

Σειρά Ασκήσεων 13: DRAM, Διαφύλλωση, Μονάδες Εισόδου/Εξόδου (I/O), DMA

Από την 12η για την 13η εβδομάδα του Εξαμήνου

Βιβλίο: Για μερικά από τα θέματα αυτής της σειράς ασκήσεων, διαβάστε την §5.2 "Τεχνολογίες Μνήμης" (σελ. 453-459), καθώς και (κάπως πιο εγκυκλοπαιδικά) τις §1.4 (Κάτω από το Κάλυμα) και §1.5 (Τεχνολογίες Κατασκευής Επεξεργαστών και Μνημών), σελίδες 45-58. Τα άλλα θέματα αυτής της σειράς ασκήσεων, που είναι και τα περισσότερα, δεν υπάρχουν σε αυτή την έκδοση του βιβλίου.

13.1 SRAM, DRAM, Προσπελάσεις Συνεχόμενων Λέξεων

SRAM-DRAM: Όπως είπαμε στο μάθημα, τα chips μνήμης είναι οργανωμένα εσωτερικά σε κάμποσα blocks από στοιχεία μνήμης. Στις "στατικές" μνήμες (SRAM - Static Random Access Memory), τα στοιχεία μνήμης είναι flip-flops (με 6 transistors καθένα), και η αποθηκευμένη πληροφορία διατηρείται όσο είναι αναμένη η τάση τροφοδοσίας. Στις "δυναμικές" μνήμες (DRAM - Dynamic Random Access Memory), τα στοιχεία μνήμης είναι πυκνωτές (capacitors --ένας πυκνωτής και ένα transistor ανά bit), όπου αποθηκεύεται δυναμικά η πληροφορία. Λόγω του ρεύματος διαρροής, η πληροφορία αυτή (φορτίο στον πυκνωτή), χάνεται μέσα σε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms). Για να διατηρηθούν τα περιεχόμενα της DRAM πρέπει να τα αναζωογονούμε (refresh), δηλαδή να τα διαβάζουμε και να τα ξαναγράφουμε, κάθε περίπου 8 με 16 ms.

Μέγεθος (Χωρητικότητα - Gbits): Παρά το μειονέκτημά τους αυτό, και παρά την μεγαλύτερη καθυστέρηση προσπέλασης που έχουν, οι DRAM διαθέτουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα: προσφέρουν περίπου μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη χωρητικότητα (capacity, Mbits --όχι "capacitance") ανά chip σε σχέση με τις SRAM. Έτσι, οι DRAM χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα για την κατασκευή της κύριας μνήμης (main memory) των υπολογιστών, ενώ οι SRAM χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα για τις κρυφές μνήμες (cache memories), λόγω της χαμηλότερης καθυστέρησής τους. Με την πρόοδο της τεχνολογίας κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (chips), η χωρητικότητα των chips μνήμης συνεχώς αυξάνονταν. Τις προηγούμενες δεκαετίες, ο ρυθμός αυτής της αύξησης ήταν: **τετραπλασιασμός (x4) χωρητικότητας κάθε τρία (3) χρόνια**, όμως αυτή τη δεκαετία αυτός έχει πέσει. Το 2013, η τεχνολογία των DRAM βρισκονταν γύρω στα 2 έως 16 Gbits ανά chip, αλλά και το 2017 μιά ματιά π.χ. στο www.micron.com δείχνει παρόμοιες χωρητικότητες. Εμπορικά, την μνήμη των υπολογιστών τη βρίσκει κανείς σε μικρές πλακέτες (modules - DIMM), που η καθεμιά έχει πάνω της συνήθως 8 (ή 9) ή 16 (ή 18) chips. Έτσι, π.χ., ένα module με 8 chips των 256M x 8 bits = 2 Gbits καθένα είχε συνολική χωρητικότητα 16 Gbits = 2 GBytes. Όταν τα

chips είναι 9 αντί 8, ή 18 αντί 16, τα επιπλέον chips χρησιμοποιούνται για αποθήκευση κωδικών ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων (ECC - error correction codes).

Γραμμές και Στήλες: Μέσα στο chip της DRAM, το κάθε block είναι ένας περίπου τετράγωνος πίνακας από στοιχεία μνήμης, με γύρω στις 1024 ή παραπάνω γραμμές επί 1024 ή παραπάνω στήλες. Για να διαβάσουμε ένα στοιχείο μνήμης επιλέγουμε πρώτα τη γραμμή στην οποία ανήκει αυτό, δίνοντας τη διεύθυνση γραμμής (row address) στον αποκωδικοποιητή γραμμής, ο οποίος ανάβει ένα σύρμα (word line) που διατρέχει και ενεργοποιεί την επιθυμητή γραμμή. Όταν ανάψει το σύρμα αυτό, όλα τα στοιχεία μνήμης (bits) πάνω στη γραμμή αυτή διαβάζονται, δηλαδή τοποθετούν το καθένα την τιμή του (περιεχόμενό του) στο αντίστοιχο σύρμα στήλης (bit line) που διατρέχει τη στήλη του. Έτσι, στο κάτω μέρος του block της μνήμης, στις απολήξεις των συρμάτων στήλης, εμφανίζεται το περιεχόμενο όλων των bits που είναι αποθηκευμένα στην επιλεγείσα γραμμή. Ένας μεγάλος πολυπλέκτης επιλέγει τότε το bit που εμείς θέλαμε, βάσει της διεύθυνσης στήλης (column address), και το δίνει προς τα έξω. Η όλη αυτή διαδικασία, από την είσοδο της διεύθυνσης γραμμής μέχρι να βγεί το τελικό bit στην έξοδο, διαρκεί αρκετό χρόνο (γύρω στα 30 ns για τις σημερινές DRAM, από τα pins διεύθυνσης μέχρι τα pins δεδομένων του chip της DRAM, ενώ αυτή αυξάνει σημαντικά όταν προστεθεί και η καθυστέρηση από το chip του επεξεργαστή μέχρι το chip της DRAM και πίσω).

Γειτονικές Προσπελάσεις (sequential Accesses): Εάν μετά την παραπάνω διαδικασία, όμως, θέλουμε να διαβάσουμε και μερικά από τα "διπλανά" bits αυτού που μόλις διαβάσαμε, τότε αυτό μπορεί να γίνει πολύ γρηγορότερα: τα bits αυτά είναι "έτοιμα", στις απολήξεις των συρμάτων στήλης, και το chip της μνήμης μπορεί να τα αποστείλει στον αιτούντα την ανάγνωση (π.χ. τον επεξεργαστή) πολύ γρήγορα το ένα μετά το άλλο (περίπου 1 bit κάθε μισό με 1 ns σε καθένα από τα σύρματα δεδομένων (data) για τις σημερινές DRAM). Εκμεταλλευόμενοι τη δυνατότητα αυτή, πετυχαίνουμε να προσπελάσουμε μεγάλες ομάδες γειτονικών λέξεων (π.χ. cache lines (blocks)) με πολύ μικρή επιπλέον επιβάρυνση σε σχέση με την αρχική καθυστέρηση προσπέλασης της πρώτης λέξης της ομάδας.

13.2 Κόστος Εκκίνησης και Παροχή (Startup Cost versus Throughput)

Η παραπάνω περίπτωση προσπελάσεων σε γειτονικά bits στην ίδια γραμμή μιάς DRAM είναι παράδειγμα μιάς γενικότερης περίπτωσης: πολλές φορές, υπάρχει ένα σημαντικό **Κόστος Εκκίνησης** (start-up cost / overhead) για μιάν εργασία (π.χ. μεταφορά δεδομένων) που είναι (σχεδόν) ανεξάρτητο του μεγέθους της εργασίας (π.χ. του όγκου των δεδομένων), και στη συνέχεια υπάρχει ένα μικρότερο (ή πολύ μικρότερο) **επιπλέον (Διαφορικό) Κόστος** (incremental cost) για την κάθε επιπλέον μονάδα εργασίας (π.χ. για κάθε επιπλέον Byte ή λέξη δεδομένων που μεταφέρονται). Το επιπλέον, διαφορικό αυτό κόστος ανά μονάδα έργου πολλές φορές το μετράμε μέσω του αντιστρόφου του: ο **Ρυθμός Παραγωγής** του έργου, ή η **Παροχή** (throughput) (π.χ. των μεταφερόμενων δεδομένων) είναι η ποσότητα του έργου που παράγεται ανά μονάδα χρόνου, ή ο όγκος των δεδομένων που μεταφέρονται ανά μονάδα χρόνου.

