

Laboratorio di Segnali e Sistemi - canale M-Z

Relazione sulla quarta esperienza di laboratorio

Gruppo 29: L. Pietropaoli, S. Scacco, A. Scarpa

27 settembre 2024

Indice

1 Abstract	2
2 Strumentazione	2
3 Discussione sulle incertezze	3
4 Misura dello slew rate	3
5 Amplificatore invertente	5
5.1 Diagrammi di Bode	6
5.2 Misura guadagno \times banda	10
5.2.1 Fit lineari in fase di attenuazione	10
5.2.2 Interpolazione per frequenze di taglio	12
5.2.3 Confronto guadagni per banda	14
6 Sommatore non invertente	16
6.1 Un segnale alla volta	16
6.2 Sovrapposizione di due segnali	17
6.3 Sovrapposizione di tre segnali	18
7 Conclusioni	19

1 Abstract

In questa esperienza di laboratorio lo scopo è di prendere familiarità con gli amplificatori operazionali. Pertanto ci si concentra sullo studio di tre configurazioni molto semplici: un inseguitore di tensione per misurarne lo **slew rate**, poi un montaggio OP-Amp invertente con feedback per la misura del **prodotto guadagno per banda** e infine un sommatore a tre ingressi.

2 Strumentazione

- i. Generatore di funzioni *GW Insteek* AFG-2225.
- ii. Generatore di tensione continua *GW Insteek* GPE-4323.
- iii. Oscilloscopio digitale *Keysight* DSOX1102G.
- iv. Multimetro *Keysight* 34460A.
- v. OP-Amp mod. LM358AN. (*Fairchild*). Durante tutta l'esperienza, si è alimentato l'OP-Amp con $V_{CC} = 10\text{ V}$ e ground = -10 V .
- vi. Componenti circuitali vari, resistenze, breadboard, cavi, snodi a T e connettori BNC.

Riportiamo i grafici utili del datasheet dell'OP-Amp utilizzato:

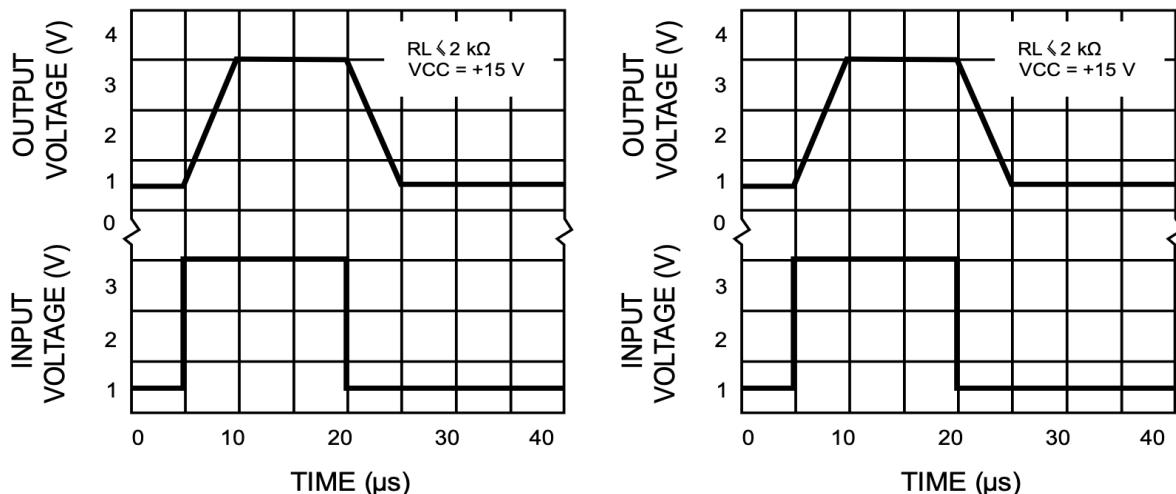


Figura 1: Grafici utili a determinare i valori di aspettazione delle principali quantità calcolate utilizzando l'OP-Amp.

- Stima della slew rate riportata da *Fairchild* per l' OP-Amp LM358AN. Ben visibile dal grafico in figura: la pendenza del segnale in uscita è di $0.5\text{ V}/\mu\text{s}$. Altrove, si legge uno slew rate dichiarato compreso in un intervallo tra $0.3\text{ V}/\mu\text{s}$ e $0.6\text{ V}/\mu\text{s}$.
- Prodotto guadagno \times banda dichiarato dal costruttore. Con $V_{CC} = 15\text{ V}$, il valore atteso appare di $5 \times 10^5\text{ Hz}$.

3 Discussione sulle incertezze

Gli strumenti di laboratorio non godono di precisione infinita e sono soggetti ad errori casuali e sistematici. Si utilizzeranno per i calcoli le seguenti stime delle incertezze:

- ii. **Generatore di tensione continua:** si associa un errore sistematico di circa 0.03 V.
- iii. **Oscilloscopio:** il datasheet indica che l'incertezza dipende dalla scala delle misure realizzate. Per le scale usate sull'oscilloscopio, l'incertezza associata è, per le scale utilizzate in questa esperienza, pari al 3%.

Si sottolinea inoltre che le misure all'oscilloscopio risentono di una sistematica ogni volta che si usa lo strumento *measure* per rilevare segnali picco-picco. Questo effetto sistematico riguarda lo spessore S della linea che rappresenta il segnale sullo schermo, che è una aggiunta ineliminabile alla misura automatica.

Tuttavia, questo errore è trascurabile: sia a/b un rapporto di tensioni, e sia scala 1/scala 2 $\approx a/b$ il rapporto delle scale che le visualizzano sull'oscilloscopio. Allora:

$$A_{mis} = \frac{a + S \text{ scala 1}}{b + S \text{ scala 2}} \approx \frac{a}{b} \frac{1 + S \text{ scala 2}/b}{1 + S \text{ scala 2}/b} = \frac{a}{b} = A_{reale}$$

- iv. **Multimetro:** dal manuale dell'utente, si associa l'incertezza di lettura pari allo 0.018% per le misure di resistenza e 0.0115% per le misure di tensione continua.

Inoltre, in ogni calcolo effettuato si è eseguita la propagazione delle incertezze.

4 Misura dello slew rate

La misura dello slew rate è stata realizzata con il circuito montato in configurazione di inseguitore di tensione, come mostrato in [Figura 2](#). Essendo lo slew rate definito come:

$$S = \max \left\{ \frac{dv_o}{dt} \right\} \quad (4.1)$$

è stato inviato come segnale di ingresso un'onda quadra di ampiezza 8V e in seguito sono stati misurati i tempi di salita e le relative differenze di potenziale del segnale di uscita fra il 10% e il 90% della pendenza, sotto forma di punti (Δt , ΔV). La stima dell'intervallo (10-90)% è stata eseguita direttamente sulla lettura all'oscilloscopio, considerando come 100% il massimo del picco-picco di ampiezza prodotta in uscita, misurando con i cursori.

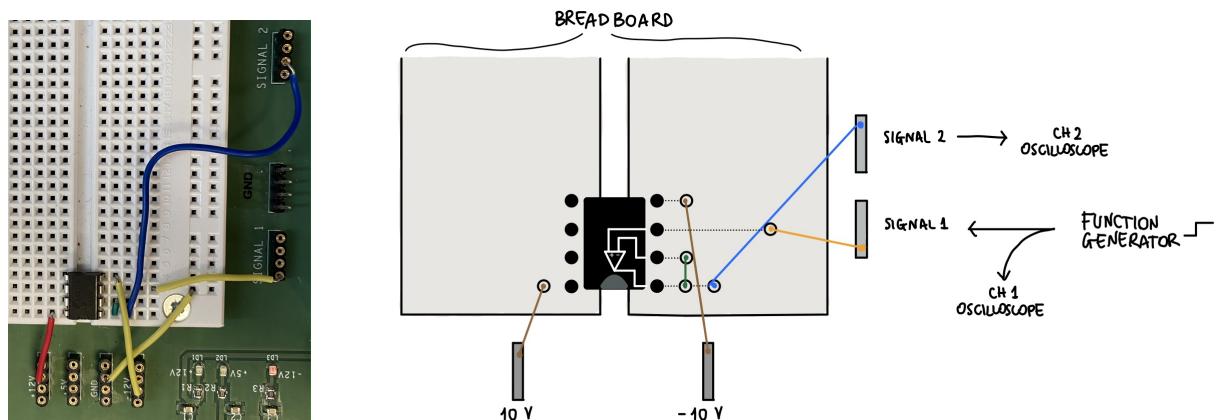


Figura 2: Circuito e schema circuitale dell'inseguitore di tensione per lo studio dello slew rate: l'ingresso invertente è collegato all'uscita dell'Op-Amp.

