

# Es05B: Circuiti lineari con Amplificatori Operazionali

Gruppo 1G.BN

Massimo Bilancioni, Alessandro Foligno, Giuseppe Zanichelli

8 novembre 2018

## Scopo dell' esperienza

Misurare le caratteristiche di circuiti lineari realizzati con un op-amp TL081 alimentati tra +15 V e -15 V.

## 1 Amplificatore invertente

Si vuole realizzare un amplificatore invertente con un' impedenza di ingresso superiore a 1 k $\Omega$  e con un amplificazione a centro banda di 10.

### 1.a Scelta dei componenti

Si monta il circuito secondo lo schema mostrato in figura, utilizzando la barra di distribuzione verde per la tensione negativa, quella rosso per la tensione positiva, e quella nera per la massa.

*[Indicare i criteri di scelta delle resistenze ed i valori desiderati]*

Le resistenze selezionate hanno i seguenti valori, misurati con il multimetro digitale, con il corrispondente valore atteso del guadagno in tensione dell' amplificatore.

$$R_1 = (1.466 \pm 0.012) \text{ k}\Omega, \quad R_2 = (15.24 \pm 0.12) \text{ k}\Omega, \quad A_{exp} = (-10.39 \pm 0.11)$$

### 1.b Montaggio circuito

Il circuito è stato montato nella basetta come riportato in figura.

### 1.c Linearità e misura del guadagno

Si fissa la frequenza del segnale ad  $f_{in} = (2.597 \pm 0.011) \text{ kHz}$  e si invia all' ingresso dell' amplificatore. L'uscita dell' amplificatore è mostrata qualitativamente in Fig. 2 per due differenti ampiezze di  $V_{in}$  (circa 1.26 Vpp e 7.20 Vpp). Nel primo caso l' OpAmp si comporta in modo lineare mentre nel secondo caso si osserva clipping. Il datasheet riporta uno Slew rate di  $13 \text{ V}/\mu\text{s}$  che è quindi trascurabile a questa frequenza .

Variando l' ampiezza di  $V_{in}$  si misura  $V_{out}$  ed il relativo guadagno  $A_V = V_{out}/V_{in}$  riportando i dati ottenuti in tabella 1 e mostrandone un grafico in Fig. 3. Il fit è stato ottenuto mediante media pesata dei valori del guadagno; si può osservare come, alzando l'ampiezza, il guadagno diminuisca impercettibilmente. Trovandosi il tutto dentro una barra d'errore, non è considerabile un effetto significativo. L'incertezza sul guadagno è stato ottenuta sommando in quadratura le incertezze su  $V_{in}$  e  $V_{out}$ , dato che queste, essendo state misurate su canali diversi, si assumono scorrelate (anche l'incertezza sul digit è scorrelata).

Gli ultimi 4 dati, riportati in tabella 1.c sono stati presi per verificare il clipping, e quindi non considerati per il fit

Si determina il guadagno mediante fit dei dati ottenuti:

$$A_{best} = 10.258 \pm 0.001 \quad \chi^2/ndof = 0.06$$

Quindi gli errori sono stati sovrastimati. Cambiando la tensione dell'integrato si osserva clipping circa quando la tensione in uscita è pari a quella di alimentazione (in realtà un po' prima).

