

Rapporto tecnico n. 427

Realizzazione di un generatore di segnale Random PWM a frequenza variabile secondo la logica pseudo casuale di Fibonacci, tramite la scheda a microcontrollore STM32 NUCLEO F411RE®

Autori:

V. Presti¹, G. Vitale², G. Marsala¹, A. Sauro¹, S. G. Scordato¹

¹INM – Institute of Marine Engineering
National Research Council of Italy

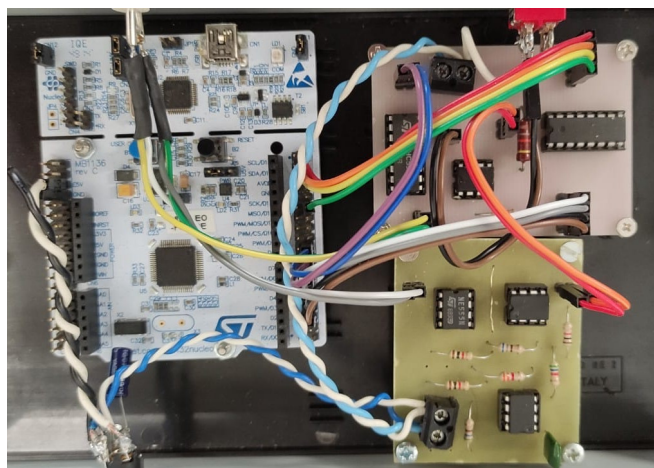
²ICAR – Institute for High Performance
Computing and Networking
National Research Council of Italy

“Esemplare fuori commercio per il deposito legale agli effetti della Legge 15 aprile 2004, n. 106”

Gli autori sono i soli responsabili del contenuto di questo rapporto tecnico

Data di creazione: 22 dicembre 2021

Prima distribuzione al pubblico e deposito legale: 22 dicembre 2021



Sede principale: Via di Vallerano, 139 – 00128 Roma
P. IVA 02118311006 – C.F. 80054330586

E-mail: segreteria.inm@cnr.it

PEC: protocollo.inm@pec.cnr.it

Tel. 06-50299222 - Fax 06-5070619

<http://www.inm.cnr.it>

Sede di Roma "Sezione di Acustica e Sensoristica O.M. Corbino"
Area della Ricerca di Tor Vergata
Via del Fosso del Cavaliere, 100 - 00133 Roma

Sede di Genova
Area della ricerca di Genova
Via De Marini, 6 –16149 Genova

Sede di Palermo
Area della ricerca di Palermo
Via Ugo La Malfa, 153 –90146 Palermo

INDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUZIONE..... | 1 |
| 1 REALIZZAZIONE DEL GENERATORE..... | 2 |
| 1.1 DESCRIZIONE FUNZIONALE..... | 2 |
| 2 REALIZZAZIONE DEL CONTROLLO..... | 3 |
| 2.1 SCHEMA DEL CONVERTITORE DIGITALE/ANALOGICO..... | 3 |
| 2.2 PROGRAMMAZIONE DEL CONTROLLO..... | 4 |
| 3 REALIZZAZIONE DELL'OSCILLATORE CONTROLLATO IN TENSIONE..... | 5 |
| 4 RISULTATI..... | 7 |
| 4.1 PARAMETRI DEL SEGNALE PWM GENERATO DALL'OSCILLATORE..... | 7 |
| 4.2 ANALISI SPETTRALE..... | 8 |
| APPENDICE A – LISTATO DEL CODICE..... | 10 |
| APPENDICE B – ELENCO DEI COMPONENTI ELETTRONICI..... | 11 |

INTRODUZIONE

Come è noto la tecnica di modulazione Pulse Width Modulation (PWM), usata per la generazione dei segnali di controllo nei convertitori switching, genera armoniche con una frequenza fondamentale pari a quella del segnale portante. Tali armoniche devono essere sopresse per rendere i convertitori elettromagneticamente compatibili con l'ambiente ed i dispositivi circostanti mediante filtri. Un modo per diminuire la potenza associata a ciascuna armonica consiste nel variare la frequenza portante in modo random, in tal caso compariranno più armoniche nello spettro ma con una potenza inferiore poiché quest'ultima dipende dal quadrato dell'ampiezza; il metodo è noto come *random modulation*.

