

Es04B: Amplificatore operazionale, circuiti lineari

Gruppo 1G.BM
Gabriele Astorino, Stefano Romboni, Matteo Morresi

11 Novembre 2021

1 Amplificatore invertente

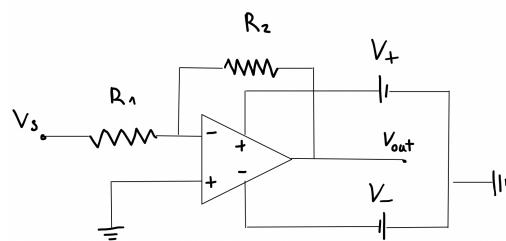
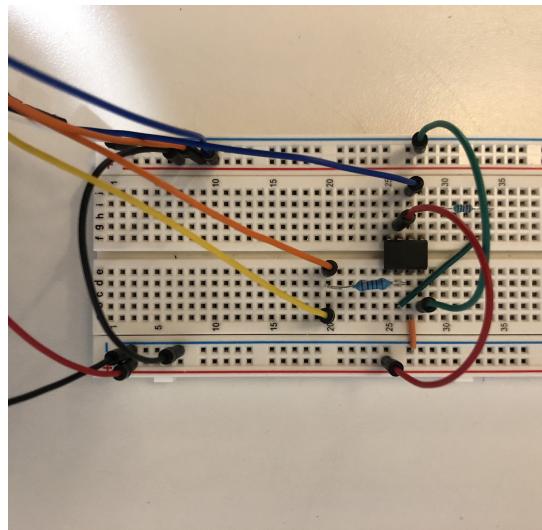


Figura 1: Schema circuitale amplificatore invertente

1.1 Richiami teorici

In questa sezione si riportano delle relazioni utili per la relazione.

Di seguito le espressioni per la retta di carico e la larghezza della zona lineare.

$$V_d = V_+ - V_- \text{, nel nostro caso vale } V_+ = 0 \Rightarrow V_d = -V_-$$

Definiamo un nuovo parametro per il circuito: $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

$$\begin{aligned} V_- &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s = \beta V_{out} + (1 - \beta) V_s \\ V_{out} &= -\frac{1}{\beta} V_d - \frac{1 - \beta}{\beta} V_s \\ Z_{in} &= R_1 + \frac{R_2}{1 + A_d} \simeq R_1 \\ Z_{out} &= R_{out} \| R_2 \frac{A_d}{1 + A_d} \simeq 0 \end{aligned}$$

Vogliamo che V_s sia tale da intercettare la curva caratteristica nella zona lineare. Una volta rispettata questa condizione possiamo trovare il valore dell'amplificazione del circuito, ovvero A_v :

$$\begin{cases} V_{out} = -\frac{1}{\beta} V_d - \frac{1 - \beta}{\beta} V_s \\ V_{out} = A_d V_d \end{cases} \implies A_v \simeq -\frac{R_2}{R_1}$$

1.2 Valori componenti circuitali

In questa sezione si sono costruiti tre circuiti con parametri ed amplificazioni differenti:

- Circuito 1: $R_1 = (999 \pm 8)$ Ω , $R_2 = (5.04 \pm 0.05)$ k Ω ;
- Circuito 2: $R_1 = (5.08 \pm 0.06)$ k Ω , $R_2 = (50.6 \pm 0.6)$ k Ω ;
- Circuito 3: $R_1 = (1.984 \pm 0.03)$ k Ω , $R_2 = (15.0 \pm 0.1)$ k Ω .

1.3 Amplificazione per i diversi circuiti

Per tutti i circuiti si sono misurate le ampiezze picco picco dei segnali in ingresso ed in uscita dall'oscilloscopio mediante cursori, associando come incertezza di misura lo 0.5%, poiché gli altri contributi all'incertezza risultano trascurabili.

Circuito 1 Si ha $V_{IN,pp} = (401 \pm 2)$ [mV] e $V_{OUT,pp} = (2.05 \pm 0.01)$ [V]

$$|A_V| = 5.11 \pm 0.04 ; \quad |A_{V,att}| \simeq \frac{R_2}{R_1} = 5.05 \pm 0.05$$

che risultano compatibili tra loro.

