

# 1 Generatori di forme d'onda

Lo studio dei generatori di forme d'onda, considerati tra gli strumenti di misura, assume particolare interesse dal momento che essi vengono spesso utilizzati per pilotare opportunamente un sistema sotto osservazione proprio allo scopo di rilevarne determinate caratteristiche. Pertanto un generatore di forme d'onda è spesso un componente fondamentale di un sistema di misura.

Un generatore di forme d'onda (o generatore di segnali) è un sistema in grado di fornire segnali periodici con andamenti temporali diversi e con la possibilità, per l'utente, di definire la frequenza, l'ampiezza e altri parametri caratteristici della forma d'onda (come per esempio il *duty-cycle* di un'onda rettangolare). Alcuni generatori sono inoltre in grado di fornire segnali modulati (con modulazioni d'ampiezza e d'angolo, analogiche o digitali).

Le forme d'onda tipicamente disponibili sono quelle di impiego più comune: segnali sinusoidali, segnali a onda quadra o rettangolare o con andamento triangolare (o a dente di sega). I primi possono essere utilizzati per rilevare (per punti) la risposta in frequenza di un amplificatore; generatori sinusoidali ad alte frequenze vengono invece utilizzati per produrre segnali di prova per sistemi di telecomunicazioni (trasmettitori, ricevitori, amplificatori, ecc.). Un segnale a onda quadra può essere utilizzato per esempio per verificare se un attenuatore è compensato o meno, o per esaminare il comportamento di un *flip-flop*. Segnali di forme diverse vengono impiegati (per esempio in fase di collaudo di un apparato) per studiare la risposta di quell'apparato a quel particolare tipo di segnale.

## 1.1 Sintetizzatori di frequenza

A partire dagli anni '60 (del secolo scorso) i generatori di segnali basati su circuiti tradizionali - in cui la frequenza di oscillazione viene determinata dal valore di uno o più elementi circuitali (resistenze, capacità, ...) - sono stati gradualmente sostituiti da sistemi basati sulla cosiddetta "sintesi di frequenza".

La caratteristica di questi sistemi è la possibilità di generare tutte le possibili frequenze (ovviamente all'interno di un determinato intervallo, caratteristico del particolare strumento) a partire da una sola frequenza di riferimento, normalmente ottenuta all'interno dello strumento stesso da un oscillatore a quarzo. Tali oscillatori, come è noto, si caratterizzano per la loro elevata stabilità in frequenza nel tempo e con la temperatura e questo assicura che i segnali prodotti dal generatore siano ugualmente stabili in frequenza.

I sintetizzatori di frequenza possono essere classificati in sistemi basati sulla *sintesi diretta* e in quelli che operano con la *sintesi indiretta* (Figura 1). Tra i primi (sintesi diretta) è possibile una ulteriore suddivisione in *sintetizzatori analogici* e *sintetizzatori digitali*; i sistemi a sintesi indiretta impiegano anelli ad aggancio di fase (PLL) e non verranno trattati in questi appunti.

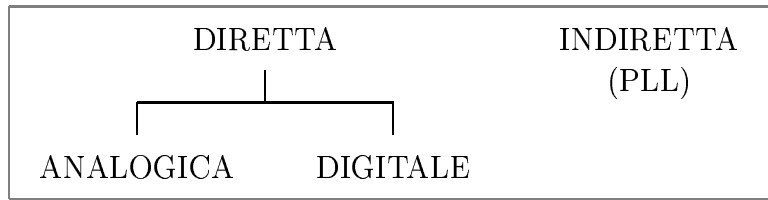


Figura 1 - Classificazione dei sintetizzatori di frequenza

### 1.1.1 Sintesi analogica diretta

Nei sistemi a sintesi analogica diretta, le diverse frequenze vengono ottenute mediante operazioni elementari sulle frequenze:

- somma (e differenza) tra frequenze: si ottengono mediante un *mixer* e opportuno filtraggio dell'uscita da questo; come è noto, infatti, dal prodotto di due segnali sinusoidali si ottengono la frequenza somma e la frequenza differenza:

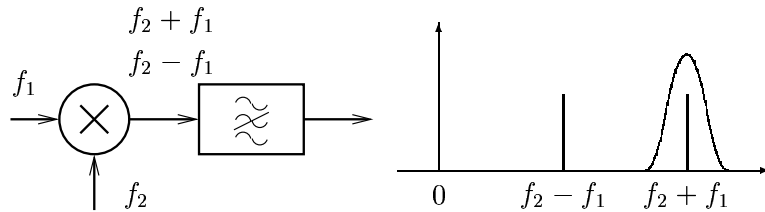


Figura 2 - Somma (o differenza) di frequenze.

$$V_1 \sin(2\pi f_1 t) \cdot V_2 \sin(2\pi f_2 t) = \frac{V_1 V_2}{2} \{ \cos[2\pi(f_1 - f_2)t] - \cos[2\pi(f_1 + f_2)t] \}$$

dunque operando, dopo il *mixer*, con un filtro opportunamente selettivo è possibile selezionare la componente che interessa;

