



# I sommatori

Prof. Alberto Borghese  
Dipartimento di Informatica  
[borgnese@di.unimi.it](mailto:borgnese@di.unimi.it)

Università degli Studi di Milano

Riferimenti: Appendice B5 prima parte.



# Sommario

## Addizionatori

Addizionatori ad anticipazione di riporto



## Implementazione di funzioni algebriche



And, Or, Not per ottenere:

Operazioni algebriche (somme, prodotti, sottrazioni e divisioni)  
su numeri binari.

Operazioni logiche su numeri binari.



## Operazione di somma



1110	← Riporto	111
1011 +	← Addendo 1	01011 +
110 =	← Addendo 2	00110 =
-----		-----
10001		10001

3 Attori: addendo 1, addendo 2, riporto.

Gli addendi sono presenti all'inizio

Il riporto viene generato via via che la somma viene svolta

L'operazione viene eseguita **sequenzialmente da dx a sx**.



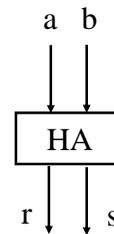
## (Half) Adder a 1 bit



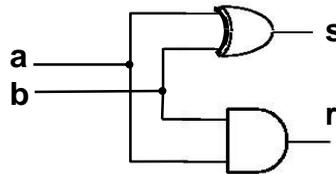
Tabella della verità della somma:

a	b	somma	riporto
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

a +  
b =



a	b	xor	s = a ⊕ b	r = ab
0	0	0		
0	1	1		
1	0	1		
1	1	0		



La somma è diventata un'operazione logica!

Cammini critici:

Somma = 1;

Riporto = 1;

Complessità

Somma = 1 porta;

Riporto = 1 porta;



## Operazione di somma



$$\begin{array}{r}
 1110 \\
 1011 + \\
 \underline{110} = \\
 10001
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \leftarrow \text{Riporto} \\
 \leftarrow \text{Addendo 1} \\
 \leftarrow \text{Addendo 2}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 111 \\
 01011 + \\
 00110 = \\
 \underline{\quad\quad} \\
 10001
 \end{array}$$

3 Attori: addendo 1, addendo 2, riporto.

Gli addendi sono presenti all'inizio

- Non c'è riporto in ingresso per il primo bit (HA)
- Il riporto viene generato via via che la somma viene svolta per i bit successivi al primo

Viene eseguita sequenzialmente da dx a sx.

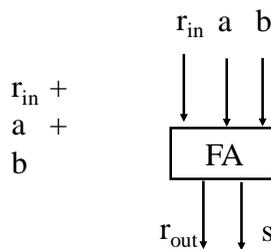


# Full Adder a 1 bit



Tabella della verità della somma completa:

a	b	r <sub>in</sub>	somma	riporto
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1



$$s = m_1 + m_2 + m_4 + m_7$$

$$r = m_3 + m_5 + m_6 + m_7$$



# Full Adder a 1 bit – espressione logica di s



Tabella della verità della somma completa:

$$s = m_1 + m_2 + m_4 + m_7$$

a	b	r <sub>in</sub>	somma	riporto
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

$$s = \bar{a} \bar{b} r_{in} + a \bar{b} r_{in} + a \bar{b} r_{in} + a b r_{in} =$$

$$= (\bar{a}b + a\bar{b})r_{in} + (ab + ab)r_{in} = \text{XOR / XNOR}$$

$$= (a \oplus b) r_{in} + (ab + ab) r_{in} =$$

a	b	y	y
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

$$\text{XOR}(a,b) = (\bar{a}b + a\bar{b})$$

$$\text{!XOR}(a,b) = \text{XNOR}(a,b) = (ab + \bar{a}\bar{b})$$



# Full Adder a 1 bit – espressione logica di $r_{out}$



Tabella della verità della somma completa:

$$r = m_3 + m_5 + m_6 + m_7$$

a	b	$r_{in}$	somma	riporto
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

$$r_{out} = \overline{a} \overline{b} r_{in} + \overline{a} b r_{in} + a \overline{b} r_{in} + a b r_{in} =$$

$$1) ab + (a \oplus b) r_{in}$$

$$2) a r_{in} + (a \oplus r_{in}) b$$

Quale è meglio?