Circuito 2 Anche per il secondo circuito sono state misurate le ampiezze picco picco del segnale in ingresso e in uscita:

$$\begin{cases} V_{IN,pp} = 394 \pm 2 \text{ [mV]} \\ V_{OUT,pp} = 3.21 \pm 0.02 \text{ [V]} \end{cases} \implies |A_V| = 9.97 \pm 0.07 \quad |A_{V,att}| \simeq \frac{R_2}{R_1} = 10.0 \pm 0.2$$

Circuito 3 $V_{IN,pp} = (400 \pm 2)$ [mV] e $V_{OUT,pp} = (3.04 \pm 0.02)$ [V]. Guadagno misurato e atteso sono quindi:

$$|A_V| = 7.60 \pm 0.05 \quad |A_{V,att}| \simeq \frac{R_2}{R_1} = 7.5 \pm 0.1$$

1.4 V_{OUT} al variare di V_{IN}

Per il circuito 3 si è quindi misurata l'ampiezza picco picco di V_{OUT} al variare dell'ampiezza di V_{IN} per un segnale sinusoidale di frequenza fissata a 5 kHz. Si sono eseguite con i cursori nove misure per l'amplificatore invertente operante in regime lineare e quattro in regime non lineare. Per quanto riguarda l'incertezza associata sono valide le

V_{IN} [mV]	σV_{IN} [mV]	V_{OUT} [V]	σV_{OUT} [V]
100.7	0.6	0.758	0.004
200	1	1.515	0.007
302	2	2.27	0.01
400	2	3.03	0.02
500	3	3.78	0.02
600	3	4.57	0.02
700	4	5.37	0.03
800	4	6.12	0.03
900	5	6.90	0.03
1000	5	7.35	0.04
1103	6	7.84	0.04
1203	6	7.91	0.04
1402	7	7.94	0.04

Tabella 1: Misure dei valori di ampiezza picco picco di V_{IN} e V_{OUT} per l'amplificatore invertente.

considerazioni fatte al punto 1.3. Riportiamo in Tabella 1 i risultati delle misure.

Si è quindi eseguito un fit dei minimi quadrati con la funzione `curve_fit` di python dei dati acquisiti in regime lineare per misurare il guadagno del circuito. Poichè vale la relazione $V_{OUT} = A_v V_{IN}$ si è impiegato il modello:

$$y(x; A) = Ax$$

Le incertezze ottenute propagando su V_{OUT} le incertezze di V_{IN} tramite il modello non sono trascurabili rispetto alle incertezze di misura di V_{OUT} . Si è allora eseguito il fit calcolando gli errori efficaci sulle y . Si è posto `absolute_sigma` = False perchè le incertezze hanno anche una componente sistematica.

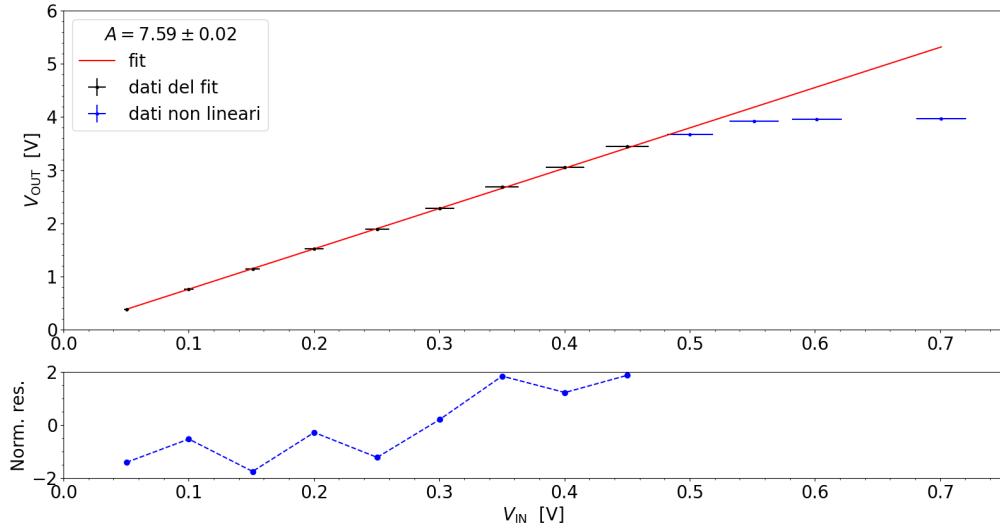


Figura 2: Si sono riportate in blu figura anche le misure effettuate nel regime non lineare, che non sono state utilizzate per il fit

Come risultati del fit si è ottenuto:

$$|A_v| = 7.59 \pm 0.02 \quad \chi^2/ndof = 7.6/8$$

Il guadagno misurato con il fit è quindi compatibile con il guadagno atteso, confermando che l'amplificatore operazionale impiegato approssima bene le caratteristiche di un amplificatore differenziale ideale.

