

HY330 – Ψηφιακά Κυκλώματα - Εισαγωγή στα Συστήματα VLSI

Διδάσκων: Χ. Σωτηρίου, Βοηθοί: θα ανακοινωθούν

<http://inf-server.inf.uth.gr/courses/CE330>

I

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα 10/28/2015
Δεδομένων

7^η διάλεξη – Ακολουθιακά Κυκλώματα

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

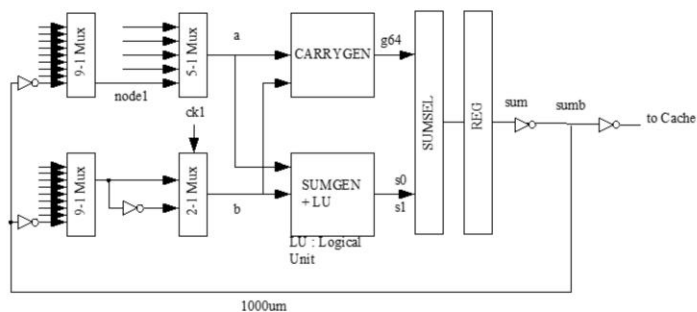
Περιεχόμενα

- ▶ **Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων**
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων

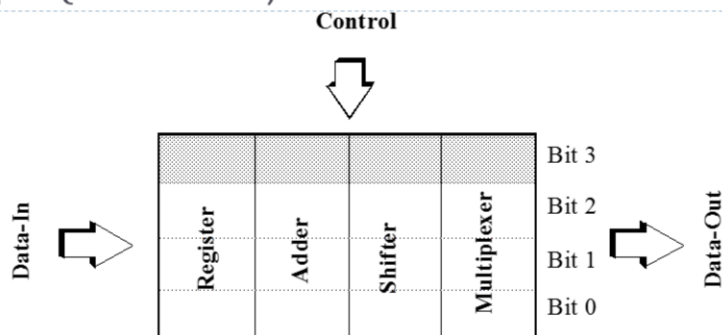
Κατηγορίες	Παραδείγματα
Αριθμητικές, Λογικές Μονάδες	Αθροιστές, Πολλαπλασιαστές, Ολισθητές, Συγκριτές, κτλ.
Μνήμη	RAM, ROM, ουρές, καταχωρητές
Κυκλώματα Ελέγχου	Μετρητές, Μηχανές Πεπερασμένων Καταστάσεων
Κυκλώματα Διασυνδεσιμότητας	Δρομολογητές (Switches), Διαιτητές (Arbiters), Κυκλώματα Διαύλων (Bus)

Παράδειγμα Επεξεργαστή



- Μονάδες Εκτέλεσης Itanium (x6 στον επεξεργαστή)

Δομή κυκλώματος κατατετμημένου ανά ψηφίο (bit-sliced)



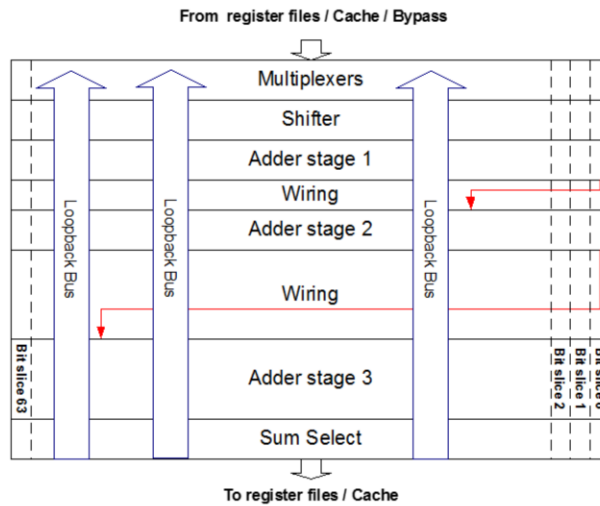
- ▶ Η μεθοδολογία κατάτμησης ανά bit χωροθετεί
 - ▶ Οριζοντίως τα ψηφία των δρώμενων
 - ▶ Είσοδος και Έξοδος οριζόντια
 - ▶ Καθέτως τα τμήματα των κυκλώματα επεξεργασίας τους
 - ▶ Σήματα Ελέγχου κάθετα

▶ 6

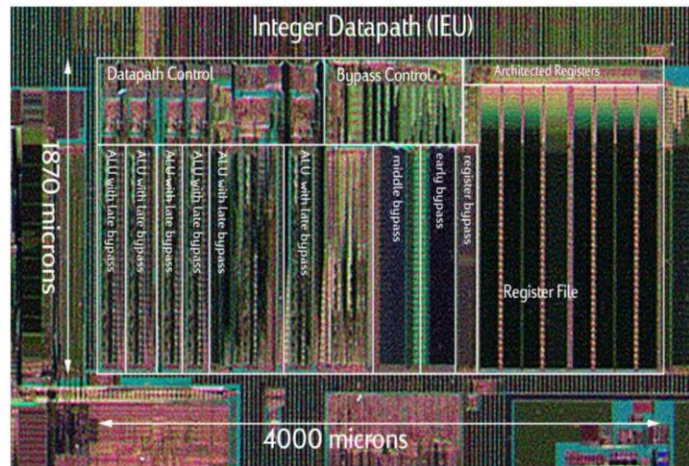
HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Παραπάνω παρουσιάζεται ο πιο συνήθης χωροθέτηση αριθμητικών, λογικών κυκλωμάτων. Η μονάδα επεξεργασίας είναι η λέξη (λ.χ. 32-bit σε επεξεργαστές, 8-bit σε DSP) και αυτή καθορίζει και την δομή της υλοποίησης στον χώρο.

Δομή κυκλώματος κατατετμημένου ανά ψηφίο (bit-sliced)



Itanium – Ακέραιο Τμήμα Δεδομένων

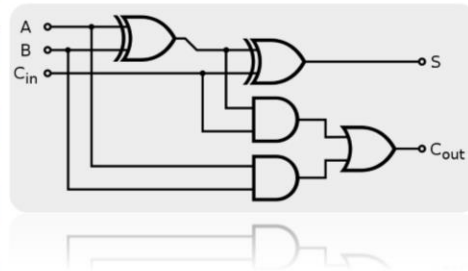


Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ **Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή**
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

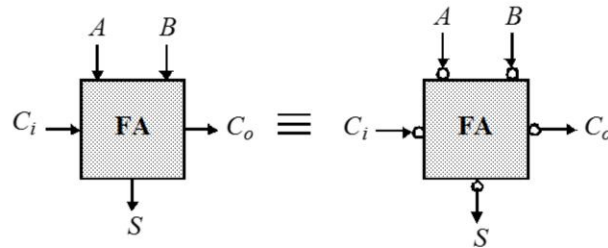
Πλήρης Αθροιστής (Full Adder)

a	b	ci	co	s	κρατούμενο
0	0	0	0	0	αναίρεση
0	0	1	0	1	αναίρεση
0	1	0	0	1	προώθηση
0	1	1	1	0	προώθηση
1	0	0	0	1	προώθηση
1	0	1	1	0	προώθηση
1	1	0	1	0	ανάθεση
1	1	1	1	1	ανάθεση



$$\begin{aligned}
 s &= a'b'ci + a'bci' + ab'ci' + abci = \\
 &\quad ci (a'b' + ab) + ci' (a'b + ab') = \\
 &\quad ci (a (+)' b) + ci' (a (+) b) = a (+) b (+) c \\
 co &= a'bci + ab'ci + abci' + abci = \\
 &\quad ab (ci + ci') + ci (a'b + ab') = ab + ci(a (+) b)
 \end{aligned}$$

Ιδιότητα Αντιστροφής

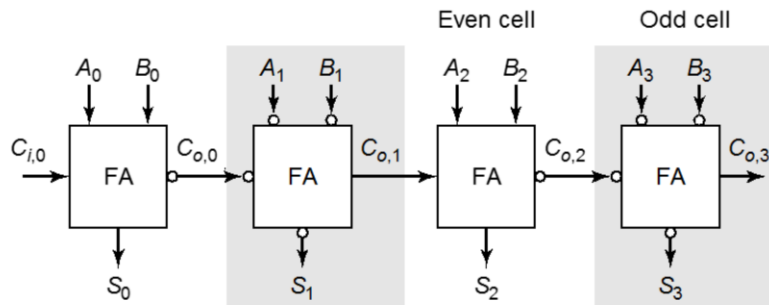


$$\bar{S}(A, B, C_i) = S(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}_i)$$

$$\bar{C}_o(A, B, C_i) = C_o(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}_i)$$

Η ιδιότητα αντιστροφής, που παρουσιάζουν οι λογικές εξισώσεις του αθροιστή, συνεπάγεται ότι η αντιστροφή των εισόδων συνεπάγεται αντιστροφή της εξόδου.

Ιδιότητα Αντιστροφής



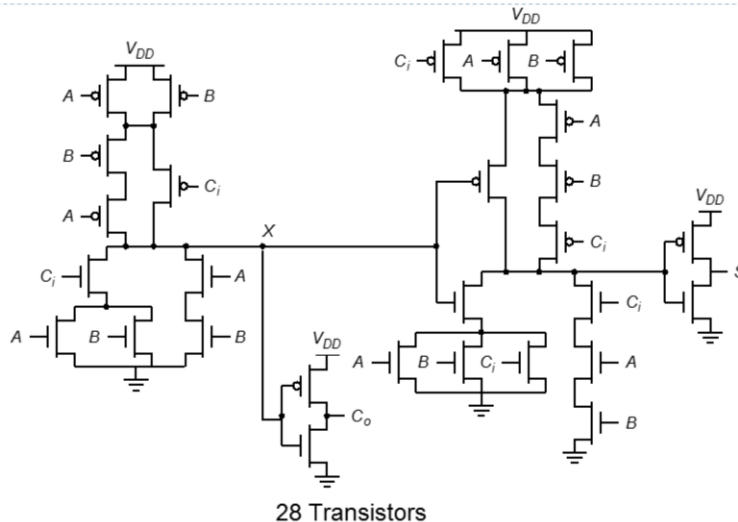
Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα Αντιστροφής

Η παραπάνω διασύνδεση της αλυσίδας κρατουμένου μειώνει τα λογικά στάδια

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS



▶ 14

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Παραπάνω βλέπουμε την απλούστερη υλοποίηση ολοκληρωμένου αθροιστή σε CMOS, ο οποίος και απαριθμεί 28 τρανζίστορ: $C_o = AB + BC_i + AC_i$, $S = ABC_i + C_o'$ ($A + B + C_i$). Οι δυο εξισώσεις έχουν επιλεγεί για να μοιράζονται συνδυαστική λογική.