## Implementazione circuitale



$$s = (a \oplus b) r_{in} + (a \oplus b) r_{in}$$

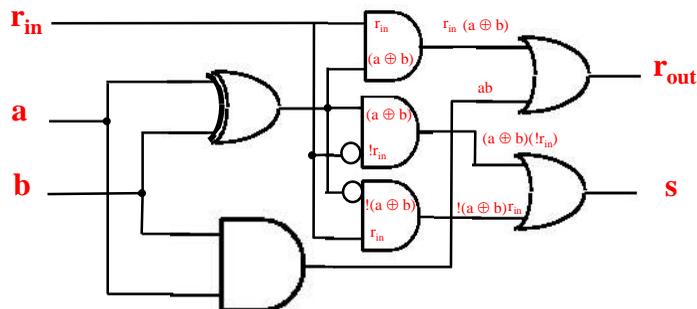
$$s = (a \oplus b) r_{in} + (a \oplus b) r_{in}$$

$$r_{out} = ab + (a \oplus b) r_{in}$$

$$r_{out} = a r_{in} + (a \oplus r_{in}) b$$

Complessità: 7 porte logiche  
(Riutilizzo l'XOR 2 volte)

Complessità: 8 porte logiche  
(Riutilizzo l'XOR 1 volta)



Complessità: 7 porte logiche.

Cammini critici:  $s \rightarrow 3$ ;  $r_{out} \rightarrow 3$



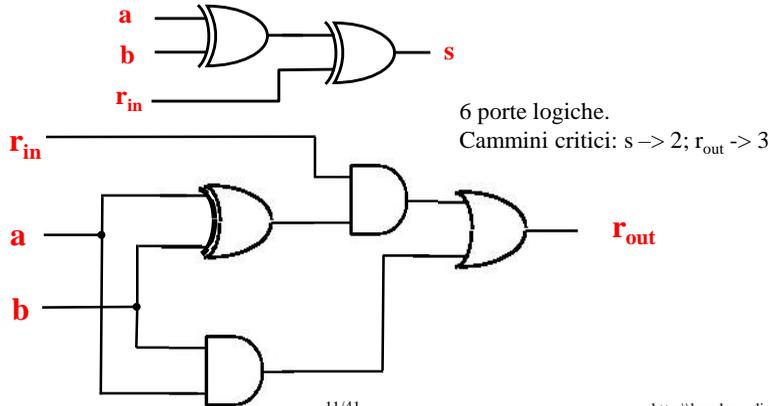
## Semplificazione circuitale



$$s = (a \oplus b) \bar{r}_{in} + (a \oplus b) r_{in} = a \oplus b \oplus r_{in}$$

$$z \triangleq (a \oplus b) \rightarrow z \bar{r}_{in} + z r_{in} = (z \oplus r_{in}) = ((a \oplus b) \oplus r_{in}) = a \oplus b \oplus r_{in}$$

$$r_{out} = ab + (a \oplus b) r_{in}$$

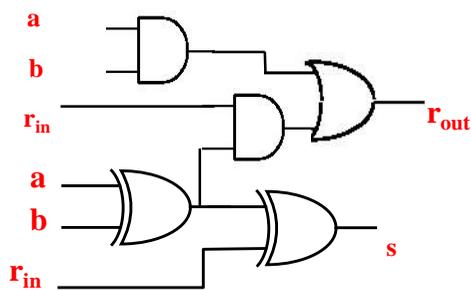


## Semplificazione ulteriore



$$s = a \oplus b \oplus r_{in}$$

$$r_{out} = ab + (a \oplus b) r_{in}$$



s - rilevatore di (dis)parità

$r_{out}$  - riporto se generato ( $a = b = 1$ ) o se propagato ( $a \oplus b = 1$ )  $r_{out} = r_{in}$

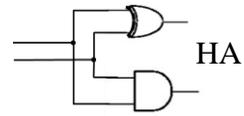


## Circuito costruito con HA

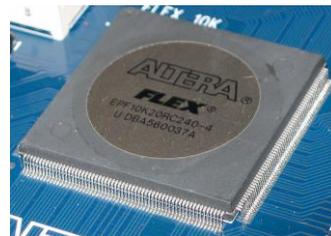
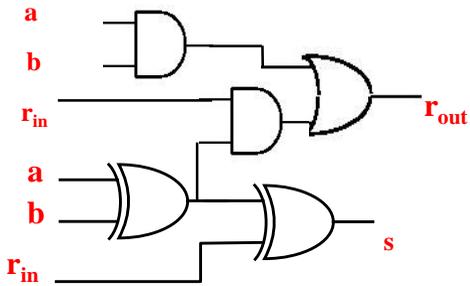


