MISURE E STRUMENTAZIONE **31 gennaio 2019**

Prof. Michele Norgia **Secondo appello AA 2018/2019**

Tempo a disposizione 2 h (1 h solo II parte) **Aula 5.1.1 ore 8.30**

Cognome e nome: ________________________________ __________________ *(stampatello)*

Matricola e firma __ __ __ __ __ __ __________________ *(firma leggibile)*

Esercizi svolti (almeno parzialmente): precompito 1 2 3 4 (7+8+5+6+6 =32p) *(crocettare)*

N.B. si consiglia di crocettare, qui sopra, gli esercizi almeno parzialmente svolti. Si richiede di **crocettare tutti i sottopunti**, ad es. 1c), 1d), degli esercizi ai quali si è dato risposta.

Crocettare ☐ SOLO SECONDA PARTE (ESERCIZI 3 e 4)

SOLUZIONI

(35 min)

Esercizio 1

(svolgere su questo foglio e sul retro)

1a) Una pista da sci è inclinata di $\boldsymbol{\theta}$**=20** ° dall'orizzontale e questo angolo è stato misurato con $\boldsymbol{U(\theta)}$**=6** ° con $\boldsymbol{k_\theta}$**=3**. Uno sciatore si lancia sulla pista (velocità iniziale v_0=0) e scende per un percorso rettilineo. La lunghezza l del percorso è stata misurata 5 volte, ottenendo i seguenti valori:

l = 404; 397; 403; 396 [m]

Si valuti la lunghezza l e la sua incertezza tipo

1b) Se gli attriti vari comportano che solo il **40%** dell'energia potenziale (E_p=mgh) si trasformi in energia cinetica ($E_c=\frac{1}{2}mv_1^2$), quanto vale la velocità v_1 dello sciatore al termine del percorso? Se ne calcoli l'incertezza relativa, considerando che l'accelerazione di gravità sulla pista vale **g=9.80665(2) m/s²**.

1c) Quale tra le variabili misurate fornisce il contributo più rilevante di incertezza su v_1?

1d) Si misura la velocità finale dello sciatore contando il tempo di attraversamento di due fotocellule poste a distanza **d=0.500(2) m**. Il tempo di attraversamento è pari a **83333 conteggi** di un oscillatore al quarzo a **5 MHz**, che parte sincrono con il segnale della prima fotocellula. Si calcoli questa seconda misura di velocità v_2 esprimendone l'incertezza in notazione concisa.

1e) Si discuta la compatibilità tra le misure di velocità v_1 e v_2.

1a) La lunghezza l si ottiene come media campionaria delle 4 misure ripetute:

$$l = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i = \mathbf{400.0\ m}$$

L'incertezza tipo, stimata con tecnica di categoria A, si ottiene come:

$$\boldsymbol{u}(l) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(l_i - \bar{l}\right)^2} = \mathbf{2.0\ m}$$

l = 400.0(20) m

1b) L'angolo di inclinazione della pista è θ=20(2) °=0.349(35) rad.

Il dislivello della pista è $h=l\sin\theta$=136.81 m.

L'energia potenziale è $E_p=mgh$ e l'energia cinetica acquisita, pari al 40 % dell'energia potenziale persa durante la discesa, è $E_c=\frac{1}{2}mv_1^2=0.4E_p$. Si ricava dunque:

$v_1 = \sqrt{0.8gh}$ **=32.761 m/s**.

Per il calcolo della sua incertezza valutiamo prima l'incertezza del dislivello $h = l\sin\theta$

$$u(h) = \sqrt{\left[\frac{\partial h}{\partial l}\right]^2 u^2(l) + \left[\frac{\partial h}{\partial \theta}\right]^2 u^2(\theta)} = \sqrt{[\sin\theta]^2 u^2(l) + [l\cos\theta]^2 u^2(\theta)} = \sqrt{0.47 + 173.07}\ \text{m} \cong 13\ \text{m}$$

(si faccia attenzione a esprimere gli angoli in radianti).