- moltiplicazione di frequenza per un numero intero: si ottiene utilizzando una opportuna rete non lineare (che dunque, pilotata da un segnale monocromatico, produce una molteplicità di armoniche) e selezionando con un filtro l'armonica di interesse.
- divisione di frequenza per un numero intero ( $f_{out} = f_{in}/N$ ): si ottiene impiegando contatori come divisori di frequenza. Pilotando infatti un contatore modulo  $N$  con un'onda quadra di frequenza  $f_1$ , è possibile ricavare in uscita un segnale (a onda quadra) di frequenza  $f_1/N$ . Se si ha interesse a che questo segnale abbia andamento sinusoidale, basta effettuare su di esso un filtraggio passa-basso per eliminare il contenuto armonico eccedente la frequenza fondamentale.

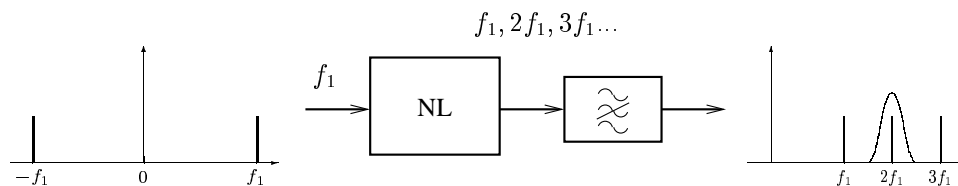


Figura 3 - Generazione di armoniche e selezione dell'armonica di interesse.

- combinazioni lineari tra frequenze: si ottengono combinando opportunamente i sistemi che effettuano somme/differenze tra frequenze e moltiplicazioni di frequenze per numeri interi.

Sebbene concettualmente semplici, queste tecniche richiedono l'utilizzo di filtri opportunamente selettivi allo scopo di selezionare la riga alla quale di volta in volta si è interessati, attenuando adeguatamente le altre (prodotte dal *mixer* o dalla medesima operazione di generazione di armoniche).

Una possibile realizzazione di sintetizzatore analogico di frequenza è schematizzato in Figura 5(a). Inviando al *mixer* la frequenza di riferimento  $f_r$  e una delle armoniche della riga (1 MHz) ottenuta per divisione di  $f_r$  è possibile ottenere in uscita le frequenze 11 MHz, 12 MHz, 13 MHz, ecc.

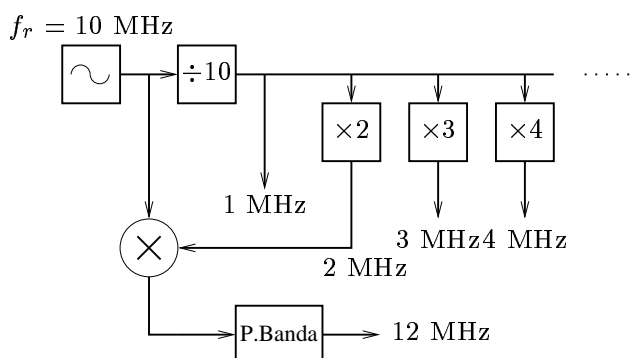


Figura 4 - Schematizzazione di sintetizzatore analogico di frequenza.

Il limite superiore è determinato dalle caratteristiche del sistema non lineare utilizzato per la generazione di armoniche (di 1 MHz): infatti l'ampiezza delle righe in uscita da questo decade all'aumentare della frequenza (e cioè dell'ordine di armonica). Oltre un certo limite l'ampiezza della componente spettrale si riduce a valori tali da diventare difficilmente distinguibile da rumore e disturbi ed essere dunque inutilizzabile.

La tecnica descritta può essere impiegata per realizzare sintetizzatori di frequenza con struttura modulare, basati sulla cosiddetta "generazione di gruppi spettrali"; un esempio di tale sistema è rappresentato schematicamente in Figura 5(a).

