο χώρο και στο χρόνο τους προορισμούς εξόδου τους. Δεδομένου τώρα ότι τα συστήματα διαθέτουν πρόσβαση σε περιορισμένο χώρο, για να συνθέσουν τον προορισμό εξόδου τους θα πρέπει οπωσδήποτε να αυξήσουν το ύψος του μέχρι να βρεθεί στην τοπικότητά τους και στη συνέχεια, με σύνθεση στο χρόνο (βρόχο) να αναφέρουν τους αυτούς τους υψηλούς επιμέρους προορισμούς σε άλλα συστήματα που με την ίδια διαδικασία θα σχηματίσουν αλυσίδες που τελικά θα φθάσουν στους τελικούς προορισμούς. Αυτή η ιεραρχική σύνθεση, αυξάνει εκθετικά με το βάθος των αναφορών. Επομένως από ένα μόνο σύστημα είναι δυνατόν να συντεθεί ένας πολύ μεγάλος προορισμός αφού σε κάθε βήμα οι νέοι κόμβοι αυξάνουν τον παραλληλισμό της πρόσβασης.

Επομένως, η δρομολόγηση αν έχει αυτήν την ιεραρχική μορφή, όπου κάθε κόμβος αναφέρει τον παραλήπτη στους γείτονες κόμβους, τότε πολύ γρήγορα ένα σήμα θα μπορέσει να φτάσει σε πολύ μεγάλο πλήθος παραληπτών. Για την αποδοτική δρομολόγηση, όμως, πρέπει η κατανομή των διασυνδεδεμένων κόμβων στον χώρο να είναι τέτοια, έτσι ώστε να καλύπτεται ο χώρος τόσο γρήγορα όσο μπορούν να δημιουργηθούν νέες αναφορές.

Δηλαδή, η ροή των σημάτων να διακλαδώνεται με εκθετικό τρόπο αλλά ταυτόχρονα να μην αναδιπλώνεται στον ίδιο χώρο.

Πράγματι, οι πιο διαδεδομένες μορφές κλιμακοθετήσιμης δρομολόγησης στο χώρο των κατανεμημένων συστημάτων περιλαμβάνουν μια δενδρική όψη του συνολικού χώρου από κάθε αποστολέα κόμβο, που με εκθετικά βήματα μπορεί να δρομολογήσει πολύ γρήγορα προς οποιοδήποτε σημείο του χώρου (Chord, Pastry). Επιπλέον, αυτές οι δενδρικές όψεις αλλάζουν για κάθε κόμβο έτσι ώστε να ισοκατανέμεται η δραστηριότητα της δρομολόγησης σε όλο το χώρο. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται κατ' εξοχήν στα δομημένα peer-to-peer (p2p) δίκτυα. Αν η δενδρική όψη του χώρου είναι κοινή για όλους, τότε η ιεραρχική δρομολόγηση που προκύπτει είναι μεν αποδοτική στην ταχύτητα πρόσβασης των προορισμών, αλλά οι υψηλότεροι στην καθολική ιεραρχία κόμβοι αποκτούν και υψηλότερο φόρτο εργασίας επειδή αποτελούν κοινό σημείο περισσοτέρων διαδρομών.

## 6.6 Σύνθεση κατανεμημένων προορισμών

### 6.6.1 Το πρόβλημα της αναφοράς κατανεμημένων προορισμών

Η δρομολόγηση δεν είναι το μόνο πρόβλημα στην σύνθεση του προορισμού εξόδου ενός συστήματος σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον. Η δρομολόγηση των σημάτων δίνει λύση στο πρόβλημα της πρόσβασης του προορισμού. Παραμένει, όμως, το πρόβλημα της αναφοράς. Δηλαδή, το πρόβλημα του προσδιορισμού των προορισμών. Ο προσδιορισμός των προορισμών εξόδου σαν διαδικασία βρίσκεται στον πυρήνα της λειτουργίας ενός συστήματος και ίσως κανείς θα περίμενε η επέκτασή του από τα τοπικά στα κατανεμημένα συστήματα να είναι προφανής και τετριμμένη. Οι διαστάσεις, όμως, των κατανεμημένων προορισμών εισόδου και εξόδου δεν επιτρέπουν απλή μεταφορά της λειτουργικότητας.

Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί το υποσύστημα πρόσβασης στο περιεχόμενο αρχείων ενός δίσκου. Στα πλαίσια του συνολικού συστήματος διαχείρισης του περιεχομένου μιας συστοιχίας δίσκων, το υποσύστημα πρόσβασης δέχεται κλήσεις από διάφορες εφαρμογές με είσοδο το όνομα του αρχείου και έξοδο περιοχή μνήμης με το περιεχόμενο του αρχείου. Προς διευκόλυνση του υποσυστήματος πρόσβασης, η περιοχή της μνήμης όπου θα επιστραφεί η έξοδος υποδεικνύεται στην είσοδο. Το υποσύστημα μέχρι στιγμής λειτουργεί απλά. Δίνει το όνομα του αρχείου σε ένα υποσύστημα που βρίσκει τα περιεχόμενα στο δίσκο και αντιγράφει τα περιεχόμενα αυτά στην έξοδο που του είναι ήδη γνωστή από την είσοδο. Η λειτουργικότητα συμπληρώνεται ως εξής: Το υποσύστημα κρατά αρχείο με το ποιος ζήτησε τί, έτσι ώστε όταν το αρχείο αλλάξει, να ειδοποιήσει αυτούς που το έχουν ζητήσει ότι το αντίγραφο που έχουν είναι άκυρο. Οι καταχωρημένοι στο αρχείο μπορούν να ζητήσουν σε οποιοδήποτε χρόνο την αφαίρεσή τους από αυτό και να μην ενημερωθούν.

Όσο το σύστημα παραμένει τοπικό, το υποσύστημα πρόσβασης μπορεί να επιστρέφει μαζί με τα περιεχόμενα κάθε αρχείου και ένα τεκμήριο εγκυρότητας, κοινό για όλους

τους καλούντες. Όταν κάποια εφαρμογή θελήσει να επιβεβαιώσει την εγκυρότητα του αντιγράφου της μπορεί να διαβάσει το τεκμήριο. Υπάρχει ένα τεκμήριο για κάθε αρχείο, εκτός και αν βελτιστοποιηθεί αναφορικά το υποσύστημα οπότε περιοχές αρχείων με την ίδια κατάσταση εγκυρότητας οπότε χρησιμοποιούνται ακόμη λιγότερα.

Ας υποθεθεί ότι το σύστημα είναι κατανεμημένο. Σε αυτήν την περίπτωση υπεισέρχονται δύο σημαντικές αλλαγές. Ο αριθμός των εφαρμογών που καλούν το υποσύστημα πρόσβασης είναι δυνητικά πολύ μεγάλος και επίσης, δεν έχουν πρόσβαση στην τοπικότητα του υποσυστήματος πρόσβασης ώστε να τους διανείμει τα τεκμήρια εγκυρότητας. Η προφανής λύση του να καταχωρεί όλους όσους έχουν παραλάβει αρχείο και στη συνέχεια να τους ειδοποιεί δεν είναι κλιμακοθετήσιμη. Το πρόβλημα της ειδοποίησης λύνεται με ιεραρχική δρομολόγηση όπως περιγράφηκε. Το πρόβλημα της σύνθεσης των προορισμών χρειάζεται αναφορά στους προορισμούς.