Εκτός του μεγάλου του εμβαδού το παραπάνω κύκλωμα είναι ιδιαίτερα αργό:

- τα δίκτυα ανέλκυσης είναι σημαντικού μεγέθους με μεγάλα PMOS τρανζίστορ
- η χωρητικότητα που εμφανίζεται στο κρατούμενο ($C_o \rightarrow C_i$) είναι σημαντική μια και απαρτίζεται από 2 χωρητικότητες διάχυσης (αντιστροφέας που παράγει το C_o) και 6 χωρητικότητες πύλης (τα τρανζίστορ με είσοδο C_i). Επιπλέον θα υπάρχει και η χωρητικότητα της διασύνδεσης.
- τα δυο κυκλώματα αποτελούνται από δυο στάδια. Δυο στάδια στην αλυσίδα του κρατουμένου επιβαρύνουν σημαντικά την καθυστέρηση προώθησης του κρατουμένου. Στην παραγωγή του αθροίσματος δεν είναι τόσο σημαντική η καθυστέρηση μια και πραγματοποιείται μια φορά.

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Έμμεση Υλοποίηση και Σήματα

a	b	ci	co	s	κρατούμενο
0	0	0	0	0	αναίρεση
0	0	1	0	1	αναίρεση
0	1	0	0	1	προώθηση
0	1	1	1	0	προώθηση
1	0	0	0	1	προώθηση
1	0	1	1	0	προώθηση
1	1	0	1	0	ανάθεση
1	1	1	1	1	ανάθεση

▶ Σε κάποιες υλοποιήσεις αθροιστών οι έξοδοι (s, co) προκύπτουν από έμμεσες εκφράσεις:

▶ $G = A \cdot B$

▶ $D = A' \cdot B'$

▶ $P = A + B$ ή

▶ $P = A (+) B$

▶ Έτσι, οι εκφράσεις για co, s μετατρέπονται ως εξής:

▶ $co = G + P \cdot ci$ και

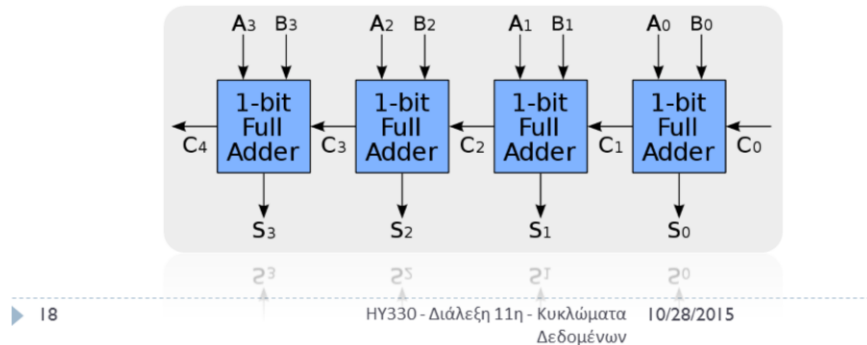
▶ $s = p (+) ci$

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ **Σειριακό Κρατούμενο**
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Σειριακό Κρατούμενο

- ▶ Η απλούστερη υλοποίηση ενός n -bit αθροιστή
 - ▶ Εν σειρά το κάθε ψηφίο n παίρνει κρατούμενο από το $(n-1)$
- ▶ Μειονεκτήματα
 - ▶ Μεγάλης καθυστέρησης κρίσιμο μονοπάτι
 - ▶ Από το c_0 μέχρι το δεξιότερο κρατούμενο



$$c_0 = ab (c_i + c_i') + c_i (a'b + ab')$$

Άρα η καθυστέρηση σε Λογικά Επίπεδα είναι 4 (τεχνολογικά ανεξάρτητη καθυστέρηση).

Αναλυτικά 1^ο επίπεδο (χειρότερο) είναι το $a'b$, ab' , 2^ο επίπεδο το $a'b + ab'$,

3^ο επίπεδο το $c_i (a'b + ab')$, και 4^ο ολόκληρο το c_0 .

Άρα, η καθυστέρηση του c_0 είναι 4 Λογικά Επίπεδα, ενώ το κόστος σε εμβαδό είναι 9.

Το κόστος σε εμβαδό ισούται με το πλήθος των εμφανίσεων των δυαδικών όρων-μεταβλητών.

Έτσι:

Καθυστέρηση c_1 : 4 t.u. (1 t.u. – time unit = 1 επίπεδο λογικής AND/OR = 1 g.d. – gate delay)

Καθυστέρηση c_2 : (4 + 4) t.u.

Καθυστέρηση c_3 : (4 + 4 + 4) t.u.

Καθυστέρηση c_4 : (4 + 4 + 4 + 4) t.u.

Καθυστέρηση c_i : (4 * 1) t.u.

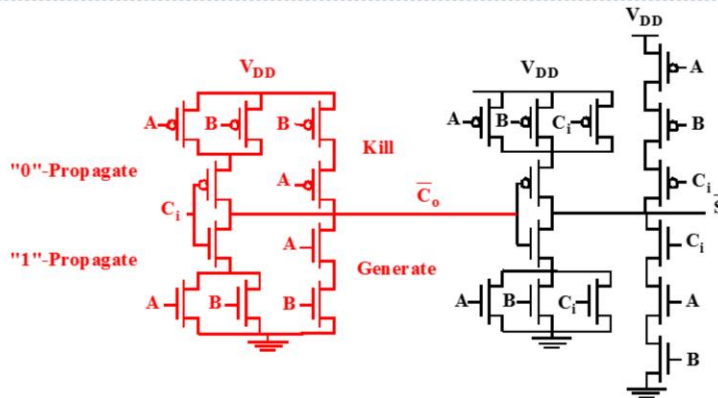
Η καθυστέρηση του 4-bit αθροιστή είναι $4 * 3$ (4^ο bit) + 4 (s_3) = 16 λογικά επίπεδα/t.u.

Καθυστέρηση c_{16} (16-bit αθροιστή) = $4 * 16 = 64$ t.u., δηλ. 64 λογικά επίπεδα (ή καθυστερήσεις τεχνολογικά-ανεξάρτητων πυλών)

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Αθροιστής Mirror – «Καθρέφτης»



24 transistors

► Βασίζεται στις: $c_o = G + P c_i$, $s = p (+) c_i$,
 $d = a'b'$, $g = ab$, $p = a + b$

► 20

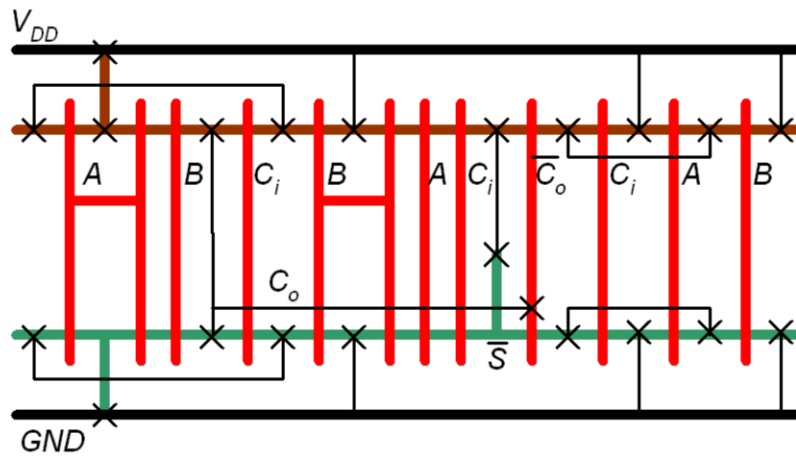
HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα 10/28/2015
 Δεδομένων

Ο παραπάνω αθροιστής έχει ένα ιδιότυπο κύκλωμα παραγωγής του κρατουμένου. Πρώτον, δεν χρησιμοποιεί αντιστροφή, και δεύτερον τα δίκτυα καθέλκυσης και ανέλκυσης δεν είναι δυικά αλλά συμμετρικά!

Οι ιδιότητες που εκμεταλλεύεται η συμμετρική πύλη είναι (α) η συμπληρωματικότητα των σχέσεων d , g και p , (β) συμμετρία μεταξύ των d και g , και συμμετρία της προώθησης ως προς το C_i . Το δεξί τμήμα είναι μετασχηματισμός του απλού στατικού CMOS αθροιστή όπου έχουμε διαιρέσει την αρχική πύλη σε δυο συμμετρικά μέρη.

Στην παραπάνω πύλη μπορούμε να κρατήσουμε το δεξί τμήμα (S) σε ελάχιστο μέγεθος και να βελτιστοποιήσουμε τα μεγέθη του αριστερού (C_o') ως προς την αλυσίδα.

Γράμμο-διάγραμμα Αθροιστή Mirror



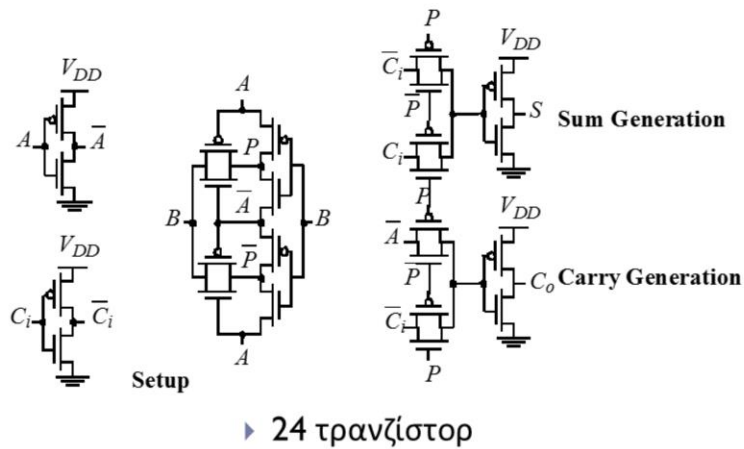
Αθροιστής Mirror

- ▶ Μέχρι 2 τρανζίστορ σε σειρά στο κρατούμενο
- ▶ Τρανζίστορ C_i κοντά στην έξοδο
- ▶ Στην σχεδίαση της διάταξης ο σημαντικότερος περιορισμός είναι η μείωση της χωρητικότητας C_o
 - ▶ μείωση των 4 χωρητικότητων διάχυσης!
- ▶ Η χωρητικότητα στο C_o αναλογεί σε
 - ▶ 4 εσωτερικές διάχυσης
 - ▶ 2 εσωτερικές πύλης-εξόδου
 - ▶ 6 εξωτερικές
- ▶ Τρανζίστορ του S → ελάχιστο μέγεθος

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ **Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης**
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης



► 24

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Η παραπάνω υλοποίηση βασίζεται στις εξισώσεις: $P = A (+) B$, $Co = G + P ci$ και $S = p (+) ci$.