In questo documento si descrive un sistema per la generazione di segnali PWM basato su un circuito analogico pilotato da una scheda a micro controllore ST NUCLEO-F411RE[®]. Il circuito è in grado di generare il segnale di pilotaggio per un gate di un dispositivo switching di potenza facendo variare la frequenza in un intervallo prefissato e con un dato Duty Cycle. Nel seguito viene descritto il principio di funzionamento del circuito, la realizzazione sperimentale ed alcune forme d'onda per dimostrare la correttezza del funzionamento.

1. REALIZZAZIONE DEL GENERATORE

Con il dispositivo di seguito descritto viene generato un segnale per il controllo dei convertitori DC/DC con tecnica PWM, con frequenza di commutazione variabile e Duty Cycle costante.

1.1 DESCRIZIONE FUNZIONALE

Allo scopo di generare un segnale PWM a frequenza variabile pseudo-casuale (Random PWM), si è realizzato un oscillatore controllato in tensione (VCO). Con il segnale analogico generato da un convertitore digitale-analogico (DAC), al variare del livello di tensione di questo segnale (VCL) viene quindi controllata la frequenza dell'oscillatore. Per ottenere la codifica binaria degli ingressi al DAC secondo la logica pseudo-casuale di Fibonacci ed aggiornata attraverso un contatore decimale, è stata programmata la scheda a micro controllore ST NUCLEO-F411RE®.

Secondo lo schema della figura 1 è previsto l'invio di comandi da terminale al controllore, tramite comunicazione seriale per abilitare il contatore (ENABLE); ma per motivi pratici realizzativi l'abilitazione viene comunque gestita con un deviatore.

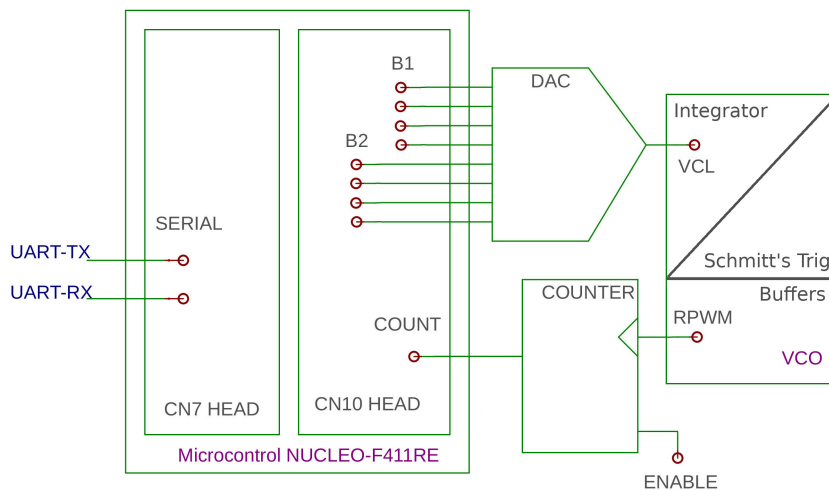


Figura 1: schema funzionale del generatore.

2. REALIZZAZIONE DEL CONTROLLO

Il dispositivo di controllo è realizzato sia per ottenere il segnale analogico VCL, sia per il conteggio degli impulsi del segnale PWM.

2.1 SCHEMA DEL CONVERTITORE DIGITALE/ANALOGICO

Il controllore gestisce la codifica binaria degli 8 ingressi digitali al convertitore analogico DAC. Attraverso la scala di resistenze R – 2R e la resistenza di retroazione (RFB) si ottiene quindi il segnale di controllo VCL, dal peso binario degli ingressi.

Il contatore ad 8 ingressi binari COUNTER esegue il conteggio decimale degli impulsi di clock, ottenuti dai fronti di salita del PWM. In base alla logica del conteggio, esso abilita il controllore ad aggiornare la codifica binaria degli ingressi al convertitore ogni 16 impulsi. Nel caso in cui il contatore non è abilitato si otterrà quindi il segnale PWM a frequenza fissa.