$$s = a \oplus b \oplus r_{in}$$

$$r_{out} = ab + (a \oplus b) r_{in}$$



Esempio di fitting

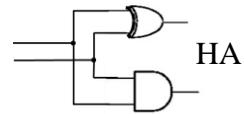


## Circuito costruito con HA



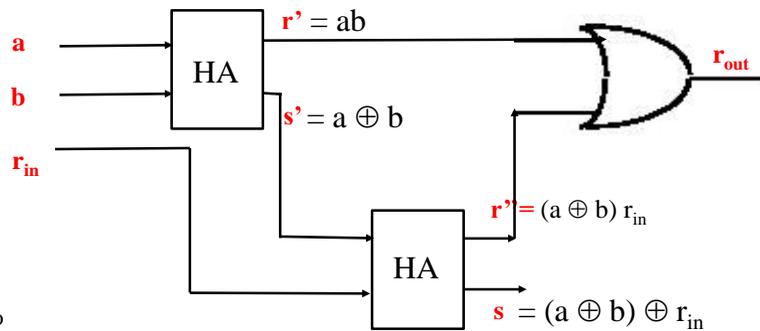
$$s = a \oplus b \oplus r_{in}$$

$$r_{out} = ab + (a \oplus b) r_{in}$$



5 porte logiche.

Cammini critici:  $s \rightarrow 2$ ;  $r_{out} \rightarrow 3$



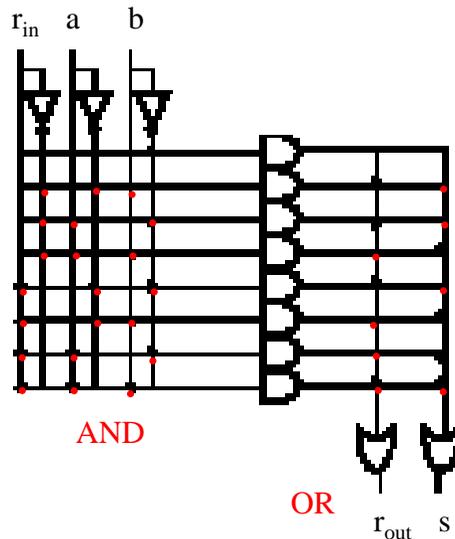
Raggruppo  
AND e XOR in un HA



## Implementazione mediante PLA



a	b	r <sub>in</sub>	somma	r <sub>out</sub>
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1



SOP: costruisco i mintermini e li sommo



## Esercizi con ROM e PLA



Implementare il circuito del Full Adder mediante ROM

Scrivere il circuito che esegue la somma di:  $3 + 4$  in base 2.

Riportare tutte le uscite delle porte logiche.

