

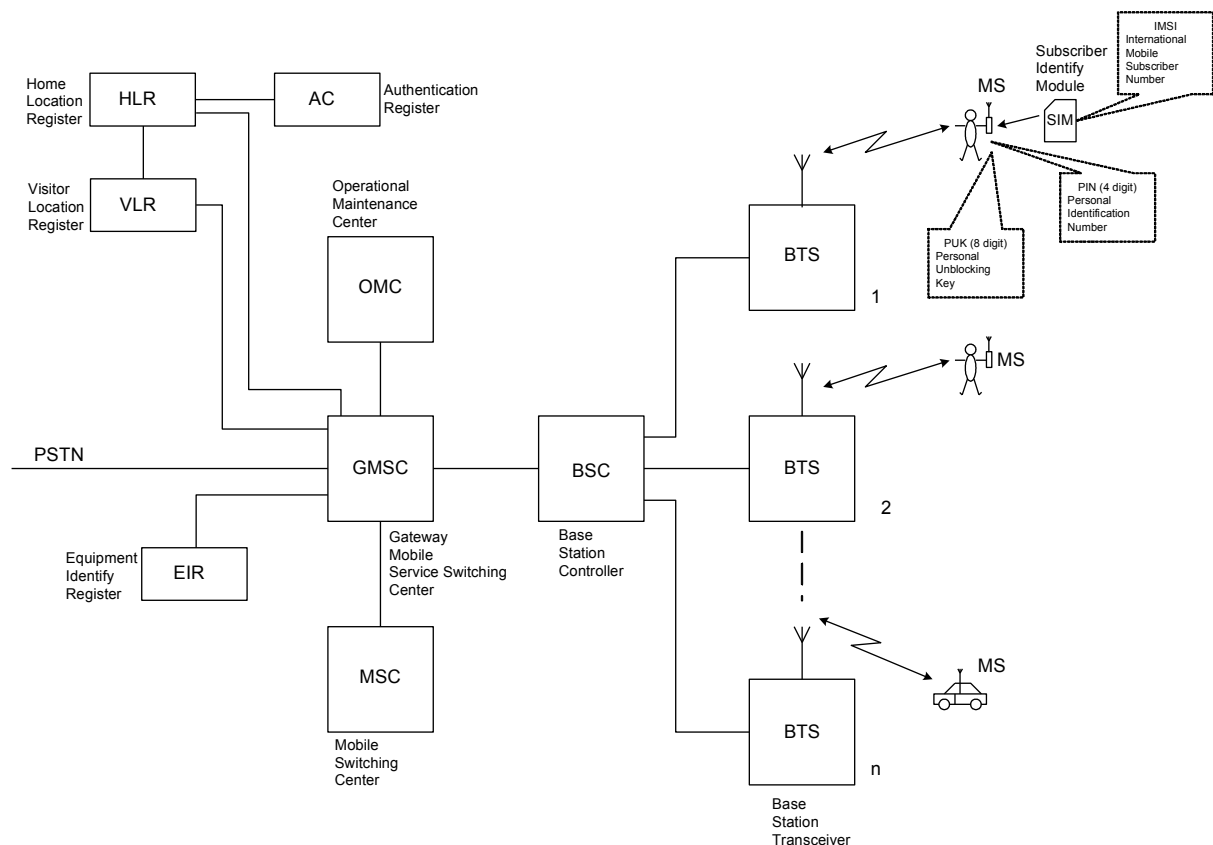
01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Introduzione, un cenno sui sistemi

Il sistema GSM

Uno dei sistemi più complessi di telecomunicazioni oggi esistenti è quello costituito da una **rete cellulare**, che è composta da:

- Dalle unità di commutazione
- Da delle unità di trasmissione
- Delle stazioni radio base
- Dai terminali di utente



Schema a blocchi semplificato di una rete GSM

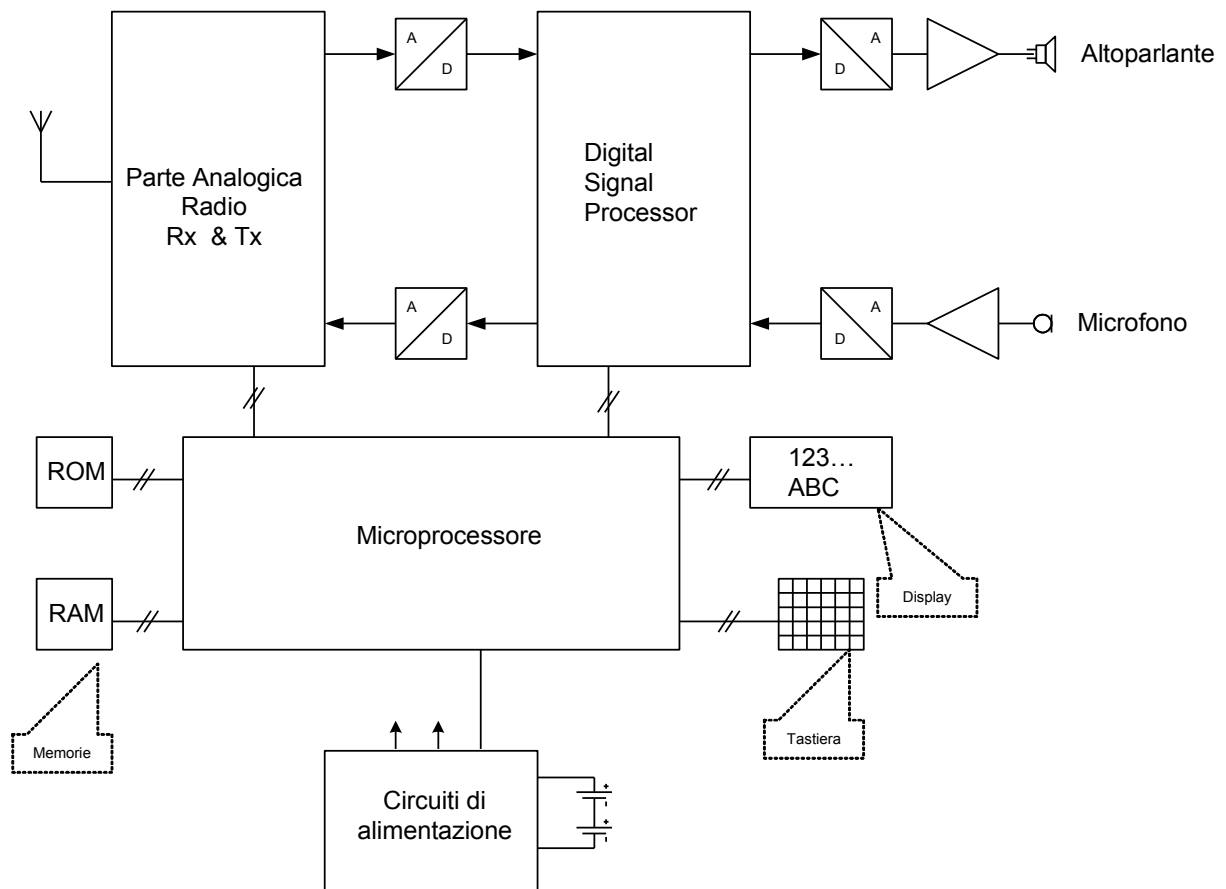
Il GSM (come pre le sue evoluzioni 3G e 4G) è un sistema digitale, che significa che viene trasmessa una informazione codificata e modulata in modo digitale.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Lo schema a blocchi

Ci concentreremo sugli ultimi due, che sono simili, vediamo lo schema a blocchi di un terminale portatile, è composto da:

- I circuiti della radio, Rx, Tx, antenna,
- I circuiti della Banda Base (BB), AD, DA, filtri DSP, amplificatori audio
- I circuiti di controllo, microprocessore, tastiera display
- I circuiti di alimentazione, regolatori, batterie



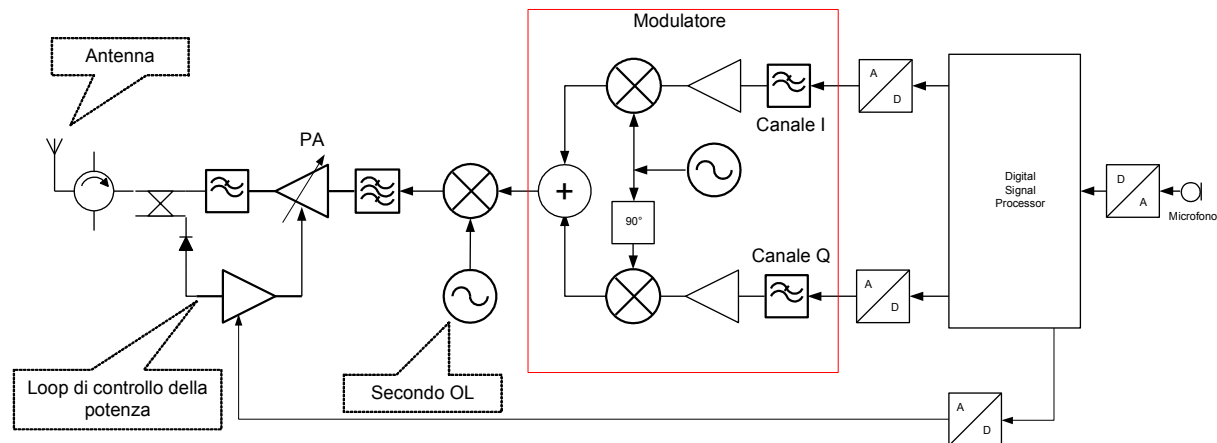
Schema a blocchi di un ricetrasmittitore digitale
(GSM, voce)

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Trasmettitore

Cosa fa un Tx? Serve a irradiare un campo elettromagnetico modulato con intelligenza in modo che possa poi essere captato ad una certa distanza.

Schema a blocchi di un trasmettitore



Le principali caratteristiche di un trasmettitore:

a) Banda di frequenza di lavoro e frequenza di emissione.

- Ad esempio una stazione radio privata potrà usare un trasmettitore progettato per funzionare nella gamma VHF assegnata al servizio di radiodiffusione che va da 88 a 108 MHz, ma potrà lavorare solamente su di un canale cioè su di una sola frequenza assegnata dal Ministero delle Telecomunicazioni.
- Un trasmettitore HF (Onde Corte) per uso militare dovrà coprire la gamma da 2 a 30 MHz.
- Il trasmettitore di un telefonino GSM con due bande avrà al suo interno un trasmettitore in grado di lavorare su due bande (up link):

- Gamma a 900 MHz , a 880 MHz a 915 MHz,
- Gamma a 1800 MHz , da 1710 MHz 1785 MHz .

Mentre la stazione base trasmetterà (down link) :

- Gamma a 900 MHz , da 925 MHz a 960 MHz,
- Gamma a 1800 MHz, da 1805 MHz a 1880 MHz..

L'offset fra Tx ed Rx è di 45 MHz a 900 MHz ed i 95 MHz a 1800 MHz.

Molti sistemi di radiocomunicazione sono canalizzati, cioè ad ogni canale radio viene assegnato un preciso valore di frequenza .

Una caratteristica importante legata alla frequenza di emissione è la stabilità di frequenza. Di solito è specificata dalle norme.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il sistema **GSM** è un sistema **misto FDMA e TDMA** :

- FDMA, Frequency Division Multiple Access
- TDMA, Time Division Multiple Access

ARFCN:	124
Spaziatura di frequenza Rx Tx:	45 MHz e 95 MHz
Spaziatura nel tempo fra RX Tx:	3 time slots
Velocità di modulazione:	270,833 kBits/sec
Periodo di frame:	4,615 mS
Timeslot:	576,9 μ S
Durata Bit:	3,692 μ S
Modulazione:	0,3 GMSK
TDMA:	8

b) Potenza di uscita.

- E la potenza delle portante a RF che il trasmettitore irradia attraverso l'antenna. Si misura in Watt (frazioni o multipli) . Il suo valore dipende dalla distanza che il trasmettitore deve coprire. Da pochi metri nel caso degli aprì cancello (5 – 10 mW) e dei telefono cordless (10 – 200 mW) ai trasmettitori di radiodiffusione a onde corte (1 – 10 MW). La distanza coperta (o l'area) non dipende solo dalla potenza del Tx, ma dal sistema di antenna (Guadagno), sensibilità del ricevitore, dal tipo di modulazione e di codifica del segnale trasmesso.
- I telefoni cellulari GSM portatili emettono con una potenza massima di 2 W (in 20 step) con una potenza minima di 5 dBm, varia in funzione della distanza dalla stazione radio base) mentre le stazioni fisse possono arrivare anche a 20 W.

Un trasmettitore GSM che lavora in un sistema TDMA quando trasmette occupa solamente 1/8 del tempo totale di frame, cioè emette potenze a solamente per **576,9 μ S** poi

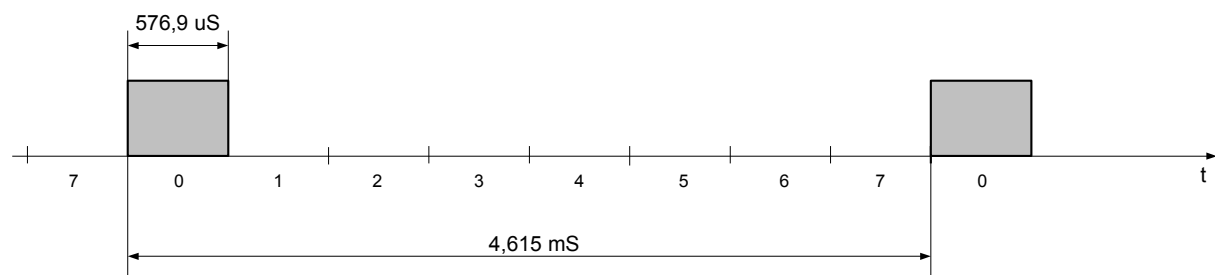


Figura 3

L'impulso trasmesso deve essere contenuto in una sagoma temporale in modo da contenere l'occupazione spettrale.

Nel caso del GSSM/GPRS il trasmettitore può trasmettere per più slot, dipende sia dalla capacità del modem che dal traffico sulla stazione base.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

c) Tipo di modulazione. Per esempio, qui a Trieste, ci sono trasmettitori che trasmettono con vari sistemi di modulazione:

- Le trasmissioni radiodiffusione sono trasmesse in AM (sulle OM) ed in FM (in VHF).
- La TV una modulazione composita in AM & FM
- Le radio della polizia e dei VVFF in FM
- Il GSM che usa un particolare forma di MSK, la 0,3 **GMSK**,

....senza contare le trasmissioni a bassa potenza tipo WiFi, Bluetooth etc

d) Distorsione del segnale modulato. Aspetto molto delicato, molto semplice da definire e da misurare nel caso dei sistemi di modulazione analogica, ma no altrettanto quando si tratta di modulazione digitale, ormai prevalentemente fatta nel piano IQ (fase e quadratura).

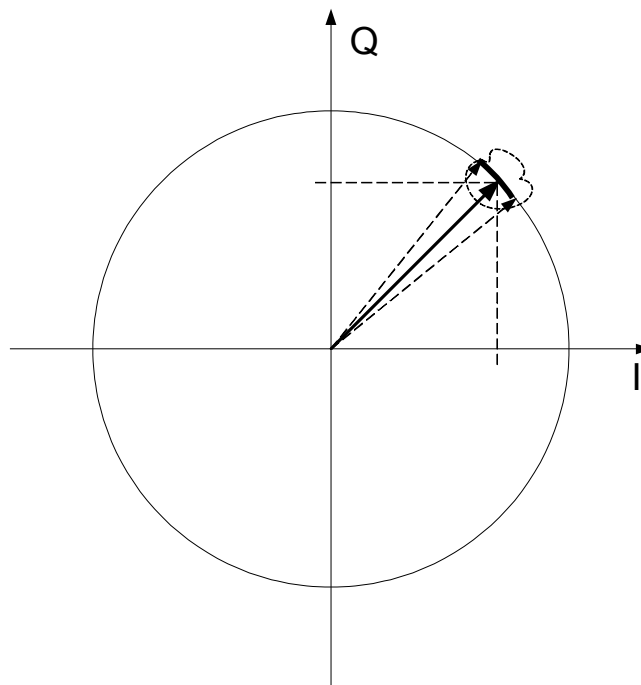


Figura 4

Nel GSM ad esempio la modulazione GMSK richiede che l'errore di fase (scostamento della traiettoria di fase reale da quella ideale) sia:

- Di picco < 20 gradi
- RMS < 5 gradi

Questo parametro è **fortemente influenzato dal rumore degli oscillatori locali** sia in trasmissione che in ricezione.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

e) Spaziatura di canale e larghezza di canale.