$u_r(g) = u(g)/g \cong 2\times10^{-6}$ e $u_r(h) = u(h)/h \cong 9.6\times10^{-2}$

$\mathbf{u_r(v_1)} = \sqrt{\frac{1}{4}u_r^2(g) + \frac{1}{4}u_r^2(h)} \cong (1/2)u_r(h) \cong \mathbf{4.8\times10^{-2}}$ quasi totalmente dovuta alla misura dell'angolo θ.

$u(v_1) = v_1 u_r(v_1) = 1.573$ m/s=1.6 m/s

1c) Rivedendo i calcoli precedenti, si nota che l'incertezza di v_1 è quasi interamente dovuta alla misura dell'angolo θ.

1c) $d = 0.5$ m con $u(d) = 2\times10^{-3}$ m e $u_r(d) = u(d)/d = 4\times10^{-3}$

Il periodo dell'oscillatore vale $T_c = 1/f_c = 1/(5\ \text{MHz}) = 0.2\ \mu$s.

Considerando che l'oscillatore parte sincrono con la prima fotocellula, il valore atteso del numero di conteggi è $N_c = 83333.5$ (uniformemente distribuito tra 83333 e 83334). Il tempo di attraversamento vale quindi

$T = N_c T_c = 16.6667$ ms con $u(T) = T_c/\sqrt{12} = 5.8\times10^{-8}$ s e $u_r(T) = u(T)/T = 3.5\times10^{-6}$

$v_2 = d/T = 29.99994$ m/s

$u_r(v_2) = \sqrt{u_r^2(d) + u_r^2(T)} \cong u_r(d) = 4\times10^{-3}$ essendo $u_r(d) >> u_r(T)$.

$u(v_2) = v_2 u_r(v_2) = 0.12$ m/s e dunque la seconda misura di velocità è $\mathbf{v_2 = 30.00 \pm 0.12}$ **m/s**

1d) Siamo in presenza di due misure indipendenti della stessa grandezza che hanno fornito valori di misura diversi tra loro. Valutiamo la compatibilità tra le due misure secondo il criterio di compatibilità standard che prevede di confrontare la distanza tra i due valori con una combinazione delle due incertezze standard, secondo la relazione: $|v_1 - v_2| < k_{\text{comp}}\sqrt{u^2(v_1) + u^2(v_2)}$ con $k_{\text{comp}} = 1,2,3$ fattore di copertura per la valutazione della compatibilità. Sostituendo i valori numerici del caso, si ottiene: $|32.8\ \text{m/s} - 30.00\ \text{m/s}| < k_{\text{comp}}\sqrt{(1.6\ \text{m/s})^2 + (0.12\ \text{m/s})^2} \cong k_{\text{comp}}(1.6\ \text{m/s})$ ovvero $2.8/1.6 < k_{\text{comp}}$ e dunque $\mathbf{k_{comp} > 1.75}$.

Vi è dunque **compatibilità** tra le due misure **per un fattore di copertura $\mathbf{k_{comp} = 2}$**.

(25 min) **Esercizio 2**

(svolgere su questo foglio e sul retro)

2a) Per una misura di temperatura utilizziamo una termocoppia e un sensore integrato LM35 con sensibilità 10 mV/°C. Inizialmente si effettua una taratura della termocoppia ponendo il giunto caldo a due temperature note e tenendo il giunto freddo a temperatura ambiente costante (misurata dall'integrato LM35). Alla massima temperatura T=120 °C si misura una tensione V_{120}=1.9 mV, a T=20 °C si misura invece una tensione V_{20}=-0.1 mV. Si ricavi la sensibilità α della termocoppia e la temperatura ambiente.