Scrivere il circuito che esegue la seguente sottrazione:  $5 - 2$  in base

2. Riportare tutte le uscite delle porte logiche.



## Sommario



Addizionatori

Addizionatori ad anticipazione di riporto



## OR su più bit



1	0	0	1
---	---	---	---

OR

1	1	0	0
---	---	---	---

=

1	1	0	1
---	---	---	---

Ogni bit viene elaborato separatamente



## AND su più bit



1	0	0	1
---	---	---	---

AND

1	1	0	0
---	---	---	---

=

1	0	0	0
---	---	---	---

Ogni bit viene elaborato separatamente



## Operazione di somma



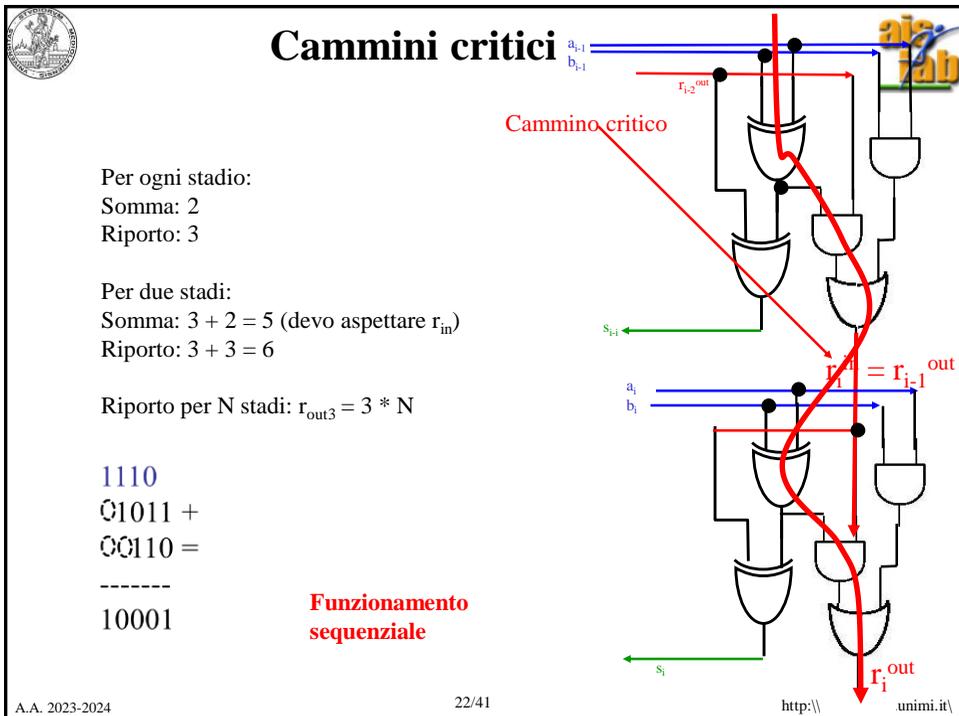
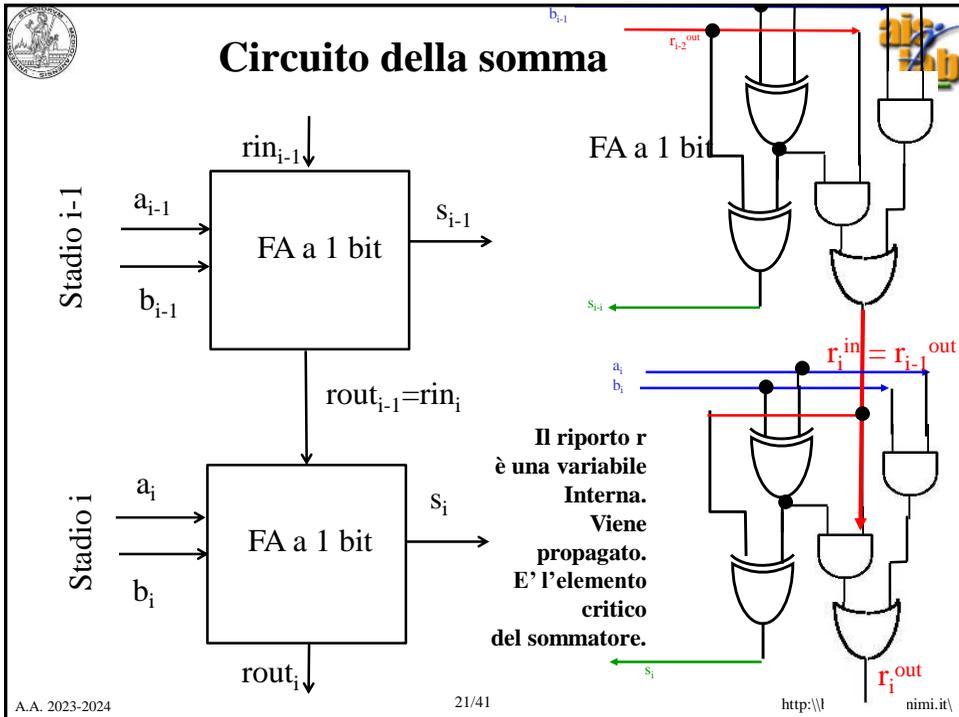
1110	← Riporto
01011 +	← Addendo 1
00110 =	← Addendo 2
-----	
10001	

Per ogni bit ho 3 Attori: addendo 1, addendo 2, riporto.

Gli addendi sono presenti all'inizio

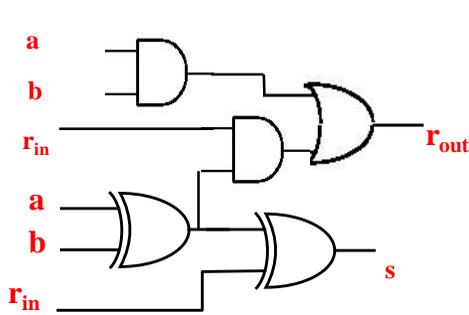
Il riporto viene generato via via che la somma viene svolta

Viene eseguita sequenzialmente da dx a sx.