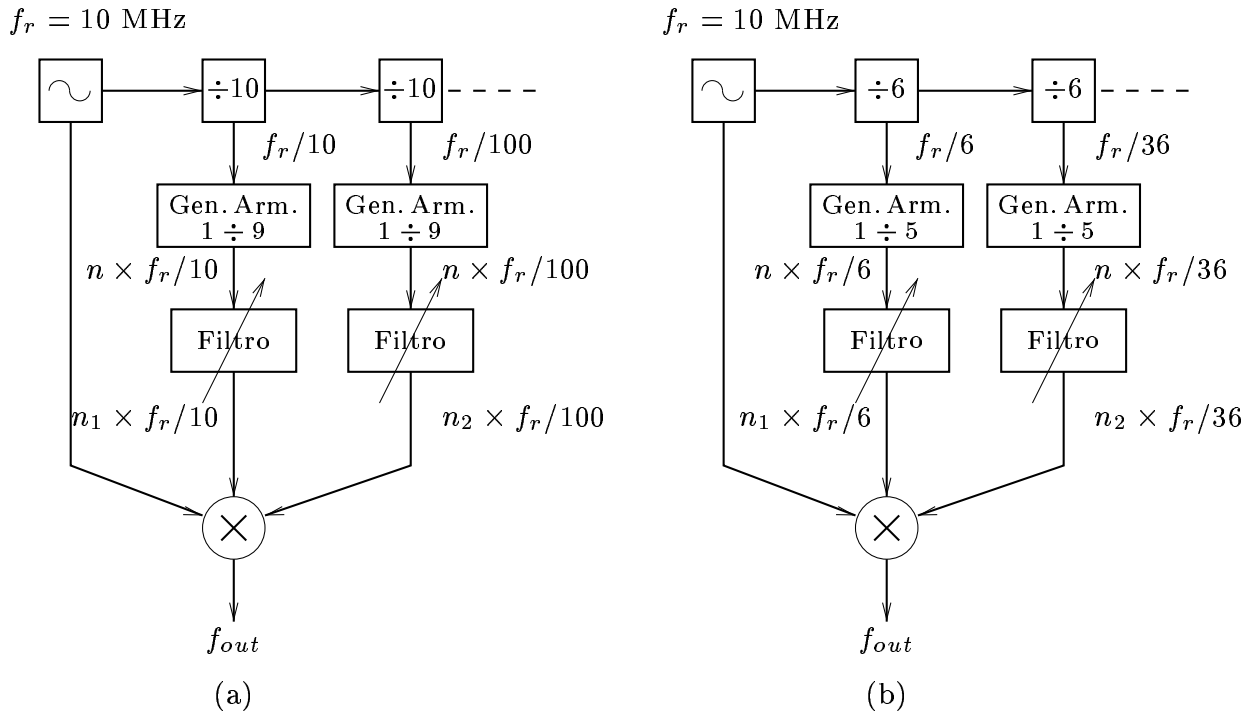


Figura 5 - Schematizzazione di sintetizzatori analogici di frequenza basati sulla generazione di gruppi spettrali.

Nello schema ogni generatore di armoniche elabora la riga prodotta dopo un certo numero di divisioni successive a partire dalla frequenza di riferimento; dopo ogni generatore di armoniche, il filtro passa-banda seleziona quella di interesse che, inviata al *mixer* insieme con le righe provenienti dagli altri generatori di armoniche concorre a determinare la frequenza d'uscita. L'espressione "generatore di gruppi spettrali" si riferisce a ogni catena costituita da un divisore, generatore di armoniche e filtro passa-banda.

La frequenza prodotta ha espressione

$$f_o = f_r + n_1 \frac{f_r}{10} + n_2 \frac{f_r}{100}$$

L'utente, impostando il valore della frequenza di interesse, definisce i coefficienti  $n_1$  ed  $n_2$ , mediante i quali vengono selezionate le armoniche necessarie. Così, per esempio, con  $n_1 = 3$  ed  $n_2 = 6$  si ottiene  $f_o = 13.6$  MHz. Se tutti i generatori di armoniche sono in grado di produrre fino all'armonica di ordine 9 della riga in ingresso, allora il sintetizzatore rappresentato in figura permette di ottenere frequenze da 100 kHz a 19.9 MHz, con la risoluzione di 100 kHz.

Il sistema ha evidentemente una struttura modulare, in quanto ogni generatore di gruppi spettrali è *concettualmente* identico agli altri (ma ovviamente lavora a frequenze diverse). L'ag-

giunta di ulteriori generatori gruppi spettrali permetterebbe una risoluzione in frequenza più spinta.

Lo schema riportato in Figura 5(b) utilizza divisori di ordine inferiore ( $\div 6$ ) e generatori a cui è richiesto di produrre fino alla quinta armonica della riga in ingresso; è facile verificare che, per ottenere la stessa risoluzione del sistema in Figura 5(a) e coprire lo stesso intervallo di frequenze è necessario un maggior numero di gruppi spettrali. La semplificazione dei generatori di armoniche comporta dunque un aumento della circuiteria necessaria.

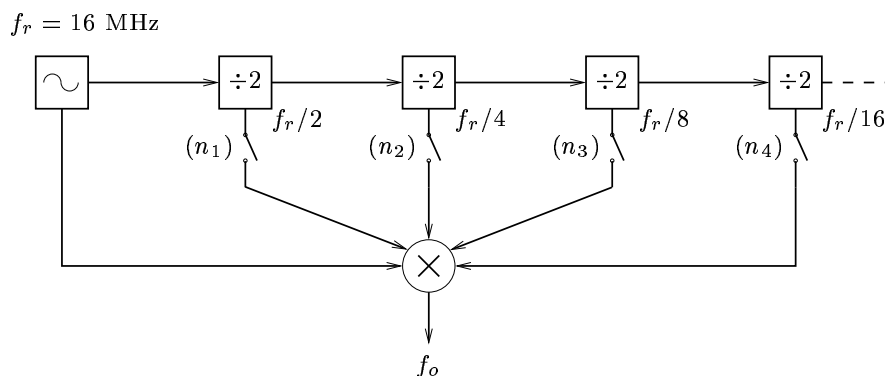


Figura 6 - Altro esempio di sintetizzatore analogico di frequenza.

