

Software Defined Radio



Relatore
ing Alessio Minin IV3GDE

Pozzuolo del Friuli, 13 novembre 2022

SDR : I e Q

Rappresentazione dei segnali sul piano complesso: I e Q

L'introduzione dei dati I/Q nasce dall'esigenza di evidenziare le variazioni di ampiezza e di fase di un segnale con andamento sinusoidale. Se i cambiamenti di ampiezza e di fase sono realizzati in modo ordinato e predeterminato, è possibile usare questi cambiamenti di ampiezza e fase per codificare delle informazioni: questo processo è noto come modulazione. La modulazione è il processo di modifica di un segnale portante, di frequenza superiore, in rapporto a un messaggio, o informazione, di frequenza inferiore. I dati I/Q sono molto diffusi nei sistemi di comunicazione RF e, più in generale, nella modulazione del segnale, perché è un modo conveniente per modulare e demodulare i segnali.

SDR : I e Q

I/Q IN SISTEMI DI COMUNICAZIONE

Per spiegare perché viene utilizzato il sistema I/Q, risulta opportuno accennare preventivamente i principi della modulazione.

Attualmente i sistemi di comunicazione RF utilizzano forme avanzate di modulazione per aumentare la quantità di dati che possono essere trasmessi in una data quantità di spettro. La modulazione dei segnali può essere suddivisa in due grandi categorie: modulazione analogica e modulazione digitale. L'aggettivo analogico o digitale si riferisce alla maniera in cui i dati modulano un'onda sinusoidale chiamata portante. Se dati analogici modulano una portante sinusoidale, ciò rappresenta a una modulazione analogica. Se i dati analogici vengono campionati da un convertitore analogico-digitale (ADC) e i bit rappresentativi modulano un'onda portante sinusoidale, si ottiene una modulazione digitale.

SDR : I e Q

Sia la modulazione analogica che la modulazione digitale vengono eseguite modificando l'ampiezza dell'onda portante, o la sua frequenza o la sua fase, o una combinazione di questi in funzione.

Modulazione di ampiezza (AM), Modulazione di frequenza (FM) o Modulazione di fase (PM) possono quindi essere sia analogiche che digitali. Nella AM viene modificata l'ampiezza dell'onda portante mentre nella FM e nella PM vengono interessate rispettivamente la frequenza e la fase della portante.

A breve si vedrà perché è molto interessante l'uso di I/Q nelle telecomunicazioni.

Si inizi considerando l'espressione analitica che identifica una grandezza sinusoidale riportata in figura 1.

SDR : I e Q

The diagram shows the equation $A_c \cos(2\pi f_c t + \phi)$ with three red labels and arrows pointing to parts of the equation: 'Amplitude' points to A_c , 'Frequency' points to f_c , and 'Phase' points to ϕ . A large black curly bracket is positioned below the terms $2\pi f_c t + \phi$, with the word 'Angle' centered underneath it. Below the bracket, the text '(Frequency = Rate of Change of Angle)' is written in black.

Figura 1 - Espressione di una grandezza sinusoidale. Pertanto, si può rappresentare il valore istantaneo di un'onda sinusoidale con un vettore nel piano complesso contenente i valori di ampiezza e fase in un sistema di coordinate polari.

SDR : I e Q

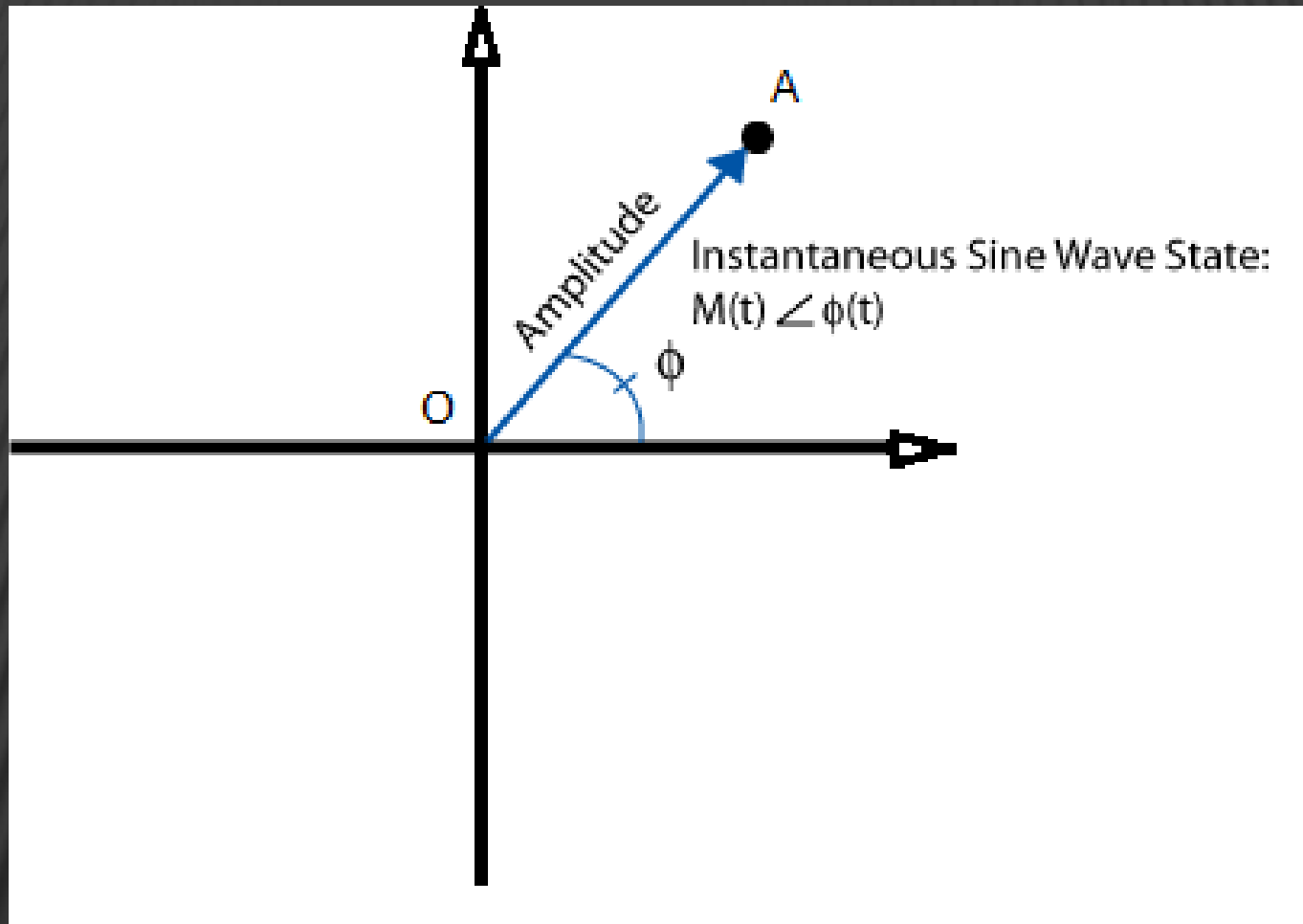


Figura 2 - Rappresentazione polare di una grandezza sinusoidale.

SDR : I e Q

Nella figura 2, la distanza tra l'origine degli assi O e il punto A rappresenta l'ampiezza della sinusoide mentre l'angolo compreso tra l'asse orizzontale e il segmento OA rappresenta la fase istantanea.

La modulazione del segnale comporta modifiche da apportare alle onde sinusoidali per codificare informazioni. Per fare ciò i possibili parametri su cui si può agire sono ampiezza, frequenza e fase. Tenuto conto che la frequenza è semplicemente il tasso di variazione di fase di un'onda sinusoidale (la frequenza è infatti la derivata prima della fase fatta rispetto al tempo), la somma dei due componenti costituenti l'argomento dell'espressione sinusoidale determina l'angolo di fase istantaneo.

Ove il segnale non risulti modulato in ampiezza la lunghezza del segmento OA rimane costante nel tempo. Per esempio, una sinusoide con una frequenza di 1 Hz (2π radianti/secondo) ruota in senso antiorario intorno all'origine degli assi ad una velocità di un giro al secondo. Se l'ampiezza non cambia nel corso della rotazione, i punti A descriveranno un cerchio centrato in O con raggio uguale all'ampiezza nel tempo di 1 secondo.

SDR : I e Q

Si supponga che il riferimento di fase utilizzato sia un'onda sinusoidale di frequenza pari alla sinusoide della quale si tratta e che viene rappresentata dai punti di ampiezza e fase. Se la frequenza dell'onda sinusoidale di riferimento e la frequenza dell'onda sinusoidale tracciata sono uguali, la variazione cui è soggetta la fase dei due segnali sarà la stessa, e l'angolo di fase tra le due rimarrà costante.

