



Apparati elettronici ad ultrasuoni

Corso di Elettronica dei Sistemi Analogici e Sensori

Laurea Magistrale Ingegneria Elettronica

Università di Firenze

A.A. 2013-2014

Docente: Prof. Ing. Lorenzo Capineri

Argomenti trattati - parte 1

- Principio di funzionamento dei trasduttori piezoelettrici
- Modello circuitale del trasduttore alla risonanza
 - Compensazione
 - Adattamento di impedenza
 - Collegamenti
- Apparato ad ultrasuoni
 - Modi di funzionamento
 - Schema a blocchi
 - Impulsatori alta tensione ($\geq 100\text{V}$)
 - Circuito *duplexer*
 - Circuiti di smorzamento e compensazione

Principio di funzionamento dei trasduttori piezoelettrici

Piezoelasticità

La piezoelasticità (*la parola deriva dal greco πιέζειν, premere, comprimere*) è la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri.

Un materiale piezoelastico è un materiale la cui struttura molecolare (asimmetrica) fornisce un effetto di accoppiamento elettromeccanico:

- Effetto piezoelastico inverso: quando vi si applica un campo elettrico si genera una deformazione meccanica
- Effetto piezoelastico diretto: quando viene deformato meccanicamente si genera al suo interno un campo elettrico (usato per ricevere ultrasuoni)

Principali costanti piezoelettriche

$$d_{ij} = \left(\frac{\textit{strain ottenuto lungo l'asse } j}{\textit{campo elettrico applicato lungo l'asse } i} \right)_T$$
$$g_{ij} = \left(\frac{\textit{campo elettrico indotto lungo l'asse } j}{\textit{strain meccanico applicato lungo l'asse } i} \right)_D$$
$$\varepsilon_{ij} = \left(\frac{\textit{vettore di induzione dielettrica lungo l'asse } j}{\textit{campo elettrico lungo l'asse } i} \right)$$
$$K^2 = \frac{\textit{energia meccanica immagazzinata}}{\textit{energia elettrica fornita}}$$

d = parametro delle caratteristiche del funzionamento del materiale come trasmettitore

g= parametro delle caratteristiche del funzionamento del materiale come ricevitore

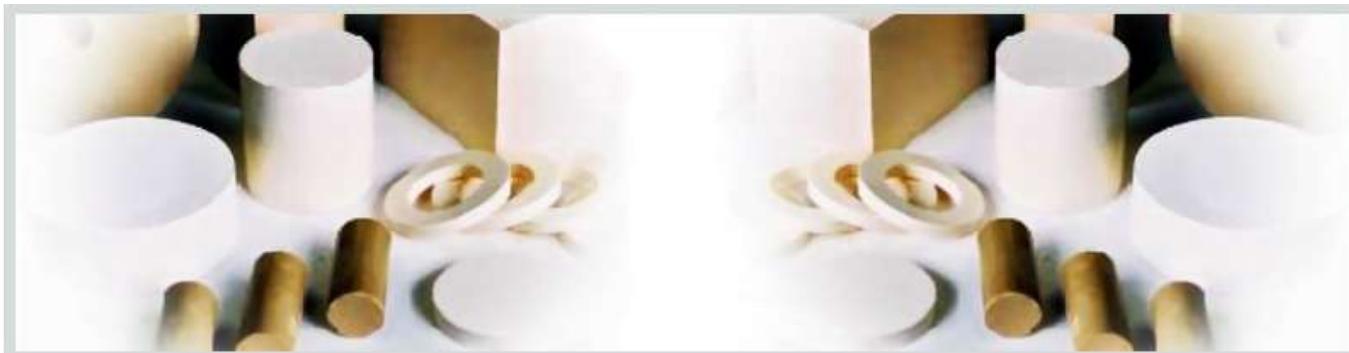
ε= costante dielettrica del materiale

K= coefficiente di accoppiamento meccanico. Capacità del materiale di convertire energia meccanica in energia elettrica e viceversa.

Esempi di Materiali Piezoelettrici

Material	ρ	$\epsilon_{33}^s/\epsilon_0$	k_T	c_{TL} km/s	Z_L MR	k'_{33}	c'_{33L} km/s	Z'_{33} MR	k_{33}	c_{33L} km/s	Z_{33} MR
PZT-5A	7.75	830	0.49	4.350	33.71	0.66	3227	25.01	0.705	3693	28.62
PZT-5H	7.50	1470	0.50	4.560	34.31	0.70	3800	29	0.75		
<i>BaTiO₃</i>	5.7	1260	0.38	5.47	31.18	0.47			0.50		
<i>LiNbO₃</i>	4.64	39	0.49	7.36	34.2						
Quartz	2.65	4.5	0.093	5.0	13.3						
PVDF	1.78	12	0.11	2.2	3.92						
PMN-PT	8.06	680	0.64	4.646	37.45	0.9066	3.057	24.64	0.94	3.343	26.94
PZN-PT	8.31	1000	0.5	4.03	33.49	0.878	2.624	21.81	0.91	2.417	20.09
Comp A	6.01	376	0.80	3.0	18.03						
Comp B	4.37	622	0.66	3.79	16.58						
Navy VI	7.5	1470	0.5	4.575	34.31	0.698	3986	29.9	0.75	3.851	28.88

Piezoceramici: possono essere realizzati in varie forme e dimensioni



Modi di vibrazione

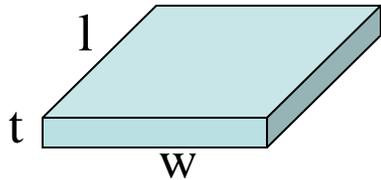
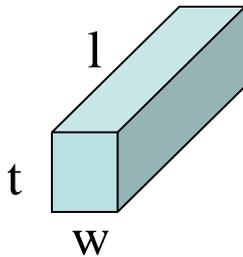
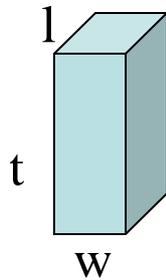


Plate-mode : $t \ll l, w$



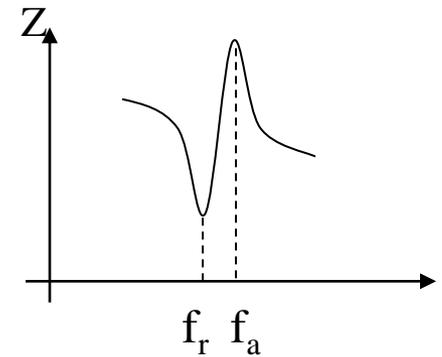
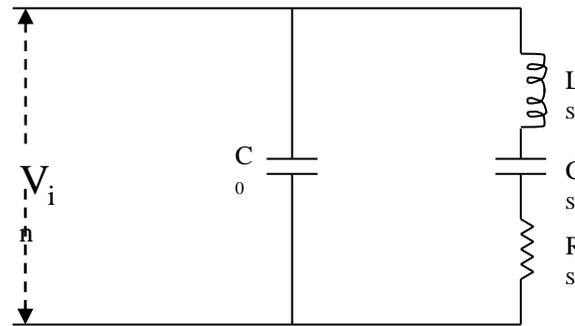
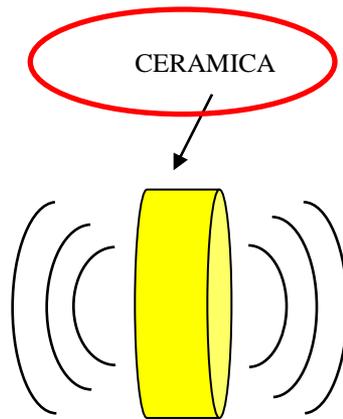
Thickness-mode : $l \gg t, w$



Bar-mode : $t \gg l, w$

Trasduttore circolare

Circuito equivalente semplificato per una ceramica piezoelettrica

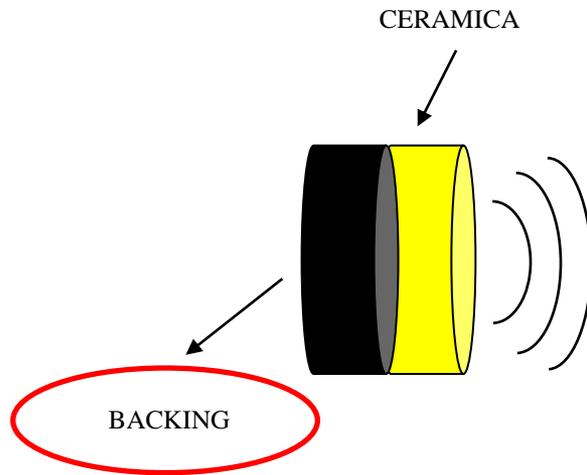


- Emissione di ultrasuoni in tutte le direzioni (anche posteriormente)
- Sistema fortemente risonante → Banda Stretta

Trasduttore circolare

Accorgimenti per migliorare le prestazioni di un trasduttore

1) Backing

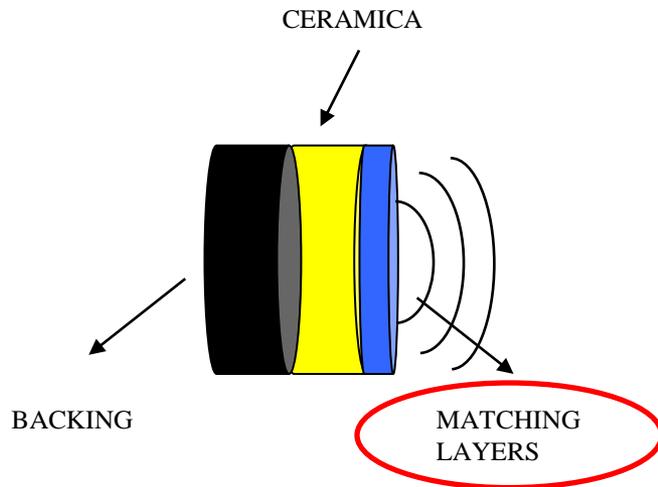


Il backing è un mezzo assorbente incollato posteriormente alla ceramica, per "prelevare" e "smorzare" gli ultrasuoni che si propagano nella direzione opposta a quella privilegiata di osservazione

Trasduttore circolare

Accorgimenti per migliorare le prestazioni di un trasduttore

2) Matching Layers

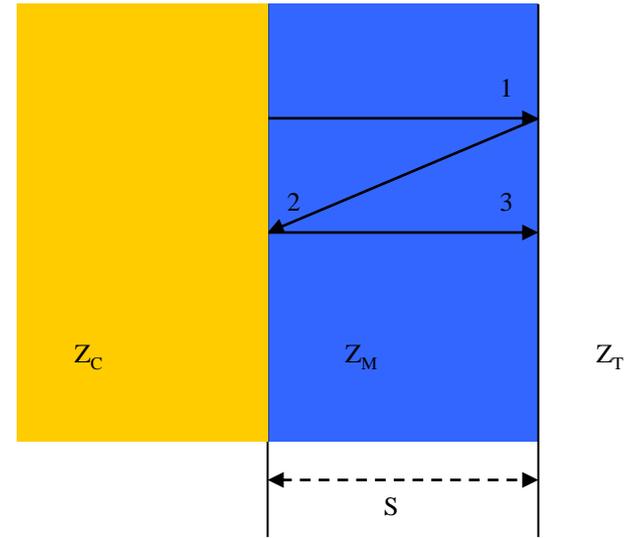


Z_C = impedenza ceramica (typ. 30 MR)

Z_M = impedenza matching layer

Z_T = impedenza tessuto (typ. 1.5 MR)

È necessario adottare accorgimenti per adattare l'impedenza acustica del PZT a quella dei tessuti

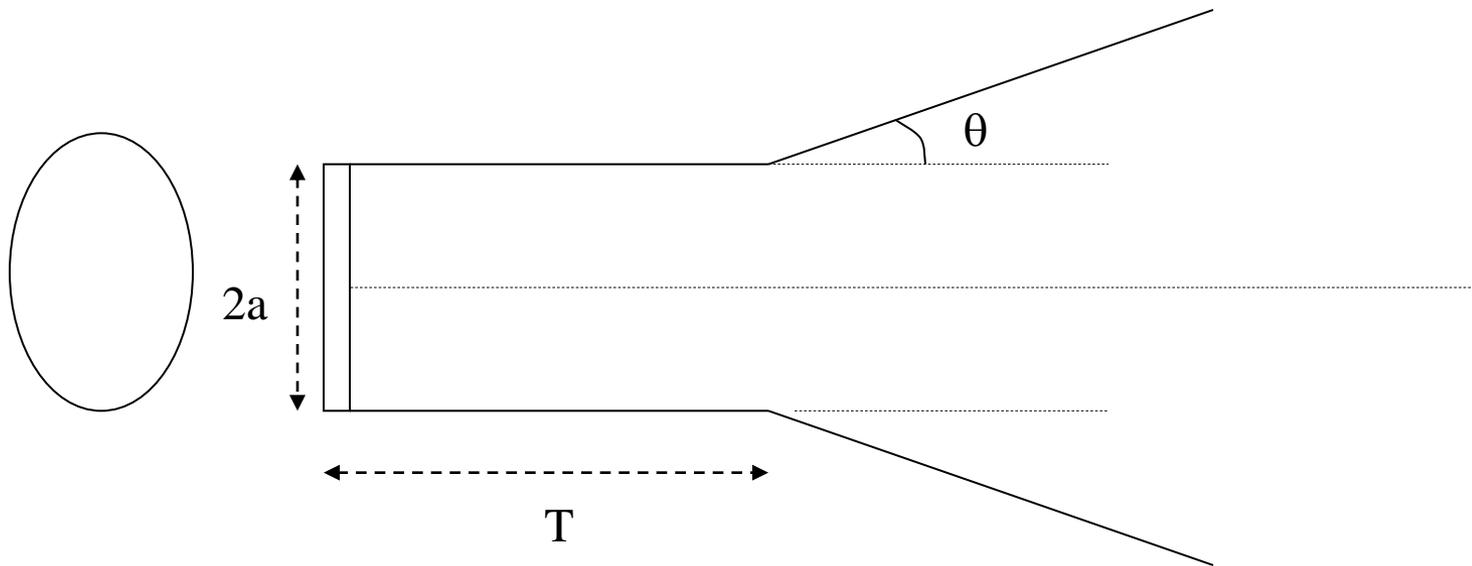


$$Z_C > Z_M > Z_T$$

$$Z_M = \sqrt{Z_C Z_T}$$

$$S = \frac{\lambda}{4}$$

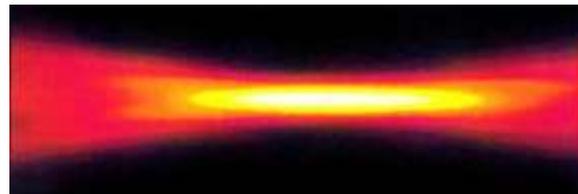
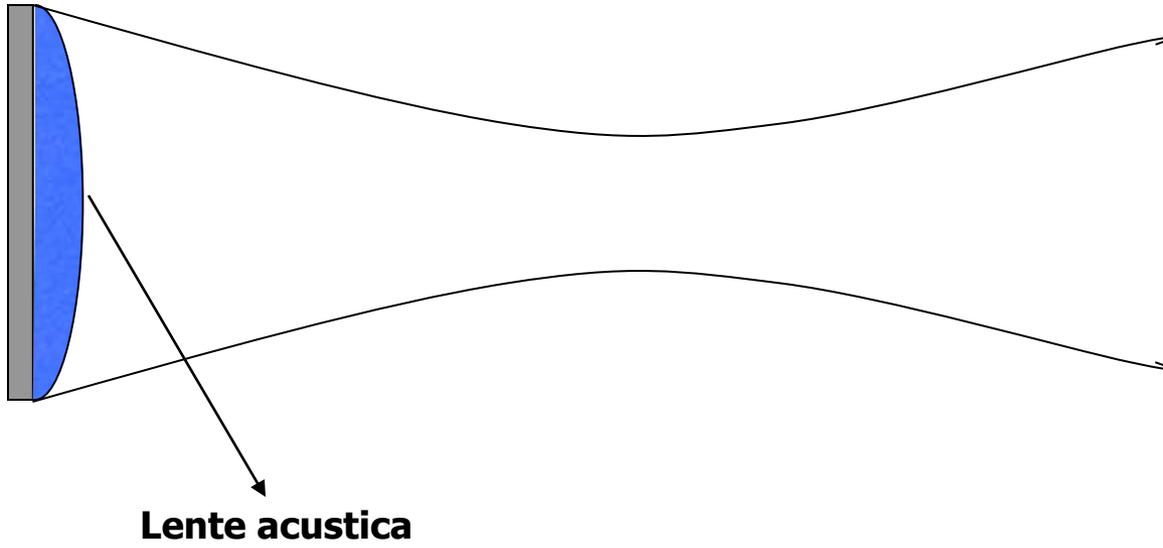
Focalizzazione naturale



