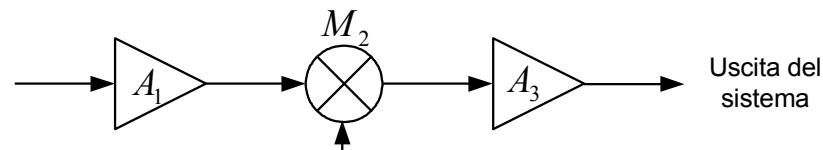


Elettronica per le telecomunicazioni

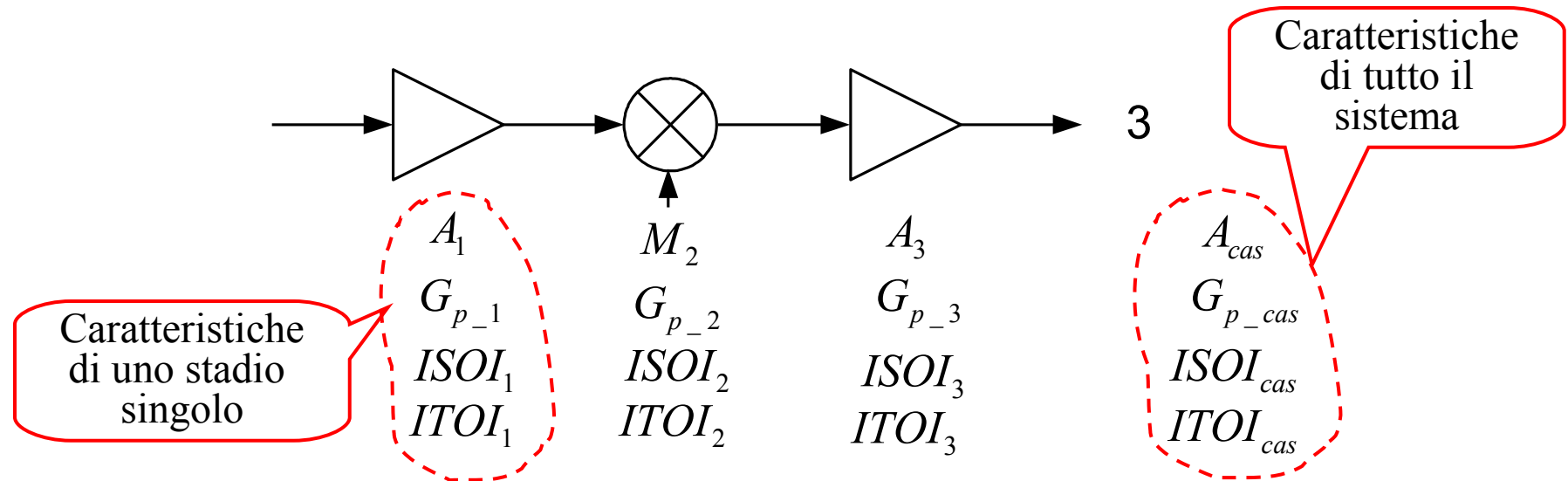
AA 2014 - 2015

La non linearità di ampiezza di più stadi in cascata



Più stadi in cascata

Considereremo una cascata composta da tre stadi



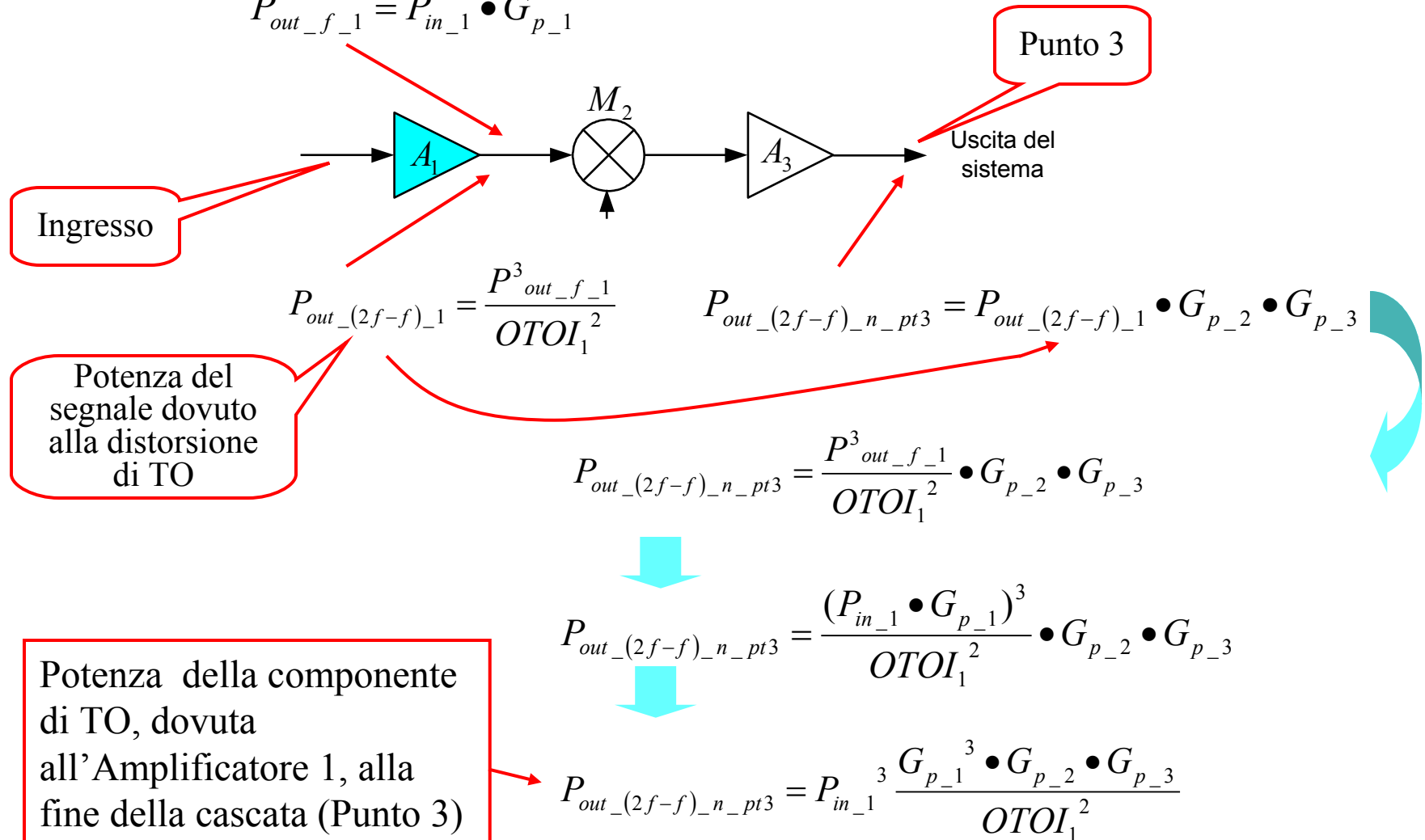
Per uno stadio singolo le relazioni della potenza sono (TO):

$$P_{out_ (2f-f) _ dBm} = 3P_{out_ f _ dBm} - 2OTOI_{dBm} \quad \Rightarrow \quad P_{out_ (2f-f)} = \frac{P_{out_ f}^3}{OTOI^2}$$

$$P_{out_ f _ dBm} = P_{in_ f _ dBm} + G_{p_ dB} \quad \Rightarrow \quad P_{out_ f} = P_{in_ f} \cdot G_p$$

Il primo amplificatore, A_1

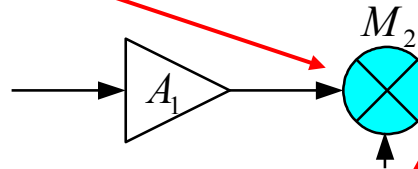
$$P_{out_f_1} = P_{in_1} \cdot G_{p_1}$$



Il secondo stadio, il mixer, M_2

$$P_{in_f_2} = P_{out_f_1} = P_{in_1} \cdot G_{p_1}$$

Potenza della
fondamentale
all'ingresso del
secondo stadio



$$P_{out_f_2} = P_{in_f_2} \cdot G_{p_2}$$

$$P_{out_f_2} = P_{in_f_1} \cdot G_{p_1} \cdot G_{p_2}$$

Uscita del
sistema

Punto 3

$$P_{out_ (2f-f)_2} = \frac{(P_{out_f_2})^3}{OTOI_2^2}$$

$$P_{out_ (2f-f)_2} = \frac{(P_{in_f_1} \cdot G_{p_1} \cdot G_{p_2})^3}{OTOI_2^2}$$