In Figura 6 è rappresentato schematicamente un analogo sintetizzatore che impiega solo divisori per 2 e dunque non richiede generatori di armoniche. L'espressione della frequenza disponibile in uscita è del tipo

$$f_o = f_r + n_1 \frac{f_r}{2} + n_2 \frac{f_r}{4} + n_3 \frac{f_r}{8} + n_4 \frac{f_r}{16} + \dots$$

in cui i coefficienti  $n_1, n_2, \dots$  assumono valore 0 se il corrispondente tasto è aperto e valore 1 in caso contrario.

### 1.1.2 Sintesi digitale diretta

La tecnica finora descritta, per quanto ampiamente utilizzata fino a qualche decennio fa, richiede un gran numero di filtri e altri blocchi analogici, in misura crescente con il *range* di frequenze che è necessario coprire e con la risoluzione richiesta. Un sistema con così tanto *hardware* necessario è anche un sistema costoso. Oggigiorno si sono affermate metodi di sintesi di frequenza diverse, basate su tecniche digitali, che hanno praticamente soppiantato i sintetizzatori analogici.

I sistemi a sintesi digitale diretta (D.D.S.) funzionano sulla base di un principio molto semplice: se sono disponibili, immagazzinati su adeguato supporto di memoria (e quindi in formato digitale), i campioni relativi a un periodo di una forma d'onda, prelevandoli sequenzialmente

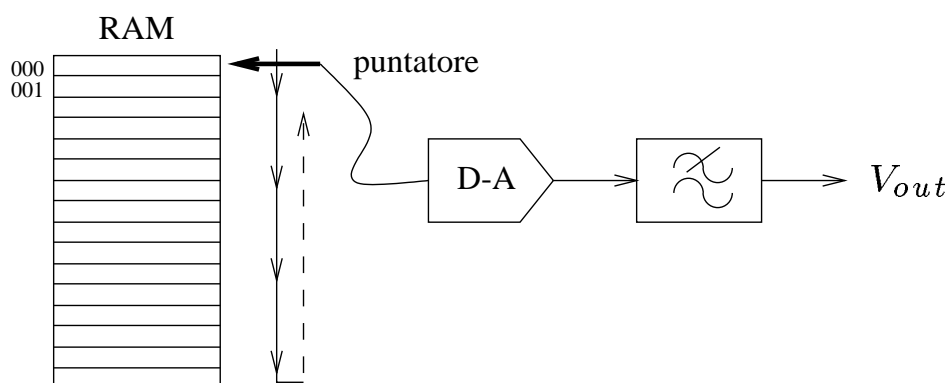


Figura 7 - Schematizzazione di sintetizzatore digitale di frequenza.

dalla memoria e rendendoli disponibili in uscita dopo una conversione digitale-analogico si ottiene la ricostruzione della forma d'onda in questione. Un sistema che opera secondo questo principio è rappresentabile mediante lo schema a blocchi mostrato in Figura 7. I campioni del segnale presenti in memoria corrispondono ad angoli di fase (cioè frazioni del periodo) uniformemente spaziate: gli  $n$  campioni (su un periodo) di un segnale corrispondono dunque ad angoli di fase  $0, 2\pi/n, 2 \cdot 2\pi/n, \dots, i \cdot 2\pi/n \dots, (n - 1) \cdot 2\pi/n$ . Il puntatore "scorre" ciclicamente la memoria, prelevando i dati che vi sono contenuti e inviandoli al convertitore D-A.

Questa tecnica funziona con qualsiasi forma d'onda: è solo necessario che un opportuno numero di campioni di essa siano disponibili nella memoria dello strumento.

Il prelievo sequenziale di campioni del segnale dalla memoria consiste nell'andare a leggere sequenzialmente il contenuto di locazioni di memoria contigue, dunque con indirizzi sequenziali. La generazione di questi indirizzi può pertanto essere effettuata da un contatore che viene incrementato ad ogni impulso di un segnale di *clock*. Una volta che il contatore è arrivato a fondo scala, viene resettato e il conteggio riparte: il segnale prodotto è dunque la ripetizione periodica della forma d'onda memorizzata.

La frequenza del segnale di *clock* determina la velocità di ricostruzione della forma d'onda e in definitiva la frequenza ottenuta. Il filtro passa-basso in uscita serve nella pratica a smussare il segnale in uscita dal convertitore D-A che, in assenza di filtraggio, presenterebbe salti bruschi tra il valore corrispondente a un campione e il successivo. Il filtro viene detto *anti-alias* dal momento che permette la ricostruzione di un segnale continuo a partire dai suoi campioni.