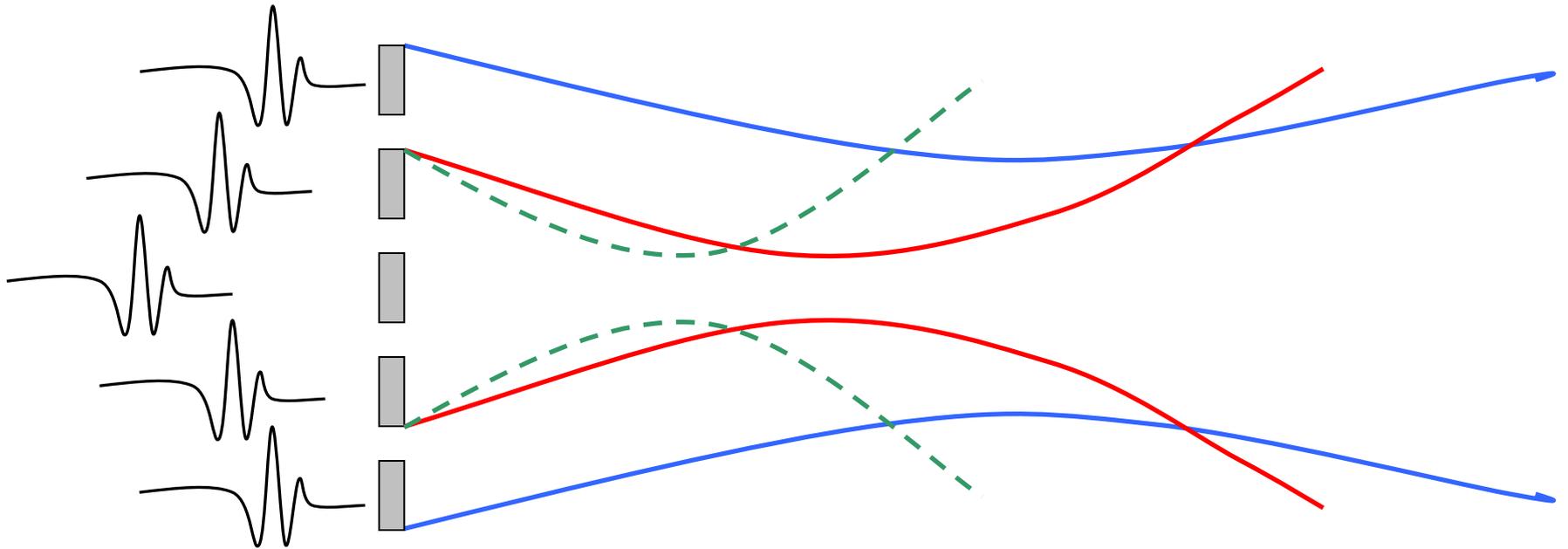
$$T = a^2 / \lambda \quad \text{campo vicino}$$

$$\sin \theta = 0,61 \lambda / a$$

Focalizzazione geometrica



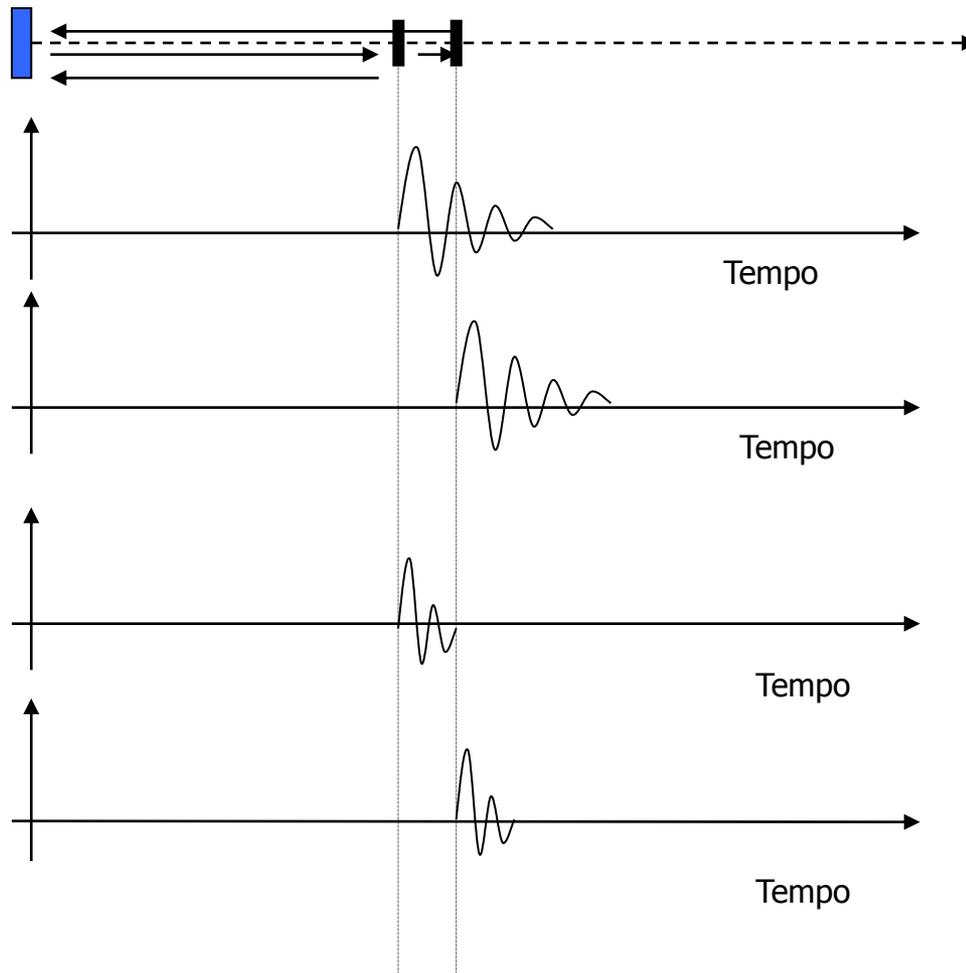
Focalizzazione elettronica



- 1) Possibile solo con trasduttori ad array (**con più elementi indipendenti**)
- 2) I diversi elementi vengono eccitati con segnali sfasati tra loro in modo tale che i diversi contributi vadano a sommarsi costruttivamente in determinate zone dello spazio (fuoco)

Caratteristiche Prestazionali di un trasduttore

RISOLUZIONE ASSIALE



**Capacità di distinguere
due oggetti
lungo l'asse del trasduttore**

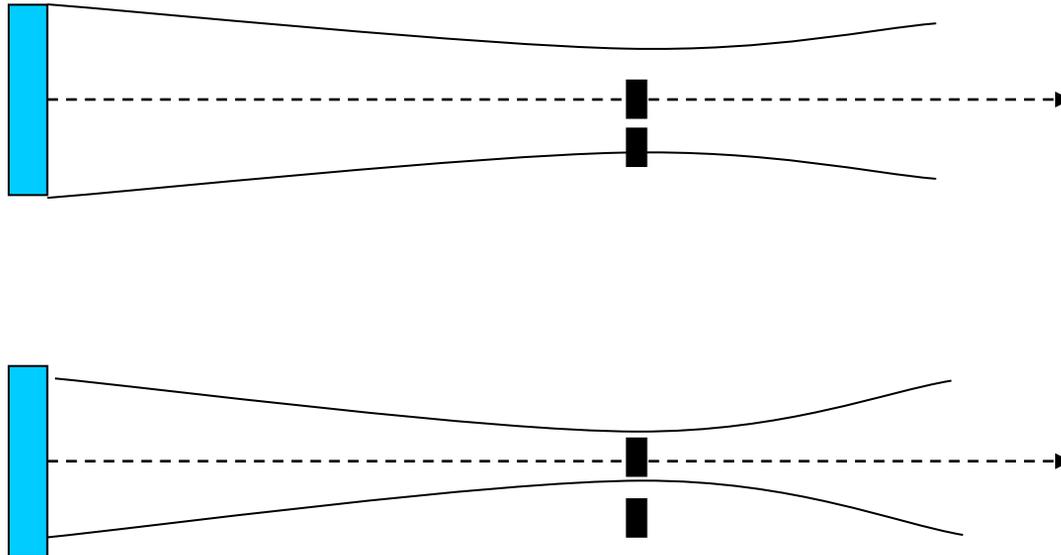
**È legata alla frequenza del segnale e alla
banda del trasduttore
(ovvero alla sua capacità di trasmettere
e ricevere impulsi brevi)**

*Per discriminare 2 oggetti mediante il
segnale di eco da essi generato è
necessario che il segnale di eco relativo
all'oggetto più vicino termini prima
dell'inizio di quello relativo all'oggetto
più lontano*

Caratteristiche Prestazionali di un trasduttore

RISOLUZIONE LATERALE

**Capacità di distinguere due oggetti nella direzione
perpendicolare a quella dell'asse del trasduttore
È legata alla frequenza e alla focalizzazione del trasduttore**

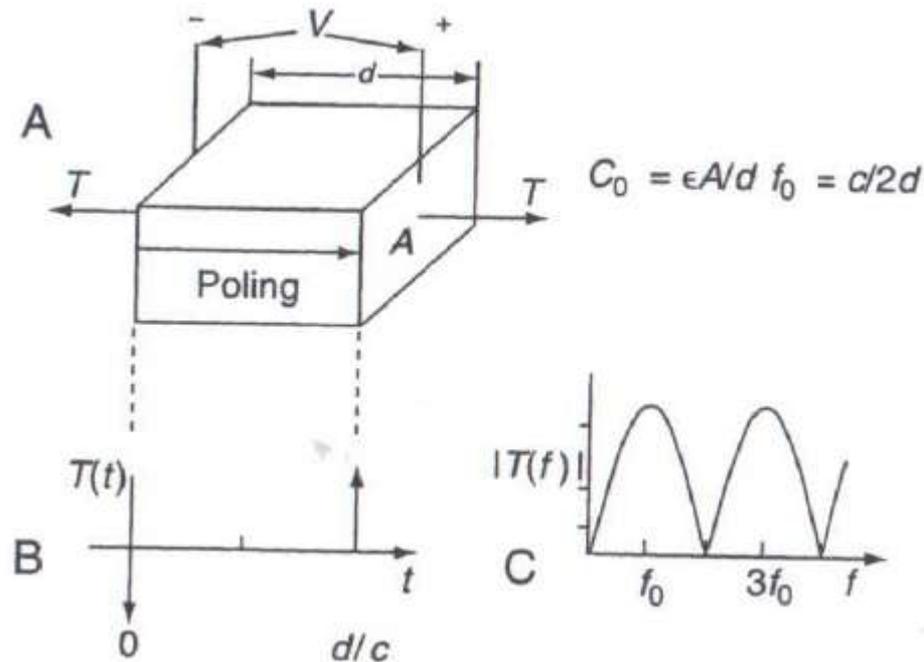


Caratteristiche Prestazionali di un trasduttore

SENSIBILITA'

$$\textit{Sensibilità} = \frac{\textit{AmpiezzaEco}}{\textit{AmpiezzaTrasmissione}}$$

Elemento piezoelettrico con vibrazione in modo spessore



- A) Modello di un cristallo piezoelettrico con espansione nella direzione dello spessore sottile d , materiale piezoelettrico con costante dielettrica ϵ^S definita a deformazione nulla ($S=0$), c velocità materiale piezoelettrico
- B) dovuto all'applicazione di un impulso in tensione $V(t)=\delta(t)$
- C) Andamento dello stress T in frequenza

Risposta in frequenza $F(f)$

$$T = C^D S - hD \quad (5.2)$$

in which (h) is a piezoelectric constant. The elastic stiffness constant (C^D) is obtained under a constant dielectric displacement (D), and (E) is the electric field,

$$D = \epsilon^S E = \frac{\epsilon^S AV}{dA} = C_0 V/A \quad (5.3)$$

If a voltage impulse is applied across the electrodes, the piezoelectric effect creates forces at the top and bottom of the transducer, given by

$$F(t) = TA = (hC_0 V/2)[- \delta(t) + \delta(t - d/c)] \quad (5.4)$$

for which we have assumed that the media outside the electrodes has the same acoustic impedance as the transducer (see Figure 5.1a). To obtain the spectrum of this response, take the Fourier transform of Eq. (5.4),

$$F(f) = -i(hC_0 V)e^{-i\pi f d/c} \sin[\pi(2n + 1)f/2f_0] \quad (5.5)$$

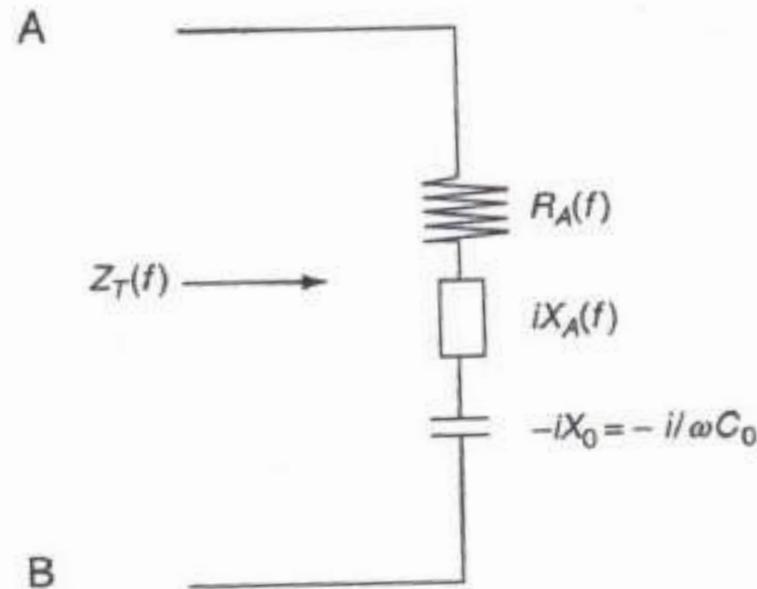
an expression with maxima at odd harmonics (note that $n = 1, 2, 3$, etc.) of the fundamental resonance $f_0 = c/2d$ (shown in Figure 5.1c). The speed of sound between the electrodes is given by $c = \sqrt{C^D/\rho}$.