La coppia degli amplificatori operazionali è impiegata per ottenere infine un intervallo di livelli di tensione del segnale VCL, tale che l'oscillatore generi il segnale Random PWM con banda in frequenza 12 – 30KHz.

In figura 2 è rappresentato lo schema elettrico del controllo, dove è anche descritta la nomenclatura specifica dei segnali della scheda con controllore F411RE[®].

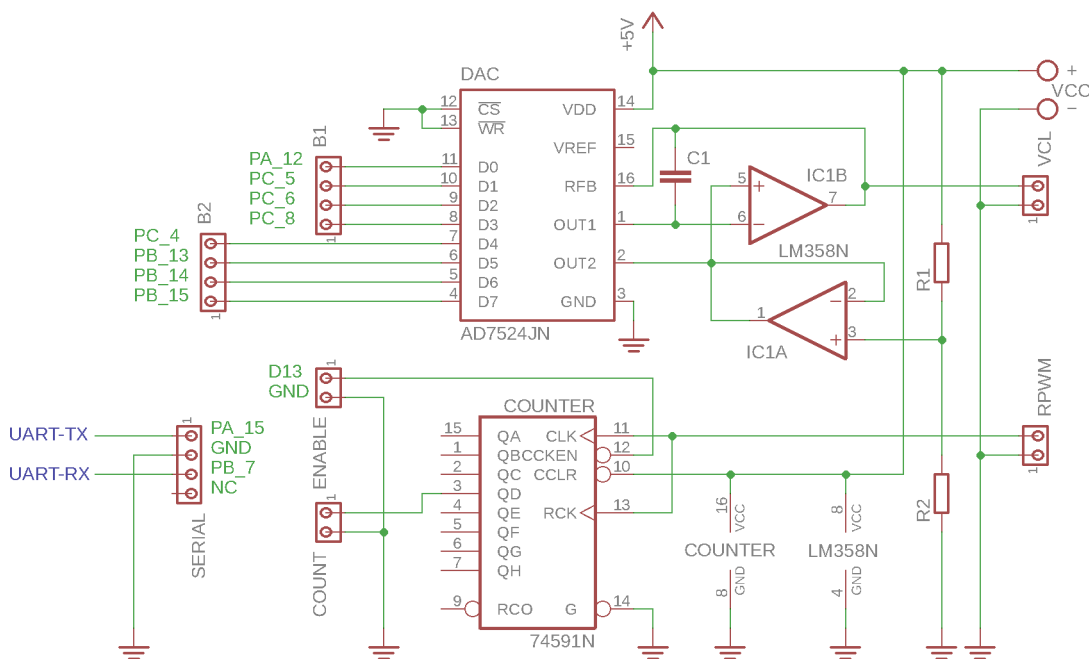


Figura 2: schema del controllo, realizzato con un convertitore D/A ed un contatore decimale.

2.2 PROGRAMMAZIONE DEL CONTROLLO

In questa sezione è descritta la programmazione con cui il controllore genera la sequenza numerica secondo la logica pseudo casuale di Fibonacci (in appendice è riportato il listato del codice).

Il generatore della sequenza è istanziato dinamicamente attraverso il puntatore all'oggetto `rndFib`; la classe di questi oggetti è nominata `FibonacciLFSR`¹ (3^a linea del codice).

Con l'oggetto `bOut` della classe `BusOut` il valore della variabile decimale `rndValue` viene convertito in codifica binaria ad 8 bit, gestita quindi come ingresso digitale al convertitore analogico (linee 6 e 7). La chiamata alla funzione `onCount()` con l'oggetto `counterInt`, aggiorna il valore della variabile decimale al fronte di salita del segnale di conteggio del contatore, con il metodo `rise()` riportato in linea 21.

Con la classe `Serial` viene infine istanziato nella linea 17 l'oggetto `console`; questo permette di inviare un segnale seriale da terminale ed elaborato come carattere alfanumerico in codifica ASCII al controllore, in modo ciclico con l'istruzione `for()`. La comunicazione di questo segnale permette quindi di modificare il valore della variabile `enabled`, con la quale viene appunto gestito il segnale di abilitazione del contatore.