Δt (μ s)	ΔV (V)	$\sigma_{\Delta V}$ (V)
5	1.150	0.035
10	2.350	0.071
15	3.50	0.11
20	4.75	0.14
25	5.88	0.18
30	7.00	0.21

Figura 3: Valori differenze di tempi e di potenziale lungo la salita del segnale di uscita. L'incertezza associata al ΔV è il 3%, come motivato in [sezione 3](#). Non si è fornito invece incertezza sull'asse dei tempi poiché non se ne tiene conto nel calcolo della slew rate tramite fit lineare.

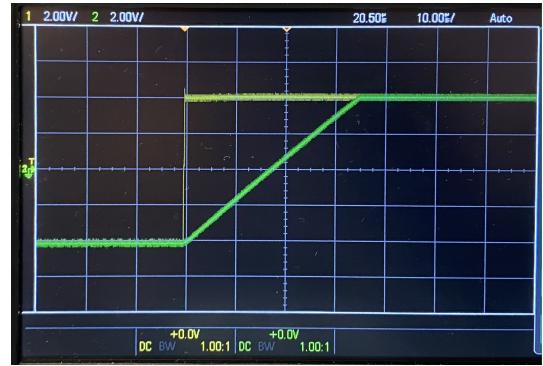


Figura 4: visualizzazione all'oscilloscopio della salita del segnale in uscita dall'inseguitore.

Nella [Figura 3](#) sono riportati i valori misurati che hanno permesso di ottenere la seguente stima per lo slew rate attraverso un fit lineare, mostrato in [Figura 5](#):

$$S = (0.236 \pm 0.005) \text{ V}/\mu\text{s} \quad (4.2)$$

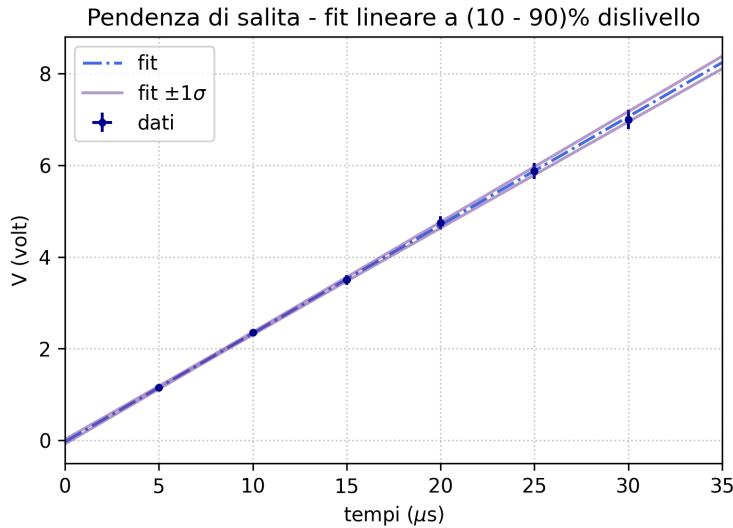


Figura 5: Fit lineare realizzato per ottenere la stima della pendenza del segnale di ingresso (i punti sono mostrati con l'errore sulle ordinate). I valori ottenuti per i parametri della retta sono: $m = 0.236 \text{ V}/\mu\text{s}$ e $c = -0.029 \text{ V}$.

Confrontando con il valore riportato nel *datasheet* dell'OP-Amp in questione, notiamo che lo slew rate dichiarato è circa il doppio di quello misurato in laboratorio, ma nel grafico fornитoci non è apprezzabile alcuna incertezza.

Continuando a cercare, si è trovato affermato dall'azienda produttrice un intervallo di slew rate compreso tra $0.3 - 0.6 \text{ V}/\mu\text{s}$, con 15 V di alimentazione e con segnale di ingresso tra 0.5 e 3 V. Al contrario, in laboratorio si è alimentato l'Op-Amp con 20 V, e il segnale in ingresso è stato di 8 V. Probabilmente, ciò basta a spiegare la discrepanza osservata tra slew rate dichiarato e osservato.

5 Amplificatore invertente

Visibile in [Figura 6](#), è stato realizzato un **amplificatore in configurazione invertente**. Lo si è studiato in 4 diverse configurazioni, variando ogni volta la resistenza R , e lasciando inalterata la resistenza di feedback. Questo ha chiaramente portato a sua volta ad una variazione nell'amplificazione, che è pari a:

$$A = \frac{R'}{R} \quad (5.1)$$

e che è stata oggetto di questo studio. Più precisamente, il montaggio è finalizzato all'inferenza del prodotto (guadagno \times banda), per poterlo confrontare con i valori forniti dal costruttore, visibili in [Figura 1](#):

Nella [Tabella 1](#) sono riportati i valori della resistenza di feedback e della resistenza variabile, con le relative incertezze. Si è avuta attenzione nello scegliere una delle quattro resistenze adatta allo scopo dell'ultima parte di questa esperienza sperimentale (cfr. [sezione 6](#)), in particolare la quarta nell'ordine in cui sono mostrate in tabella.

R' (k Ω)	R (k Ω)	A_v attesa	f_T attesa (kHz)
97.92 ± 0.018	2.640 ± 0.001	-37.09 ± 0.01	14.38 ± 0.01
	9.871 ± 0.002	-9.92 ± 0.01	50.40 ± 0.01
	21.97 ± 0.004	-4.46 ± 0.01	112.18 ± 0.01
	46.50 ± 0.01	-2.11 ± 0.01	237.44 ± 0.01

Tabella 1: Valori misurati per R e R' dell'invertente montato, con i valori attesi dell'amplificazione secondo la [Equazione 5.1](#), e delle frequenze di taglio secondo il $G \times B$ dichiarato dal costruttore di 5×10^5 Hz.

L'incertezza per i valori attesi è piccolissima, perciò la si è riportata come 0.01 in valore assoluto (sebbene sia molto più piccola). Questo perché da un lato è poco rilevante studiarla, e dall'altro sicuramente dominano gli effetti sistematici a quella precisione.

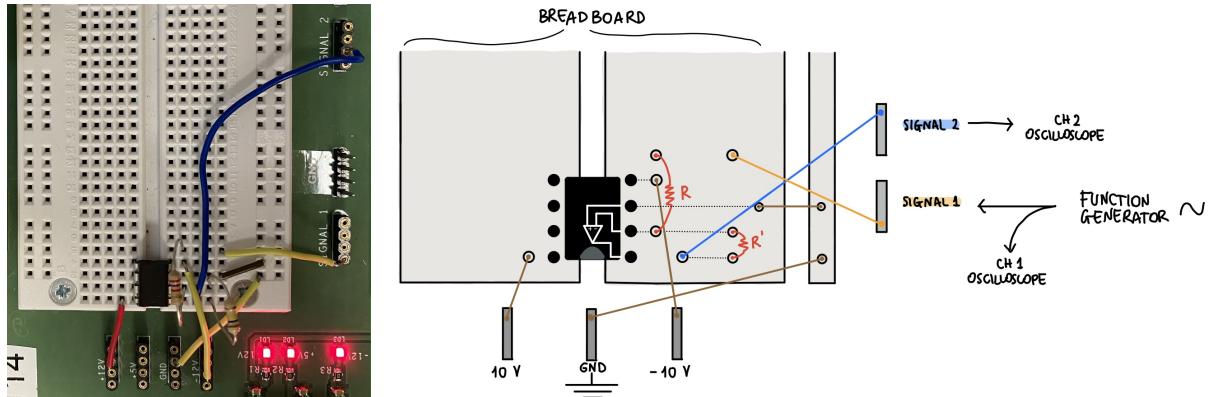


Figura 6: Circuito e schema circuitale in configurazione di amplificatore invertente.

5.1 Diagrammi di Bode

Riportiamo nelle [Tabella 2 - Tabella 5](#) i dati ottenuti per le quattro misure delle resistenze scelte. La [Figura 7](#) presenta i relativi diagrammi di Bode.