Γιά παράδειγμα, θεωρήστε ένα DRAM chip με οργάνωση $x8$ (π.χ. $256M \times 8$), δηλαδή ένα chip με 8 data pins, που λειτουργεί σε συγχρονισμό (SDRAM - Synchronous DRAM) με ένα ρολοϊ 500 MHz (άρα με περίοδο ρολογιού 2 ns) (το παράδειγμα είναι κάπως παλαιότερο - το 2017, τα ρολόγια των DRAM's είναι συχνά πάνω από 1000 MHz). Ο χρονισμός των data pins είναι DDR (Double Data Rate), δηλαδή το κάθε data pin μπορεί να μεταφέρει ένα data bit σε κάθε θετική ακμή του ρολογιού και ένα επιπλέον data bit σε κάθε αρνητική ακμή ρολογιού, άρα στο παράδειγμά μας ένα data bit ανά 1 ns (μισή περίοδο ρολογιού), δηλαδή με ένα ρυθμό (παροχή) μεταφοράς $1 \text{ bit} / 1 \text{ ns} = 1 \text{ Gbit/s}$ ανά pin. Έστω ότι από τη στιγμή που δίνουμε στο chip αυτό μία διεύθυνση ανάγνωσης μέχρι να μας επιστρέψει τα 8 bits (1 Byte) (μέσω των 8 data pins) από τη διεύθυνση που του δώσαμε περνάει καθυστέρηση **40 ns**. Μετά από αυτά τα πρώτα 8 bits όμως, έστω ότι εμείς θέλουμε και τα διπλανά τους 56 bits, δηλαδή συνολικά 64 bits (8 Bytes) (π.χ. διότι έχουμε 8 τέτοια chips εν παραλλήλω, και θέλουμε να διαβάσουμε μία Cache Line των 64 Bytes από αυτά ($8 \text{ Bytes/chip} \times 8 \text{ chips} = 64 \text{ Bytes}$ συνολικά)) (καμιά φορά, αυτά όλα τα bits ή Bytes που τα διαβάζουμε όλα μαζί τα λέμε "burst" – ομοβροντία). Αφού το κάθε data pin του chip μπορεί να μας δίνει 1 data bit ανά 1 ns, τότε τα 8 pins του chip μπορούν να μας δίνουν 8 bits ανά 1 ns, δηλαδή $1 \text{ Byte} / 1 \text{ ns} = 1 \text{ GByte/s}$.

Σε αυτό λοιπόν το παράδειγμα, το κόστος (καθυστέρηση) εκκίνησης της ανάγνωσης ενός τέτοιου "burst" είναι 40 ns, και αυτή η καθυστέρηση εκκίνησης αφορά τόσο το κάθε ένα chip χωριστά όσο και τα 8 εν παραλλήλω chips όλα μαζί. Από την άλλη, το επιπλέον (διαφορικό) κόστος (καθυστέρηση) για τα επιπλέον (γειτονικά) bits και Bytes είναι 1 ns για κάθε ένα επιπλέον bit ανά pin, ή 1 ns για κάθε 8 επιπλέον bit (1 Byte) ανά chip, ή 1 ns για κάθε 8 επιπλέον Bytes για όλα και τα 8 chips. Το αντίστροφο αυτού του διαφορικού κόστους (το αντίστροφο της καθυστέρησης ανά μονάδα επιπλέον όγκου δεδομένων) είναι ο ρυθμός μεταφοράς των επιπλέον δεδομένων, ή η παροχή δεδομένων, δηλαδή $1 \text{ bit/ns} = 1 \text{ Gbit/s}$ για κάθε ένα pin, ή $1 \text{ Byte/ns} = 1 \text{ GByte/s}$ για κάθε ένα chip, ή $8 \text{ Bytes/ns} = 8 \text{ GBytes/s}$ για όλα και τα 8 chips. Με αυτή την καθυστέρηση εκκίνησης (40 ns) και το ρυθμό μεταφοράς ($8 \text{ GBytes/s} = 8 \text{ Bytes/ns}$), η συνολική καθυστέρηση για να διαβάσουμε ολόκληρη την Cache Line των 64 Bytes από τα 8 εν παραλλήλω chips θα είναι: 40 ns για τα πρώτα 8 Bytes, συν 1 επιπλέον ns για κάθε μία επιπλέον ομάδα από 8 Bytes, δηλαδή συνολικά 7 επιπλέον ns για τις 7 επιπλέον οκτάδες από Bytes ($64 \text{ Bytes} = 8 \text{ πρώτα Bytes} + (7 \times 8 = 56) \text{ επιπλέον Bytes}$), άρα συνολικά $40 + 7 = 47 \text{ ns}$. Παρόμοια συμπεριφορά με την παραπάνω συναντάμε και σε πλήθος άλλων περιπτώσεων, στα υπολογιστικά συστήματα και τα δίκτυα:

- Σαν πρώτο παράδειγμα, η ομοχειρία (pipelining) έχει αυτή ακριβώς τη συμπεριφορά, έστω και αν συχνά αδιαφορούμε για το κόστος εκκίνησης όταν μία εργασία απαιτεί την εκτέλεση εκατομμυρίων εντολών. Στην δική μας απλή pipeline της άσκησης 9, το κόστος εκκίνησης είναι 5 κύκλοι ρολογιού (δηλ. όση ώρα χρειάζεται για να τελειώσει η πρώτη εντολή), και στη συνέχεια ο ρυθμός ολοκλήρωσης των επομένων, επιπλέον εντολών είναι 1 εντολή ανά κύκλο ρολογιού όσο δεν υπάρχουν αλληλεξαρτήσεις εντολών ή αστοχίες κρυφών μνημών.
- Σαν δεύτερο παράδειγμα, οι σκληροί δίσκοι έχουν κι αυτοί παρόμοια συμπεριφορά: μέχρι να μπορέσουμε να αρχίσουμε να διαβάζουμε το block

δεδομένων που μας ενδιαφέρει, πρέπει να περιμένουμε να κινηθεί η κεφαλή ανάγνωσης και να γυρίσει ο δίσκος ούτως ώστε να έλθει το πρώτο bit του block κάτω από την κεφαλή, που συνήθως σημαίνει από λίγα έως 10 με 20 ms (milli-second) –αυτό είναι το κόστος (καθυστέρηση) εκκίνησης της ανάγνωσης. Μετά από αυτό όμως, τα bits είναι αποθηκευμένα τόσο κοντά το ένα στο άλλο, και ο δίσκος γυρίζει τόσο γρήγορα, που η παροχή δεδομένων (ρυθμός ανάγνωσης) είναι της τάξης των μερικών δεκάδων έως λίγων εκατοντάδων MBytes/s (ας πούμε, αν είναι 100 MBytes/s = 800 Mbits/s = ένα bit κάθε 1.25 ns).

- Άλλο παράδειγμα είναι τα δίκτυα, όπου τα σύρματα (γραμμές μεταφοράς ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) και οι οπτικές ίνες (κυματοδηγοί φωτονίων) συμπεριφέρονται ακριβώς σαν πολύ μακρούς pipelines –σαν τράινα από bits που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο με την ταχύτητα του φωτός. Για παράδειγμα, θεωρήστε ένα δίκτυο 10-Gig Ethernet (10 Gbit/s) που περνάει μέσα από μιάν οπτική μήκους 20 km, και μέσω του οποίου ένα πακέτο μεγέθους 1 KByte. Έστω ότι η ταχύτητα του φωτός μέσα στην οπτική ίνα είναι 200 Mm/s (λόγω του δείκτη διάθλασης του υλικού της ίνας, η ταχύτητα του φωτός μέσα στην ίνα είναι χαμηλότερη απ' όσο στο κενό –ας πούμε εδώ τα 2/3 των 300 χιλιάδων km/s του κενού). Η καθυστέρηση εκκίνησης για τη μεταφορά του πακέτου μας μέσα από την οπτική ίνα, δηλαδή η καθυστέρηση του πρώτου bit για να διανύσει τα 20 km με αυτή την ταχύτητα, θα είναι $20 \text{ km} / 200 \text{ Mm/s} = 0.1 \text{ ms} = 100 \text{ }\mu\text{s}$. Μετά το πρώτο bit, τα επόμενα ακολουθούν σε "απόσταση" (χρονική) 0.1 ns ανά bit (το αντίστροφο του 10 Gbits/s) –αυτό είναι το διαφορικό κόστος του κάθε επιπλέον bit. Άρα, τα 8 Kbits (1 KByte) του πακέτου μας θα χρειαστούν περίπου 8 χιλιάδες φορές το 0.1 ns, δηλαδή περίπου $800 \text{ ns} = 0.8 \text{ }\mu\text{s}$ για να φτάσουν, το ένα πίσω από το άλλο. Η συνολική καθυστέρηση λοιπόν είναι $100 + 0.8 = 100.8 \text{ }\mu\text{s}$.
- Παρόμοια είναι και η συμπεριφορά των αρτηριών (buses) μέσα στους υπολογιστές, και των δικτύων από συνδέσμους σημείο-προς-σημείο (point-to-point links) που σήμερα αντικαθιστούν τις αρτηρίες στις ψηλές ταχύτητες –όπως π.χ. το PCI-Express και τα "Networks-on-Chip (NoC)", όπως θα πούμε αμέσως τώρα, στην § 13.3, καθώς και παρακάτω, στην άσκηση [13.7](#)