$$P_{out_ (2f-f)_2} = P_{in_f_1}^3 \frac{G_{p_1}^3 \cdot G_{p_2}^3}{OTOI_2^2}$$

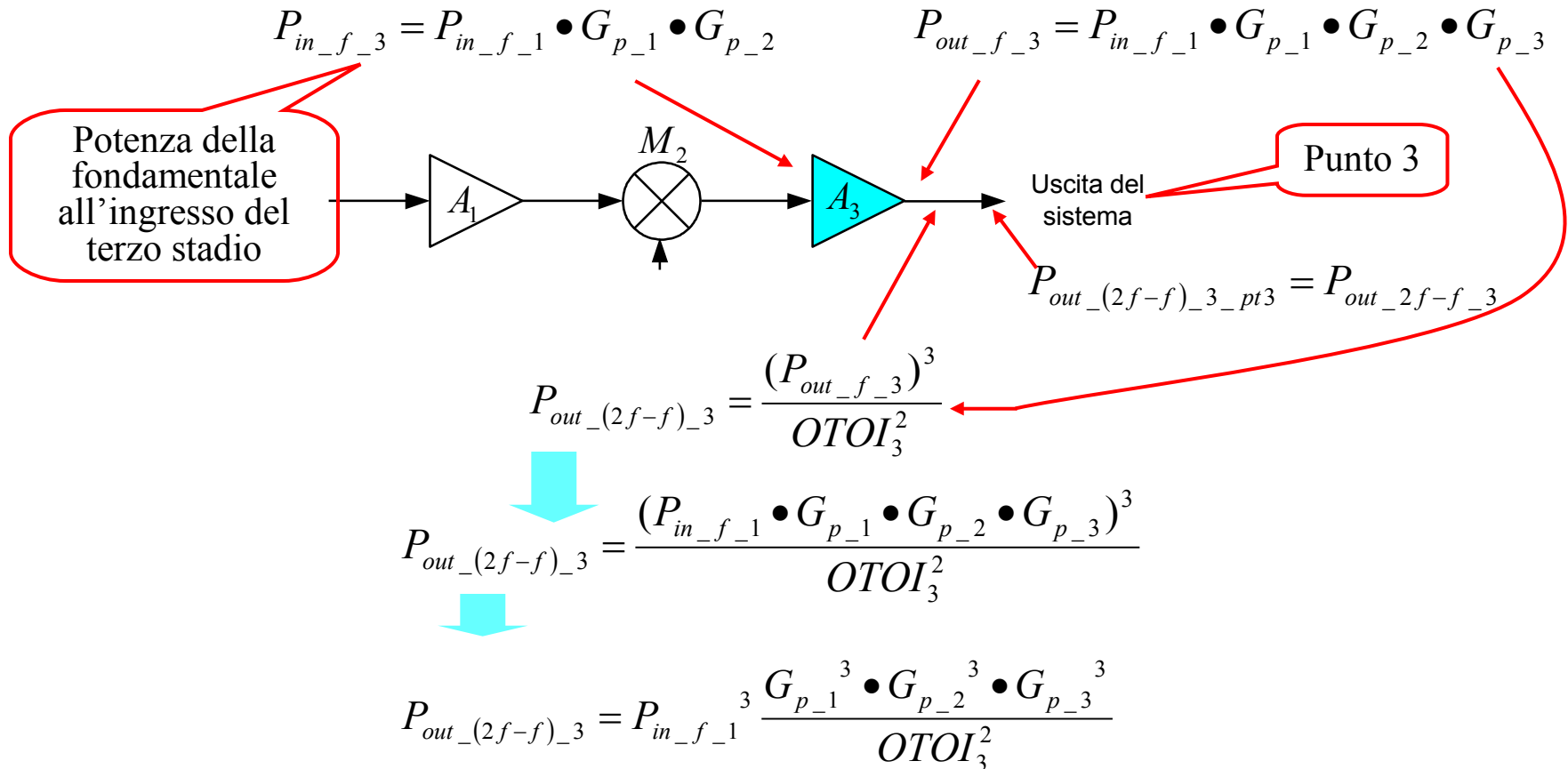
$$P_{out_ (2f-f)_2_pt3} = P_{out_2f-f_2} \cdot G_{p_3}$$