Si nota anche come per valori di V_{IN} circa maggiori di 500 [mV] l'OpAmp sia uscito dalla sua zona lineare: V_{OUT} non supera infatti il valore massimo della tensione di alimentazione pari a 5 [V].

2 Risposta in frequenza e slew rate

2.1 Risposta in frequenza

In questa sezione si vuole studiare la risposta in frequenza degli amplificatori invertenti utilizzando il Network Analyzer. (Si è scelto di utilizzare in ingresso un segnale di ampiezza 100 [mV] e analizzare un range di frequenze tra 100 [Hz] e 5 [MHz].

Per tutti i circuiti la frequenza di taglio è stata misurata tramite il bode-plot del circuito fatto tramite il Network analyzer. Abbiamo scelto di considerare come errore associato l'errore massimo, preso muovendo il cursore nell'intervallo in cui il guadagno fosse di -3 [dB], la cui grandezza dipende da quanti punti sono stati presi durante l'analisi.

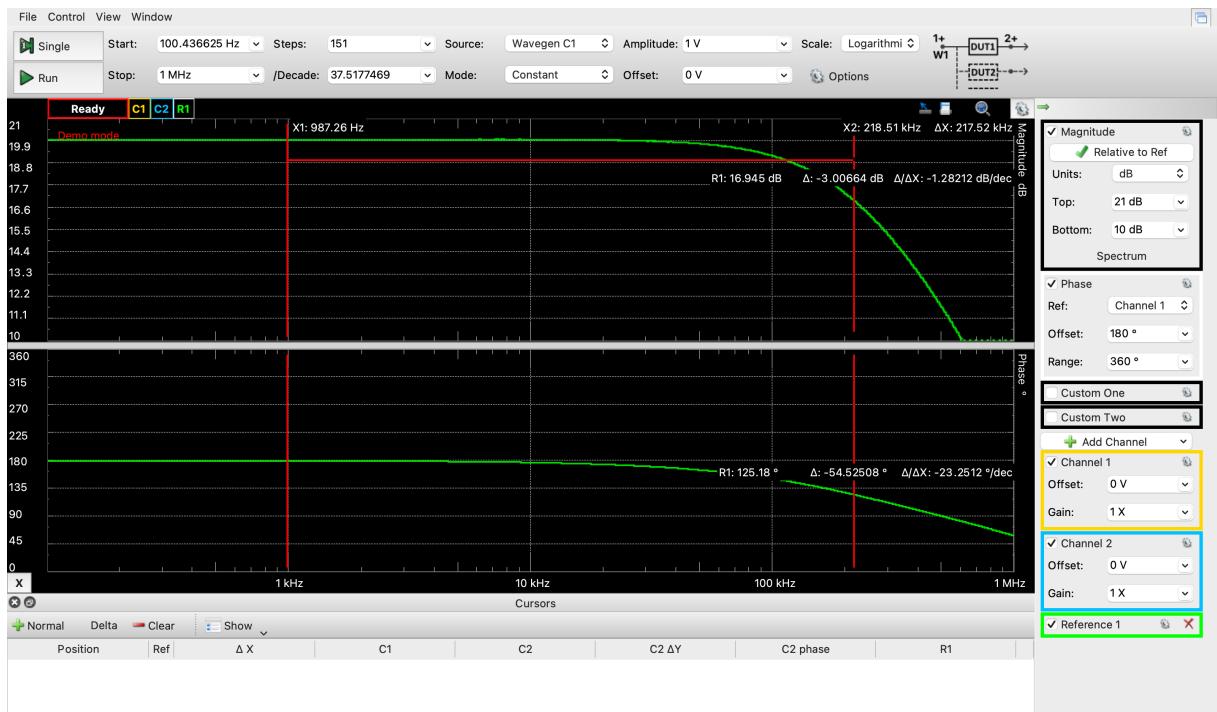


Figura 3: Immagine riferita al circuito 2

Circuito 1 Si stima una frequenza di taglio pari a

$$f_t = 384 \pm 3 \text{ [kHz]} \Rightarrow \text{banda-guadagno: } 1.96 \pm 0.02 \text{ [MHz]}$$

Circuito 2 La frequenza misurata è

$$f_t = 219 \pm 2 \text{ [kHz]} \Rightarrow \text{banda-guadagno: } 2.18 \pm 0.03 \text{ [MHz]}$$

Circuito 3 Per il terzo circuito si è ottenuta una frequenza di taglio pari a

$$f_t = 273 \pm 3 \text{ [kHz]} \Rightarrow \text{banda-guadagno: } 2.07 \pm 0.03 \text{ [MHz].}$$

Da manuale il valore riportato per la banda-guadagno è tipicamente di circa 4 [MHz], dunque nessuna misura eseguita risulta compatibile con quanto atteso. Probabilmente questo è dovuto al fatto che la stima riportata da datasheet, sia stata eseguita con un alimentazione a 18 [V], mentre durante l'esperienza si utilizzata 5 [V].