In questo caso, un punto singolo che rappresenta ampiezza e fase può essere utilizzato per rappresentare un segnale sinusoidale di frequenza pari alla frequenza di riferimento.

Ogni rotazione di fase intorno all'origine indica una differenza di frequenza tra l'onda sinusoidale di riferimento e l'onda sinusoidale tracciata. Fino a questo punto, si sono trattati i dati di ampiezza e di fase in un sistema di coordinate polari.

SDR : I e Q

È possibile però rappresentare i dati di ampiezza e di fase da un sistema di coordinate polari a un sistema di coordinate cartesiano (x, O, y) introducendo le grandezze I e Q.

Queste ultime sono determinate attraverso una trasformazione di coordinate tra un sistema polare e un sistema cartesiano di pari origine.

Utilizzando la trigonometria, è ora possibile convertire le informazioni sull'onda sinusoidale già espresse in coordinate polari in dati di I/Q dell'onda sinusoidale in coordinate cartesiane.

Queste due rappresentazioni sono equivalenti e contengono esattamente le medesime informazioni, solo in forme diverse.

Questa equivalenza è illustrata nella Fig. 3.

SDR : I e Q

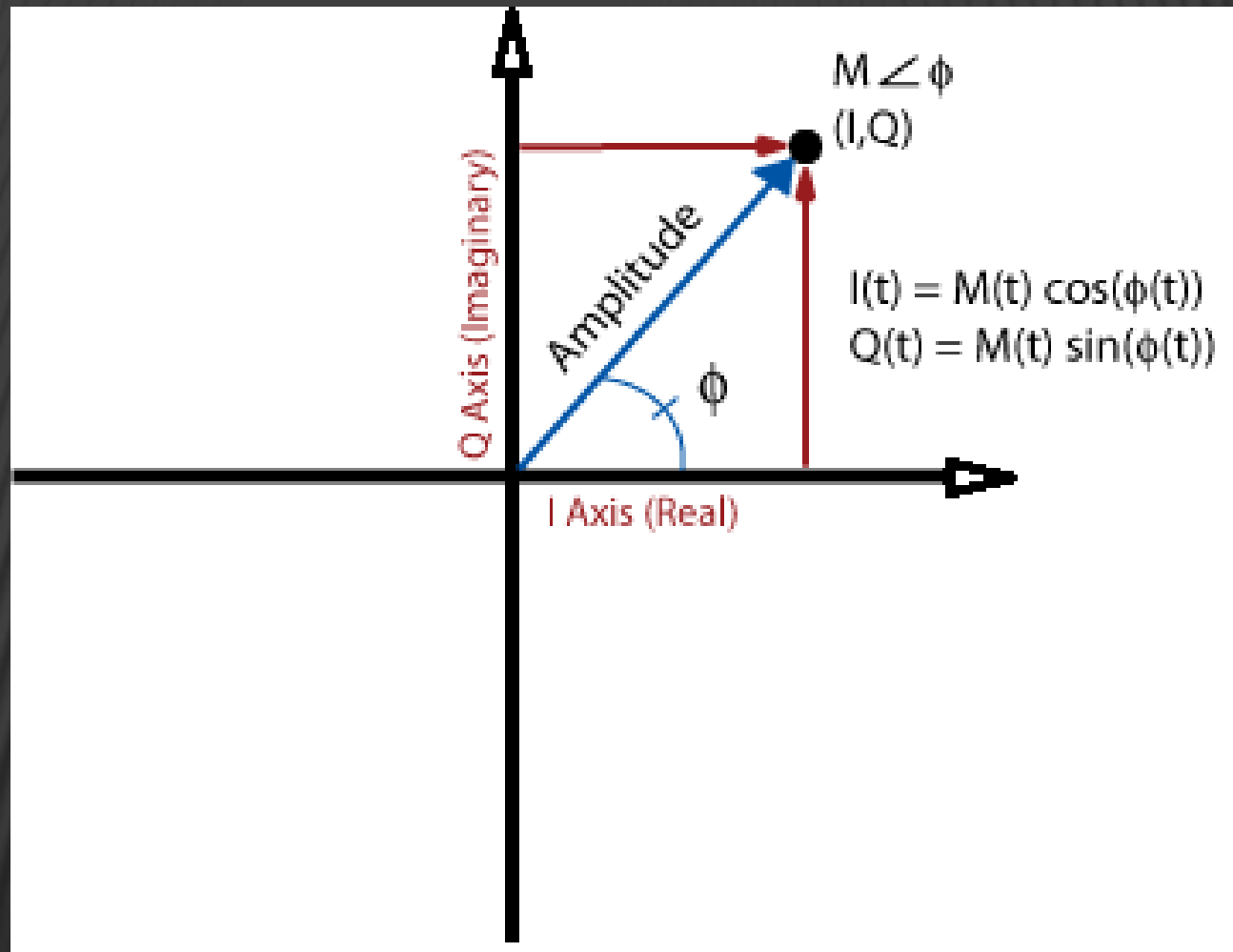


Figura 3 - I e Q rappresentati in forma polare.

SDR : I e Q

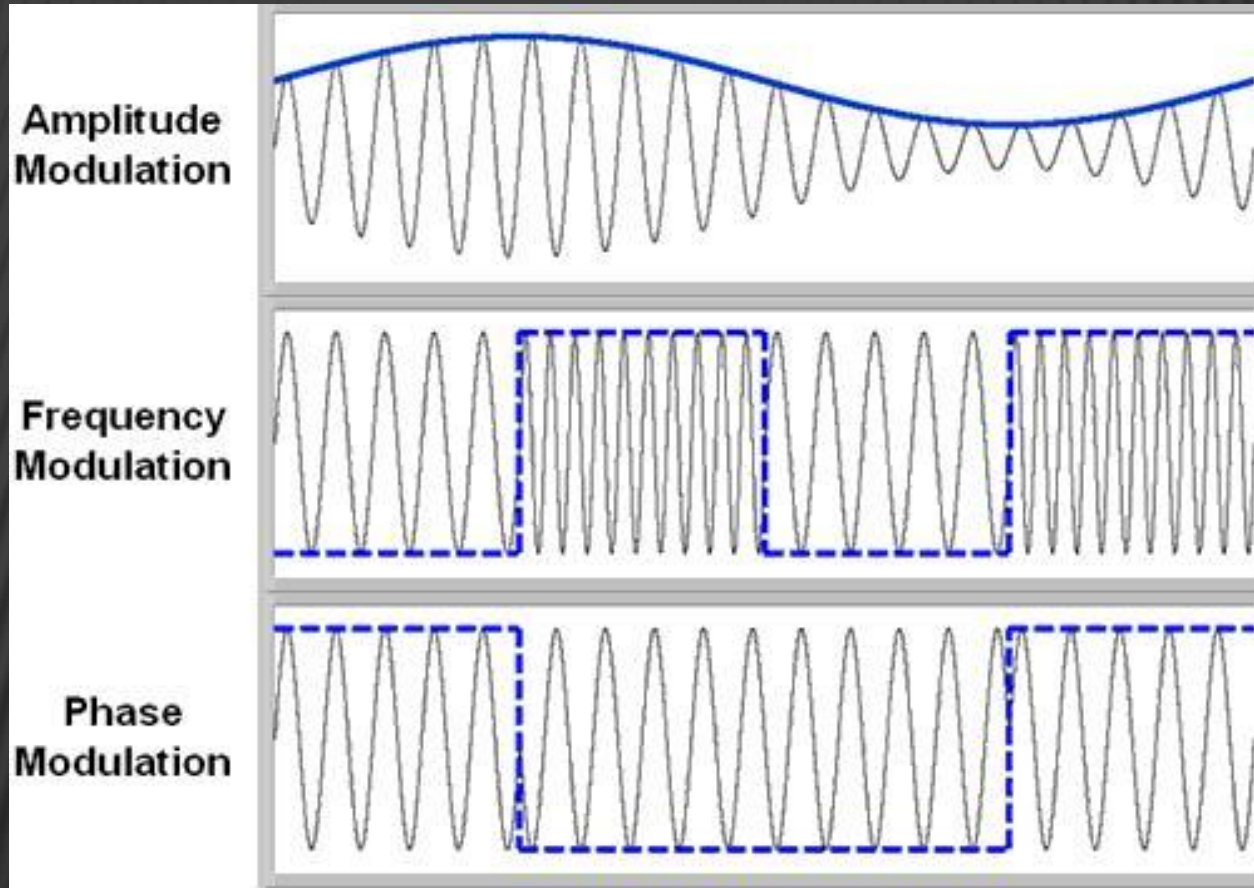


Figura 4 - Dominio del tempo dei segnali AM, FM e PM.

