

Laboratorio di Segnali e Sistemi - A.A. 2021/22

Esperienza 4: Amplificatore operativo

Chiara Scrocca 1855186
Alessandro Tancredi 1919636
Rosso Vitale 1892051

17 novembre 2021

Indice

1	Obiettivi dell'esperienza	2
2	Apparato sperimentale	2
3	Operazioni eseguite	2
4	Misura dello slew rate	3
5	Misura del prodotto guadagno per banda	4
6	Sommatore	6
6.1	Prima configurazione	6
6.2	Seconda configurazione	7
6.3	Terza configurazione	7
7	Conclusioni	7

1 Obiettivi dell'esperienza

L'obiettivo dell'esperienza è quello di familiarizzare con un amplificatore operazionale attraverso lo studio del suo comportamento in diverse circostanze.

2 Apparato sperimentale

Per questa esperienza sono stati utilizzati:

- Generatore di segnali
- Generatore di tensione continua (elind MODEL 6TD20)
- Oscilloscopio digitale (Keysight DSOX1102G) con banda passante 70 MHz e frequenza di campionamento 2 GSa/s, impedenza d'ingresso $1\text{ M}\Omega$ in parallelo a 16 pF.
- Breadboard
- Multimetro da banco (Fluke 45) con risoluzione pari a 3%, impedenza d'ingresso $10\text{ M}\Omega$ in parallelo a $<100\text{ pF}$.
- Op-Amp LM358A (Fairchild Semiconductor)

3 Operazioni eseguite

L'esperienza è divisa in tre sezioni:

1. Misura dello slew rate dell' Op-Amp
2. Misura del prodotto guadagno per banda
3. Realizzazione e utilizzo di un sommatore a tre ingressi non invertente

4 Misura dello slew rate

Nella prima parte dell'esperienza abbiamo montato sulla basetta un inseguitore di tensione cioè un amplificatore non invertente con amplificazione unitaria (Figura 1) e abbiamo inviato in ingresso un segnale di onda quadra di ampiezza pari a $(1.25 \pm 0.04)V$ allo scopo di misurare il tempo di salita del segnale in uscita dall'Op-Amp.

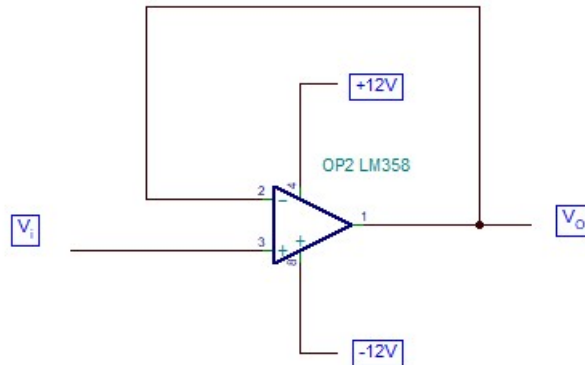


Figura 1: Inseguitore di tensione

Il risultato ottenuto è:

$$S = (0.275 \pm 0.128) \frac{V}{\mu s} \quad (1)$$

Come descritto nel paragrafo sull'apparato sperimentale l'Op-Amp montato sul circuito è un LM358A del costruttore Fairchild Semiconductor, andando a leggere il Datasheet per questo componente si può ricavare dal grafico sottostante una stima del valore atteso dello slew rate che risulta essere pari a $\hat{S} = \frac{2.5}{10} = 0.25 \frac{V}{\mu s}$.

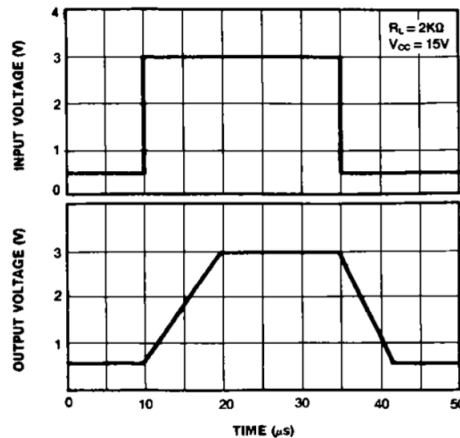


Figure 11. Voltage Follower Pulse Response

Figura 2: Immagine acquisita dal Datasheet del componente LM358A della Fairchild Semiconductor

5 Misura del prodotto guadagno per banda

Nella seconda parte dell'esperienza abbiamo montato sulla breadboard un amplificatore invertente come mostrato nella schematica in (Figura 3). I valori dei componenti misurati sono riportati nella tabella seguente.