Impedenza elettrica del trasduttore

Because of the forces generated by the transducer, the electrical impedance looking through the voltage terminals is affected. A radiation impedance, (Z_A) is added to the capacitive reactance so that an equivalent circuit (see Figure 5.2a) for the overall electrical impedance is

$$Z_T = Z_A - i(1/\omega C_0) = R_A(f) + i[X_A(f) - 1/\omega C_0] \quad (5.6)$$

Here Z_A is radiation impedance, of which R_A and X_A are its real and imaginary parts.



Impedenza elettrica del trasduttore

What is R_A ? To first order, it can be found from the total real electrical power flowing into the transducer for an applied voltage (V) and current (I)

$$W_E = II^* R_A / 2 = |I|^2 R_A / 2 \quad (5.7a)$$

where current is $I = i\omega Q = i\omega C_0 V$. The total power radiated from both sides of the transducer into a surrounding medium of specific acoustic impedance, $Z_C = \rho c A$ (equal to that of the crystal) is

$$W_A = ATT^* / (2Z_C / A) = A^2 |F(f) / A|^2 / 2Z_C = |h C_0 V \sin(\pi f / 2f_0)|^2 / 2Z_C \quad (5.7b)$$

Setting the powers of Eqs. (5.7a) and (5.7b) equal, we can solve for R_A ,

$$R_A(f) = R_{AC} \text{sinc}^2(f / 2f_0) \quad (5.8a)$$

where $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$ and

$$R_{AC} = \frac{k_T^2}{4f_0 C_0} = \frac{d^2 k_T^2}{2A \epsilon^S} \quad (5.8b)$$

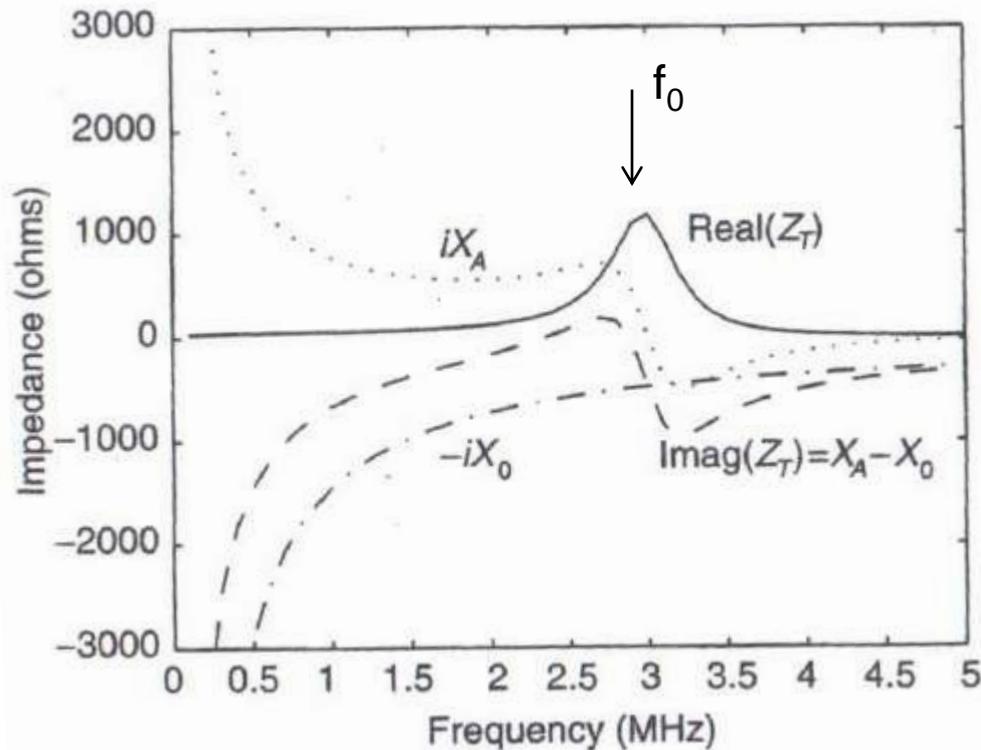
The electroacoustic coupling constant is k_T , and $k_T = h / \sqrt{C^D / \epsilon^S}$. Interesting properties of R_{AC} include an inverse proportionality to the capacitance and area of the transducer and a direct dependence on the square of the thickness (d). Note that at

Modello circuitale del trasduttore alla risonanza

Analisi alla frequenza di risonanza

$$R_A(f_0) = \frac{k_T^2}{\pi^2 f_0 C_0} \quad (5.8c)$$

$$X_A(f) = \Im_{Hi}[R_A(f)] = R_{AC} \frac{[\sin(\pi f / f_0) / \pi f / f_0]}{2(\pi f / 2f_0)^2} \quad (5.8d)$$



Osservazioni

Alla frequenza f_0 risulta $X_A=0$ e R_A max; Il trasduttore si presenta come un carico ohmico – capacitivo.

Circuito equivalente in un intorno della risonanza serie e parallelo (Mason 1964, Kino 1987)

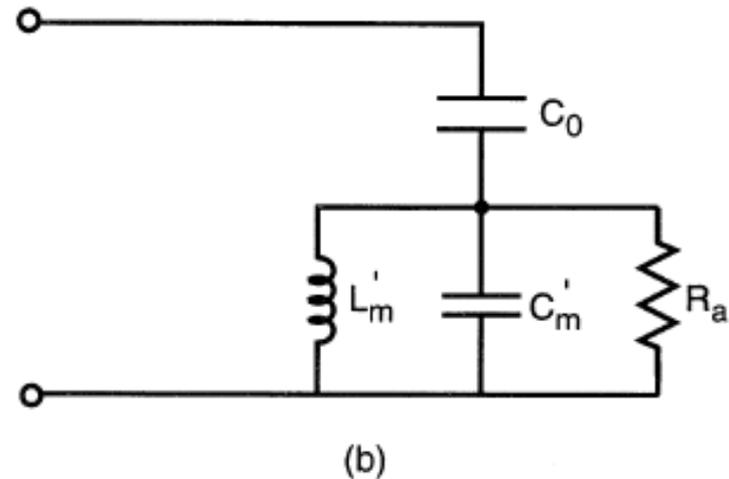
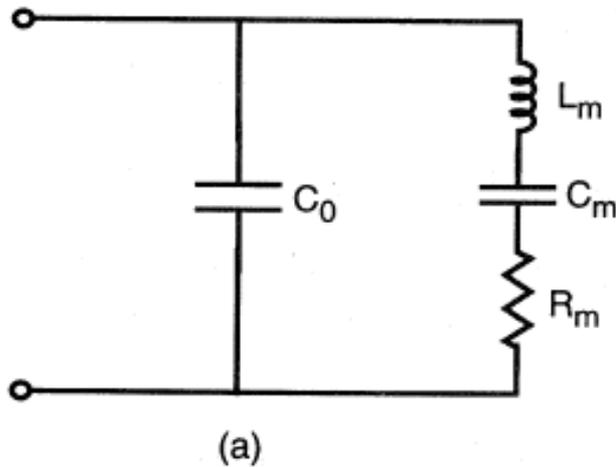


FIGURE 65.6 Simplified equivalent circuits for a piezoelectric transducer: (a) near-series resonance and (b) near-parallel resonance.

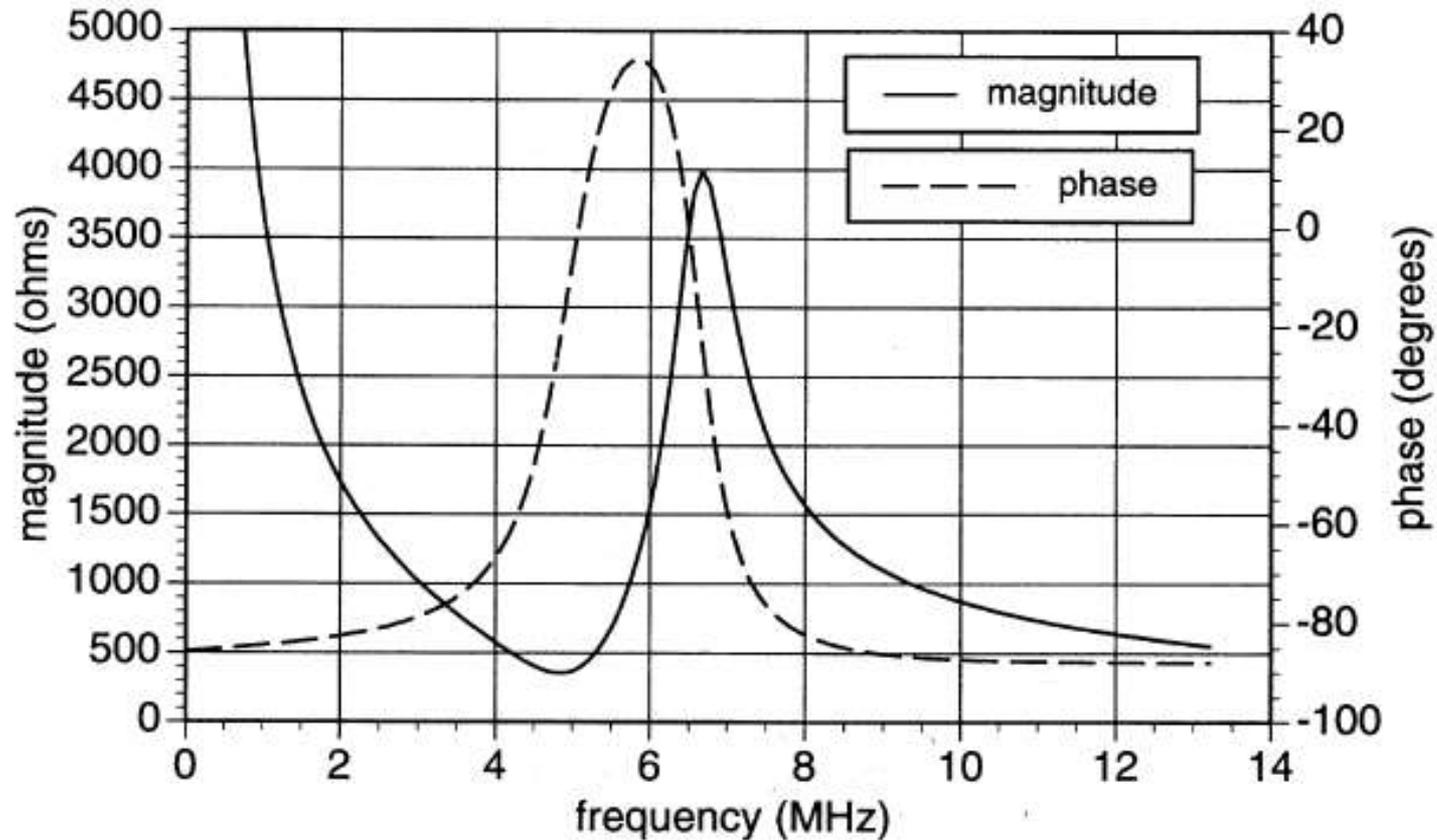
$$R_m = \frac{\pi}{4k^2 \omega C_0} \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_C}$$

$$R_a = \frac{4k^2}{\pi \omega C_0} \cdot \frac{Z_C}{Z_1 + Z_2}$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m C_m}}$$

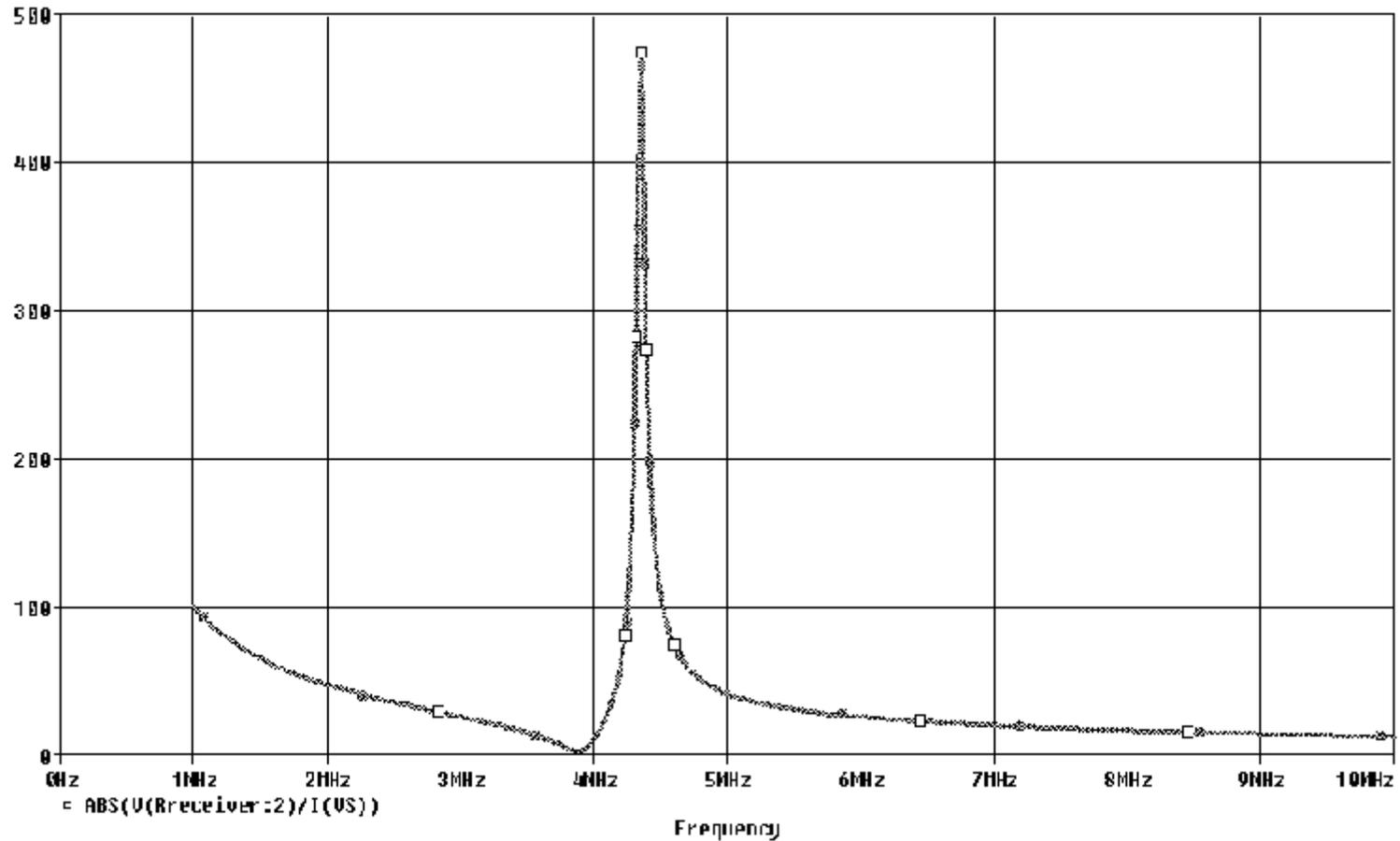
$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L'_m C'_m}}$$

Andamento impedenza di un elemento di una cortina



Examples for a 128-element linear array operating at 5 MHz. The array is made of PZT-5H with element dimensions of $0.1 \times 5 \times 0.3$ mm.