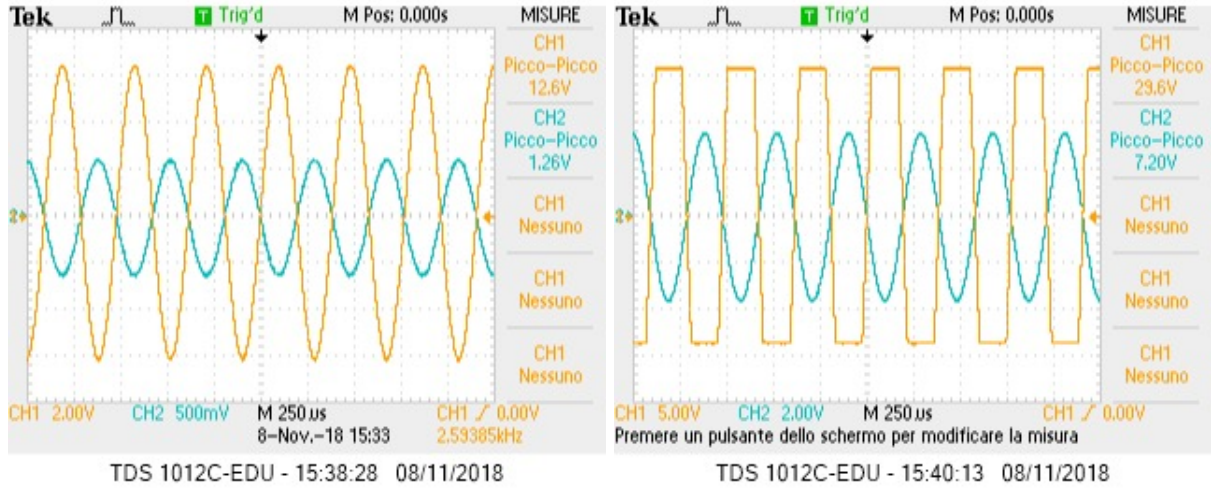


Figura 1: screenshot dei segnali con e senza clipping

Figura 2: Ingresso (in alto) ed uscita (in basso) di un amplificatore invertente con OpAmp, in zona lineare (a sinistra) e non (a destra)

Tabella 1:  $V_{out}$  in funzione di  $V_{in}$  e relativo rapporto.

$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (V)	$A_V$
$0.50 \pm 0.01$	$5.12 \pm 0.1$	$10.3 \pm 0.4$
$0.71 \pm 0.02$	$7.4 \pm 0.2$	$10.4 \pm 0.4$
$0.90 \pm 0.03$	$9.4 \pm 0.3$	$10.4 \pm 0.4$
$1.2 \pm 0.03$	$12.4 \pm 0.3$	$10.3 \pm 0.4$
$1.46 \pm 0.04$	$15.1 \pm 0.4$	$10.3 \pm 0.4$
$1.58 \pm 0.05$	$16.3 \pm 0.5$	$10.3 \pm 0.4$
$1.82 \pm 0.06$	$18.5 \pm 0.6$	$10.2 \pm 0.4$
$1.98 \pm 0.06$	$20.2 \pm 0.6$	$10.2 \pm 0.4$
$2.18 \pm 0.06$	$22.2 \pm 0.6$	$10.2 \pm 0.4$
$2.46 \pm 0.07$	$24.8 \pm 0.7$	$10.1 \pm 0.4$
$2.68 \pm 0.08$	$27.2 \pm 0.8$	$10.1 \pm 0.4$

## 2 Risposta in frequenza e *slew rate*

### 2.a Risposta in frequenza del circuito

Non siamo riusciti a vedere la frequenza di taglio inferiore, che tuttavia deve essere  $\sim 10\text{Hz}$  visto che per questa frequenza non si ha una sensibile diminuzione del guadagno.

Per la frequenza di taglio superiore abbiamo campionato il guadagno per frequenze tra  $1\text{kHz}$  e  $1\text{MHz}$ . Abbiamo abbassato  $V_{in}$  per alte frequenze per evitare possibili Slew Rate.

La frequenza di taglio è stata ricavata come l'intersezione delle due rette fittate rispettivamente a bassa e ad alta frequenza. (Figura 4)

$$f_H = (167.7 \pm \quad) \text{ kHz}$$

### 2.b Misura dello *slew-rate*

Si misura direttamente lo *slew-rate* dell'op-amp inviando in ingresso un' onda quadra di frequenza intorno ai  $\sim 0.9 \text{ kHz}$  e di ampiezza  $2.08 \text{ V}$ . Si ottiene:

$$SR_{\text{misurato}} = (12.5 \pm 0.5) \text{ V}/\mu\text{s} \quad \text{valore tipico (13) V}/\mu\text{s}$$

$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (V)
$2.96 \pm 0.09$	$28.8 \pm 0.8$
$3.04 \pm 0.09$	$29.3 \pm 0.8$
$3.20 \pm 0.09$	$29.4 \pm 0.9$
$3.25 \pm 0.1$	$29.5 \pm 0.9$

Tabella 2: dati del segnale tagliato (clipping)