SDR : I e Q

La Fig. 4 rappresenta le modulazioni analogiche AM, FM e PM applicate ad un segnale portante. Nel caso AM, il segnale del messaggio, detto anche modulante, è l'onda sinusoidale blu che determina l'involuppo dell'onda portante sinusoidale di frequenza più elevata. Nel caso FM, il messaggio modulante è l'onda quadra tratteggiata. Si può denotare che il risultato è costituito dalla variazione di frequenza della portante: in corrispondenza allo stato logico alto della modulante corrisponde un aumento della frequenza della portante rispetto al valore che assume in corrispondenza allo stato logico basso. Se il segnale del messaggio modulante fosse un'onda sinusoidale, la variazione di frequenza avverrebbe con continuità e quindi sarebbe meno visibile in figura.

SDR : I e Q

Nel caso di PM, se la modulante è un'onda quadra, si può notare il netto cambiamento di fase sui fronti di salita e di discesa della stessa.

Applicando tutto questo alla trattazione precedente, in caso di modulazione AM la sua ampiezza è direttamente proporzionale all'ampiezza del segnale modulante. Con riferimento alla Fig. 5 si potrà notare che varia la lunghezza del segmento OA, e di conseguenza l'ampiezza dei segnali I e Q. Per determinare il valore istantaneo del segnale RF, a partire da I e Q, sarà sufficiente applicare il teorema di Pitagora.

SDR : I e Q

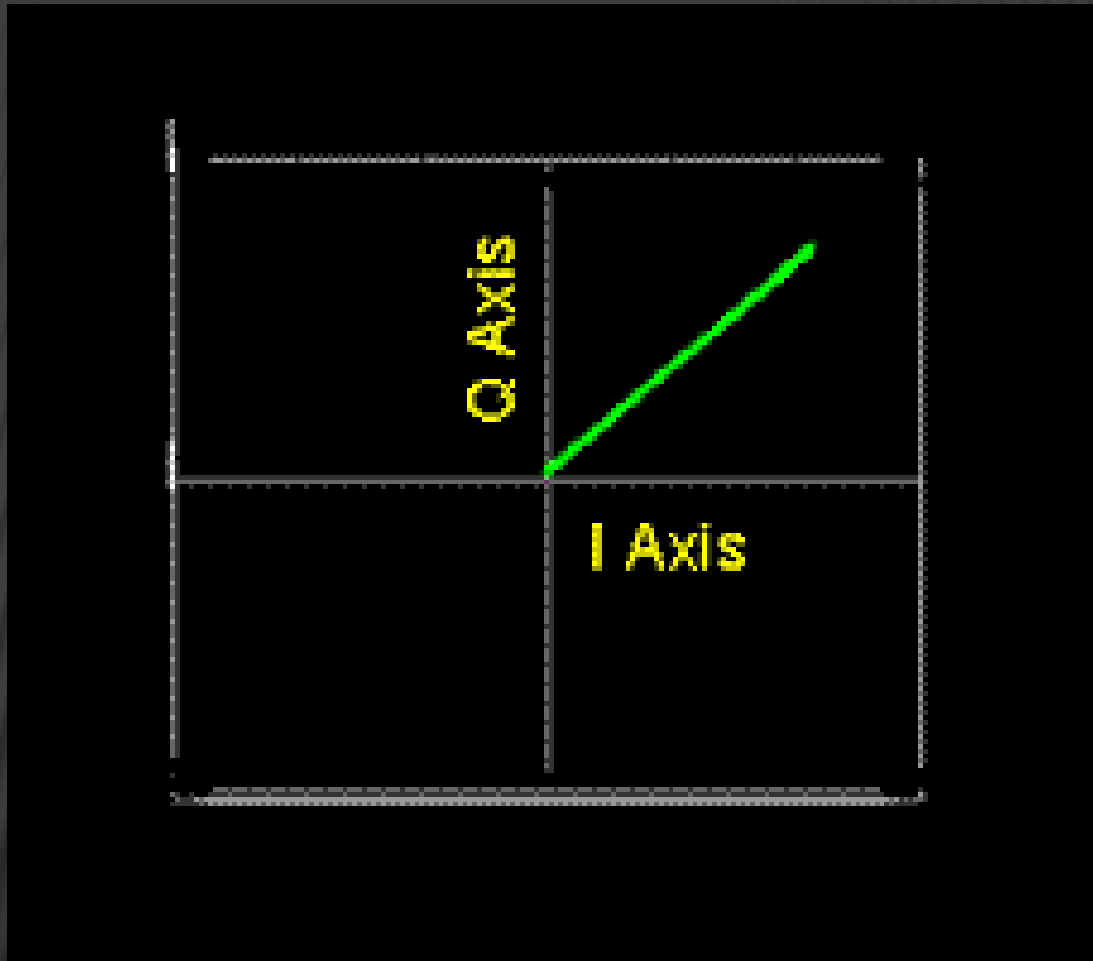


Figura 5 - Dati di I/Q in ampiezza nel dominio complesso.

SDR : I e Q

La figura 5 mostra punti di dati I/Q che variano solo in ampiezza, con la fase fissa di 45 gradi. Dalla Fig. 5 non possiamo dedurre la natura del segnale del messaggio: sappiamo solo che è modulato in ampiezza. Tuttavia, se si potesse vedere come i punti dei dati di I/Q variano in ampiezza rispetto al tempo, si vedrebbe essenzialmente una rappresentazione del segnale del messaggio. Se aggiungessimo un asse dei tempi che entra nella pagina e poi rappresentassimo il tutto in assonometria potremmo vedere una immagine simile a quella rappresentata in figura 6.

SDR : I e Q

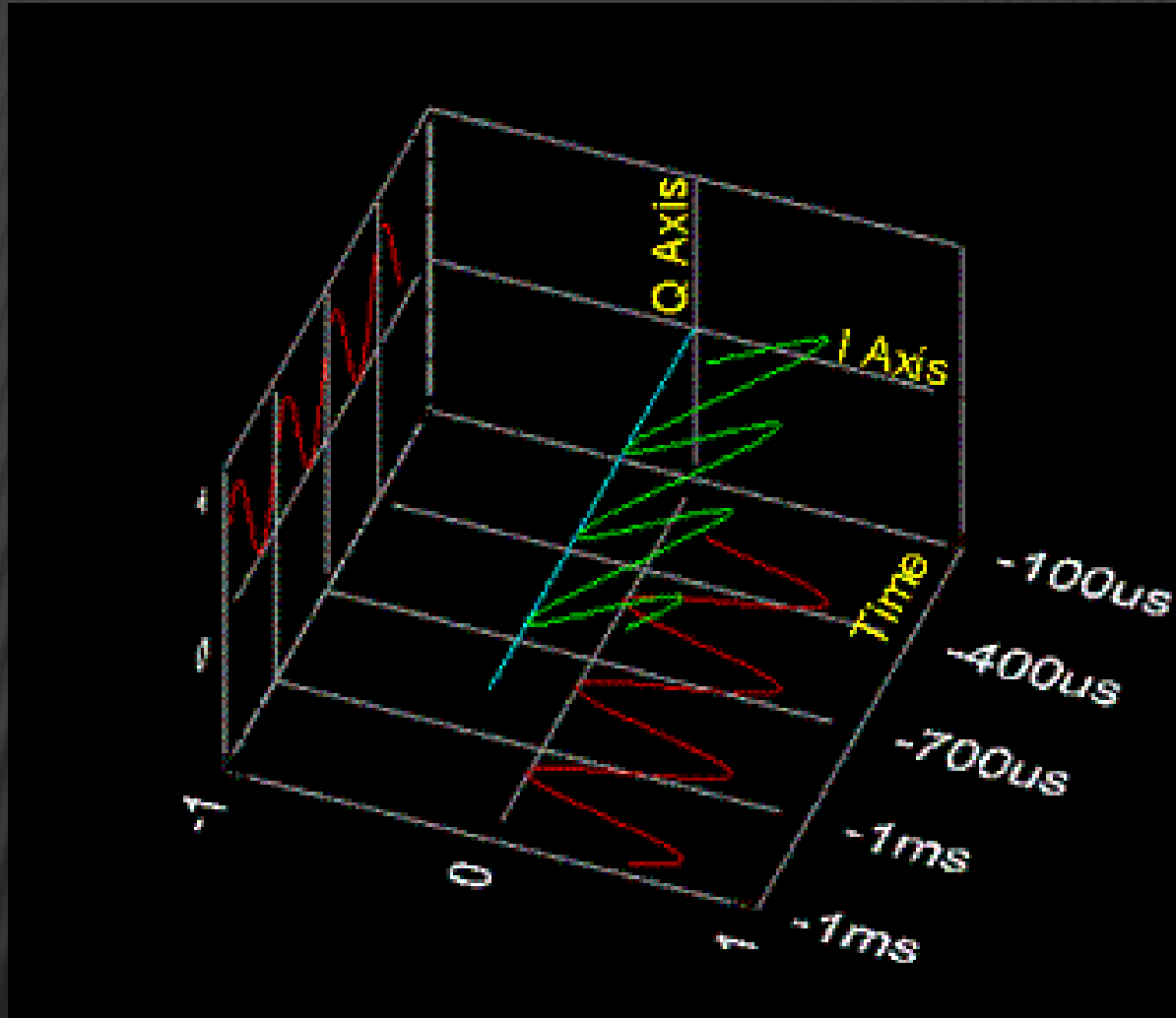


Figura 6 - Rappresentazione della grandezza I/Q in funzione del tempo.