### 6.6.2 Εξαρτήσεις

Η λύση στο πρόβλημα της αναφοράς κατανεμημένων προορισμών έχει κι αυτή ιεραρχικά κατανεμημένο χαρακτήρα. Εφόσον το υποσύστημα πρόσβασης δεν μπορεί να καταχωρήσει όλη την πληροφορία για να αναφέρει τους προορισμούς της έξοδου του, αυτοί οι προορισμοί θα πρέπει να κατανεμηθούν στο χώρο. Ένας φυσικός τρόπος να γίνει αυτό, αντιστοιχεί στην αναφορική βελτιστοποίηση που έχει συζητηθεί προηγουμένα. Η πληροφορία που απαιτείται για την αναφορά των προορισμών, δε δημιουργήθηκε στην είσοδο του υποσυστήματος πρόσβασης, συγκεντρώθηκε εκεί. Σήματα από πολλές απομακρυσμένες περιοχές του χώρου, ακολουθώντας ολοένα και συγκλίνουσες διαδρομές προς τον ίδιο προορισμό, κατέληξαν όλες σε μία είσοδο. Στα πλαίσια της αναφορικής βελτιστοποίησης, ο σχεδιασμός δε θα απέρριπτε αυτήν την πληροφορία της προέλευσης, για να την ξαναανακαλύψει όταν χρειαστεί να αναφερθεί σε αυτόν στην έξοδο. Αυτή η τακτική τώρα είναι κρίσιμη για την κλιμακοθετησιμότητα. Με την αίτηση του αρχείου, κάθε εφαρμογή δημιουργεί μια *εξάρτηση* από το υποσύστημα πρόσβασης. Αντί να καταγράφει η πηγή της εξάρτησης τους εξαρτώμενους, είναι αποδοτικότερο να καταγράφει κάθε εξαρτώμενος της εξαρτήσεις του.

### 6.6.3 Ίχνη Διαδρομών

Η εξαρτήσεις αυτές ακολουθούν το δρόμο των αιτήσεων. Αν κάθε σήμα που αιτείται μιας εξάρτησης αφήσει το ίχνος της στη διαδρομή από όπου θα περάσει, τότε η εξάρτηση αποσυντίθεται σε επιμέρους εξαρτήσεις, η καταγραφή των οποίων κατανέμεται στο χώρο. Επειδή, οι εξαρτήσεις ακολουθούν ίχνη που καθορίζονται από τη δρομολόγηση και αφού η δρομολόγηση ήδη έχει βελτιστοποιηθεί για κλιμακοθετησιμότητα, τότε και η κατανομή των εξαρτήσεων θα μπορεί να κλιμακωθεί ανάλογα.

Στην είσοδο του υποσυστήματος πρόσβασης θα φθάσει ως αναφορά των εξαρτήσεων η κορυφή ενός δένδρου, και πολύ απλά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό το δένδρο για να

αποσταλούν σήματα σε όλους τους εξαρτώμενους προορισμούς, είτε διατηρώντας τις εξαρτήσεις, είτε καταστρέφοντάς τες στη διαδικασία. Εάν θεωρηθεί ότι σε ένα καταναμημένο χώρο πολλές εφαρμογές δημιουργούν πολλές εξαρτήσεις από πολλές διευθύνσεις τότε η υπέρθεση όλων αυτών των δένδρων δημιουργεί ένα γράφο εξαρτήσεων που αντιστοιχεί σε καταγεγραμμένα ίχνη διαδρομών σημάτων.

## 6.7 Διαχείριση επικοινωνίας

Μέχρι αυτό το σημείο, η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων περιοχών ενός καταναμημένου χώρου περιέχει την ιεραρχική δρομολόγηση σημάτων για πρόσβαση σε προορισμούς και την ιεραρχική καταγραφή ιχνών διαδρομών σημάτων για την δημιουργία καταναμημένων αναφορών προορισμών. Οι αναφορές αυτές είναι απαραίτητες για την πρόσβαση προορισμών μεγάλης κλίμακας. Η δρομολόγηση λύνει μόνο το πρόβλημα της πρόσβασης. Για το πρόβλημα της αναφοράς θα πρέπει να δημιουργηθούν εξαρτήσεις. Ως μέρος του χώρου, κάθε κόμβος θα πρέπει να αναλάβει να δρομολογεί σήματα και να συνθέτει εξαρτήσεις ως μέλος της ιεραρχικής διαδρομής επικοινωνίας μεταξύ τρίτων απομακρυσμένων κόμβων. Στην ενότητα αυτή συζητείται το πώς το πλαίσιο του Χωροκράτορα για τη διαχείριση αναφορών μπορεί να αποτελέσει ένα πυρήνα για την αρχιτεκτονική υλοποίηση αλλά και βελτιστοποίηση ενός καταναμημένου περιβάλλοντος.