Resistori ($k\Omega$)	Amplificazione attesa
$R'_1 = 4.631 \pm 0.002$	4.318 ± 0.003
$R'_2 = 14.60 \pm 0.01$	14.46 ± 0.01
$R'_3 = 46.31 \pm 0.02$	45.85 ± 0.03
$R'_4 = 100.20 \pm 0.05$	99.21 ± 0.07
$R = 1.010 \pm 0.001$	

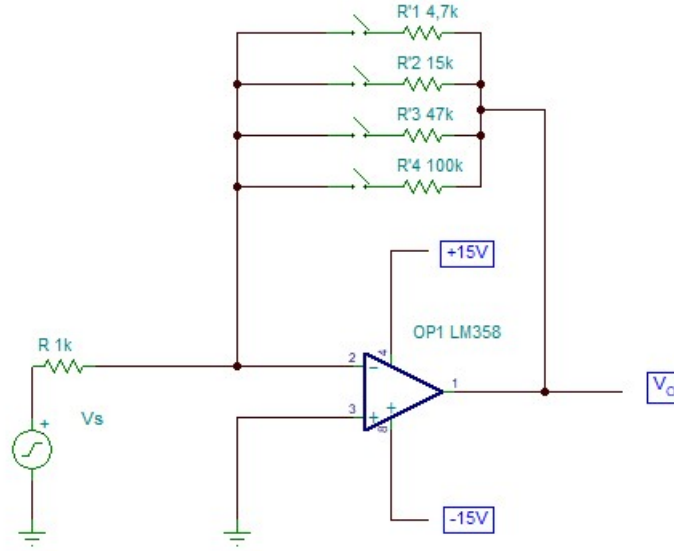


Figura 3: Amplificatore invertente

Abbiamo osservato l'andamento della risposta in frequenza per i 4 valori diversi delle resistenze R'_i . Rapporiamo i dati raccolti per le frequenze, i valori di V_{in} , V_{out} e del guadagno $G = 20 \cdot \log_{10}(|T(j\omega)|)$ in Tabella 1. Elaborando i dati raccolti abbiamo ottenuto il grafico del diagramma di Bode in Figura 4.