Andamento impedenza di un elemento singolo circolare



Ceramic P1-88 , 4 MHz , diameter 10 mm

Compensazione alla risonanza

$$L_0 = \frac{1}{\omega_0^2 C_0}$$

Compensazione X_{C_0} con
induttanza parallelo

$$L_1 = \frac{1}{\omega_0^2 C_0 + 1/R_m^2 C_0}$$

Compensazione $X_{C_0} + X_{acus}$ con
induttanza serie

Esempio per l'elemento della cortina precedente:

$C_0 = 22 \text{ pF}$, $R_m = 340 \text{ } \Omega$ e freq. Risonanza serie 5.0 MHz.

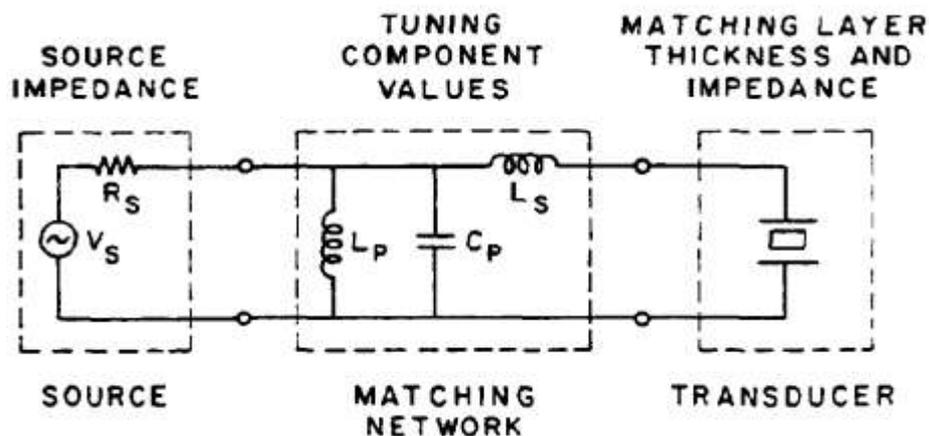
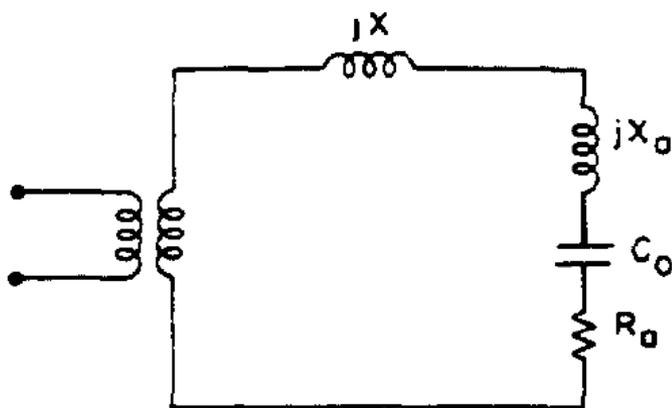
$L_0 = 46 \text{ } \mu\text{H}$ o $L_1 = 2.4 \text{ } \mu\text{H}$

Osservazione: la compensazione parallelo aumenta l'impedenza mentre quella serie la diminuisce.

Adattamento di impedenza

In generale per avere l'adattamento di impedenza verso il ricevitore in modo da avere il massimo trasferimento di potenza si può usare un trasformatore oppure una rete più complessa a due o tre elementi L-C.

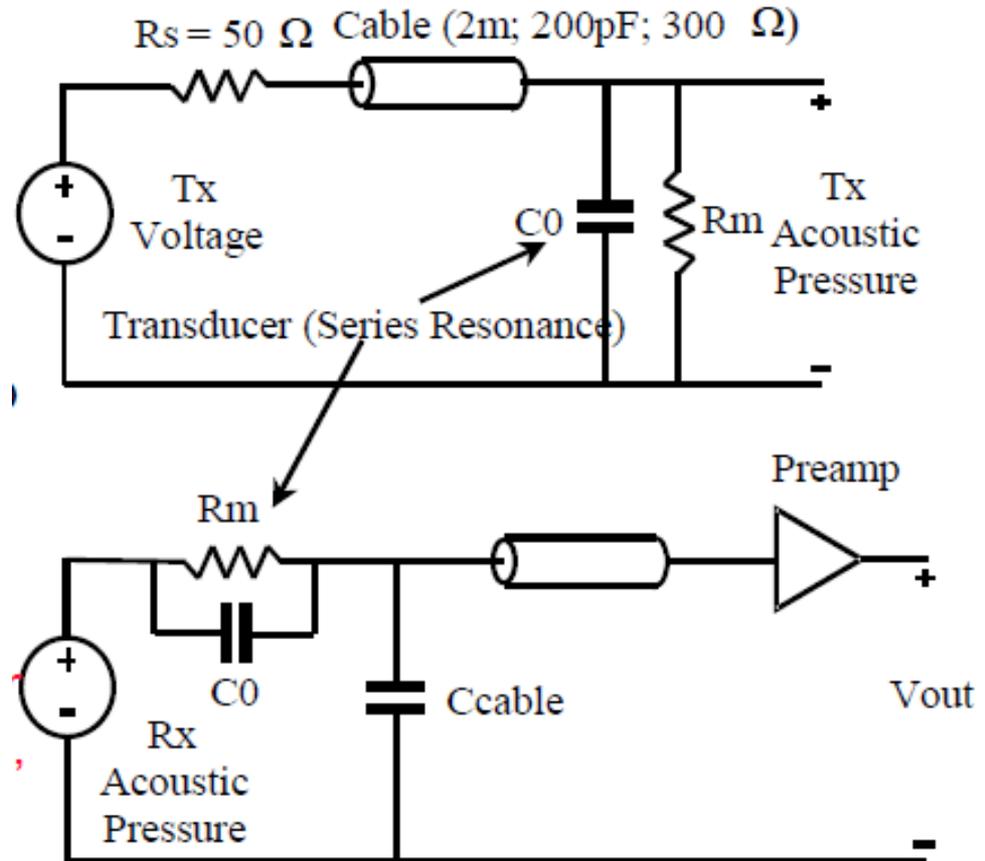
Queste due soluzioni con reti passive sono applicabili a trasduttori singoli o cortine di pochi elementi in quanto non sono facilmente integrabili ed introducono variazioni tra i canali a causa delle tolleranze dei componenti



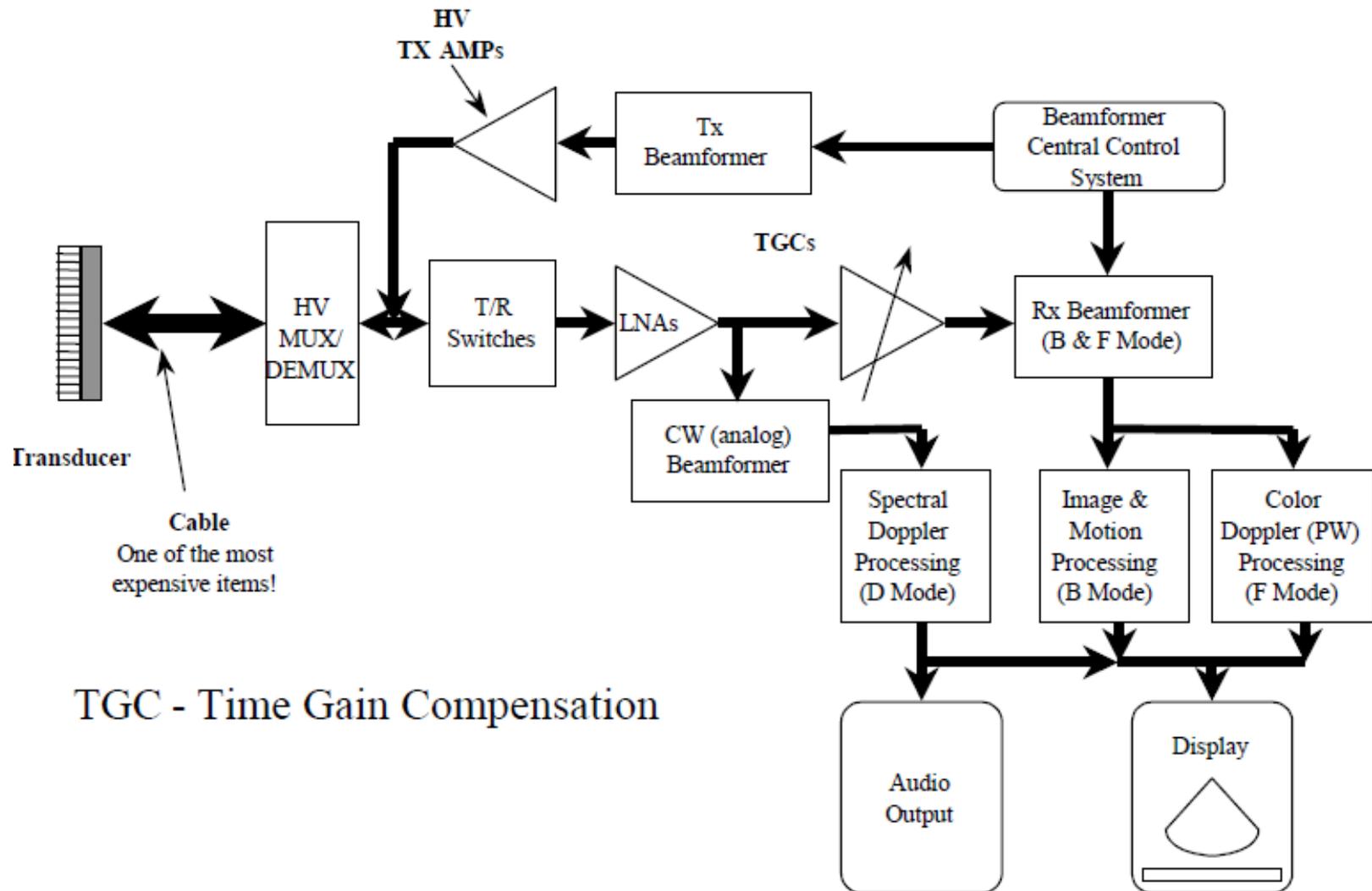
La soluzione alternativa è di tipo attivo, che può essere affrontata con tecnologie dei circuiti integrati sono gli amplificatori a basso rumore (LNA) con impedenza di ingresso programmabile tramite una rete di retroazione

Collegamento del trasduttore

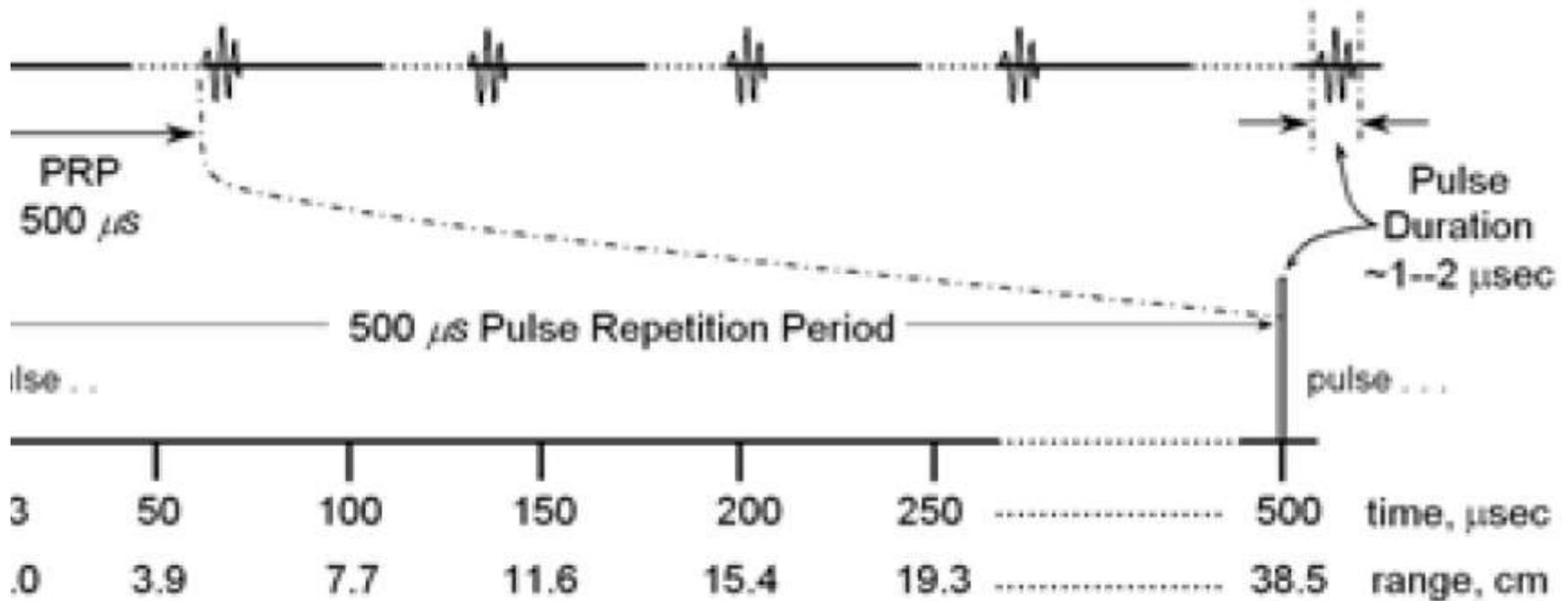
- R_m rappresenta la parte resistiva dovuta al carico acustico.
- L'adattamento di impedenza tra trasduttore, Z_{out} , Z_{in} e cavo e' importante per massimizzare S/N
- Ampiezza dei segnali: da $10\mu V_{pp}$ a $0.5 V_{pp}$
- idealmente il preamplificatore dovrebbe stare nel corpo del trasduttore ma il consumo di potenza, cavi di alimentazione e dimensioni sono grandi ostacoli all'integrazione



Apparato ad ultrasuoni



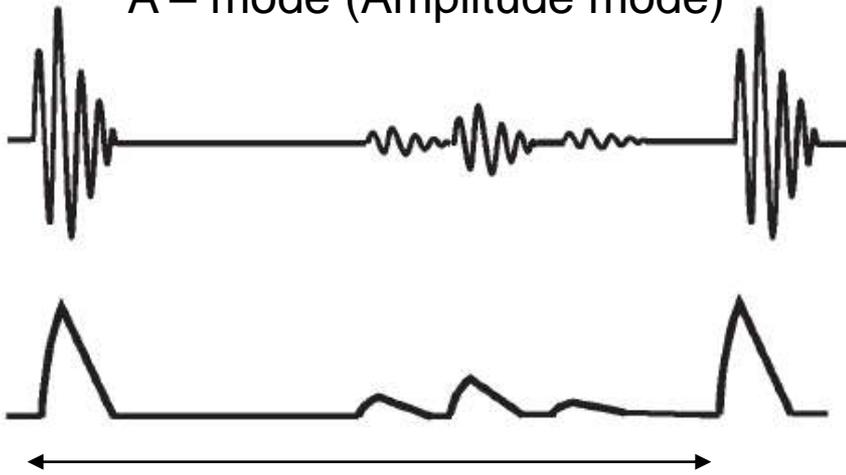
Acquisizione PW per immagini ad ultrasuoni