### 6.7.1 Το κόστος της συγκέντρωσης επικοινωνίας

Η εικόνα του καταναμημένου χώρου στον οποίο πολλές εφαρμογές αιτούνται και προσφέρουν υπηρεσίες σε όλο το χώρο, κυριαρχείται από σήματα και ίχνη που διασταυρώνονται σε κάθε κόμβο. Κάθε κόμβος αποτελεί δρομολογητή σημάτων και εξαρτήσεων. Αναπόφευκτα, όταν σε μια περιοχή συγκεντρώνεται πολλή κίνηση είτε επειδή περιέχει δημοφιλείς προορισμούς είτε επειδή περιέχει απαιτητικές εφαρμογές, ο όγκος των δεδομένων που πρέπει να διαχειρισθούν οι μεμονωμένοι κόμβοι μεγαλώνει. Ιδιαίτερα στις μεγάλες κλίμακες συστημάτων, ένας προορισμός καθολικού ενδιαφέροντος μπορεί να συγκεντρώσει σε μια πολύ μικρή περιοχή κίνηση από ολόκληρη την επικράτεια του καταναμημένου συστήματος. Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται συχνά στο Διαδίκτυο (Internet). Για παράδειγμα, ένας δημοφιλής ιστότοπος επικαιρότητας (news website), η σελίδα μιας μεγάλης διοργάνωσης όπως οι ολυμπιακοί αγώνες, ή ο τόπος προμήθειας ενός ευρέως διαδεδομένου λογισμικού προϊόντος, αμέσως μετά την διάθεσή του στο κοινό. Ήδη στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων μαζικής διανομής περιεχομένου χρησιμοποιούνται ιεραρχικές προσεγγίσεις έτσι ώστε η αυθεντική πηγή να μη χρειάζεται να αναλάβει καθολικών διαστάσεων κόστος διαχείρισης.

Όταν η αναμενόμενη κίνηση είναι γνωστή, τότε η ιεράρχηση μπορεί να καθοδηγηθεί στα πλαίσια της εξύψωσης των προορισμών για την αποφυγή του αναφορικού κορεσμού. Σε ένα εγγενώς καταναμημένο μοντέλο σχεδιασμού συστημάτων, όμως, η αναμενόμενη κίνηση



δε μπορεί να θεωρείται γνωστή, γιατί έτσι περιορίζει τις δυνατότητες προγραμματισμού του και την ευελιξία της λειτουργίας του.

### 6.7.2 Αναφορική βελτιστοποίηση

Μελετώντας το φαινόμενο της συγκεντρωμένης κίνησης, παρατηρείται ότι τα δεδομένα παρουσιάζουν σημαντική κανονικότητα. Είτε οι προορισμοί θα απευθύνονται σε μικρές περιοχές είτε οι αποστολές θα αποτελούν μικρές τοπικότητες. Αυτό το εγγυάται η κλιμακοθετήσιμη δρομολόγηση. Εάν δεν εστιάζεται το ένα άκρο της επικοινωνίας σε μικρή περιοχή, τότε η δρομολόγηση θα ισοκατανείμει την κίνηση σε όλο το χώρο. Εφόσον τα δεδομένα παρουσιάζουν κανονικότητα, εάν το σύστημα βελτιστοποιηθεί αναφορικά χρησιμοποιώντας μια δομή σαν αυτήν του Χωροκράτορα, Η αυξημένη κίνηση μπορεί να εξουδετερωθεί και ενδέχεται να αποτελεί και ευνοϊκότερη περίπτωση για την επίδοση του συνολικού συστήματος από μια λιγότερο συγκεντρωμένη κίνηση.