Presa dati 1				
Frequenza	Ingresso	Uscita	Amplificazione	Gain
0.010 kHz	0.370 V	13.70 V	37.0 ± 1.6	31.37 ± 0.37 dB
0.018 kHz	0.370 V	13.70 V	37.0 ± 1.6	31.37 ± 0.37 dB
0.030 kHz	0.370 V	13.70 V	37.0 ± 1.6	31.37 ± 0.37 dB
0.050 kHz	0.370 V	13.70 V	37.0 ± 1.6	31.37 ± 0.37 dB
0.070 kHz	0.370 V	13.70 V	37.0 ± 1.6	31.37 ± 0.37 dB
0.100 kHz	0.370 V	13.80 V	37.3 ± 1.6	31.43 ± 0.37 dB
0.180 kHz	0.370 V	13.75 V	37.2 ± 1.6	31.40 ± 0.37 dB
0.300 kHz	0.370 V	13.80 V	37.3 ± 1.6	31.43 ± 0.37 dB
0.500 kHz	0.372 V	13.80 V	37.1 ± 1.6	31.39 ± 0.37 dB
0.700 kHz	0.370 V	13.70 V	37.0 ± 1.6	31.37 ± 0.37 dB
1.000 kHz	0.372 V	13.80 V	37.1 ± 1.6	31.39 ± 0.37 dB
1.800 kHz	0.372 V	13.70 V	36.8 ± 1.6	31.32 ± 0.37 dB
3.000 kHz	0.372 V	13.60 V	36.6 ± 1.6	31.26 ± 0.37 dB
5.000 kHz	0.372 V	12.90 V	34.7 ± 1.5	30.80 ± 0.37 dB
7.000 kHz	0.161 V	5.390 V	33.5 ± 1.4	30.50 ± 0.37 dB
10.00 kHz	0.161 V	4.980 V	30.9 ± 1.3	29.81 ± 0.37 dB
14.00 kHz	0.161 V	4.340 V	27.0 ± 1.1	28.61 ± 0.37 dB
15.00 kHz	0.163 V	4.180 V	25.6 ± 1.1	28.18 ± 0.37 dB
18.00 kHz	0.161 V	3.740 V	23.2 ± 1.0	27.32 ± 0.37 dB
30.00 kHz	0.161 V	2.470 V	15.34 ± 0.65	23.72 ± 0.37 dB
50.00 kHz	0.105 V	1.130 V	10.76 ± 0.45	20.64 ± 0.37 dB
70.00 kHz	0.104 V	0.835 V	8.03 ± 0.34	18.09 ± 0.37 dB
100.0 kHz	0.105 V	0.587 V	5.59 ± 0.24	14.95 ± 0.37 dB
180.0 kHz	0.105 V	0.336 V	3.20 ± 0.14	10.10 ± 0.37 dB
300.0 kHz	0.105 V	0.195 V	1.86 ± 0.08	5.38 ± 0.37 dB
500.0 kHz	0.104 V	0.111 V	1.07 ± 0.05	0.57 ± 0.37 dB

Tabella 2: Amplificatore invertente con $R = 2.64 \text{ k}\Omega$. La presa dati è stata infittita intorno alle frequenze di taglio. Gli errori relativi assegnati alle misure di tensione sono pari al 3%, mentre l'errore relativo assegnato all'amplificazione è il 4.2%.

Presa dati 2				
Frequenza	Ingresso	Uscita	Amplificazione	Gain
0.010 kHz	0.531 V	5.25 V	9.89 ± 0.42	19.90 ± 0.37 dB
0.018 kHz	0.531 V	5.27 V	9.92 ± 0.42	19.93 ± 0.37 dB
0.030 kHz	0.531 V	5.23 V	9.85 ± 0.42	19.87 ± 0.37 dB
0.050 kHz	0.531 V	5.27 V	9.92 ± 0.42	19.93 ± 0.37 dB
0.070 kHz	0.533 V	5.27 V	9.89 ± 0.42	19.90 ± 0.37 dB
0.100 kHz	0.533 V	5.25 V	9.85 ± 0.42	19.87 ± 0.37 dB
0.180 kHz	0.531 V	5.27 V	9.92 ± 0.42	19.93 ± 0.37 dB
0.300 kHz	0.533 V	5.27 V	9.89 ± 0.42	19.90 ± 0.37 dB
0.500 kHz	0.531 V	5.27 V	9.92 ± 0.42	19.93 ± 0.37 dB
0.700 kHz	0.531 V	5.27 V	9.92 ± 0.42	19.93 ± 0.37 dB
1.000 kHz	0.531 V	5.27 V	9.92 ± 0.42	19.93 ± 0.37 dB
1.800 kHz	0.533 V	5.27 V	9.89 ± 0.42	19.90 ± 0.37 dB
3.000 kHz	0.531 V	5.27 V	9.92 ± 0.42	19.93 ± 0.37 dB
5.000 kHz	0.533 V	5.25 V	9.85 ± 0.42	19.87 ± 0.37 dB
7.000 kHz	0.531 V	5.23 V	9.85 ± 0.42	19.87 ± 0.37 dB
10.00 kHz	0.531 V	5.19 V	9.77 ± 0.41	19.80 ± 0.37 dB
18.00 kHz	0.265 V	2.55 V	9.62 ± 0.41	19.67 ± 0.37 dB
30.00 kHz	0.263 V	2.31 V	8.78 ± 0.37	18.87 ± 0.37 dB
50.00 kHz	0.125 V	0.940 V	7.52 ± 0.32	17.52 ± 0.37 dB
55.00 kHz	0.125 V	0.899 V	7.2 ± 0.31	17.15 ± 0.37 dB
60.00 kHz	0.125 V	0.859 V	6.84 ± 0.29	16.70 ± 0.37 dB
70.00 kHz	0.125 V	0.780 V	6.24 ± 0.26	15.90 ± 0.37 dB
100.0 kHz	0.125 V	0.590 V	4.73 ± 0.20	13.49 ± 0.37 dB
180.0 kHz	0.125 V	0.362 V	2.86 ± 0.12	9.14 ± 0.37 dB
300.0 kHz	0.125 V	0.210 V	1.67 ± 0.07	4.46 ± 0.37 dB
500.0 kHz	0.124 V	0.119 V	0.97 ± 0.04	-0.28 ± 0.37 dB

Tabella 3: Amplificatore invertente con $R = 9.87\text{k}\Omega$. La presa dati è stata infittita intorno alle frequenze di taglio. Gli errori relativi assegnati alle misure di tensione sono pari al 4% mentre l'errore relativo assegnato all'amplificazione è il 5%.

Presa dati 3				
Frequenza	Ingresso	Uscita	Amplificazione	Gain
0.010 kHz	1.05 V	4.74 V	4.51 ± 0.19	13.09 ± 0.37 dB
0.018 kHz	1.05 V	4.74 V	4.51 ± 0.19	13.09 ± 0.37 dB
0.030 kHz	1.05 V	4.74 V	4.51 ± 0.19	13.09 ± 0.37 dB
0.050 kHz	1.05 V	4.74 V	4.51 ± 0.19	13.09 ± 0.37 dB
0.070 kHz	1.05 V	4.76 V	4.53 ± 0.19	13.13 ± 0.37 dB
0.100 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
0.180 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
0.300 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
0.500 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
0.700 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
1.000 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
1.800 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
3.000 kHz	1.05 V	4.78 V	4.55 ± 0.19	13.16 ± 0.37 dB
5.000 kHz	1.05 V	4.76 V	4.53 ± 0.19	13.13 ± 0.37 dB
7.000 kHz	1.05 V	4.76 V	4.53 ± 0.19	13.13 ± 0.37 dB
10.00 kHz	1.05 V	4.76 V	4.53 ± 0.19	13.13 ± 0.37 dB
18.00 kHz	0.213 V	0.935 V	4.39 ± 0.19	12.85 ± 0.37 dB
30.00 kHz	0.213 V	0.920 V	4.32 ± 0.18	12.71 ± 0.37 dB
50.00 kHz	0.213 V	0.875 V	4.11 ± 0.17	12.27 ± 0.37 dB
70.00 kHz	0.210 V	0.805 V	3.83 ± 0.16	11.67 ± 0.37 dB
100.0 kHz	0.125 V	0.440 V	3.52 ± 0.15	10.93 ± 0.37 dB
110.0 kHz	0.125 V	0.420 V	3.36 ± 0.14	10.53 ± 0.37 dB
120.0 kHz	0.125 V	0.404 V	3.23 ± 0.14	10.19 ± 0.37 dB
130.0 kHz	0.125 V	0.388 V	3.10 ± 0.13	9.84 ± 0.37 dB
180.0 kHz	0.125 V	0.314 V	2.51 ± 0.11	8.00 ± 0.37 dB
300.0 kHz	0.124 V	0.193 V	1.56 ± 0.07	3.84 ± 0.37 dB
500.0 kHz	0.125 V	0.115 V	0.92 ± 0.04	-0.72 ± 0.37 dB

Tabella 4: Amplificatore invertente con $R = 21.97\text{ k}\Omega$. La presa dati è stata infittita intorno alle frequenze di taglio. Gli errori relativi assegnati alle misure di tensione sono pari al 4% mentre l'errore relativo assegnato all'amplificazione è il 5%.