1 Il generatore della sequenza è implementato con l'algoritmo Linear Feedback Shift Register.

3. REALIZZAZIONE DELL'OSCILLATORE CONTROLLATO IN TENSIONE

Come è possibile osservare dallo schema della figura seguente l'oscillatore è realizzato con due coppie di operazionali, dove ciascuna coppia è contenuta nell'integrato LM6172N. L'oscillatore stesso controlla quindi il temporizzatore NE555, ottenendo il segnale di controllo PWM.

Nello specifico, con l'operazionale IC1A si è realizzato un circuito integratore per generare un segnale a dente di sega. Con l'operazionale IC1B si è realizzata quindi un'interfaccia invertente per il controllo delle fasi di carica e scarica della capacità dell'integratore.

Con la coppia di operazionali IC2A e IC2B è stato realizzato un comparatore invertente con isteresi (Schmitt's trigger) ed un'interfaccia invertente. Con il segnale generato dal comparatore viene controllata l'interfaccia IC1B; con l'interfaccia IC2B viene infine controllato il temporizzatore INV-BUF, con cui si è realizzata un'ulteriore interfaccia invertente con soglie di isteresi.

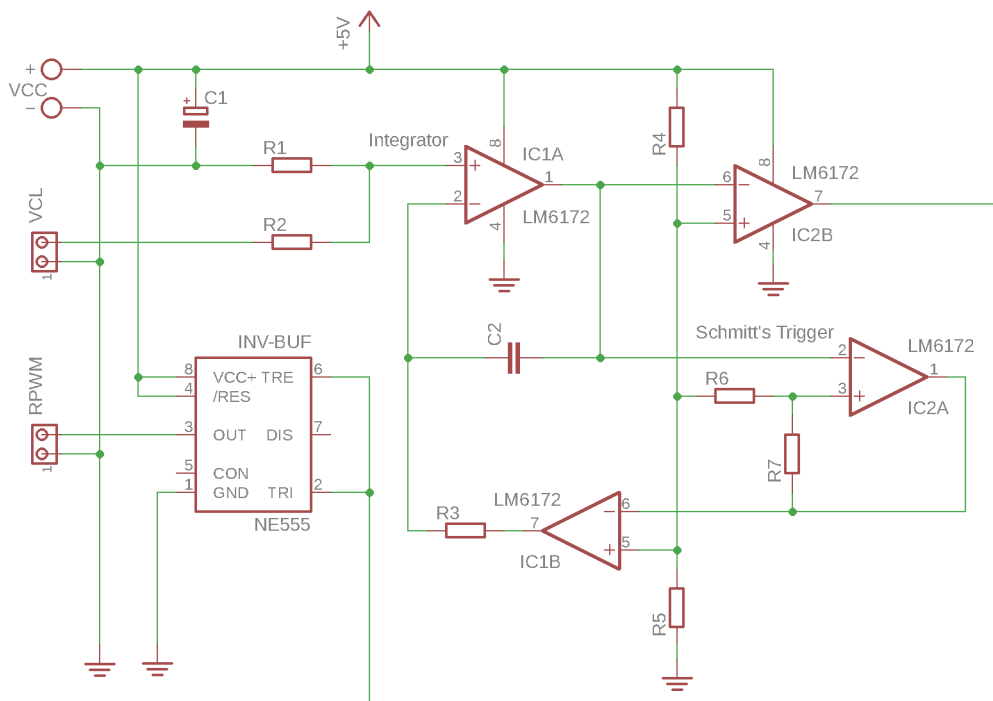


Figura 3: schema dell'oscillatore VCO.