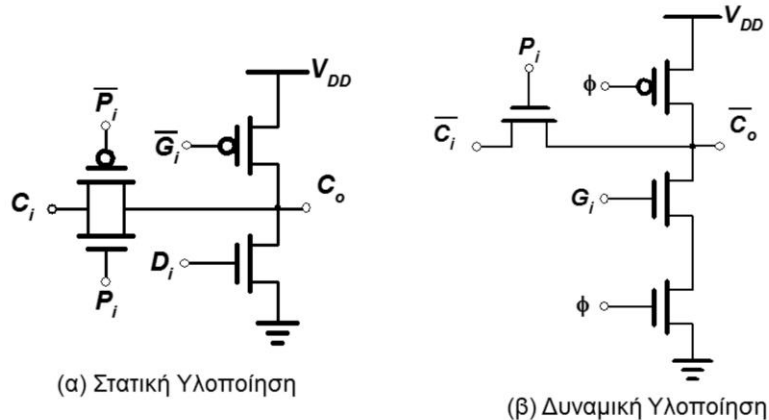
Οι 2 πύλες XOR υπολογίζουν τα P και P' αντίστοιχα, και κατόπιν παράγονται, βάση αυτών τα S και Co. Η παραπάνω υλοποίηση εξασφαλίζει ομοιόμορφη καθυστέρηση για τα σήματα Co και S.

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ **Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης**
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester (Manchester Carry Chain) - 1

- Απλοποίηση του αθροιστή με τρανζίστορ διέλευσης:



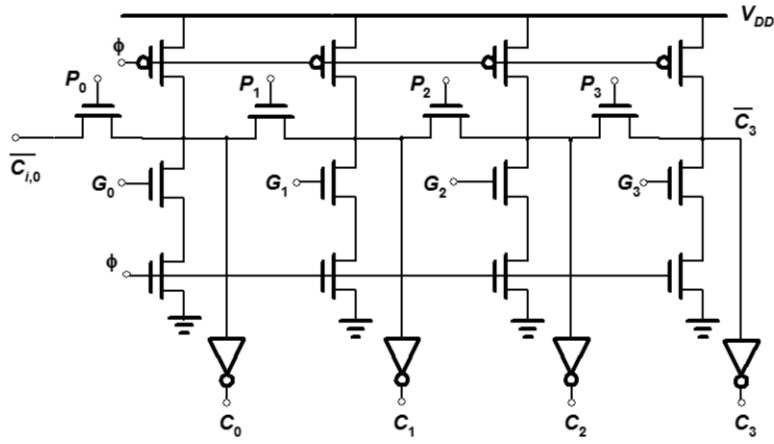
► 26

ΗΥ330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Τα παραπάνω σχήματα αποτελούν μετασχηματισμούς της αλυσίδας κρατουμένου του αθροιστή υλοποιημένου με τρανζίστορ διέλευσης.

Το σχήμα στα αριστερά είναι στατική υλοποίηση του κρατουμένου βάσει των σημάτων G, P και D, ενώ το σχήμα στα δεξιά αποτελεί δυναμική υλοποίηση με ρολόι και χρησιμοποιεί μόνο σήματα τα P και D.

Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester (Manchester Carry Chain) - 2



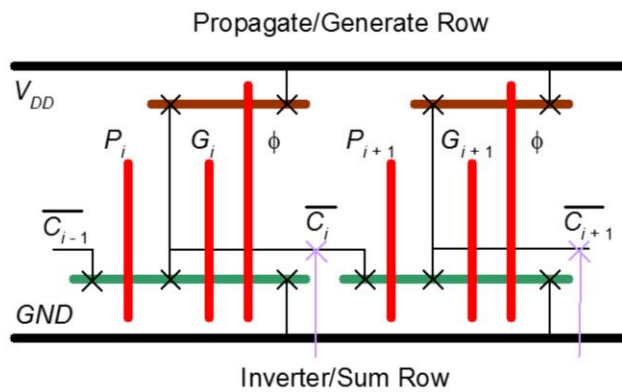
$$\begin{aligned} c_1 &= G_0 + P_0 c_0, \\ c_2 &= G_1 + P_1 c_1 = G_1 + P_1 (G_0 + P_0 c_0), \dots \end{aligned}$$

▶ 27

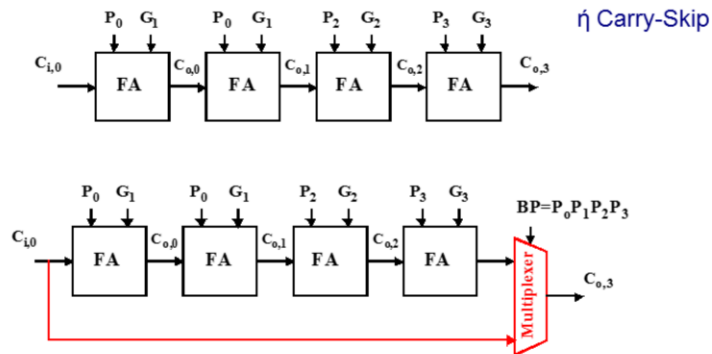
HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα | 10/28/2015
Δεδομένων

Παραπάνω παρουσιάζεται η δυναμική υλοποίηση ενός αθροιστή 4-bit που χρησιμοποιεί την δυναμική πύλη για την αλυσίδα κρατουμένου.

Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester (Manchester Carry Chain) – Γράμμο-Διάγραμμα



Αθροιστής Παράκαμψης (Carry-Bypass/Skip)



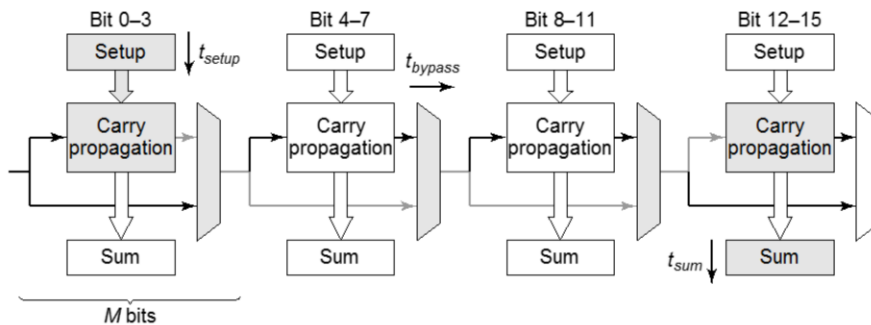
```

If (P0P1P2P3)
    Co,3 = 1
else Co,3 = Ci,0
else GENERATE or DELETE
    
```

Η αρχιτεκτονική του αθροιστή παράκαμψης προσθέτει ένα μονοπάτι παράκαμψης της αλυσίδας των κρατούμενων χρησιμοποιώντας την σύζευξη των σημάτων προώθησης (προώθηση ομάδας – group propagate : $GP = P_0P_1P_2P_3$).

Έτσι, επιτυγχάνει επιτάχυνση της χειρίστης περίπτωσης, δηλ. προώθησης του κρατουμένου από είσοδο σε έξοδο.

Αθροιστής Παράκαμψης (Carry-Bypass/Skip)



$$t_{adder} = t_{setup} + M t_{carry} + (N/M - 1) t_{bypass} + (M - 1) t_{carry} + t_{sum}$$

▶ 30

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Παραπάνω βλέπουμε έναν αθροιστή παράκαμψης 16-bit υλοποιημένο με 4 επιμέρους αθροιστές.

Το κρίσιμο μονοπάτι που φαίνεται παραπάνω σκιασμένο σε γκρι αποτελεί ένα πάνω όριο στην καθυστέρηση του αθροιστή θεωρώντας την εξής περίπτωση:

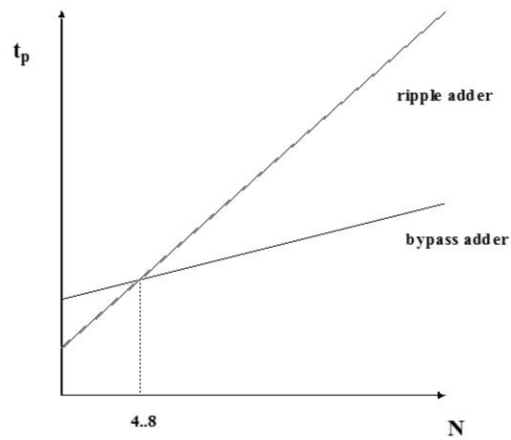
- χρόνος προετοιμασίας (υπολογισμός P)
- υπόθεση ότι αξιολογείται κανονικά η αλυσίδα (κρατούμενο από το 1^ο bit – G0)
- παράκαμψη κρατούμενου στους επόμενους δυο αθροιστές
- υπόθεση ότι αξιολογείται κανονικά η αλυσίδα στον τελευταίο (κρατούμενο από το 2^ο bit – G1)
- χρόνος υπολογισμού S

Ο βέλτιστος αριθμός ψηφίων ανά επιμέρους αθροιστή υπολογίζεται από παραμέτρους τεχνολογίας, π.χ. καθυστέρηση/φορτίο του πολυπλέκτη στο κρατούμενο, διαφορά καθυστέρησης μεταξύ της παράκαμψης και συμβατικής αλυσίδας.