2b) Si intendono misurare le tensioni prodotte dalla termocoppia e dall'integrato tramite una scheda DAQ con guadagni impostabili a G= 0.1; 1; 10 (campionatore interno a 12 bit e dinamica ±1 V). Dopo aver impostato i guadagni per i canali e la modalità di acquisizione, si calcoli la risoluzione delle due misure di temperatura.

2c) La misura della temperatura viene effettuata anche con un sensore NTC (β=4000 K, R_0 = 2.2 kΩ a 25 °C). Quanto vale la sua resistenza a 120° C?

2d) Si proponga un circuito per la lettura dell'NTC e l'elettronica di condizionamento più adeguata per la misura della termocoppia.

2a) In prima approssimazione la relazione di una termocoppia è all'incirca lineare nell'intorno della temperatura ambiente. La sua sensibilità si ottiene quindi come

$$\alpha = \frac{\Delta V_{\mathrm{TC}}}{\Delta T} = \frac{2\ \mathrm{mV}}{100\ °\mathrm{C}} = 20\ \mu\mathrm{V/°C}$$

$$T_{AMB} = 20°\mathrm{C} - \frac{V_{20}}{\alpha} = 20°\mathrm{C} - \frac{-0.1\ \mathrm{mV}}{20\ \mu\mathrm{V/°C}} = 25\ °\mathrm{C} = 120°\mathrm{C} - \frac{V_{120}}{\alpha} = \mathbf{25°C}$$

2b) Dobbiamo acquisire due canali: LM35 e termocoppia.

Per un canale (LM35) ci aspettiamo 250 mV di segnale (25°C×10 mV/°C), è quindi sensato impostare $\mathbf{G_1=1}$, corrispondente alla dinamica di ingresso ±1 V.

Per il secondo canale misuriamo tensioni da V_{20}=-0.1 mV a V_{120}=1.9 mV, per cui impostiamo $\mathbf{G_2=10}$, corrispondente alla dinamica di ingresso ±100 mV.

Sicuramente è preferibile una **modalità di acquisizione differenziale**, dati l'ampiezza del segnale della termocoppia.

La risoluzione di misura in tensione del primo canale vale $\Delta V_1 = \frac{D}{2^n} = \frac{2\ \mathrm{V}}{2^{12}} \cong 0.49\ \mathrm{mV}$, che corrisponde a

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta V_1}{10\ \mathrm{mV/°C}} = \mathbf{0.049°C}$$

La risoluzione di misura in tensione del secondo canale vale $\Delta V_2 = \frac{D}{2^n} = \frac{200\ \mathrm{mV}}{2^{12}} \cong 49\ \mu\mathrm{V}$, che corrisponde a

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta V_2}{20\ \mu\mathrm{V/°C}} = \mathbf{2.45°C}$$

2c) La resistenza dell'NTC a T=120°C=393.15 K vale $R = R_0 e^{-\beta(1/T_0 - 1/T)} = \mathbf{86\ \Omega}$

2d) Il sensore NTC, avendo come uscita un valore di resistenza, può essere letto in diversi modi. Ad esempio fornendo una corrente costante, oppure attraverso in un partitore di resistenza (semiponte), oppure inserendolo in un ponte di misura.

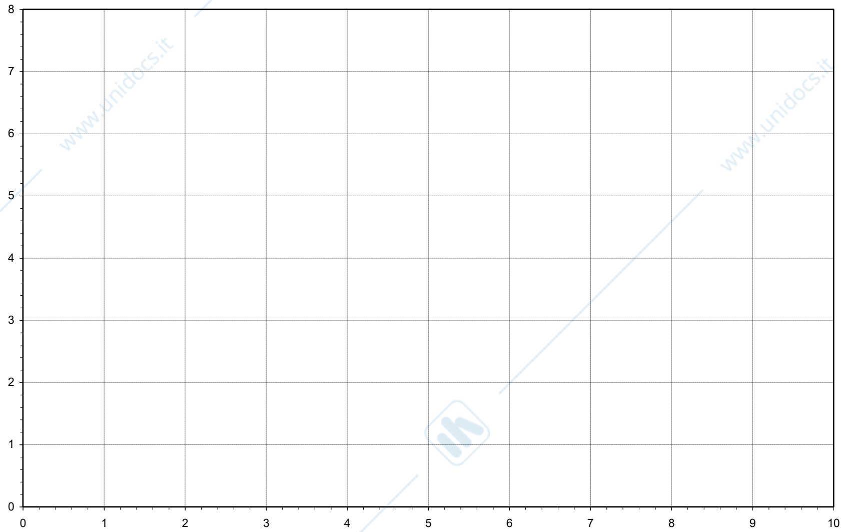
Per la misura del segnale della termocoppia è adeguato un amplificatore da strumentazione.