Τα σήματα που απευθύνονται στον ίδιο πόρο ενός κατανεμημένου συστήματος παρουσιάζουν ομοιότητες. Η πληροφορία που περιέχουν τυπικά περιλαμβάνει την ταυτότητα (προορισμό) της εφαρμογής που αιτεί και το τί αιτεί. Η εφαρμογή μπορεί να συμπτύξει τις αιτήσεις της, εξυπνώντας τις αναφορές σε οποιαδήποτε πεδία είναι εφικτό. Κατά τη διαδρομή, τα σήματα από διαφορετικούς αποστολείς πάλι είναι δυνατόν να μειωθούν, ειδικά όσο συγκλίνουν προς μια κοινή περιοχή. Βέβαια, για να γίνει αυτό, χρειάζεται πρόσβαση σε πολλά σήματα ταυτόχρονα. Αυτό μπορεί να ρυθμιστεί εάν κάθε κόμβος συγκεντρώνει έναν αριθμό σημάτων πριν αρχίσει την αποστολή τους. Ανάλογα με την κίνηση, μπορεί η αυξομειώνεται η διάρκεια της συγκέντρωσης των σημάτων για να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ όγκου και καθυστέρησης.

Η ίδια μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και για τη διαχείριση των εξαρτήσεων, αλλά αυτή τη φορά η σύνθεση των αναφορών γίνεται στο χώρο. Η ίδιες οι εφαρμογές μπορούν να αιτούνται μαζικά τις εξαρτήσεις τους, όταν αυτό είναι εφικτό. Στην πορεία, εξαρτήσεις που είναι αναφορικά ισοδύναμες μπορούν να μειωθούν.

Τελικά, η λειτουργία ενός κατανεμημένου συστήματος όπως περιγράφηκε καθίσταται δυνατή και αποδοτική. Η ιεραρχική δρομολόγηση επιτρέπει την κατανομή της κίνησης των σημάτων και των εξαρτήσεων σε όλο το χώρο, υπό κανονικές συνθήκες. Όταν αρχίζουν και δημιουργούνται συγκεντρώσεις που καταστρέφουν την ομαλότητα της κατανομής, η κανονικότητα των δεδομένων που προκύπτει δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να βελτιστοποιήσει αναφορικά τη λειτουργία του και να δημιουργήσει τάση για εξουδετέρωση της ανισορροπίας της κατανομής.

## 6.8 Διαχείριση κατανεμημένου χώρου

Βασικό στοιχείο των κατανεμημένων συστημάτων που θεωρήθηκαν είναι η κοινή,

καθολική διευθυνσιοδότηση του χώρου τους. Με αυτήν αποκτούν μια δομή δυναμικά διαχειρίσιμη και με αυξημένες δυνατότητες και ευελιξία στον προγραμματισμό συστημάτων. Το μοντέλο για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, μπορεί να εφαρμοσθεί και σε καταναμημένους χώρους. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν επιφανειακά μερικές κατευθύνσεις για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της δυναμικής και ιεραρχικής διαχείρισης του χώρου. Τα καταναμημένα συστήματα δεν είναι αναγκαίο να θεωρηθούν ως φυσικά απομακρυσμένοι δικτυακοί κόμβοι. Οποιοδήποτε σύστημα με πολύπλοκη τοπολογία που επιβάλλει πολλαπλή διαστρωμάτωση και απομόνωση των υποσυστημάτων μπορεί να θεωρηθεί καταναμημένο σύστημα (όπως ορίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου).

### 6.8.1 Μαζική διαχείριση χαρακτηριστικών αντικειμένων

Ένα αντικείμενο κατέχει κάποια χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να περιληφθούν στην αναπαράστασή του στο χώρο λειτουργίας των υπολογιστικών συστημάτων. Δεν έχουν, όμως, όλα τα χαρακτηριστικά το ίδιο ύφος. Κάποια χαρακτηριστικά έχουν το ύφος του περιεχομένου, δηλαδή έχουν μεγάλη έκταση και σπανιότητα, ενώ άλλα χαρακτηριστικά έχουν το ύφος της κατάστασης, που μπορεί να πάρει λίγες μόνο τιμές. Στην περίπτωση των χαρακτηριστικών κατάστασης, είναι σκόπιμο να διευθυνσιοδοτηθούν ξεχωριστά σε μία γραμμική διάταξη που αντιπροσωπεύει το αναγνωριστικό του αντικειμένου που τα κατέχει. Έτσι, όσο αυξάνεται ο αριθμός των αντικειμένων, τόσο περισσότερα αντικείμενα θα έχουν την ίδια τιμή στα χαρακτηριστικά κατάστασης, επιτρέποντας στο σύστημα να βελτιστοποιήσει την αναφορά τους.