Con  $n$  campioni in memoria e una frequenza di *clock*  $f_{CK}$  la frequenza del segnale presente in uscita è

$$f_o = \frac{f_{CK}}{n} \quad (1)$$

infatti sono necessari  $n$  cicli di *clock* perché siano portati in uscita tutti gli  $n$  campioni della forma d'onda. L'espressione (1) evidenzia chiaramente che la frequenza  $f_o$  del segnale in uscita dipende dalla frequenza di *clock*, ma anche che è possibile far variare  $f_o$  agendo sul numero  $n$

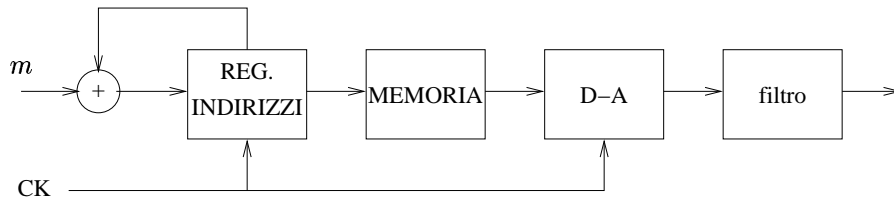


Figura 8 - Sintesi digitale diretta di frequenza: controllo della frequenza del segnale in uscita mediante decimazione dei campioni in memoria (1 ogni  $m$ ).

di campioni. Questo principio viene più frequentemente utilizzato per controllare la frequenza in uscita.

Il numero di campioni da inviare all'uscita può essere ridotto rispetto al numero  $n$  di quelli disponibili scandendo la memoria, invece che per locazioni contigue, prelevando solo 1 ogni  $m$  campioni. La generazione degli indirizzi di memoria da cui estrarre i dati avviene allora (invece che con un contatore), per mezzo di un registro accumulatore, il cui contenuto viene incrementato, a ogni impulso di *clock*, di un valore costante: questo valore è proprio  $m$  (Figura 8).

La (1) diventa dunque

$$f_o = \frac{mf_{CK}}{n} \quad (2)$$

dal momento che adesso saranno necessari  $n/m$  cicli di *clock* per portare al convertitore D-A i campioni selezionati. In questo modo, lavorando a frequenza di *clock* fissa e facendo variare  $m$  si copre con il segnale in uscita un determinato *range* di valori di frequenza.

È ovvio che al crescere di  $m$  peggiora la qualità del segnale ricostruito venendo meno la possibilità di rappresentare correttamente le sue variazioni più brusche via via che il numero di campioni residui si riduce.

Per un segnale sinusoidale si potrebbe pensare di accrescere il valore di  $m$  fino a lavorare con un numero  $n/m = 2$  di campioni residui; questo limite è solo ideale dal momento che 2 campioni per periodo di una forma d'onda sinusoidale consentono la corretta ricostruzione del segnale solo con un filtro anti-alias ideale, condizione che non è certamente realizzabile nella pratica. Più realisticamente è possibile assumere come limite inferiore al numero di campioni residui per un segnale sinusoidale il valore di 4 (cioè non superare il valore  $m_{max} = n/4$ ). In queste condizioni il sintetizzatore avrebbe le seguenti caratteristiche:

- minima frequenza sintetizzabile:  $f_{min} = \frac{f_{CK}}{n}$  (dalla (2) con  $m = 1$ );
- massima frequenza sintetizzabile:  $f_{max} = \frac{f_{CK}}{4}$  (dalla (2) con  $m = m_{max} = n/4$ );
- risoluzione in frequenza:  $\Delta f = f_{min} = \frac{f_{CK}}{n}$ .

Per esempio con una frequenza di *clock*  $f_{CK} = 40$  MHz e  $n = 2^{14}$  (valori tipici di strumenti in commercio) si ottiene  $f_{min} = \Delta f \simeq 2.4$  kHz,  $f_{max} = 10$  MHz. Il *range* di frequenze ottenibili copre poco più di due decenni. Per forme d'onda diverse, dovendo il numero di campioni residui (quindi effettivamente utilizzati) essere opportunamente maggiore di 4, a parità di frequenza di *clock* e di numero massimo ( $n$ ) di campioni utilizzabili risulterà inferiore il massimo valore di frequenza ottenibile. In tutti i casi, utilizzando comunque più di un valore per la frequenza di *clock* è possibile estendere ulteriormente il *range* di valori di frequenza disponibili.

Un netto miglioramento delle prestazioni, in termini di risoluzione in frequenza è possibile con una modifica del metodo di generazione degli indirizzi. Nello schema in Figura 9, tra il registro accumulatore (detto "registro dell'incremento di fase" (*PIR: Phase Increment Register*)) e la memoria è presente un blocco funzionale che effettua il troncamento su  $P$  bit (degli  $N$  originari) del dato presente nel registro. Il valore così ottenuto costituisce l'indirizzo di memoria dal quale viene prelevato il campione da riconvertire in analogico. Il contenuto del registro accumulatore viene incrementato di una quantità  $w$  (detta *tuning word*), che determina la frequenza del segnale prodotto.