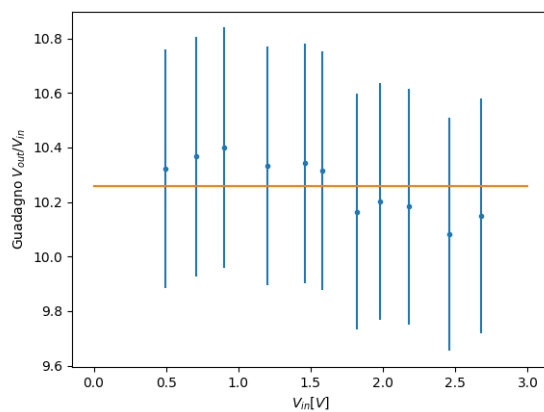


Figura 3: Linearità dell' amplificatore invertente

iiiiiii HEAD Abbiamo misurato nel punto a pendenza massima di  $V_{out}$ , che si trova proprio all'inizio dell'onda quadra, subito dopo la pendenza diminuisce di circa  $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$

===== Abbiamo misurato la pendenza massima del segnale  $V_{out}$ , che si trova proprio in corrispondenza dell' inizio dell'onda quadra, subito dopo la pendenza diminuisce di circa  $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$

Tabella 3: Guadagno dell' amplificatore invertente in funzione della frequenza.

$f_{in}$ (kHz)	$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (V)	$A$ (dB)
$0.753 \pm 0.015$	$1.02 \pm 0.03$	$10.4 \pm 0.3$	$20.2 \pm 0.26$
$1.76 \pm 0.04$	$1.03 \pm 0.03$	$10.5 \pm 0.3$	$20.2 \pm 0.26$
$2.90 \pm 0.06$	$1.03 \pm 0.03$	$10.5 \pm 0.3$	$20.2 \pm 0.26$
$6.22 \pm 0.12$	$1.05 \pm 0.03$	$10.7 \pm 0.3$	$20.2 \pm 0.26$
$12.2 \pm 0.2$	$1.06 \pm 0.03$	$10.7 \pm 0.3$	$20.1 \pm 0.26$
$22.5 \pm 0.4$	$1.05 \pm 0.03$	$10.6 \pm 0.3$	$20.1 \pm 0.26$
$44.9 \pm 0.9$	$1.05 \pm 0.03$	$10.5 \pm 0.3$	$20.0 \pm 0.26$
$86.7 \pm 1.7$	$1.06 \pm 0.03$	$9.92 \pm 0.3$	$19.4 \pm 0.26$
$166 \pm 3$	$1.06 \pm 0.03$	$8.48 \pm 0.3$	$18.1 \pm 0.26$
$212 \pm 4$	$0.688 \pm 0.02$	$4.96 \pm 0.15$	$17.2 \pm 0.26$
$251 \pm 5$	$0.680 \pm 0.02$	$4.44 \pm 0.14$	$16.3 \pm 0.26$
$350 \pm 7$	$0.776 \pm 0.02$	$4.02 \pm 0.13$	$14.3 \pm 0.26$
$435 \pm 9$	$0.688 \pm 0.02$	$3.00 \pm 0.09$	$12.8 \pm 0.26$
$555 \pm 10$	$0.696 \pm 0.02$	$2.44 \pm 0.08$	$10.9 \pm 0.26$
$729 \pm 14$	$0.784 \pm 0.02$	$2.22 \pm 0.07$	$9.04 \pm 0.26$
$1220 \pm 24$	$0.800 \pm 0.03$	$1.38 \pm 0.05$	$4.74 \pm 0.26$

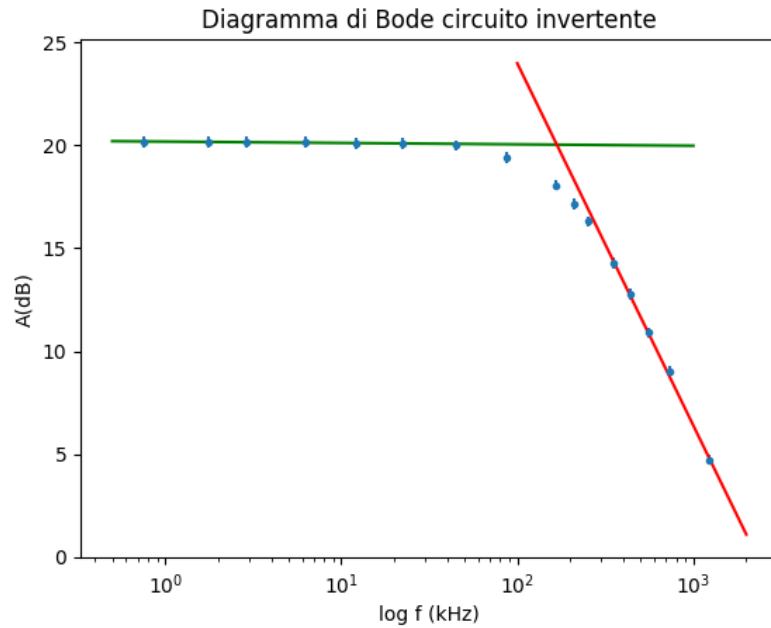


Figura 4: Plot di Bode in ampiezza per l' amplificatore invertente.