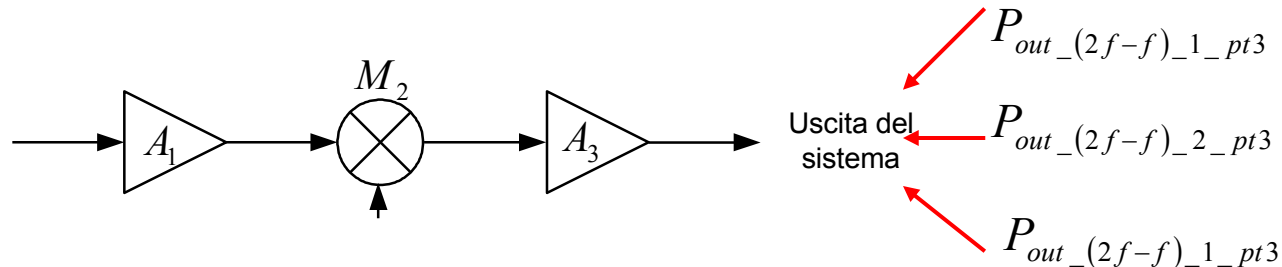
$$P_{out_ (2f-f)_2_pt3} = P_{in_f_1}^3 \frac{G_{p_1}^3 \cdot G_{p_2}^3 \cdot G_{p_3}}{OTOI_2^2}$$

Potenza della componente di TO, dovuta al secondo stadio, Mixer, alla fine della cascata (Punto 3)

Il terzo stadio, l'amplificatore A_2



All'uscita della cascata sono presenti le componenti dovute alla distorsione di TO provocate da ogni singolo stadio



I prodotti della distorsione di terzo ordine presenti all'uscita della cascata, punto 3, hanno tutti la stessa frequenza .

Per sommare le potenze dei tre segnali con precisione è necessario conoscere la relazione di fase fra i singoli segnali.

Se i segnali sono in fase la loro somma vettoriale avrà un valore, mentre avrà un valore diverso se la loro relazione di fase sarà diversa.

Ci sono due metodi per calcolare la distorsione totale:

- La **somma coerente**, cioè si considera che i prodotti di Terzo Ordine sono in fase,
- La **somma non coerente**, si sommano semplicemente le potenze dei singoli segnali.

Nella **somma coerente** le componenti della potenza sono convertite in tensioni, quindi sommate e successivamente convertite di nuovo in potenza.

$$P_{totale_coerente} = \left[\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2} + \sqrt{P_3} + \dots \sqrt{P_n} \right]^2$$

La potenza totale disponibile di Terzo Ordine all'uscita della cascata dei tre stadi sarà

$$P_{out_ (2f-f)_cascata} = P_{in_f_1}^3 \left[\sqrt{\frac{G_{p_1}^3 \cdot G_{p_2} \cdot G_{p_3}}{OTOI_1^2}} + \sqrt{\frac{G_{p_1}^3 \cdot G_{p_2}^3 \cdot G_{p_3}}{OTOI_2^2}} + \sqrt{\frac{G_{p_1}^3 \cdot G_{p_2} \cdot G_{p_3}^3}{OTOI_3^2}} \right]^2$$



$$G_{p_cascata} = G_{p_1} \cdot G_{p_2} \cdot G_{p_3}$$

$$P_{out_ (2f-f)_cascata} = P_{in_f_1}^3 \cdot G_{p_cascata}^3 \left[\sqrt{\frac{1}{G_{p_2}^2 \cdot G_{p_3}^2 \cdot OTOI_1^2}} + \sqrt{\frac{1}{G_{p_3}^2 \cdot OTOI_2^2}} + \sqrt{\frac{1}{OTOI_3^2}} \right]^2$$



$$P_{out_ (2f-f)_cascata} = P_{in_f_1}^3 \cdot G_{p_cascata}^3 \left[\frac{1}{G_{p_2} \cdot G_{p_3} \cdot OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \cdot OTOI_2} + \frac{1}{OTOI_3} \right]^2$$

$$P_{out_f_3} = P_{in_f_1} \bullet G_{p_1} \bullet G_{p_2} \bullet G_{p_3} \quad \Rightarrow \quad P_{out_f_3} = P_{in_f_1} \bullet G_{p_cascata}$$

$$P_{out_ (2f-f)_cascata} = P_{in_f_1}^3 \bullet G_{p_cascata}^3 \left[\frac{1}{G_{p_2} \bullet G_{p_3} \bullet OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \bullet OTOI_2} + \frac{1}{OTOI_3} \right]^2$$

$$P_{out_ (2f-f)_cascata} = P_{out_f_3}^3 \left[\frac{1}{G_{p_2} \bullet G_{p_3} \bullet OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \bullet OTOI_2} + \frac{1}{OTOI_3} \right]^2$$

La potenza di TO della cascata di tre stadi è data anche dalla

$$P_{out_ (2f-f)_3} = \frac{(P_{out_f_3})^3}{OTOI_3^2} \quad \Rightarrow \quad P_{out_ (2f-f)_cascata} = \frac{(P_{out_f_3})^3}{OTOI_{cascata}^2}$$