13.3 Διαφύλλωση (Interleaving), Αλληλοκαλυπτόμενες Δοσοληψίες

Ο *Παραλληλισμός* είναι η βασική τεχνική για την αύξηση της παροχής (throughput) μιάς υπηρεσίας, δηλαδή του πόσοι "πελάτες" εξυπηρετούνται ανά μονάδα χρόνου, έστω και αν δεν μειώνεται η καθυστέρηση ("εκκίνησης") της εξυπηρέτησης του καθενός πελάτη χωριστά. Η ομοχειρία (pipelining) είναι η μία μορφή παραλληλισμού, που εφαρμόζεται όταν πολλαπλές *ειδικευμένες* μονάδες εργάζονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές φάσεις η καθεμία της εξυπηρέτησης του κάθε "πελάτη". Η άλλη μορφή παραλληλισμού είναι όταν πολλαπλές *ίδιες* μονάδες εργάζονται ταυτόχρονα εξυπηρετώντας (πλήρως) έναν διαφορετικό "πελάτη" καθεμία. Αυτή η δεύτερη μορφή παραλληλισμού, εφαρμοσμένη στις μνήμες, χρησιμοποιείται εδώ και μισό αιώνα για την αύξηση της παροχής των μνημών, ονομαζόμενη *Διαφύλλωση Μνήμης (Memory Interleaving)*.

Ένα Διαφυλλωμένο Σύστημα Μνήμης αποτελείται από πολλαπλές μικρότερες μνήμες, που μπορούν να δουλεύουν όλες ταυτόχρονα, προσπελώνοντας (διαβάζοντας ή γράφοντας) κι από μία διαφορετική λέξη (ή ομάδα γειτονικών λέξεων) καθεμία. Οι επιμέρους μικρότερες μνήμες ονομάζονται "memory banks", καθεμία. Η καθε λέξη του συνολικού συστήματος μνήμης βρίσκεται αποθηκευμένη σε μία και μόνο μία από τις banks. Όποτε συμβαίνει να χρειαζόμαστε (σχεδόν) ταυτόχρονα δύο η περισσότερες λέξεις (ή ομάδες γειτονικών λέξεων) που βρίσκονται αποθηκευμένες σε διαφορετικές banks καθεμία, μπορούμε να τις προσπελάσουμε (σχεδόν) ταυτόχρονα, βάζοντας τις banks που τις περιέχουν (πολλαπλές ανεξάρτητες μνήμες, δηλαδή) να δουλεύουν εν παραλλήλω. Ο τρόπος διαμοιρασμού των λέξεων (ή των ομάδων γειτονικών λέξεων, π.χ. cache lines) στις banks μιάς διαφυλλωμένης μνήμης ακολουθεί κάποια συνάρτηση κατακερματισμού (hashing) πάνω στις διευθύνσεις των λέξεων, επιλεγμένη ούτως ώστε να μεγιστοποιεί την πιθανότητα οι λέξεις (ή ομάδες) που ζητάμε χρονικά κοντά μεταξύ τους να βρίσκονται σε διαφορετική bank. Μία συνήθης τέτοια συνάρτηση κατακερματισμού χρησιμοποιεί bits κοντά στο δεξιό (LS) άκρο της διεύθυνσης για να επιλέξει την bank, ούτως ώστε προσπελάσεις σε διαδοχικές λέξεις (ή cache lines), π.χ. λόγω σειριακών επισκέψεων σε μεγάλους πίνακες, να πέφτουν σε διαφορετικές banks.

Η παραδοσιακή οργάνωση ενός διαφυλλωμένου συστήματος μνήμης χρησιμοποιεί μάν αρτηρία (bus) που είναι πολύ γρηγορότερη από τις memory banks που συνδέονται επάνω της. Για παράδειγμα, θεωρήστε μάν αρτηρία (address bus) που μπορεί, κάθε 10 ns, να μεταφέρει κι ένα καινούργιο αίτημα προσπέλασης σε μία memory bank (δηλαδή μία διεύθυνση μαζί με τα bits ελέγχου που την συνοδεύουν) (για απλότητα, ας θεωρήσουμε μόνο προσπελάσεις ανάγνωσης εδώ). Θεωρήστε ότι στην αρτηρία αυτή συνδέουμε 8 memory banks, που η καθεμία τους έχει καθυστέρηση ανάγνωσης 80 ns. Τέλος, θεωρήστε ότι τα data που βγαίνουν (διαβάζονται) από κάθε bank τροφοδοτούν μία δεύτερη αρτηρία (data bus) που μπορεί κάθε 10 ns να μεταφέρει πίσω στον επεξεργαστή τα data που διαβάσαμε από μία bank. Τότε, ο επεξεργαστής μπορεί, κάθε 10 ns, να ξεκινάει κι από μία νέα προσπέλαση μνήμης, παρό το γεγονός ότι θα υπάρχουν ήδη 7 προηγούμενες "εκκρεμείς" (pending) προσπελάσεις, αρκεί η κάθε νέα προσπέλαση να απευθύνεται σε μία (στην) "ελεύθερη" bank, δηλαδή μία (την) bank εκείνη που δεν είναι απασχολημένη με μία από τις υπόλοιπες 7 εκκρεμείς προσπελάσεις. Η κάθε μία προσπέλαση (ανάγνωση) επιστρέφει τα data της μετά από 80 ns, αλλά κάθε 10 ns υπάρχουν data που επιστρέφουν κι από μία διαφορετική από τις 8 τελευταίες προσπελάσεις που τις ξεκίνησε όλες ο επεξεργαστής πριν τελειώσουν οι 7 προηγούμενες.

Τα σημερινά DRAM chips περιέχουν μέσα τους πολλαπλές διαφυλλωμένες banks (συνήθως μεταξύ 4 και 16 banks). Το ρόλο των γρήγορων αρτηριών που είναι κοινές μεταξύ των banks τον παίζουν αφ' ενός τα address pins για τις αιτήσεις πρόσβασης, αφ' ετέρου τα data pins για τις απαντήσεις στις αναγνώσεις. Η διαφύλλωση (παράλληλισμός) μέσα σ' ένα DRAM chip είναι επωφελής διότι, π.χ., την ώρα που σ' ένα bank βρίσκεται σε εξέλιξη η ανάγνωση μιάς νέας γραμμής (που είναι μιά αργή διαδικασία), ένα άλλο bank επιστρέφει τα data μιάς προηγούμενης ανάγνωσης μέσω των data pins, κ.ο.κ.

Η αρτηρία που τροφοδοτεί ένα διαφυλλωμένο σύστημα μνήμης, ή ένα δίκτυο που

αποτελεί την εξέλιξη της αρτηρίας (όπως το PCI Express) και που προορίζεται για την επικοινωνία ανάλογων *παράλληλων* συστημάτων –π.χ. πολλαπλοί πυρήνες, πολλαπλά περιφερειακά, συστοιχίες παράλληλων δίσκων, κλπ– πρέπει να έχει μία χαρακτηριστική ιδιότητα που δεν την συναντούσαμε στις παραδοσιακές αρτηρίες: πρέπει να υποστηρίζει **πολλαπλές, χρονικά Αλληλοκαλύπτοντες Δοσοληψίες** (multiple Transactions, Overlapping in time), ή αλλιώς επονομαζόμενες πολλαπλές **Εκκρεμείς Δοσοληψίες** (multiple Pending Transactions), ή **Split Transactions**. Η ιδέα είναι η εξής: μία από τις επικοινωνούσες συσκευές (ο αιτών – requester, master) ζητά μία Δοσοληψία (Transaction) από μάν άλλη συσκευή (ο απαντών – replyier, slave) και περιμένει μάν απάντηση· π.χ. ο αιτών ζητά μάν ανάγνωση, στέλνοντας μία διεύθυνση, και ο απαντών θα απαντήσει αργότερα, στέλνοντας τα αιτηθέντα δεδομένα. Η δοσοληψία αυτή, συνήθως σήμερα, διαρκεί αρκετή ώρα, σε σχέση με το πόσο γρήγορο είναι το μέσο επικοινωνίας (αρτηρία, δίκτυο). Τον παλαιό καιρό, μέχρι να έλθει πίσω η απάντηση και να ολοκληρωθεί έτσι η δοσοληψία, δεν μπορούσε καμιά άλλη συσκευή από τις συνδεδεμένες στην αρτηρία να ξεκινήσει καινούργια δοσοληψία, προκειμένου να μην "ανακατωθούν" μεταξύ τους οι δοσοληψίες και προκύψει "μπέρδεμα". έτσι, η αρτηρία καθόταν ανενεργή (idle) όση ώρα έκανε ο απαντών να απαντήσει.