Frequenza (Hz)	$A_1 = 4.8 \pm 0.2$			$A_2 = 14.6 \pm 0.6$			$A_3 = 46.1 \pm 2.0$			$A_4 = 99.1 \pm 4.2$		
	$V_{in}(mV)$	$V_{out}(mV)$	Guadagno (dB)	$V_{in}(mV)$	$V_{out}(mV)$	Guadagno (dB)	$V_{in}(mV)$	$V_{out}(mV)$	Guadagno (dB)	$V_{in}(mV)$	$V_{out}(mV)$	Guadagno (dB)
9.0 ± 0.3	261.0 ± 7.8	1200 ± 36	13.25 ± 0.37	261.0 ± 7.8	3840 ± 115	23.35 ± 0.37	261.0 ± 7.8	12100 ± 363	33.32 ± 0.37	262.0 ± 7.9	26000 ± 780	39.93 ± 0.37
40.6 ± 1.2	261.0 ± 7.8	1270 ± 38	13.74 ± 0.37	261.0 ± 7.8	3820 ± 115	23.31 ± 0.37	262.0 ± 7.9	12100 ± 363	33.29 ± 0.37	262.0 ± 7.9	26000 ± 780	39.93 ± 0.37
161 ± 5	263.0 ± 7.9	1210 ± 36	13.26 ± 0.37	263.0 ± 7.9	3800 ± 114	23.20 ± 0.37	263.0 ± 7.9	12100 ± 363	33.26 ± 0.37	262.0 ± 7.9	26200 ± 786	40.00 ± 0.37
630 ± 19	262.0 ± 7.9	1290 ± 39	13.84 ± 0.37	263.0 ± 7.9	3800 ± 114	23.20 ± 0.37	262.0 ± 7.9	12100 ± 363	33.29 ± 0.37	263.0 ± 7.9	25900 ± 777	39.87 ± 0.37
888 ± 27	261.0 ± 7.8	1310 ± 39	14.01 ± 0.37	262.0 ± 7.9	3860 ± 116	23.37 ± 0.37	263.0 ± 7.9	12100 ± 363	33.26 ± 0.37	263.0 ± 7.9	25900 ± 777	39.87 ± 0.37
(1.21 ± 0.04)k	263.0 ± 7.9	1210 ± 36	13.26 ± 0.37	262.0 ± 7.9	3800 ± 114	23.23 ± 0.37	262.0 ± 7.9	12100 ± 363	33.29 ± 0.37	263.0 ± 7.9	25600 ± 768	39.77 ± 0.37
(1.69 ± 0.05)k	262.0 ± 7.9	1210 ± 36	13.29 ± 0.37	263.0 ± 7.9	3800 ± 114	23.20 ± 0.37	262.0 ± 7.9	12000 ± 360	33.22 ± 0.37	264.0 ± 7.9	25300 ± 759	39.63 ± 0.37
(2.30 ± 0.07)k	263.0 ± 7.9	1210 ± 36	13.26 ± 0.37	263.0 ± 7.9	3800 ± 114	23.20 ± 0.37	264.0 ± 7.9	12000 ± 360	33.15 ± 0.37	265.0 ± 7.9	24500 ± 735	39.32 ± 0.37
(3.24 ± 0.10)k	265.0 ± 7.9	1210 ± 36	13.19 ± 0.37	264.0 ± 7.9	3790 ± 114	23.14 ± 0.37	264.0 ± 7.9	11700 ± 351	32.93 ± 0.37	267 ± 8	22700 ± 681	38.59 ± 0.37
(4.47 ± 0.13)k	263.0 ± 7.9	1210 ± 36	13.26 ± 0.37	263.0 ± 7.9	3780 ± 113	23.15 ± 0.37	264.0 ± 7.9	11400 ± 342	32.71 ± 0.37	270.0 ± 8.1	20600 ± 618	37.65 ± 0.37
(6.35 ± 0.19)k	75.2 ± 2.3	358 ± 11	13.55 ± 0.37	75.0 ± 2.3	1090 ± 33	23.25 ± 0.37	75.4 ± 2.3	3200 ± 96	32.56 ± 0.37	76.4 ± 2.3	5510 ± 165	37.16 ± 0.37
(8.65 ± 0.26)k	75.2 ± 2.3	350 ± 10	13.36 ± 0.37	75.2 ± 2.3	1070 ± 32	23.06 ± 0.37	76.0 ± 2.3	3030 ± 91	32.01 ± 0.37	77.4 ± 2.3	4700 ± 141	35.67 ± 0.37
(12.3 ± 0.4)k	75.2 ± 2.3	350 ± 10	13.36 ± 0.37	75.2 ± 2.3	1050 ± 31	22.90 ± 0.37	76.4 ± 2.3	2690 ± 81	30.93 ± 0.37	77.8 ± 2.3	3700 ± 111	33.54 ± 0.37
(16.6 ± 0.5)k	75.2 ± 2.3	346 ± 10	13.26 ± 0.37	75.4 ± 2.3	1030 ± 31	22.71 ± 0.37	77.0 ± 2.3	2330 ± 70	29.62 ± 0.37	77.8 ± 2.3	2830 ± 85	31.22 ± 0.37
(22.9 ± 0.7)k	75.2 ± 2.3	344 ± 10	13.21 ± 0.37	75.4 ± 2.3	975 ± 29	22.23 ± 0.37	77.4 ± 2.3	1910 ± 57	27.84 ± 0.37	78.2 ± 2.3	2140 ± 64	28.74 ± 0.37
(31.9 ± 0.9)k	75.2 ± 2.3	338 ± 10	13.05 ± 0.37	76.0 ± 2.3	895 ± 27	21.42 ± 0.37	77.8 ± 2.3	1420 ± 43	25.23 ± 0.37	77.8 ± 2.3	1520 ± 46	25.82 ± 0.37
(44.2 ± 1.3)k	74.8 ± 2.2	330 ± 10	12.89 ± 0.37	76.2 ± 2.3	775 ± 23	20.15 ± 0.37	77.6 ± 2.3	1070 ± 32	22.79 ± 0.37	77.8 ± 2.3	1120 ± 34	23.16 ± 0.37
(61.5 ± 1.8)k	74.8 ± 2.2	318 ± 9	12.57 ± 0.37	76.8 ± 2.3	647 ± 19	18.51 ± 0.37	77.6 ± 2.3	780 ± 23	20.04 ± 0.37	78.0 ± 2.3	805 ± 24	20.27 ± 0.37
(85.5 ± 2.6)k	75.4 ± 2.3	292 ± 9	11.76 ± 0.37	77.0 ± 2.3	509 ± 15	16.40 ± 0.37	77.8 ± 2.3	575 ± 17	17.37 ± 0.37	78.0 ± 2.3	583 ± 17	17.47 ± 0.37
(119 ± 4)k	75.6 ± 2.3	261 ± 8	10.76 ± 0.37	77.2 ± 2.3	380 ± 11	13.84 ± 0.37	77.8 ± 2.3	420 ± 13	14.64 ± 0.37	77.8 ± 2.3	424 ± 13	14.73 ± 0.37
(164 ± 5)k	76.8 ± 2.3	221 ± 7	9.18 ± 0.37	78.0 ± 2.3	287 ± 9	11.31 ± 0.37	77.6 ± 2.3	302 ± 9	11.80 ± 0.37	78.0 ± 2.3	304 ± 9	11.81 ± 0.37
(227 ± 7)k	77.2 ± 2.3	179 ± 5	7.30 ± 0.37	77.6 ± 2.3	211 ± 6	8.69 ± 0.37	77.6 ± 2.3	219 ± 7	9.01 ± 0.37	77.6 ± 2.3	223 ± 7	9.17 ± 0.37
(319 ± 9)k	77.2 ± 2.3	133 ± 4	4.72 ± 0.37	77.6 ± 2.3	148 ± 4	5.61 ± 0.37	77.2 ± 2.3	154 ± 5	6.00 ± 0.37	77.6 ± 2.3	155 ± 5	6.01 ± 0.37
(556 ± 17)k	77.2 ± 2.3	77.6 ± 2.3	0.05 ± 0.37	77.6 ± 2.3	84.0 ± 2.5	0.69 ± 0.37	77.2 ± 2.3	88 ± 3	1.14 ± 0.37	77.6 ± 2.3	88 ± 3	1.09 ± 0.37
(1.00 ± 0.03)M	77.2 ± 2.3	42.2 ± 1.3	-5.25 ± 0.37	77.2 ± 2.3	45.4 ± 1.4	-4.61 ± 0.37	77.2 ± 2.3	45.4 ± 1.4	-4.61 ± 0.37	77.2 ± 2.3	45.2 ± 1.4	-4.65 ± 0.37