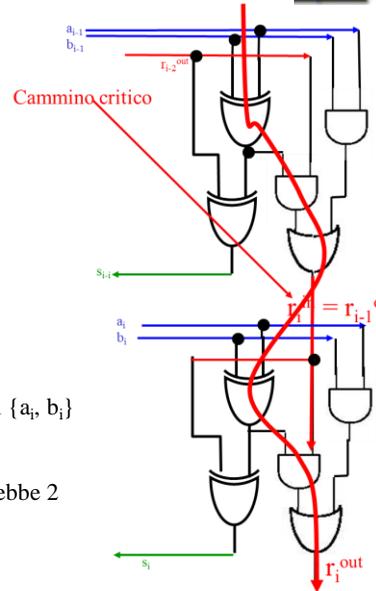


## Osservazioni sul cammino critico

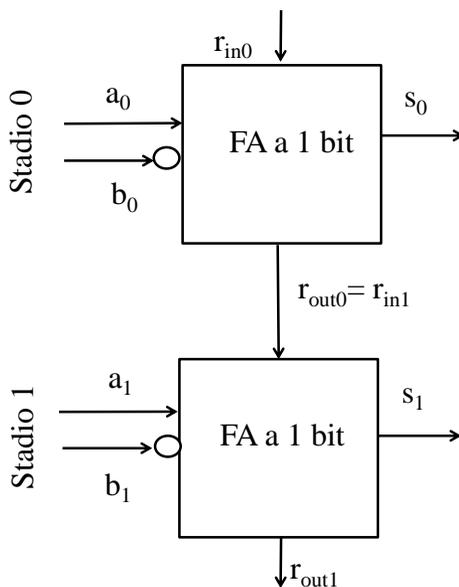


I termini  $g_i$  si possono calcolare a partire dagli ingressi  $\{a_i, b_i\}$  senza aspettare il riporto in ingresso.

Con questa considerazione, ciascuno stadio aggiungerebbe 2 porte di ritardo. Trascuriamo nel seguito.



## Circuito della sottrazione



Sommo i seguenti 2 numeri  $11 + (-13)$ :

$$A = 01011_2 = 11_{10}$$

$$B = 10011_2 = -13_{10}$$

E' equivalente ad effettuare la differenza:

$$S = A - B = 11 - 13$$

**Calcolo di  $-B$ :**

- $B = +13_{10} = 01101_2 \Rightarrow$

- Complemento a 1  $\Rightarrow 10010$   $\bar{B} = \bar{B}$

- Sommo 1 per ottenere il complemento a 2:

$$10010 + 1 = 10011_2 = -13_{10}$$

Il complemento a 2 di B,  $-B$ , si ottiene come:

$$-B = (\bar{B} + 1)$$

La sottrazione diventa una somma:

$$S = A + (\bar{B} + 1)$$

Nella sottrazione avrò  $r_{in0} = +1$



## I problemi del full-adder



Il full adder con propagazione del riporto è lento.

- Il riporto si propaga sequenzialmente  
caratteristica dell'algoritmo di calcolo
- la commutazione dei circuiti non è istantanea (tempo di commutazione)  
caratteristica fisica dei dispositivi
- Soluzioni  
**modificare l'algoritmo**  
**modificare i dispositivi**



## Prima possibilità: forma tabellare



Riscrivo le equazioni del riporto in modo non sequenziale. Come?

$$\{r_{out3}, s_{out3}, s_{out2}, s_{out1}, s_{out0}\} = f(r_{in0}, a_0, b_0, a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3, \dots)$$

Scrivo la tabella della verità dove in uscita ho il riporto in uscita e I bit di somma e  
In ingresso  $2 * N$  valori (gli  $N$  bit dei 2 addendi).

La tabella della verità ha  $2^{(2N+1)}$  righe (per  $N=32$ , ...)



# Carry look-ahead (anticipazione di riporto)

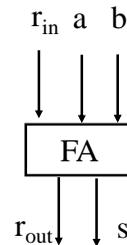


Approccio strutturato per diminuire la latenza della somma.

$$r_{out} = ab + (a \oplus b) r_{in}$$

### Analisi del singolo stadio.

Quando si genera un riporto in uscita?



Quando ho almeno due 1, in ingresso; cioè almeno due «1» tra  $r_{in}$ ,  $a$  e  $b$ .

11000 riporto

⊕ 1101 +

⊕ 0100 =

-----

10001



# Propagazione e generazione



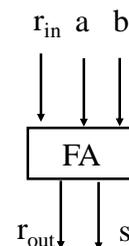
Ho riporto quando ho almeno due 1, in ingresso; cioè tra  $r_{in}$ ,  $a$  e  $b$ .

a	b	$r_{in}$	somma	riporto
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

### Osservazioni:

- Viene generato un riporto dallo stadio  $i$ , qualsiasi sia il riporto in ingresso se  $a_i = b_i = 1 \Rightarrow g_i = a_i b_i$ .
- Viene generato un riporto allo stadio  $i$ , se il riporto in ingresso è = 1 ed una delle due variabili in ingresso è = 1  $\Rightarrow$  se  $p_i = (a_i \oplus b_i) \Rightarrow$  viene generato riporto se  $p_i r_{in} = 1$  ( $p_i$  propaga il segnale di riporto  $r_{in}$ ).