2.2 Misura dello slew rate

Anche in questa sezione per la misura dello slew rate per tutti i circuiti si è inviato in ingresso un'onda quadra di frequenza 1 [kHz] (settaggio di Wavegen) e successivamente ne è stata aumentata progressivamente l'ampiezza, verificando un aumento della pendenza della retta corrispondente alla discesa (idealemente verticale) del segnale:

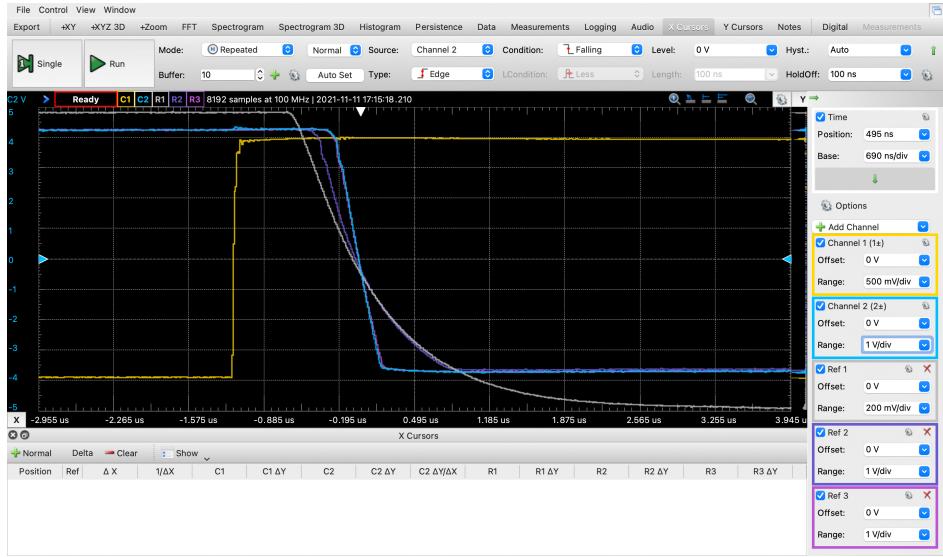


Figura 4: Immagine di esempio del circuito 2

Tramite i cursori si è poi misurata la pendenza utilizzando l'apposita funzione interna al programma Wavegen associando l'errore massimo di variazione della pendenza alla misura finale:

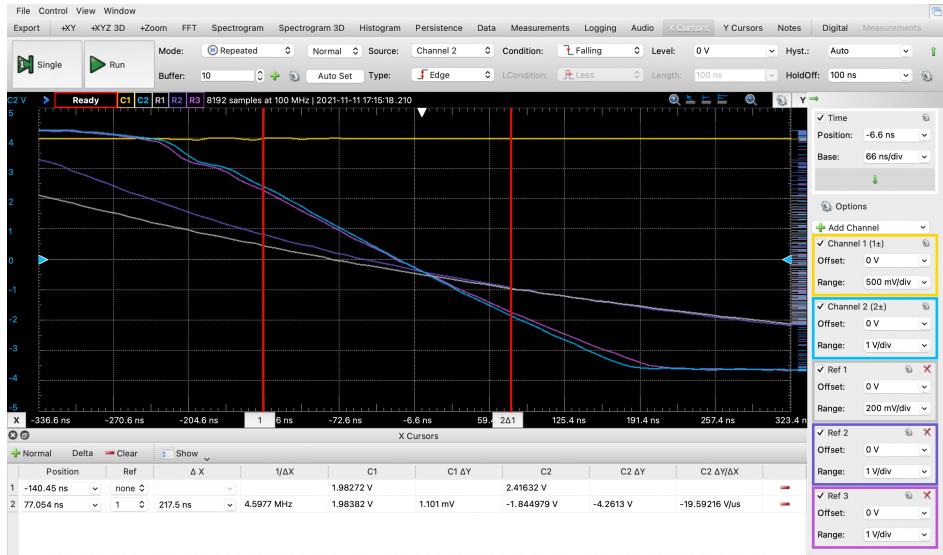


Figura 5: Immagine di esempio del circuito 2

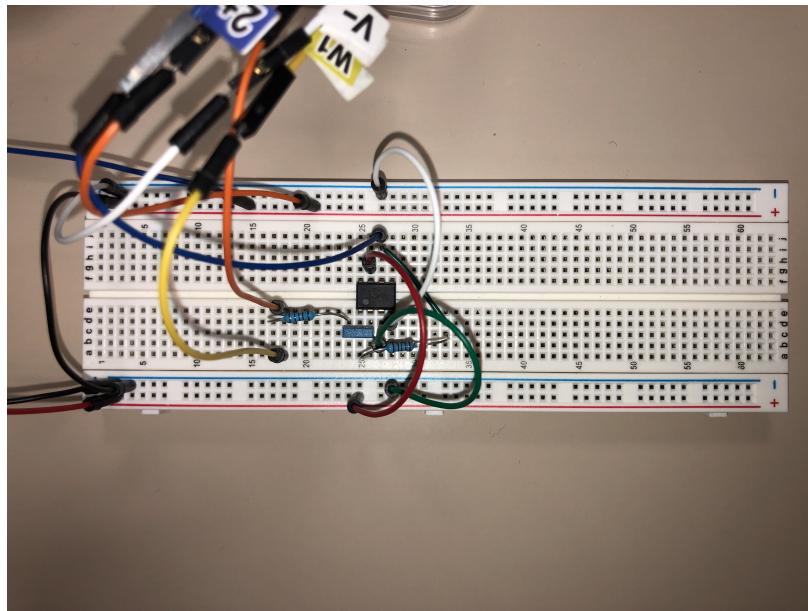
Circuito 1 Slew rate= 17.8 ± 0.1 [V/ μ s]

Circuito 2 Slew rate= 19.5 ± 0.5 [V/ μ s]

Circuito 3 Slew rate= 19.2 ± 0.8 [V/ μ s].

Anche in questo caso i valori risultati ottenuti non risultano compatibili con quanto riportato da datasheet: 13 [V/ μ s]. Ciò è sicuramente dovuto alle diverse condizioni in cui il circuito operava, soprattutto per quanto riguarda il diverso valore di alimentazione, ovvero 15 [V].

3 Circuito derivatore



Riportiamo per prima cosa i parametri circuituali misurati per i tre diversi circuiti derivatori:

-Circuito 1: $R_1 = (999 \pm 8)$ [Ω], $C_1 = (47 \pm 2)$ [nF], $R_2 = (9.92 \pm 0.08)$ [k Ω];

-Circuito 2: $R_1 = (990 \pm 10)$ [Ω], $R_2 = (10.0 \pm 0.1)$ [k Ω], $C_1 = (46 \pm 2)$ [nF];

-Circuito 3: $R_1 = (992 \pm 8)$ [Ω], $C_1 = (46 \pm 2)$ [nF], $R_2 = (9.93 \pm 0.08)$ [k Ω].

3.1 Risposta in frequenza

Prima di riportare i risultati ottenuti, si riporta il valore atteso per la frequenza di taglio del derivatore:

$$f_{\text{HPF,att}} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}. \quad (1)$$

Circuito 1 Per stimare la frequenza di taglio del derivatore, si è misurato mediante i cursori l'attenuazione a -3 [dB] dal massimo valore del guadagno.

Si ha quindi, associando come incertezza di misura l'errore di lettura dovuto ai cursori in quanto preponderante, si ha

$$f_{\text{HPF}} = (3.36 \pm 0.02) \text{ [kHz]} \quad f_{\text{HPF,att}} = (3.4 \pm 0.1) \text{ [kHz]}$$

che risulta quindi compatibile con quanto atteso.