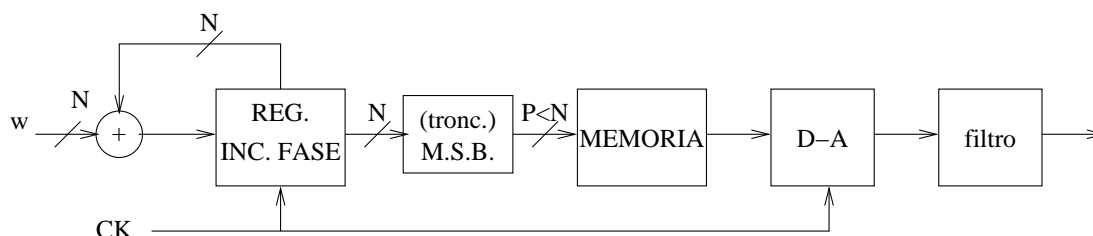


Figura 9 - Sintesi digitale diretta di frequenza: controllo della frequenza del segnale in uscita mediante accumulo di fase.

Il vantaggio presentato da quest'ultimo metodo (detto dell'*accumulo di fase*) deriva dal fatto che esso consente di ottenere la stessa risoluzione in frequenza  $\Delta f = f_{CK}/2^N$  della precedente, ma con una memoria di dimensioni inferiori: questa è infatti costituita da  $2^P$  (con  $P < N$ ) locazioni.

Le caratteristiche richieste agli strumenti più moderni comportano l'impiego di memorie (RAM) veloci e di convertitori D-A ad elevata risoluzione. A titolo di esempio si riportano di seguito le caratteristiche di uno strumento commerciale:

- frequenza di *clock*:  $f_{CK} = 40$  MHz;
- numero di bit del P.I.R.:  $N = 48$ ;
- profondità di memoria: 16k locazioni ( $P = 14$ ,  $2^P = 16384$ );
- risoluzione  $\Delta f = f_{CK}/2^N \simeq 142$  nHz (la risoluzione dichiarata è  $\Delta f = 1$   $\mu$ Hz);



- risoluzione verticale (convertitore D-A): 14 bit.

La tecnica finora descritta, agendo (campione per campione) sulla fase del segnale prodotto, permette di realizzare in modo molto semplice le modulazioni d'angolo (frequenza e fase).

In particolare, una modulazione in frequenza si ottiene facendo assumere alla *tuning word*  $w$  valori proporzionali al segnale modulante. Così per ottenere un segnale modulato in frequenza con una tensione a rampa (*linear sweep*) basta far variare linearmente nel tempo il valore di  $w$ ; una variazione della *tuning word* con legge logaritmica produrrà invece una variazione logaritmica nel tempo della frequenza istantanea del segnale (*logarithmic sweep*).

Facendo assumere alla *tuning word*, alternativamente, uno tra due valori  $w_1$  e  $w_2$  si ottiene invece una modulazione FSK (Figura 10).

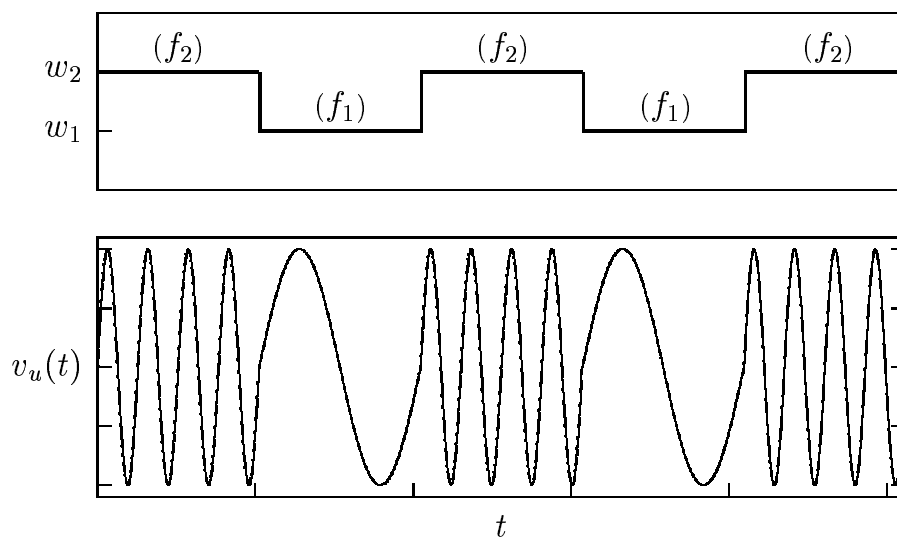


Figura 10 - Modulazione FSK di un segnale sinusoidale generato mediante DDS.