I vari regolamenti e leggi nazionali ed internazionali stabiliscono con precisione come devono essere posizionate in frequenza le varie stazioni trasmittenti di solito sono equamente distanziate da un valore fisso di frequenza che viene chiamato spaziatura di canale. Ad esempio:

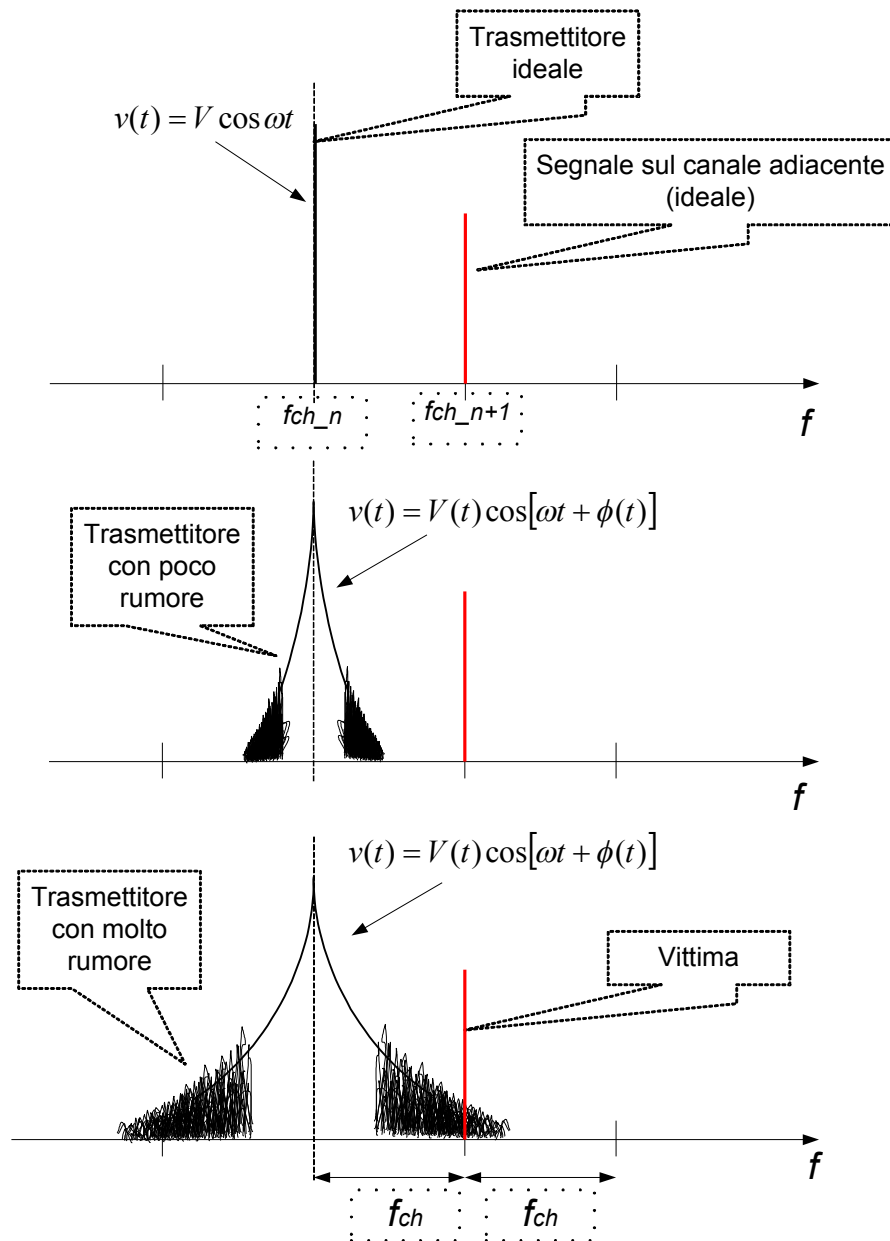
- Nella radiodiffusione FM in VHF è di 200 kHz,
- Nel GSM è di 200 kHz.
- Nelle radio FM della polizia è di 25 kHz.

La **larghezza di canale** dipende dal tipo di modulazione usate e deve essere inferiore alla spaziatura di canale in modo da evitare che una trasmissione interferisca sovrapponendosi ad un'altra. Ad esempio nella radio diffusione FM in VHF la larghezza di canale è di +/- 75 kHz. Si lascia cioè una banda di guardia fra una stazione ed un'altra.

f) L'emissione di segnali indesiderati. Un trasmettitore deve emettere solamente sulla frequenza sulla quale è destinato ad operare, ma molte volte per come è costruito può emettere segnali anche su frequenze diverse. Le più ovvie sono le **armoniche** della frequenza fondamentale $2f$, $3f$ e così via, ma ci possono essere dei segnali indesiderati anche su altre frequenze sia vicine alla portante (alimentatori a commutazione) che distanti (portante ottenuta per mescolazione). Questi segnali vengono chiamati segnali spuri o spurie. La loro attenuazione minima è fissata dalla norme

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

g) Il rumore sul canale adiacente. Stesso problema del punto precedente. Un trasmettitore potrebbe disturbare quelli collocati sui canali adiacenti se la sua purezza spettrale e bassa.



01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Ricevitore

Cosa fa un Rx? Un ricevitore è una macchina capace di recuperare un segnale modulato con intelligenza da una portante a RF raccolto dall'antenna in presenza di diverse specie di interferenze.

Alcune date della storia della radio:

- Maxwell 1865
- Hertz 1877
- Marconi 1895
- Armstrong 1915 (la supereterodina)

Il nome di **eterodina** fu inventato da Fessenden, dal greco **heteros** = differente e da **dynamis** = **potenza**. La sua applicazione fu un ricevitore per ricevere i segnali emessi dai trasmettitori a scintilla sintonizzati tramite un ricevitore composto da un mescolatore non lineare ed un oscillatore locale costituito da un alternatore in alta frequenza (massimo 100 kHz). La conversione era direttamente in bassa frequenza, cioè si ascoltava direttamente, con la cuffia, il segnale telegrafico (Morse) ricevuto. Aveva realizzato un ricevitore a conversione diretta (molto usato oggi), ma aveva anticipato i tempi, l'alternatore usato come oscillatore locale si comportava come un trasmettitore e disturbava le altre emissioni. Il sistema fu abbandonato

Con l'invenzione del triodo, de Forest, (1913) si cominciarono ad usare i ricevitori ad amplificazione diretta, ma avevano dei limiti nella selettività e nel variare la frequenza di ricezione.

Nel 1915 Armstrong modificò il principio della eterodina applicando un oscillatore locale a triodo e invece di convertire direttamente in bassa frequenza fece una conversione a 50 kHz e su questa frequenza realizzò un amplificatore selettivo. Chiamò il circuito o sistema **super eterodina**.

Vedere anche gli appunti sulla supereterodina.

Le principali caratteristiche di un ricevitore sono:

a) Banda di frequenza di lavoro e la frequenza di ricezione.

Sono valide le stesse considerazioni fatte per il trasmettitore. Il trasmettitore di un telefonino GSM con due bande avrà al suo interno un trasmettitore capace di lavorare su bande, una a 900 MHz (più precisamente da 880 MHz a 915 MHz) e una a 1800 MHz (da 1710 MHz 1785 MHz) e un ricevitore che copra le stesse gamme, ma spostate in alto di 45 MHz (915 – 960 MHz e 1805 – 1880 MHz).

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

b) La sensibilità (BER, S/N)

La sensibilità è la capacità di un ricevitore di rivelare un debole segnale RF. Viene espressa normalmente come intensità (potenza in dBm o tensione in uV) del segnale ricevuto per un dato rapporto segnale – rumore, S/N oppure per un dato BER.

Un aspetto molto differente dei sistemi digitali, come il GSM, rispetto a quelli analogici è che l'informazione con cui viene modulata la portante su una o più delle sue caratteristiche (potenza, fase o frequenza) avviene in modo discontinuo ovvero per step discreti, mentre nei sistemi analogici avviene in modo continuo. Nel GSM si ha usato la modulazione GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). L'informazione viene cioè codificata sotto forma di simboli o bit, per cui, per definire la sensibilità di un ricevitore digitale non si usa il rapporto S/N, ma il Bit Error Rate (BER) per una data potenza del segnale di ingresso.

Il segnale ricevuto nel sistema GSM è modulato con un flusso continuo di dati costituiti da blocchi di bit codificati e protetti in modo diverso a seconda della loro funzionalità. Ad esempio i dati relativi alla voce sono meno protetti di quelli relativi alla segnalazione, quindi si valuta la sensibilità in funzioni di diversi tipi di BER e per diverse condizioni di canale, con o senza fading.

Per un stazione mobile di piccole dimensioni (un telefonino) la specifica GSM stabilisce che la sensibilità di riferimento deve essere:

-102 dBm per un BER $\leq 0,1\%$ sul canale di traffico. (paragrafo 6.2 della specifica ETSI 300 910, GSM05.05).

c) La selettività.

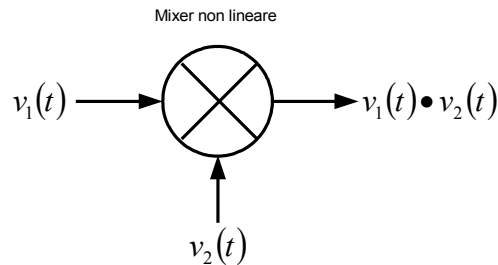
La selettività è la misura di un ricevitore di quanto bene un ricevitore può selezionare il segnale della stazione desiderato (utile) escludendo tutti gli altri. Ci sono diverse caratteristiche del ricevitore che contribuiscono alla sua selettività complessiva :

- La reiezione all'interferenza **co-canale**. È la capacità di un ricevitore di ricevere il segnale desiderato anche in presenza di un segnale interferente presente sullo stesso canale. È una caratteristica che impatta sul progetto di un sistema radiomobile cellulare e influisce sul riuso della frequenza.
Il sistema GSM prevede una reiezione di almeno **9 dB**. Un ricevitore con una reiezione di 7 dB è migliore di uno con soli 10 dB, questa caratteristica dipende da come è costruito il demodulatore.
- La selettività sul **canale adiacente**. Dipende dalla selettività dei filtri di frequenza intermedia e dalla purezza spettrale dell'oscillatore locale spuri e rumore.
- La reiezione della **frequenza immagine** ed alle altre frequenze indesiderate. (vedere appunti sulla supereterodina)
- Il **blocking**. I segnali presenti in banda, diversi da quello utile, possono creare delle risposte spurie del ricevitore che possono ricadere in banda utile, il risultato è un degrado di C/I (rapporto portante segnale interferente) all'uscita del ricevitore.

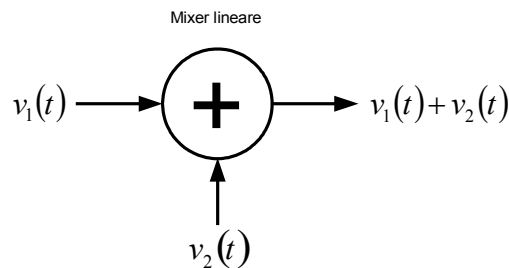
01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

La conversione di frequenza

Il circuito che opera la conversione di frequenza è il mescolatore o **mixer**, è un circuito non lineare che opera una moltiplicazione.



Da non confondere con i mixer lineari, che sono dei sommatore



Il mixer (moltiplicatore) se visto nel dominio del tempo opera una moltiplicazione fra due funzioni trigonometriche. Le formule di Werner

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

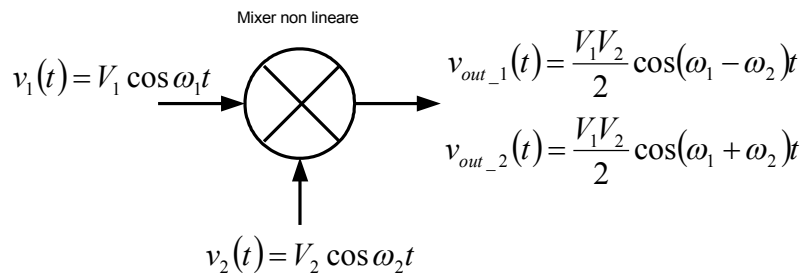
$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

nel nostro caso

$$v_1(t) = V_1 \cos \omega_1 t \quad v_2(t) = V_2 \cos \omega_2 t$$

$$v_1(t) \cdot v_2(t) = \frac{V_1 V_2}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_2) t + \cos(\omega_1 + \omega_2) t]$$

all'uscita avremo due segnali ,

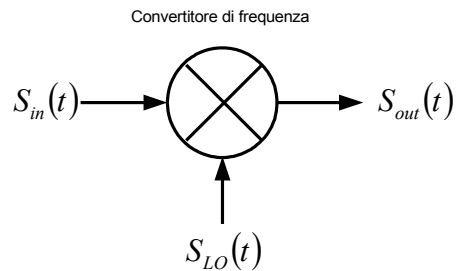


$$v_{out_1}(t) = \frac{V_1 V_2}{2} \cos(2\pi f_1 - 2\pi f_2) t$$

$$v_{out_2}(t) = \frac{V_1 V_2}{2} \cos(2\pi f_1 + 2\pi f_2) t$$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il convertitore nel dominio della frequenza



Il mixer (o miscelatore) è un circuito non lineare che consente di effettuare la conversione di frequenza ossia permette di traslare lo spettro di frequenza $S_{in}(f)$ del segnale d'ingresso $S_{in}(t)$ di una quantità stabilita dalla frequenza f_{LO} del segnale sinusoidale $S_{LO}(t)$ secondo la relazione:

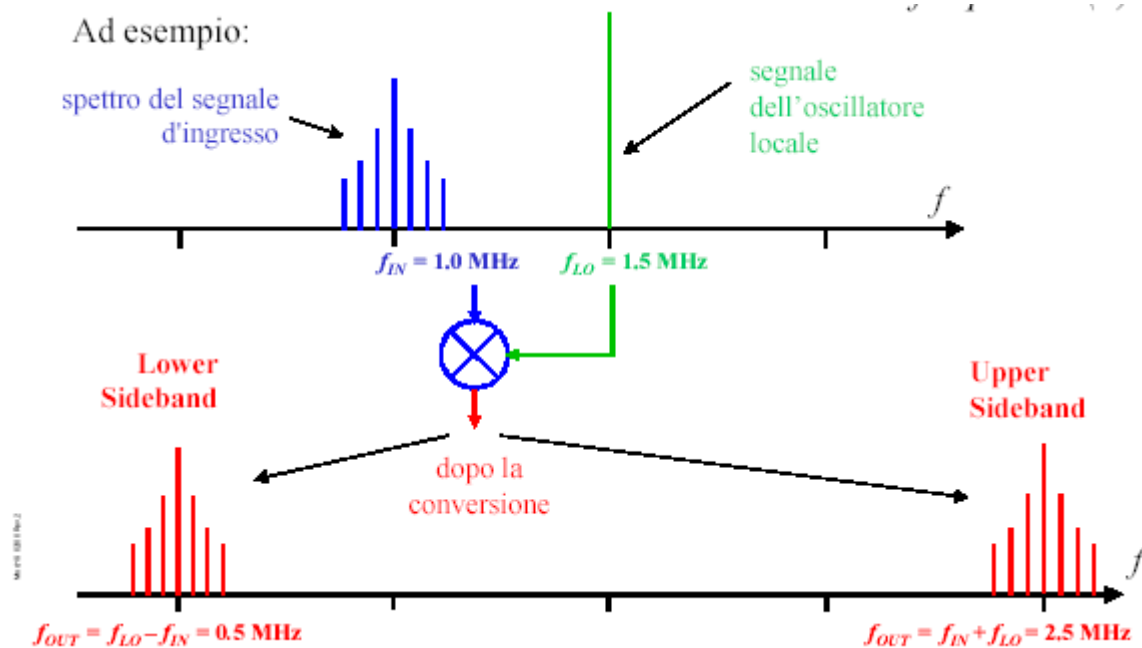
$$f_{out} = |f_{in} \pm f_{LO}|$$

Il mixer è un dispositivo **non lineare** perché in uscita si presentano frequenze che non esistono al suo ingresso (non vale il principio della sovrapposizione degli effetti).

Esistono casi in cui la non linearità è un effetto desiderato, ad esempio, con l'amplificatore a basso rumore! Attenzione: nel mixer la non linearità deve essere tale da produrre solamente una traslazione in frequenza del segnale d'ingresso, in funzione del segnale dell'oscillatore locale.

Dunque la versione "ideale" del mixer non comprende alcuna selettività del circuito, idealmente se il segnale d'ingresso si compone di più segnali, in uscita si trova la sovrapposizione degli spettri traslati: si può parlare di "principio di sovrapposizione degli spettri" o di miscelazione lineare (linear mixing)

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO



Si noti che la relazione tra le frequenze dei segnali alle varie porte, ossia:

$$f_{out} = |f_{in} \pm f_{LO}| \quad \text{non ha un'unica soluzione.}$$

In altri termini esistono più valori di frequenze che la soddisfano.