Tabella 1: Dati raccolti all'oscilloscopio

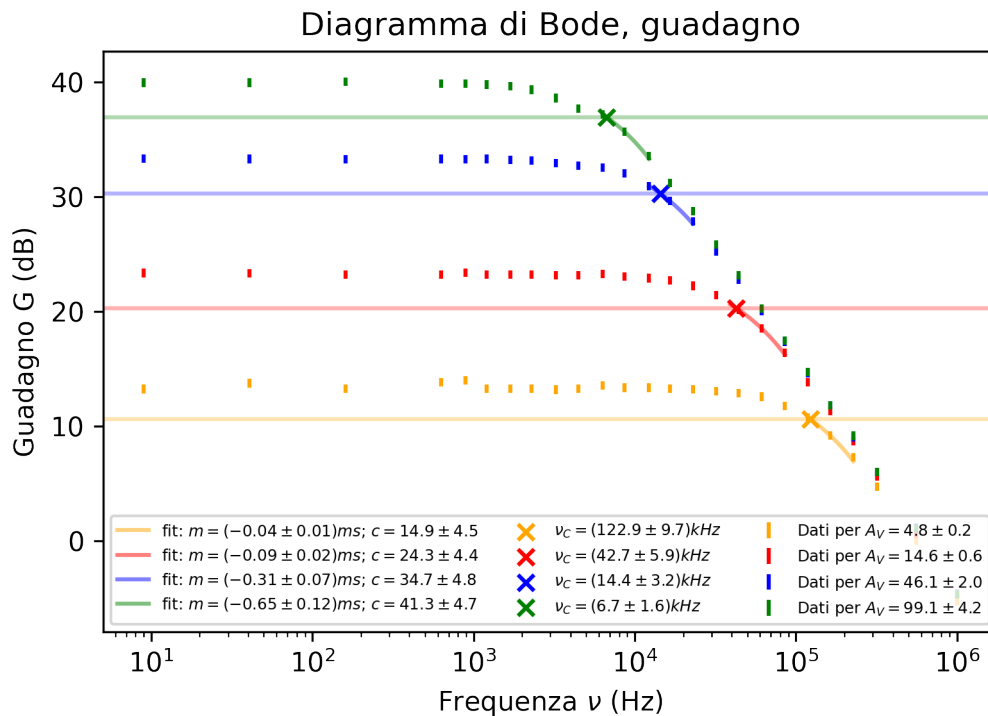


Figura 4: Diagramma di Bode

Per ogni set di dati è stata stimata la frequenza di taglio, evidenziata in figura, interpolando nella zona di linearità all'altezza di 3dB al di sotto dell'amplificazione in banda, che è stata stimata mediando i primi sei valori per ogni andamento. Per il fit lineare si è proceduto con il metodo dei minimi quadrati.