Η σημερινή, καλύτερη οργάνωση επιτρέπει "χωριστές" δοσοληψίες (split transactions): Η φάση του αιτήματος (request) της κάθε δοσοληψίας είναι ξεχωριστή από τη φάση της απάντησης (reply), και μεταξύ των δύο επιτρέπεται να παρεμβληθούν μία ή περισσότερες ανάλογες φάσεις (αιτήματα, απαντήσεις) μιάς ή περισσότερων άλλων δοσοληψιών. Ουσιαστικά δηλαδή, επιτρέπεται λειτουργία ανάλογη της διαφυλλωμένης μνήμης: ένας ή περισσότεροι αιτούντες επιτρέπεται να αποστείλουν πολλαπλά αιτήματα σε μία η περισσότερες συσκευές που θα τα απαντήσουν, προτού επιστρέψει η απάντηση στο πρώτο από τα αιτήματα. Με άλλα λόγια, επιτρέπεται οι δοσοληψίες να αλληλοκαλύπτονται χρονικά –η δεύτερη να αρχίζει πριν τελειώσει η πρώτη, κ.ο.κ.– άρα επιτρέπεται ο παραλληλισμός μεταξύ δοσοληψιών. Αυτό σημαίνει ότι επιτρέπονται πολλαπλές "εκκρεμείς" (pending) δοσοληψίες: όσο η πρώτη δεν έχει τελειώσει ακόμα, άρα είναι εκκρεμής, ξεκινάει η δεύτερη, και είναι κι εκείνη εκκρεμής μέχρι να τελειώσει, κ.ο.κ.

Από την άποψη της υλοποίησης, μία από τις σημαντικότερες απαιτήσεις για να δουλέψουν σωστά όλα αυτά είναι να υπάρχει ένας τρόπος όταν έρχεται μιά απάντηση να ξέρουμε **για ποιό** από τα προηγούμενα αιτήματα αποτελεί απάντηση αυτή που τώρα έρχεται! Εάν όλα τα αιτήματα παίρνουν σταθερό χρόνο να απαντηθούν, τότε μπορεί να προδιαγραφεί ότι τα αιτήματα θα απαντώνται πάντα **με τη σειρά τους (in order)**, και άρα η κάθε απάντηση αφορά πάντα το παλαιότερο εκκρεμές αίτημα· τότε, μιά ουρά FIFO αρκεί για να θυμόμαστε τα εκκρεμή αιτήματα, και να τα "ταιριάζουμε" με τις αφικνούμενες απαντήσεις. Όμως, δυστυχώς, συνήθως, τα διάφορα αιτήματα, πιθανόν σε διαφορετικές συσκευές και σε διαφορετικές "αποστάσεις" στο δίκτυο, **δεν** παίρνουν σταθερό και πάντα τον ίδιο χρόνο να απαντηθούν, άρα οι απαντήσεις έρχονται **εκτός σειράς (out-of-order – ooo)**. Τότε, απαιτείται η κάθε δοσοληψία να συνοδεύεται από έναν "αριθμό (κωδικό) ταυτοποίησης" (**transaction ID – identifier**), που να είναι εκάστοτε μοναδικός μεταξύ των εκκρεμών εκείνη την ώρα δοσοληψιών, και όταν έρχεται μιά απάντηση να υπάρχει ένα κύκλωμα που να την

"ταιριάζει", βάσει αυτού του ID, με το αντίστοιχο αίτημα που είχε αυτό το ID· όταν ολοκληρωθεί έτσι η δοσοληψία, απελευθερώνεται και μπορεί να ανακυκλωθεί και ο αριθμός (κωδικός) που είχε πάρει αυτή η δοσοληψία.

Άσκηση 13.4: Απεικόνιση Μνήμης των Μονάδων E/E (Memory Mapped I/O)

Όπως είπαμε στο μάθημα, ένας συνηθισμένος τρόπος επικοινωνίας επεξεργαστή-μονάδων εισόδου/εξόδου (E/E - περιφερειακές συσκευές) είναι η "απεικόνιση μνήμης" των μονάδων E/E (memory-mapped I/O). Σε τέτοια συστήματα, ένα μέρος του "χώρου" φυσικών διευθύνσεων αντιστοιχεί στην κύρια μνήμη του υπολογιστή, ενώ οι υπόλοιπες φυσικές διευθύνσεις αντιστοιχούν στις περιφερειακές συσκευές. Αυτό σημαίνει ότι εντολές load και store των οποίων η εικονική διεύθυνση μεταφράζεται σε τέτοιες "άλλες" φυσικές διευθύνσεις προκαλούν μεταφορά δεδομένων από την εκάστοτε επιλεγόμενη περιφερειακή συσκευή προς τον επεξεργαστή (load) ή αντίστροφα (store), αντί να διαβάζουν ή να γράφουν μία θέση κύριας μνήμης. Η προστασία των περιφερειακών συσκευών (π.χ. αρχεία στο δίσκο) από ανεπίτρεπτες/κακόβουλες, λανθασμένες, ή ταυτόχρονες προσβάσεις εξασφαλίζεται με το να μην απεικονίζει το λειτουργικό σύστημα καμία εικονική σελίδα χρήση σε φυσική σελίδα που αντιστοιχεί σε περιφερειακές συσκευές, και να "εμφανίζει" αυτές τις φυσικές σελίδες μόνο στο χώρο εικονικών διευθύνσεων του λειτουργικού συστήματος (πλήν περιπτώσεων ειδικών συσκευών και ειδικών χρηστών που επιτρέπεται να αποκτούν κατ'ευθείαν πρόσβαση σε αυτές).

Σαν απλοϊκό παράδειγμα, για τους σκοπούς αυτής της άσκησης, θεωρήστε ότι μιλάμε για ένα σύστημα κύριας μνήμης και συσκευών E/E που βλέπει φυσικές διευθύνσεις λέξεων (όχι bytes, δηλαδή έχουν ήδη αφαιρεθεί τα 2-3 LS bits της διεύθυνσης του επεξεργαστή) μεγέθους (οι φυσικές διευθύνσεις λέξεων) 11 bits. Τον αντίστοιχο χώρο φυσικών διευθύνσεων, μεγέθους 2048 λέξεων, αποφασίζουμε να μοιράσουμε ως εξής:

- 0xxxxxxxxx: 1024 λέξεις κύριας μνήμης (main memory).
- 10xxxxxxxx: 512 λέξεις για μία "μεγάλη" περιφερειακή συσκευή (δηλαδή μία συσκευή που περιέχει έναν μεγάλο buffer δεδομένων E/E που θέλουμε να μπορεί να βλέπει ο επεξεργαστής).
- 11111000xx: 4 λέξεις καταναμεμημένες σε 2 "μικρές" συσκευές E/E, την "IN" στις δύο μικρότερες διευθύνσεις, και την "OUT" στις δύο μεγαλύτερες, όπου η κάθε μία από αυτές τις συσκευές έχει δύο εσωτερικούς καταχωρητές –τον "status" στην ζυγή διεύθυνση, και τον "data" στη μονή διεύθυνση.

(α) Σχεδιάστε, χρησιμοποιώντας πύλες AND (οσωνδήποτε εισόδων) και NOT, τον αποκωδικοποιητή διευθύνσεων που επιλέγει τη συσκευή (και τον καταχωρητή) που πρέπει να ενεργοποιηθεί κάθε φορά. Είσοδος του αποκωδικοποιητή είναι τα 11 σύρματα φυσικής διεύθυνσης λέξεων από τον επεξεργαστή (μετά τη μετάφραση της εικονικής διεύθυνσης από το TLB). Ο αποκωδικοποιητής έχει 6 σύρματα εξόδου: 1 για την κύρια μνήμη, 1 για την μεγάλη συσκευή E/E, 2 για την IN, και 2 για την OUT· για κάθε μία από τις IN και OUT, το πρώτο σύρμα λέει πότε απευθυνόμαστε στον καταχωρητή της "status" και το δεύτερο λέει πότε απευθυνόμαστε στον "data". Σχεδιάστε το κύκλωμα που γεννά αυτά τα 6

σύρματα, δείχνοντας προσεκτικά ποια σύρματα εισόδου και ποιās πολικότητας χρησιμοποιείτε σε κάθε πύλη AND.