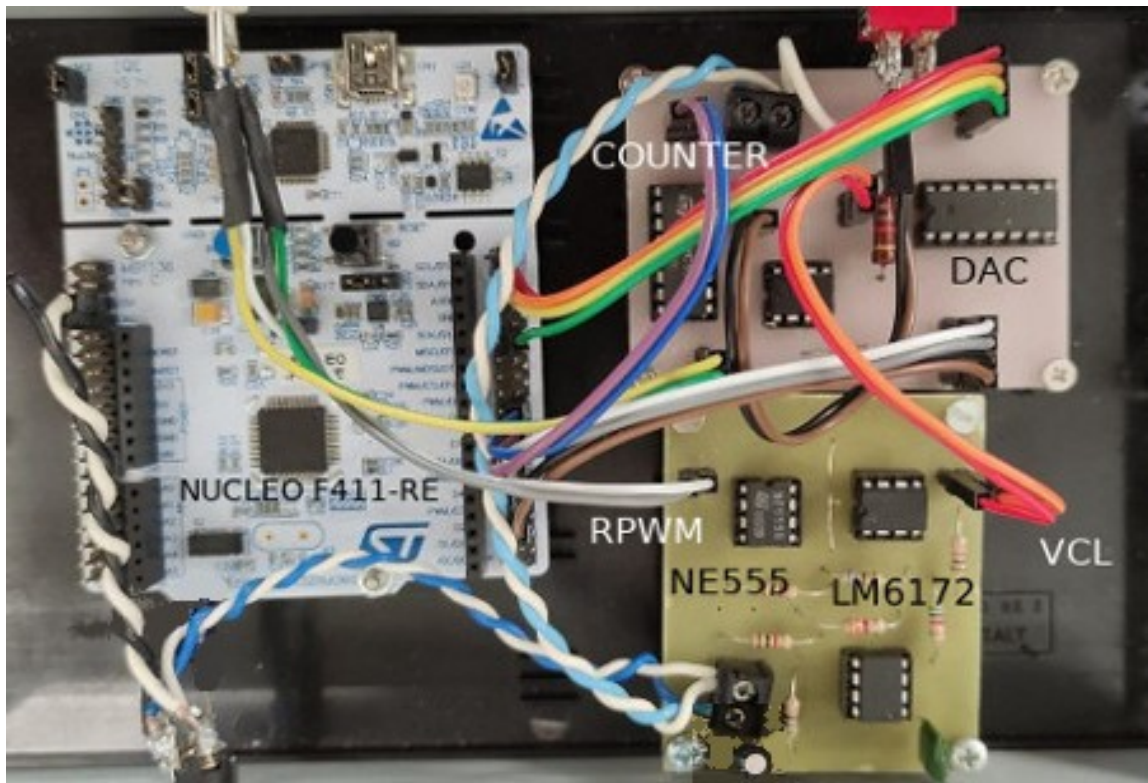


Figura 4: realizzazione del generatore del segnale Random PWM (RPWM).

4. RISULTATI

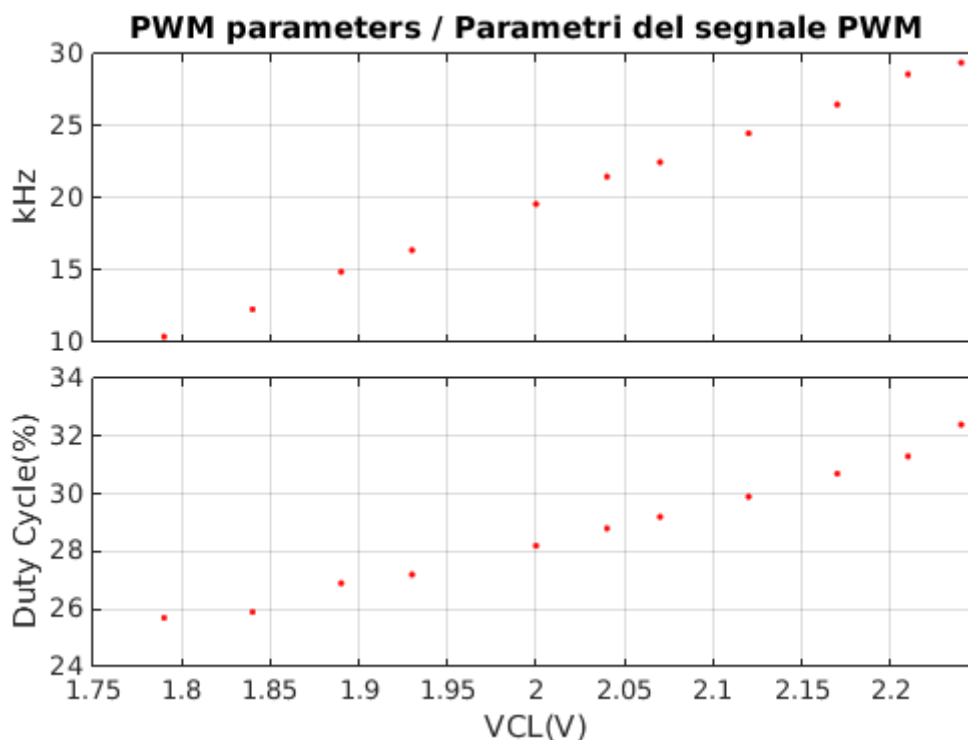
In questo capitolo sono descritti i parametri del segnale PWM, generato e quindi controllato dall'oscillatore. Con l'analisi spettrale del segnale viene infine evidenziato il vantaggio di adottare un controllo sui parametri del PWM.