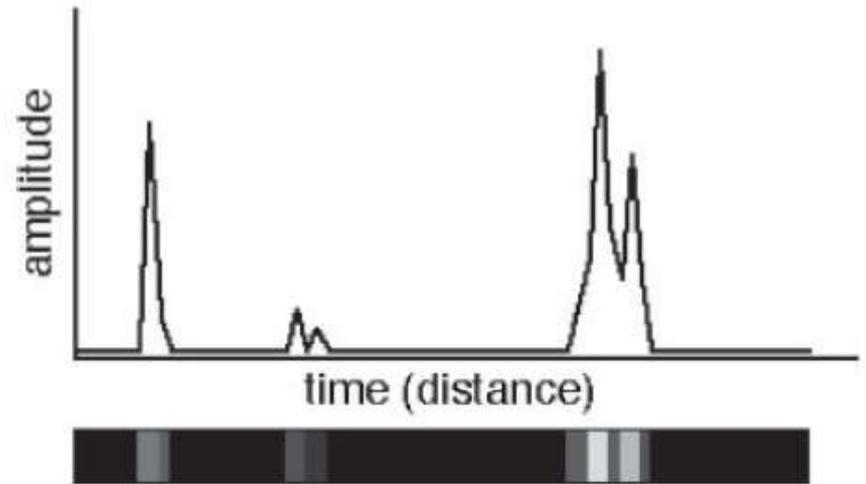
$$PRF = \frac{1}{PRP} = \frac{1}{500 \mu s} = \frac{1}{500 \times 10^{-6} s} = \frac{2000}{s} = 2 \text{ kHz}$$

Formazione dell'immagine

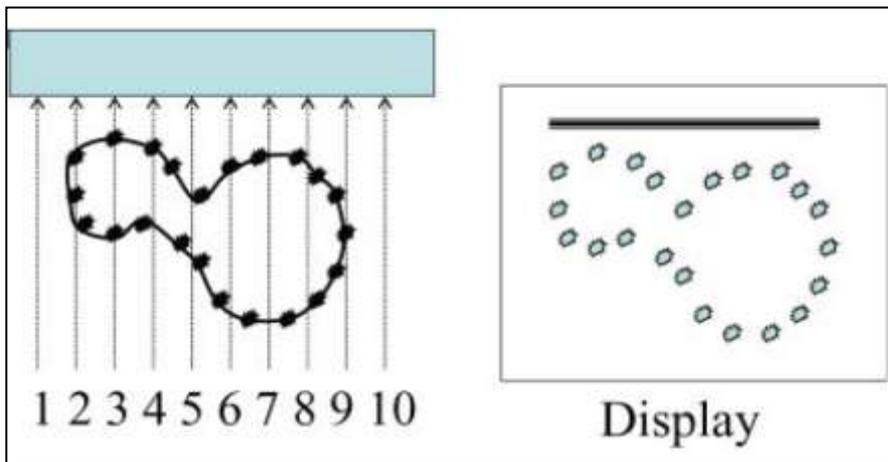
A – mode (Amplitude mode)



Pulse Repetition Period (PRP) = $1 / \text{PRF}$

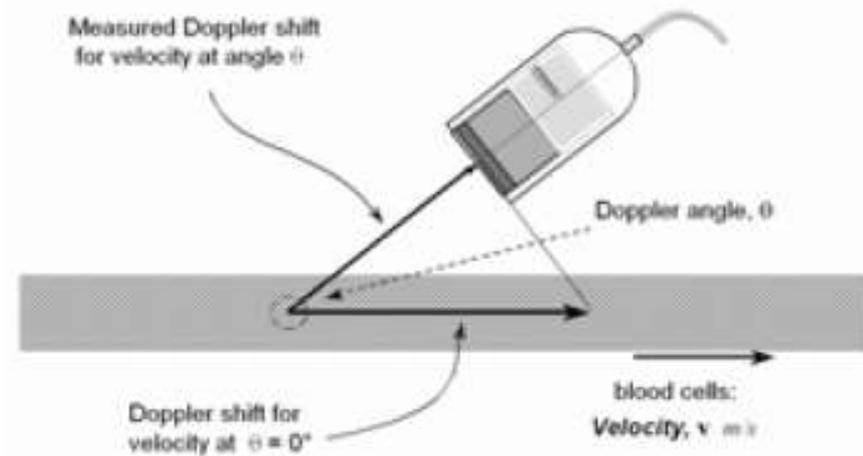


Conversione ampiezza scala di grigi



Effetto Doppler

- ❖ The Doppler shift is the difference between the incident frequency and reflected frequency
- ❖ f_d = Doppler frequency shift
- ❖ f_i = transducer frequency
- ❖ f_r = reflected frequency
- ❖ v = blood velocity
- ❖ c_t = speed of sound in tissue
- ❖ As the angle of incidence increases with respect to the long axis of the blood vessel, the Doppler shift decreases
- ❖ $\cos 0 = 1$, $\cos 30 = 0.87$, $\cos 45 = 0.707$, $\cos 60 = 0.5$, $\cos 90 = 0$



$$f_d = f_i - f_r = \frac{2v \cos(\theta)}{c_t} f_i$$

$$v = \frac{f_d c_t}{2 f_i \cos(\theta)}$$

Modi di funzionamento

- Pulse (**PW**)
- Pulse Wave Doppler (**PW Doppler**)
- Continuous Wave Doppler (**CW Doppler**)
- **In particolare il modo PW e CW Doppler differiscono per:**

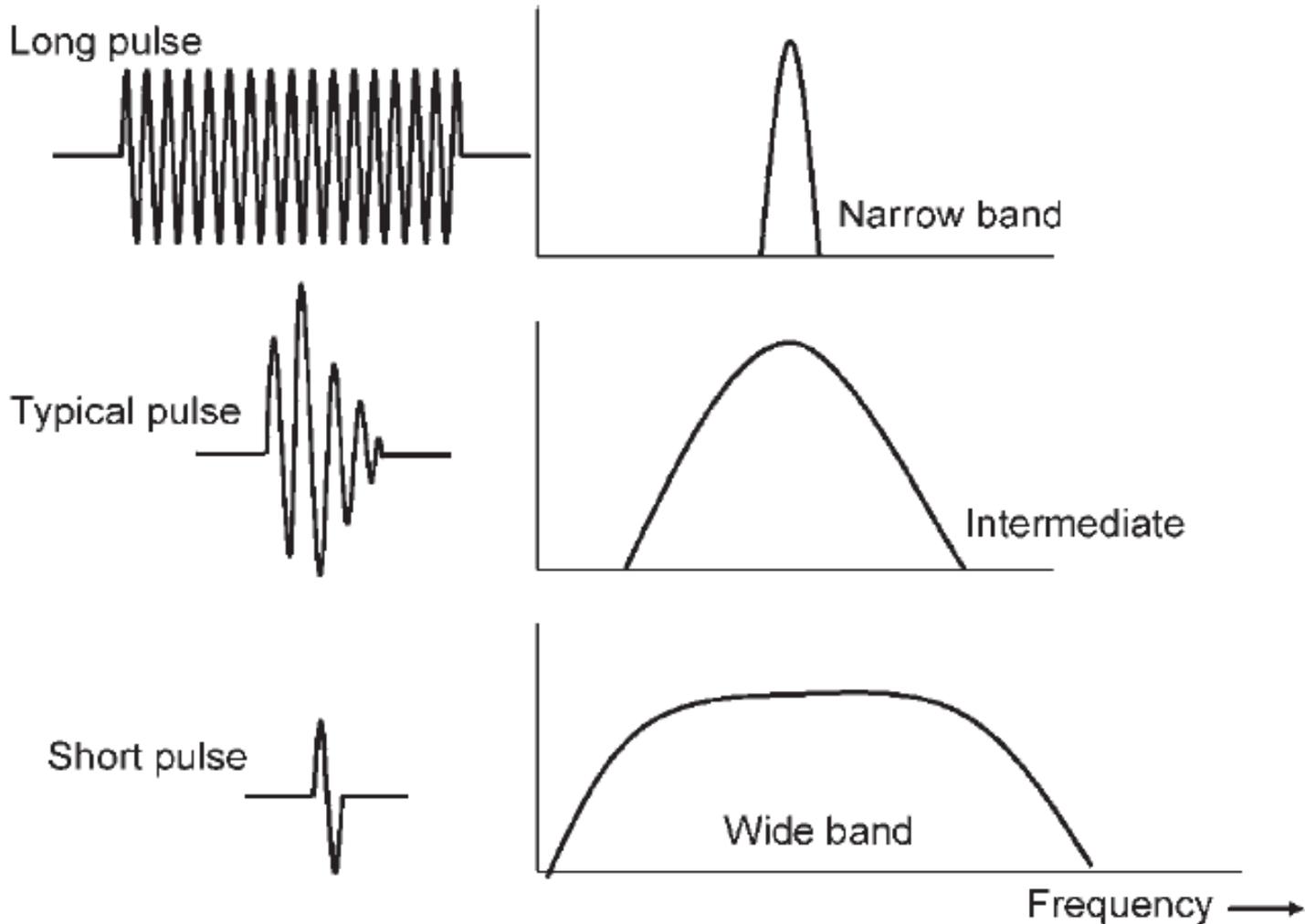
PW Doppler

- Misura lo spostamento in frequenza per effetto Doppler ad una particolare posizione lungo l'asse del trasduttore definita dal formatore del fascio
- Svantaggi: elevati spostamenti in frequenza sono limitati dalla frequenza di ripetizione degli impulsi (Es.: 12 cm profondità, $v=1540$ m/s \Rightarrow max. PRF = 6.4 kHz \Rightarrow max. spostamento Doppler = PRF/2 = 3.2 kHz per il criterio di Nyquist)

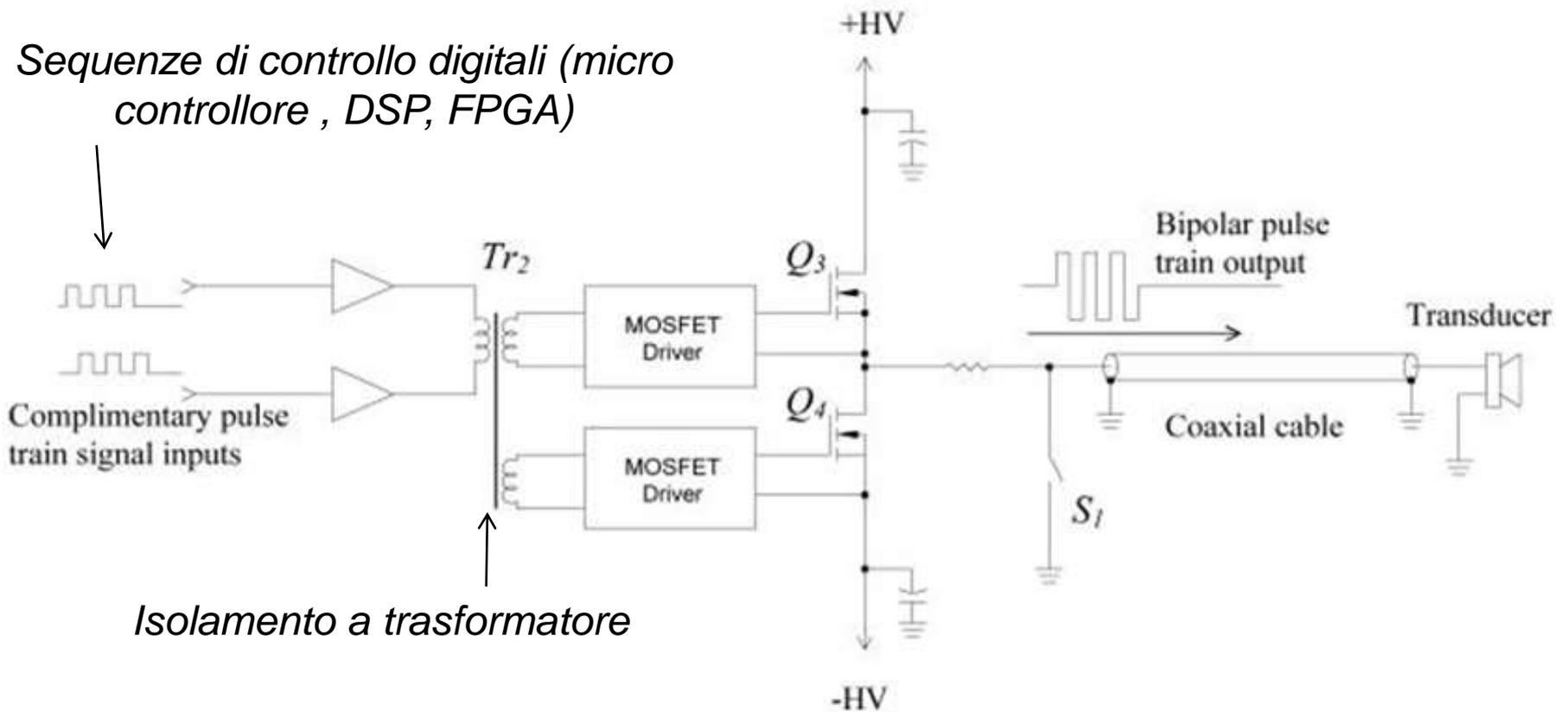
CW Doppler

- Metà elementi della cortina sono usati in trasmissione per emissione CW e metà in ricezione
- Livelli di ampiezza di eccitazione più bassi
- Misura di spostamenti frequenza Doppler elevati ma senza poter determinare la distanza del bersaglio in movimento (misure di variazione di fase di una sinusoide)
- Elevata dinamica per separare il contributo della portante a frequenza fissa riflessa da bersagli statici rispetto al contributo dei bersagli in movimento