Presa dati 4				
Frequenza	Ingresso	Uscita	Amplificazione	Gain
0.010 kHz	2.17 V	4.50 V	2.07 ± 0.09	6.34 ± 0.37 dB
0.018 kHz	2.17 V	4.50 V	2.07 ± 0.09	6.34 ± 0.37 dB
0.030 kHz	2.17 V	4.50 V	2.07 ± 0.09	6.34 ± 0.37 dB
0.050 kHz	2.17 V	4.50 V	2.07 ± 0.09	6.34 ± 0.37 dB
0.070 kHz	2.19 V	4.50 V	2.05 ± 0.09	6.26 ± 0.37 dB
0.100 kHz	2.19 V	4.52 V	2.06 ± 0.09	6.29 ± 0.37 dB
0.180 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
0.300 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
0.500 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
0.700 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
1.000 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
1.800 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
3.000 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
5.000 kHz	2.19 V	4.54 V	2.07 ± 0.09	6.33 ± 0.37 dB
7.000 kHz	2.19 V	4.50 V	2.05 ± 0.09	6.26 ± 0.37 dB
10.00 kHz	2.17 V	4.54 V	2.09 ± 0.09	6.41 ± 0.37 dB
18.00 kHz	0.430 V	0.890 V	2.07 ± 0.09	6.32 ± 0.37 dB
30.00 kHz	0.430 V	0.880 V	2.05 ± 0.09	6.22 ± 0.37 dB
50.00 kHz	0.426 V	0.875 V	2.05 ± 0.09	6.25 ± 0.37 dB
70.00 kHz	0.125 V	0.257 V	2.06 ± 0.09	6.26 ± 0.37 dB
100.0 kHz	0.125 V	0.250 V	2.00 ± 0.08	6.02 ± 0.37 dB
180.0 kHz	0.125 V	0.221 V	1.77 ± 0.08	4.95 ± 0.37 dB
250.0 kHz	0.124 V	0.189 V	1.52 ± 0.06	3.66 ± 0.37 dB
275.0 kHz	0.124 V	0.176 V	1.42 ± 0.06	3.04 ± 0.37 dB
300.0 kHz	0.125 V	0.167 V	1.34 ± 0.06	2.52 ± 0.37 dB
500.0 kHz	0.125 V	0.110 V	0.88 ± 0.04	-1.11 ± 0.37 dB

Tabella 5: Amplificatore invertente con $R = 46.5\text{ k}\Omega$. La presa dati è stata infittita intorno alle frequenze di taglio. Gli errori relativi assegnati alle misure di tensione sono pari al 4% mentre l'errore relativo assegnato all'amplificazione è il 5%.

Ed infine, il diagramma di Bode:

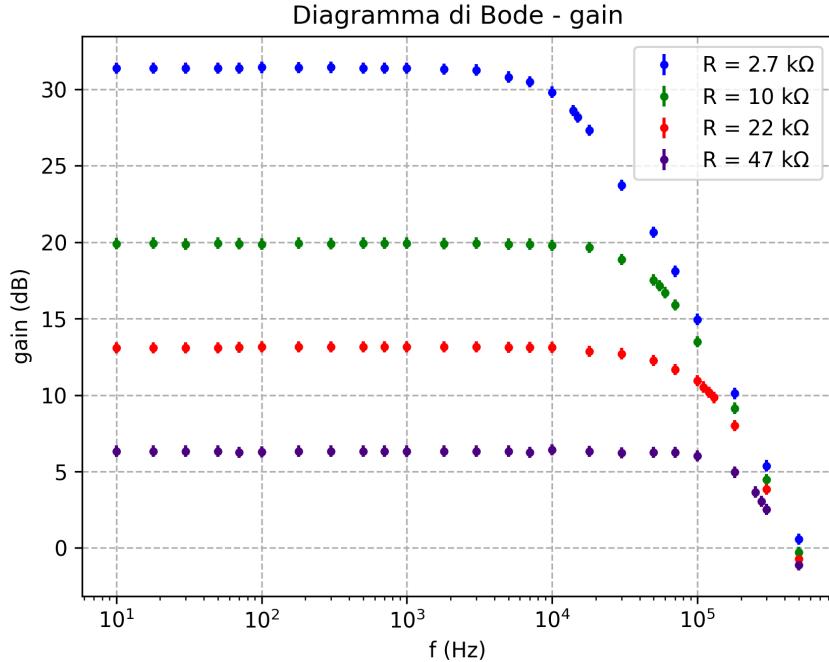


Figura 7: Semplice rendizione del diagramma di Bode per i quattro circuiti (in legenda è indicato il variare della resistenza di ingresso) con annessi errori sul guadagno. Si nota anche ad occhio un comportamento conforme a ciò che ci si aspetta dalle previsioni, con l'estendersi della banda al diminuire dell'amplificazione. In [sottosezione 5.2](#) si approfondirà il calcolo che ci permette di valutare la fedeltà del circuito al modello teorico.

5.2 Misura guadagno \times banda

Abbiamo definito il prodotto guadagno \times banda come:

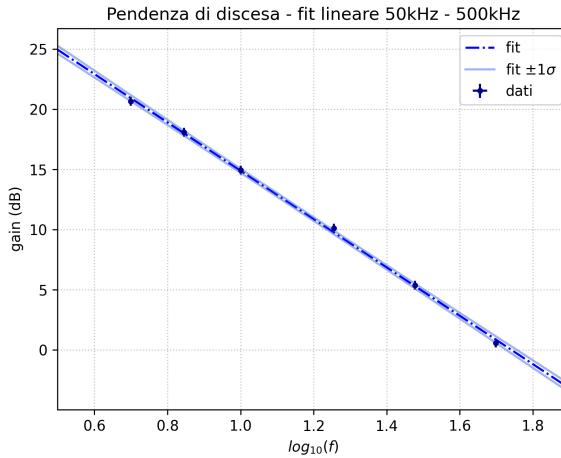
$$G \times B = \text{Amplif max} \cdot f_T \quad (5.2)$$

Ora, la stima di tale valore si è effettuata secondo due metodi:

- i. Attraverso una stima dell'intersezione tra le quattro curve che descrivono i punti del diagramma di Bode e la retta orizzontale di gain nullo. Durante la fase di attenuazione, tali curve sono ben approssimate da rette - pertanto un fit lineare si è reso necessario.
- ii. Attraverso il calcolo diretto delle frequenze di taglio, mediante l'algoritmo di interpolazione tra i punti adiacenti sul diagramma che attraversano il gain al taglio.

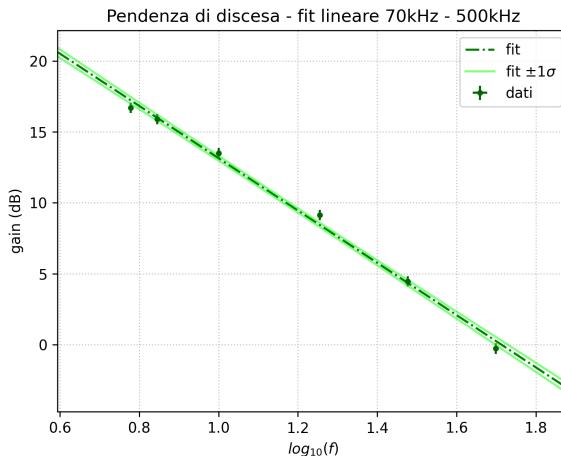
5.2.1 Fit lineari in fase di attenuazione

Riportiamo i grafici dei fit lineari nei quattro casi studiati di amplificatore invertente:



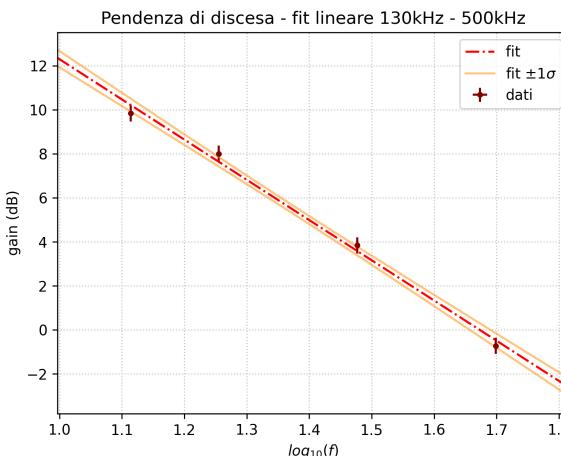
$R = 2.64 \text{ k}\Omega$	
Punti utilizzati	
Frequenza	Gain
50.00 kHz	$20.64 \pm 0.37 \text{ dB}$
70.00 kHz	$18.09 \pm 0.37 \text{ dB}$
100.0 kHz	$14.95 \pm 0.37 \text{ dB}$
180.0 kHz	$10.10 \pm 0.37 \text{ dB}$
300.0 kHz	$5.38 \pm 0.37 \text{ dB}$
500.0 kHz	$0.57 \pm 0.37 \text{ dB}$
Pendenza	Intercetta
$-20.08 \pm 0.43 \text{ dB/dec}$	$34.97 \pm 0.52 \text{ dB}$

Figura 8: Sulla sinistra, il fit lineare realizzato con i punti in tabella a destra. Si è scelto di operare nell’intervallo di punti allineati 50 kHz - 500 kHz.



$R = 9.87 \text{ k}\Omega$	
Punti utilizzati	
Frequenza	Gain
70.00 kHz	$15.90 \pm 0.37 \text{ dB}$
100.0 kHz	$13.49 \pm 0.37 \text{ dB}$
180.0 kHz	$9.14 \pm 0.37 \text{ dB}$
300.0 kHz	$4.46 \pm 0.37 \text{ dB}$
500.0 kHz	$-0.28 \pm 0.37 \text{ dB}$
Pendenza	Intercetta
$-18.45 \pm 0.45 \text{ dB/dec}$	$31.59 \pm 0.55 \text{ dB}$

Figura 9: Sulla sinistra, il fit lineare realizzato con i punti in tabella a destra. Si è scelto di operare nell’intervallo di punti allineati 70 kHz - 500 kHz.



$R = 21.97 \text{ k}\Omega$	
Punti utilizzati	
Frequenza	Gain
130.0 kHz	$9.84 \pm 0.37 \text{ dB}$
180.0 kHz	$8.00 \pm 0.37 \text{ dB}$
300.0 kHz	$3.84 \pm 0.37 \text{ dB}$
500.0 kHz	$-0.72 \pm 0.37 \text{ dB}$
Pendenza	Intercetta
$-18.27 \pm 0.83 \text{ dB/dec}$	$30.6 \pm 1.2 \text{ dB}$

Figura 10: Sulla sinistra, il fit lineare realizzato con i punti in tabella a destra. Si è scelto di operare nell’intervallo di punti allineati 130 kHz - 500 kHz.

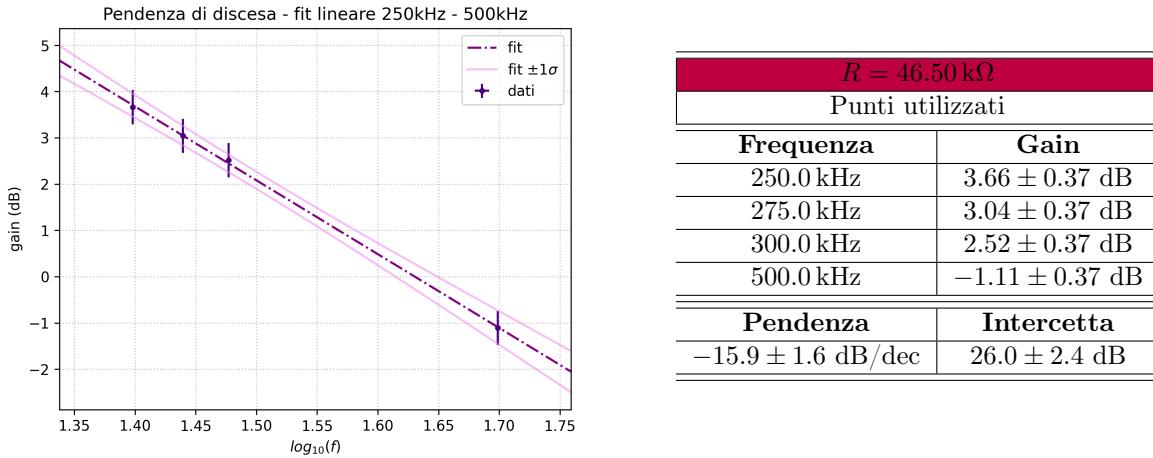


Figura 11: Sulla sinistra, il fit lineare realizzato con i punti in tabella a destra. Si è scelto di operare nell’intervallo di punti allineati 250 kHz - 500 kHz.

Si osserva dai fit che all’aumentare della resistenza e al diminuire dell’amplificazione, le rette di fit vedono la loro pendenza diminuire e le incertezze sui parametri aumentare. Questo perché si riduce sia il numero dei punti, sia l’intervallo considerato per questo fit lineare. Le curve non fanno “in tempo” ad entrare nella vera zona di attenuazione a -20 dB/dec, come ci aspetteremmo.

Per avere una misura più precisa dei parametri del fit, sarebbe stato necessario prendere punti a frequenza più elevata, almeno fino a 1 MHz, per permettere alle curve di schiacciarsi sulla stessa retta di discesa, ma purtroppo non è stato possibile prendere questi ulteriori dati sperimentali a causa del poco tempo a disposizione per terminare le richieste dell’esperienza.

A questo punto, è possibile identificare il prodotto guadagno \times banda con l’intersezione tra i quattro fit e la retta di gain nullo:

$$G \times B = -\frac{c}{m} \quad (5.3)$$

ed un’incertezza associata dalla propagazione delle incertezze dei parametri del fit. Si riportano i valori di queste intersezioni in tabella [Tabella 7](#), in sezione [sottosottosezione 5.2.3](#).

5.2.2 Interpolazione per frequenze di taglio

Il secondo metodo utilizzato prevede invece l’uso dell’interpolazione per il calcolo della frequenza di taglio, tra due punti che attraversano il gain di taglio.

In questo caso, il prodotto guadagno per banda è dato da:

$$G \times B = \bar{A}_v \cdot f_T \quad (5.4)$$

dove \bar{A}_v rappresenta la media amplificazione calcolata in ciascuna delle quattro zone di plateau visibili in [Figura 7](#), con l’incertezza relativa alla media aritmetica dei valori (perché hanno tutti la stessa incertezza).

Nella figura [Figura 12](#) appare visivamente il processo di interpolazione nei quattro casi studiati:

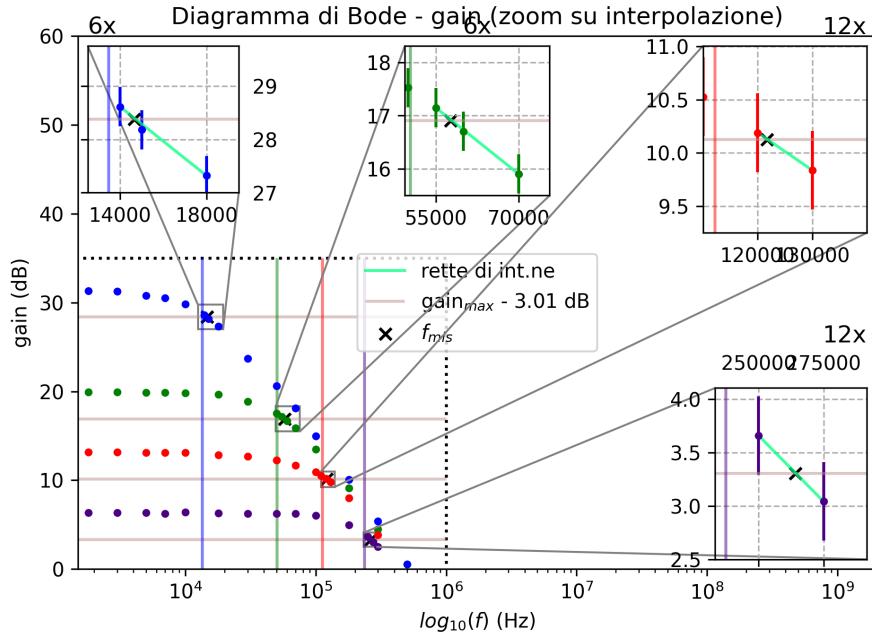


Figura 12: In figura il riassunto grafico dell'interpolazione effettuata per inferire le frequenze di taglio dei quattro circuiti. In blu, verde, rosso e viola sono i punti e i relativi **valori attesi** per le frequenze di taglio, consistentemente con i colori usati in precedenza. Con gain_{max} si è indicata la conversione in guadagno della media di amplificazione massima per ciascuna curva di punti. Nelle Tabella 2 - Tabella 5 i punti evidenziati sono quelli che sono stati impiegati di volta in volta per fare le medie.