Studiando il Datasheet del componente in esame è possibile ricavare una stima del valore del prodotto guadagno per banda. Infatti dal grafico sottostante, si evince, ponendo il valore del guadagno pari a 1, che la retta caratteristica della alimentazione a 15 V interseca l'asse delle ascisse all'incirca nel punto di coordinata $(500 \pm 100)kHz$.

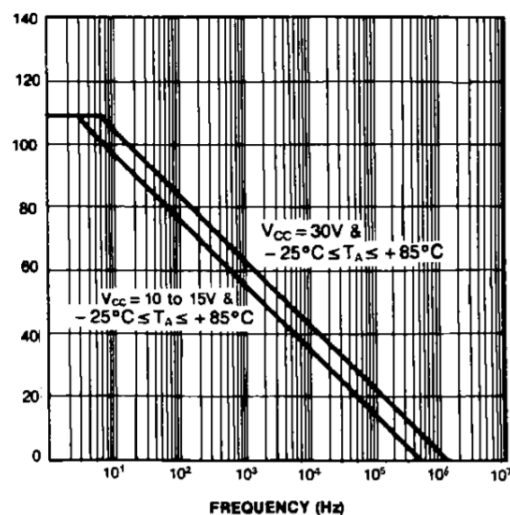


Figure 3. Open Loop Frequency Response

Figura 5: Immagine acquisita dal Datasheet del componente LM358A della Fairchild Semiconductor

Mentre i valori ottenuti moltiplicando la frequenza di taglio stimata con l'amplificazione (non in dB) corrispondente a tale frequenza sono riportati in tabella 2:

	GxBW(kHz)
$G \times BW_1$	417 ± 37
$G \times BW_2$	441 ± 61
$G \times BW_3$	470 ± 72
$G \times BW_4$	471 ± 78

Tabella 2: Valori del prodotto guadagno per banda

Ottenendo come valore medio:

$$\langle Gx BW \rangle = (450 \pm 33) kHz \quad (2)$$

6 Sommatore

Nell'ultima parte dell'esperienza abbiamo costruito un sommatore a 3 ingressi non invertente come mostrato in Figura 6. I valori dei componenti misurati sono riportati nella tabella seguente.

Resistori (Ω)
$R' = 4331 \pm 2$
$R_a = 100200 \pm 50$
$R_b = 100200 \pm 50$
$R_c = 100210 \pm 50$
$R = 2175 \pm 1$

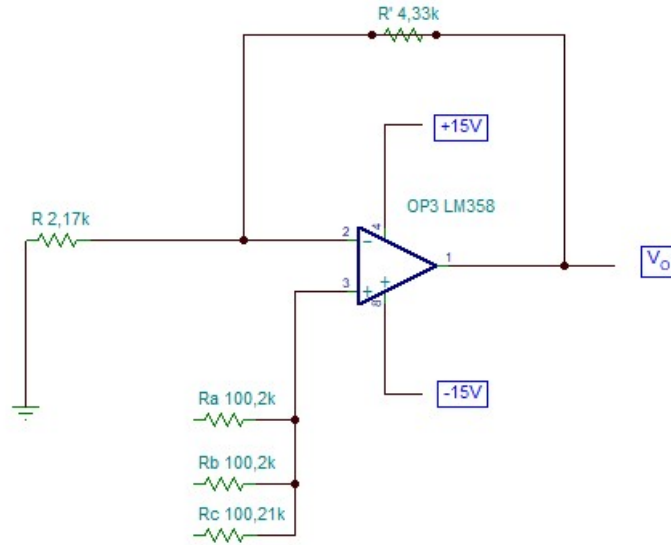


Figura 6: Sommatore a 3 ingressi non invertente

Lo studio del sommatore è stato svolto in tre diverse configurazioni.