Quando sia la condizione 1) che la condizione 2) è verificata? Cosa succede se entrambe le condizioni sono verificate?





## Esempio



Sono interessato ad  $r_4^{out}$ . Supponiamo anche il riporto in ingresso al primo stadio:  $r_0^{in} = 0$ .

$r_{in}$ 000000	0111000	0111000
a 10101101 +	10101101 +	10111101 +
b 00010010 =	00011010 =	00011000 =
-----	-----	-----
10111111	11100111	11010101

$$r_5^{in} = r_4^{out} = 0$$

$$r_5^{in} = r_4^{out} = 1$$

$$r_5^{in} = r_4^{out} = 1$$

Per propagazione

Per generazione

$$p_4 = (a_4 \oplus b_4)r_4^{in}$$

$$g_4 = a_4b_4$$



## Sviluppo della funzione logica riporto

$$r_i^{out} = ab + (a \oplus b)r_i^{in}$$

$$r_i^{out} = g_i + p_i r_i^{in}$$

$$r_0^{out} = g_0 + p_0 r_0^{in}$$

$$r_1^{out} = g_1 + p_1 r_1^{in} = g_1 + p_1 g_0 + p_1 p_0 r_0^{in}$$

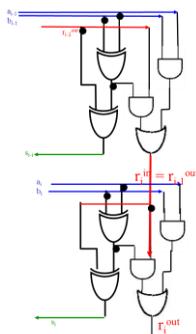
$r_1^{out}$ 111	$r_1^{in}$ 110
1001 +	1001 +
0010 =	0011 =
-----	-----
1100	1100

$$g_0 = 0$$
$$p_0 = p_1 = 1$$

$$g_0 = 1$$
$$p_1 = 1$$

$r_1^{out}$ 10
1010 +
0011 =
-----
1100

$$g_1 = 1$$





## Sviluppo della funzione logica riporto



$$r_i^{\text{out}} = ab + (a \oplus b) r_i^{\text{in}}$$

$$r_i^{\text{out}} = g_i + p_i r_i^{\text{in}}$$

$$r_0 = g_0 + p_0 r_0$$

$$r_1 = g_1 + p_1 r_0 = g_1 + p_1 g_0 + p_1 p_0 r_0$$

$$r_2 = g_2 + p_2 r_1 = g_2 + p_2(g_1 + p_1 g_0 + p_1 p_0 r_0) = g_2 + p_2 g_1 + p_2 p_1 g_0 + p_2 p_1 p_0 r_0$$

$$r_3 = g_3 + p_3 r_2 = g_3 + p_3(g_2 + p_2 g_1 + p_2 p_1 g_0 + p_2 p_1 p_0 r_0) = g_3 + p_3 g_2 + p_3 p_2 g_1 + p_3 p_2 p_1 g_0 + p_3 p_2 p_1 p_0 r_0$$

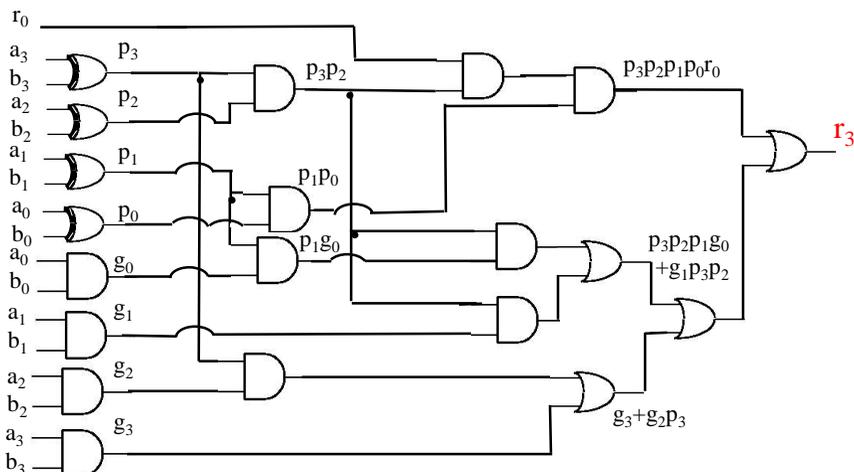
← Propago il riporto



## Determinazione del cammino critico.



$$r_3 = g_3 + p_3 r_2 = g_3 + p_3(g_2 + p_2 g_1 + p_2 p_1 g_0 + p_2 p_1 p_0 r_0) = g_3 + p_3 g_2 + p_3 p_2 g_1 + p_3 p_2 p_1 g_0 + p_3 p_2 p_1 p_0 r_0$$