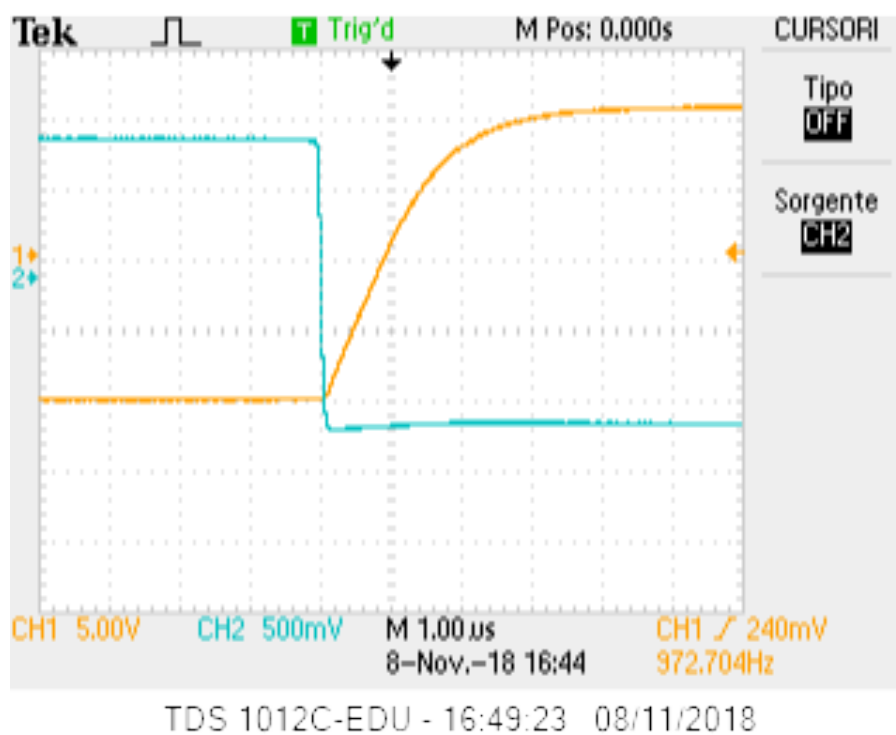


Figura 5: Segnale onda quadra (azzurro) e  $V_{in}$  (arancio)

### 3 Circuito integratore

Si monta il circuito integratore con i seguenti valori dei componenti indicati:

$$R_1 = (0.997 \pm 0.008) \text{ k}\Omega, \quad R_2 = (9.92 \pm 0.08) \text{ k}\Omega, \quad C = (50.4 \pm 2.3) \text{ nF}$$

#### 3.a Risposta in frequenza

Si invia un' onda sinusoidale e si misura la risposta in frequenza dell' amplificazione e della fase riportandoli nella tabella 4 e in un diagramma di Bode in Fig. 6.