SDR : I e Q

La Fig. 6 mostra gli stessi dati I e Q del grafico in 2D della Fig. 5. L'ampiezza della traccia del segnale è modulata con un andamento sinusoidale e questo indica che il segnale del messaggio è, appunto, un'onda sinusoidale. La traccia verde rappresenta i dati di ampiezza e fase in un sistema di coordinate polari, mentre le tracce rosse corrispondono alle proiezioni di questa forma d'onda sugli assi I e Q, che rappresentano individualmente le forme d'onda I e Q.

Si può pensare, ora, di modulare la stessa sinusoide con lo stesso segnale modulante, ma con un sistema PM; la rappresentazione che se ne ricaverebbe è mostrata in Fig. 7.

SDR : I e Q

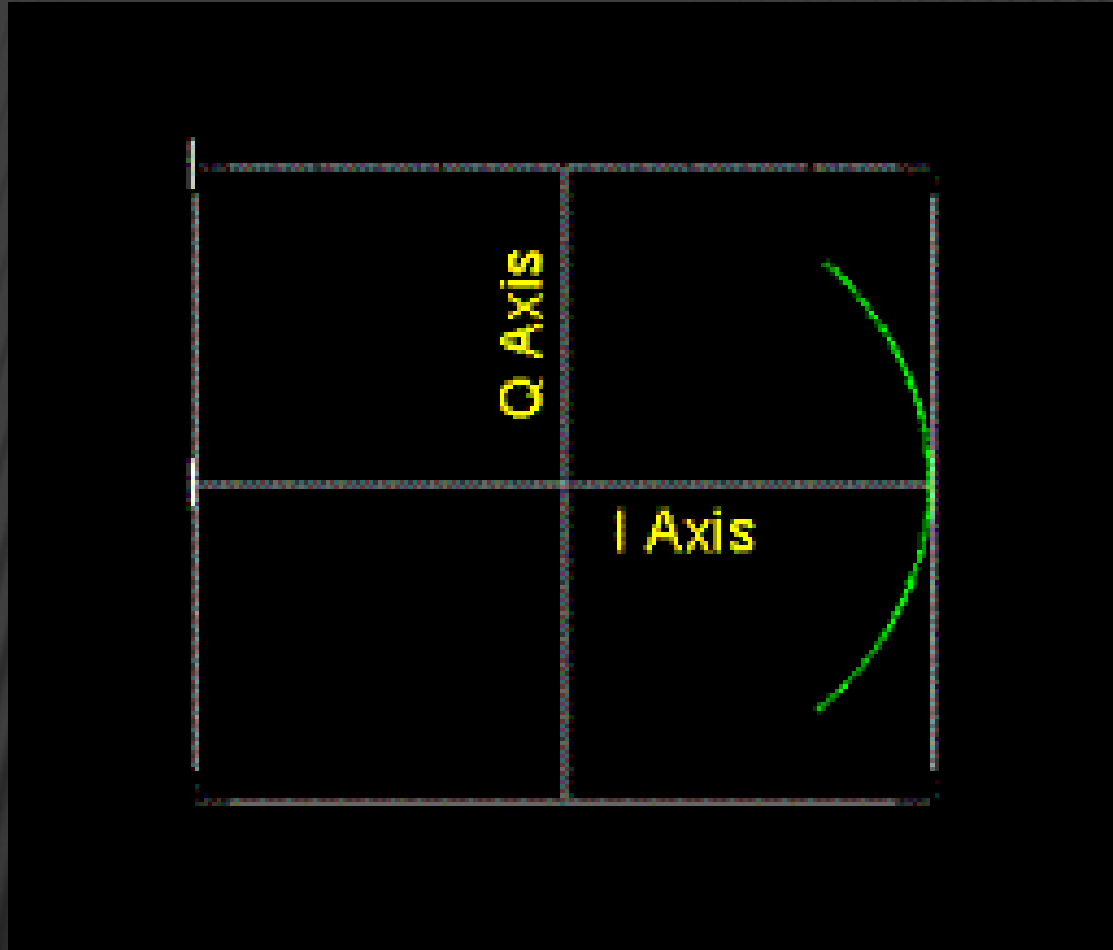


Figura 7 - Rappresentazione polare della fase in funzione del tempo.

SDR : I e Q

Dall'analisi di tale figura si può constatare come vari la fase del segnale portante mentre mantiene costante l'ampiezza. Non si è in grado di ricostruire quale sia la forma del segnale modulante nel tempo, ma si può affermare che i livelli minimo e massimo del segnale del messaggio si identificano in scostamenti di fase di + e - 45 gradi. Anche in questo caso l'introduzione di un asse dei tempi ci permette di comprendere meglio questo concetto.

SDR : I e Q

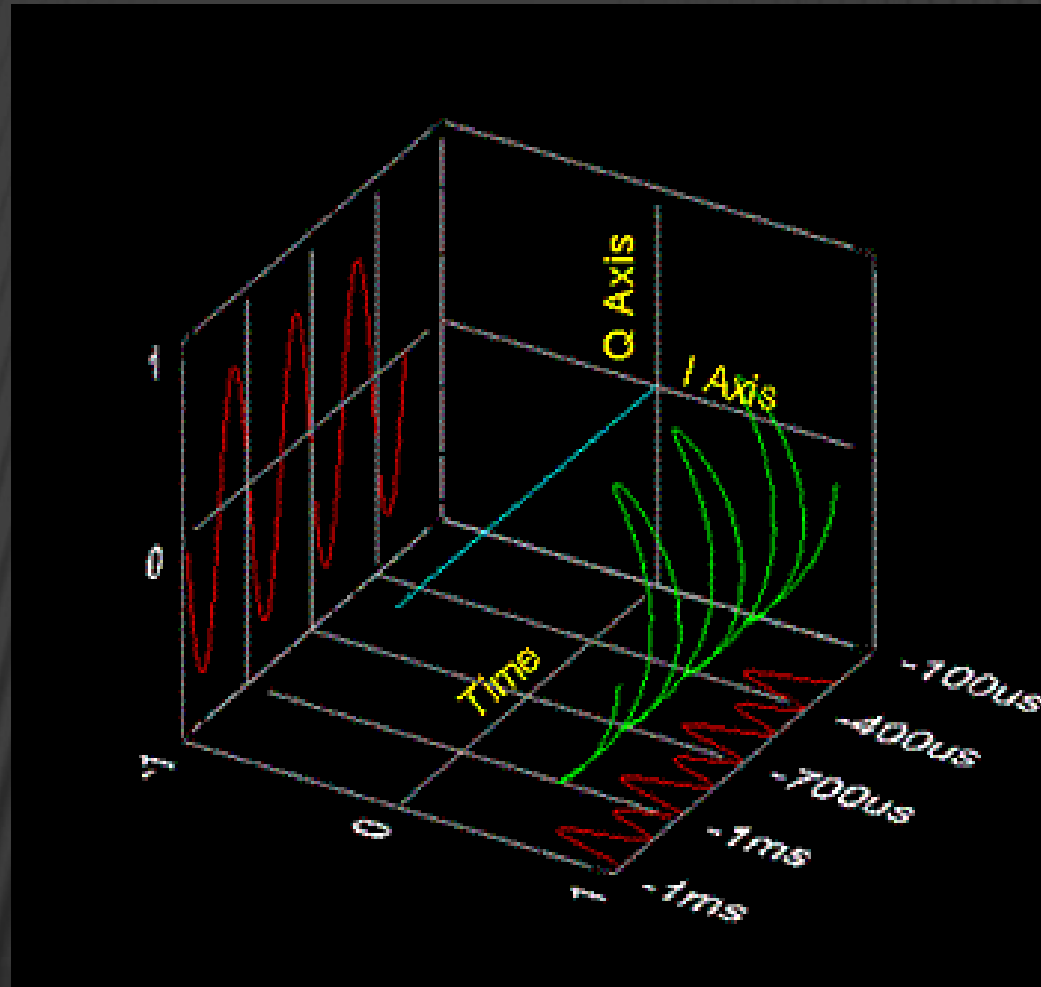


Figura 8 - Rappresentazione 3D della modulazione di fase.

SDR : I e Q

La Fig. 8 mostra la traccia verde che varia in modo sinusoidale rispetto al tempo. Le proiezioni sugli assi I e Q rappresentano individualmente le forme d'onda I e Q, corrispondenti alla modulazione di fase con modulante un'onda sinusoidale ad ampiezza costante.