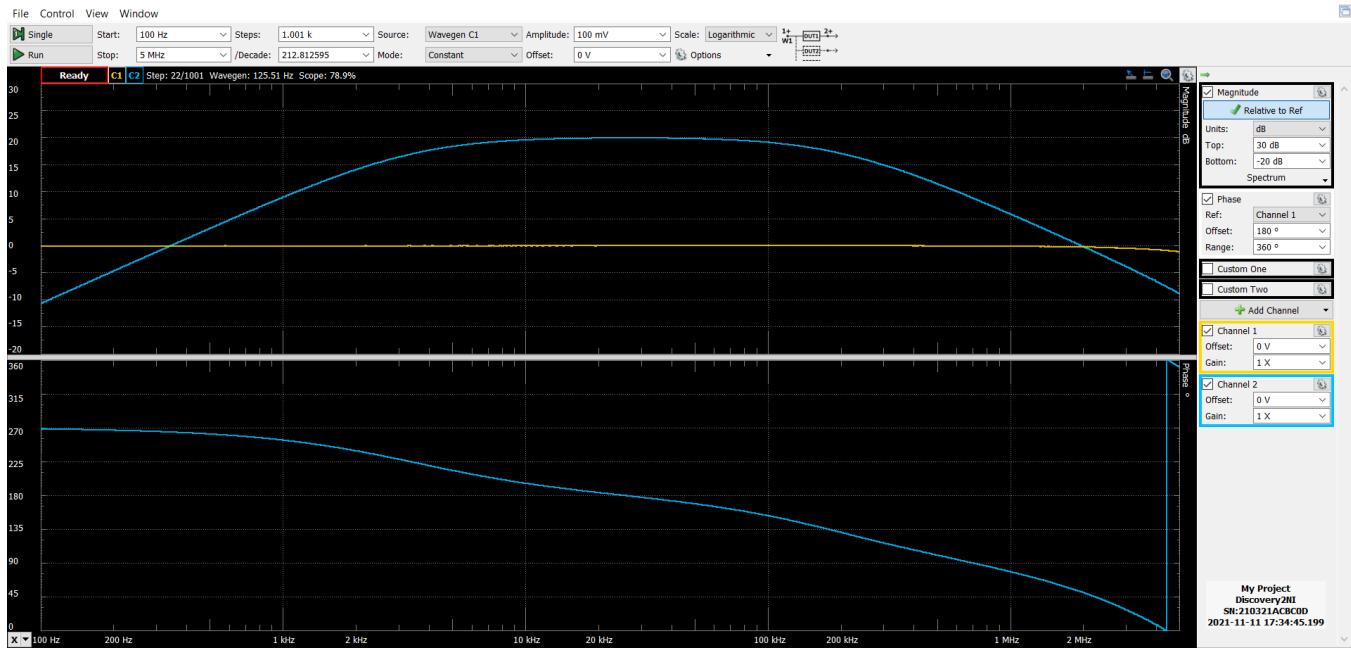


Figura 6: Risposta in frequenza del derivatore circuito 1.

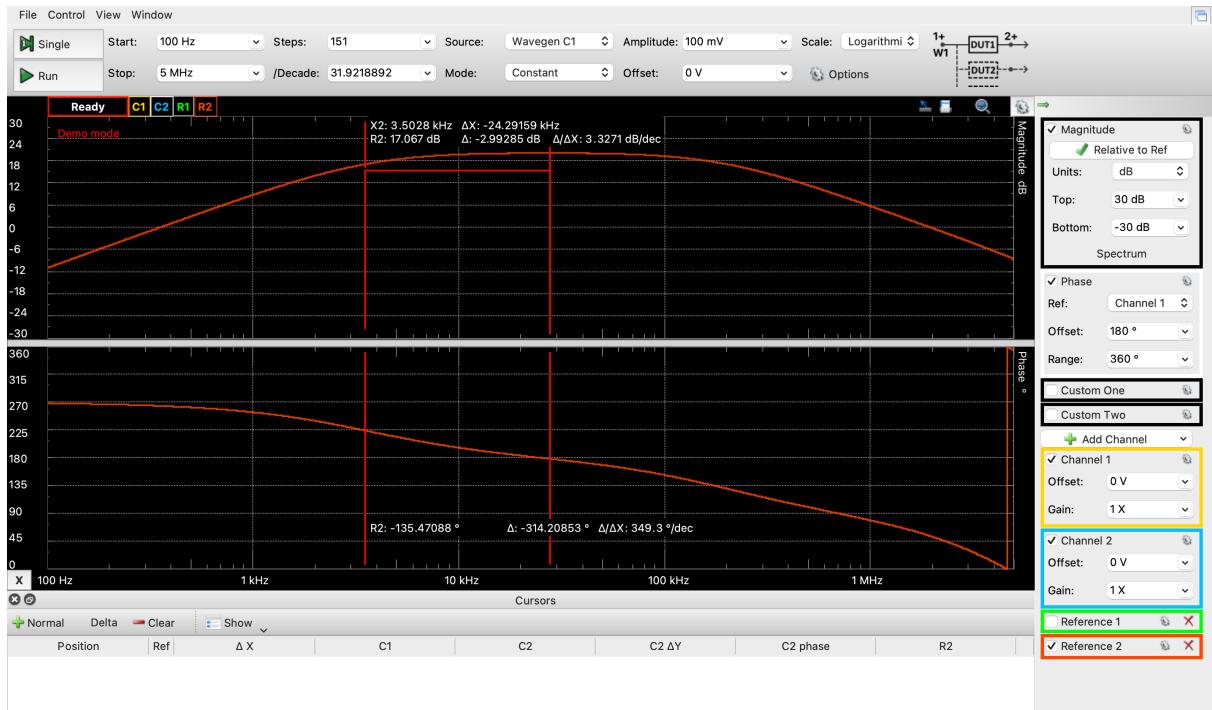


Figura 7: Risposta in frequenza del derivatore circuito 2.