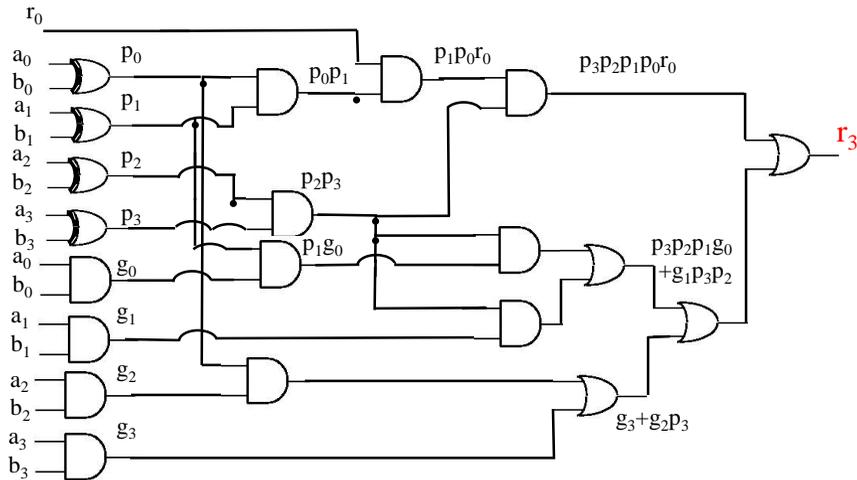
Cammino critico = 6, senza anticipazione sarebbe  $3 * 4 = 12$



## Determinazione la complessità.



$$r_3 = g_3 + p_3 r_2 = g_3 + p_3(g_2 + p_2 g_1 + p_2 p_1 g_0 + p_2 p_1 p_0 r_0) = g_3 + p_3 g_2 + p_3 p_2 g_1 + p_3 p_2 p_1 g_0 + p_3 p_2 p_1 p_0 r_0.$$



Complessità di  $r_3 = 20$  porte logiche + porte per la somma e per i riporti interni



## Come determino i bit di somma?



$$s_k = (a_k \oplus b_k) \oplus r_{k \text{ in}} = p_k \oplus r_{k \text{ in}}$$

Occorre calcolare  $r_{1,\text{in}}, r_{2,\text{in}}, r_{3,\text{in}}$  ( $r_{0,\text{in}} = r_0$  dato)

Occorre riutilizzare più espressioni possibile.



## Complessità aggiuntiva per gli altri bit di riporto



$$r_2 = g_2 + p_2 r_1 = g_2 + p_2 (g_1 + p_1 g_0 + p_1 p_0 r_0) = g_2 + p_2 g_1 + p_2 p_1 g_0 + p_2 p_1 p_0 r_0$$

In rosso le porte già presenti nel circuito di  $r_{out3}$

Complessità aggiuntiva pari a 6 porte logiche.

$$r_1 = g_1 + p_1 r_0 = g_1 + p_1 g_0 + p_1 p_0 r_0$$

In rosso le porte già presenti nel circuito di  $r_{out3}$

Complessità aggiuntiva pari a 2 porte logiche.

Complessità aggiuntiva totale per i riporti: 8 porte logiche.



## Complessità aggiuntiva per i bit di somma



$$s_k = (a_k \oplus b_k) \oplus r_{k in} = p_k \oplus r_{k in}$$

Ogni bit di somma aggiunge una porta logica XOR =>  
La complessità aumenta di  $N * 1 = 4$  porte logiche.

Un CLA su 4 bit ha quindi una complessità di  $20 + 6 + 2 + 4 = 32$  porte logiche.

Un sommatore a propagazione di riporto ha una complessità di  $4 * 5 = 20$  porte logiche.