4.1 PARAMETRI DEL SEGNALE PWM GENERATO DALL'OSCILLATORE

Con la tabella sottostante sono riportate le corrispondenze tra il livello di tensione del controllo VCL, il quale controlla la frequenza ed il Duty Cycle del segnale.

| VCL (V) | Frequency (kHz) | Duty Cycle (%) |
|---------|-----------------|----------------|
| 1.79 | 10.4 | 25.7 |
| 1.84 | 12.3 | 25.9 |
| 1.89 | 14.9 | 26.9 |
| 1.93 | 16.4 | 27.2 |
| 2.00 | 19.6 | 28.2 |
| 2.04 | 21.5 | 28.8 |
| 2.07 | 22.5 | 29.2 |
| 2.12 | 24.5 | 29.9 |
| 2.17 | 26.5 | 30.7 |
| 2.21 | 28.6 | 31.3 |
| 2.24 | 29.4 | 32.4 |

Tabella 1



4.2 ANALISI SPETTRALE

In figura 5 si osservano le tracce degli spettri del segnale generato a differenti frequenze con portante fissa, dove ciascuna armonica fondamentale è evidenziata con la relativa misura della frequenza ed ampiezza².

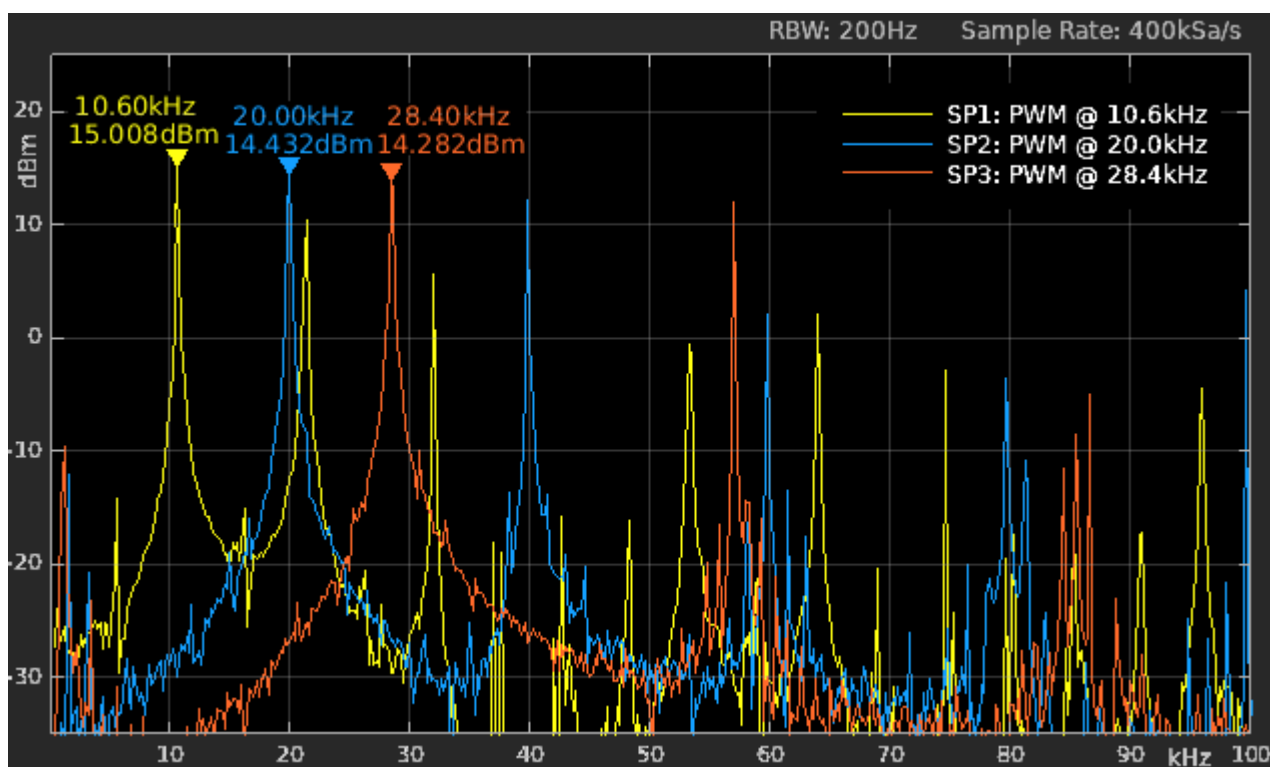


Figura 5: tracciati degli spettri del segnale PWM, acquisiti a frequenza fissa.

In seguito si osserva infine come nello spettro del segnale Random PWM riportato nell'ultima figura, non sono distinguibili le armoniche come nel caso della frequenza fissa; a frequenza variabile è distinguibile la banda delle frequenze 12 – 30kHz circa, se riferita ad un livello di -20dBmW. Da questa stessa figura si osserva la seconda banda compresa tra 30 kHz e 60 kHz, dove è evidente come le ampiezze a tali frequenze sono al di sotto di 0dBmW. A frequenze superiori il segnale può già considerarsi annullato.

² La misura delle ampiezze è calcolata nota la potenza espressa in dBmW (abbreviata in dBm), dissipata da un ipotetico carico ohmico di 50 Ω , se ai suoi capi viene applicato il segnale in esame.