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

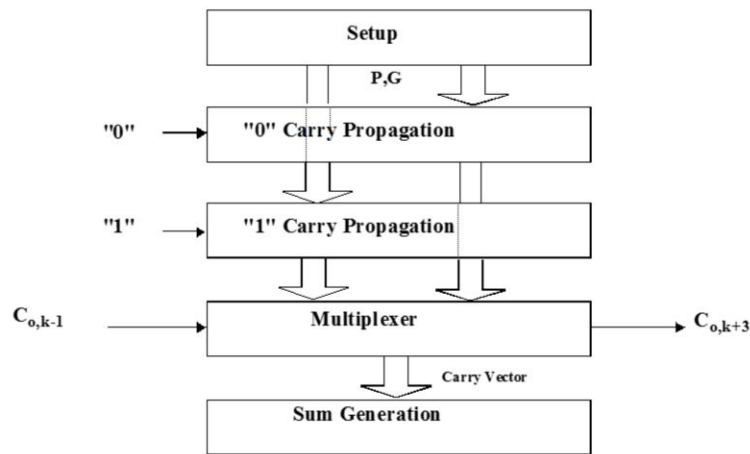
Αθροιστής Παράκαμψης (Carry-Bypass/Skip)



Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

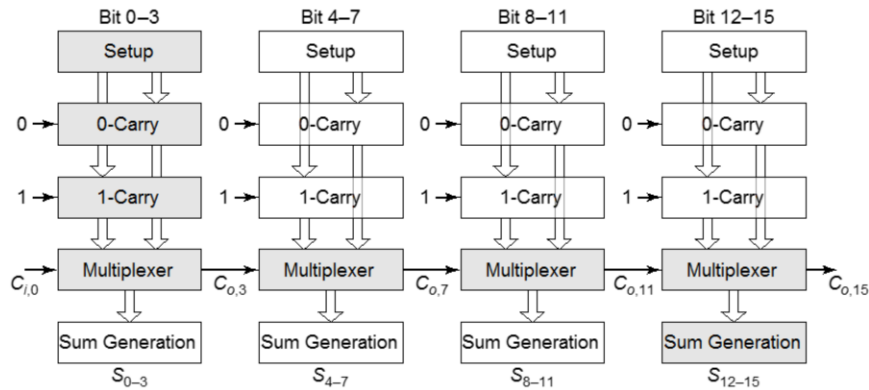
Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου



Ο αθροιστής επιλογής κρατουμένου αποτελεί προσέγγιση «ωμής δύναμης» (brute force) όπου υπολογίζονται ούτως η άλλως τα εναλλακτικά αποτελέσματα του κρατουμένου για τις δυο πιθανές τιμές του κρατουμένου, 0 ή 1.

Έτσι, για μια ομάδα bits, με την άφιξη της κυριολεκτικής τιμής του κρατουμένου επιλέγεται το 1 από τα 2 προϋπολογισμένα αποτελέσματα και το άθροισμα.

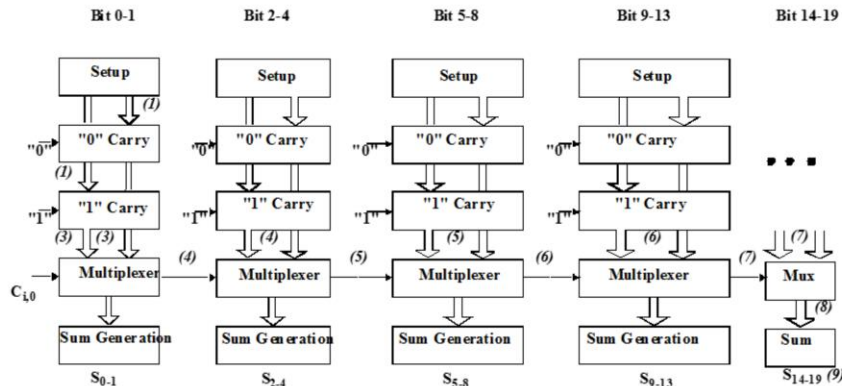
Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου - Γραμμικός



$$t_{add} = t_{setup} + \left(\frac{N}{M}\right)t_{carry} + Mt_{mux} + t_{sum}$$

Παραπάνω βλέπουμε αθροιστή επιλογής 16-bit υλοποιημένο πάλι από ομάδες των 4-bit, και την κρίσιμο οδό του κυκλώματος σκιασμένη σε γκρι.

Αθροιστής Επιλογής Κρατούμενου – Ρίζας



$$t_{add} = t_{setup} + P \cdot t_{carry} + (\sqrt{2N})t_{mux} + t_{sum}$$

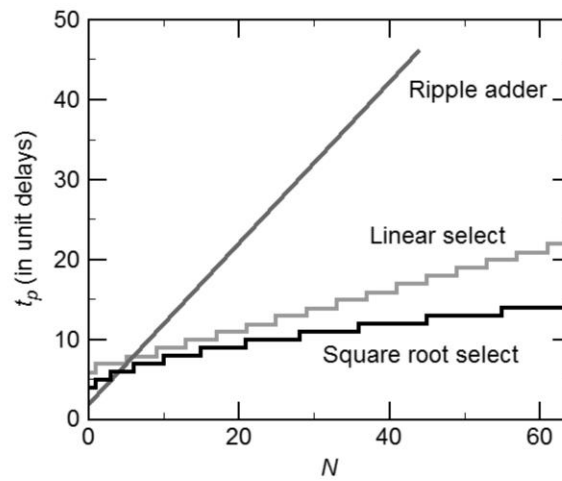
▶ 36

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα | 0/28/2015
Δεδομένων

Ένας μετασχηματισμός που μπορεί να επιταχύνει την λειτουργία του αθροιστή επιλογής είναι το ανομοιομόρφο, και επαυξανόμενο αριθμό ψηφίων, λ.χ. επιπρόσθεση 1 bit για κάθε επιμέρους αθροιστή. Το κίνητρο για αυτήν την ανομοιομορφία είναι η μη ισοσκελισμένη άφιξη που παρατηρείται στην κρίσιμη οδό μεταξύ των σημάτων της αλυσίδας του πολυπλέκτη, και του υπολογισμού των 2 λύσεων, η οποία αντιστοιχεί πρακτικά σε διαθέσιμο, εκμεταλλεύσιμο χρόνο.

Έτσι, για P στάδια και M bits για το αρχικό, όπου επιπροσθέτεται 1 bit για κάθε στάδιο έχουμε $N = M + (M + 1) + \dots + (M + P - 1) = MP + P(P-1)/2 \approx P^2/2$. Έτσι $P \approx \sqrt{2N}$.

Αθροιστής Επιλογής Κρατούμενου – Ρίζας



Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Πρόγνωση Κρατουμένου

- ▶ Ο βασικός στόχος είναι να μειωθεί η μεγάλη καθυστέρηση της αλυσίδας των κρατουμένων των n -bit
- ▶ Βασική ιδέα
 - ▶ Ακριβής πρόγνωση κρατουμένου πριν αυτό προκύψει από τις εξισώσεις
- ▶ Για ομάδες n -bit (όπου συνήθως $n \sim 4$)
 - ▶ Υπολογίζεται η πρόγνωση του κρατουμένου
 - ▶ αυτή προωθείται στην επόμενη ομάδα
 - ▶ Η καθυστέρηση της πρόγνωσης είναι σημαντικά μικρότερη από τον σειριακή προώθηση του κρατουμένου

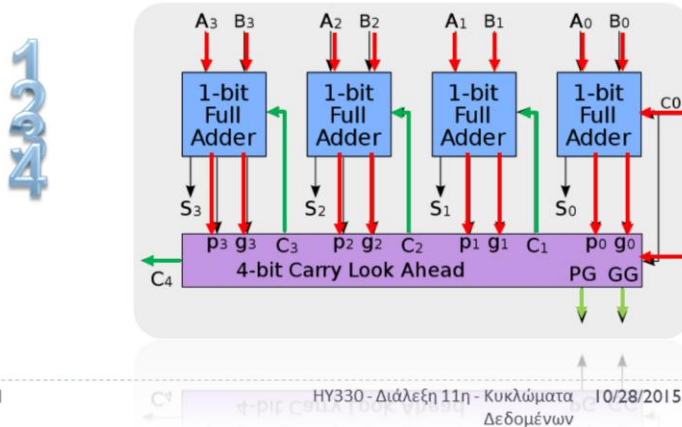
Πρόγνωση Κρατούμενου - Γένεση, Προώθηση

- ▶ Στην πρόσθεση $A + B$ παράγεται κρατούμενο μόνο όταν AB :
 - ▶ $G = AB$
- ▶ Ένα κρατούμενο προάγεται στο επόμενο ψηφίο όταν:
 - ▶ $P = A + B$
- ▶ Το κρατούμενο μπορεί να εκφραστεί ως:
 - ▶ $c_0 = G + P \cdot c_1$
- ▶ Για $v=4$ -bits:
 - ▶ $c_1 = G_0 + P_0 \cdot c_0$
 - ▶ $c_2 = G_1 + P_1 \cdot c_1 = G_1 + P_1(G_0 + P_0 \cdot c_0) = G_1 + G_0P_1 + c_0P_0P_1$
 - ▶ $c_3 = G_2 + G_1P_2 + G_0P_1P_2 + c_0P_0P_1P_2$
 - ▶ $c_4 = G_3 + G_2P_3 + G_1P_2P_3 + c_0P_0P_1P_2P_3$

Ομοιόμορφη εξίσωση

Πρόγνωση Κρατουμένου – 4-bit Αθροιστής

- ▶ $C_4 = (G_3 + G_2P_3 + G_1P_2P_3 + G_0P_1P_2P_3) + C_0(P_0P_1P_2P_3)$
- ▶ $PG = P_0P_1P_2P_3$
- ▶ $GG = G_3 + G_2P_3 + G_1P_2P_3 + G_0P_1P_2P_3$
- ▶ $C_4 = GG + C_0 PG$



Καθυστέρηση για $P_i = A_i B_i$, $G_i = A_i + B_i = 1$ Λογικό Επίπεδο
Καθυστέρηση $p_i, g_i : 1 \text{ t.u.}$

Καθυστέρηση για c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 :

$c_1 = G_0 + P_0 c_0$, δηλαδή 3 λογικά επίπεδα.

Αναλυτικά τα G_0, P_0 έχουν καθυστέρηση 1 λογικό επίπεδο, το 2^ο είναι το $P_0 c_0$,

και τρίτο ολόκληρο το c_1

Ομοίως για το c_4 :

$c_4 = G_3 + G_2P_3 + G_1P_2P_3 + C_0P_0P_1P_2P_3$

Τα $P_0, P_1, P_2, P_3, G_2, G_1, G_2$ έχουν καθυστέρηση 1 λογικό επίπεδο, το 2^ο είναι το $C_0P_0P_1P_2P_3$,

και τρίτο ολόκληρο το c_4 .