Nell'esempio sopra riportato un segnale centrato ad 1 MHz viene applicato ad un mixer in cui il segnale dell'oscillatore locale ha una frequenza di 1.5 MHz. In base alla relazione tra le frequenze, all'uscita saranno presenti le repliche del segnale d'ingresso centrate in:

$$f_{out} = |f_{in} \pm f_{LO}|$$

$$(1) |1 \text{ MHz} + 1.5 \text{ MHz}| = |2.5 \text{ MHz}| = 2.5 \text{ MHz}$$

$$(2) |1 \text{ MHz} - 1.5 \text{ MHz}| = |-0.5 \text{ MHz}| = 0.5 \text{ MHz}$$

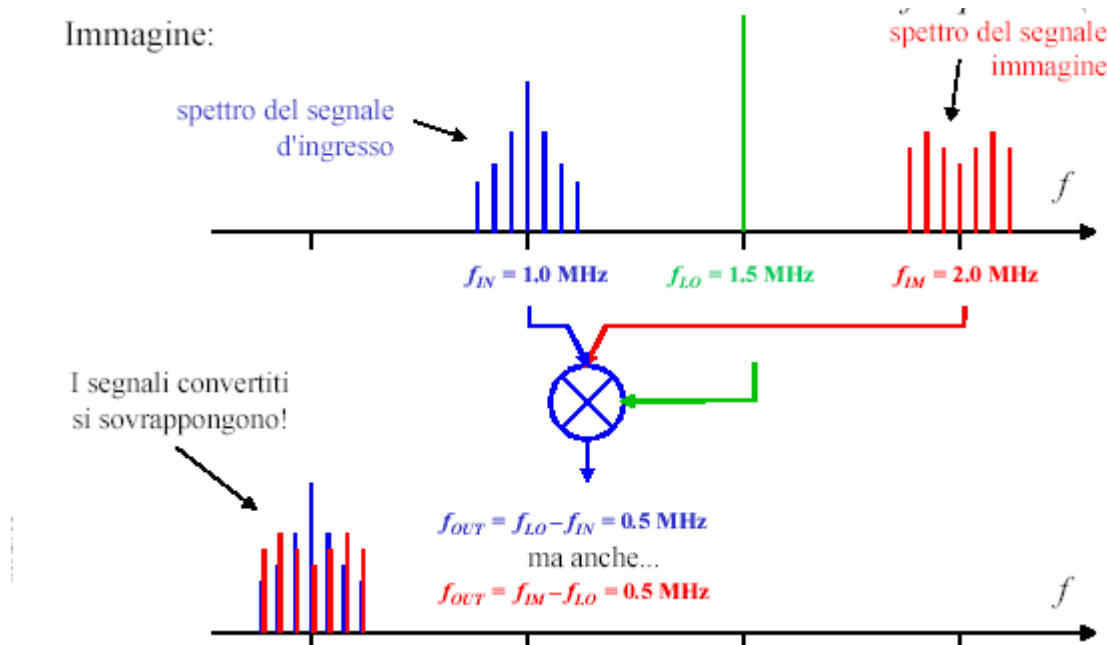
Il segnale risultante dalla soluzione (1) viene chiamato **upper sideband (banda laterale superiore)**, mentre il segnale che soddisfa alla (2) è la **lower sideband (banda laterale inferiore)**

Solitamente interessa **solo uno** dei due segnali, da selezionare con un filtro o un amplificatore selettivo all'uscita del mixer

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Oltre alla creazione di delle due bande laterali all'uscita del mixer, la stessa relazione implica che avvenga la conversione di un altro segnale d'ingresso nella stessa banda del segnale utile. Questo segnale viene detto segnale **immagine**, ed è simmetrico rispetto a f_{LO} in maniera tale che valga:

$$|f_{in} \pm f_{LO}| = |f_{LO} - f_{IM}|$$



Nella figura è evidenziato questo fenomeno con un esempio: si vuole convertire il segnale d'ingresso utile, centrato ad 1 MHz, ad una frequenza più bassa, ossia 0.5MHz. Di conseguenza l'oscillatore locale dovrà avere una frequenza di 1.5 MHz.

$$f_{out} = |f_{in} \pm f_{LO}| = |1\text{MHz} - 1,5\text{MHz}| = |-0,5\text{MHz}| = 0,5\text{MHz}$$

Però se all'ingresso è presente anche un altro segnale, centrato a 2 MHz, lo stesso mixer e la frequenza scelta per l'oscillatore locale lo convertiranno nella stessa banda del segnale utile:

$$f_{out} = |f_{IM} \pm f_{LO}| = |2\text{MHz} - 1,5\text{MHz}| = |0,5\text{MHz}| = 0,5\text{MHz}$$

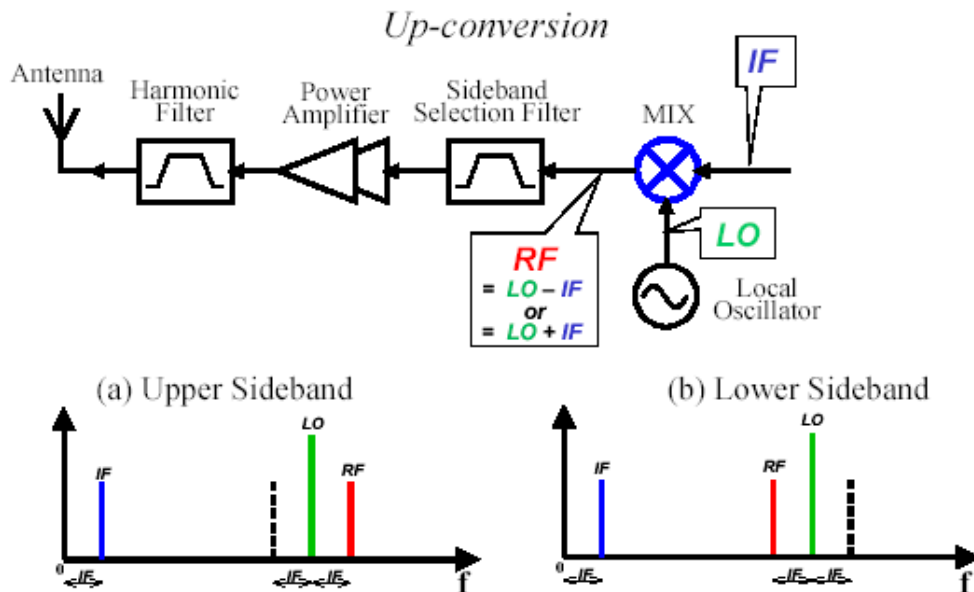
Questo è un problema tipico dei ricevitori, nei quali è generalmente necessario prevedere un filtro per la **reiezione della banda immagine** prima del mixer.

Quando la frequenza dell'oscillatore locale è maggiore di quella del segnale ricevuto, $f_{LO} > f_{RF}$, il valore della frequenza immagine è dato da

$$f_{LM} = f_{RF} + 2f_{IF}$$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Nei trasmettitori il mixer viene usato come **upconverter**, ossia miscela il segnale a frequenza intermedia (IF) con il segnale dell'oscillatore locale (LO) generando un segnale di frequenza pari alla somma (Upper Sideband) o differenza (Lower Sideband) delle frequenze dei segnali d'ingresso. Generalmente uno dei due segnali viene filtrato (attenuato) e l'altro trasmesso.



La conversione di un segnale modulato

Il dispositivo non lineare che permette la conversione di frequenza può essere un dispositivo con una caratteristica di trasferimento di *secondo ordine*, del tipo

$$V_{out_2}(t) = k_2 V_{in}^2(t) \quad (\text{Nota 1 a fine testo})$$

si assume che V_{in} sia la somma dei due segnali di ingresso al mescolatore e che uno dei due sia modulato,

$$V_{mod}(t) = A(t) \cos[\omega_1 t + \phi_1(t)]$$

$$V_{unmod}(t) = \cos(\omega_2 t)$$

L'uscita di secondo ordine sarà

$$V_{out_2}(t) = k_2 [V_{mod}(t) + V_{unmod}(t)]^2$$

$$V_{out_2}(t) = k_2 \{A(t) \cos[\omega_1 t + \phi_1(t)] + \cos(\omega_2 t)\}^2$$

$$V_{out_2}(t) = k_2 \frac{[1 + A^2(t)]}{2} + \frac{k_2 A^2(t)}{2} \cos[2\omega_1 t + 2\phi_1(t)] + \frac{k_2}{2} \cos(2\omega_2 t) +$$

$$+ k_2 A(t) \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1(t)] +$$

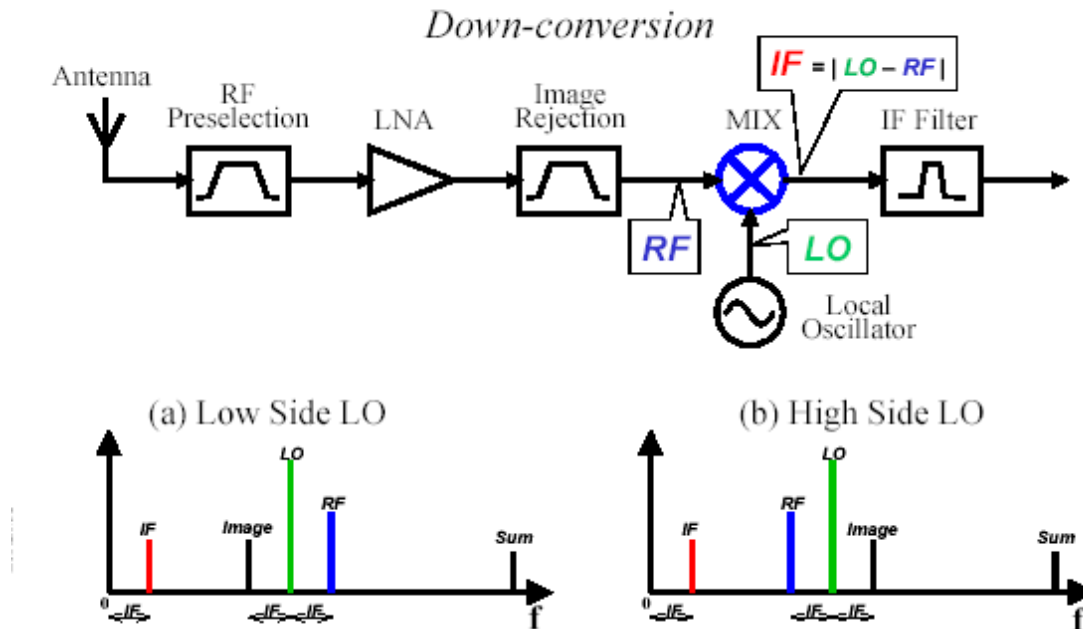
$$+ k_2 A(t) \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1(t)]$$

Questi due sono i segnali desiderati

Vengono conservate le informazioni contenute nella modulazione

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Nei ricevitori il mixer viene usato come **downconverter**: si converte un'intera banda del segnale d'antenna a radiofrequenza (RF) ad una frequenza intermedia (IF) fissa che contiene il segnale utile. Contemporaneamente viene creata anche la banda laterale superiore (Sum).



Dalla banda IF si estrae poi il segnale desiderato utilizzando un filtro di larghezza di banda pari a quella del segnale utile, lo stesso filtro elimina la banda laterale superiore (Sum).

- I circuiti a valle del mixer possono essere ottimizzati per lavorare solo alla frequenza IF.
- Si noti il filtro di reiezione della banda immagine, posto all'ingresso del mixer, che sopprime il segnale alla frequenza immagine.

Infine, va osservato che lo stesso risultato può essere ottenuto nei due modi:

(a) con $f_{LO} < f_{RF}$

(b) con $f_{LO} > f_{RF}$

La scelta più opportuna varia a seconda della pianificazione delle frequenze del sistema.

Cos'è un Ricevitore?

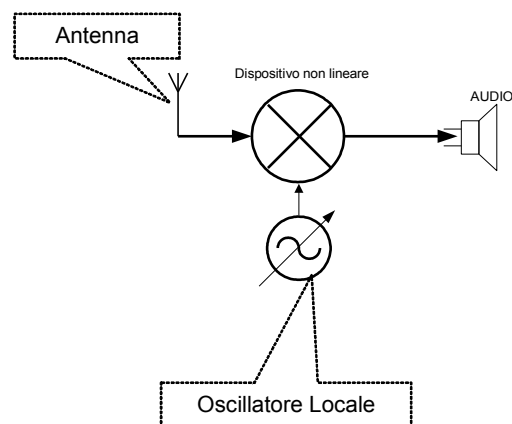
Un ricevitore è una macchina capace di recuperare un segnale modulato con intelligenza da una portante a RF raccolto dall'antenna in presenza di diverse specie di interferenze.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

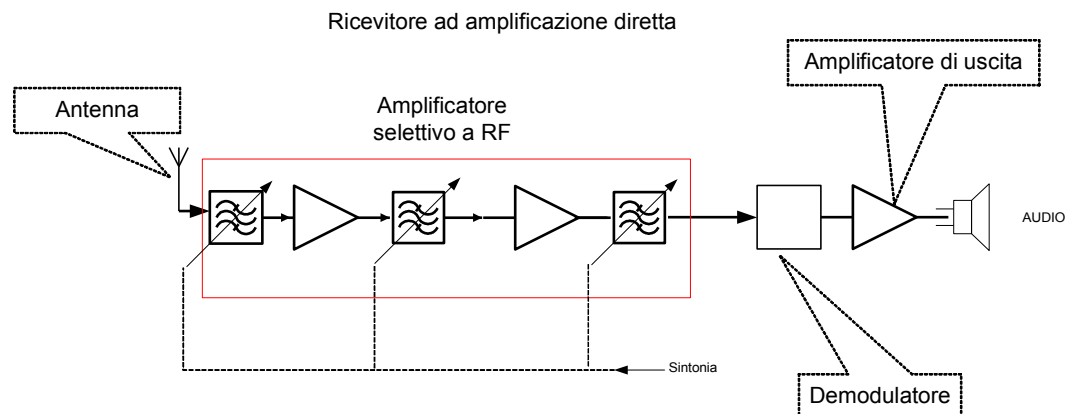
Alcune date della storia della radio

- **Maxwell** 1865
- **Hertz** 1877
- **Marconi** 1895
- **Armstrong** 1915 (la supereterodina)

Il nome di **eterodina** fu inventato da **Fessenden** (scienziato canadese, circa 1900), dal greco **heteros** = differente e da **dynamis** = **potenza**. La sua applicazione fu un ricevitore per ricevere i segnali emessi dai trasmettitori ad arco sintonizzati, tramite un ricevitore composto da un mescolatore non lineare e da un oscillatore locale costituito da un alternatore in alta frequenza (massimo 100 kHz). La conversione avveniva direttamente in bassa frequenza, cioè si ascoltava direttamente, con la cuffia, il segnale telegrafico (Morse) ricevuto. Egli fu il primo a realizzare un ricevitore a conversione diretta (molto usato oggi), ma aveva anticipò i tempi. L'alternatore usato come oscillatore locale si comportava come un trasmettitore e disturbava le altre emissioni, il sistema fu abbandonato.



Con l'invenzione del triodo, de Forest, (1913) si cominciarono ad usare i ricevitori ad amplificazione diretta, ma avevano dei limiti nella selettività, era scarsa e variava in funzione della frequenza, era complesso variare la frequenza di ricezione.



Nel 1915 Armstrong modificò il principio della eterodina, costruì l'oscillatore locale con un circuito a triodo. Invece di convertire direttamente in bassa frequenza fece una conversione alla frequenza di 50 kHz e su questa frequenza realizzò un amplificatore selettivo. Chiamò il sistema **supereterodina**.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il principio della supereterodina

Il principio della supereterodina è illustrato in Figura SE.3. Il segnale ricevuto viene combinato con il segnale di un oscillatore e convertito ad un valore di frequenza che è (di solito) la differenza fra la frequenza dell'oscillatore locale e quella del segnale ricevuto. Questo valore di frequenza viene chiamato Media Frequenza (MF) oppure **Frequenza Intermedia (IF)**.

Nota: La frequenza somma è ovviamente presente, talvolta viene utilizzata al posto della differenza.

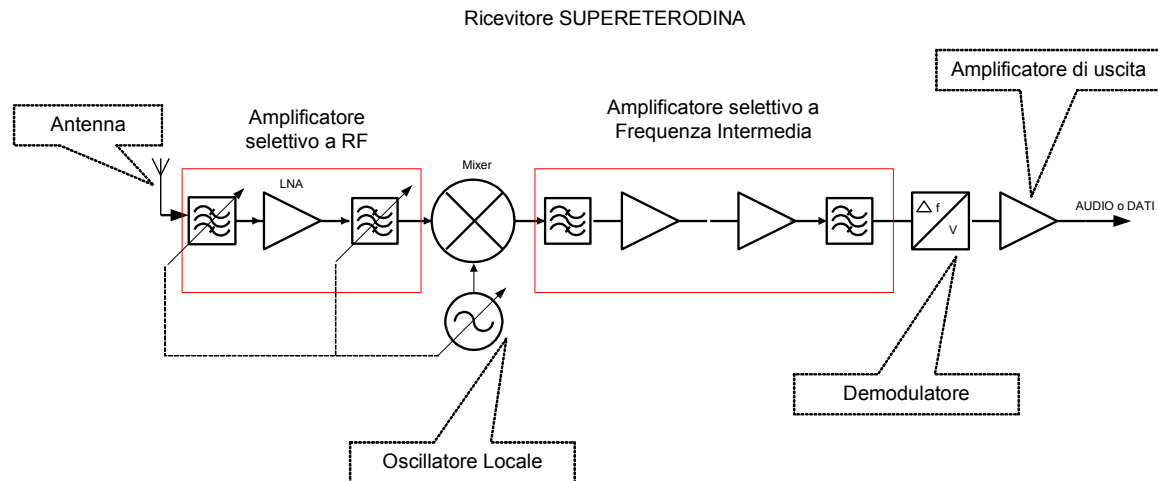


Figura SE.3

I blocchi circuitali che formano la supereterodina sono:

- L'amplificatore sintonizzato a RF
- Il convertitore di frequenza o mixer
- L'amplificatore selettivo a frequenza intermedia
- Il demodulatore (AM, FM, PSK,)
- L'amplificatore di uscita.

Il vantaggio principale della supereterodina è che la selettività rimane la stessa per tutta la gamma di ricezione dei segnali, i filtri a IF si possono realizzare con tecniche tali da renderli molto selettivi e stabili (a cristallo, ceramici,...).

Uno degli svantaggi è che l'oscillatore locale può raggiungere l'antenna ed essere irradiato.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

I filtri nella supereterodina

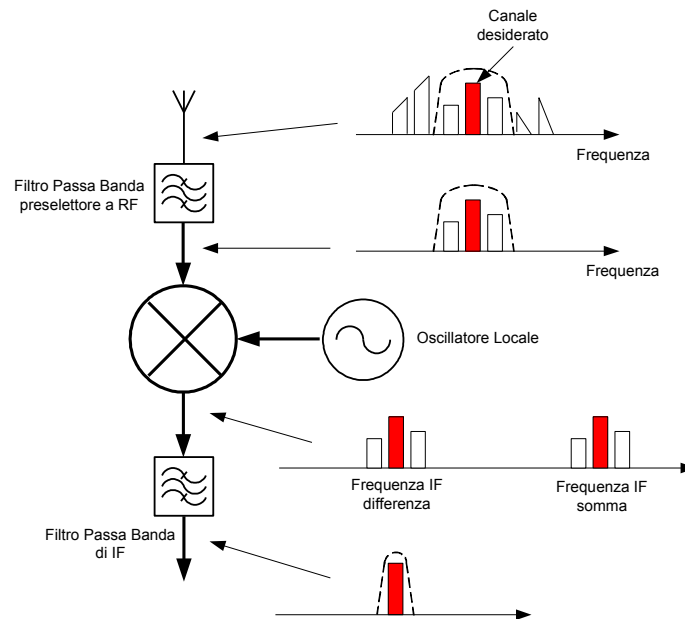


Figura SE.12

Il **filtro di ingresso** passa banda serve:

- a limitare la banda di ricezione,
- ad attenuare la frequenza immagine,
- ad attenuare i prodotti di intermodulazione di secondo ordine.