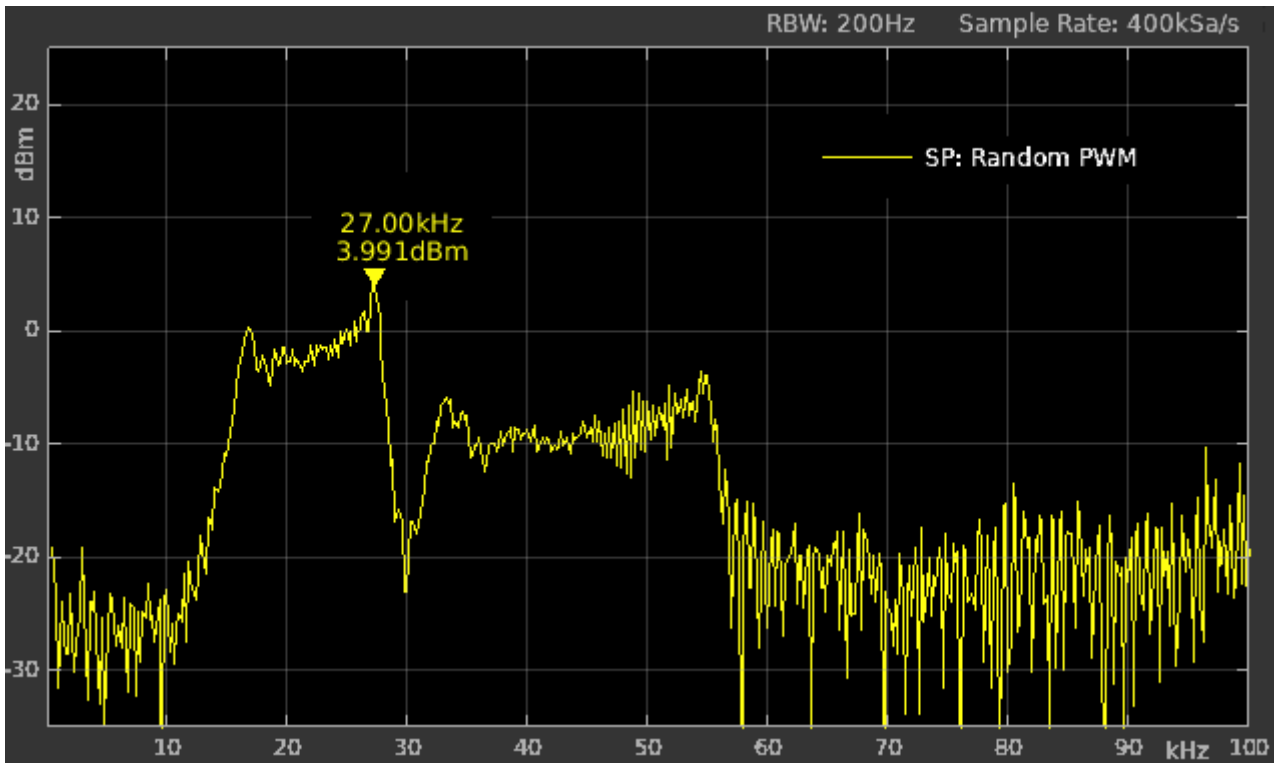


Figura 6: spettro del segnale PWM a frequenza variabile.

In conclusione, dal confronto degli spettri del segnale con portante a frequenza fissa con quest'ultimo, si evidenzia il vantaggio della sensibile attenuazione delle ampiezze di oltre 10dBmW. La caratteristica di questo segnale si riflette quindi sui fenomeni di ondulazione (Ripple) della tensione di uscita nel caso di un convertitore switching, pilotato con questo segnale.

APPENDICE A – LISTATO DEL CODICE

```
1. #include "mbed.h"
2. #include "FibonacciLFSR.h"
3.
4. FibonacciLFSR *rndFib = new FibonacciLFSR (rndFib->LFSR_8);
5. InterruptIn *counterInt = new InterruptIn (PB_2);
6. BusOut *bOut=new BusOut(PA_12,PC_5,PC_6,PC_8,PC_4,PB_13,PB_14,PB_15);
7. uint8_t rndValue = 0x00;
8. void onCount (void)
9. {
10.     bOut->write (rndValue);
11.     rndValue = rndFib->getRandom ();
12.     return;
13.}
14.
15.char c;
16.bool doQuit = false, enabled = false;
17.Serial *console = new Serial (PA_15, PB_7, 9600);