$$V_{in} = ( \quad \pm \quad ) \text{ V}$$

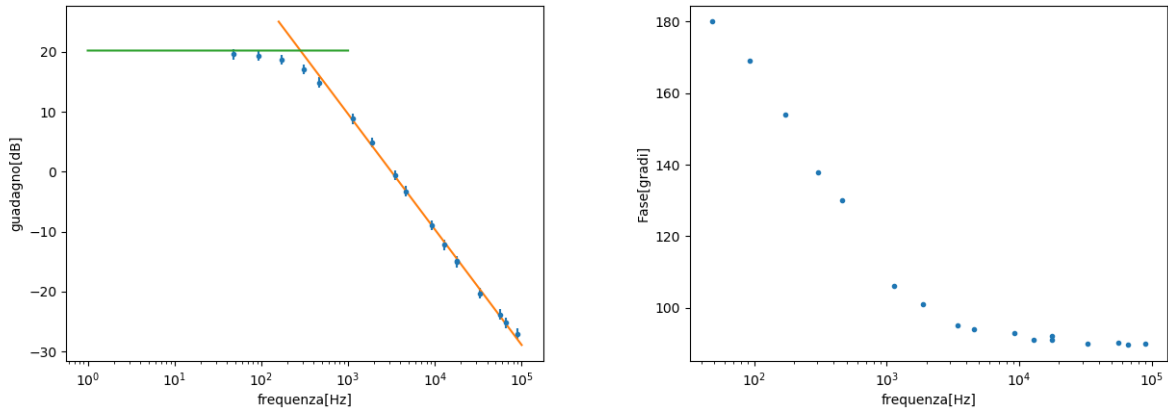


Figura 6: Plot di Bode in ampiezza (a sinistra) e fase (a destra) per il circuito integratore.

Tabella 4: Guadagno e fase dell' integratore invertente in funzione della frequenza.

$f_{in}$ (kHz)	$V_{out}$ (V)	$A$ (dB)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$\phi$
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$

Si ricava una stima delle caratteristiche principali dell'andamento (guadagno a bassa frequenza, frequenza di taglio, e pendenza ad alta frequenza) e si confrontano con quanto atteso. Non si effettua la stima degli errori, trattandosi di misure qualitative. La frequenza di taglio viene stimata come al solito con l'intesezione delle due rette; una delle due è stata determinata con un fit lineare, mentre per disegnare la retta del guadagno massimo si è usato il valore misurato in precedenza di  $A \approx 10.26$ . Il valore della frequenza di taglio così ottenuto è  $f_t \approx 0.32 \text{ kHz}$ , in accordo con la frequenza di taglio che ci si aspetterebbe  $f_t = \frac{1}{2\pi R_2 C} = 0.32 \pm 0.01 \text{ kHz}$ . Si può trascurare del tutto la frequenza di taglio dell'opamp, che è tre decadi più avanti. L'andamento della fase pure è quello che ci si aspetta, dato che per alte frequenze lo sfasamento deve essere di  $90^\circ$  (domina l'impedenza del condensatore che sfasa di j), mentre per basse frequenze è quella solita di  $180^\circ$  di un amplificatore invertente. L'andamento teorico può essere descritto da una formula del tipo:

$$\Delta\phi = 180^\circ - \arctan(f/f_t)$$

. usando il valore di  $f_t$  stimato prima si può notare un discreto accordo con i dati, come riportato in figura 7

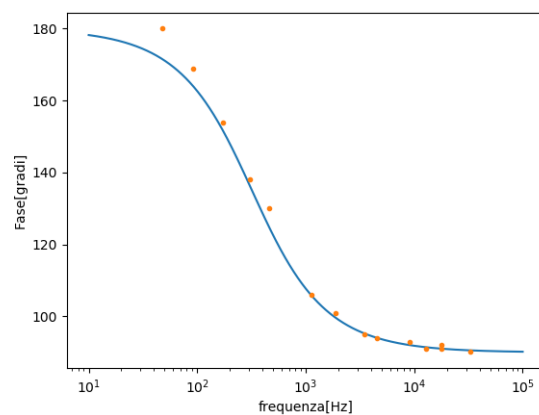


Figura 7: andamento dei punti sperimentali e modello per la fase in funzione della frequenza.

$A_M = ( \quad ) \text{ dB}$	atteso : $( \quad ) \text{ dB}$
$f_H = ( \quad ) \text{ Hz}$	atteso : $( \quad ) \text{ Hz}$
$dA_V/df = ( \quad ) \text{ dB/decade}$	atteso : $( \quad ) \text{ dB/decade}$

## Risposta ad un' onda quadra

Si invia all' ingresso un' onda quadra di frequenza  $\sim 10.0 \pm 0.7 \text{ kHz}$  e ampiezza  $\sim 1.40 \pm 0.05 \text{ V}$ . Si riporta in Fig. 8 le forme d' onda acquisite all' oscillografo per l' ingresso e l' uscita. Come atteso per un integratore, l'uscita è costituita da onde triangolari.