Il **filtro IF** di frequenza intermedia **definisce la selettività** (statica) del ricevitore. I filtri possono essere di tipo diverso (Bessel, Butterworth, ...), a seconda del tipo di modulazione in gioco e possono impiegare tecnologie costruttive diverse:

- LC, usati in RF nelle gamme HF e VHF e in IF nei più semplici ricevitori commerciali a basso costo
- A cavità risonanti, usati a RF nella gamma VHF, UHF e superiori, sono ingombranti
- A cristallo, molto usati a frequenza IF fino a poco meno di 100 MHz,
- Ceramiche, usati sia in RF che a IF, da circa 100 kHz o poco più a qualche GHz,
- SAW, molto usati sia in RF che a IF per frequenze superiori a 400 MHz circa fino a qualche GHz.

La banda passante dei filtri a IF deve essere sufficientemente larga da contenere lo spettro del segnale modulato, senza attenuare le bande laterali più distanti. Ad esempio nei sistemi a MF di radiodiffusione deve essere ± 75 kHz rispetto alla frequenza centrale del filtro. L'ondulazione (ripple) in banda deve essere contenuta in modo da non attenuare le bande laterali in modo casuale e quindi provocare distorsioni. La banda di massima attenuazione definisce la selettività statica del ricevitore viene dimensionata in funzione della distanza dal canale adiacente, ad esempio 200 kHz nei sistemi FM di radiodiffusione.

Il rapporto fra larghezza della banda alla massima attenuazione (usualmente specificata a 60 dB) e l'attenuazione a 3 dB (larghezza della banda passante) viene chiamato **fattore di forma** del filtro

$$\text{Fattore di forma} = \frac{\text{Banda}_a_{-60dB}}{\text{Banda}_a_{-3dB}}$$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

L'attenuazione in banda deve essere il più contenuta possibile, al massimo qualche dB, solitamente < 1 dB.

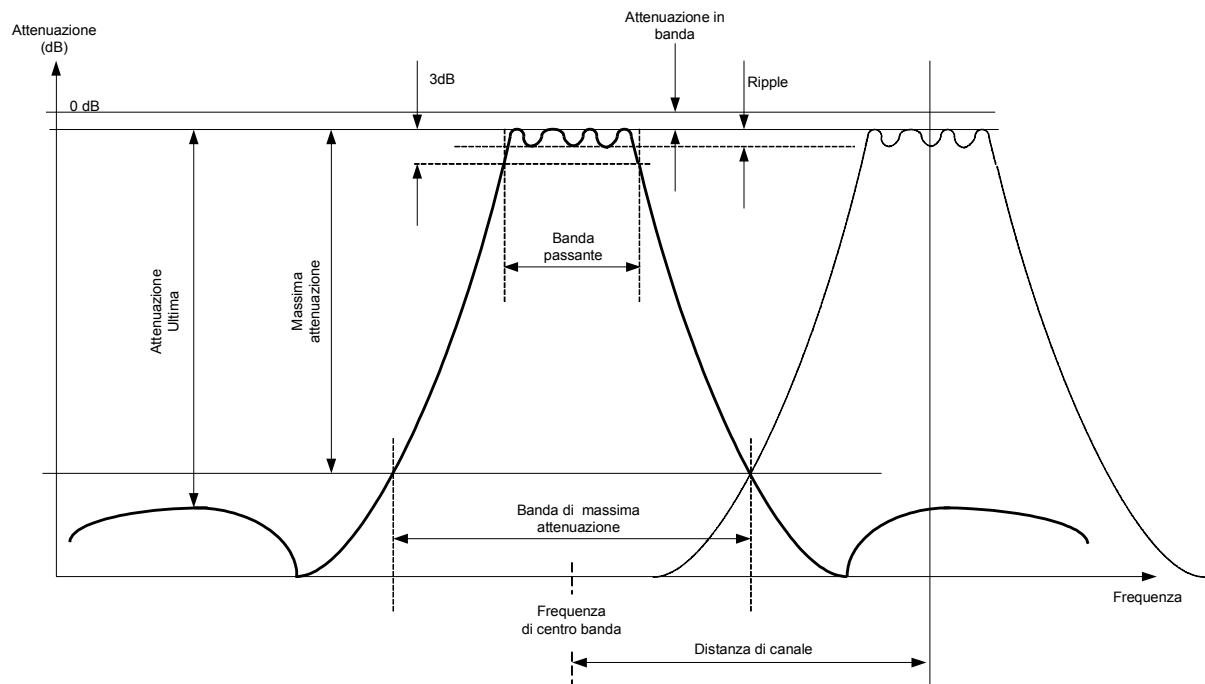


Figura SE.13

I valori tipici di frequenza intermedia sono:

- 455 kHz, nei ricevitori AM per radiodiffusione,
- 10,7 MHz, nei ricevitori FM per radiodiffusione,
- 21,4 MHz, nei ricevitori VHF e UHF,
- 45 MHz, nei ricevitori VHF e UHF,
- 360 MHz, 280 MHz e 246 MHz nei ricevitori GSM nelle bande di 900 e 1800 MHz.

Il controllo automatico di guadagno AGC

Lo scopo dei circuiti che attuano il controllo automatico di guadagno è :

- quello di mantenere il segnale di uscita costante in funzione delle variazioni del segnale di ingresso.
- Evitare che gli stadi amplificatori vadano in saturazione. (solo per i sistemi che usano modulazione di involuppo, come la AM ad esempio).

Questa funzione viene realizzata attraverso un servo meccanismo (loop) di controllo che agisce sugli amplificatori a guadagno variabile a RF e a IF. Talvolta si agisce su di un attenuatore variabile invece che su di un amplificatore a guadagno variabile.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

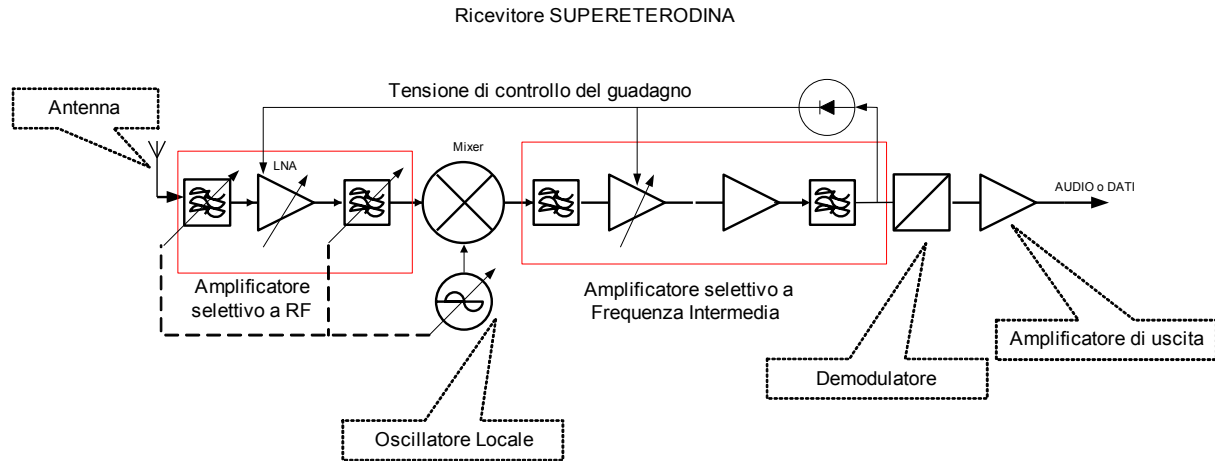


Figura SE.14

L'oscillatore locale

Deve fornire il segnale al mixer per convertire il segnale ricevuto nel segnale a frequenza intermedia. Deve avere una escursione di frequenza sufficiente a coprire la gamma di frequenza da ricevere.

Ad esempio un ricevitore per la radiodiffusione AM sulle OM, gamma che va da 540 kHz a 1600 kHz, con un tipico valore di IF = 455 kHz, l'oscillatore potrà essere sintonizzato nella gamma da 955 kHz a 2055 kHz ($f_{LO} > f_{RF}$) oppure nella gamma da 85 kHz a 1145 kHz ($f_{LO} < f_{RF}$).

In genere gli oscillatori sono sintonizzati variando uno dei due elementi del loro circuito risonante LC, più spesso si agisce sulla C. Nel caso dell'esempio appena riportato si vede che sarà conveniente impiegare la soluzione $f_{LO} > f_{RF}$ per avere una minore escursione della capacità.

Infatti dalla formula per la frequenza di oscillazione $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,

considerando le frequenze che voglio ottenere $f_{\min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\max}}}$ e $f_{\max} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\min}}}$

ottengo il rapporto $\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}}\right)^2$

con $f_{LO} > f_{RF}$ si avrà $\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{2055}{955}\right)^2 = 4,27$, risultato correntemente realizzabile

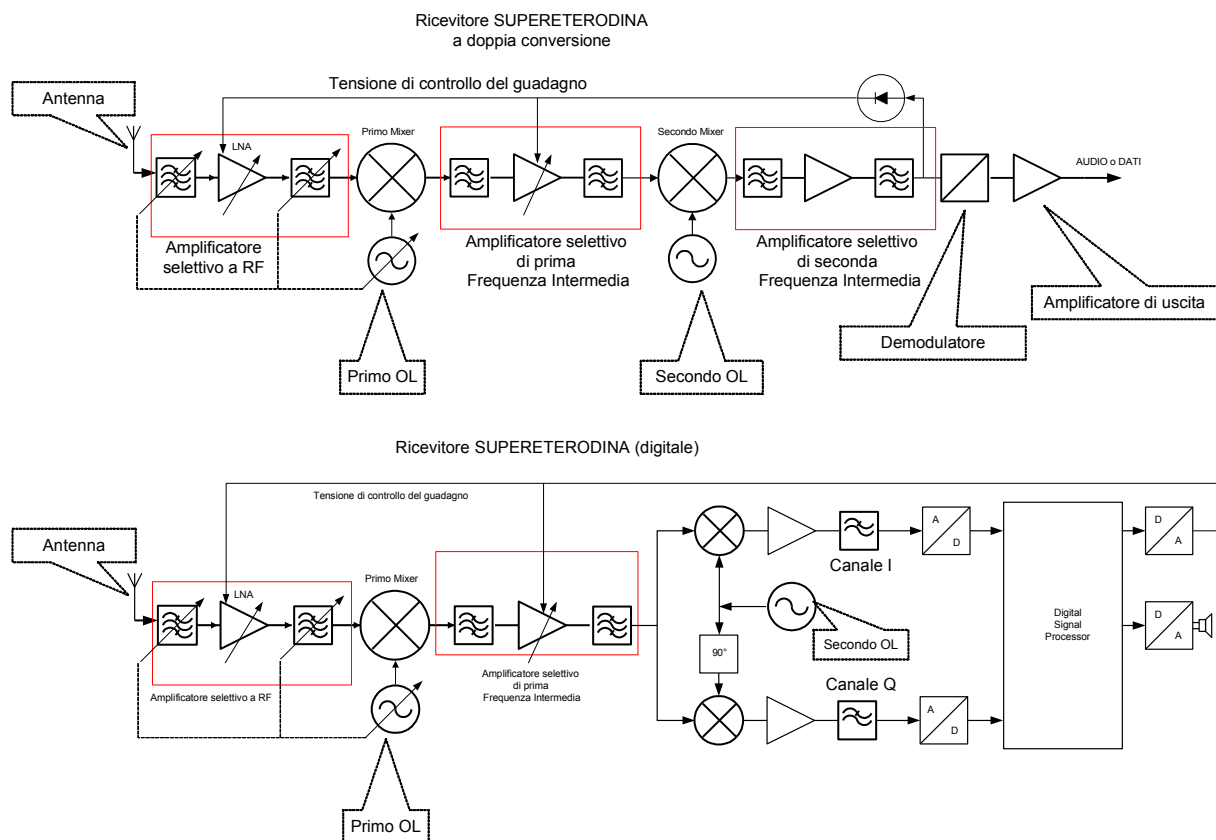
mentre con $f_{LO} < f_{RF}$ si avrà $\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{1145}{85}\right)^2 = 181,46$ che rappresenta un rapporto di frequenza praticamente impossibile da ottenere con un singolo oscillatore.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Gli oscillatori possono essere quindi variabili o fissi. I primi possono essere degli oscillatori liberi la loro frequenza si varia con continuità agendo meccanicamente (manopola) su uno dei due elementi che costituiscono il circuito risonante (L o C), sono poco stabili in frequenza e di solito sono impiegati nei ricevitori di radiodiffusione più economici. Un modo per realizzare degli oscillatori variabili stabili è quello di costruire dei sintetizzatori di frequenza, per farlo ci sono varie tecniche, una delle più diffuse è il PLL.

Gli oscillatori fissi si ottengono sostenendo nel circuito risonante dell'oscillatore gli elementi LC con elementi ad alto fattore di merito (Q) come i cristalli di quarzo.

Un caratteristica importante è la stabilità di frequenza a cui si può ovviare con l'uso dei sintetizzatori., che però non sono così "puliti" dal punto di vista dello spettro come gli oscillatori liberi. Per rumore di un oscillatore si intende quello generato da modulazioni indesiderate dell'oscillatore stesso. Modulazione che se osservata nel dominio della frequenza appare come un complesso di bande laterali di ampiezza irregolare e via via decrescente come ci si allontana dalla f_0 .



Nota 1

La relazione $V_{out_2}(t) = k_2 V_{in}^2(t)$ è il secondo termine della

$$V_{out}(t) = k_1 V_{in}(t) + k_2 V_{in}^2(t) + k_3 V_{in}^3(t) + \dots$$

in caso di amplificazione lineare esiste solamente il primo termine $V_{out}(t) = k_1 V_{in}(t)$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Principali blocchi funzionali di un ricevitore

Visto il principio di funzionamento della supereterodina vediamo i principali blocchi funzionali di un ricevitore

Per lo Schema a blocchi di un ricevitore si fa riferimento agli **appunti i sulla supereterodina**.

Lo schema a blocchi si può dividere in tre parti

- La parte dei circuiti a Radio Frequenza (RF), viene anche chiamata Front End
- La parte dei circuiti di Media Frequenza / Intermediate Frequency (MF oppure IF)
- La parte dei circuiti e delle funzioni di Banda Base (BB)

L'antenna del RX

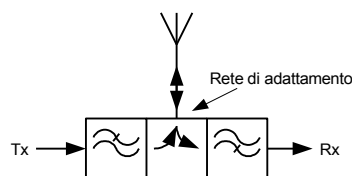
Di solito in comune con il trasmettitore, ma potrebbe non esserlo in qualche applicazione, ad esempio in alcune nelle stazioni in HF, esempio a Trieste la stazione Radio Costiera aveva l'antenna ricevente a Conconello e quella trasmittente a Monte Radio.

Il commutatore di antenna

Fra TX e RX nei sistemi TDD. Come nei CB si usava un relè oggi si usano dei diodi. Sono sistemi chiamati PTT (push to talk) o simplex. TX e RX hanno la stessa frequenza.

Il filtro duplexer

Si tratta di una rete a tre porte che consente di collegare il trasmettitore ed il ricevitore alla stessa antenna. Viene usato nei sistemi FDD, come nei sistemi duplex. TX ed RX **non hanno** la stessa frequenza, ad esempio nel GSM 900 MHz la differenza è di 45 MHz. E' costruito in modo che il segnale del trasmettitore venga sufficientemente attenuato nella banda del ricevitore.



Il filtro preselettore

Serve genericamente a limitare la banda (in modo che al ricevitore arrivino solamente i segnali relativi al sistema per cui è stato costruito), ma soprattutto a :

- Attenuare il segnale sulla frequenza immagine
- Attenuare i prodotti di IM di secondo ordine. (*vedere appunti sulla linearità*)

Di solito si usa un filtro passa banda con una banda passante che copra la banda di frequenza di utilizzo, se la banda passante è molto ampia si usa un filtro a sintonia variabile (è il caso dei ricevitori AM per OM e FM per VHF) oppure più filtri passa banda che vengono commutati (ad esempio nei ricevitori per HF da 0,5 a 30 MHz o più). La sua attenuazione ultima determina l'attenuazione della frequenza immagine.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

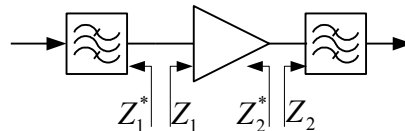
Si usano diversi modelli di filtri che rispondono a diversi modelli matematici, non esiste una regola precisa, di solito non si tiene conto della risposta alla fase.

La tecnologia per costruirli può essere di diverso tipo:

- A induttanza e capacità , LC,
- A cavità risonanti, con dielettrico aria (molto grandi) o con dielettrico ceramico
- Ad onde acustiche di superficie (Surface Acoustics Filter , SAW),

Le principali caratteristiche di un filtro preselettore (Passa Banda) sono:

- b) La frequenza di centro banda, (oppure la gamma se il filtro è sintonizzabile)
- c) La banda passante, (misurata a 3 dB),
- d) L'attenuazione in banda, (deve essere più piccola possibile, *vedere NF*)
- e) L'attenuazione massima,
- f) L'attenuazione ultima o meglio l'attenuazione alla frequenza della frequenza, immagine,
- g) Il fattore di forma,
- h) L'impedenza di ingresso e di uscita,
- i) La massima potenza applicabile al suo ingresso,
- j) La tecnologia con cui è stato costruito o deve esserlo,
- k) Le sue dimensioni fisiche, il tipo di connessione,
- l) Gli aspetti ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni....),
- m) Il costo.