18.DigitalOut *ledOut = new DigitalOut (D13, enabled);
19.int main (void)
20.{
21.    for (counterInt->rise (onCount); !doQuit; ledOut->write (enabled)) {
22.        c = console->getc();
23.        if (c == 'c')
24.            enabled = !enabled;
25.        else if (c == 'I'
26.            enabled = false;
27.    }
28.}
```

APPENDICE B – ELENCO DEI COMPONENTI ELETTRONICI

Componenti dell'oscillatore controllato:

- integrato NE555 (timer in package DIP a 8 piedini)
- 2 integrati LM6172 (2 amplificatori operazionali, in package DIP a 8 piedini)
- $R1 = R4 = R5 = 1k\Omega$, $R2 = 5,6k\Omega$, $R3 = 560\Omega$, $R6 = 680\Omega$, $R7 = 3,3k\Omega$
- $C1 = 100\mu F$ elettrolitico, $C2 = 39nF$

Componenti dello stadio di controllo:

- integrato LM358 (2 amplificatori operazionali, in package DIP a 8 piedini)
- integrato AD7524JN (convertitore digitale/analogico 8 ingressi binari, in package DIP a 16 piedini)
- integrato M74HC590 (contatore 8 ingressi binari, in package DIP a 16 piedini)
- $R1 = 18k\Omega$, $R2 = 10k\Omega$
- $C1 = 100nF$