(30 min)

Esercizio 3

(svolgere su questo foglio e sul retro)

3a) Intendiamo acquisire con un oscilloscopio digitale due tensioni continue, pari a V_1=200 mV e V_2=12.5 mV.
Si descrivano le impostazioni dell'oscilloscopio adatte ad effettuare la misura delle due tensioni.
3b) Il terzo canale dell'oscilloscopio viene utilizzato per misurare il tempo di salita di un segnale digitale, da un livello basso di 0 V a 3.3 V. Si descrivano le nuove impostazioni dell'oscilloscopio per visualizzare il tempo di salita (che dovrebbe essere di 100 ns) e le due tensioni continue. Si disegni la corrispondente schermata oscillografica.
3c) Che banda analogica deve avere l'oscilloscopio per poter effettuare correttamente la misura?
3d) L'oscilloscopio dispone della banda analogica richiesta, ma il suo campionatore è limitato a 5 MSa/s. Potrebbe effettuare ugualmente la misura richiesta? Con quale tecnica?



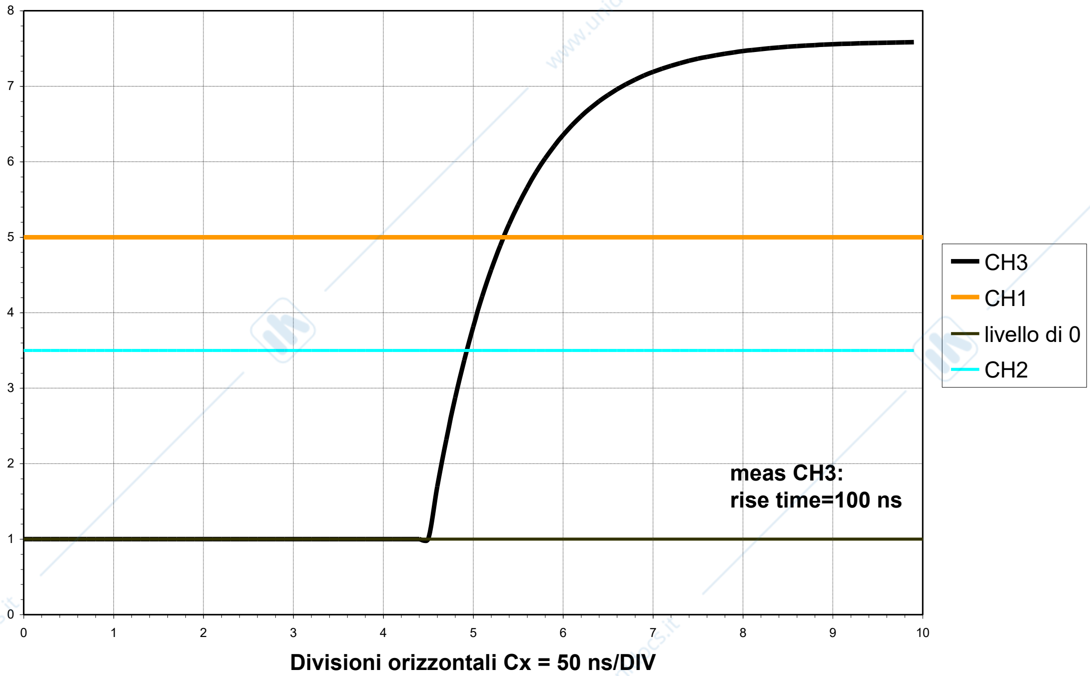
3a) Si acquisiscono i due segnali con i canali CH1 e CH2 dell'oscilloscopio, posto in modalità **DC** (sono in continua). Il *trigger* viene posto in modalità **AUTO**, in quanto il segnale continuo non fornisce fronti su cui agganciare il *trigger*. La base dei tempi viene impostata a un valore che permetta di visualizzare in tempo reale eventuali variazioni di temperatura, non necessita comunque una particolare velocità. Ad esempio potremmo impostare 10 ms/DIV.
Per sfruttare la dinamica dell'oscilloscopio, si pone ad esempio il livello di 0 V sulla prima divisione dello schermo. Possiamo quindi impostare 50 mV/DIV come coefficiente di amplificazione verticale per CH1 e 5 mV/DIV per CH2.