Per ottenere una modulazione in fase basta sommare al contenuto del P.I.R. un opportuno valore  $q$ , corrispondente allo sfasamento richiesto (Figura 11). Facendo assumere al parametro  $q$ , alternativamente, uno tra due valori, è possibile ottenere una modulazione PSK (Figura 12).

Poiché nei generatori di forme d'onda l'utente specifica, oltre alla forma e alla frequenza del segnale richiesto, anche la sua ampiezza, deve evidentemente essere prevista la possibilità di far variare questa. Tale risultato può essere ottenuto "moltiplicando il segnale" per un'opportuno valore. L'operazione può essere effettuata sui dati in formato digitale (dunque tra la RAM e il convertitore), oppure agendo sulla tensione di riferimento del DAC, oppure ancora - più convenientemente - amplificando (o attenuando, se necessario) il segnale in uscita dal DAC stesso. Quest'ultimo modo di operare risulta il più conveniente perché l'entità dell'amplificazione può essere controllata mediante un'altra tensione, generata internamente o esternamente

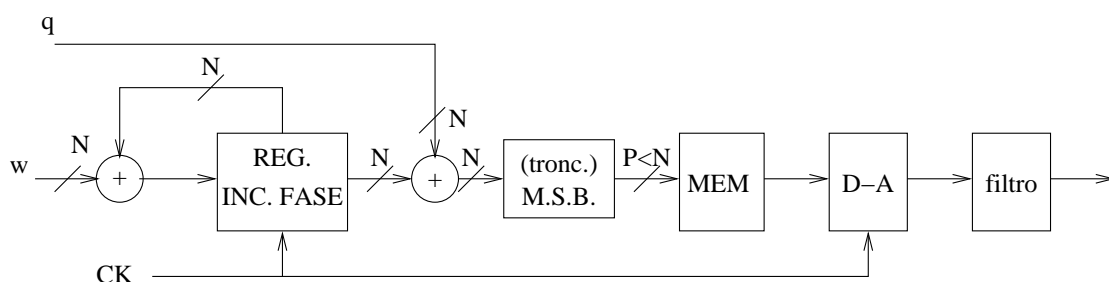


Figura 11 - Sintesi digitale diretta di frequenza: controllo della fase del segnale in uscita.

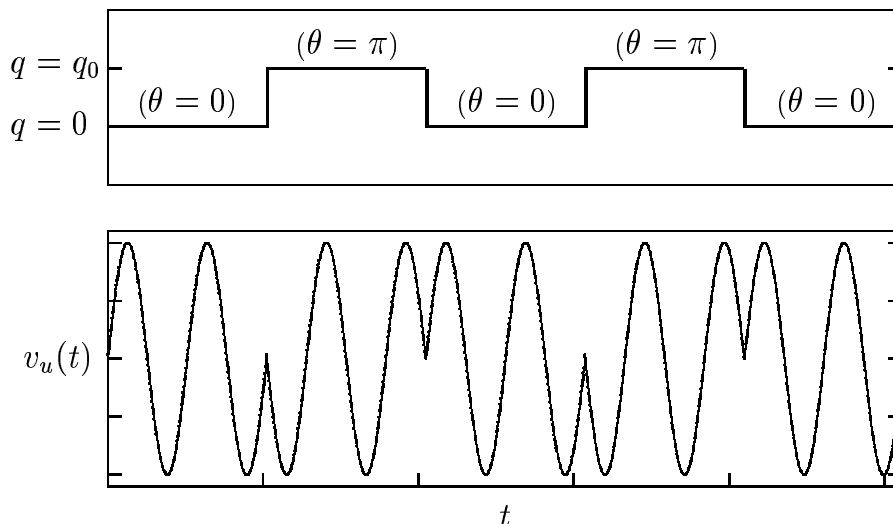


Figura 12 - Modulazione PSK di un segnale sinusoidale generato mediante DDS.

allo strumento, permettendo quindi anche operazioni di modulazione in ampiezza, anche con segnali provenienti dall'esterno.

L'amplificatore presente nello stadio d'uscita dello strumento deve avere un comportamento tale da non deformare il segnale prodotto dallo strumento: a questo scopo sono necessarie, su tutta la banda di interesse, una risposta in ampiezza piatta e una risposta in fase lineare con la frequenza. L'ultimo stadio deve essere inoltre in grado di pilotare carichi relativamente elevati (è tipico il caso di impedenze di carico di  $50\ \Omega$ ) con tensione dell'ordine di qualche volt picco-picco (generalmente, per i generatori di impiego più comune, fino a  $10\ V_{pp}$ ).