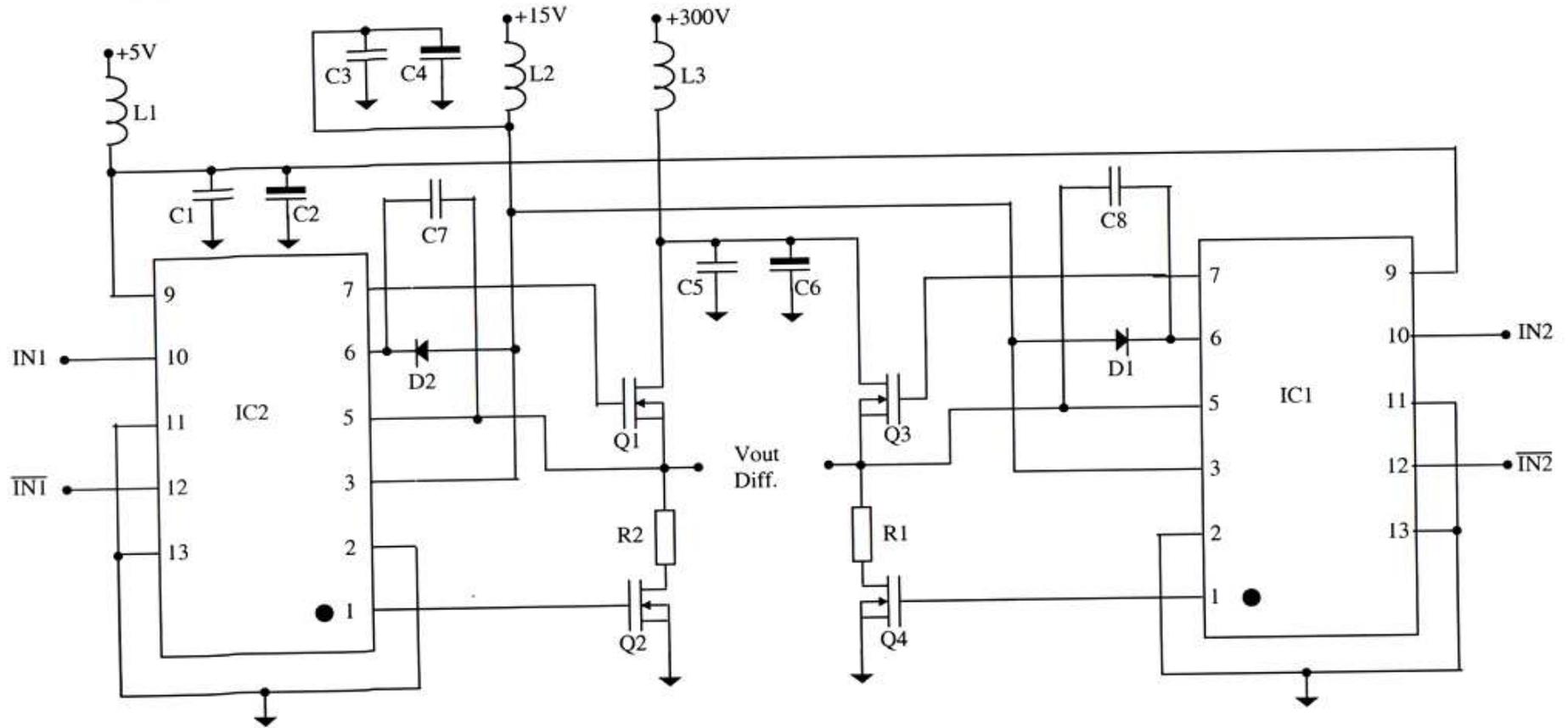
Segnali di eccitazione per i vari modi di funzionamento



Impulsatore bipolare



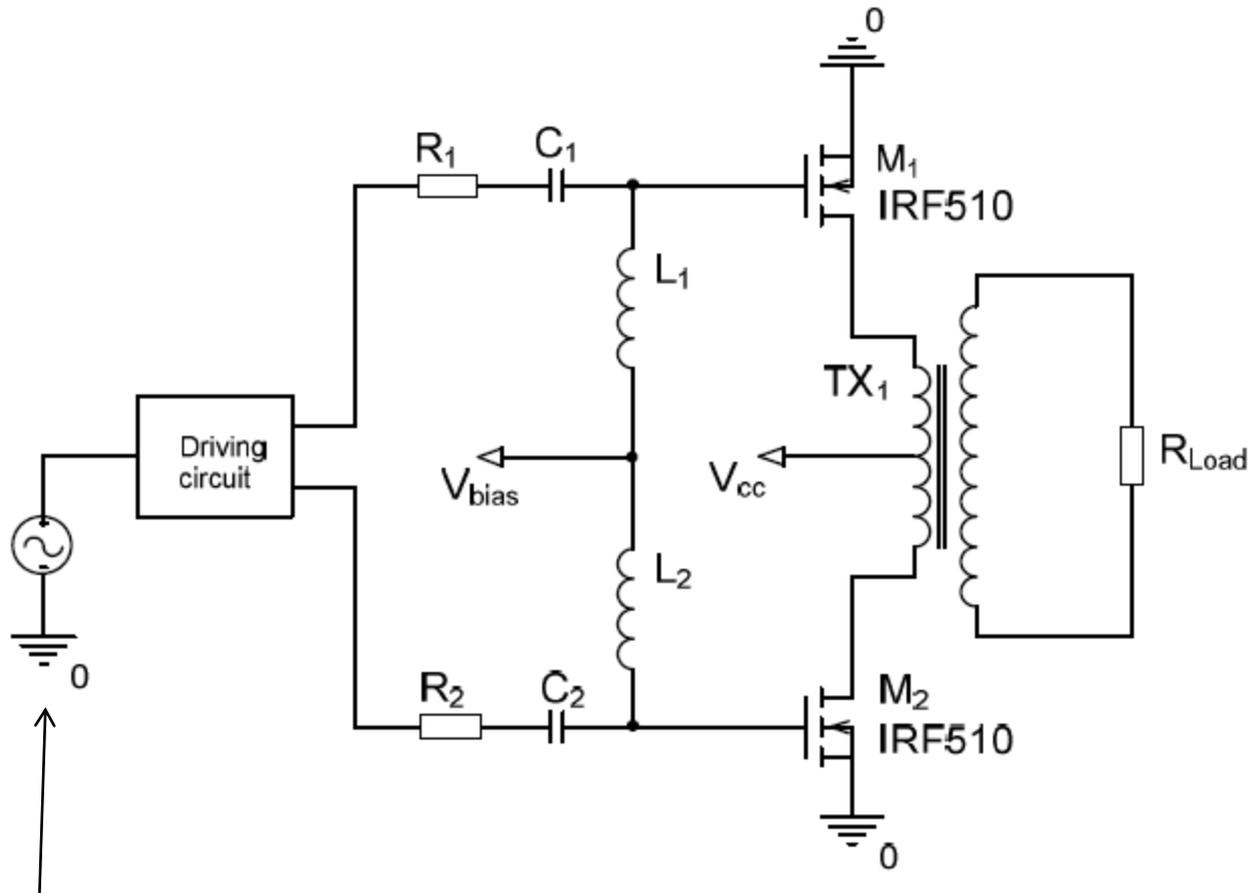
Impulsatore bipolare a ponte



Configurazione a ponte con carico pilotato in modo differenziale.

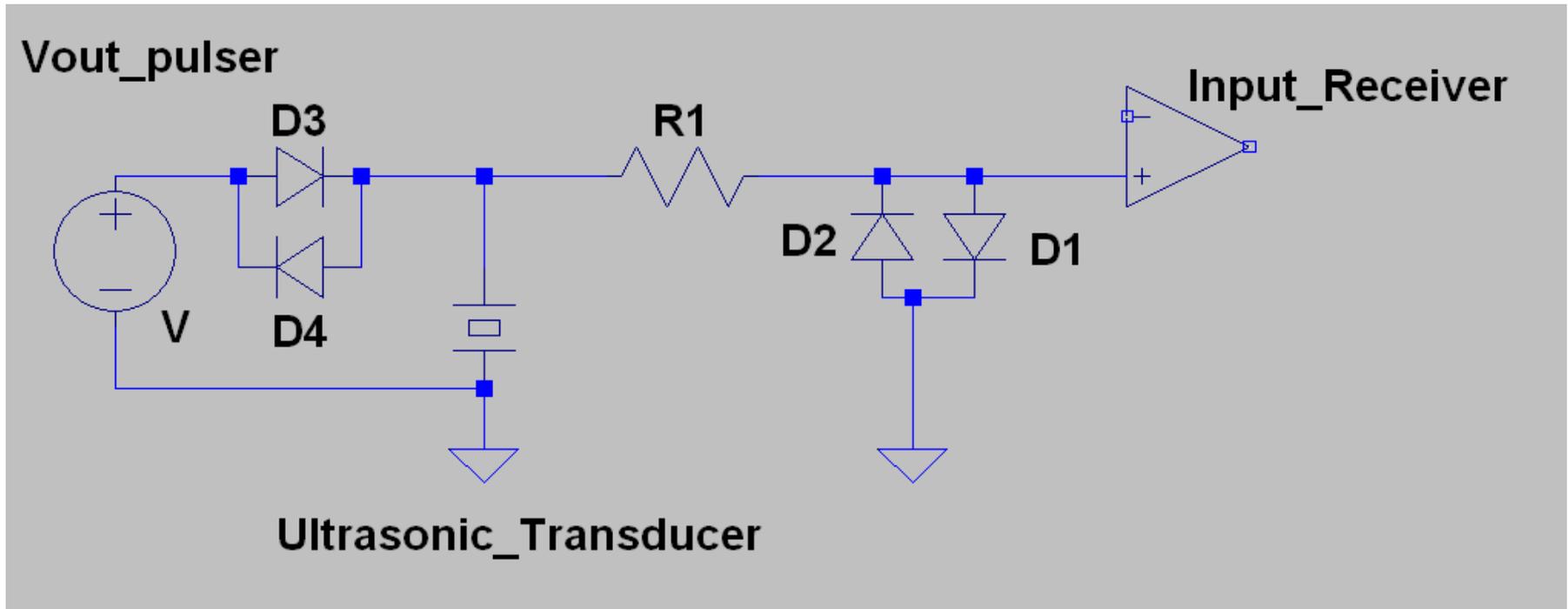
Configurazione amplificatore classe D integrato per $V_{cc} < 100V$

Amplificatore lineare push-pull



Generatore di segnale con impulsi a spettro controllato (es. Burst sinusoidale)

Circuito Duplexer



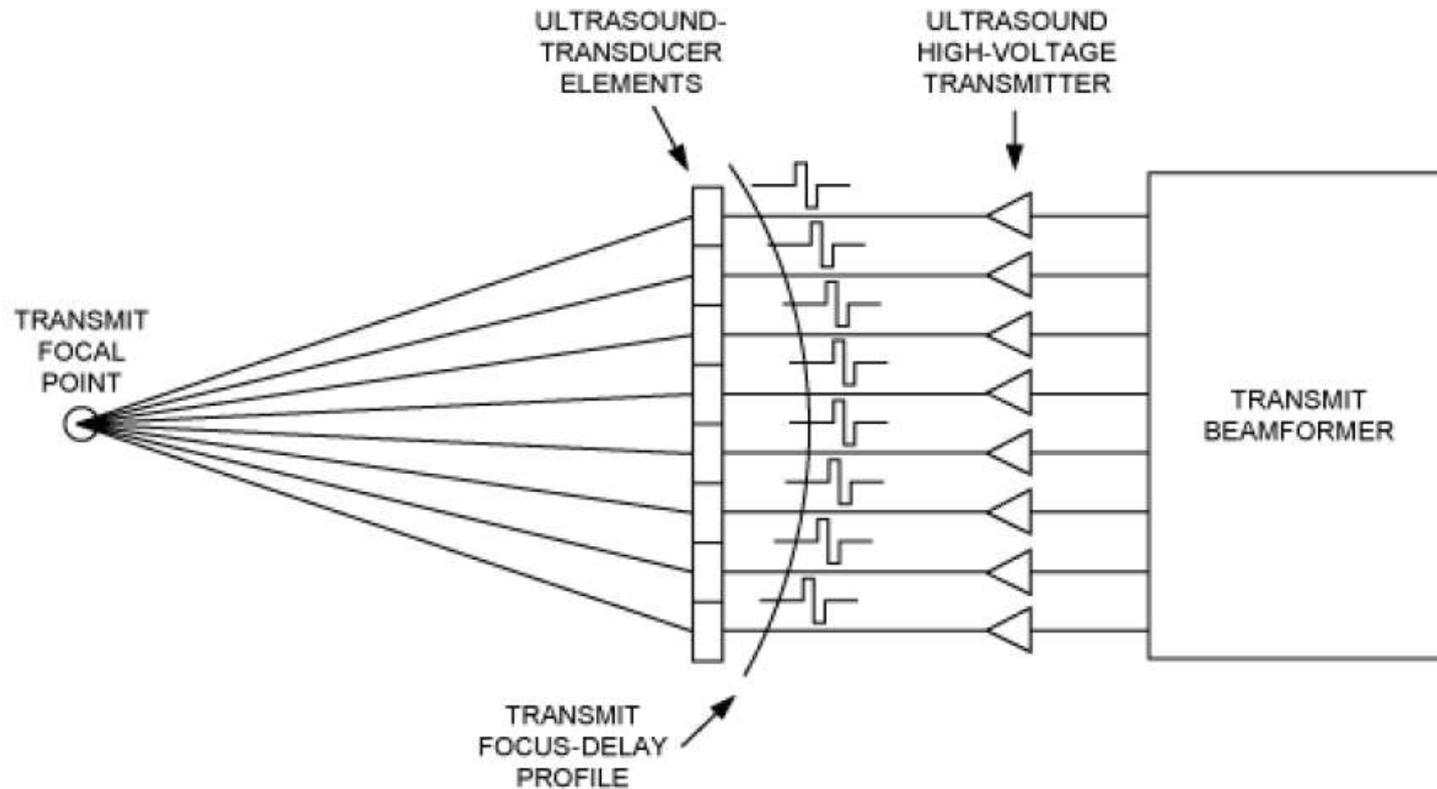
Scopo :

serve alla separazione del circuito di Trasmissione e di Ricezione che sono attivi in intervalli di tempo diversi

Argomenti trattati - parte 2

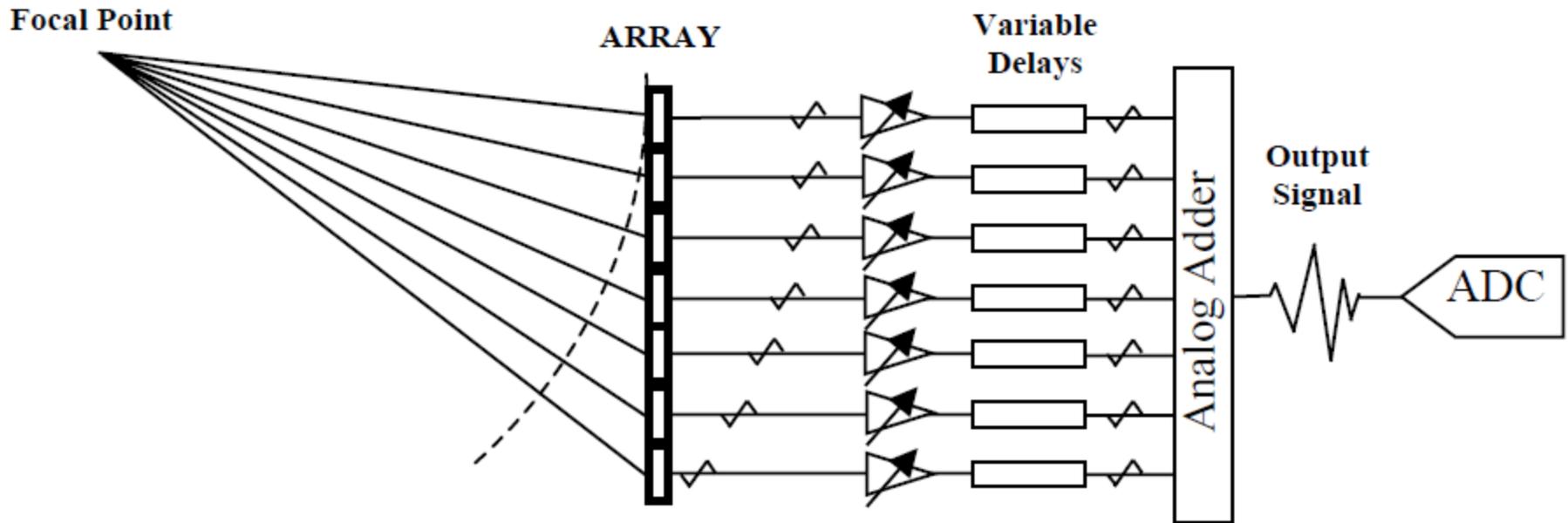
- Soluzioni analogico/digitali per i formatori di fascio con trasduttori a cortina
- Amplificatore a basso rumore LNA ,
adattamento di impedenza programmabile,
calcolo della cifra di rumore della catena
amplificatrice
- Amplificatore a guadagno variabile VGA