In forma più generale

$$\frac{(P_{out_f_3})^3}{OTOI_{cascata}^2} = P_{out_f_3}^3 \left[\frac{1}{G_{p_2} \bullet G_{p_3} \bullet OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \bullet OTOI_2} + \frac{1}{OTOI_3} \right]^2$$

$$\frac{1}{OTOI_{cascata}} = \frac{1}{G_{p_2} \bullet G_{p_3} \bullet OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \bullet OTOI_2} + \frac{1}{OTOI_3}$$

Il punto di Intercetta di Terzo Ordine di Ingresso, ITOI si ricava tenendo conto che

$$OTOI_{cascata} = ITOI_{cascata} \bullet G_{p_1} \bullet G_{p_2} \bullet G_{p_3}$$

$$\frac{1}{OTOI_{cascata}} = \frac{1}{G_{p_2} \bullet G_{p_3} \bullet OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \bullet OTOI_2} + \frac{1}{OTOI_3}$$

$$\frac{1}{ITOI_{cascata}} = \frac{G_{p_1} \bullet G_{p_2} \bullet G_{p_3}}{G_{p_2} \bullet G_{p_3} \bullet ITOI_1 \bullet G_{p_1}} + \frac{G_{p_1} \bullet G_{p_2} \bullet G_{p_3}}{G_{p_3} \bullet ITOI_2 \bullet G_{p_2}} + \frac{G_{p_1} \bullet G_{p_2} \bullet G_{p_3}}{ITOI_3 \bullet G_{p_3}}$$

$$\frac{1}{ITOI_{cascata}} = \frac{1}{ITOI_1} + \frac{1}{\frac{ITOI_2}{G_{p_1}}} + \frac{1}{\frac{ITOI_3}{G_{p_1} \bullet G_{p_2}}}$$

Per una cascata di n stadi si avrà

$$\frac{1}{OTOI_{cascata}} = \frac{1}{G_{p_2} \bullet G_{p_3} \bullet G_{p_4} \bullet \dots \bullet G_{p(n-1)} \bullet OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \bullet G_{p_4} \bullet \dots \bullet G_{p(n-1)} OTOI_2} + \dots + \frac{1}{OTOI_n}$$

$$\frac{1}{ITOI_{cascata}} = \frac{1}{ITOI_1} + \frac{1}{\frac{ITOI_2}{G_{p_1}}} + \dots + \frac{1}{\frac{ITOI_n}{G_{p_1} \bullet G_{p_2} \bullet \dots \bullet G_{p(n-1)}}}$$

Più stadi in cascata, IP3, la somma coerente

$$\frac{1}{OTOI_{cascata}} = \frac{1}{G_{p-2} \cdot G_{p-3} \cdot OTOI_1} + \frac{1}{G_{p-3} \cdot OTOI_2} + \frac{1}{OTOI_3}$$

Contributo alla distorsione di TO del primo stadio

Contributo alla distorsione di TO del secondo stadio

Contributo alla distorsione di TO del terzo stadio

Quando si esegue l'analisi di tutta la cascata, si "**sposta**" il TOI di ogni dispositivo alla porta comune in modo da realizzare una comparazione e quindi capire quale sarà l'elemento critico della cascata per quanto riguarda il TOI.

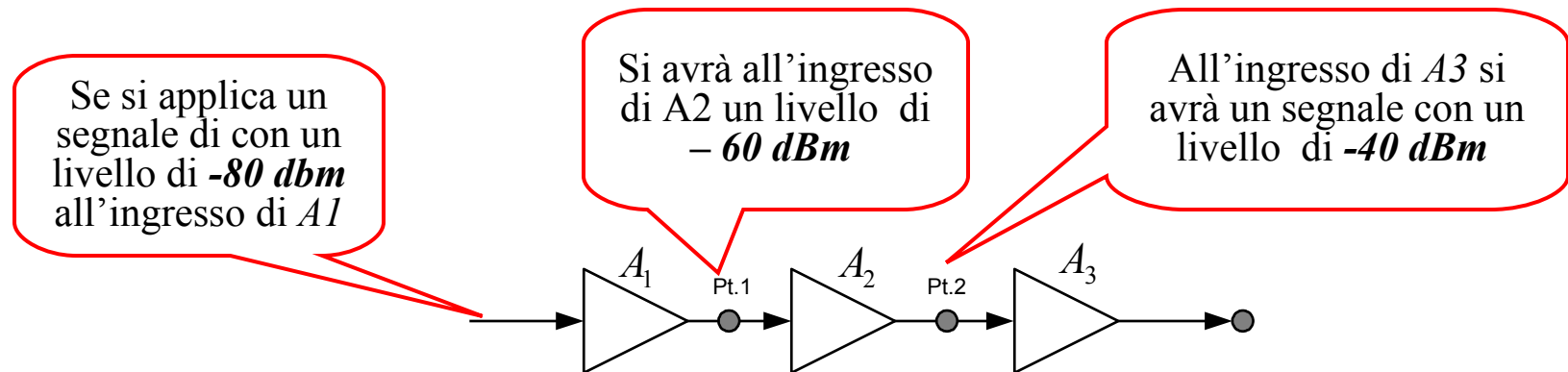
La linearità di una cascata dipende dalla **linearità e dal guadagno di ogni singolo elemento**.