In sostanza, i dati di I/Q rappresentano il segnale del messaggio. Poiché le forme d'onda dei dati I/Q sono visualizzazioni cartesiane di grafici polari per ampiezza e fase, non è facile visualizzare la natura del segnale del messaggio attraverso i dati di I/Q. Per illustrare quanto affermato si osservino le componenti I e Q di Fig. 8 disegnate in rosso.

In tale situazione si sarebbe naturalmente portati a ragionare in termini di coordinate polari, piuttosto di impiegare i dati cartesiani I e Q.

SDR : I e Q

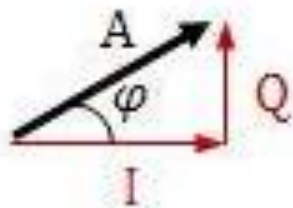
Tuttavia, le problematiche pratiche di progettazione hardware rendono i dati I e Q la scelta migliore in questa materia. È difficile variare con precisione la fase dell'onda portante sinusoidale ad alta frequenza in un circuito hardware in accordo con un segnale del messaggio applicato all'ingresso. Un modulatore di segnale hardware che manipola l'ampiezza e la fase di un'onda portante sinusoidale sarebbe quindi costoso e difficile da progettare e costruire e, in ultima analisi, non è flessibile come un circuito che utilizza le forme d'onda I e Q.

Per capire come evitare la manipolazione diretta della fase di una portante RF, è innanzitutto necessario tornare alla trigonometria (Fig. 9).

SDR : I e Q

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta) \quad (1)$$

$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = A \cos(2\pi f_c t) \cos(\varphi) - A \sin(2\pi f_c t) \sin(\varphi) \quad (2)$$



$$I = A \cos(\varphi)$$

$$Q = A \sin(\varphi)$$

$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t) \quad (3)$$

where I is the amplitude of the in-phase carrier

Q is the amplitude of the quadrature-phase carrier

Figura 9 - Fondamenti matematici della modulazione di I/Q.

SDR : I e Q

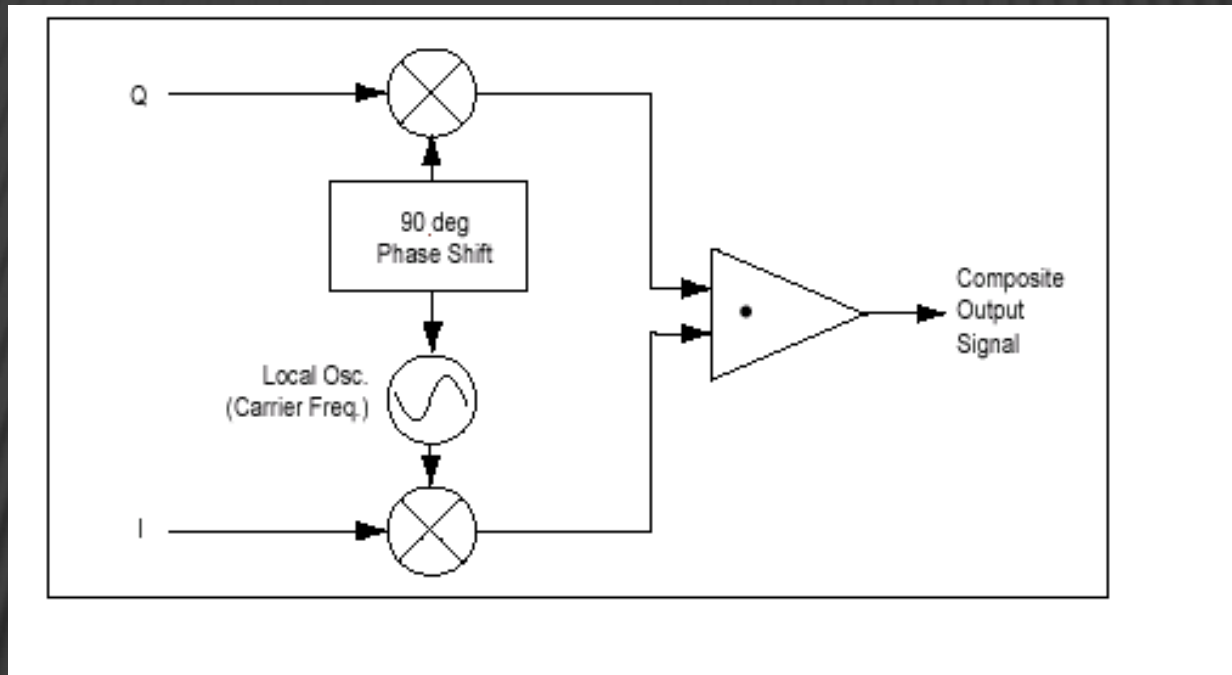
Ricorrendo alle formule di addizione e di sottrazione, posto $I = A \cos(\phi)$ e $Q = A \sin(\phi)$ si ottiene la formula che dimostra che, semplicemente manipolando le ampiezze dei segnali di ingresso I e Q, si può controllare l'ampiezza, la frequenza e la fase di una portante RF sinusoidale modulabile.

Con questo metodo, non è più necessario variare direttamente la fase di un'onda sinusoidale portante RF. Si può ottenere lo stesso effetto manipolando le ampiezze dei segnali di ingresso I e Q.

Si osservi che la seconda metà dell'equazione è una senoide mentre la prima metà è una cosenoide. Tenendo conto che la cosenoide altro non è che una senoide in quadratura in anticipo rispetto alla senoide, è necessario includere nel circuito hardware un dispositivo per produrre uno sfasamento di 90 gradi tra le portanti utilizzate nei miscelatori dei segnali I e Q. Tale soluzione pone problemi di progettazione ben minori rispetto alla manipolazione diretta della fase.

SDR : I e Q

La Fig. sottostante mostra uno schema a blocchi di un modulatore I/Q.

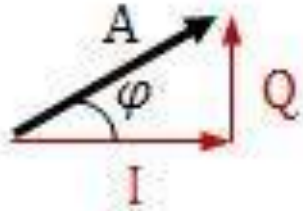


I cerchi con una 'X' rappresentano i mixer che eseguono una conversione di frequenza di tipo upconvert. Il modulatore I/Q miscela la forma d'onda I con l'onda sinusoidale portante RF, e miscela il segnale Q con la stessa onda portante sinusoidale RF, ma sfasata di 90° . Il segnale Q è sottratto dal segnale I producendo la RF modulata.

SDR : I e Q

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = A \cos(2\pi f_c t) \cos(\varphi) - A \sin(2\pi f_c t) \sin(\varphi)$$



$$I = A \cos(\varphi)$$

$$Q = A \sin(\varphi)$$

$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t)$$

where I is the amplitude of the in-phase carrier

Q is the amplitude of the quadrature-phase carrier

I 90 gradi di sfasamento della portante sono l'origine dei nomi per i dati I e Q. I si riferisce a dati in fase (la portante è in fase) mentre Q si riferisce a dati in quadratura (la portante è sfasata di 90 gradi). Questa tecnica è nota come quadrature upconversion e lo stesso modulatore I/Q può essere utilizzato per qualsiasi schema di modulazione.

SDR : I e Q

Questo perché il modulatore I/Q semplicemente reagisce alle variazioni delle ampiezze di I e Q, e i dati di I e Q possono essere utilizzati per rappresentare le variazioni di ampiezza e di fase di un segnale. La flessibilità e semplicità (rispetto ad altre opzioni) della progettazione di un modulatore I/Q è la ragione della sua diffusione e popolarità.

GENERAZIONE DI FORME D'ONDA ARBITRARIE PER MODULAZIONI DIGITALI

Il progresso nelle tecniche di generazione dei segnali favorisce la realizzazione di **generatori di segnali universali** di nuovo tipo, che sono capaci di raggiungere le prestazioni necessarie al collaudo e alla validazione di **sistemi avanzati con modulazioni digitali** senza imporre gli elevati costi tipici della strumentazione di fascia più elevata.

Oggi quasi tutti i servizi di comunicazione usano uno o più metodi di **modulazione digitale**.

GENERAZIONE DI FORME D'ONDA ARBITRARIE PER MODULAZIONI DIGITALI

Tradizionalmente, gli **strumenti di misura e collaudo per applicazioni a radio frequenza** sono stati progettati per affrontare uno specifico compito, per cui l'introduzione di nuove e più complesse forme di codifica e modulazione ha spesso richiesto l'aggiornamento e la sostituzione dei relativi sistemi di misura.

Per i **segnali di test** necessari a validare un ricevitore in fase di progetto o a verificarne le prestazioni in fase di collaudo lo strumento tipico è il **generatore di segnali vettoriali** (VSG, *Vector Signal Generator*), un'apparecchiatura capace di generare uno o più portanti controllando in tempo reale le rispettive ampiezze e fasi.