(β) Σε ποιά λέξη μνήμης (στο δεκαδικό, αρχίζοντας από την 0), ή σε ποιά θέση του buffer της μεγάλης συσκευής (πάλι στο δεκαδικό, αρχίζοντας από την 0), ή σε ποιόν καταχωρητή ποιās συσκευής αναφέρεται κάθε μία από τις εξής φυσικές διευθύνσεις λέξεων που δίδονται στο δεκαεξαδικό σύστημα, ή ποιές από αυτές είναι παράνομες (ανύπαρκτες): 000, 00E, 100, 200, 2FF, 300, 3FF, 400, 4FF, 500, 5FF, 600, 608, 60A, 60E, 60F, 610, 680, 6C0, 6C3, 6CF, 6FF, 700, 708, 70A, 70E, 70F, 710, 780, 7C0, 7C3, 7CF, 7FF, 800, 808, 80A, 80E, 80F, C0E, C0F, F02, F12.

Άσκηση 13.5: Καταχωρητές Κατάστασης, Busy Wait, Polling

Φυσικά, οι μονάδες E/E δεν είναι πραγματική μνήμη: συχνά, διαβάζοντας από ορισμένη διεύθυνση, δεν παίρνει ο επεξεργαστής την ίδια τιμή με αυτήν που είχε γράψει εκεί την τελευταία φορά που έγραψε σε αυτήν (ο επεξεργαστής) --παίρνει την τιμή που θέλει να του δώσει κάθε φορά η μονάδα E/E, η οποία τιμή συχνά αλλάζει με το χρόνο. Επίσης, τέτοιες αναγνώσεις από περιφερειακές συσκευές μπορούν να έχουν "παρενέργειες" (side-effects), όπως π.χ. να θέτουν ή να μηδενίζουν σημαίες (flag bits) που υποδεικνύουν π.χ. ότι διαβάστηκε η παρούσα τιμή εισόδου και δεν έχει έλθει ακόμα η επόμενη (νέα) τιμή εισόδου. Ομοίως, εγγραφή σε ορισμένη διεύθυνση περιφερειακής συσκευής μπορεί να προκαλεί π.χ. μετάδοση της πληροφορίας σε κάποιο σύρμα/δίκτυο, και όχι πραγματική εγγραφή σε κάποια flip-flops που να μπορούμε αργότερα να τα διαβάσουμε, και ενδέχεται επίσης η εγγραφή αυτή να προκαλεί και άλλες παρενέργειες όπως π.χ. μηδενισμό ενός flag που υποδεικνύει ότι παρελήφθη η παρούσα τιμή εξόδου και ότι η συσκευή δεν είναι ακόμα έτοιμη να παραλάβει την επόμενη τιμή.

Επειδή οι μονάδες E/E δεν συμπεριφέρονται σαν πραγματική μνήμη, οι τιμές που διαβάζουμε ή γράφουμε στις διευθύνσεις τους πρέπει να *μην* κρατιούνται στην *κρυφή* μνήμη, ειδάλλως θα διαβάζουμε παλιές τιμές ή αυτά που γράφουμε δεν θα φτάνουν όλα ή αμέσως στις συσκευές E/E. Αυτό, το να παρακάμπτουν δηλαδή οι προσπελάσεις αυτές την κρυφή μνήμη, επιτυγχάνεται συνήθως με ένα επιπλέον bit στον πίνακα σελίδων, που να υποδεικνύει "non-cacheable pages", ή με το να αναγνωρίζει η κρυφή μνήμη την ειδική μορφή των φυσικών διευθύνσεων των συσκευών E/E. Επίσης, και ο Compiler πρέπει να είναι ενήμερος για τη συμπεριφορά αυτών των "θέσεων" ως μη κανονική μνήμη, ούτως ώστε π.χ. να μην αντικαθιστά πολλαπλές αναγνώσεις (load) από εκεί με χρήση τυχόν προηγούμενων αντιγράφων τους σε καταχωρητές, και σε περίπτωση πολλαπλών συνεχόμενων εγγραφών εκεί να μην απαλείφει όλες εκτός της τελευταίας εγγραφής. Για να ενημερωθεί ο Compiler για αυτή την ειδική συμπεριφορά, πρέπει αυτές οι "θέσεις μνήμης" να δηλωθούν ως **volatile** στο πρόγραμμα που τις προσπελάζει.

Ένα άλλο σύστημα επικοινωνίας επεξεργαστή-συσκευών E/E, διαφορετικό από την απεικόνιση μνήμης των μονάδων E/E, είναι η ύπαρξη ειδικών εντολών εισόδου/εξόδου (I/O instructions) στο ρεπερτόριο εντολών του επεξεργαστή. Οι εντολές εισόδου μοιάζουν με τις load και οι εντολές εξόδου μοιάζουν με τις store, όμως οι εντολές E/E είναι "προνομιούχες" (privileged), δηλαδή επιτρέπεται να

εκτελούνται μόνο σε "kernel mode", και οι εντολές E/E ειδοποιούν την κρυφή μνήμη να μην παρέμβει. Κατά τα άλλα, στις αρτηρίες E/E, οι εντολές E/E μάλλον καταλήγει να δίνουν διευθύνσεις εντελώς ανάλογες προς αυτές που δίνουν οι εντολές load/store στα συστήματα με απεικόνιση μνήμης των μονάδων E/E.

Σε αυτή την άσκηση, θεωρήστε ότι η "μικρή" συσκευή IN της άσκησης 13.4 είναι μία συσκευή εισόδου από πληκτρολόγιο, με τους καταχωρητές "κατάστασης" (status) και "δεδομένων" (data) που είπαμε. Μόλις έλθει νέος χαρακτήρας από το πληκτρολόγιο, η συσκευή θέτει τον καταχωρητή κατάστασης στην τιμή 1, και θέτει τον καταχωρητή δεδομένων στην τιμή που αποτελεί τον κώδικα ASCII του χαρακτήρα που ήλθε. Ανάγνωση (από πλευράς επεξεργαστή) του καταχωρητή κατάστασης δεν έχει παρενέργειες, ενώ ανάγνωση του καταχωρητή δεδομένων προκαλεί μηδενισμό του καταχωρητή κατάστασης (μέχρι να έλθει ο επόμενος χαρακτήρας --έτσι ξεχωρίζουμε, αν πατηθεί το ίδιο πλήκτρο πολλές φορές, πόσες φορές πατήθηκε).

(α) Γράψτε μία διαδικασία (procedure) `"read_kbd_busywait_char()"` σε C (ή, στην ανάγκη, σε ψευδοκώδικα στυλ C) η οποία επιστρέφει τον επόμενο χαρακτήρα από το πληκτρολόγιο αυτό. Όπως λέει και το όνομά της, η διαδικασία αυτή θα κάνει "busy wait", δηλαδή θα περιμένει να έλθει ο επόμενος χαρακτήρας απασχολώντας εν τω μεταξύ τον επεξεργαστή με το να ελέγχει συνεχώς, ξανά και ξανά, εάν ήλθε χαρακτήρας (ανάγνωση του καταχωρητή κατάστασης) --φυσικά, πρόκειται για πολύ κακό στυλ προγραμματισμού, αλλά από κάπου πρέπει να ξεκινήσουμε... Η διαδικασία θα επιστρέφει τον χαρακτήρα (char) που ήλθε. Θεωρήστε ότι η διαδικασία θα τρέχει σε kernel mode (θα είναι μέρος του λειτουργικού συστήματος), και ότι, όταν θα τρέχει, η μετάφραση εικονικών διευθύνσεων σε φυσικές θα είναι η συνάρτηση ταυτότητας, δηλαδή η φυσική διεύθυνση θα ισούται με την εικονική που την γέννησε. Χρησιμοποιήστε type casting, από τις σταθερές ακέραιες ποσότητες των διευθύνσεων που ξέρετε, για να αρχικοποιήσετε τους pointers (κατάλληλου είδους) που θα χρειαστείτε για προσπέλαση στους καταχωρητές της συσκευής.