Riportiamo infine, nella tabella Tabella 6 i vari risultati nei passaggi intermedi del calcolo che ci porta al guadagno per banda:

Resistenze	Δf di plateau	Amplificazione	Δf di interpolazione	f di taglio
2.640 kΩ	0.010 – 1.000 kHz	37.10 ± 0.48	$14.00 – 18.00$ kHz	14.7 ± 2.3 kHz
9.871 kΩ	0.010 – 3.000 kHz	9.90 ± 0.12	$55.00 – 70.00$ kHz	57.6 ± 6.0 kHz
21.97 kΩ	0.010 – 10.00 kHz	4.538 ± 0.048	$120.0 – 130.0$ kHz	122 ± 11 kHz
46.50 kΩ	0.010 – 70.00 kHz	2.069 ± 0.020	$250.0 – 275.0$ kHz	264 ± 22 kHz

Tabella 6: Calcolo dell'amplificazione e della frequenza di taglio, utili per il prodotto guadagno per banda che calcoleremo poco più avanti.

Si osserva che rispetto ai valori attesi, l'amplificazione è perfettamente compatibile, entro 1σ con i valori attesi. L'incertezza attesa, invece, sono leggermente più basse dei valori che abbiamo stimato con l'interpolazione. Questo è probabilmente dovuto al fatto che il guadagno per banda risulterà più alto di quello previsto di 500 kHz. Risultati visibili in sottosottosezione 5.2.3.

La Figura 13 offre una visualizzazione grafica dei conti appena svolti.

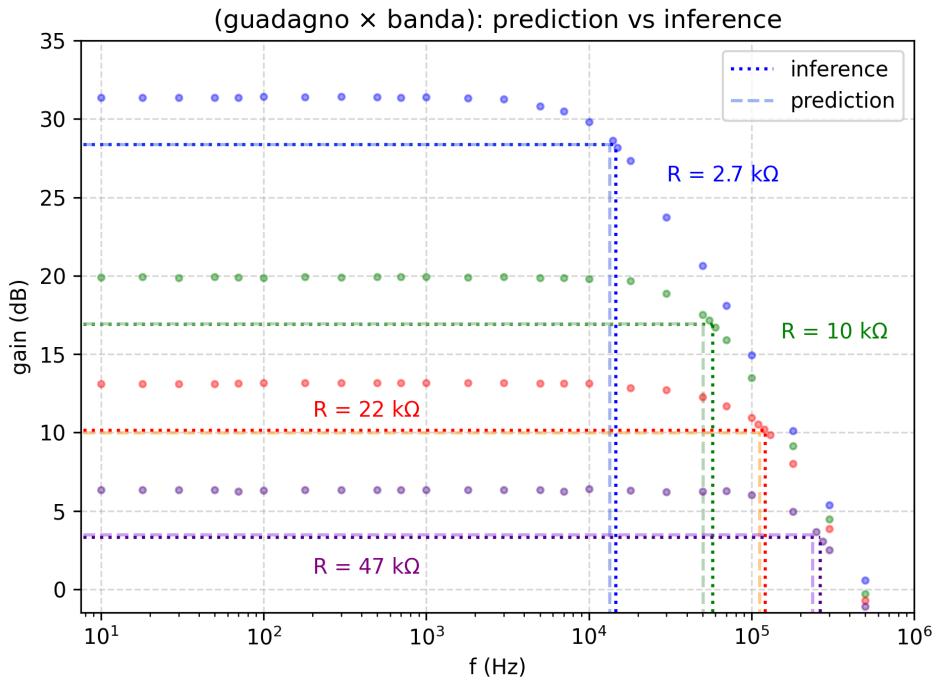


Figura 13: Visualizzazione grafica dell'area $(\text{gain}_{\max} - 3\text{dB}) \times \text{banda}$. Sono mostrati in stile punitinato i valori attesi per la frequenza di cut-off e il massimo gain abbassato di 3.01 dB, mentre in stile tratteggiato vi sono i corrispettivi valori misurati facendo uso dell'interpolazione e della media sulle amplificazioni massime.

5.2.3 Confronto guadagni per banda

Infine, riportiamo in tabella Tabella 7 tutti i valori di guadagno per banda, ottenuti secondo i due metodi esposti in sottosezione 5.2:

Fit lineare a gain nullo

Resistenza	Valore	Incertezza
2.64 kΩ	551 kHz	57 kHz
9.92 kΩ	516 kHz	61 kHz
21.97 kΩ	471 kHz	108 kHz
46.50 kΩ	427 kHz	217 kHz

Amplificazione × taglio

2.64 kΩ	544 kHz	84 kHz
9.92 kΩ	571 kHz	60 kHz
21.97 kΩ	552 kHz	54 kHz
46.50 kΩ	546 kHz	45 kHz

Tabella 7: Risultati dei vari guadagni per banda, calcolati con i due metodi sopra esposti.

Il confronto con il valore atteso secondo i due metodi è visibile nei seguenti grafici in Figura 14:

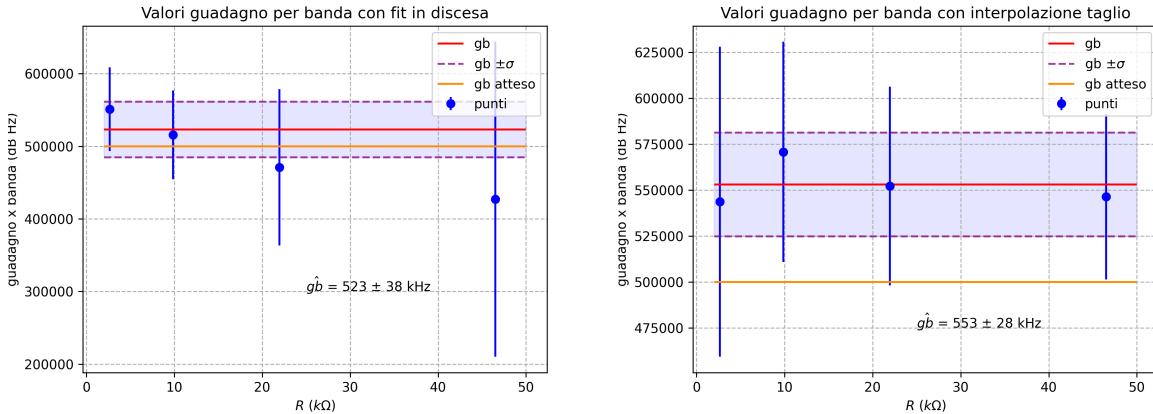


Figura 14: Sulla sinistra, i valori del guadagno per banda ottenuti attraverso il calcolo del fit lineare in discesa. A destra, i valori corrispettivi ottenuti però con l'interpolazione classica della frequenza di taglio.

I valori e le incertezze dei due guadagni per banda visibili nei grafici sono stati ottenuti facendo combinazione dei risultati sui vari $G \times B$ calcolati nei due metodi.