6.1 Prima configurazione

Abbiamo misurato l'amplificazione a media frequenza dei singoli ingressi ponendo gli altri due a massa. Il valore atteso dell'amplificazione è: $\hat{A}_{v_i} = (1 + \frac{R'}{R}) \cdot \frac{R_j || R_k}{R_i + (R_j || R_k)}$ Si calcola quindi: $\hat{A}_v = (99.7 \pm 0.1)\%$ Per tutti e tre i canali si misura un'amplificazione: $A_V = (100 \pm 4)\%$, risultato perfettamente compatibile con il valore atteso.

6.2 Seconda configurazione

Ponendo l'ingresso C a massa e inviando agli ingressi A e B due segnali sinusoidali da due diversi generatori con frequenze rispettivamente pari a $(996 \pm 11)Hz$ e $(1003 \pm 11)Hz$ abbiamo osservato il fenomeno del battimento e stimato la frequenza di battimento, la cui previsione teorica è data dalla differenza delle due frequenze: $\hat{\nu}_b = (7 \pm 15)Hz$. Il valore misurato della frequenza di battimento, ottenuto misurando il periodo sull'oscilloscopio, è pari a: $\nu_b = (7.7 \pm 0.2)Hz$.

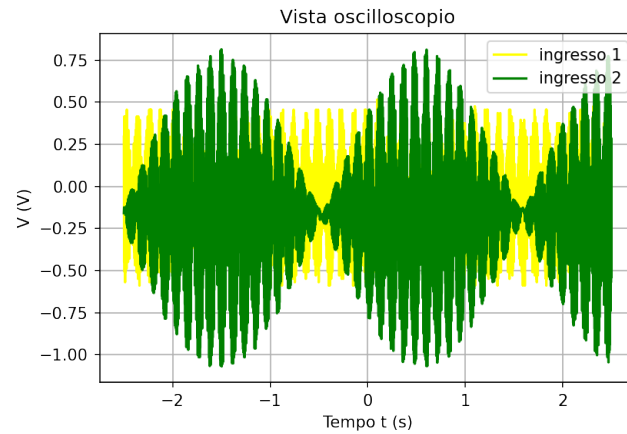


Figura 7: Fenomeno del battimento per alte frequenze

6.3 Terza configurazione

Nella terza configurazione abbiamo inviato 3 segnali diversi per ogni ingresso:

- un'onda quadra di 1kHz all'ingresso 1
- un onda sinusoidale di 5kHz all'ingresso 2
- un offset di continua di 1V all'ingresso 3

Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 8.

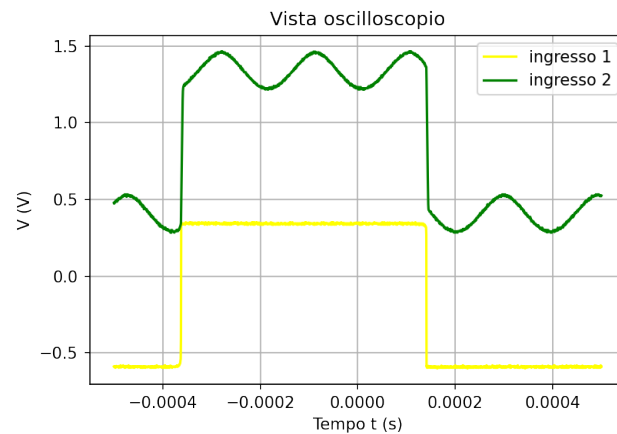


Figura 8

Dal grafico riportato (8) è possibile osservare come il sommatore realizzato abbia, senza distorsioni evidenti, sommato i tre ingressi producendo un segnale d'uscita pari alla composizione dei segnali in input. Non si osservano deformazioni dovute allo slew rate sui segnali.

7 Conclusioni

Attraverso la realizzazione dei tre circuiti è stato possibile confermare la teoria, ottenendo risultati in ogni caso compatibili entro tre incertezze con i valori attesi. Si osserva tuttavia una tendenza ad avere un valore

del prodotto guadagno per banda crescente all'aumentare dell'amplificazione; tale effetto può essere causato da comportamenti induttivi che diventano più influenti ad alte frequenze e quindi per valori di amplificazione minori. Lo slew rate del Op-Amp e la frequenza di battimento sono stati misurati effettuando misure ripetute in modo da ridurre l'incertezza sulle stesse, tuttavia non è stato possibile ottenere un'incertezza ragionevole sulla misura della frequenza di battimento, data la natura dell'incertezza sulle frequenze dell'oscilloscopio. In generale l'esperienza ha avuto come risultato una migliore comprensione del funzionamento di tali oggetti, ed ha consentito di ottenere misure quasi sempre abbastanza precise.