(β) Η παραπάνω διαδικασία (α) είναι πολύ κακιά, διότι δεν αφήνει τον επεξεργαστή να κάνει τίποτα άλλο όσην ώρα αυτός περιμένει να πληκτρολογηθεί ο επόμενος χαρακτήρας. Όπως είπαμε και στο μάθημα, ένας καλύτερος τρόπος είναι να εκτελεί ο επεξεργαστής διάφορα προγράμματα, και, περιοδικά, όποτε έρχεται διακοπή από το ρολόι πραγματικού χρόνου (συνήθως 50 με 120 Hz --άλλο από το ρολοί του επεξεργαστή, των GHz ή εκατοντάδων MHz), μεταξύ άλλων περιοδικών εργασιών, να ελέγχει και εάν ήλθε κάποιος νέος χαρακτήρας από το πληκτρολόγιο (αρκεί οι χαρακτήρες να μην έρχονται πιο γρήγορα από τις διακοπές, πράγμα που ισχύει για πληκτρολόγιο και 50-120 Hz ρυθμό διακοπών). Ο τρόπος αυτός λέγεται **δειγματοληψία (polling)** (ή περιόδευση), διότι ο επεξεργαστής παίρνει ένα "δείγμα" από την κατάσταση του πληκτρολογίου κάθε 10 με 20 ms (50-100 Hz). Γράψτε μία νέα διαδικασία `"read_kbd_polling_char()"`, ανάλογη με την προηγούμενη, αλλά αυτή τη φορά χωρίς αναμονή. Εάν έχει έλθει νέος χαρακτήρας από το προηγούμενο κάλεσμα στην `read_kbd_polling_char()`, τότε θα επιστρέφει αυτόν τον χαρακτήρα, αλλιώς (αν δεν έχει έλθει νέος χαρακτήρας) θα επιστρέφει (αμέσως) `'\0'`.

Άσκηση 13.6: Κόστος E/E βάσει Δειγματοληψίας και βάσει Διακοπών

Η περιοδική **δειγματοληψία (polling)** που είδαμε στην παραπάνω άσκηση 13.5 είναι ένας ρεαλιστικός τρόπος εισόδου/εξόδου (E/E - I/O), αρκεί η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι αρκούντως υψηλή ώστε να μην χάνονται εισοδοί ή να μην καθυστερεί η έξοδος. Το μειονέκτημα της δειγματοληψίας είναι η σπατάλη χρόνου για την ανάγνωση του καταχωρητή κατάστασης όταν δεν έχει έλθει ακόμα νέα είσοδος ή δεν έχει τελειώσει ακόμα η προηγούμενη πράξη εξόδου.

Ένας εναλλακτικός τρόπος εισόδου/εξόδου είναι **E/E βάσει διακοπών (interrupt-driven I/O)**: η περιφερειακή συσκευή διακόπτει (interrupt) τον επεξεργαστή όταν υπάρχουν νέα δεδομένα εισόδου γι' αυτόν, ή όταν είναι έτοιμη να δεχτεί νέα δεδομένα εξόδου από αυτόν. Έτσι, δεν σπαταλιέται χρόνος για δειγματοληψία χωρίς λόγο της συσκευής, όσο αυτή δεν είναι ακόμα έτοιμη. Το κόστος, πάντως, της E/E βάσει διακοπών είναι η ειδική φροντίδα (overhead) που απαιτεί η κάθε διακοπή, δεδομένου ότι αυτή αλλάζει τη διεργασία που τρέχει, τα περιεχόμενα της κρυφής μνήμης και του TLB, και απαιτεί δαπανηρή καταγραφή στοιχείων (book-keeping) για να λειτουργήσει σωστά. Αντ' αυτού, η δειγματοληψία μπορεί να έχει το πλεονέκτημα, ανάλογα με την περίπτωση, ότι δειγματοληπτεί "μία και καλή" πολλές συσκευές E/E για κάθε μία διακοπή από το ρολόϊ (batch processing), αντί να υφίσταται "κάθε τρεις και λίγο" το κόστος μίας επιπλέον διακοπής από μίαν άλλη συσκευή. Για να αποφασίσουμε τι μας συμφέρει μας ενδιαφέρουν τρεις παράμετροι:

- Πόσο κοντά χρονικά μπορεί να συμβούν δύο γεγονότα εισόδου; Η περίοδος δειγματοληψίας πρέπει να είναι βραχύτερη από αυτό, προκειμένου να μην χάσουμε το δεύτερο γεγονός. Προκειμένου περί εξόδου, πόσο δεχόμαστε να καθυστερήσουμε από την ολοκλήρωση μίας πράξης εξόδου μέχρι να το αντιληφθεί ο επεξεργαστής και να προχωρήσει στην επόμενη; Την παράμετρο αυτή μπορούμε να την μεγαλώσουμε (άρα σπανιότερη δειγματοληψία) αν η συσκευή E/E έχει έναν μεγαλύτερο ενταμειυτή (buffer) που να μπορεί να κρατά μέσα του περισσότερα δεδομένα εισόδου ή εξόδου (περισσότερη δουλειά κάθε φορά).
- Πόσος είναι ο μέσος ρυθμός των γεγονότων εισόδου; Δηλαδή, ανεξάρτητα αν δύο γεγονότα εισόδου ενδέχεται να συμβούν πολύ κοντά μεταξύ τους, *κατά μέσον όρο* πόσο κοντά χρονικά θα συμβαίνουν; Όσο σπανιότερη είναι η κατά μέσον όρο εμφάνισή τους, τόσο μεγαλύτερη είναι η σπατάλη της άσκοπης δειγματοληψίας.
- Πόσο πολλές συσκευές E/E δειγματοληπτούμε μαζί σε κάθε διακοπή του ρολογιού (batching factor); Όσο περισσότερες είναι αυτές, τόσο περισσότερο αποσβένεται μεταξύ τους το κόστος της διακοπής του ρολογιού.

Θεωρήστε, σε αυτήν την άσκηση, ότι το ρολόϊ του επεξεργαστή είναι 1 GHz (άσχετο με το ρολόϊ πραγματικού χρόνου που μας δίνει περιοδικές διακοπές), ότι η ειδική φροντίδα (overhead) για κάθε διακοπή είναι δύο χιλιάδες (2000) κύκλοι του ρολογιού του επεξεργαστή, και ότι το κόστος δειγματοληψίας μίας συσκευής E/E είναι διακόσιοι (200) κύκλοι του ρολογιού του επεξεργαστή (η κύρια αιτία αυτής της καθυστέρησης είναι το ότι οι αρτηρίες E/E (I/O buses) είναι πολύ πιο αργές από τους (γρήγορους) σημερινούς επεξεργαστές). Θέλουμε να

υπολογίσουμε τι ποσοστό του συνολικού χρόνου του επεξεργαστή θα απορροφά η E/E στις παρακάτω περιπτώσεις, όταν αυτή γίνεται βάσει δειγματοληψίας ή βάσει διακοπών.

(α) Εστω ένας υπολογιστής ο οποίος λαμβάνει και καταγράφει σήματα από 40 απομακρυσμένα σημεία. Κάθε μία από τις 40 γραμμές εισόδου ενδέχεται να φέρνει νέες εισόδους κάθε 1 ms, δηλαδή με μέγιστο ρυθμό 1 kHz. Εάν χρησιμοποιήσουμε δειγματοληψία, επομένως, το ρολόϊ πρέπει να μας δίνει 1 διακοπή ανά 1 ms. Σε κάθε διακοπή, δειγματοληπτούμε 40 συσκευές. Πόσους κύκλους ρολογιού (του επεξεργαστή) ξοδεύουμε σε κάθε διακοπή, (i) για την ίδια τη διακοπή, και (ii) για τις 40 δειγματοληψίες; Δεδομένου ότι αυτό επαναλαμβάνεται 1000 φορές το δευτερόλεπτο, πόσους κύκλους ρολογιού ανά s ξοδεύουμε για E/E; Τι ποσοστό της συνολικής υπολογιστικής δυναμικότητας του επεξεργαστή αντιπροσωπεύουν αυτοί οι κύκλοι;

(β) Έστω ότι στο σύστημα (α), παρ' ότι νέες εισοδοί μπορεί να έρχονται σχετικά κοντά η μία με την άλλη (κάθε 1 ms), ο μέσος ρυθμός άφιξης τους είναι σημαντικά αραιότερος: κατά μέσον όρο έρχονται 40 νέες εισοδοί ανά δευτερόλεπτο ανά γραμμή εισόδου. Συνολικά, για όλες τις γραμμές, πόσες είναι οι νέες εισοδοί ανά s; Έστω ότι κάνουμε E/E βάσει διακοπών, και ότι κάθε νέα είσοδος (από οιαδήποτε γραμμή) προκαλεί μία διακοπή. Πόσες διακοπές ανά δευτερόλεπτο θα έχουμε, κατά μέσον όρο; Πόσους κύκλους ρολογιού θα ξοδεύει ο επεξεργαστής για να τις εξυπηρετήσει; Τι ποσοστό της συνολικής υπολογιστικής του δυναμικότητας αντιπροσωπεύουν αυτοί; Συμφέρει η δειγματοληψία (α) ή οι διακοπές (β);