Formatore di fascio analogico



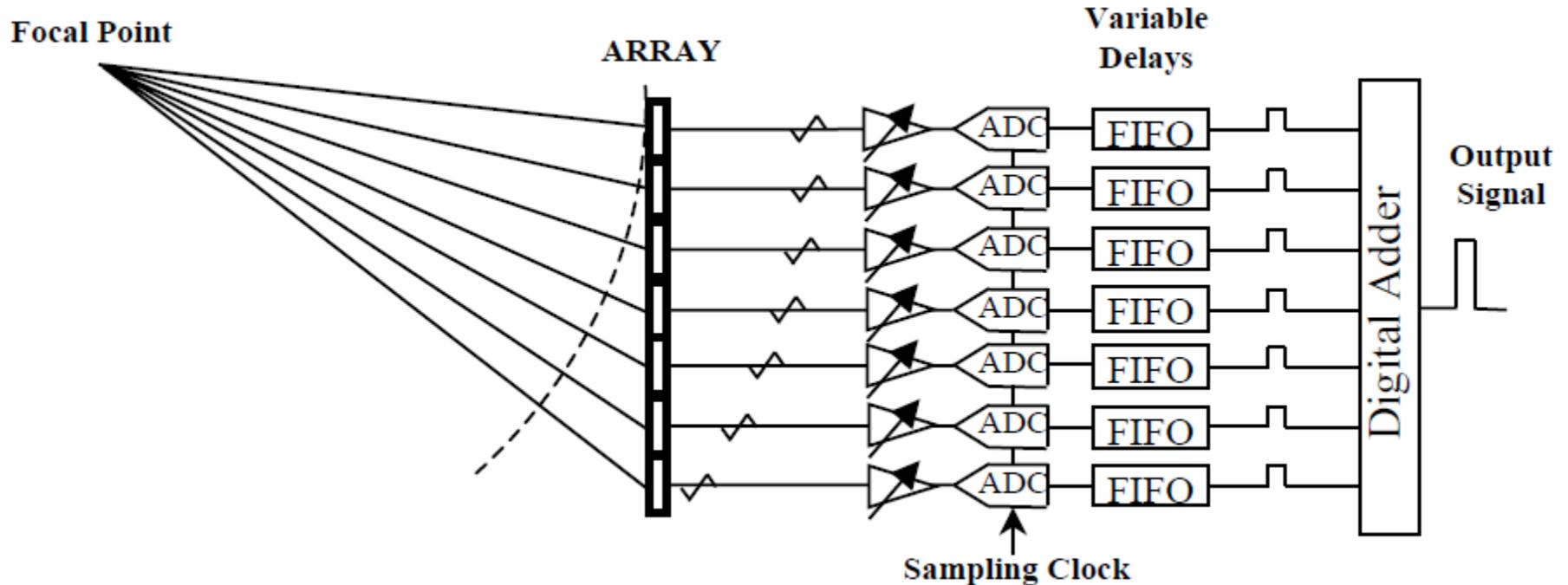
Transmitting mode

Formatore di fascio analogico



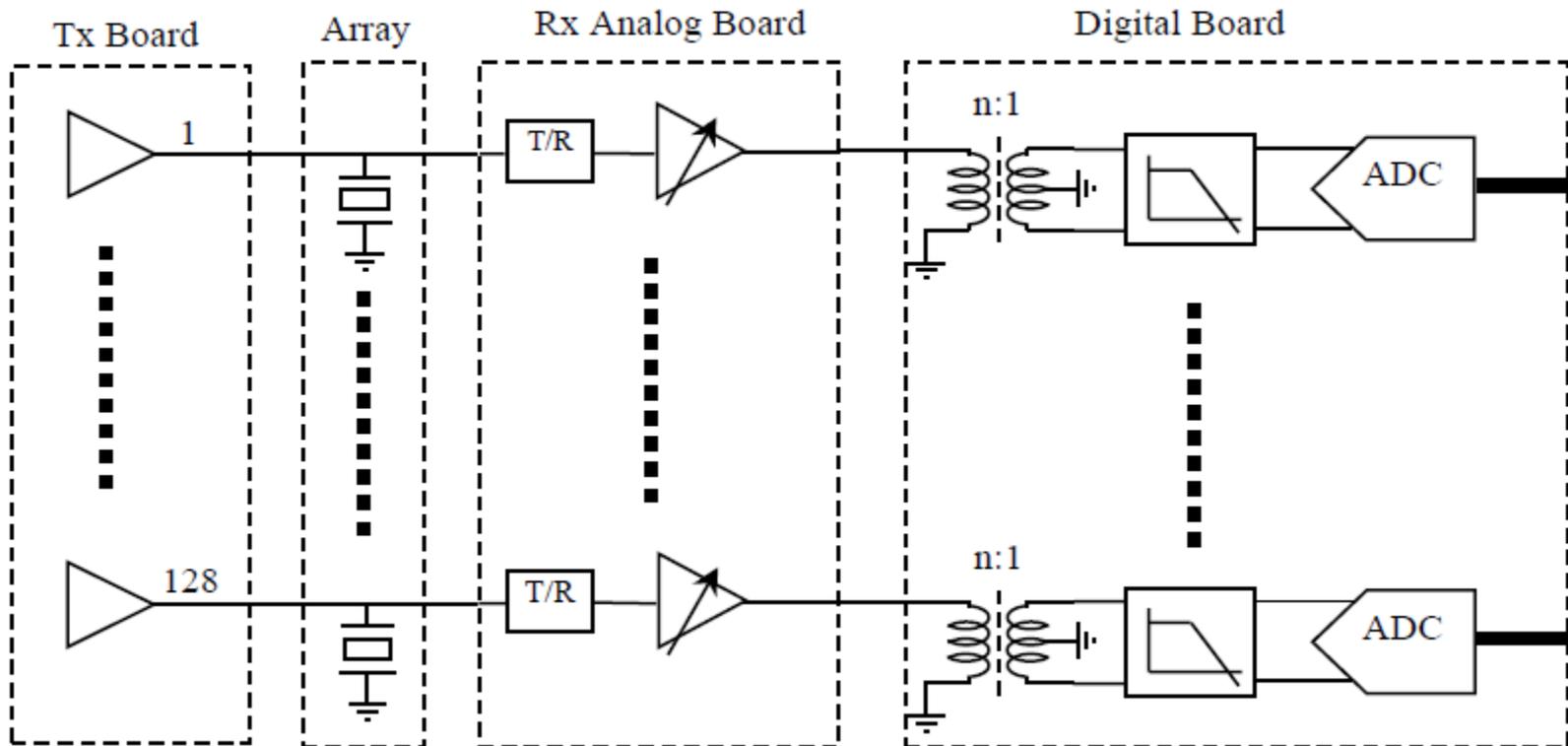
Receiving mode – Analog beam forming

Formatore di fascio digitale

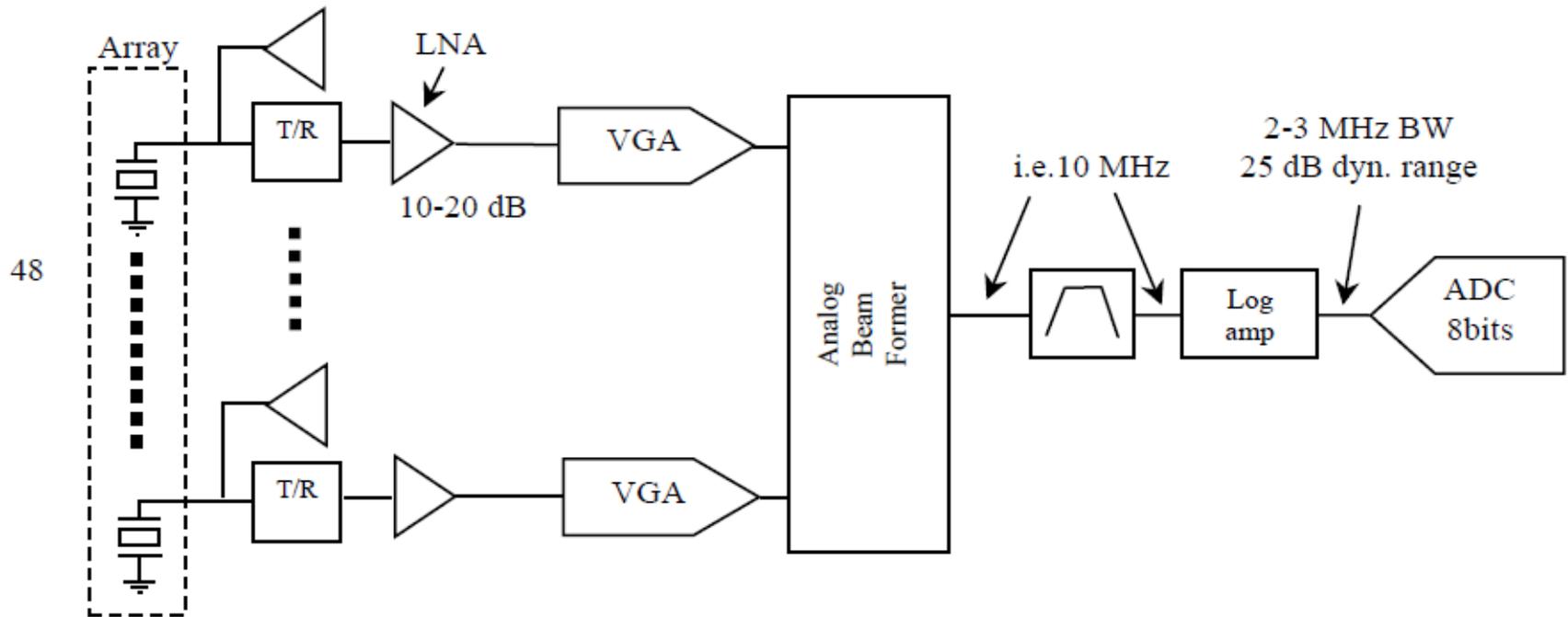


Receiving mode – Digital-beam forming

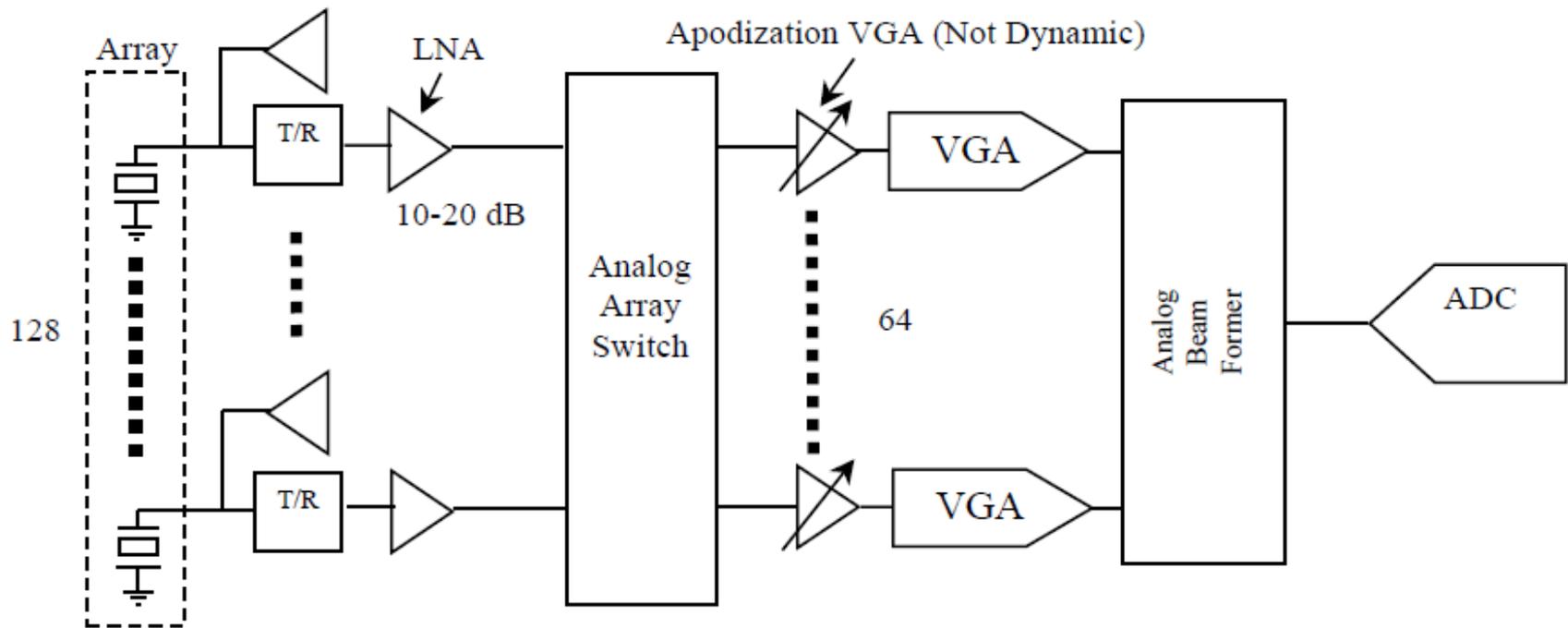
Digital Beam Forming isolated



Analog Beam Former



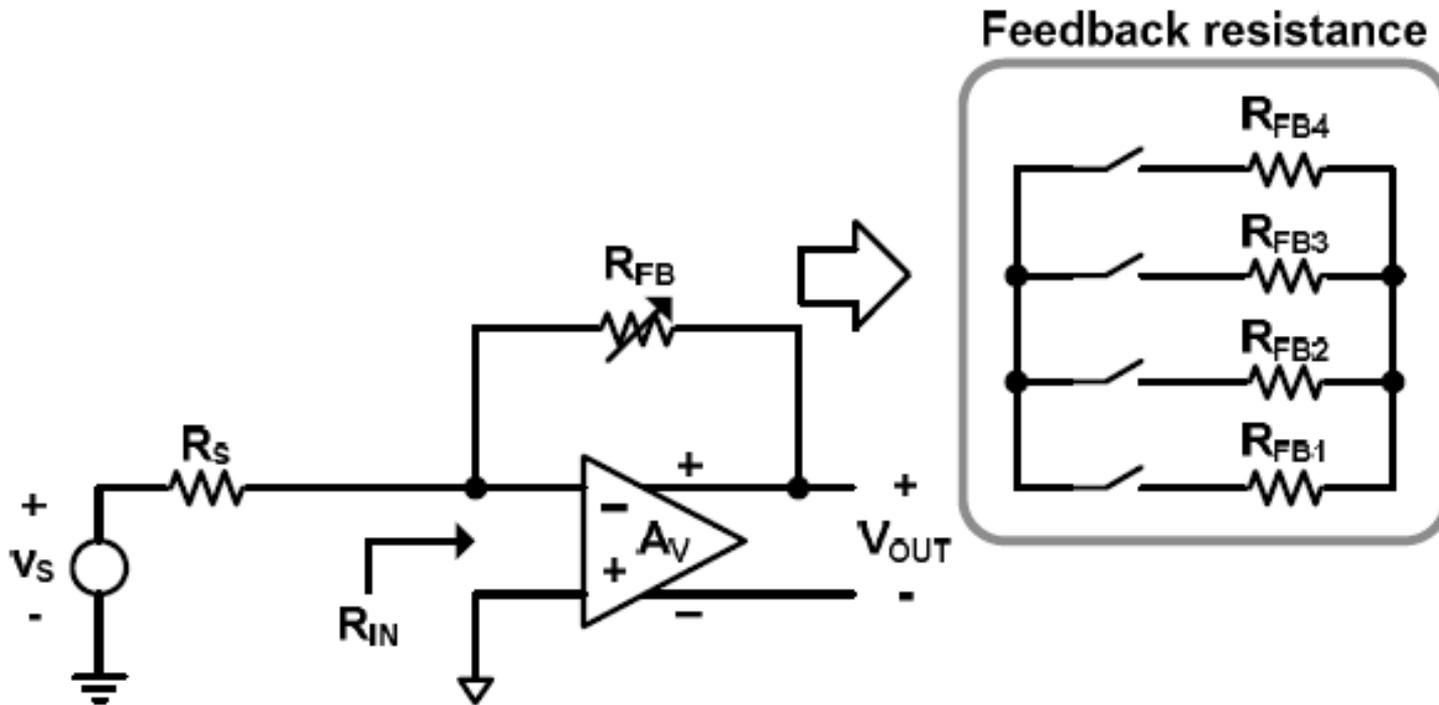
Analog Beam Former with analog multiplexer