Έτσι:

Καθυστέρηση για $c_1-c_4 : 3 \text{ t.u.}$ (για υλοποίηση 2-επίπεδης λογικής)

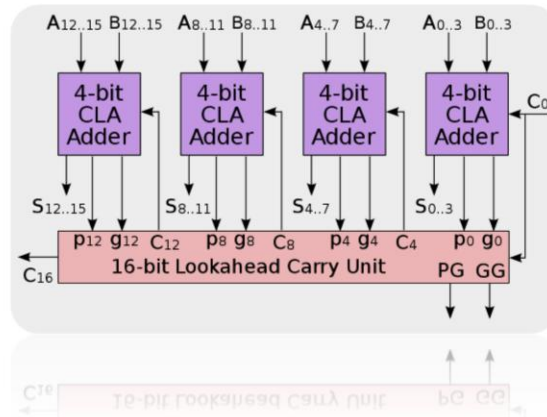
Καθυστέρηση για $PG, GG = 2 \text{ t.u.}$

Άρα η καθυστέρηση για τον 4-bit αθροιστή είναι $3 + 4 = 7$ λογικά επίπεδα (αντί για 16 του σειριακού κρατουμένου)

Πρόγνωση Κρατούμενου – 16-bit Αθροιστής

- Ιεραρχικά η μονάδα LCU υπολογίζει τα:

- PG_i ,
- GG_i
- c_{16}



► 42

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Για τον 16-bit αθροιστή με 4 των 4-bit με Πρόγνωση και 1 μονάδα Ιεραρχικής Πρόγνωσης (LCU), οι καθυστερήσεις έχουν ως εξής:

PP_i (4-bit) = $P0P1P2P3 = 2$ λογικά επίπεδα

GG_i (4-bit) = $G3 + G2P3 + G1P2P3 + G0P1P2P3 = 3$ λογικά επίπεδα

Ιεραρχικό c_i (c_4, c_8, c_{12}, c_{16}) από τα PP_i, GG_i :

$c_4 = GG_1 + c_0 PP_1$

$c_8 = GG_2 + c_4 PP_2 = GG_2 + GG_1 PP_2 + c_0 PP_1 PP_2$

$c_{12} = GG_3 + c_8 PP_3 = GG_3 + (GG_2 + GG_1 PP_2 + c_0 PP_1 PP_2) PP_3$

$= GG_3 + GG_2 PP_3 + GG_1 PP_2 PP_3 + c_0 PP_1 PP_2 PP_3,$

όπου GG_i, PP_i είναι για τον i ($1^\circ, 2^\circ$ και 3°) 4-bit αθροιστή

Άρα, τα c_8, c_{12} έχουν βάθος 5 λογικά επίπεδα, το c_4 έχει 4.

$s_{0...3} : 4 \text{ t.u.}$

$s_{4...7} : 9 \text{ t.u.}$

$s_{8...11} : 9 \text{ t.u.}$

$s_2, s_3, s_4 : 9 \text{ t.u.,}$

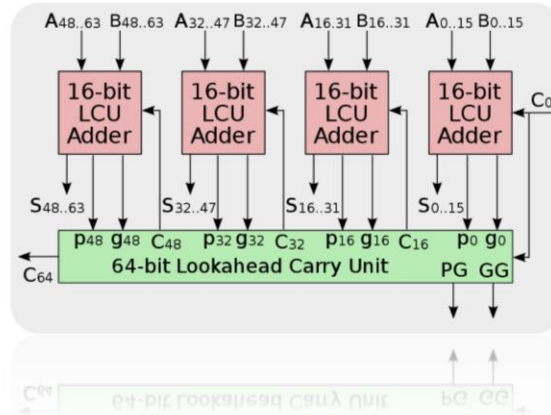
c_{16} επίσης σε 5 t.u.

Η μέγιστη καθυστέρηση είναι βάθους 9 (9 t.u.).

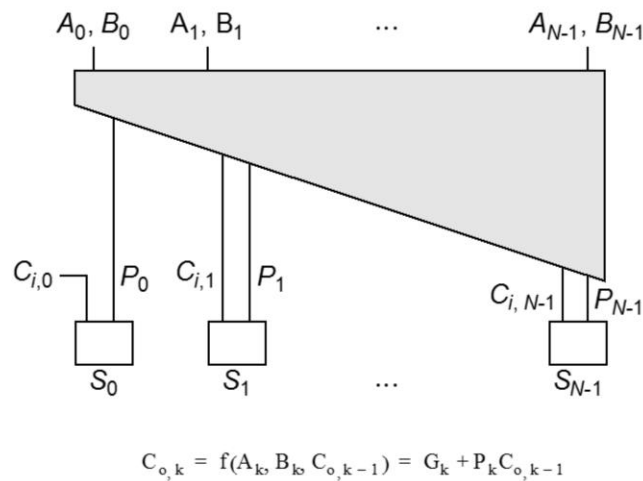
Στον 16-bit σειριακό αθροιστή θα ήταν $4 \cdot 15$ (κρατούμενου του $15^{\text{ου}}$ bit) + 4 = 64 λογικά επίπεδα/t.u.

Πρόγνωση Κρατουμένου – 64-bit Αθροιστής

- Ίδια ιδέα με 2^ο επίπεδο ιεραρχίας



Αθροιστής Πρόγνωσης Κρατουμένου (Lookahead)



Παραπάνω βλέπουμε την κλασσική αρχιτεκτονική του αθροιστή πρόγνωσης κρατουμένου, όπου τονίζεται η επαυξανόμενη λογική πολυπλοκότητα σε κάθε επόμενο ψηφίο.

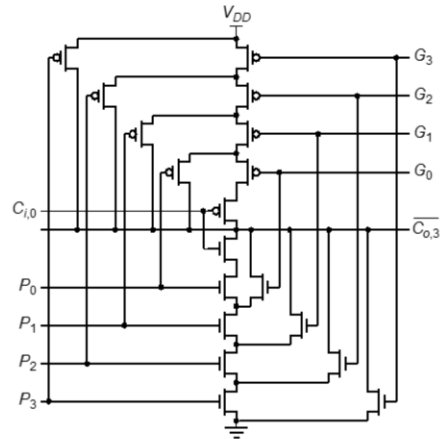
Πρόγνωση Κρατουμένου - επίπεδο τρανζίστορ

Εξισώσεις Κρατουμένου :

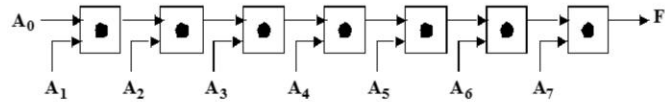
$$C_{o,k} = G_k + P_k(G_{k-1} + P_{k-1}C_{o,k-2})$$

Πλήρης Ανάπτυξη:

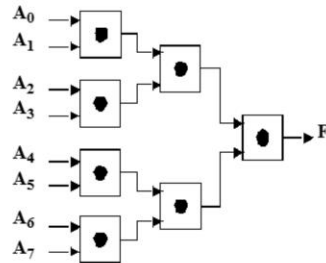
$$C_{o,k} = G_k + P_k(G_{k-1} + P_{k-1}(\dots + P_1(G_0 + P_0 C_{i,0})))$$



Πρόγνωση Κρατουμένου - Γραμμική ή Λογαριθμική Διάταξη



$$t_p \sim N$$



$$t_p \sim \log_2(N)$$

- ▶ διάταξη δέντρου κατά τον υπολογισμό συνεπάγεται λογαριθμική καθυστέρηση!

Parallel Prefix Adders

► Prefix Sum

$$y_0 = x_0$$

$$y_1 = x_0 + x_1$$

$$y_2 = x_0 + x_1 + x_2$$

input numbers	1	2	3	4	5	6	...
prefix sums	1	3	6	10	15	21	...

► Parallel Prefix Sums Problem is defined as:

Given:	x_0	x_1	x_2	x_3	...	x_{k-1}
Find:	x_0	$x_0 + x_1$	$x_0 + x_1 + x_2$	$x_0 + x_1 + x_2 + x_3$		$x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{k-1}$

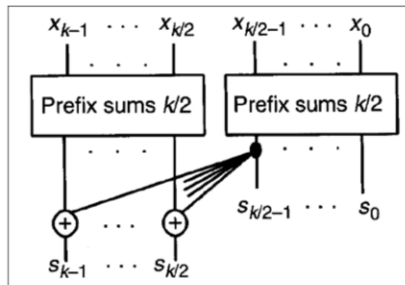
16-input parallel prefix sum

Carry Operator for CLA Adders

- ▶ Define $(g', p') \text{ c } (g'', p'') = (g, p) \Leftrightarrow$
 - ▶ $g = g'' + g' p''$, and
 - ▶ $p = p' p''$
- ▶ Carry Operator Properties
 - ▶ Associative
 - ▶ $((g_0, p_0) \text{ c } (g_1, p_1)) \text{ c } (g_2, p_2) = (g_0, p_0) \text{ c } ((g_1, p_1) \text{ c } (g_2, p_2))$
 - ▶ **NOT** Commutative
 - ▶ $(g_0, p_0) \text{ c } (g_1, p_1) \neq (g_1, p_1) \text{ c } (g_0, p_0)$
- ▶ Associative nature of Carry Operator can be used to Compute Prefix Carry Networks!

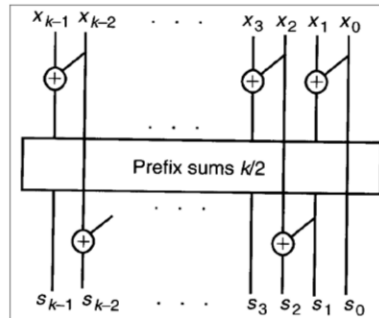
Parallel Prefix Carry Networks

- ▶ PPCN built using two $k/2$ -input networks and $k/2$ adders



- ▶ $D(k) = D(k/2) + 1 = \log_2 k$
- ▶ $C(k) = 2C(k/2) + k/2 = (k/2) \log_2 k$

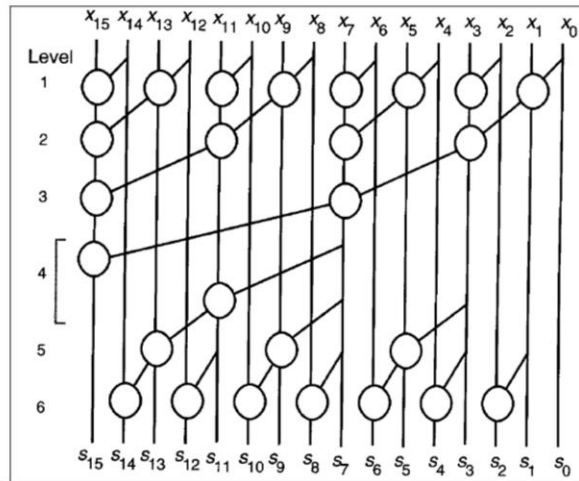
- ▶ PPCN built using one $k/2$ -input networks and $k - 1$ adders



- ▶ $D(k) = D(k/2) + 2 = 2\log_2 k - 1$
- ▶ $C(k) = C(k/2) + k - 1 = 2k - 2 - \log_2 k$