Una caratteristica dei generatori a DDS di estremo interesse, è quella di poter essere programmati in modo da fornire forme d'onda non standard e quindi non previste dal costruttore nelle fasi di progettazione e realizzazione dello strumento<sup>1</sup>. La programmazione consiste nel-

<sup>1</sup>Per questa ragione i generatori che hanno questa funzionalità vengono denominati anche Generatori di forme d'onda arbitrarie (*AWG: Arbitrary Waveform Generator*), proprio con riferimento alla possibilità di fornire *qualsiasi* forma d'onda.

l'andare a memorizzare - in un'apposita porzione della memoria dello strumento appositamente prevista - i campioni della forma d'onda di interesse. Questi campioni possono provenire dalla digitalizzazione (effettuata ad opera dell'utente) di un segnale materialmente disponibile in forma analogica, oppure dal calcolo dei valori assunti da una certa funzione definita analiticamente in determinati istanti (che corrispondono agli istanti di campionamento), oppure dal risultato di simulazioni.

La memorizzazione viene di norma condotta interfacciando lo strumento con un Personal Computer e controllando mediante questo le operazioni necessarie; dal momento infatti che spesso si ha a che fare con un elevato numero di campioni, necessario per un'adeguata ricostruzione della forma d'onda, risulterebbe estremamente scomodo operare mediante la tastiera sul pannello frontale dello strumento! Alcuni generatori dispongono inoltre di strumenti software che semplificano le operazioni di definizione e costruzione di forme d'onda "arbitrarie", come per esempio procedure per ottenere nuove forme d'onda mettendo insieme porzioni di forme d'onda predefinite.

In tutti i casi, dopo la memorizzazione del segnale di interesse (operazione che può essere effettuata una sola volta), esso può essere riprodotto, con diversi valori di ampiezza e frequenza (ed eventualmente modulato) tutte le volte che se ne ha necessità, svincolandosi dalla necessità di avere disponibile, ogni volta, il sistema con il quale il segnale originario è stato prodotto.

### 1.1.3 Caratteristiche e specifiche dei sintetizzatori di frequenza

- **stabilità in frequenza:** esprime il fatto che la frequenza del segnale prodotto rimanga stabile nel tempo e con la temperatura; poiché nei sintetizzatori (analogici e digitali) di frequenza la frequenza d'uscita ( $f_o$ ) è multipla di quella di riferimento, l'incertezza (percentuale) su  $f_o$  è pari a quella della frequenza di riferimento: dunque ricavando questa da un oscillatore al quarzo, si può ottenere una stabilità in frequenza dell'ordine di pochi p.p.m., o anche migliore.
- **risoluzione:** come si è già detto, le tecniche di DDS consentono (impiegando una RAM di opportuna profondità), di ottenere risoluzioni in frequenza dell'ordine del microhertz, almeno intorno alle frequenze più basse tra quelle disponibili.
- **purezza spettrale:** indica la "qualità" della forma d'onda prodotta; per un segnale sinusoidale (cioè un segnale teoricamente monocromatico) è ovviamente espressa dalla quantità di armoniche presenti e dalla loro ampiezza; un parametro numerico per esprimere la purezza spettrale è il coefficiente di distorsione (armonica), generalmente espresso in dBc e cioè rapportato all'ampiezza della riga fondamentale (*carrier*).
- **massima frequenza di lavoro:** come già anticipato, nella DDS essa è minore per onde triangolari e quadre che per segnali sinusoidali (cioè con banda più stretta) a parità di numero di campioni in memoria. In alcuni sistemi, segnali a onda quadra vengono generati

da segnali sinusoidali, mediante l'impiego di comparatori analogici: in questo modo si ottiene il risultato di coprire lo stesso *range* di frequenze che con segnali sinusoidali, ottenendo anche la stessa risoluzione in frequenza.

- **altre tecniche per estendere il *range* di frequenze:** in alcuni generatori il segnale sinusoidale prodotto mediante DDS viene successivamente inviato a un *mixer* (opportunamente pilotato sull'altro ingresso) allo scopo di ottenere una traslazione in alto della frequenza.
- **agilità in frequenza:** esprime la rapidità con cui è possibile far variare la frequenza della forma d'onda fornita. Essa è maggiore nei sistemi a sintesi diretta che in quelli a sintesi indiretta (i PLL sono piuttosto lenti). Nei sintetizzatori digitali il tempo per la commutazione della frequenza è molto breve, perché coincidente con il tempo necessario per modificare la *tuning word*.
- **modalità di funzionamento:** oltre alle modalità "ordinarie" (continua - in cui la forma d'onda è resa disponibile per un tempo non determinato *a priori* - o modulate in ampiezza o frequenza o fase), i generatori più moderni permettono modalità di funzionamento in cui è possibile controllare molto accuratamente la durata dell'erogazione del segnale.
  - controllo da trigger (*triggered*): la forma d'onda definita è resa disponibile a partire dall'istante in cui arriva il segnale di trigger, che può essere prodotto esternamente (*external trigger*) e arrivare allo strumento mediante un opportuno ingresso, oppure manualmente, agendo su un apposito pulsante.
  - *burst*: a partire da un segnale di trigger viene generato un determinato numero di cicli della forma d'onda selezionata;
  - *gated*: la forma d'onda selezionata viene resa disponibile in uscita per un tempo determinato a partire da un segnale di trigger.