## Quanto si guadagna con l'anticipazione del riporto per N stadi?



Cammino critico per le variabili interne:

$$r_0^{\text{out}} \Rightarrow 3$$

$$r_1^{\text{out}} \Rightarrow 4$$

$$r_2^{\text{out}} \Rightarrow 5$$

Cammino critico per le variabili esterne:

$$r_3^{\text{out}} \Rightarrow 6$$

$$s_3 \Rightarrow 6 \text{ NB la prima porta XOR è in comune con } r_2^{\text{out}}$$

$$s_2 \Rightarrow 5 \text{ NB la prima porta XOR è in comune con } r_1^{\text{out}}$$

$$s_1 \Rightarrow 4 \text{ NB la prima porta XOR è in comune con } r_0^{\text{out}}$$

$$s_0 \Rightarrow 2$$

Cammino critico scala come  $CC_{(1 \text{ stadio})} * \log(N)$



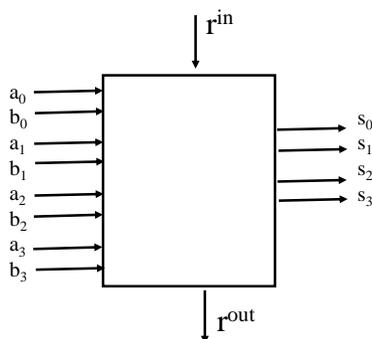
## Addizionatori modulari



La complessità del circuito è tollerata per piccoli n.

Circuiti sommatore indipendenti si hanno per 4 bit.

Moduli elementari.



**Come si ottiene la somma?**

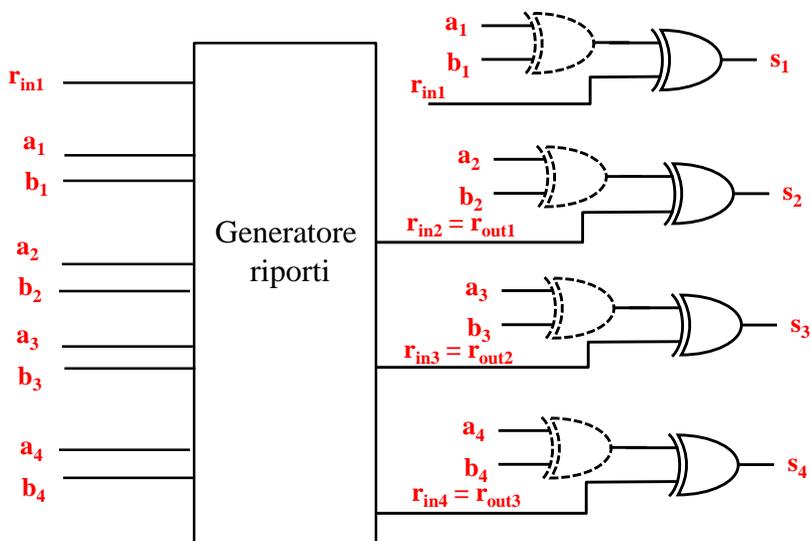
Collegando in cascata i moduli (sommatore elementari).

Cammino critico = 6 (CC di un modulo a 4 bit) \* N/4. Per 32 bit, 48 (ciascun modulo dimezza il CC).

Per confronto, senza parallelizzazione, sommatore a propagazione di riporto, per 32 bit,  $N * 3 = 96$ .



## Architettura interna



## Addizionatori modulari::esempio

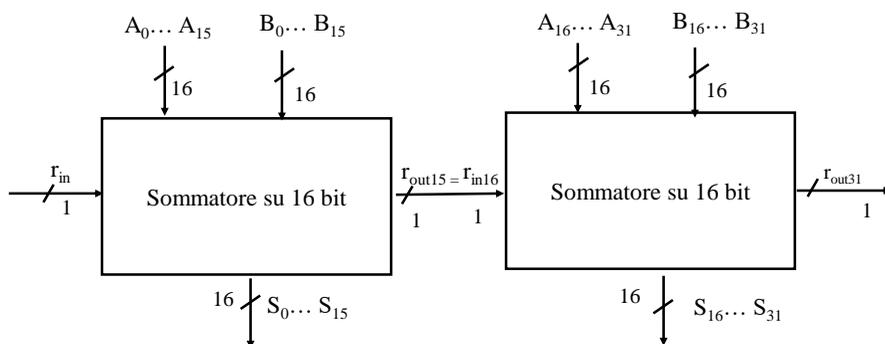


Occorre sommare 2 variabili, A e B, su  $N = 32$  bit  
 Ho a disposizione due sommatore su 16 bit.

$$CC = CC_{(1 \text{ stadio})} * \log(N) = 3 * 4 = 12$$

Come si ottiene la somma?

Fondamento delle estensioni architetturali SSE





# Sommario



Addizionatori

Addizionatori ad anticipazione di riporto