(γ) Έστω τώρα ότι στο σύστημα (α) αυξάνεται ο μέσος ρυθμός άφιξης νέων εισόδων, από λίγες δεκάδες ανά γραμμή ανά δευτερόλεπτο που ήταν στο (β) σε 400 ανά γραμμή ανά δευτερόλεπτο (δηλαδή πλησιάζει περισσότερο στο μέγιστο ρυθμό, που είναι 1 kHz). Το κόστος της δειγματοληψίας δεν αλλάζει, αφού αυτή ούτως ή άλλως επισκέπτεται την κάθε γραμμή 1000 φορές το δευτερόλεπτο. Όμως, στη μέθοδο βάσει διακοπών, αυξάνει το μέσο πλήθος διακοπών ανά δευτερόλεπτο. Πώς αλλάζουν οι απαντήσεις σας της ερώτησης (β) εδώ; Συμφέρει η δειγματοληψία ή οι διακοπές, τώρα;

(δ) Στις περιπτώσεις (β) και (γ), κινδυνεύουμε να χάσουμε κάποια νέα είσοδο αν "πέσουν μαζεμένες" νέες εισοδοί από όλες τις γραμμές; Έστω ότι αμέσως μετά την έλευση μίας νέας εισόδου από τη γραμμή A, μας έρχονται νέες εισοδοί και από τις 39 άλλες γραμμές. Για να εξυπηρετήσει ο επεξεργαστής τις 40 αυτές διακοπές (τη μία μετά την άλλη), πόσους κύκλους επεξεργαστή χρειάζεται; Πόσος χρόνος είναι αυτός; Το νωρίτερο που μπορεί να έλθει η επόμενη είσοδος από τη γραμμή A είναι 1 ms μετά την προηγούμενη, όπως είπαμε στο (α). Θα έχει προλάβει ο επεξεργαστής να εξυπηρετήσει τις παραπάνω 40 διακοπές πριν έλθει η επόμενη αυτή είσοδος από τη γραμμή A, ή θα την χάσει αυτή την επόμενη είσοδο;

(ε) Έστω τώρα ότι αντί των 40 εισόδων του (α) ο υπολογιστής μας έχει μία μόνο -- αλλά πολύ γρηγορότερη-- είσοδο: μία γραμμή δικτύου των 32 Mbit/s, δηλαδή 4 MBytes/s. Έστω ότι η συσκευή εισόδου μπορεί να κρατήσει (έχει buffer για να κρατήσει) 1 πακέτο, αλλά όχι παραπάνω. Η συσκευή μας δίνει 1 διακοπή για κάθε 1 αφικνούμενο πακέτο. Έστω ότι τα μικρότερα δυνατά πακέτα είναι

μεγέθους 40 Bytes καθένα (όπως στο πρωτόκολλο του Διαδικτύου, το IP). Άρα, ο μέγιστος δυνατός ρυθμός άφιξης πακέτων είναι 4000 KBytes/s διά 40 Bytes ανά πακέτο = 100 K πακέτα/s. Εάν μας έρχονται πακέτα ελαχίστου μεγέθους και με τον μέγιστο δυνατό ρυθμό ("κολλητά" το ένα με το άλλο), ξανα-απαντήστε την ερώτηση (β).

(στ) Σήμερα, μία γραμμή δικτύου μέτριας ταχύτητας είναι του 1 Gbit/s, δηλαδή περίπου 30 φορές γρηγορότερη από αυτήν του (ε). Μπορεί ο υπολογιστής μας να την αντέξει αν η συσκευή εισόδου συνεχίσει να έχει ενταμειυτή μόνο για ένα πακέτο και συνεχίσει να μας δίνει μία διακοπή για κάθε αφικνούμενο πακέτο;;;

Άσκηση 13.7: Απευθείας Πρόσβαση Μνήμης (DMA) από Συσκευές E/E

Από τα παραπάνω νούμερα φάνηκε ότι οι γρήγορες συσκευές E/E πρέπει να έχουν μεγάλους ενταμειυτές (buffers), ούτως ώστε οι διακοπές --είτε του ρολογιού είτε των συσκευών-- να μην είναι πολύ συχνές, και να μπορεί μεγάλη "ποσότητα εργασίας" να συσσωρεύεται στον ενταμειυτή μεταξύ διαδοχικών "επισκέψεων" στη συσκευή από τον επεξεργαστή. Ακόμα και με αυτή τη λύση, όμως, για να μην είναι οι διακοπές πολύ συχνές, υπάρχει και ένα άλλο πρόβλημα επιδόσεων για τις γρήγορες συσκευές E/E:

Γιά να αντιγράψει ο επεξεργαστής ένα μεγάλο όγκο δεδομένων ανάμεσα στον ενταμειυτή της περιφερειακής συσκευής και την κυρίως μνήμη του υπολογιστή, απαιτούνται πολλοί κύκλοι ρολογιού, επειδή οι αρτηρίες E/E (λεωφόροι E/E - I/O buses) είναι πολύ πιο αργές από τους σημερινούς (γρήγορους) επεξεργαστές. Δεδομένου ότι η αντιγραφή αυτή είναι μία πολύ απλή εργασία, θα αποτελούσε σπατάλη δαπανηρών υπολογιστικών πόρων (του επεξεργαστή) το να βάζουμε τον επεξεργαστή να την κάνει: ο επεξεργαστής, σε αυτή τη δουλειά, θα σπαταλά την περισσότερη ώρα του περιμένοντας να απαντήσει η αρτηρία E/E. Η ενδεδειγμένη λύση είναι να αποκτήσει η περιφερειακή συσκευή τη δυνατότητα να κάνει μόνη της την αντιγραφή ανάμεσα στο ενταμειυτή της και στην κύρια μνήμη: Η "**Απευθείας Πρόσβαση Μνήμης (Direct Memory Access - DMA)**" από τις συσκευές E/E λειτουργεί ως εξής. Η συσκευή E/E έχει δύο ή τρεις καταχωρητές ελέγχου για τη λειτουργία DMA:

- Διεύθυνση έναρξης --είναι η (φυσική) διεύθυνση μνήμης προς την οποία ή από την οποία θα αρχίσει η αντιγραφή δεδομένων.
- Μέγεθος μεταφοράς --είναι το πλήθος των Bytes που θα αντιγραφούν.
- Καταχωρητής ενεργοποίησης --είναι ο καταχωρητής εκείνος όπου μόλις ο επεξεργαστής γράψει έναν ειδικό κώδικα θα αρχίσει η αντιγραφή (αυτός μπορεί και να μην υπάρχει, π.χ. εάν η αντιγραφή αρχίζει με το που γράφουμε το μέγεθος μεταφοράς στον δεύτερο καταχωρητή).

Η συσκευή E/E έχει επίσης μία μικρή μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (FSM), η οποία, μόλις δοθεί το σήμα εκκίνησης, κάνει την εξής δουλειά κατ' επανάληψη:

- Ζητά να της δοθεί η χρήση της αρτηρίας μνήμης (ή των αρτηριών E/E και μνήμης, ή του/των σχετικών συνδέσμων).
- Μόλις της δοθεί η χρήση, αντιγράφει την επόμενη "λέξη" του ενταμειυτή της

συσκευής στην κυρίως μνήμη, εκεί που δείχνει ο καταχωρητής διεύθυνσης, ή την αντιγράφει από την κυρίως μνήμη στον ενταμιευτή της συσκευής. [Στο βήμα αυτό, η "λέξη" που αντιγράφεται συχνά δεν είναι μία μόνο λέξη του επεξεργαστή ή της αρτηρίας, αλλά μία μικρή ομάδα (burst - ριπή) λέξεων, προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τη δυνατότητα των DRAM για οικονομικότερη προσπέλαση συνεχόμενων λέξεων (§ 13.1), καθώς και να αποσβέσουμε καλύτερα το overhead απόκτησης χρήσης της αρτηρίας μέσω της μεταφοράς περισσότερων Bytes κάθε φορά που την αποκτούμε].

- iii. Αυξάνει τον καταχωρητή διεύθυνσης κατά το πλήθος των Bytes που μόλις μετέφερε.
- iv. Μειώνει τον καταχωρητή μεγέθους μεταφοράς κατά το πλήθος των Bytes που μόλις μετέφερε.
- v. Αν ο καταχωρητής μεγέθους είναι ακόμα μεγαλύτερος του μηδενός, επαναλαμβάνει από το (i).