Circuito 2 Nello stesso modo, si è proceduto per il circuito 2.

$$f_{\text{HPF}} = (3.50 \pm 0.03) \text{ [kHz];}$$

$$f_{\text{HPF,att}} = (3.5 \pm 0.2) \quad [\text{kHz}];$$

Circuito 3 Nello stesso modo, si è proceduto per il circuito 3

$$f_{\text{HPF}} = (3.52 \pm 0.04) \text{ [kHz]}; \quad f_{\text{HPF,att}} = (3.5 \pm 0.2) \text{ [kHz]}$$

3.2 Risposta ad un'onda triangolare

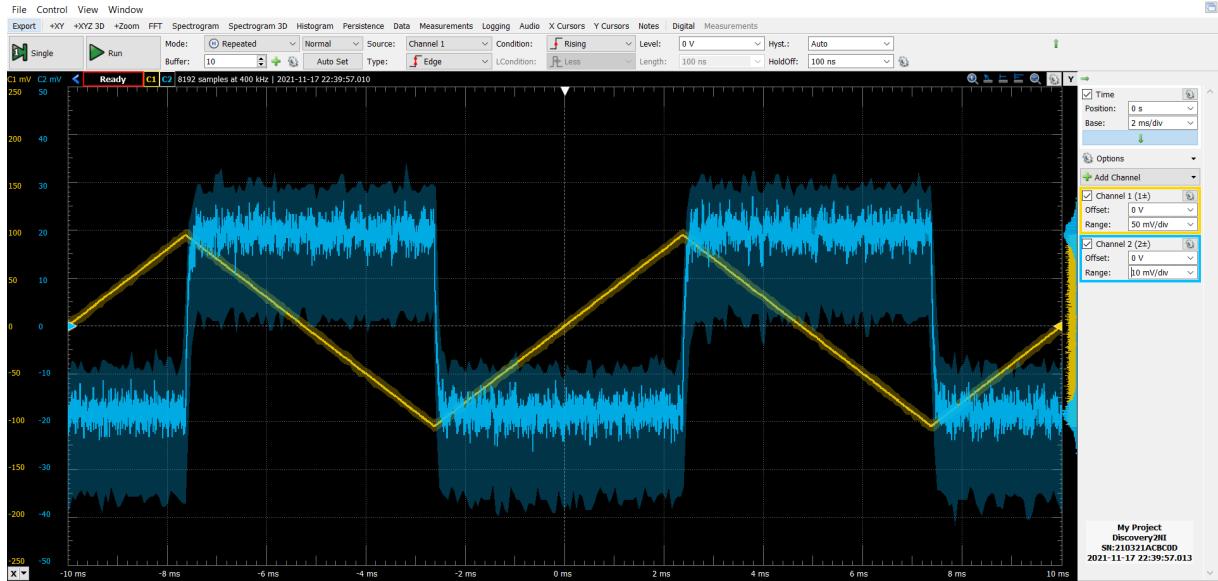


Figura 8: Risposta ad un'onda triangolare di frequenza 100 [Hz].