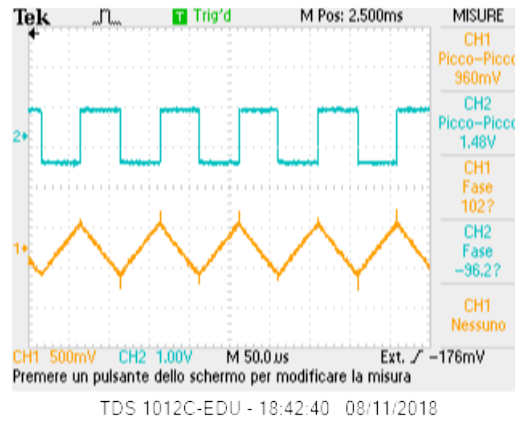


Figura 8: Ingresso (in alto) ed uscita (in basso) del circuito integratore per un' onda quadra.

Si misura l' ampiezza dell' onda in uscita e si confronta il valore atteso.

$$V_{outpp} = (0.66 \pm 0.03) \text{ V}$$

$$\text{atteso : } (0.67 \pm 0.05) \text{ V}$$

Ci si aspetta infatti, per un'onda quadra in ingresso, con un integratore perfetto (trascurando cioè l'effetto di  $R_2$ ), una relazione del tipo:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{4fR_1C}$$



### 3.b Discussione

Si è poi provato a variare la frequenza fino a valori intorno, e sotto, la frequenza di taglio. A questo punto il segnale in uscita risultava distorto rispetto all'onda triangolare. Per frequenze al di sotto la frequenza di taglio, il segnale in uscita è costituito sostanzialmente dalle scariche del condensatore, come riportato ad esempio in Figura 9. Per frequenze ancora al di sotto, come in Figura 10 si osserva un segnale discontinuo in uscita, il che è sorprendente dato che il segnale che si osserva è sostanzialmente proporzionale alla carica sul condensatore, e quindi lo si aspetta continuo. In realtà quello che succede è che, dato che il segnale è molto amplificato, al cambio di polarità dell'onda quadra, il condensatore si scarica su  $R_1$ , anziché su  $R_2$ , e, dato che  $R_1$  è 10 volte più piccola, lo fa con una velocità 10 volte più grande rispetto al solito, il che sembra un processo istantaneo, per la scala dei tempi a cui è impostato l'oscilloscopio, . Finita la scarica su  $R_1$  si osserva quella solita su  $R_2$ .

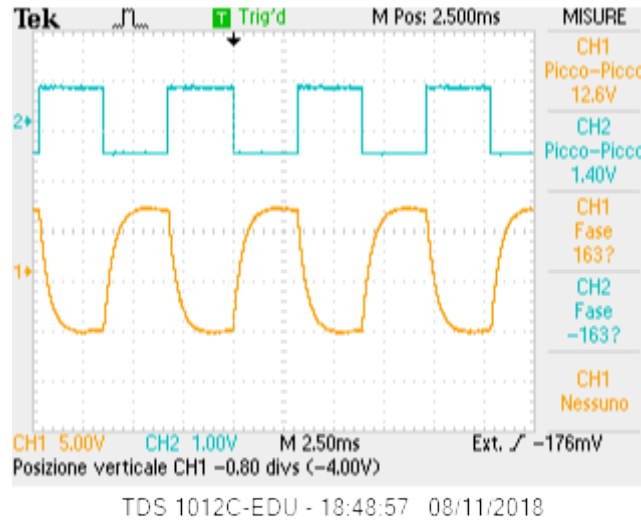


Figura 9: segnale a "pinna di squalo"

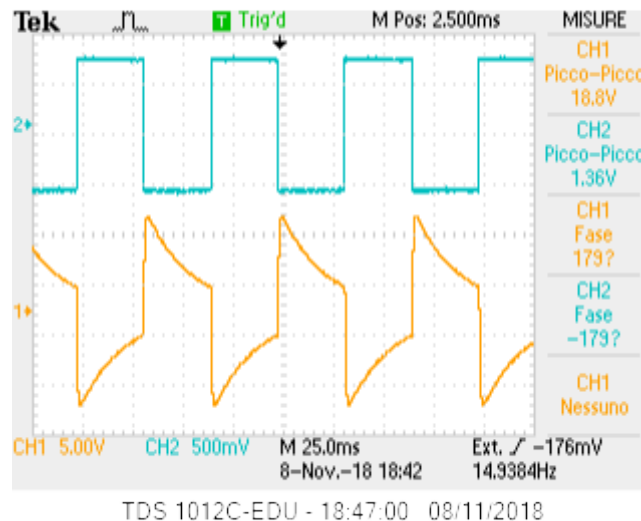


Figura 10: segnale a bassa frequenza