L'amplificatore a basso rumore, LNA

Fa parte della grande famiglia degli amplificatori. Le sue caratteristiche principali sono:

- La gamma di frequenza di funzionamento,
- Guadagno, può anche variabile e in questo caso va definita la gamma di variazione,
- Linearità,
- La figura di rumore (deve essere più bassa possibile),
- Le impedenze di ingresso e di uscita, (devono essere adattate ai circuiti che precedono e seguono l'amplificatore),
- Il tipo polarizzazione, la tensione di alimentazione,
- L'assorbimento di corrente,
- Le sue dimensioni fisiche, il tipo di connessione,
- n) Gli aspetti ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni....),
- o) Il costo.

L'amplificatore basso rumore, LNA, di ingresso è sicuramente un amplificatore in classe A, non sarà così per l'amplificatore del trasmettitore dove vista la maggiore potenza in gioco si tenderà ad un funzionamento in classe B

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il guadagno di un amplificatore può essere definito come:

- Guadagno di potenza, $\frac{P_{out}}{P_{in}}$
- Guadagno di tensione, $\frac{V_{out}}{V_{in}}$
- Guadagno di corrente, $\frac{I_{out}}{I_{in}}$

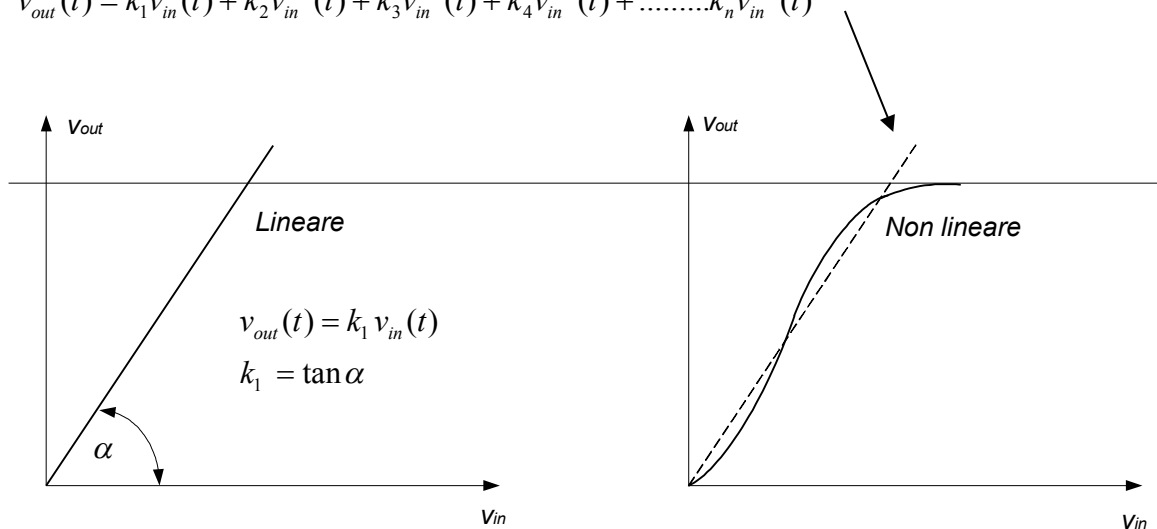
Normalmente il guadagno viene espresso in dB.

Un amplificatore si definisce lineare quando la sua caratteristica ingresso uscita è:

$$v_{out}(t) = k_1 v_{in}(t)$$

dove k è una costante ed è il guadagno dell'amplificatore. Se l'amplificatore, o un generico quadripolo, non è perfettamente lineare la sua caratteristica di trasferimento non è più esprimibile con una semplice legge lineare ma richiede anche altri termini della variabile di ingresso.

$$v_{out}(t) = k_1 v_{in}(t) + k_2 v_{in}^2(t) + k_3 v_{in}^3(t) + k_4 v_{in}^4(t) + \dots k_n v_{in}^n(t)$$



La saturazione è la zona orizzontale della caratteristica ingresso uscita.

La non linearità della caratteristica di trasferimento genera distorsioni sul segnale di uscita.

Un concetto per descrivere la linearità di un quadripolo è il punto di compressione a 1dB.
(vedere gli appunti relativi)

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il mixer

Le principali caratteristiche di un mixer sono:

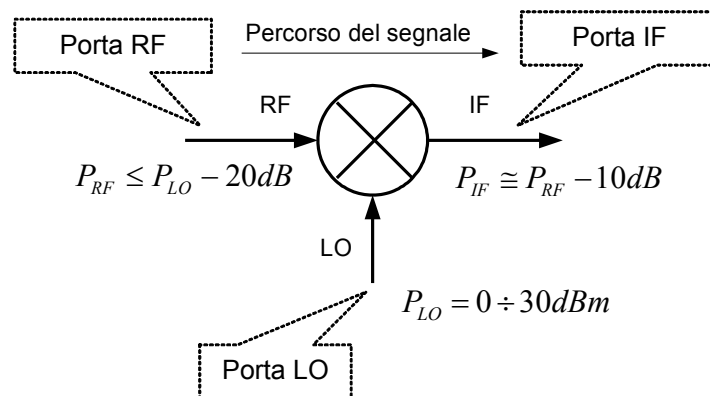
- La gamma di frequenza di funzionamento
- Il guadagno, (se negativo si parla di perdita di conversione)
- La gamma dei livelli di ingresso:
 - Livelli della porta RF
 - Livello della porta dell'oscillatore locale
- Isolamento fra le porte
- Linearità, (sembra un controsenso, ma non lo è)
- La figura di rumore (deve essere più bassa possibile)
- Le impedenze delle due porte di ingresso e della porta di uscita
- Il tipo polarizzazione, la tensione di alimentazione, se si tratta di un mixer attivo
- L'assorbimento di corrente, se si tratta di un mixer attivo
- Le sue dimensioni fisiche, il tipo di connessione
- p) Gli aspetti ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni....)
- q) Il costo

Il guadagno & la perdita di conversione

$$CL_{DIFF} = \frac{P_{IF-DIFF}}{P_{RF}} \quad \text{oppure} \quad CL_{SUM} = \frac{P_{IF-SUM}}{P_{RF}}$$

a seconda che si consideri la frequenza differenza $f_{RF} - f_{LO}$ o quella somma $f_{RF} + f_{LO}$.
Non è detto che le due componenti abbiano ampiezza uguale.

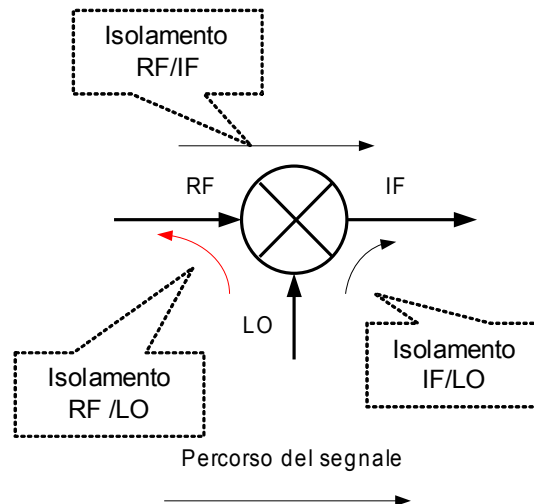
I livelli tipici di un mixer



I livelli di LO riportati in figura si riferiscono a mixer a diodi. Per i mixer attivi come la cella di Gilbert il livello è solitamente inferiore, tipicamente qualche centinaio di mV.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

L'isolamento fra le porte



L'isolamento RF/LO deve essere il più alto possibile altrimenti il segnale dell'oscillatore locale può essere irradiato dall'antenna e disturbare altri servizi.

Alcuni semplici esempi :

- Quale sarà la frequenza dell'LO per convertire un segnale FM VHF di radiodiffusione alla frequenza di 105,2 MHz avendo come valore di IF = 10,7 Mhz?

$$f_{LO} = f_{RF} \pm f_{IF}$$

$$f_{LO} = f_{RF} + f_{IF} = 105,2 + 10,7 = 115,9 \text{ MHz}$$

$$f_{LO} = f_{RF} - f_{IF} = 105,2 - 10,7 = 94,5 \text{ MHz} \text{ (casca in banda di ricezione, non si può usare)}$$

- Quali sono le frequenze dei due segnali che possono essere convertiti ad una IF di 45 MHz con un Lo alla frequenza di 880 Mhz?

$$f_{RF} = f_{LO} \pm f_{IF}$$

$$f_{RF} = f_{LO} + f_{IF} = 880 + 45 = 925 \text{ MHz}$$

$$f_{RF} = f_{LO} - f_{IF} = 880 - 45 = 835 \text{ MHz}$$

- Se un segnale ricevuto ha la frequenza di 220 MHz è l'oscillatore locale ha la frequenza di 241,4MHz, quale sarà la frequenza dei segnali convertiti?

$$f_{IF} = f_{LO} \pm f_{RF}$$

$$f_{IF} = f_{LO} + f_{RF} = 241,4 + 220 = 461,5 \text{ MHz}$$

$$f_{IF} = f_{LO} - f_{RF} = 241,4 - 220 = 21,4 \text{ MHz}$$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Un esempio sulla perdita di inserzione

Si consideri un mixer con le seguenti caratteristiche:

- Perdita di conversione $CL = 8\text{dB}$,
- Isolamento RF/IF = 30 dB
- Isolamento LO/IF = 45 dB
- Isolamento LO/RF = 25 dB

Calcolare la frequenza e l'ampiezza dei segnali presenti sulla porta IF considerando che

$$f_{RF} = 82\text{MHz} \text{ con un livello di } P_{RF_82} = -40\text{dBm}$$

$$f_{LO} = 325\text{MHz} \text{ con un livello di } P_{LO} = +7\text{dBm} \text{ (tipico livello per un mixer passivo)}$$

Le frequenze dei segnali presenti sulla porta IF sono:

$$f_{IF} = f_{LO} \pm f_{RF}$$

$$f_{IF} = f_{LO} + f_{RF} = 325 + 82 = 407\text{MHz}$$

$$f_{IF} = f_{LO} - f_{RF} = 325 - 82 = 243\text{MHz}$$

più i segnali RF ed LO : 325 MHz e 82 MHz.

Le loro ampiezze sono:

- I due segnali convertiti a 243 MHz e a 407 MHz saranno attenuati di un quantità uguale al valore della perdita di conversione, $CL = 8\text{ dB}$,

$$P_{IF_243} = P_{IF_407} = P_{RF_82} - CL = -40\text{dBm} - 8 = -48\text{dBm}.$$

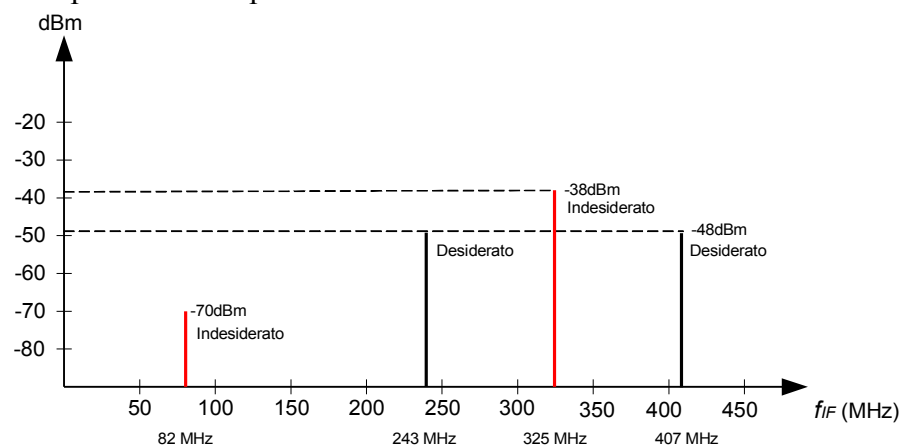
- L'isolamento RF/IF riporta il segnale di ingresso dalla porta RF alla porta IF

$$P_{IF_82} = P_{RF_82} - ISOL_{RF/IF} = -40\text{dBm} - 30 = -70\text{dBm}.$$

- Isolamento LO/IF riporta il segnale dell'LO sulla porta IF

$$P_{IF_325} = P_{LO} - ISOL_{LO/IF} = +7\text{dBm} - 45 = -38\text{dBm}$$

Riassumendo sulla porta IF sono presenti:



Da considerare anche l'isolamento LO/RF che porta il segnale dell'oscillatore locale sulla porta RF

$$P_{RF_325} = P_{LO} - ISOL_{LO/RF} = +7\text{dBm} - 25 = -18\text{dBm}$$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il primo oscillatore locale

Deve fornire il segnale al mixer per convertire il segnale ricevuto nel segnale a frequenza intermedia. Deve avere una escursione di frequenza sufficiente a coprire la gamma di frequenza da ricevere.

Ad esempio un ricevitore per la radiodiffusione AM sulle OM, gamma che va da 540 kHz a 1600 kHz, con un tipico valore di IF = 455 kHz, l'oscillatore potrà essere sintonizzato nella gamma da 955 kHz a 2055 kHz ($f_{LO} > f_{RF}$) oppure nella gamma da 85 kHz a 1145 kHz ($f_{LO} < f_{RF}$).

In genere gli oscillatori sono sintonizzati variando uno dei due elementi del loro circuito risonante LC, più spesso si agisce sulla C. Nel caso dell'esempio appena riportato si vede che sarà conveniente impiegare la soluzione $f_{LO} > f_{RF}$ per avere una minore escursione della capacità. Infatti dalle

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{e} \quad f_{\min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\max}}} \quad \text{e} \quad f_{\max} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\min}}}$$

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)^2$$

$$\text{con } f_{LO} > f_{RF} \text{ si avrà } \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{2055}{955} \right)^2 = 4,27$$

$$\text{mentre con } f_{LO} < f_{RF} \text{ si avrà } \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{1145}{85} \right)^2 = 181,46$$

un rapporto di frequenza praticamente impossibile da ottenere con un singolo oscillatore.

Gli oscillatori possono essere quindi **fissi** o **variabili**.

Gli **oscillatori fissi** si ottengono sostenendo nel circuito risonante dell'oscillatore gli elementi LC con elementi ad alto fattore di merito (Q) come i cristalli di quarzo.

Un oscillatore è formato da un amplificatore e da una rete selettiva in frequenza inserita nel circuito di reazione.

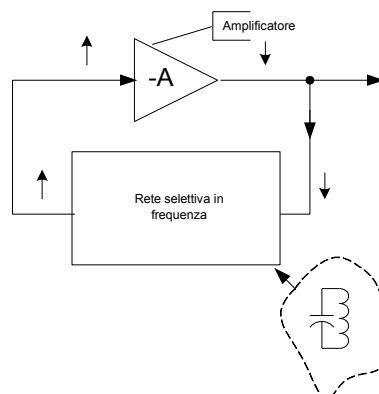


Figura 1

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Gli oscillatori variabili possono essere realizzati come gli oscillatori liberi, ma la loro frequenza si può variare con continuità agendo meccanicamente (manopola) su uno dei due elementi che costituiscono il circuito risonante (L o C), sono poco stabili in frequenza e di solito sono impiegati nei ricevitori per radiodiffusione più economici.

Un modo per realizzare degli oscillatori variabili stabili è quello di costruire dei sintetizzatori di frequenza. Viene realizzato un blocco funzionale in grado di generare frequenze nella gamma desiderata con la stessa precisione di un oscillatore di riferimento a cristallo di quarzo. Uno dei sistemi più usati è l'Anello ad Aggancio di Fase (Phased Locked Loop, PLL).

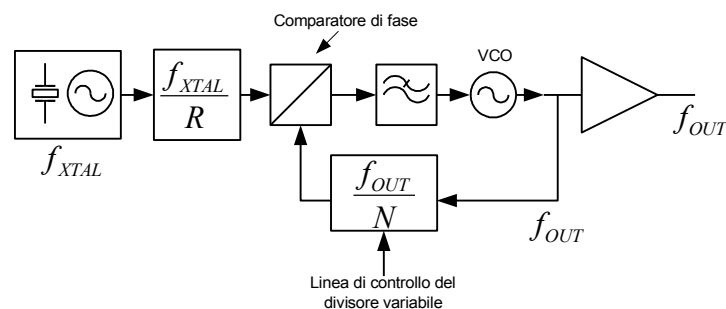


Figura 2

La variazione di frequenza non sarà continua (figura 3) come quella di un oscillatore libero (figura sotto) ma sarà a gradini (figura 4)

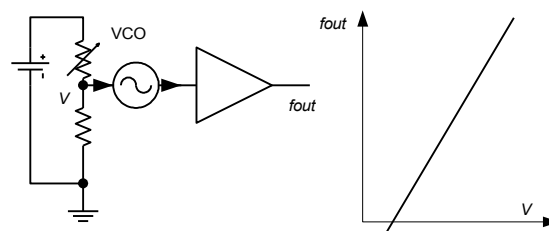


Figura 3

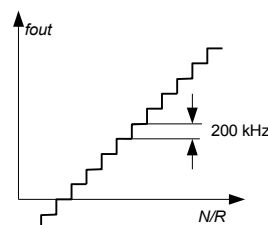


Figura 4

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Le caratteristiche principali di un oscillatore sono:

- La frequenza di oscillazione, o la **gamma di frequenza di oscillazione**. La banda di frequenza coperta dall'Oscillatore Locale deve essere conforme alla banda di frequenza che il ricevitore deve poter sintonizzarsi.
- Il **livello di uscita**. Deve essere quello richiesto dal mixer.
- La **stabilità di frequenza**. Deve essere tale da permettere al ricevitore di ricevere il segnale sul canale assegnato senza richiedere ritocchi alla sintonia dell'oscillatore stesso.

$$f_{range} = f_0 \pm \left(\frac{\Delta_{in_ppM}}{10^6} \cdot f_0 \right)$$

che viene specificata nel campo di temperatura di lavoro e nel tempo.

- La **purezza spettrale**. Questa caratteristica incide sensibilmente sulla **selettività** del ricevitore. (attenuazione delle armoniche, attenuazione delle frequenze spurie, rumore)
- Le caratteristiche fisiche ed ambientali.

Un oscillatore ideale genera un segnale sinusoidale di forma ideale privo di armoniche e di segnali spuri. Nel dominio del tempo si presenta come una senoide ideale (Figura 5A) e in quello della frequenza non sono presenti bande laterali o armoniche ma una sola riga dello spettro (Figura 5E).