Un elemento preceduto da altri con un guadagno elevato avrà al suo ingresso un segnale elevato e quindi potrà più facilmente generare distorsione.

Più stadi in cascata, IP3, la somma coerente

Esempio 1

Si hanno 3 amplificatori **uguali** connessi in cascata



| | | |
|-----------------------|----------|----------|
| $G_{p_dB} = 20dB$ | $20dB$ | $20dB$ |
| $ITOI_{dBm} = -10dBm$ | $-10dBm$ | $-10dBm$ |
| $OTOI_{dBm} = 10dBm$ | $10dBm$ | $10dBm$ |

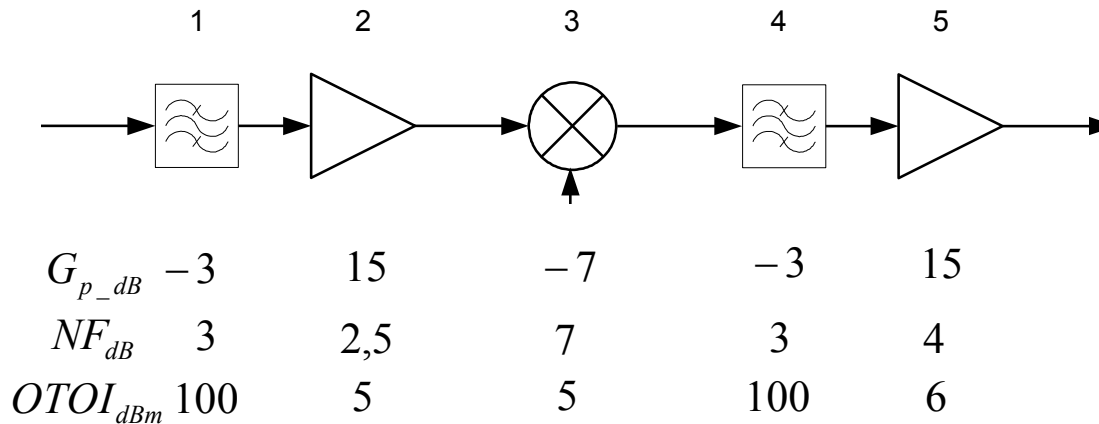
L'amplificatore $A3$ è quello il segnale di **ingresso di maggiore potenza** e quindi con l'**effetto dominante** sulla TOI.

In un sistema ben progettato i valori di distorsione di TO, (di ingresso e di uscita) traslati alla porta comune (ingresso o uscita) devono essere grosso modo uguali. In questo modo ciascun elemento della cascata influisce sulla distorsione complessiva con la stessa quantità .

Più stadi in cascata, IP3, la somma coerente

Esempio 2

Dato il sistema di stadi in cascata rappresentato in figura e noti per ogni stadio i valori di, guadagno, figura di rumore, OTOI e della banda passante $BW = 30 \text{ kHz}$.



Calcolare:

- la figura di rumore di tutta la cascata $NF_{cascata_dB}$,
- il valore del guadagno di tutta la cascata G_{p_dB} ,
- il valore di ITOI di tutta la cascata $ITOI_{cascata_dBm}$,
- il valore di OTOI di tutta la cascata $OTOI_{cascata_dBm}$,
- il valore di MDS_{dBm} ,
- Il valore di $SFDR_{dB}$.