Ας θεωρήσουμε σε αυτή την άσκηση τον ίδιο επεξεργαστή με ρολοϊ 1 GHz που είχαμε και παραπάνω, και έναν σύνδεσμο επικοινωνίας περιφερειακών - μνήμης - επεξεργαστή τύπου PCI-Express των 2.5 Gbits/s (δηλ. παλαιότερης γενιάς), και "στενό", δηλ. της μίας μόνο "λωρίδας" (x1). Ο ρυθμός μετάδοσης αυτού του συνδέσμου είναι $2.5 \text{ Gb/s} = 2500 \text{ Mb/s} = \text{περίπου } 312 \text{ Mbytes/s}$, δηλαδή περίπου 1 Byte κάθε 3.2 ns ή αλλιώς 1 Byte κάθε 3.2 κύκλοι ρολογιού του επεξεργαστή μας. Πάνω στο σύνδεσμο αυτό οι πληροφορίες μεταφέρονται σε "πακέτα" (όπως στα δίκτυα), και κάθε πακέτο έχει μίαν επικεφαλίδα (header) ας πούμε των 12 Bytes (π.χ. διευθύνσεις πηγής, προσορισμού, κωδικό πράξης, έλεγχος σφαλμάτων, κλπ) ακολουθούμενη από τα μεταφερόμενα Bytes δεδομένων.

(α) Έστω ότι δεν υπάρχει DMA, και ο επεξεργαστής κάνει την αντιγραφή μεταξύ μνήμης και ενταμιευτή περιφερειακής συσκευής, ας πούμε από τη μνήμη προς την περιφερειακή συσκευή. Η αντιγραφή γίνεται με ένα μικρό βρόχο που περιλαμβάνει μία εντολή load από τη μνήμη και μία εντολή store στον ενταμιευτή της συσκευής. Οι εντολές load και store αναφέρονται σε μία μόνο λέξη (4 Bytes) -- αφού δεν υπάρχουν εντολές load/store πολλαπλών λέξεων. Όταν ταξιδεύει η λέξη (μέσω της εντολής store) προς τη συσκευή μέσω του σύνδεσμου PCI-Express, η λέξη αυτή ταξιδεύει μέσα σε ένα πακέτο μεγέθους 12 Bytes (header) + 4 Bytes (data) = 16 Bytes ανά πακέτο. Με το ρυθμό 1 Byte κάθε 3.2 κύκλοι ρολογιού του επεξεργαστή που βρήκαμε παραπάνω, κάθε τέτοιο πακέτο των 16 Bytes (μεταφορά μίας λέξης των 4 Bytes) κοστίζει περίπου 50 κύκλους ρολογιού του επεξεργαστή. Ας υποθέσουμε ότι οι υπόλοιπες εντολές του βρόχου κοστίζουν 30 κύκλους του επεξεργαστή, κυρίως λόγω των αναπόφευκτων αστοχιών κρυφής μνήμης που θα προκαλέσουν οι επανειλημμένες εντολές load από διευθύνσεις μη πρόσφατα χρησιμοποιημένες. Συνολικά, επομένως, ο ρυθμός αντιγραφής είναι 4 Bytes ανά 80 κύκλους επεξεργαστή (80 ns). Πόσος είναι αυτός ο ρυθμός σε MBytes/s και σε Mbits/s; Εάν ο επεξεργαστής αυτός έχει να τροφοδοτεί ταυτόχρονα 2 δίσκους με παροχή 10 MBytes/s καθένας και 1 δίκτυο fast ethernet με παροχή 100 Mbits/s, τι ποσοστό του χρόνου του θα υποχρεωθεί να αφιερώνει για αντιγραφές δεδομένων από τη μνήμη του προς τους ενταμιευτές των συσκευών αυτών;

(β) Έστω τώρα ότι υπάρχει DMA. Ας υποθέσουμε, προς στιγμήν, ότι ο επεξεργαστής δεν απασχολεί καθόλου το σύνδεσμο PCI-Express μνήμης-E/E, π.χ.

επειδή ευστοχεί συνεχώς στην κρυφή του μνήμη, και επομένως ο σύνδεσμος αυτός είναι συνεχώς διαθέσιμος για τη μηχανή DMA. (i) Εάν η μηχανή DMA τροφοδοτούσε τις περιφερειακές συσκευές στέλνοντας μία λέξη κάθε φορά (4 data Bytes μέσα σε κάθε "πακέτο"), και εάν απασχολεί έτσι το σύνδεσμο πλήρως (100%), πόση θα ήταν η συνολική παροχή της σε MBytes/s και σε Mbits/s; (ii) Όμως, οι μηχανές DMA κάνουν (σχεδόν) πάντα τις μεταφορές τους σε μεγαλύτερα blocks δεδομένων, προκειμένου να αποσβέσουν σε περισσότερα δεδομένα το κόστος (overhead) της επικεφαλίδας του πακέτου, ή της απόκτησης και χρήσης της αρτηρίας, ή της έναρξης προσπέλασης σε νέα γραμμή (row) της μνήμης DRAM. Ας πούμε ότι εδώ η μηχανή DMA μας μεταφέρει τα δεδομένα σε ομάδες (blocks) των 16 λέξεων (64 Bytes) καθεμία (δηλ. ανά πακέτο). Άρα τα πακέτα θα έχουν μέγεθος 12 header Bytes + 64 data Bytes = 76 Bytes κάθε πακέτο. Με το ρυθμό 1 Byte κάθε 3.2 ns που βρήκαμε παραπάνω, κάθε τέτοιο πακέτο παίρνει $76 \text{ B} \times 3.2 \text{ ns/B} = \text{περίπου } 250 \text{ ns}$ ανά πακέτο, ή 4 M πακέτα (των 64 Bytes δεδομένων) ανά δευτερόλεπτο. Εάν η αρτηρία απασχολείται πάλι 100% για τέτοιες μεταφορές DMA, πόση θα είναι η συνολική παροχή της σε MBytes/s και σε Mbits/s;

(γ) Εάν οι παραπάνω μεταφορές DMA σε blocks των 64 Bytes εξυπηρετούν πάλι τους 2 δίσκους με παροχή 10 MBytes/s καθένας και το 1 δίκτυο fast ethernet με παροχή 100 Mbits/s της ερώτησης (α), τότε τι ποσοστό του χρόνου του συνδέσμου PCI-Express μνήμης-E/E απασχολούν αυτές οι μεταφορές DMA αυτών των περιφερειακών συσκευών; Συγκρίνετε αυτό το ποσοστό με το ποσοστό της απάντησης (α). Παρ'ότι πρόκειται για ανόμοια μεγέθη (το (α) ήταν ποσοστό του χρόνου του επεξεργαστή, ενώ το (γ) είναι ποσοστό του χρόνου της αρτηρίας), εξηγήστε σε ποιούς δύο παράγοντες οφείλεται η μείωση του ποσοστού απασχόλησης από το (α) στο (γ).

Επιπλέον της μείωσης αυτής, που είναι από μόνη της ένα κέρδος, παρατηρήστε ότι στο μεν (α), δηλαδή χωρίς DMA, ο επεξεργαστής αφιέρωνε ένα μη ευκαταφρόνητο μέρος του χρόνου του για να εξυπηρετεί τις μεταφορές δεδομένων αυτών των συσκευών E/E, ενώ στο (γ), δηλαδή με DMA, ο επεξεργαστής δεν αφιερώνει καθόλου χρόνο σε αυτές τις μεταφορές (φροντίζει μόνο να τις ξεκινάει, και μετά τις αφήνει να τρέχουν μόνες τους για πολλά KBytes συνήθως), και οι μεταφορές γίνονται "μόνες τους" (δηλαδή από την ή τις μηχανές DMA, που δουλεύουν παράλληλα με τον επεξεργαστή), απασχολώντας (οι μεταφορές DMA) ένα μέρος μόνο της διαθέσιμης παροχής (throughput) της μνήμης, και αφήνοντας το υπόλοιπο μέρος αυτής της παροχής διαθέσιμο για να εξυπηρετούνται οι αστοχίες της κρυφής μνήμης του επεξεργαστή.

Τρόπος Παράδοσης:

Κάντε τις από τώρα, γιά να τις έχετε έτοιμες, παρ' ότι θα τις παραδώσετε λίγο αργότερα, μαζί με την επόμενη (και τελευταία) σειρά ασκήσεων (και θα εξεταστείτε, τότε, προφορικά και στις δύο μαζί). Ο τρόπος παράδοσης θα είναι on-line, σε μορφή PDF (μόνον) (μπορεί να είναι κείμενο μηχανογραφημένο ή/και "σκαναρισμένο" χειρόγραφο, αλλά *μόνον* σε μορφή PDF).