Parallel Prefix Carry Networks

► Brent-Kung 16-input Parallel Prefix Adder

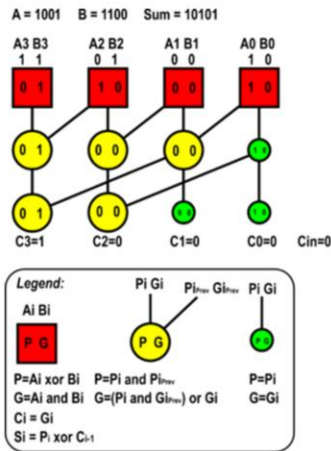


► 50

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα 10/28/2015
Δεδομένων

Parallel Prefix Carry Networks

► Kogge-Stone 6-input Parallel Prefix Adder



► 51

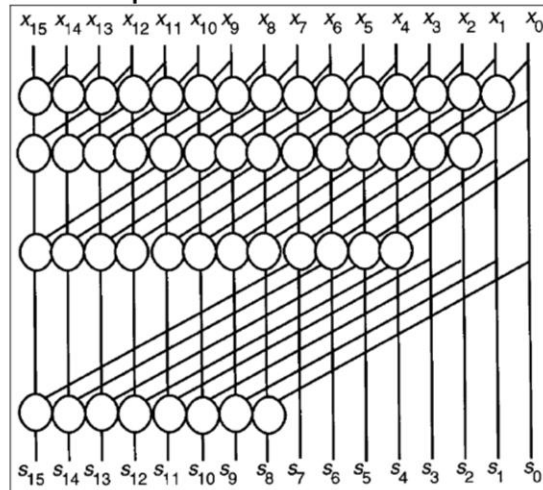
HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα 10/28/2015
Δεδομένων

Is similar to $k/2$ -input networks and $k/2$ adders design (LHS of Slide 18), but avoids the fan-out problem by distributing the computations.

A k -input Kogge-Stone has delay of $\log_2 k$ levels, and a cost of $k \log_2 k - k + 1$ – fastest possible implementation for two-input blocks.

Parallel Prefix Carry Networks

► Kogge-Stone 16-input Parallel Prefix Adder



► 52

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Is similar to $k/2$ -input networks and $k/2$ adders design (LHS of Slide 18), but avoids the fan-out problem by distributing the computations.

A k -input Kogge-Stone has delay of $\log_2 k$ levels, and a cost of $k \log_2 k - k + 1$ – fastest possible implementation for two-input blocks.

Parallel Prefix Carry Networks

- ▶ Radix and Sparsity

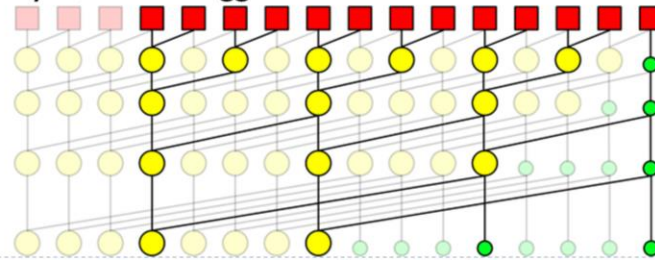
- ▶ Radix

- ▶ how many carry results (from the previous level of computation) are used to generate the current carry level (all 2 so far)

- ▶ Sparsity

- ▶ Number of carry bits generated by tree

- ▶ Sparsity 4, 16-bit Kogge-Stone Adder



▶ 53

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα
Δεδομένων 10/28/2015

Parallel Prefix Sum Computation

- ▶ A prefix sum can be calculated in parallel by the following steps.
 - ▶ Compute the sums of consecutive pairs of items in which the first item of the pair has an even index: $z_0 = x_0 + x_1, z_1 = x_2 + x_3$, etc.
 - ▶ Recursively compute the prefix sum w_0, w_1, w_2, \dots of the sequence z_0, z_1, z_2, \dots
 - ▶ Express each term of the final sequence y_0, y_1, y_2, \dots as the sum of up to two terms of these intermediate sequences: $y_0 = x_0, y_1 = z_0, y_2 = z_0 + x_2, y_3 = w_0$, etc. After the first value, each successive number y_i is either copied from a position half as far through the w sequence, or is the previous value added to one value in the x sequence.

Δέντρα Κρατουμένων

$$C_{0,0} = G_0 + P_0 C_{i,0}$$

$$C_{0,1} = G_1 + P_1 G_0 + P_1 P_0 C_{i,0}$$

$$C_{0,2} = G_2 + P_2 G_1 + P_2 P_1 G_0 + P_2 P_1 P_0 C_{i,0}$$

$$= (G_2 + P_2 G_1) + (P_2 P_1)(G_0 + P_0 C_{i,0}) = G_{2:1} + P_{2:1} C_{0,0}$$

► Ορίζουμε σύνθετα σήματα $Gx:y$ και $Px:y$, όπως παραπάνω

► Ορίζουμε πράξη \bullet (υποκύκλωμα) :

$$(G, P) \bullet (G', P') = (G + PG', PP')$$

► η παραπάνω πράξη μας επιτρέπει να υλοποιήσουμε διαφορετικές αρχιτεκτονικές αθροιστών με πρόγνωση

► $(C_{3:0}) = [(G_3, P_3) \bullet (G_2, P_2) \bullet (G_1, P_1) \bullet (G_0, P_0)] \bullet (C_i, 0)$, και

► $(G_{3:0}, P_{3:0}) = (G_{3:2}, P_{3:2}) \bullet (G_{1:0}, P_{1:0})$

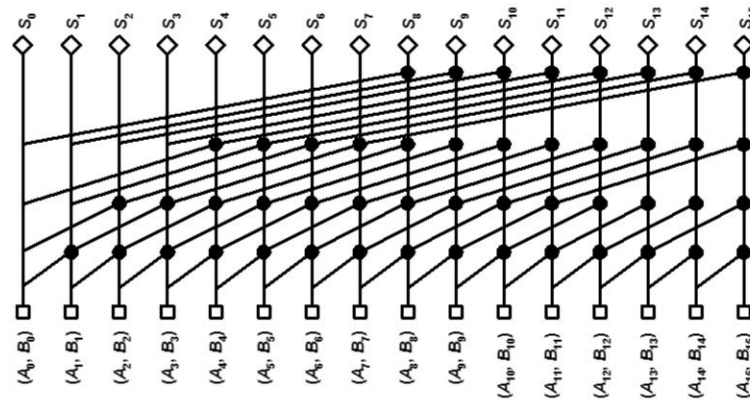
► 55

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα 10/28/2015
Δεδομένων

Η σχέση/πράξη \bullet είναι προσεταιριστική αλλά όχι μεταθετική.

Με τον ορισμό της πράξης \bullet μπορούμε εύκολα να σχηματίσουμε λογαριθμικής καθυστέρησης αθροιστές, σχηματίζοντας ιεραρχικά τις ομάδες G , P και τα σχετικά κρατούμενα.

Λογαριθμικός Αθροιστής Πρόγνωσης



Δέντρο 16-bit, Βάσης-2 Kogge-Stone

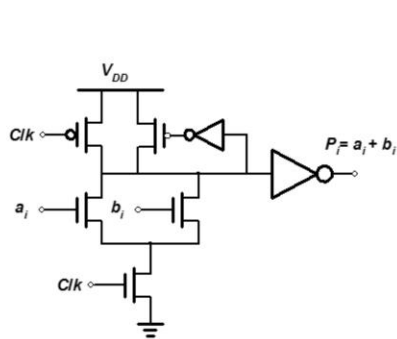
56

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα | 10/28/2015
Δεδομένων

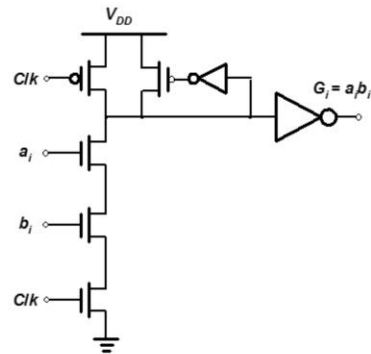
Ο χαρακτηρισμός Βάσης 2 (Radix-2) στοιχειοθετεί ότι το δέντρο είναι δυαδικό, δηλ. δυο είσοδοι κρατούμενων χρησιμοποιούνται κάθε φορά.

Χαρακτηριστικά δέντρου Kogge-Stone: ομοιόμορφες συνδέσεις, σταθερό fanout.

Δυναμικά Κυκλώματα Πρόγνωσης Κρατούμενου - 1

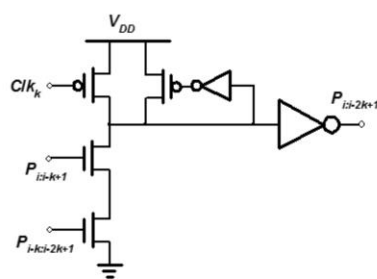


Propagate

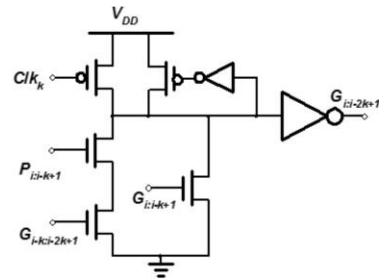


Generate

Δυναμικά Κυκλώματα Πρόγνωσης Κρατουμένου - 2



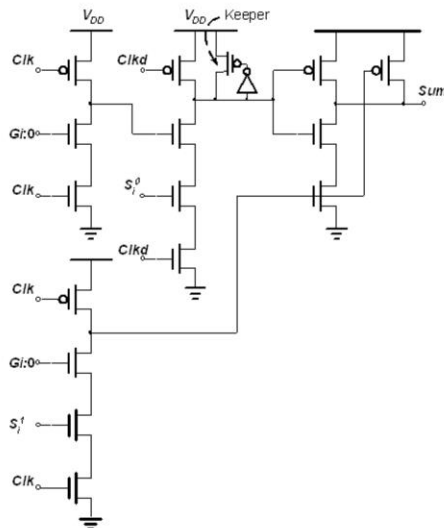
Propagate



Generate

Η σχέση/πράξη • μπορεί να υλοποιηθεί από τα παραπάνω δυναμικά κυκλώματα.