Se viene rappresentato con un fasore questo ruota in senso antiorario con una velocità angolare ω_0 costante (Figura 5H). Se viene reso di forma quadra o rettangolare il passaggio per lo zero è deterministico (Figura 5C).

In pratica un oscillatore reale si discosta di molto dal comportamento ideale. Se lo osserviamo nel dominio del tempo si potranno notare variazioni casuali della sua ampiezza e della sua frequenza, il rapporto segnale rumore non sarà infinito (Figura 5B).

Nel dominio della frequenza il segnale dell'oscillatore si presenterà accompagnato da armoniche e da bande laterali di rumore (Figura 5F). Non sarà fermo sul valore nominale di frequenza, ma si muoverà attorno ad esso. Le variazioni di frequenza in un periodo maggiore di un secondo vengono chiamate *drift*, mentre quelle che si verificano in tempi inferiori al secondo sono chiamate *phase noise* (*rumore di fase*). Il passaggio per lo zero non sarà più deterministico, (Figura 5D), ma statistico.

Il fasore ruoterà sempre in senso antiorario con velocità angolare $\approx \omega_0$, ma mostrerà delle variazioni casuali di ampiezza e di fase (Figura 5G). Nella figura 5 G si è aggiunto al fasore ideale un secondo fasore dovuto al rumore e composto da due componenti, una dovuta al rumore di ampiezza ed una dovuta al rumore di fase. Le ampiezze di queste due componenti di rumore sono quantità statistiche.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

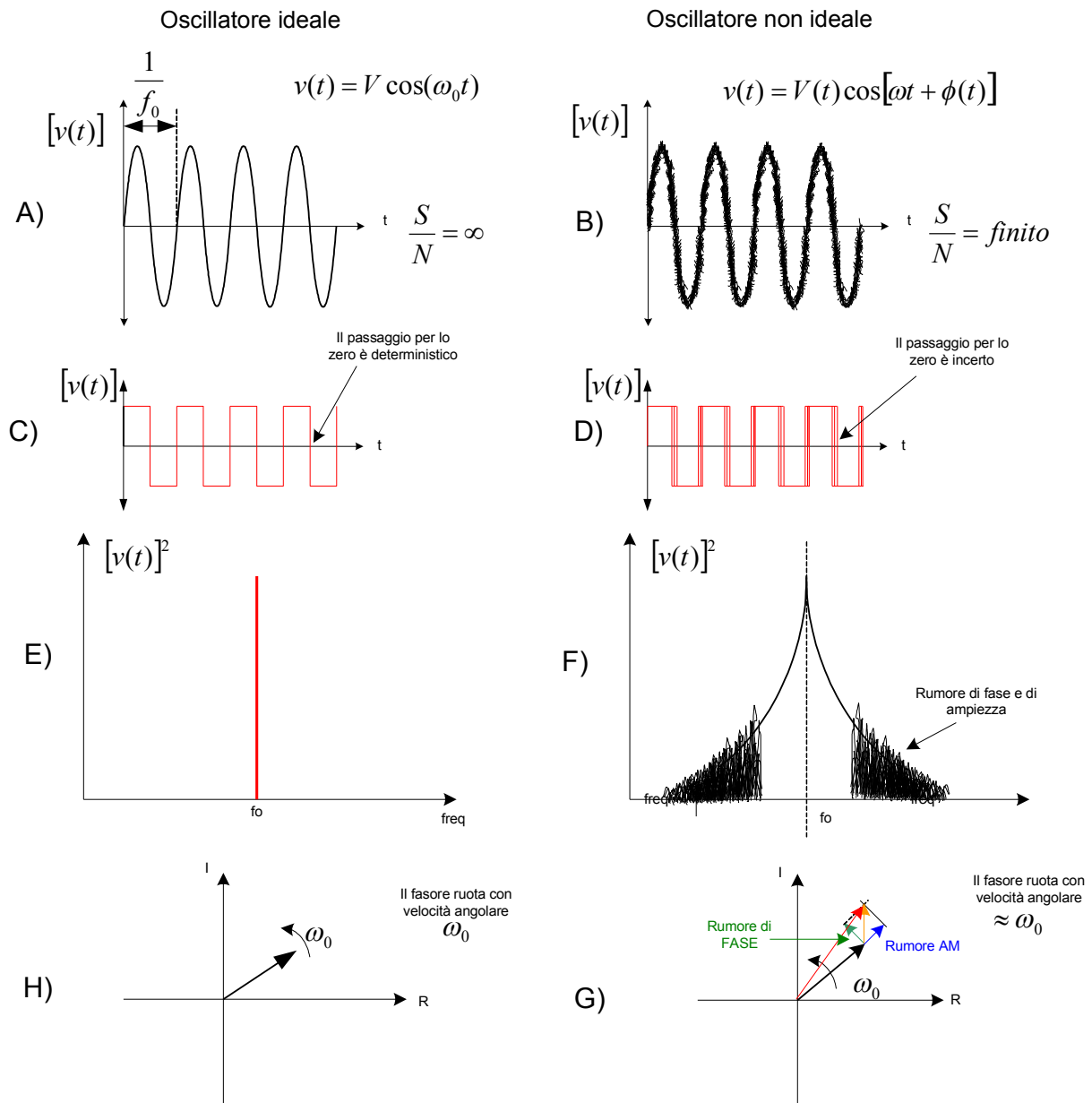


Figura 5

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

In pratica lo spettro di un oscillatore (visto con l'analizzatore di spettro) si presenta come in figura 6, cioè occupa una certa banda di frequenza.

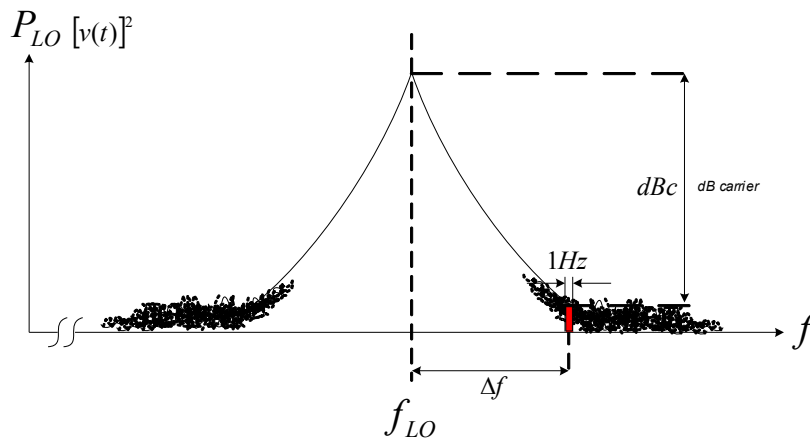


Figura 6

La purezza spettrale di un oscillatore, dal punto di vista del rumore, viene espressa per convenzione dal rapporto fra:

- La potenza del rumore, misurato in una banda di frequenza unitaria, 1 Hz, ad una distanza, Δf , dalla portante,

e

- La potenza complessiva del segnale.

$$PN(\Delta f_c) = \frac{\text{Potenza}_{\text{misurata}}(f_0 + \Delta f_c) (\text{in una banda di } 1\text{Hz})}{\text{Potenza}_{\text{totale}} \text{ del segnale}} (dBc)$$

dove $dBc = dB carrier$. (*carrier = portante, dalla modulazione*)

Oltre al rumore lo spettro di un oscillatore può contenere dei segnali spuri sia in vicinanza della fondamentale, (Figura 7) sia come armoniche. I segnali spuri in vicinanza della fondamentale sono generalmente simmetrici e sono il risultato di modulazioni spurie sia AM che FM. La loro attenuazione si misura facendo riferimento al livello di potenza complessivo della fondamentale.

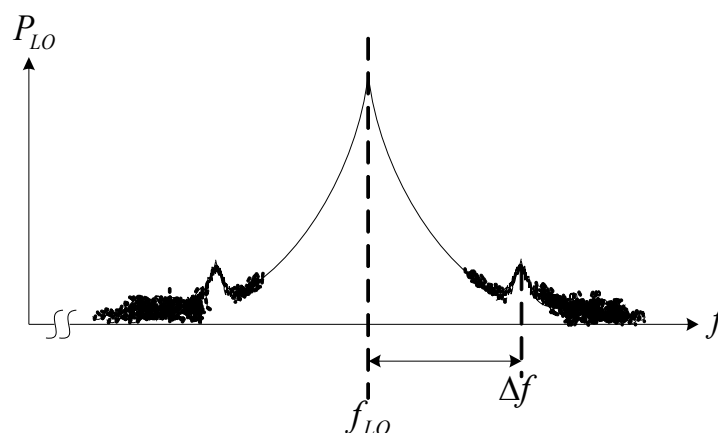
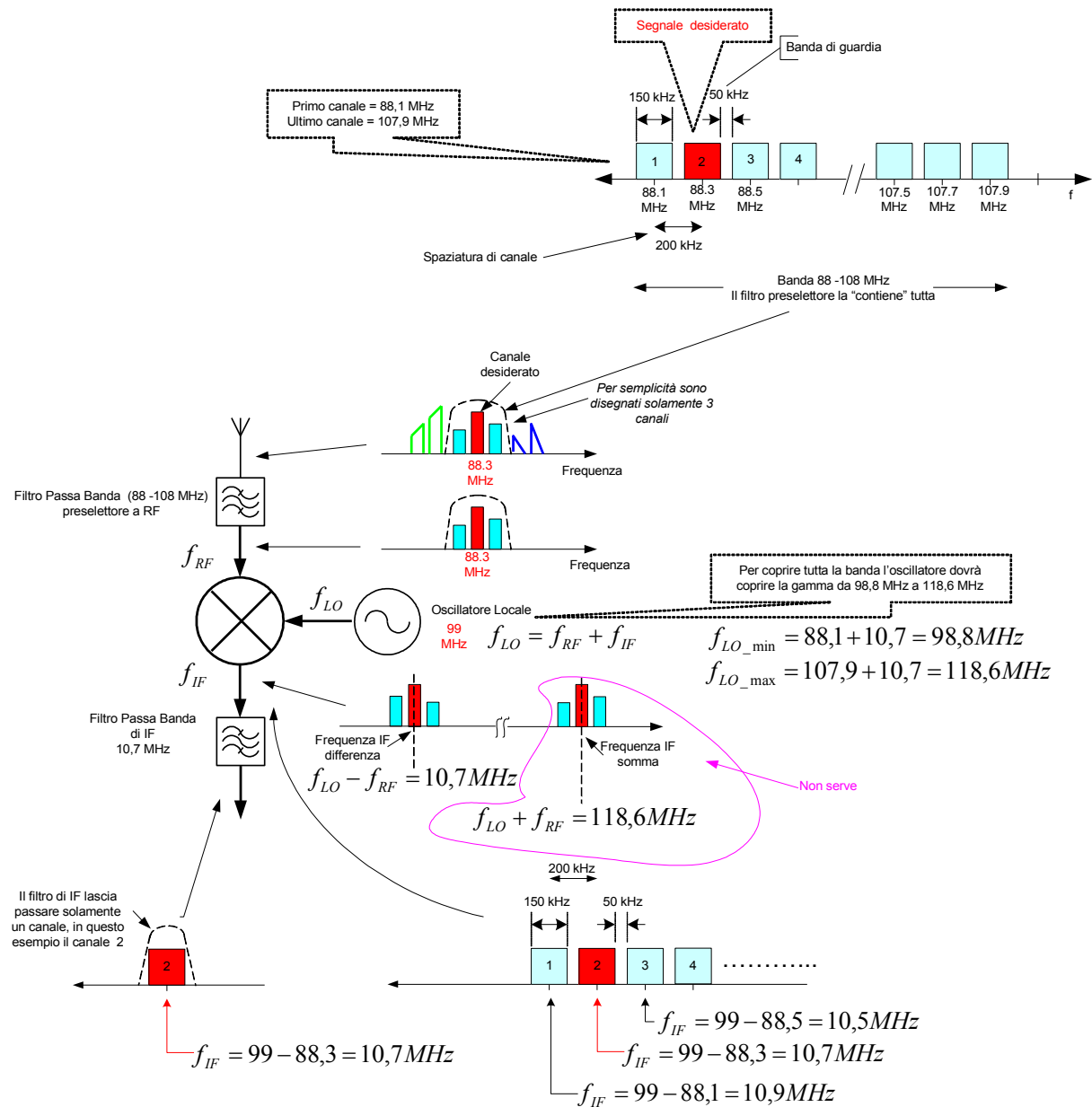


Figura 7

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Esempio sul contributo alla selettività da parte del filtro PB di IF

Si considera un ricevitore che deve ricevere la banda di radiodiffusione FM nella gamma VHF.



01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il disegno illustra il meccanismo di conversione su tre canali adiacenti nella banda VHF FM da 88,1 MHz a 107,9 MHz, i canali presi come esempio (la numerazione progressiva è arbitraria e valida ai soli fini dell'esempio) sono:

- Canale 1, 88,1 MHz,
- Canale 2, 88,3 MHz,
- Canale 3, 88,5 MHz,

Si desidera ricevere il segnale sul canale 2 alla frequenza di 88,3 MHz

Si assume che il filtro preselettore contenga tutta la banda, in realtà non è così per un problema di attenuazione della frequenza immagine.

(Vedere Nota 1).

Il valore della media frequenza è fissato a **10,7 MHz**. L'oscillatore locale dovrà coprire la gamma da **98,8 MHz a 118,6 MHz**.

Per ricevere il canale desiderato a 88,3 MHz l'oscillatore locale dovrà essere generare un segnale alla frequenza di 99 MHz.

All'uscita del mixer saranno presenti sia i segnali conseguenti alla differenza fra LO e RF (desiderati) sia quelli conseguenti alla somma fra LO e RF (non desiderati). Il numero dei canali presenti dipenderà solamente dalla larghezza di banda del filtro preselettore, nell'esempio ne sono riportati solamente tre e quindi all'uscita del mixer avremo tre canali ottenuti per differenza e tre canali ottenuti per somma. Di questi solo uno è quello corrispondente al canale desiderato:

$$f_{IF} = f_{LO} - f_{RF} = 99 - 88,3 = 10,7 \text{ MHz}$$

Il filtro di IF dovrà avere una banda passante tale da eliminare i segnali somma (si trovano attorno a 118,6 MHz) e per eliminare i segnali convertiti in prossimità del valore di IF:

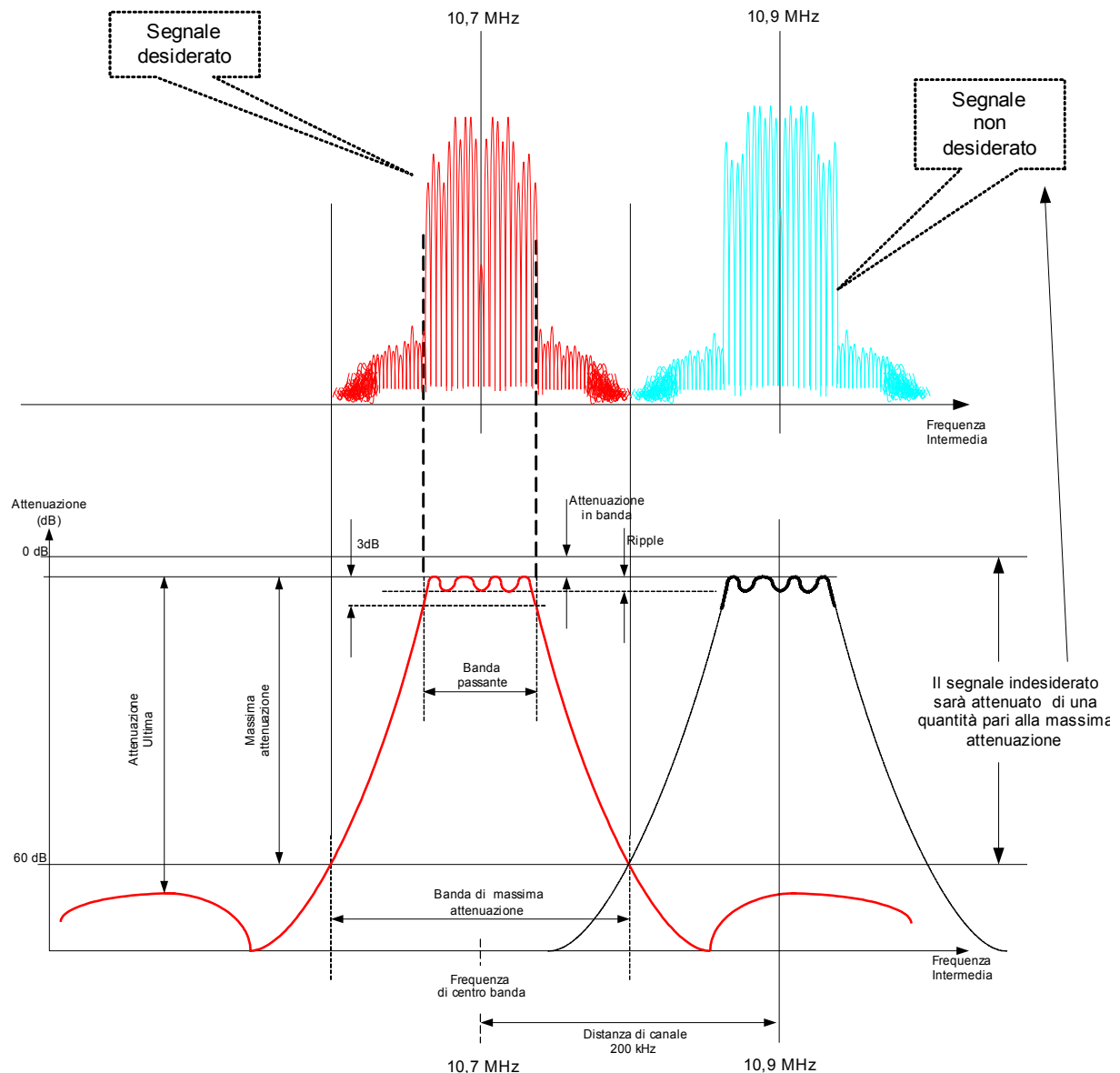
$$f_{IF} = 99 - 88,5 = 10,5 \text{ MHz}$$

$$f_{IF} = 99 - 88,1 = 10,9 \text{ MHz}$$

Il segnali convertiti adiacenti alla valore centrale di frequenza intermedia, IF = 10,7 MHz in questo esempio, saranno attenuati di una quantità pari alla massima attenuazione del filtro IF.