Si osserva come i risultati:

- Sono tutti abbastanza compatibili tra loro, ma non compatibili con il valore atteso di 500 kHz. Questo è del tutto normale: da un lato il valore atteso non è facilmente leggibile dal datasheet, pertanto ne si è fatta una stima ad occhio; d'altro canto, il valore è anche normale che sia più elevato in quanto l'alimentazione richiesta per avere il valore atteso è di 10 – 15 V, mentre noi abbiamo alimentato l'OP-Amp con 20 V. Pertanto, ci possiamo ritenere soddisfatti dei risultati finali.
- Con il primo metodo del fit lineari, le incertezze aumentano notevolmente mentre i guadagni per banda diminuiscono all'aumentare del valore delle resistenze. Questo è dovuto, come già osservato, alla mancanza di spazio da parte delle prese dati a basse amplificazione per poter entrare nella zona di attenuazione lineare. Pertanto l'intercetta a zero non è un valore veramente attendibile per il guadagno per banda nel caso della resistenza $R = 22 \text{ k}\Omega$ e $47 \text{ k}\Omega$. Si sarebbe potuto rimediare, per esempio, scegliendo di studiare amplificazioni maggiori così da ridurre la banda in questione e far cadere prima i punti lungo la retta di discesa.
- Con il secondo metodo dell'interpolazione, le incertezze invece si riducono, e i guadagni per banda invece restano più o meno costanti. Questo è dovuto al fatto che al diminuire dell'amplificazione (quindi all'aumentare delle R), la banda si allarga e i punti distano mediamente più spazio tra loro, pertanto l'interpolazione ritorna un risultato più preciso per la frequenza di taglio. Questo metodo, perciò, risulta più attendibile del primo nella stima del guadagno per banda.

6 Sommatore non invertente

6.1 Un segnale alla volta

Si è studiato il sommatore a tre ingressi con tre diverse configurazioni. Nel primo stadio dell'esperimento si è misurata l'amplificazione inviando il segnale al circuito attraverso una resistenza collegata al pin non-invertente e mettendo due le altre resistenze a ground (Figura 15).

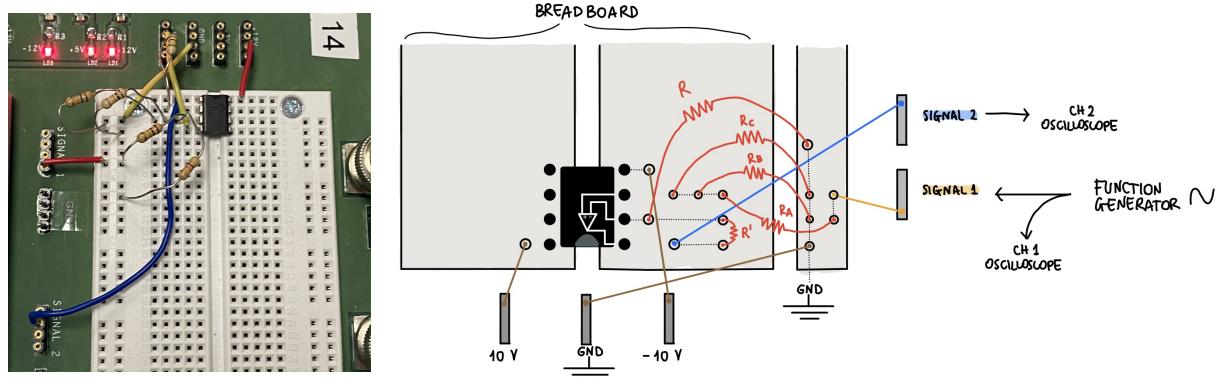


Figura 15: Montaggio del sommatore a tre ingressi (conf. 1): in figura è mostrata una delle tre configurazioni con le quali lo si è usato, vale a dire con il segnale esterno (il cavo rosso che esce da SIGNAL 1 ed entra su una delle due piste laterali della basetta) introdotto nel circuito attraverso una delle tre resistenze di sommatore.

L'amplificazione attesa, nel caso di resistenze uguali $R_A = R_B = R_C \approx 10\text{ k}\Omega$, è pari a:

$$A_1 = \left(1 + \frac{R'}{R}\right) \frac{R_x}{R_A + R_B + R_C}, \quad x = A, B, C$$

$$= \frac{1}{3} \left(1 + \frac{R'}{R}\right)$$

Ora, avendo lasciato montate le resistenze $R' = 98\text{ k}\Omega$ e $R = 47\text{ k}\Omega$, si attende nei tre casi il valore di amplificazione di 1.035 ± 0.001 . Di nuovo, l'incertezza dei valori attesi, causa precisione del multimetro, è così bassa da dover sovrastimare l'errore per non dover inventare cifre significative.

A questo punto, si è collegato un segnale sinusoidale a frequenza 1.5 kHz , così da avere la massima amplificazione disponibile, ed infine si sono scelte tre resistenze il più possibile simili. Riportiamo nella seguente tabella i dati ottenuti:

Amplificazioni singole			
Resistenza	Ingresso	Uscita	Amplificazione
$9.894 \pm 0.002\text{ k}\Omega$	1.05 V	1.09 V	1.038
$9.868 \pm 0.002\text{ k}\Omega$	1.05 V	1.09 V	1.038
$9.874 \pm 0.002\text{ k}\Omega$	1.05 V	1.09 V	1.038

Tabella 8: Risultati della presa dati, prima parte del sommatore invertente. Le incertezze relative sulle tensioni sono del 3% (circa 30 mV), e quelle sull'amplificazione sono del 4.2% (circa 0.04).

I valori ottenuti sono perfettamente compatibili con il valore atteso di 1.035 dell'amplificazione. Il sommatore funziona.

6.2 Sovrapposizione di due segnali

Si è poi studiato il fenomeno del battimento, collegando un altro segnale sinusoidale ([Figura 16](#)) con frequenza molto prossima a quella del segnale già presente (si sono adoperati i valori **1000 - 1001 Hz**).

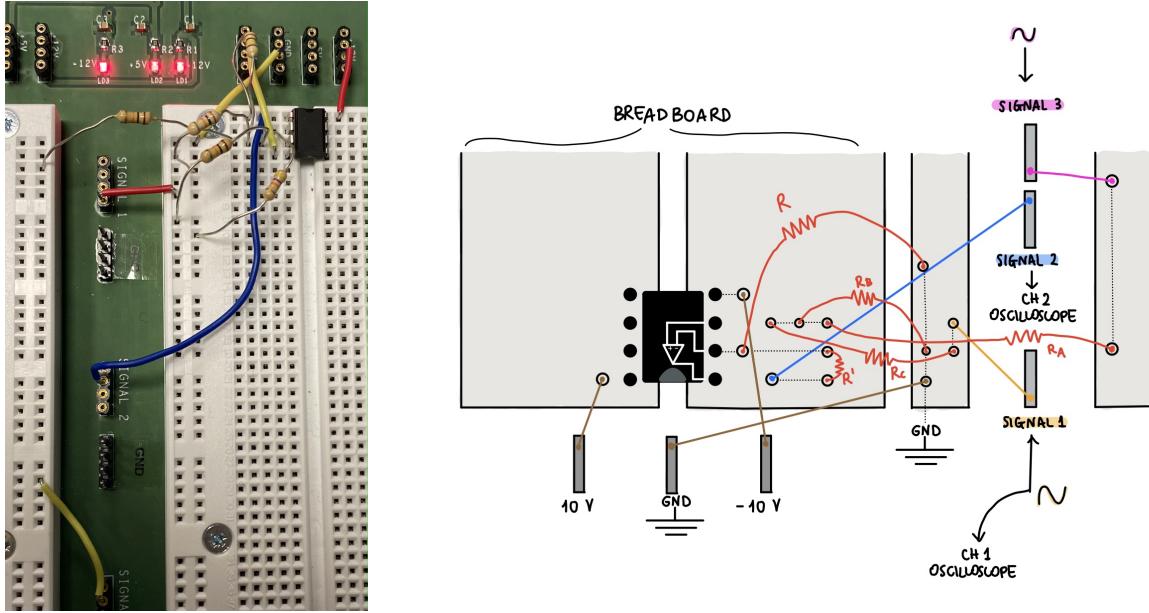


Figura 16: Configurazione del circuito in ricezione di due segnali sinusoidali si frequenza molto vicina, e schema annesso.

Leggendo l'uscita sempre nello stesso punto del circuito, si è osservata la figura di interferenza mostrata in [Figura 17](#): la somma delle due onde dà in teoria luogo a un segnale periodico di frequenza:

$$\nu = \frac{|\nu_1 - \nu_2|}{2} = 0.5 \text{ Hz}$$

con ν_1, ν_2 le frequenze delle onde di partenza. Si è misurato quanto visibile in [Figura 17](#):

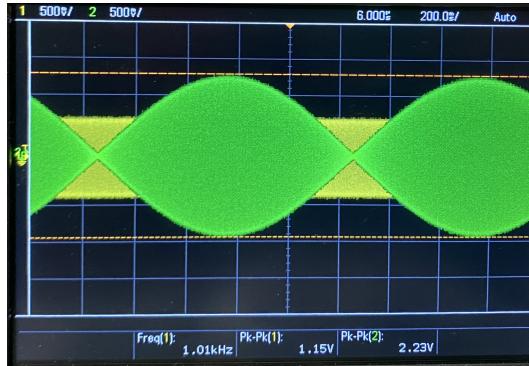


Figura 17: Schermo dell'oscilloscopio e battimento dei due segnali.