GENERAZIONE DI FORME D'ONDA ARBITRARIE PER MODULAZIONI DIGITALI

Le misure possono essere talvolta necessarie lavorando sui **segnali a radiofrequenza**, ma in molti altri casi le prove si eseguono anche a frequenza più basse, alla **frequenza intermedia (MF)** o addirittura in **banda base**.

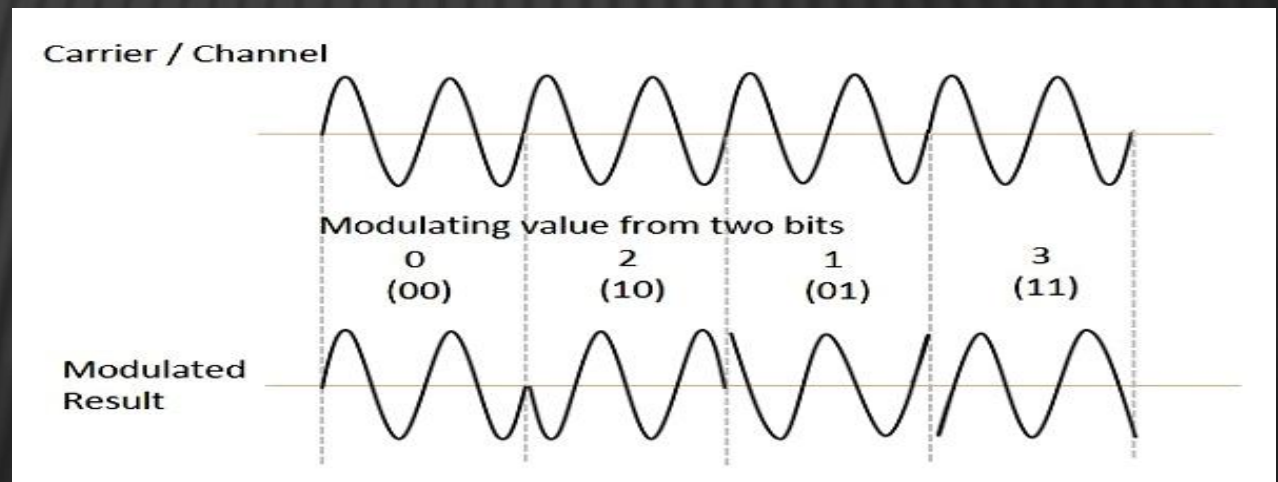
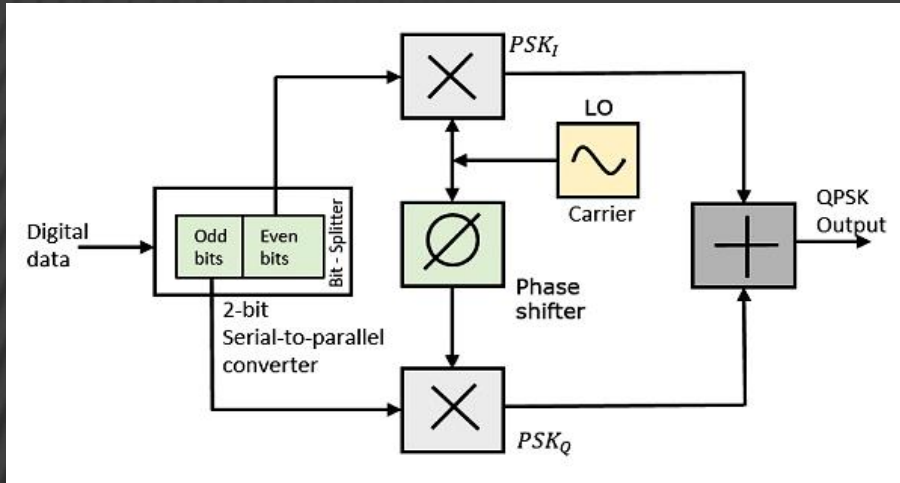
I moderni **generatori di forme d'onda arbitrarie**, o **AWG** (*Arbitrary Waveform Generator*) possono facilmente generare i segnali in banda base a frequenza intermedia e in alcuni casi anche a radiofrequenza con la **qualità necessaria per le misure su modulazioni digitali** ad un costo decisamente inferiore rispetto a quello dei classici analizzatori di segnali vettoriali.

GENERAZIONE DI FORME D'ONDA ARBITRARIE PER MODULAZIONI DIGITALI

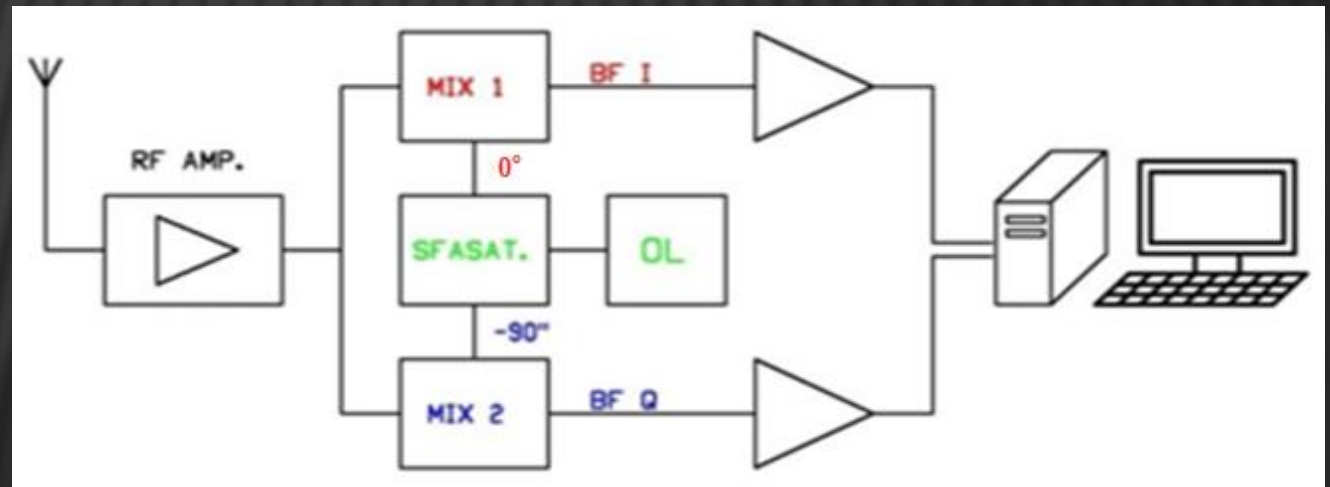
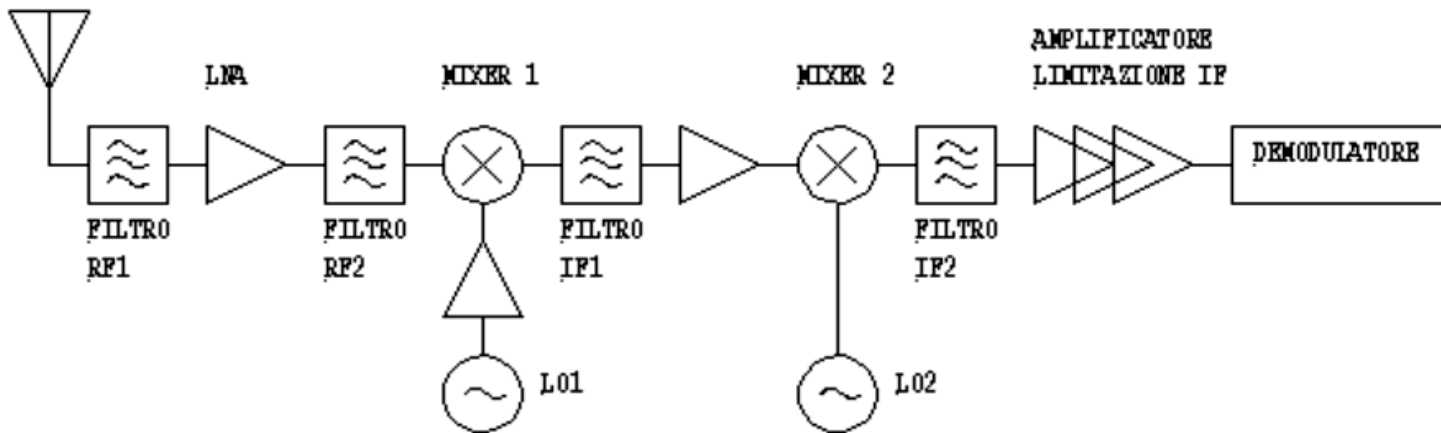
I generatori di forme d'onda arbitrarie a basso costo sono tipicamente basati sulla flessibile ed economica tecnica della **sintesi digitale diretta**, o **DDS** (*Direct Digital Synthesis*). Purtroppo però, la sintesi digitale diretta soffre di alcune importanti limitazioni che impediscono generalmente di ottenere segnali di qualità sufficiente per le prove su segnali a radiofrequenza o a frequenza intermedia, e talvolta anche per segnali in banda base a larga banda.