Questo valore di attenuazione ultima contribuirà a determinare la massima selettività del ricevitore che sarà inferiore a questo valore a causa del rumore dell'oscillatore locale. In altre parole la selettività sul canale adiacente corrisponde alla attenuazione ultima del filtro IF solamente nel caso il rumore dell'oscillatore locale possa essere considerato trascurabile.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO



Esempio

Un ricevitore supereterodina ha un filtro di media frequenza con le seguenti caratteristiche:

- Frequenza di centro banda, $f_{IF} = 10,7 \text{ MHz}$;
- Attenuazione in banda passante di $A_{FIF_IB} = 2 \text{ dB}$;
- Attenuazione ultima alla distanza di canale di 200kHz, $A_{FIF_FB_CHA200} = 70 \text{ dB}$.

Il mixer ha un guadagno di conversione $G_C = -6 \text{ dB}$ e l'oscillatore locale , supposto ideale, è sintonizzato sulla frequenza di $f_{LO} = 99 \text{ MHz}$.

Calcolare i livelli dei segnali all'uscita del filtro di media frequenza se all'ingresso del mixer sono presenti due segnali:

- Il segnale utile a $f_{0_RF} = 88,3 \text{ MHz}$ con un livello $P_{0_RF} = -50 \text{ dBm}$;

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

- Un segnale indesiderato sul canale adiacente alla frequenza $f_{i_RF} = 88,1MHz$ con un livello di potenza di $P_{i_RF} = -30dBm$.

Soluzione

All'uscita del mixer saranno presenti due segnali, quello utile alla frequenza

$$f_{0_IF} = f_{LO} - f_{0_RF} = 99 - 88,3 = 10,7MHz$$

E quello indesiderato

$$f_{i_IF} = f_{LO} - f_{i_RF} = 99 - 88,1 = 10,9MHz$$

con i livelli di

$$P_{0_IF} = P_{0_RF} + G_c = -50dBm - 6dB = -56dBm \text{ e rispettivamente}$$

$$P_{i_RF} = P_{i_RF} + G_c = -30dBm - 6dB = -36dBm$$

All'uscita del filtro il livelli saranno,

$$P'_{0_IF} = P_{0_IF} - A_{B_IF} = -56dBm - 2dB = -58dBm \text{ alla frequenza } f_{0_IF} = 10,7MHz$$

$$P'_{i_IF} = P_{i_IF} - A_{B_IF} - A_{U_IF_200} = -36dBm - 2dB - 70dB = -108dBm \text{ alla frequenza}$$

$$f_{i_IF} = 10,9MHz$$

All'uscita del filtro IF il **segnale indesiderato sarà attenuato di $A_i = 50dB$ rispetto al segnale utile**, $A_i = P'_{0_IF} - P'_{i_IF} = -56dBm - (-108)dB = 50dB$

Riassumendo

- In banda IF

$$P_{0_IF} = P_{0_RF} + G_c$$

$$P'_{0_IF} = P_{0_IF} - A_{FIF_IB}$$

$$P'_{0_IF} = P_{0_RF} + G_c - A_{FIF_IB}$$

- Fuori banda IF

$$P_{i_IF} = P_{i_RF} + G_c$$

$$P'_{i_IF} = P_{i_IF} - A_{FIF_IB} - A_{FIF_FB_CHA200}$$

$$P'_{i_IF} = P_{i_RF} + G_c - A_{FIF_IB} - A_{FIF_FB_CHA200}$$

$$A_i = P'_{0_IF} - P'_{i_IF}$$

(Vedere Nota 2).

Dove:

P_{0_IF} : potenza del segnale utile dopo il mixer, dBm,

P'_{0_IF} : potenza del segnale utile all'uscita del filtro IF, dBm,

P_{i_IF} : potenza del segnale indesiderato dopo il mixer, dBm,

P'_{i_IF} : potenza del segnale indesiderato all'uscita del filtro IF, dBm

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Nota 1

La banda FM VHF di radiodiffusione copre la gamma da 88 a 108 MHz quindi è larga 20 MHz, nel caso di una conversione con l'oscillatore locale "alto" cioè con

$$f_{LO} = f_{RF} + f_{IF}$$

l'immagine si trova a $f_{IM} = f_{RF} + 2f_{IF}$ cioè considerano la minima frequenza in banda a

$f_{IM_minima} = f_{RF_minim} + 2f_{IF} = 88,1 + 21,4 = 109,5 \text{ MHz}$ che è di 107,9 MHz. Un filtro preselettore che attenui la 109,5 MHz e non attenui la 107,9 MHz è irrealizzabile, per cui sarà obbligatorio usare un filtro passa banda a sintonia variabile e non un filtro largo quanto tutta la banda 880 – 108 MHz.

Nota 2

L'attenuazione fra segnale utile e segnale interferente è un parametro molto importante dei ricevitori.

$$A_i(dB) = P'_{0_IF}(dBm) - P'_{i_IF}(dBm)$$

Il segnale utile di potenza, P'_{0_IF} , all'uscita dei circuiti di media frequenza (filtri e amplificatori) viene applicato all'ingresso del demodulatore.

Per demodulare correttamente il segnale utile in modo da fornire all'uscita del ricevitore un segnale con il rapporto segnale rumore oppure con il BER specificati è necessario che al demodulatore venga fornito un segnale il cui rapporto fra segnale utile e segnale interferente, P'_{i_IF} , sia entro un limite specificato.

Questo rapporto viene solitamente indicato con

$$\frac{C}{I}(dB)$$

dove C (= *Carrier*) è la potenza del segnale utile ed I (= *Interfering*) la somma delle potenze dei segnali interferenti più il rumore.

Se viene preso in considerazione solamente il rumore esso viene indicato come

$$\frac{C}{N}(dB).$$

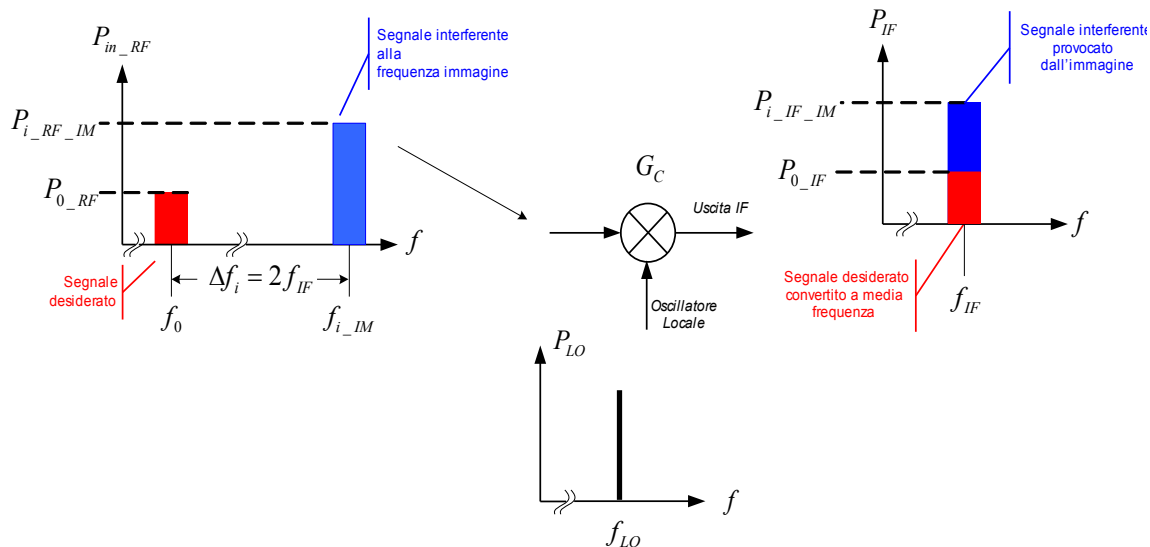
Il valore di questo rapporto dipende da vari fattori: dal tipo di modulazione usata, dalla natura del demodulatore (algoritmi), dalle specifiche di sistema.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Appunti sulla frequenza immagine

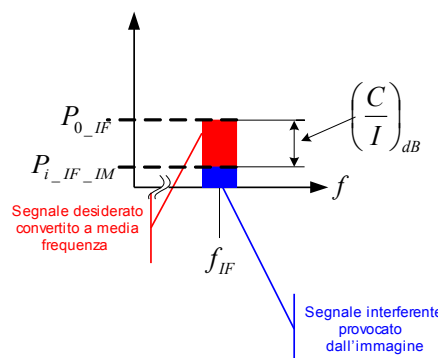
La figura mostra una situazione in cui all'ingresso del mixer di un ricevitore supereterodina sono presenti due segnali, uno desiderato con frequenza f_0 e con un livello di potenza P_{0_RF} ed uno indesiderato (interferente) alla frequenza immagine, f_{i_IM} con potenza $P_{i_RF_IM}$.

$$f_{i_IM} = f_0 + 2f_{IF}, \quad P_{i_RF_IM} > P_{0_RF}$$



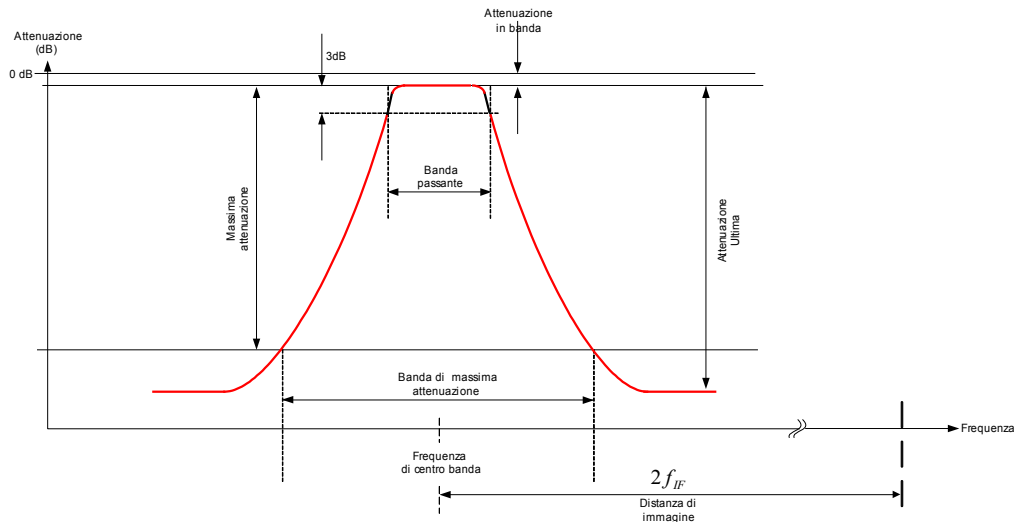
A causa del meccanismo di conversione all'uscita del mixer (ingresso della catena di IF) saranno presenti **tutti e due i segnali**, quello desiderato e quello indesiderato, tutti e due sulla stessa frequenza f_{IF} .

Il segnale desiderato potrà essere demodulato correttamente solamente se il rapporto fra le rispettive potenze sarà superiore ad un dato valore definito dalle specifiche di sistema, $\frac{C}{I}$.



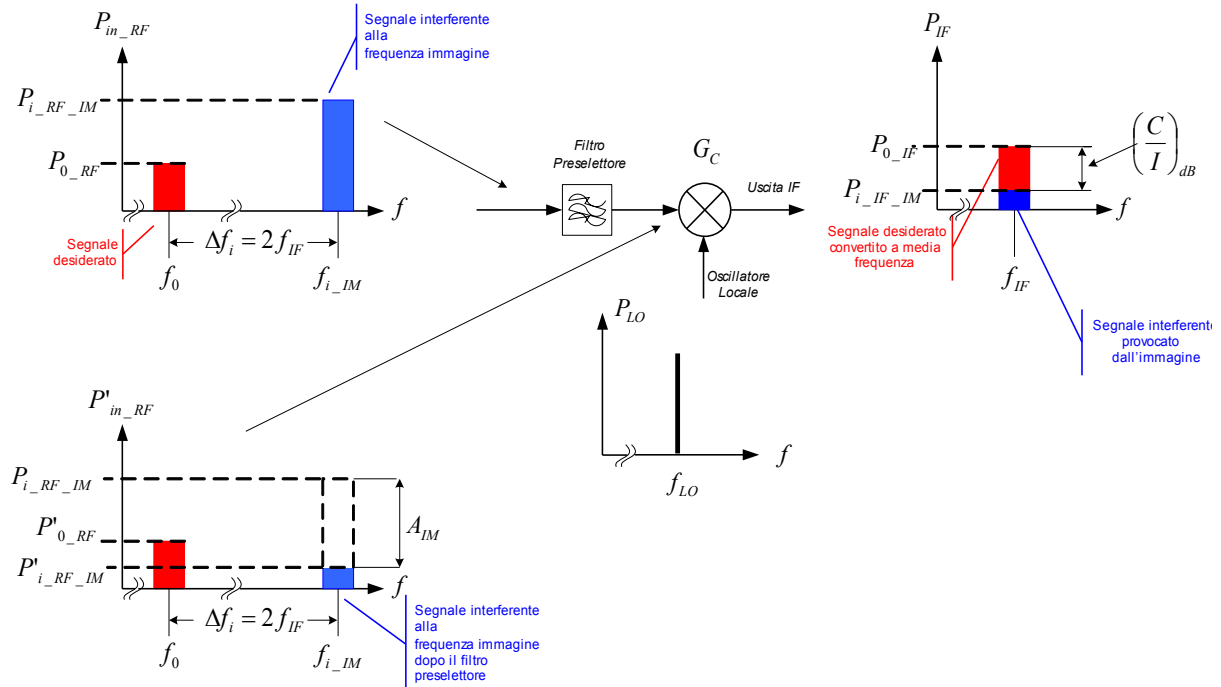
La figura mostra la situazione desiderata. Questa condizione potrà essere raggiunta aggiungendo il filtro preselettore all'ingresso della porta RF del mixer.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO



La figura mostra una probabile sagoma di un filtro preselettore PB. Si definisce come **Attenuazione in Banda** la perdita di inserzione provocata dal filtro a centro banda, A_{RF_IB} e come **Attenuazione fuori Banda** l'attenuazione rispetto al segnale in banda che il filtro provoca ad un segnale interferente sulla frequenza immagine, $A_{RF_FB_IM}$.

Situazione con filtro preselettore:



01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Vediamo di determinare l' **Attenuazione fuori Banda** necessaria del filtro preselettore.

Il livelli all'uscita del mixer sono

$$P'_{0_RF_dBm} = P_{0_RF_dBm} - A_{RF_IB_dB}$$

$$P'_{i_RF_dBm} = P_{i_RF_dBm} - A_{RF_IB_dB} - A_{RF_FB_IM_dB}$$

$$P_{0_IF_dBm} = P'_{0_RF_dBm} + G_C$$

$$P_{i_IF_dBm} = P'_{i_RF_dBm} + G_C$$

$$P_{0_IF_dBm} = P_{0_RF_dBm} + G_C - A_{RF_IB_dB}$$

$$P_{i_IF_dBm} = P_{i_RF_dBm} + G_C - A_{RF_IB_dB} - A_{RF_FB_IM_dB}$$

L'attenuazione fra segnale utile e segnale interferente in media frequenza è data da

$$A_{i_dB} = P_{0_IF_dBm} - P_{i_IF_dBm}$$

$$A_{i_dB} = P_{0_RF_dBm} + G_C - A_{RF_IB_dB} - (P_{i_RF_dBm} + G_C - A_{RF_IB_dB} - A_{RF_FB_IM_dB})$$

$$A_{i_dB} = P_{0_RF_dBm} + G_C - A_{RF_IB_dB} - P_{i_RF_dBm} - G_C + A_{RF_IB_dB} + A_{RF_FB_IM_dB}$$

$$A_{i_dB} = P_{0_RF_dBm} - P_{i_RF_dBm} + A_{RF_FB_IM_dB}$$

Conosciuto il valore di $\frac{C}{I} = A_i$ ed i livelli del segnale utile e di quello interferente ,sulla frequenza immagine, si potrà calcolare il valore dell'attenuazione , $A_{RF_FB_IM}$, che il filtro preselettore dovrà realizzare sulla frequenza immagine,

$$A_{RF_FB_IM_dB} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_i$$

Il segnale interferente sarà complessivamente attenuato di $A_{IM_dB} = A_{RF_IB_dB} + A_{RF_FB_IM_dB}$

Esempio

In un ricevitore la sensibilità desiderata è di -99 dBm, il rapporto $\frac{C}{I} = A_i = 9dB$, il segnale interferente sulla frequenza immagine è di -10dBm.
Calcolare l'attenuazione del filtro preselettore alla frequenza immagine.

$$P_{0_IF_dBm} = -99dBm$$

$$P_{i_IF_dBm} = -10dBm$$

$$A_{RF_FB_IM_dB} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_i$$

$$A_{RF_FB_IM_dB} = -10dBm - (-99dBm) + 9dB = 98dB$$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Rumore e spurie

Gli appunti che seguono sono relativi all'**impatto del rumore e delle spurie** dell'oscillatore locale sul responso di un ricevitore supereterodina ai segnali indesiderati presenti sui **canali adiacenti** al segnale utile. Vengono messe in evidenza le situazioni dei segnali all'ingresso del mixer, alla sua uscita e dopo il filtro di frequenza intermedia. All'uscita del mixer viene presa in considerazione solamente la risultante differenza.