LNA (Low Noise Amplifier)– impedenza di ingresso programmabile

- Specifiche importanti per il primo stadio della catena amplificatrice:
 - Larga banda
 - Basso rumore
 - Adattamento (Impedenza ingresso = Impedenza trasduttore)

LNA con uscita differenziale e impedenza di retroazione programmabile



Guadagno e impedenza ingresso

$$\frac{V_{\text{OUT}}}{V_S} = -2 \frac{R_{\text{FB}}/R_S}{1 + \frac{1 + (R_{\text{FB}}/R_S)}{A_V/2}}$$

Se imponiamo $A_V = (R_{\text{FB}}/R_S - 1)$ risulta

$$R_{\text{IN}} \cong \frac{R_{\text{FB}}}{1 + A_V/2}$$

Si richiede elevata accuratezza di A_V sulla banda, di R_{FB} e uniformità tra i canali

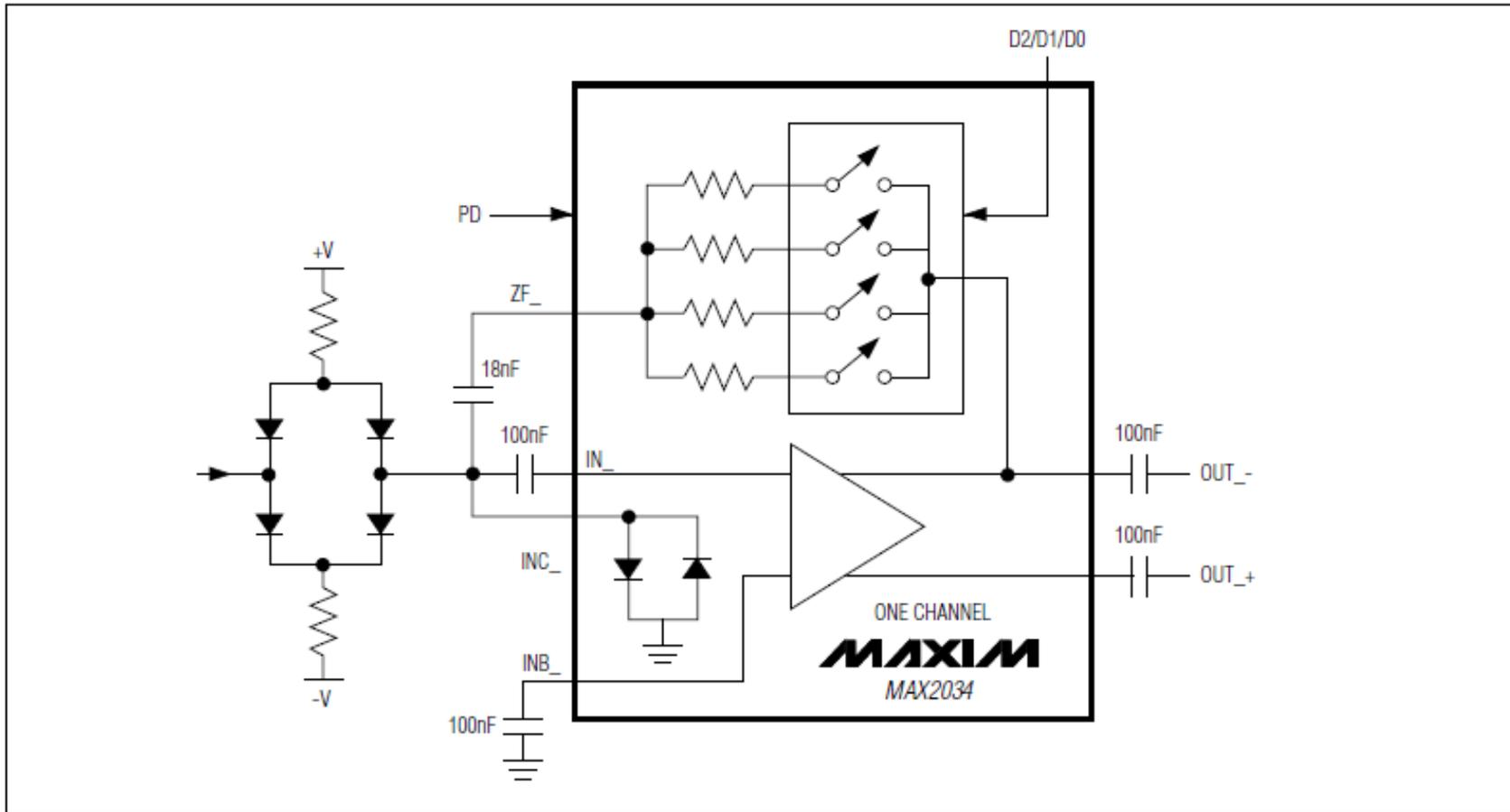
Cifra di Rumore

$$V_{n,INTOAL}^2 = 4kTR_S + \left(\frac{R_S}{R_{FB}}\right) \cdot 4kTR_S + \left(1 + \frac{R_S}{R_{FB}}\right)^2 \cdot V_n^2$$

$$NF = \frac{V_{n,INTOTAL}^2}{4kTR_S} = \left(1 + \frac{R_S}{R_{FB}}\right) + \left(1 + \frac{R_S}{R_{FB}}\right)^2 \frac{V_n^2}{4kTR_S}$$

$V_{n,INTOTAL}$ rumore totale in ingresso all'amplificatore dovuto al rumore termico di R_S , R_{FB} e intrinseco V_n
NF (cifra di rumore) si esprime in dB

Configurazione tipica singolo canale



Esempio: Calcolo Cifra di Rumore

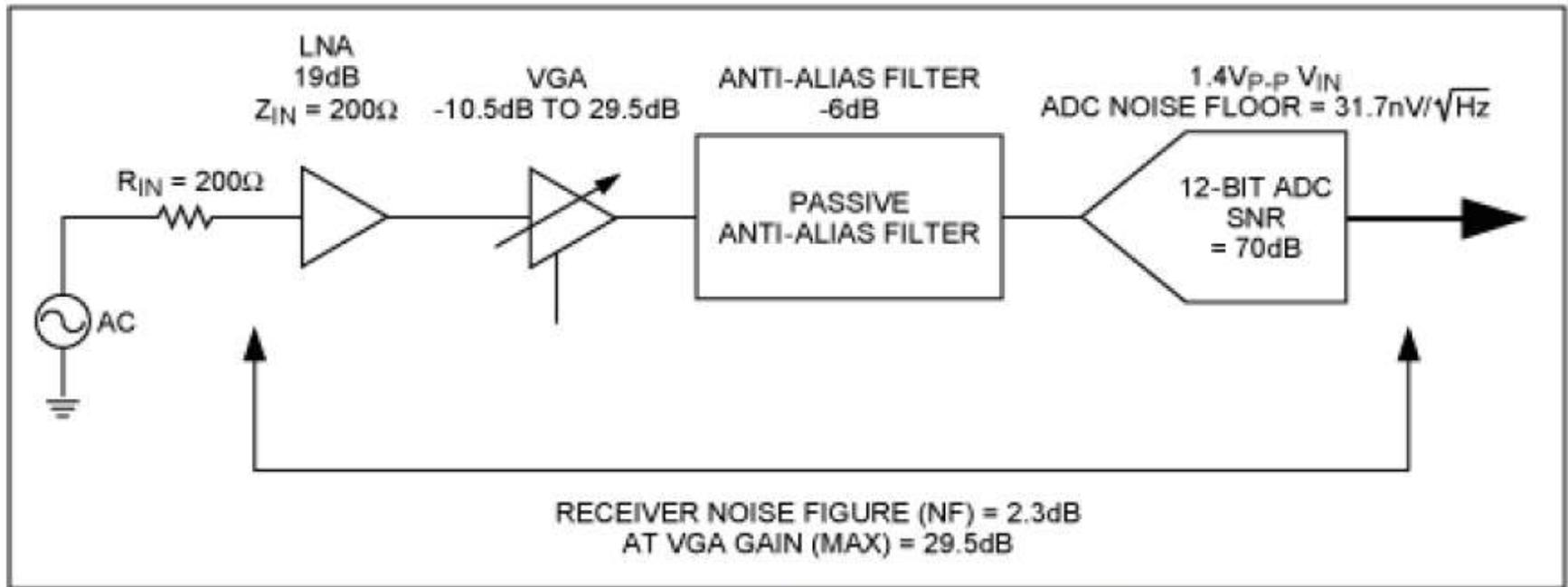
Si prende come riferimento il dispositivo MAX2034 di MAXIM.

$$A_v = 9, R_s = 50 \text{ Ohm}, V_n = 0.18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Dalle precedenti relazioni si ottiene $R_{FB} = 275 \text{ Ohm}$

Il fattore di rumore $F=2.45$ e la cifra di rumore $NF=3.9\text{dB}$ mentre il costruttore dichiara 4.1 dB

Cifra di rumore catena amplificatrice



Calcolo della cifra di rumore della catena amplificatrice con VGA e ADC

Guadagno totale della catena amplificatrice con VGA impostata **al max guadagno**

$$A_{V_{TOT(dB)}} = 19 \text{ (LNA)} + \mathbf{29.5} \text{ (VGA)} - 6 \text{ (AAF)} = 42.5 \text{ dB}$$

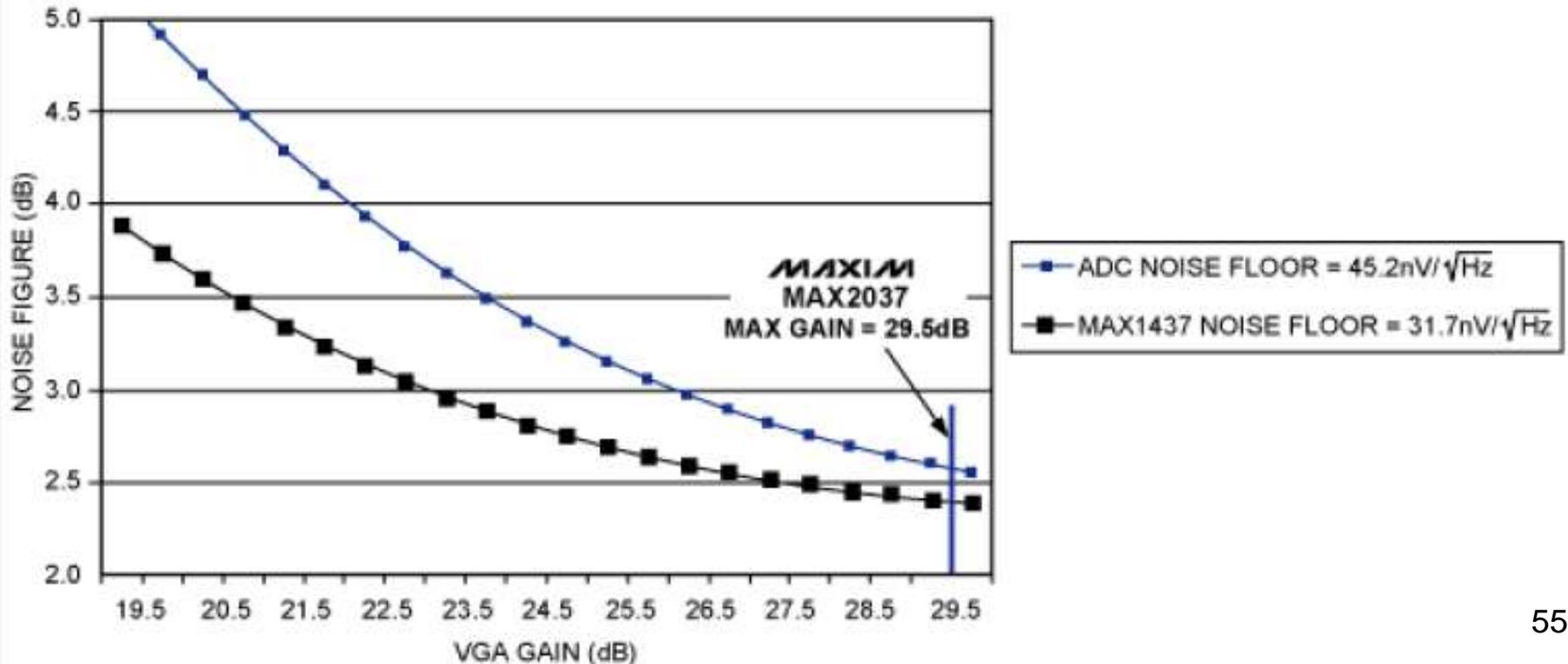
$$\text{Rumore ADC 12 bit MAX1437} = 31.7 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$$

Rumore equivalente in ingresso ADC risulta attenuato di 42.5 dB , ovvero uguale a 0.23 nV / $\sqrt{\text{Hz}}$

Il rumore equivalente per LNA è 0.18 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, quindi comparabile con quello dell'ADC.

Effetti della variazione di guadagno sulla cifra di rumore: confronto fra due ADC con diversi valori di rumore

RECEIVER NF vs.VGA GAIN FOR DIFFERENT ADC NOISE FLOORS
(6dB ANTI-ALIAS FILTER ATTENUATION, 19dB LNA GAIN)



Testi di riferimento

“Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out”,
2nd Edition, Author: Thomas Szabo

"Acoustic Waves: Devices, Imaging, and
Analog Signal Processing“, Gordon S. Kino,
Publisher: Prentice Hall, edition 1987

Ultrasound System,

http://www.ti.com/solution/ultrasound_system

MAXIM data sheets www.maxim-ic.com