Una recente innovazione introdotta da Agilent, battezzata tecnologia **Trueform**, ha cambiato le regole del gioco, consentendo di ottenere segnali di **qualità sufficiente** pur in strumenti che **mantengono il basso costo** tipico di quelli tradizionali a sintesi digitale diretta.

MODULAZIONE QPSK



RICEVITORE TRADIZIONALE E SOFTWARE DEFINED RADIO



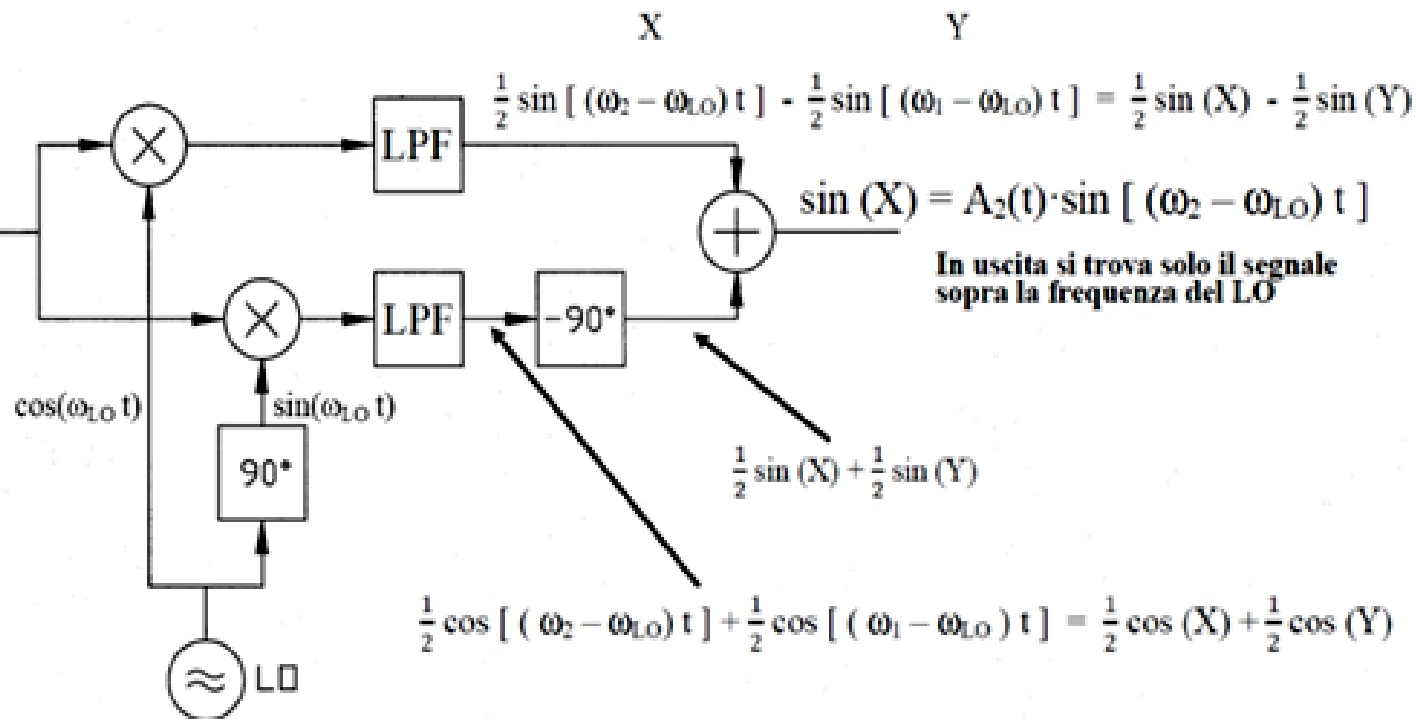
LA MATEMATICA DEGLI SDR

Ricevitore SDR

Segnali sopra e sotto
la frequenza del LO

$$A_2(t) \sin(\omega_2 t) + A_1(t) \sin(\omega_1 t)$$

Ipotesi
 $A_1(t) = A_2(t) = 1$
 $\omega_1 < \omega_{LO}$
 $\omega_2 > \omega_{LO}$



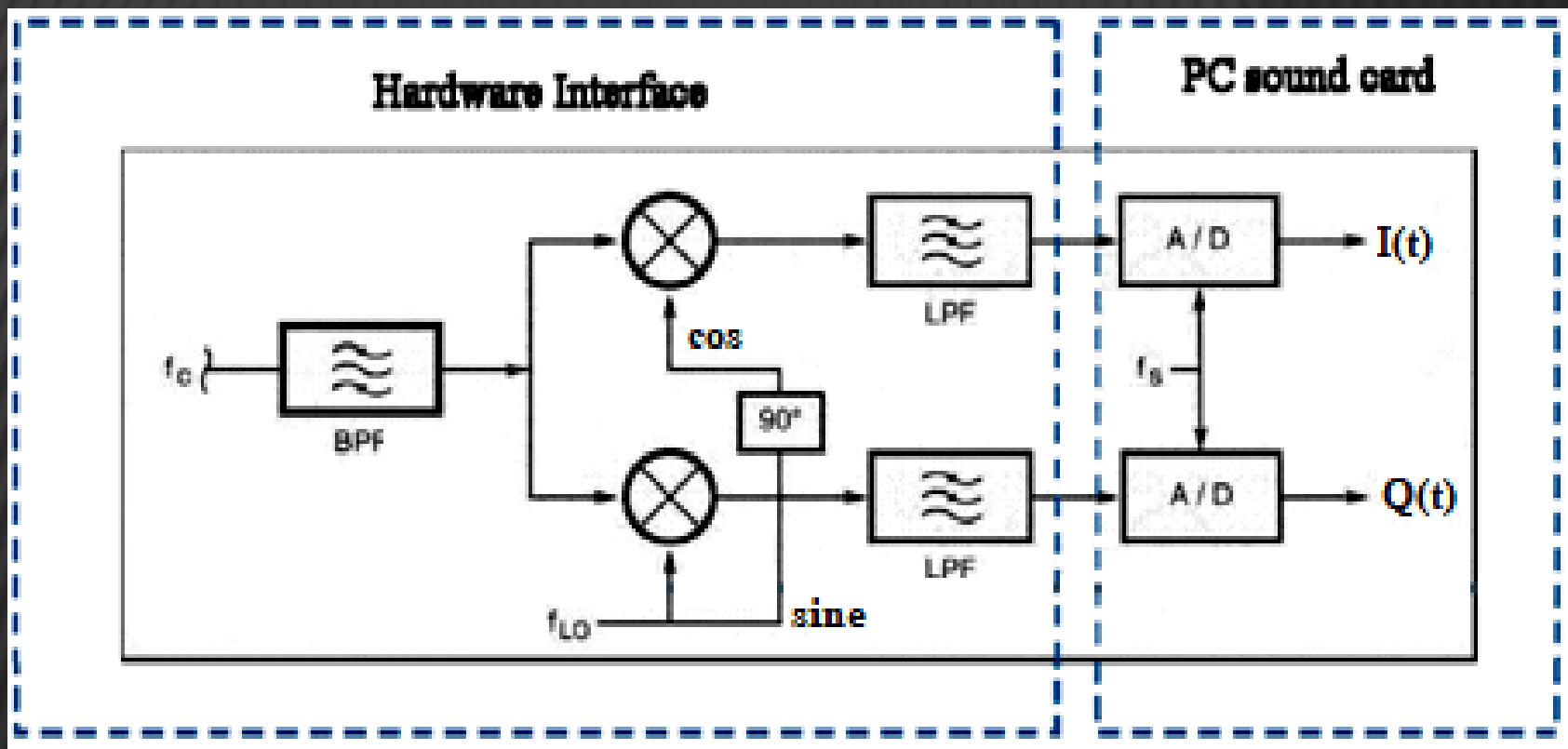
In uscita si trova solo il segnale
sopra la frequenza del LO

VANTAGGI DEI SISTEMI SDR

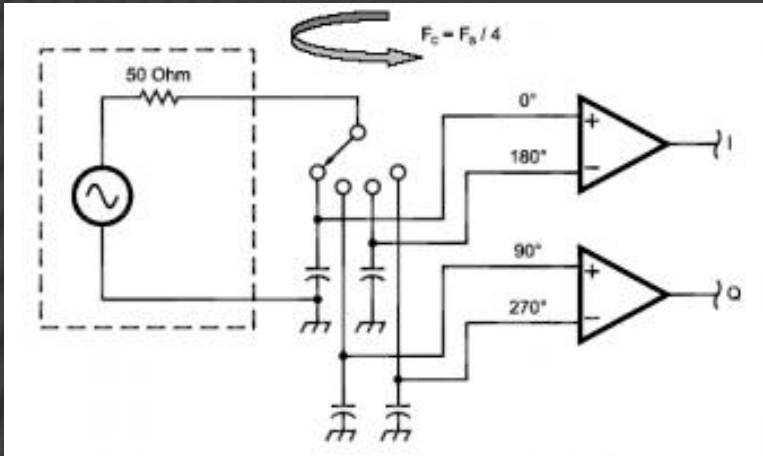
- Semplicità
- Ottima sensibilità del ricevitore
- Riprogrammabilità (non si eseguono più modifiche hardware)
- Upgrade da remoto