### 6.8.2 Ιεραρχική διαχείριση αντικειμένων

Κάθε αντικείμενο καταλαμβάνει μια περιοχή του χώρου και αυτό αποτυπώνεται στο όνομά του, τη διεύθυνση την οποία έχει. Δεδομένης της ιεραρχικής διευθυνσιοδότησης του Χωροκράτορα, οι αναδρομικές διευθυνσιοδοτήσεις αντικειμένων μέσα στην περιοχή άλλων αντικειμένων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ιεραρχίας.

### 6.8.3 Εξαγωγή και επιβολή μακροσκοπικών ιδιοτήτων

Το σχήμα απόδοσης τιμών που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 3 για την μεθόδευση της ιεραρχικής διαχείρισης των δεδομένων, ήταν η αντικατάσταση των τιμών που αποδίδουν οι υψηλότεροι κόμβοι με αυτήν που αποδίδουν οι χαμηλότεροι. Αυτή όμως είναι μια σύμβαση που δεν είναι αναγκαία και μπορεί πολύ εύκολα και διαφανώς να αλλάξει. Στη γενική περίπτωση η τιμή μιας περιοχής είναι αυθαίρετη συνάρτηση όλων των τιμών των περιοχών που την περιέχουν.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σχήμα της εξειδίκευσης των τιμών. Αν η τιμή κάθε διεύθυνσης είναι ένα ψηφίο, τότε παράλληλα με την εξειδίκευση των προορισμών καθώς

προχωρεί το αναφορικό βάθος, μπορεί να συντίθεται και μια ψηφιολέξη που αναπαριστά την τιμή του τρέχοντος προορισμού. Έτσι κάθε κόμβος συνεισφέρει στην τιμή των κόμβων που περιέχει, τιμή με μέτρο ανάλογο του ύψους του.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό και την παρακολούθηση μακροσκοπικών μεγεθών σε ένα κατανεμημένο σύστημα. Ένα φυσικό ανάλογο είναι αυτό της πυκνότητας μάζας. Ένα μακροσκοπικό αντικείμενο έχει κάποια μέση πυκνότητα μάζας που είναι μακροσκοπικό μέγεθος. Αν το αντικείμενο είναι ανομοιογενές, τότε η μέση πυκνότητα των δύο μισών του δεν είναι η ίδια και το ίδιο ισχύει αναδρομικά. Μπορούμε να αλλάξουμε τη μέση πυκνότητα συμπιέζοντας το αντικείμενο. Αν θεωρηθεί ομοιόμορφη η συμπίεση, η πυκνότητα στο εσωτερικό του διατηρεί τις αρχικές της αναλογίες. Αντίστοιχα, σε ένα κατανεμημένο χώρο διευθύνσεων, όπου κάθε κόμβος εξειδικεύει την τιμή του γονέα του, θα μπορούσε επιβληθεί μια μακροσκοπική μεταβολή των τιμών όλου του χώρου με μία μόνο πρόσβαση της ρίζας. Στην περίπτωση που η ιδιότητα του χώρου υπό αναπαράσταση έχει ομαλή κατανομή, η συνεισφορά μεγάλων υποπεριοχών θα είναι μηδενική δίνοντας μεγάλο κέρδος στην αναφορική βελτιστοποίηση.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής θα μπορούσε να είναι η διαχείριση πολιτικής δρομολόγησης εργασιών σε μεγάλη κλίμακα. Όσο η κατάσταση παραμένει ομογενής, η προτεραιότητα πολύ μεγάλου αριθμού εργασιών θα μπορούσε να γίνει με λίγους μόνο κόμβους. Σε οποιαδήποτε περιοχή θα μπορούσε άμεσα και σε οποιοδήποτε βάθος να γίνει αυξομείωση των προτεραιοτήτων. Μακροσκοπικά θα μπορούσαν να επιβληθούν αλλαγές προτεραιοτήτων σε πολύ μαζικές ομάδες διεργασιών.