- Si osservano 5 tacche per semionda, cioè 10 tacche per un periodo completo. Siccome la scala in alto a destra è di 200 ms, il periodo complessivo si stima perfettamente essere 2 secondi, pertanto la frequenza risulta essere quella attesa: 0.5 Hz.
Assegnare incertezze sulla stima non è sembrato opportuno data la natura dinamica del processo (e quindi la difficoltà nel posizionare eventuali cursori sullo schermo), e data la richiesta che abbiamo interpretato come una verifica empirica del fenomeno.
- Infine, si osserva che anche l'amplificazione è coerente: l'ampiezza dei due segnali in ingresso è pari a circa 1.15 V, mentre l'output misurato ha ampiezza picco-picco di 2.25 V, circa, che si può

perfettamente ricondurre ad una amplificazione pari a:

$$A_2 = \left(1 + \frac{R'}{R}\right) \frac{R_x + R_y}{R_A + R_B + R_C}, \quad x, y = A, B, C$$

$$= \frac{2}{3} \left(1 + \frac{R'}{R}\right) \approx 2.07$$

Un'immagine come la [Figura 17](#) è chiaramente molto rumorosa e sicuramente affetta da sistematici (il segnale in ingresso sarebbe dovuto essere di 1 V), quindi la utilizziamo solo per accertarci che il circuito stesse funzionando, almeno a grandi linee, a dovere.

Ci si ritiene pertanto soddisfatti del risultato ottenuto.

6.3 Sovrapposizione di tre segnali

Infine, si è realizzato il seguente circuito per la sovrapposizione complessiva di tre segnali nel sommatore:

- Un'onda quadra di frequenza 1 kHz e di ampiezza 1 V.
- Un'offset di tensione continua pari ad 1 V.
- Un'onda sinusoidale di frequenza 5 kHz e di ampiezza 0.4 V picco-picco.

Riportiamo lo schema del circuito e l'immagine dello stesso:

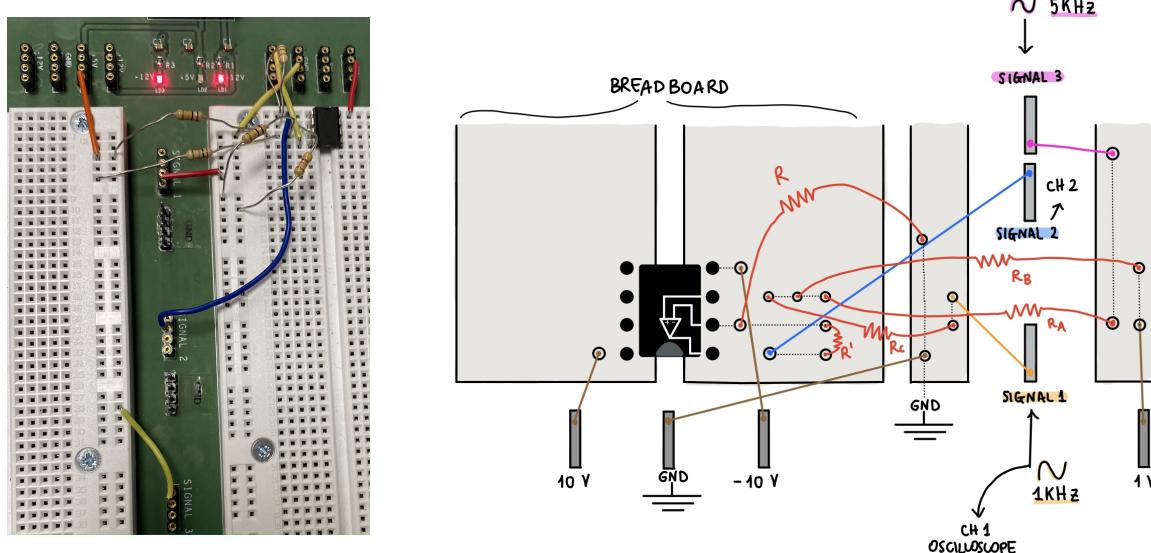


Figura 18: Circuito e schema circuitale in ricezione di due segnali sinusoidali con frequenze di 1 kHz e 5 kHz e di un offset di tensione continua pari a 1 V.

Ci aspettiamo, per il principio di sovrapposizione, la somma dei tre segnali visibile sullo schermo dell'oscilloscopio: onde sinusoidali spezzate ogni mezzo millisecondo, che si innalzano e si abbassano di un volt, e con un offset di un volt, cioè centrate in 1.5 V e 0.5 V (invece che a 0.5 V e -0.5 V). Si osserva esattamente ciò nelle seguenti immagini:

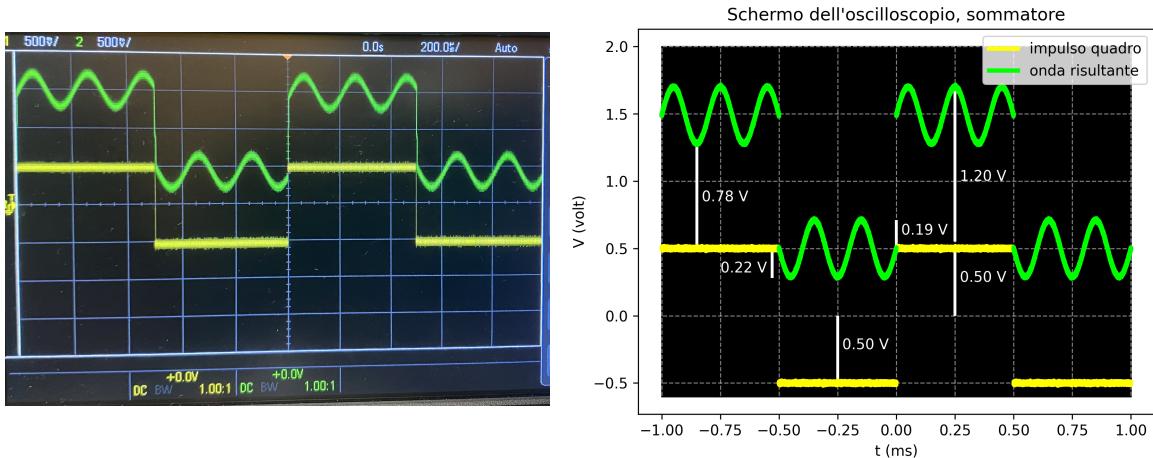


Figura 19: Schermo dell'oscilloscopio che visualizza i tre segnali contemporaneamente (e l'ingresso di onda quadra). Si riportano anche i valori di tensione misurati con i cursori.

Innanzitutto, la frequenza è corretta: in ogni semiperiodo, l'onda sinusoidale entra 2 volte e mezzo: 5 volte a periodo, pertanto 5 volte a millisecondo (la frequenza è 5 kHz).

Inoltre, i valori di tensione confermano che il sommatore sta correttamente amplificando di un fattore 1 il segnale in uscita (l'ampiezza dell'onda sinusoidale picco-picco è di 0.42 V, ed è centrata in 1.49 V e 0.5 V come atteso).

Il risultato manifesta pertanto il principio di sovrapposizione e "corona" l'esperienza di laboratorio.

7 Conclusioni

Riassumendo i risultati ottenuti, si evince che:

- la stima dello slew rate è risultata essere una sottostima del valore aspettato presente nel data sheet e ciò è probabilmente dovuto al fatto che la misura riportata dal costruttore è stata realizzata in condizioni di tensioni in ingresso e di alimentazione dell'Op-Amp diverse da quelle utilizzate in questa esperienza di laboratorio.
- Per ottenere una migliore stima del valore dell'intercetta a zero nel fit lineare si sarebbe potuto scegliere di studiare il comportamento del circuito con amplificazioni maggiori in modo da far scendere prima i punti a zero, oppure semplicemente scegliere di misurare fino a frequenze dell'ordine del MHz. La prima soluzione non è stata realizzata per una svista in fase di progettazione, e la seconda per mancanza di tempo.
- Il comportamento del sommatore non invertente nei casi di ricezione di un singolo segnale, di due segnali sinusoidali e di tre segnali (di cui due sinusoidali e uno onda quadra) è esattamente quello aspettato.