SDR : BLOCCHI PRINCIPALI RICEVITORE

QSA Quadrature Sampling Architecture

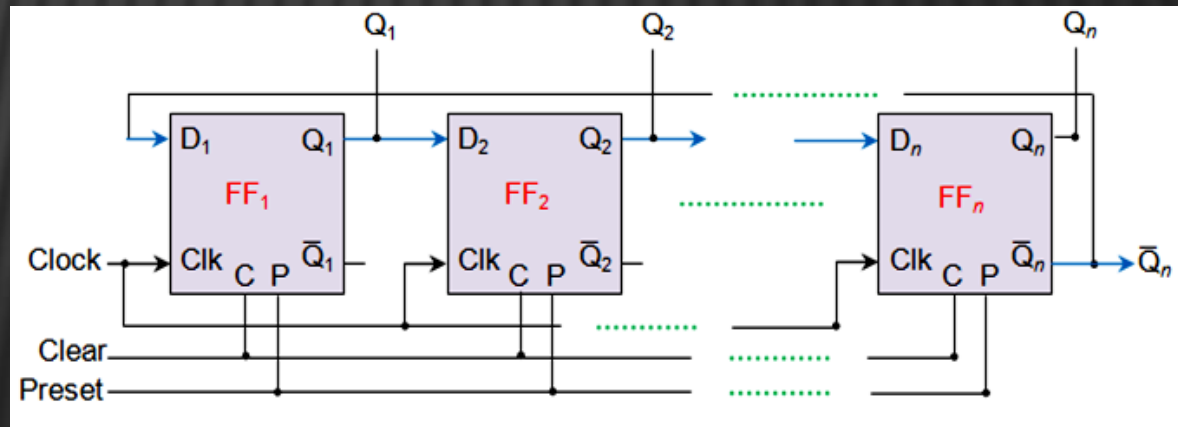


QSD : QUADRATURE SAMPLING DETECTOR

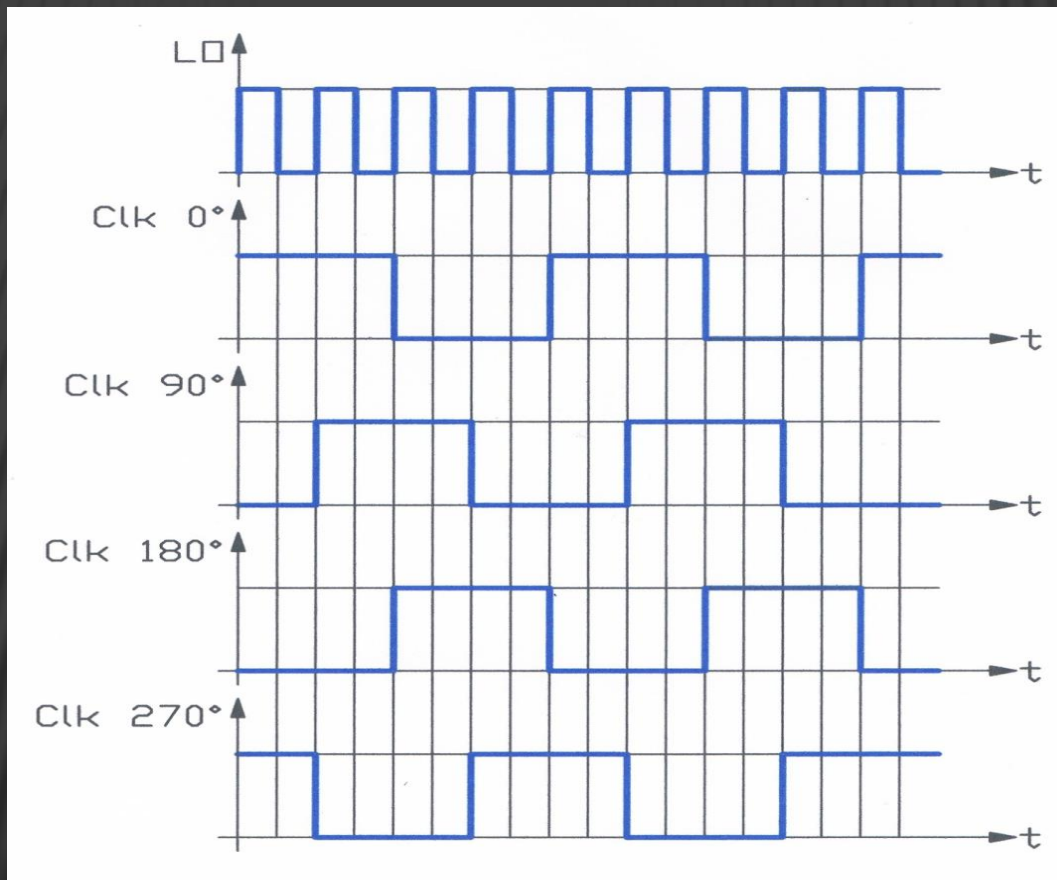


Mixer di Tayloe

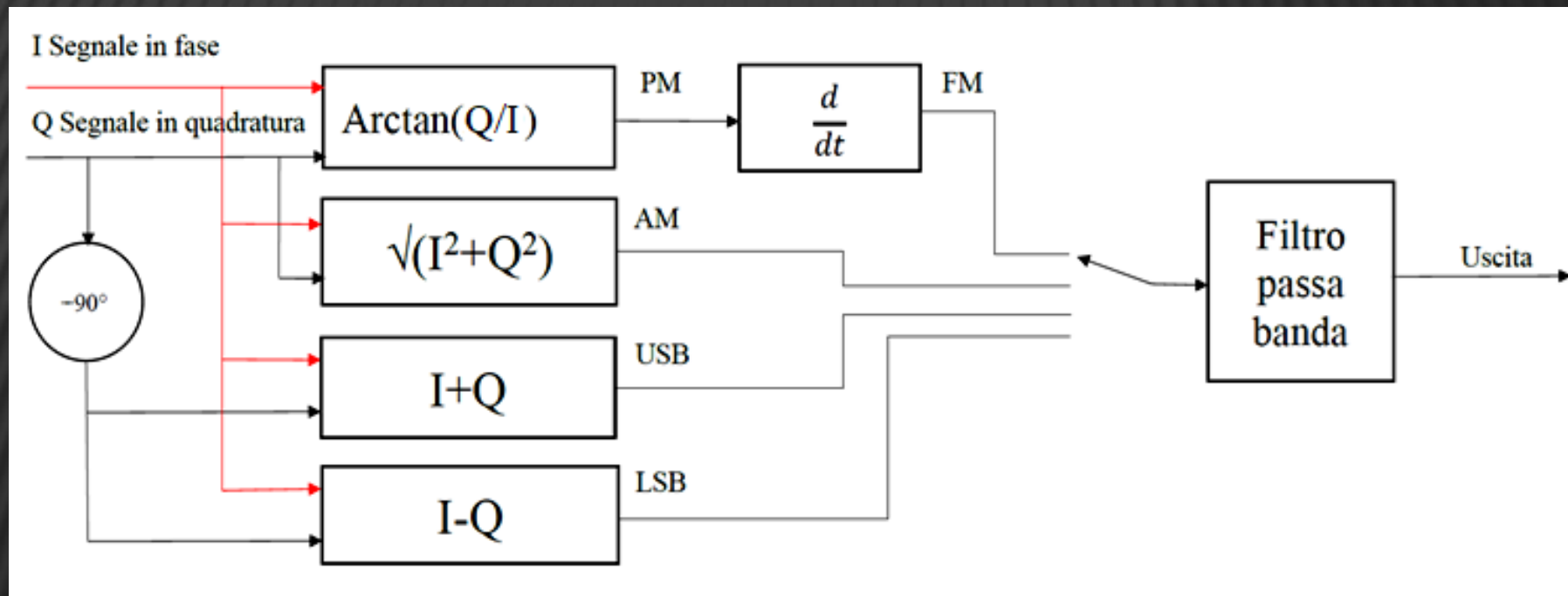
Contatore Johnson



SEGNALE INGRESSO/USCITA CONTATORE JOHNSON 2 BIT



DEMODULAZIONE VIA SOFTWARE



SDR : MODULAZIONE E DEMODULAZIONE

Grazie per l'attenzione.