3b) Connettiamo a CH3 il segnale digitale, in DC. La sua ampiezza è pari a 3.3 V, per cui scegliamo 0.5 V/DIV, ponendo sempre il livello di 0 sulla prima divisione dello schermo.

Impostiamo in questo caso il trigger sul fronte di salita di CH3, a livello 1.5 V in DC (è una scelta possibile, ovviamente non l'unica).

Dato che il tempo di salita da visualizzare è 100 ns, possiamo scegliere 50 ns/DIV come coefficiente di amplificazione orizzontale.

La modalità di acquisizione in questo caso può essere NORM, AUTO o anche SINGLE-SHOT.



3c) La banda deve essere tale da visualizzare senza errori rilevanti il fronte di salita:

$$B >> \frac{0.35}{t_{rise}} = 3.5\,\text{MHz}\ .$$

Ad esempio una banda di 40 MHz sarebbe sufficiente.

3d) Sì, perché in questo caso sarebbe adeguata una tecnica di **acquisizione in tempo equivalente** (sequenziale o casuale), in quanto il segnale probabilmente non è periodico, ma è sicuramente ripetitivo: la risposta al gradino sarà sempre la stessa, non ci sono indicazioni invece sul segnale digitale (se trasmette informazione sicuramente non è periodico).

.

(30 min)

Esercizio 4

(svolgere su questo foglio e sul retro)