Soluzione

Per prima cosa conviene convertire le grandezze espresse in dB e dBm in grandezze lineari.

$$OTOI_{dBm} = 10 \log \frac{OTOI}{10^{-3}} \quad \longleftrightarrow \quad OTOI = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{OTOI_{dBm}}{10}}$$

Si calcolano i valori di **OTOI**

$$OTOI_1 = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{OTOI_{1_dBm}}{10}} = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{100}{10}} \quad \longrightarrow \quad OTOI_1 = 10^7 W$$

$$OTOI_2 = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{OTOI_{2_dBm}}{10}} = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{5}{10}} \quad \longrightarrow \quad OTOI_2 = 3,162 \bullet 10^{-3} W$$

$$OTOI_3 = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{OTOI_{3_dBm}}{10}} = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{5}{10}} \quad \longrightarrow \quad OTOI_3 = 3,162 \bullet 10^{-3} W$$

$$OTOI_4 = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{OTOI_{4_dBm}}{10}} = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{100}{10}} \quad \longrightarrow \quad OTOI_4 = 10^7 W$$

$$OTOI_5 = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{OTOI_{5_dBm}}{10}} = 10^{-3} \bullet 10^{\frac{6}{10}} \quad \longrightarrow \quad OTOI_5 = 3,98 \bullet 10^{-3} W$$

Più stadi in cascata, IP3, la somma coerente

Esempio 2 - Soluzione

Si calcolano i guadagni

$$G_{p_cascata_dB} = G_{p_1_dB} + G_{p_2_dB} + G_{p_3_dB} + G_{p_4_dB} + G_{p_5_dB}$$

$$G_{p_cascata_dB} = (-3 + 15 + -7 + -3 + 15)dB \longrightarrow G_{p_cascata_dB} = 17dB$$

$$G_{p_dB} = 10 \log G_p \longleftrightarrow G_p = 10^{\frac{G_{p_dBm}}{10}}$$

$$G_{p_1} = 10^{\frac{-3}{10}} = 0,5$$

$$G_{p_2} = 10^{\frac{15}{10}} = 31,62$$

$$G_{p_3} = 10^{\frac{-7}{10}} = 0,2$$

$$G_{p_4} = 10^{\frac{-3}{10}} = 0,5$$

$$G_{p_5} = 10^{\frac{15}{10}} = 31,62$$

Esempio 2 - Soluzione

Con i valori di OTOI e G in lineare si può procedere al calcolo di OTOI e ITOI in cascata.

$$\frac{1}{OTOI_{cascata}} = \frac{1}{G_{p_2} \cdot G_{p_3} \cdot G_{p_4} \cdot G_{p_5} \cdot OTOI_1} + \frac{1}{G_{p_3} \cdot G_{p_4} \cdot G_{p_5} \cdot OTOI_2} +$$

$$+ \frac{1}{G_{p_4} \cdot G_{p_5} \cdot OTOI_3} + \frac{1}{G_{p_5} \cdot OTOI_4} + \frac{1}{OTOI_5}$$

Si può trascurare

$$\frac{1}{OTOI_{cascata}} = \frac{1}{0,5 \cdot 31,62 \cdot 0,2 \cdot 31,62 \cdot 10^7} + \frac{1}{31,62 \cdot 0,2 \cdot 0,5 \cdot 3,162 \cdot 10^{-3}} +$$

$$+ \frac{1}{0,5 \cdot 31,62 \cdot 3,162 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{0,5 \cdot 10^7} + \frac{1}{3,98 \cdot 10^{-3}}$$

$$\frac{1}{OTOI_{cascata}} = (0,1001 + 0,02 + 0,2513)10^3 \quad \Rightarrow \quad OTOI_{cascata} = \frac{10^{-3}}{(0,1001 + 0,02 + 0,2513)} = \frac{10^{-3}}{0,3714}$$

$$OTOI_{cascata} = 2,6929 \cdot 10^{-3} W$$

$$OTOI_{cascata_dBm} = 10 \log \frac{OTOI_{cascata}}{10_{-3}} = 10 \log 2,6929 \cdot 10^{-3} \quad \Rightarrow \quad OTOI_{cascata_dBm} = 4,362 dBm$$

Si calcola ITOI

$$ITOI_{cascata_dBm} = OTOI_{cascata_dBm} - G_{p_dB}$$

$$ITOI_{cascata_dBm} = OTOI_{cascata_dBm} - G_{p_dB} = 4,362dBm - 17dB \quad ITOI_{cascata_dBm} = -12,63dBm$$