Δυναμικά Κυκλώματα Πρόγνωσης Κρατουμένου - 3 - Έξοδος Αθροίσματος

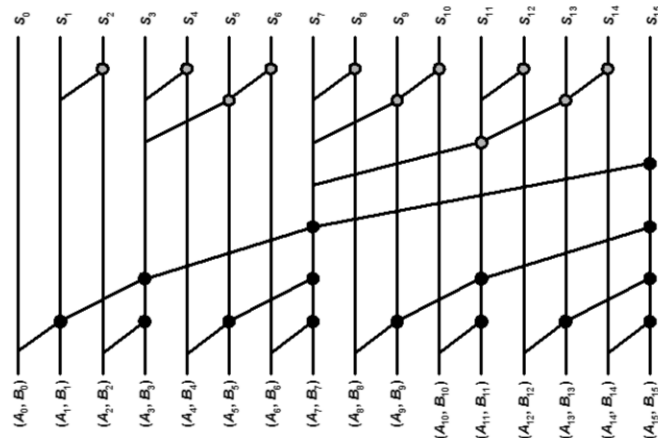


► 59

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα 10/28/2015
Δεδομένων

Το σήμα $Clkd$ είναι καθυστερημένο ρολόι και απαιτείται μια και η συνδεσμολογία των 2 πρώτων δυναμικών πυλών παραβιάζει τους κανόνες δυναμικής σχεδίασης...

Λογαριθμικός Αθροιστής Πρόγνωσης - 2



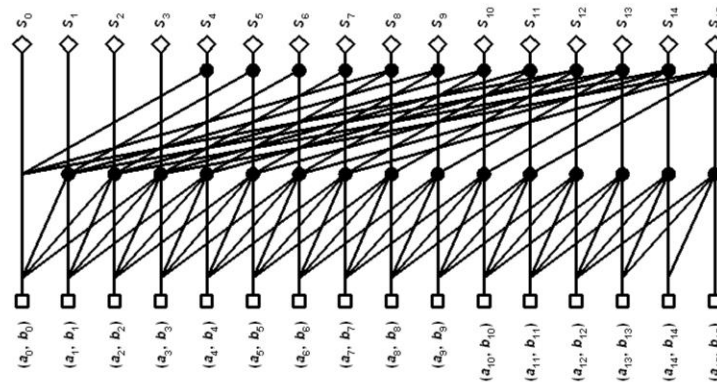
Δέντρο Brent-Kung

▶ 60

ΗΥ330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Η επιλογή του δέντρου γίνεται με βάση της σχέσης εμβαδού, καθυστέρησης και κατανάλωσης.

Λογαριθμικός Αθροιστής Πρόγνωσης - 3



Δέντρο 16-bit, Βάσης-4 Kogge-Stone

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ **Πολλαπλασιασμός**
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Αλγόριθμος Πολλαπλασιασμού

```
► MULTIPLY(x, y, m)
  // Είσοδοι - x : πολλαπλασιαστέος, y : πολλαπλασιαστής, Έξοδος - m : γινόμενο
  {
    n = LENGTH(y);
    m = 0;
    t = x; // ολισθητής //
    for i in 1 to n // για κάθε ψηφίο του y //
    {
      if (y[i] == 1)
        m = m + t; // πρόσθεση μερικού παράγοντα //
      t = t << 1; // ολίσθηση 1 ψηφίο δεξιά για κάθε ψηφίο του y //
    }
    return m;
  }
```

Πολλαπλασιασμός Μερικών Γινομένων

► 67 x 54

1° με 1°	2° με 1°	1° με 2°	2° με 2°
$\begin{array}{r} 67 \\ \times 54 \\ \hline 28 \\ 240 \\ 350 \\ 3000 + \\ \hline 3618 \end{array}$	$\begin{array}{r} 67 \\ \times 54 \\ \hline 28 \\ 240 \\ 350 \\ 3000 + \\ \hline 3618 \end{array}$	$\begin{array}{r} 67 \\ \times 54 \\ \hline 28 \\ 240 \\ 350 \\ 3000 + \\ \hline 3618 \end{array}$	$\begin{array}{r} 67 \\ \times 54 \\ \hline 28 \\ 240 \\ 350 \\ 3000 + \\ \hline 3618 \end{array}$

- οι τέσσερις αυτοί συνδυασμοί μπορούν να γίνουν σε σύνολα από δυαδικά ψηφία

Πολλαπλασιασμός Μερικών Παραγόντων

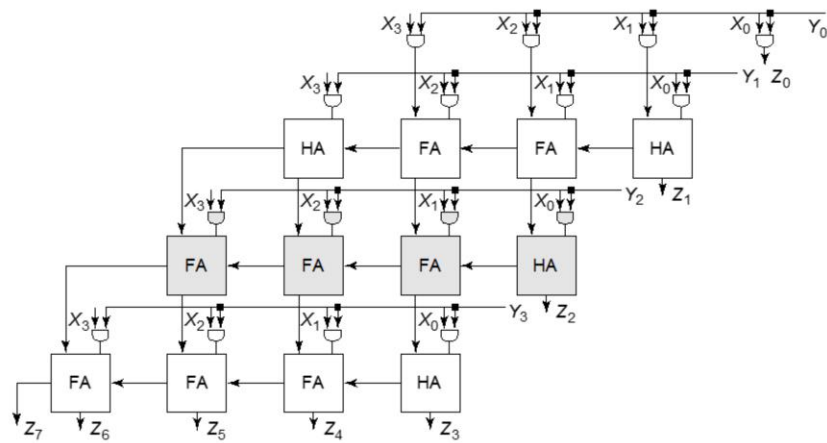
		1	0	1	0	1	0	Πολλαπλασιαστέος	
x				1	0	1	1	Πολλαπλασιαστής	
<hr/>									
				1	0	1	0	} Μερικά Γινόμενα	
			1	0	1	0	1		0
		0	0	0	0	0	0		
+	1	0	1	0	1	0			
<hr/>									
	1	1	1	0	0	1	1	0	Τελικό Αποτέλεσμα

- Μια πύλη AND αρκεί για κάθε ψηφίο του πολλαπλασια

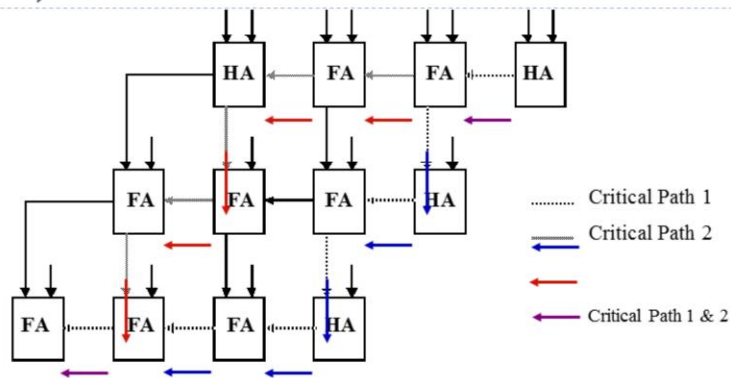
Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Πολλαπλασιαστής Πίνακα (Array)



Πολλαπλασιαστής Πίνακα (Array) - Κρίσιμη Οδός



$$t_{mult} = [(M-1) + (N-2)]t_{carry} + (N-1)t_{sum} + (N-1)t_{and}$$

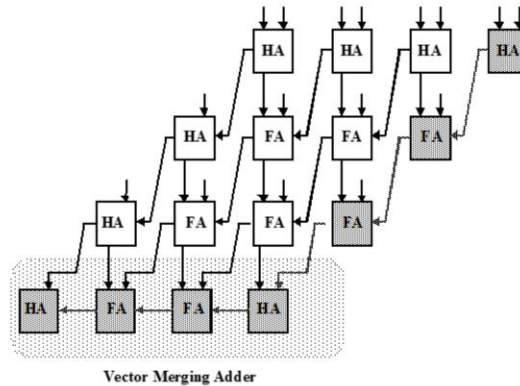
► NxM πολλαπλασιασμός

Η παραπάνω εξίσωση αφορά την 2η κρίσιμη οδό.

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Πολλαπλασιαστής Αποθήκευσης Κρατουμένου (Carry Save)



$$t_{mult} = (N-1)t_{carry} + (N-1)t_{and} + t_{merge}$$

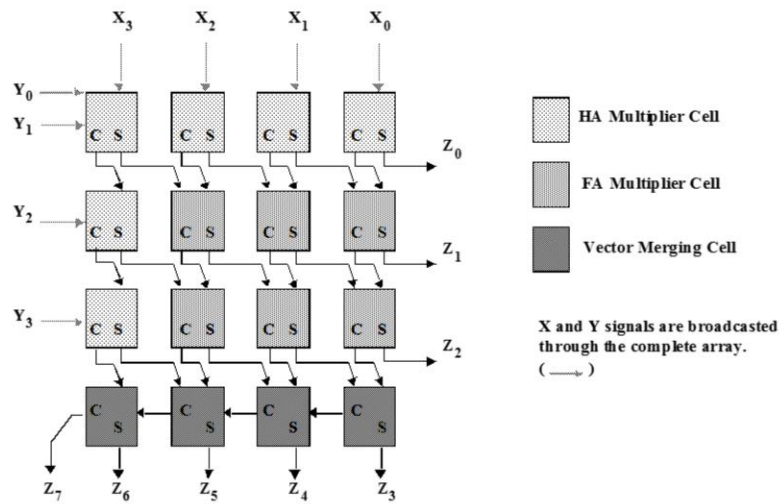
Στον πολλαπλασιαστή αποθήκευσης κρατουμένου, τα κρατούμενα προάγονται διαγώνια στο επόμενο ψηφίο κάτω αντί για αριστερά. Έτσι, απαιτείται ακόμα ένας αθροιστής (πρόγνωσης κρατουμένου συνήθως) για να παράγει το αποτέλεσμα.

Η κρίσιμη οδός στον πολλαπλασιαστή αποθήκευσης είναι μοναδική και γενικά μικρότερη.

Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

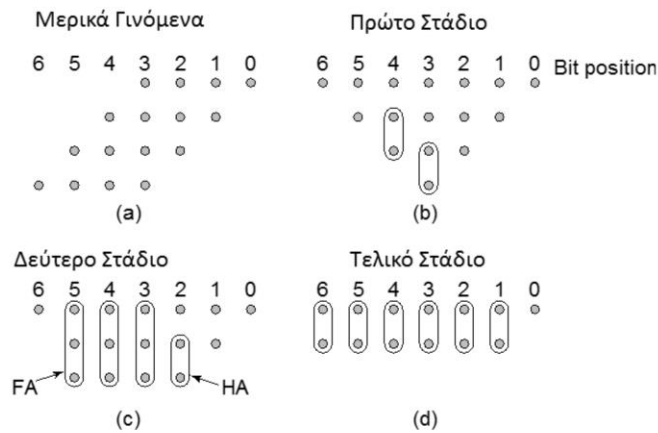
Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή



Περιεχόμενα

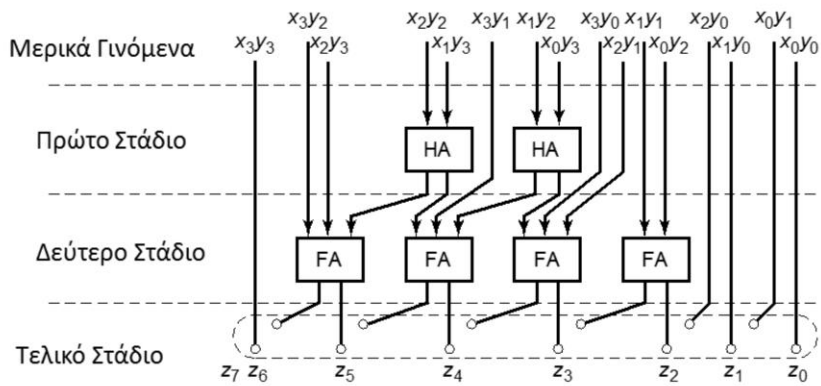
- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace



Μπορούμε να μετασχηματίσουμε την δομή των μερικών γινομένων του πολλαπλασιασμού σε ένα δέντρο πολλαπλών επιπέδων. Παραπάνω φαίνεται ο μετασχηματισμός των γινομένων για αριθμούς 4-bit.

Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace



Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ **Διαίρεση**
- ▶ Ολισθητές

Διαίρεση

0111000010 (450)

10001 (17)

Πώς κάνουμε διαίρεση;

▶ 77

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Διαίρεση

0111000010 (450)	10001 (17)	
<pre> 01110 011100 10001 010110 10001 001010 010101 - 10001 00100 01000 </pre>	<pre> 11010 (26) </pre>	<p>5-bit διαιρέτης < διαιρετέο κατεβάζουμε ψηφίο ολίσθηση-αφαίρεση, 1 στο πηλίκο κατεβάζουμε ψηφίο ολίσθηση-αφαίρεση, 1 στο πηλίκο κατεβάζουμε ψηφίο, υπόλοιπο < διαιρέτη, 0 στο πηλίκο κατεβάζουμε ψηφίο Ολίσθηση-αφαίρεση, 1 στο πηλίκο κατεβάζουμε ψηφίο, υπόλοιπο < διαιρέτη, 0 στο πηλίκο</p>

▶ Σε κάθε βήμα κάνουμε:

- ▶ Σύγκριση
- ▶ Ολίσθηση
- ▶ Αφαίρεση

▶ 78
HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα Δεδομένων 10/28/2015

Αφαίρεση αλλάζοντας το πρόσημο με το δυικό συμπλήρωμα (2's complement):

$$11100 (28) - = 11100 + = 011100 (28)$$

$$10001 (17) = (01110 + 1) = 101111 (-32+15=-17) = [1]001011$$

Το αριστερότερο ψηφίο (κρατούμενο υπερχειλίσσης) δεν χρησιμοποιείται, η τιμή 1 προκύπτει από την αναπαράσταση των αρνητικών.

Άλλα Παραδείγματα Διαίρεσης:

$$101010/10,$$

$$\text{Δεκαδικό: } 1500/15$$

Αλγόριθμος Διαίρεσης

```
► LONG_DIVISION(D, d, q, r)
  // Είσοδοι - D : Διαιρετέος, d : διαιρέτης, Έξοδοι - q : πηλίκο, r : υπόλοιπο
  {
    n = MSB(D); m = (n - LENGTH(d)); x = 0; Dt = D;
    do
    {
      while (Dt[n:m] < d) // υπόλοιπο < διαιρέτη //
        q[x++] = 0; m = m - 1; // 0 στο πηλίκο, κατεβάζουμε ψηφίο //
      q[x++] = 1; // 1 στο πηλίκο //
      r[n-m:0] = Dt[n:m] - d; // νέο υπόλοιπο //
      m = m - 1; // κατεβάζουμε ψηφίο //
      Dt[n:0] = {r, D[m-1:0]}; // συνένωση υπολοίπου με διαιρετέο //
    } while (r > d);
    return (q[0:x], r[n-m:0]);
  }
```

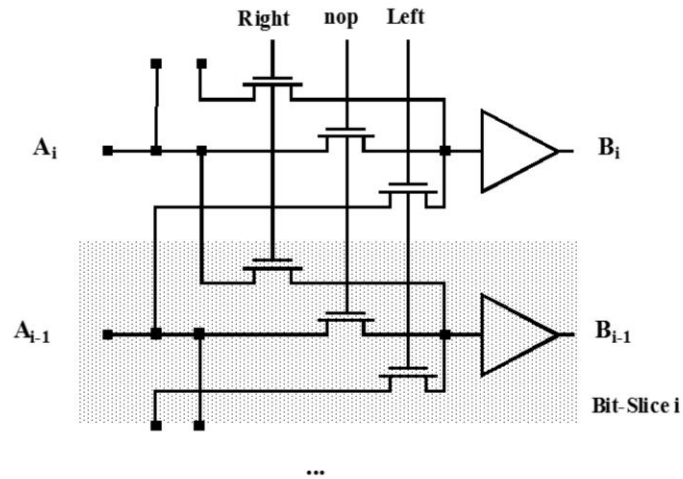
Περιεχόμενα

- ▶ Δομικοί Λίθοι Ψηφιακών Κυκλωμάτων
 - ▶ Υλοποίηση Ρίζας
- ▶ Κύκλωμα Πλήρους Αθροιστή
 - ▶ Ιδιότητα Αντιστροφής
- ▶ Στατικός Πλήρης Αθροιστής CMOS
- ▶ Έμμεση Υλοποίηση Αθροιστή και Σήματα
- ▶ Σειριακό Κρατούμενο
- ▶ Αθροιστής «Καθρέφτης» (Mirror)
 - ▶ Γράμμο-διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Τρανζίστορ Διέλευσης
- ▶ Δυναμικός Αθροιστής Διέλευσης
 - ▶ Αλυσίδα Κρατουμένου Manchester
 - ▶ Γράμμο-Διάγραμμα
- ▶ Αθροιστής Παράκαμψης (Carry Bypass)
- ▶ Αθροιστής Επιλογής Κρατουμένου (Carry Select)
 - ▶ Γραμμική Υλοποίηση
- ▶ Πρόγνωση Κρατουμένου (Carry Lookahead)
 - ▶ γένεση, προώθηση, επίπεδο τρανζίστορ, λογαριθμική διάταξη
 - ▶ δέντρα κρατουμένων, δυναμικά κυκλώματα πρόγνωσης
- ▶ Πολλαπλασιασμός
 - ▶ αλγόριθμος, μερικά γινόμενα
- ▶ Πολλαπλασιαστής Πίνακα
- ▶ Πολλαπλασιαστής αποθήκευσης κρατουμένου
- ▶ Χωροθέτηση Πολλαπλασιαστή
- ▶ Πολλαπλασιαστής Δέντρου Wallace
- ▶ Διαίρεση
- ▶ Ολισθητές

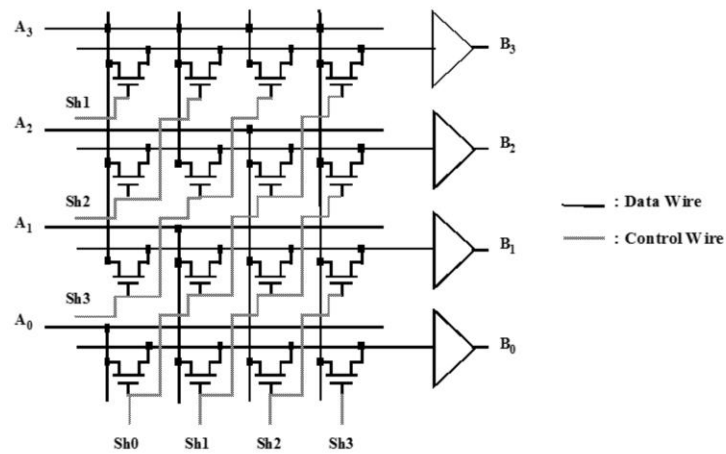
▶ 80

HY330 - Διάλεξη 11η - Κυκλώματα
Δεδομένων 10/28/2015

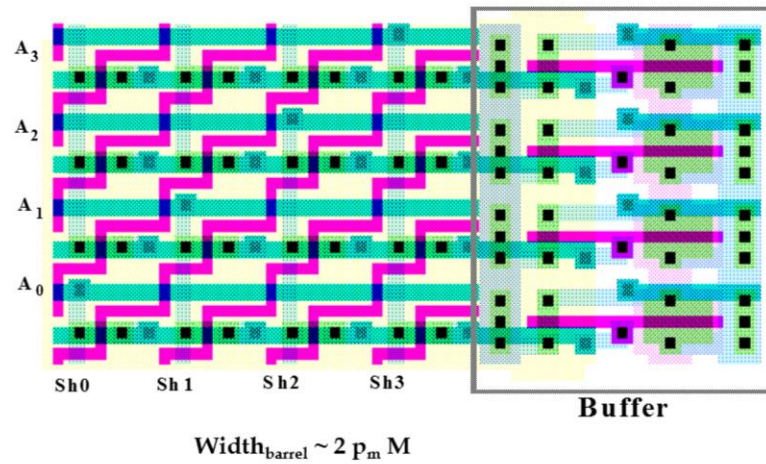
Δυναδικός Ολισθητής



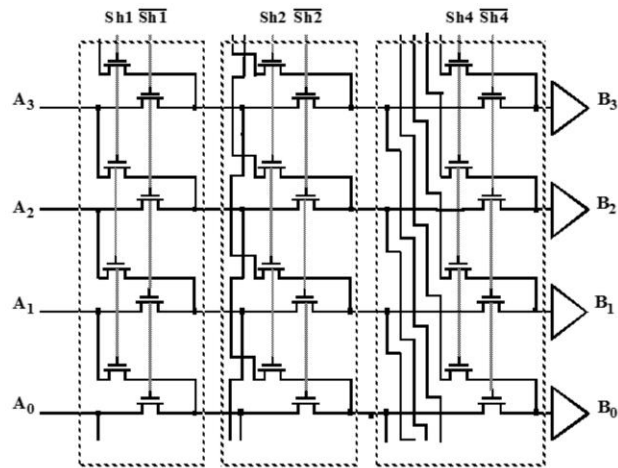
Περιστροφικός Ολισθητής (Barrel)



Περιστροφικός Ολισθητής 4x4



Λογαριθμικός Ολισθητής



0-7 bit Λογαριθμικός Ολισθητής