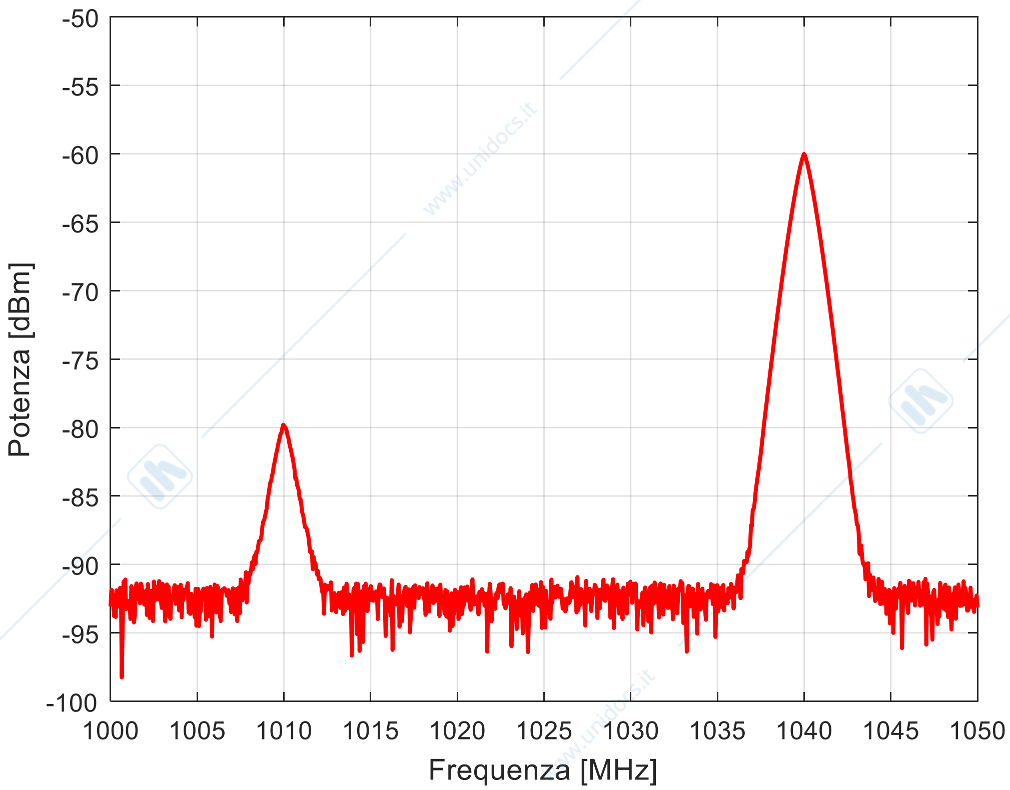
4a) In figura è riportato lo schermo di un analizzatore di spettro a supereterodina. Si descrivano tutte le impostazioni scelte dall'utente per ottenere questa misura.

4b) Si stimino il minimo tempo necessario per effettuare questa scansione e la *noise figure* dell'analizzatore.

4c) Si scriva una possibile espressione del segnale misurato, riportandone i valori numerici.

4d) Che cosa cambierebbe dimezzando il valore di *RBW*? Si riporti sullo stesso grafico la nuova traccia.

4e) Un convertitore A/D a 12 bit e 2 MSa/s, privo di altre non-idealità ad eccezione di un livello di rumore interno $V_{N,eff}$=550 μV, ha una dinamica da 0 V a 2 V. Si calcolino la risoluzione e il numero di bit equivalenti del convertitore.



4a) Impostazioni:

f_{START}**=1 GHz** e f_{STOP}**=1030 MHz**, dunque con ***SPAN*=50 MHz**.

Reference level RL=-50 dBm con amplificazione verticale A_y**=5 dB/DIV**

Tutte le righe spettrali visualizzate hanno una piena larghezza a metà altezza (FWHM) dal picco che è uguale alla r*esolution bandwidth* ***RBW*=1 MHz** (1/10 di divisione a -3dB dal picco).

4b) Il tempo di scansione minimo vale circa $ST \cong 3\dfrac{SPAN}{RBW^2} = 3\dfrac{50\cdot 10^6}{(1\cdot 10^6)^2}$ =**0.15 ms**

Dove con il fattore 3 si è tenuto conto del tempo di risposta del filtro quasi-gaussiano presente all'interno dell'analizzatore di spettro.
Dal fondo di rumore ricaviamo la *noise figure* dell'analizzatore:

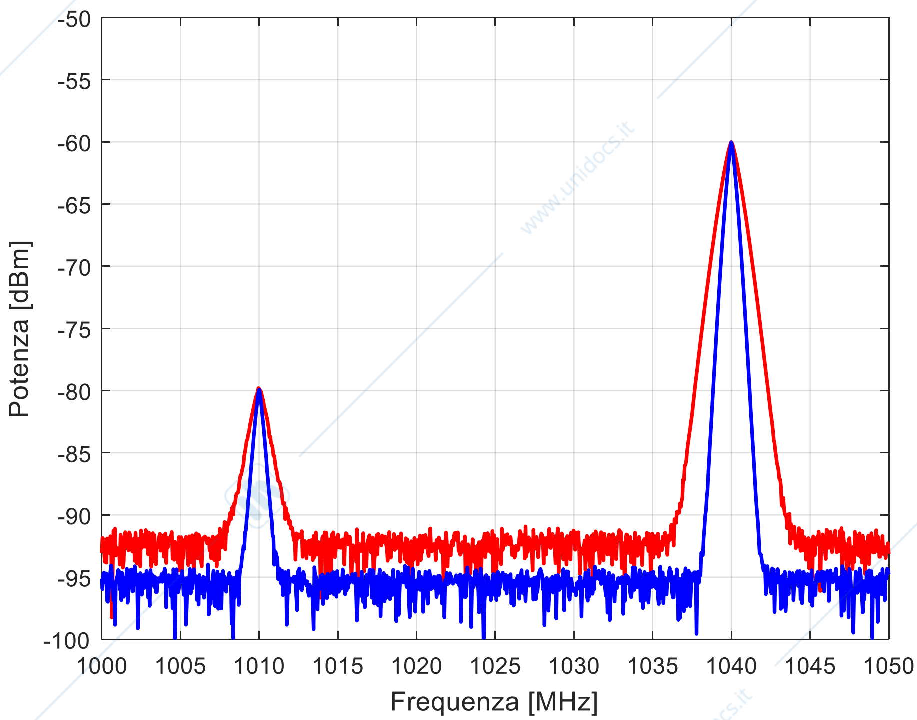
P_{FLOOR}**=-92 dBm** = *NF·kT·RBW*= *NF*-174 dBm/Hz+60 dB·Hz da cui ***NF* = 22 dB**.

4c) Il segnale è dato dalla somma di due sinusoidi:

$$s(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 + \varphi_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 + \varphi_2)$$

L'analizzatore di spettro non misura le fasi, quindi non possiamo ricavarle. Le frequenze valgono
f_1 = 1010 MHz; f_2 = 1040 MHz
Le ampiezze si ricavano dalle due potenze (l'impedenza di ingresso vale sempre R =50 Ω):
$A_1 = \sqrt{2RP_1} \cong 31.6\ \mu\text{V}$, avendo considerato che -80 dBm corrispondono a P_1= 10^{-11} W
$A_2 = \sqrt{2RP_2} \cong 316\ \mu\text{V}$, avendo considerato che -60 dBm corrispondono a P_2= 10^{-9} W.

4d) Dimezzando il valore di *RBW*, che scende a 500 kHz, si ottiene un tempo di scansione 4 volte più lungo (0.6 ms), un fondo di rumore che si abbassa di 3 dB e la larghezza dei picchi che si dimezza.



:

4e) La risoluzione dimensionale è $\Delta V = D/2^n$=(2 V)/(2^{12})=(2 V)/(4096)≅0.49 mV.
Per ricavare il numero di bit equivalenti n_e, utilizziamo la formula

$$n_e = n - \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{\sigma_q^2 + \sigma_N^2}{\sigma_q^2}\right) = n - \frac{1}{2}\log_2\left(1 + \frac{\sigma_N^2}{\sigma_q^2}\right)$$

dove n è il numero di bit, σ_q^2 è la varianza di quantizzazione e σ_N^2 è la varianza del rumore interno.

Essendo

$$\sigma_q^2 = u_q^2 = \frac{(\Delta V)^2}{12} \cong 2\times10^{-8}\ \text{V}^2 \ \text{e} \ \sigma_N^2 = (V_{N,\text{eff}})^2 \cong 3\times10^{-7}\ \text{V}^2$$

si ottiene

$$n_e = n - \frac{1}{2}\log_2\left(1 + \frac{30}{2}\right) \cong n - \frac{1}{2}\log_2(16) = n - 2 = 10 \text{ bit}$$

Esercizio ___ *(continua)*

[foglio addizionale per eventuale esercizio "lungo"]

INDICARE IL RICHIAMO IN FONDO ALLA PAGINA DELL'ESERCIZIO CORRISPONDENTE