Si calcolano i valori della Figura di Rumore di sistema, $NF_{cascata}$, per farlo si devono trasformare i valori logaritmici di NF, di ciascun stadio, nei valori lineari della Cifra di Rumore

$$NF_1 = 3dB \quad \longrightarrow \quad F_1 = 10^{\frac{3}{10}} = 2$$

$$NF_2 = 2,5dB \quad \longrightarrow \quad F_2 = 10^{\frac{2,5}{10}} = 1,77$$

$$NF_3 = 7dB \quad \longrightarrow \quad F_3 = 10^{\frac{7}{10}} = 5,0119$$

$$NF_4 = 3dB \quad \longrightarrow \quad F_4 = 10^{\frac{3}{10}} = 2$$

$$NF_5 = 4dB \quad \longrightarrow \quad F_5 = 10^{\frac{4}{10}} = 2,5$$

Si calcola la Figura di Rumore della cascata

$$F_{cascata} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{p-1}} + \frac{F_3 - 1}{G_{p-1} \bullet G_{p-2}} + \frac{F_4 - 1}{G_{p-1} \bullet G_{p-2} \bullet G_{p-3}} + \frac{F_4 - 1}{G_{p-1} \bullet G_{p-2} \bullet G_{p-3} \bullet G_{p-4}}$$

$$F_{cascata} = 2 + \frac{0,77}{0,5} + \frac{4,0119}{0,5 \bullet 31,62} + \frac{1}{0,5 \bullet 31,62 \bullet 0,2} + \frac{1,5}{0,5 \bullet 31,62 \bullet 0,2 \bullet 0,5}$$

$$F_{cascata} = 2 + 1,54 + 0,2538 + 0,3163 + 0,9488 \quad \longrightarrow \quad F_{cascata} = 5,0589$$

$$NF_{cascata} = 10 \log F_{cascata} = 10 \log 5,0589 \quad \longrightarrow \quad NF_{cascata} = 7,04 dB$$

Calcolo del MDS

$$MDS_{dBm} = NF_{cascata} - 174 + 10 \log BW$$

$$MDS_{dBm} = 7,04 - 174 + 10 \log 30 \bullet 10^3 \quad \longrightarrow \quad MDS_{dBm} = -122,188 dBm$$

Più stadi in cascata, IP3, la somma coerente

Esempio 2 - Soluzione

Si calcola SFDR

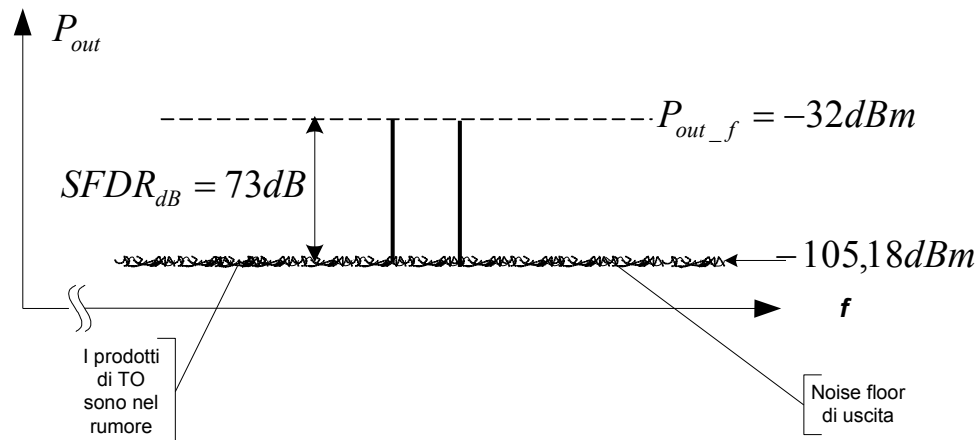
$$SFDR_{dB} = \frac{2}{3} (ITOI_{dBm} - MDS_{dBm})$$

$$SFDR_{dB} = \frac{2}{3} (-12,63_{dBm} - (-122,188_{dBm})) \quad \rightarrow \quad SFDR_{dB} = 73_{dB}$$

Il Noise Floor sarà

$$NoiseFloor_{dBm} = G_{p_cascata_dB} + \underbrace{NF_{cascata} - 174 + 10 \log BW}_{MDS_{dBm}}$$

$$NoiseFloor_{dBm} = 17 + 7,04 - 174 + 10 \log 30 \cdot 10^{-3} \quad \rightarrow \quad NoiseFloor_{dBm} = -105,18 dBm$$



Più stadi in cascata, IP3, la somma coerente

Esempio 2 - Soluzione

Il livello di ingresso

$$P_{in_f_dBm} = P_{out_f_dBm} - G_{p_dB}$$

$$P_{in_f_dBm} = -32dBm - 17dB \quad \longrightarrow \quad P_{in_f_dBm} = -49dBm$$