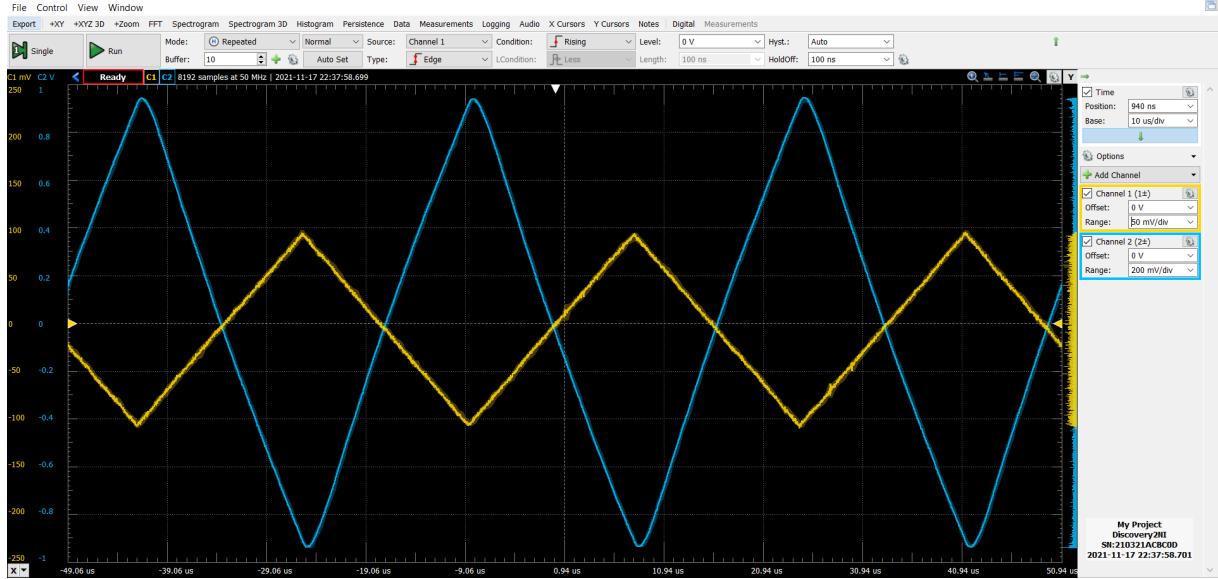


Figura 9: Risposta ad un'onda triangolare di frequenza 30 [kHz].

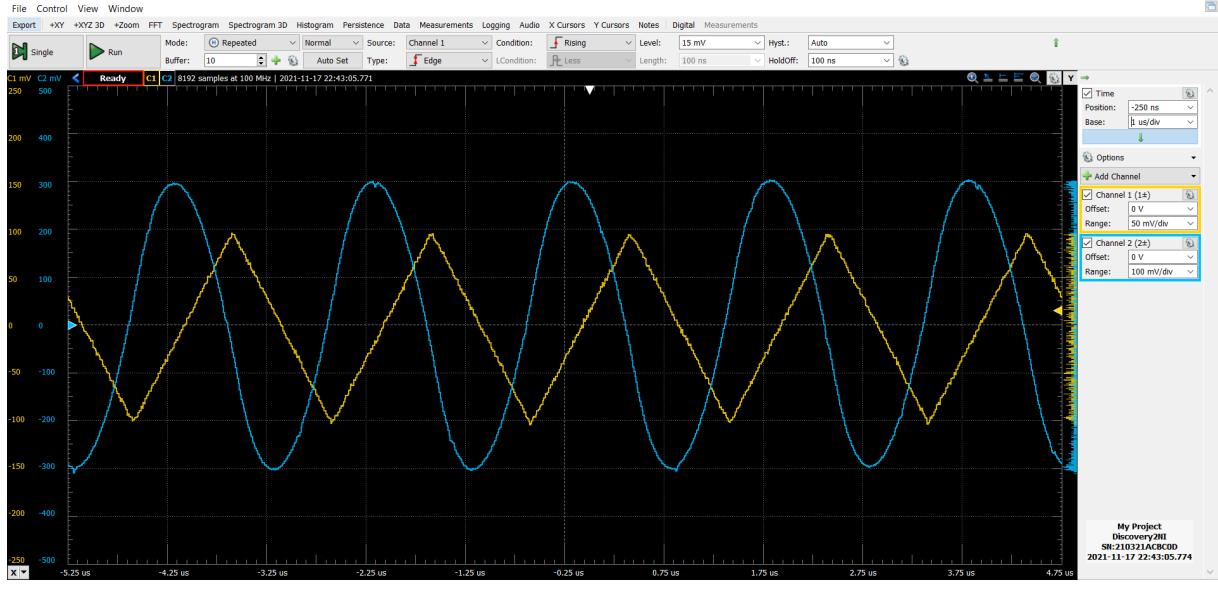


Figura 10: Risposta ad un'onda triangolare di frequenza 500 [kHz].

3.3 Commenti

Notiamo inizialmente che per un segnale in ingresso con frequenza 100 [Hz], il circuito si comporta effettivamente come un derivatore invertente come atteso. Nella zona di frequenze intermedie, 30 [kHz], il circuito si comporta come un amplificatore: il segnale in uscita rimane della stessa forma dell'ingresso ma risulta amplificato di un fattore dell'ordine di 10. Infine per frequenze alte si nota come il segnale in uscita sia distorto.

La resistenza R_1 posta in serie al condensatore serve per modificare l'impedenza di ingresso del circuito e non far divergere il guadagno per frequenze $\omega \rightarrow \infty$. In questo modo non viene amplificato il rumore ad alte frequenze del segnale e il circuito non entra in saturazione, rimanendo nella zona lineare di funzionamento dell'OpAmp.