Σε μια αντίστροφη διαδικασία, όπου η πολιτική δρομολόγησης καθορίζεται στους βαθύτερους προορισμούς πρώτα και μετά γίνεται η ιεράρχησή της, οι υψηλοί ιεραρχικά κόμβοι θα μπορούσαν να προσφέρουν ένα μέσο παρακολούθησης σε μακροσκοπικό επίπεδο της λειτουργιών στο χώρο.



# Επίλογος

Η επιβολή ενός καθολικού σχήματος αναφορικής οργάνωσης στα συστήματα κρίθηκε απαραίτητη προϋπόθεση για την κλιμακοθετησιμότητα της σύνθεσής τους. Αυτή η επιβολή απαιτεί παρέμβαση στις ήδη υπάρχουσες συστημικές δομές, γεγονός που κάνει δύσκολη την εφαρμογή του και απαιτεί τη δημιουργία ενός ελεγχόμενου περιβάλλοντος για την παραπέρα μελέτη. Επομένως, οι μελλοντικές εργασίες θα στοχεύσουν στη συνδυασμένη εξέλιξη του θεωρητικού μοντέλου και του συστημικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος του Χωροκράτορα. Προτεραιότητα της ανάπτυξης του συστήματος αυτού θα είναι η κατάλληλη διασύνδεση με τις υπάρχουσες συστημικές δομές για να εξασφαλισθεί η πρόσβαση σε πραγματικές εφαρμογές και περιβάλλοντα. Ιδανικά, το μοντέλο θα παρέχει ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη νέων τεχνικών και την ενσωμάτωση των γνωστών, ενώ το συστημικό περιβάλλον θα μεταφέρει τη θεωρία στην πράξη και θα παρέχει τα δεδομένα που θα τροφοδοτούν νέους κύκλους ερευνητικής δραστηριότητας.



# Βιβλιογραφία

- [Ale01] Alessandro Rubini and Jonathan Corbet. *Linux Device Drivers, 2nd Edition*. O'Reilly, 2001.
- [Dan03] Daniel P. Bovet and Marco Cesati. *Understanding the Linux Kernel, 2nd Edition*. O'Reilly, 2003.
- [HK03] Hung-Chang Hsiao and Chung-Ta King. A tree model for structured peer-to-peer protocols. In *3rd International Symposium on Cluster Computing and the Grid*, page 336, 2003.
- [HP02] John L. Hennessy and David A. Patterson. *Computer Architecture: A Quantitative Approach, 3d Edition*. Morgan Kaufmann, 2002.
- [inta] IA-32 Intel Architecture Optimization Reference Manual.
- [intb] IA-32 Intel Architecture Software Developer's Manual, Volumes 1, 2A, 2B, and 3.
- [PH97] David A. Patterson and John L. Hennessy. *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*. Morgan Kaufmann, 1997.
- [SMK<sup>+</sup>01] Ion Stoica, Robert Morris, David Karger, Frans Kaashoek, and Hari Balakrishnan. Chord: A scalable Peer-To-Peer lookup service for internet applications. In *Proceedings of the 2001 ACM SIGCOMM Conference*, pages 149–160, 2001.
- [Ste93] W. Richard Stevens. *TCP/IP illustrated (vol. 1): the protocols*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1993.
- [Ste97] W. Richard Stevens. *UNIX Network Programming: Networking APIs: Sockets and XTI*. Prentice Hall PTR, 1997.
- [WWWK97] Jim Waldo, Geoff Wyant, Ann Wollrath, and Sam Kendall. A note on distributed computing. In *Mobile Object Systems: Towards the Programmable Internet*, pages 49–64. Springer-Verlag: Heidelberg, Germany, 1997.