I casi esaminati sono:

- LO ideale, segnale utile più segnale interferente;
- LO ideale, solo segnale interferente;
- LO non ideale, solo segnale interferente;
- LO non ideale, segnale utile più segnale interferente;
- LO non ideale, segnale utile più diversi segnali interferenti.

1. LO ideale, segnale utile più segnale interferente

La prima condizione che viene analizzata è quella in cui il segnale dell'oscillatore locale è considerato ideale, cioè rappresentabile da una sola riga spettrale. Il segnale interferente si trova ad una distanza Δf_i dal segnale desiderato f_0 . La figura 1 dà una rappresentazione qualitativa del comportamento.

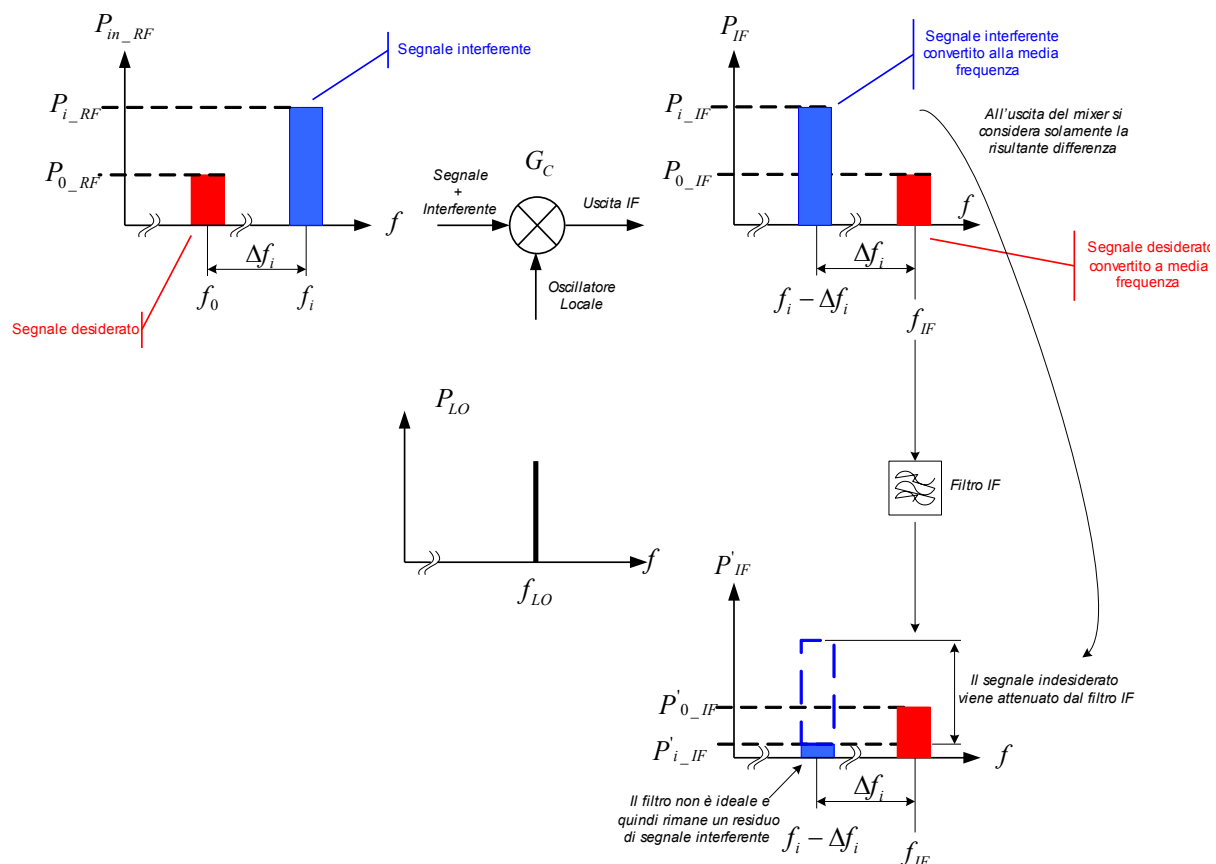


Figura 1

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

All'uscita del mixer i segnali avranno i seguenti livelli di potenza:

- potenza del segnale desiderato convertito alla frequenza intermedia, f_{IF} , sarà

$$P_{0_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{0_RF_dBm},$$
- potenza del segnale interferente convertito alla frequenza intermedia, $f_{IF} + \Delta f_i$, sarà

$$P_{i_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm}$$

Dopo il filtro di media frequenza la situazione dei livelli dei segnali sarà:

- potenza del segnale desiderato, f_{IF} ;

$$P'_{0_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{0_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB},$$
- potenza del segnale interferente, $f_{IF} + \Delta f_i$;

$$P'_{i_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB},$$

Affinché il demodulatore operi in modo corretto è necessario che il circuito di media frequenza presenti al suo ingresso i due segnali, utile e interferente (convertiti e filtrati) in un rapporto specificato in base ai requisiti di sistema,

$$A_{i_dB} = P'_{0_IF_dBm} - P'_{i_IF_dBm}$$

$$P'_{0_IF_dBm} = P_{0_RF_dBm} + G_{C_dB} - A_{FIF_IB_dB}$$

$$P'_{i_IF_dBm} = P_{i_RF_dBm} + G_{C_dB} - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB}$$

$$A_{i_dB} = P'_{0_IF_dBm} - P'_{i_IF_dBm} = P_{0_RF_dBm} + G_{C_dB} - A_{FIF_IB_dB} - (P_{i_RF_dBm} + G_{C_dB} - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB})$$

semplificando

$$A_{i_dB} = P_{0_RF_dBm} - P_{i_RF_dBm} + A_{FIF_FB_CHA_dB}$$

$$A_{CHA_dB} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} \quad (P_{i_RF} > P_{0_RF})$$

sostituendo si ha

$$A_{i_dB} = -A_{CHA_dB} + A_{FIF_FB_CHA_dB} \quad A_{FIF_FB_CHA_dB} = A_{i_dB} + A_{CHA_dB}$$

Il valore del rapporto fra segnale utile e segnale interferente, A_i , può essere aumentato aumentando il valore della attenuazione fuori banda del filtro di IF, $A_{FIF_FB_CHA}$, questo comporta una maggiore complessità del filtro.

Una maggiore selettività del ricevitore può essere raggiunta anche aggiungendo una seconda conversione.

Il segnale interferente a frequenza $f_{IF} + \Delta f_i$ può anche essere discriminato dal modulatore essendo di frequenza diversa da quella del segnale utile.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Notazione utilizzata:

G_C , guadagno di conversione del mixer, ,

P_{in_RF} , potenza applicata all'ingresso RF,

f_0 , frequenza del segnale utile applicato all'ingresso RF,

P_{0_RF} , potenza del segnale utile applicato all'ingresso RF,

f_i , frequenza del segnale interferente o indesiderato applicato all'ingresso RF,

P_{i_RF} , potenza del segnale interferente o indesiderato applicato all'ingresso RF,

Δf_i , distanza, in frequenza, fra segnale utile e segnale interferente,

P_{LO} , potenza del segnale dell'oscillatore locale, LO,

f_{LO} , frequenza del segnale dell'oscillatore locale,

P_{IF} , potenza del segnale di media frequenza,

f_{IF} , frequenza centrale di frequenza intermedia, è la frequenza del segnale utile a frequenza, f_0 , convertito a media frequenza,

P_{0_IF} , potenza del segnale di media frequenza all'uscita del mixer e alla frequenza f_{IF} ,

P_{i_IF} , potenza del segnale interferente convertito a media frequenza, $f_{IF} + \Delta f_i$,

P'_{IF} , potenza del segnale di media frequenza dopo il filtro di IF,

P'_{0_IF} , potenza del segnale di media frequenza dopo il filtro di IF,

P'_{i_IF} , potenza del segnale interferente convertito a media frequenza dopo il filtro di IF,

$A_{FIF_IB_dB}$, attenuazione in banda passante del filtro PB di IF,

$A_{FIF_FB_CHA_dB}$, attenuazione in banda oscura, a distanza di canale, del filtro PB di IF.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

2. LO ideale, solo segnale interferente

E' utile considerare il comportamento della conversione nella condizione in cui l'oscillatore locale è ideale (una riga spettrale), ma il segnale desiderato, f_0 , non è presente, all'ingresso esiste solamente il segnale interferente, f_i . Figura 2.

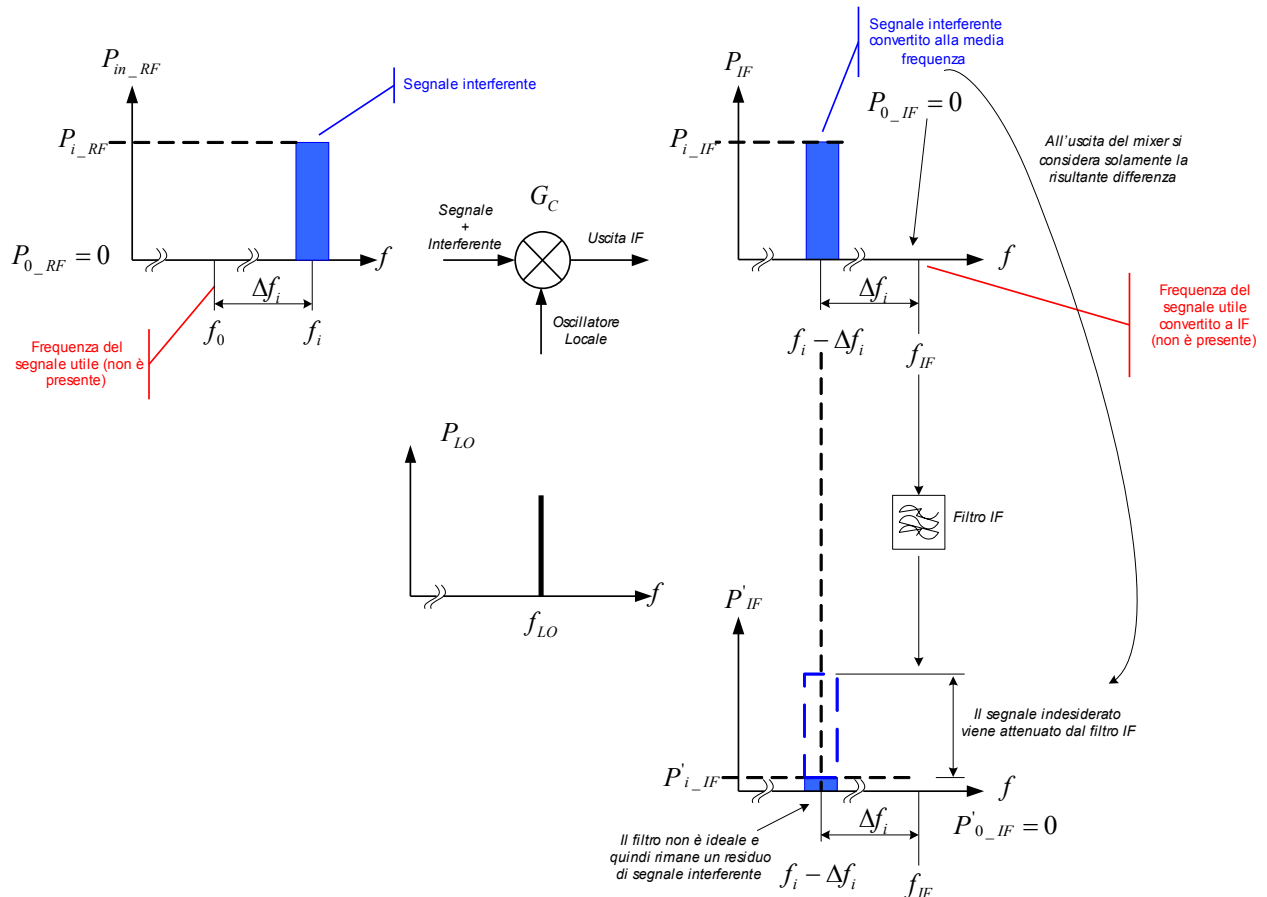


Figura 2

Dopo il filtro passa banda di media frequenza la situazione dei livelli dei segnali sarà:

- potenza del segnale desiderato, f_{IF} ; $P'_{0_IF_dBm} = 0$,
- potenza del segnale interferente, $f_{IF} + \Delta f_i$;

$$P'_{i_IF_dBm} = G_C + P_{i_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB}$$

La situazione del segnale interferente è la stessa del caso precedente.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

3. LO non ideale, solo segnale interferente

In questo caso il segnale utile, f_0 , è assente, esiste il segnale interferente, f_i e l'oscillatore locale non è più ideale, ma contiene un segnale spurio, f_{S_LO} , alla distanza Δf_i da f_{LO} .
Figura 3.

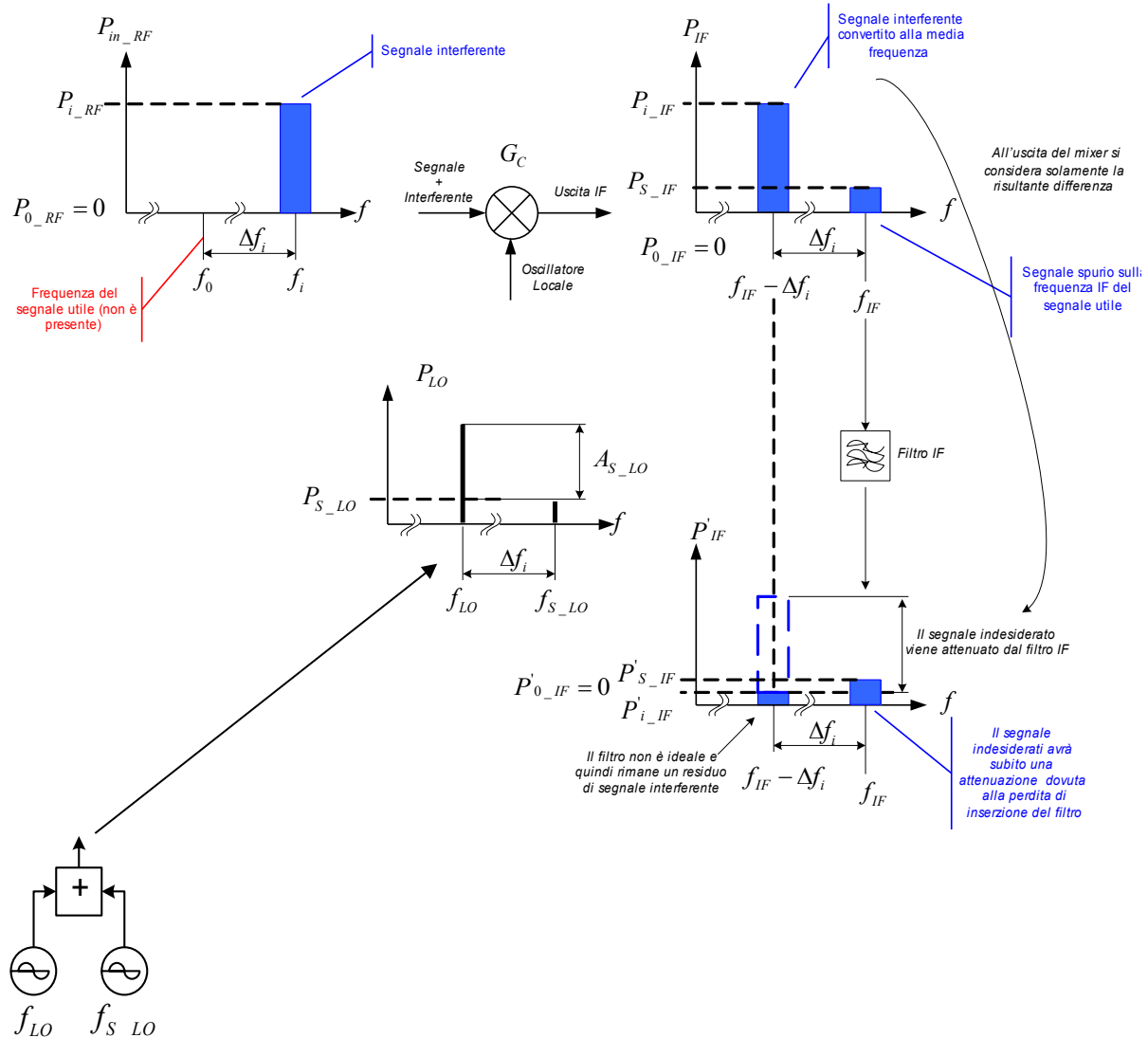


Figura 3

In questa condizione è come se il segnale dell'oscillatore locale fosse generato da due distinti generatori f_{LO} e f_{S_LO} , dove f_{S_LO} è il segnale spurio dell'oscillatore.

P_{S_LO} , potenza del segnale spurio dell'oscillatore locale,

A_{S_LO} , attenuazione del segnale spurio dell'oscillatore locale nei confronti dell'LO,

P_{S_IF} , potenza del segnale indesiderato a f_{IF} e provocato dalla spuria dell'oscillatore locale,

P'_{S_IF} , potenza del segnale indesiderato a f_{IF} all'uscita del filtro di frequenza intermedia.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

All'uscita del mixer si avranno due segnali (si considera solamente la differenza, $f_{LO} - f_{ingresso}$):

- uno alla frequenza

$f_{LO} - f_{ingresso} = f_{LO} - f_i = f_{LO} - (f_0 + \Delta f_i) = f_{LO} - f_0 - \Delta f_i$ ma $f_{LO} - f_0 = f_{IF}$ per cui il segnale avrà la frequenza $f_{IF} - \Delta f_i$, che è il segnale interferente traslato in media frequenza,

- uno alla frequenza

$f_{S_LO} - f_{ingresso} = f_{S_LO} - f_i = (f_{LO} + \Delta f_i) - (f_0 + \Delta f_i) = f_{LO} + \Delta f_i - f_0 - \Delta f_i = f_{LO} - f_0$ per cui il segnale convertito, grazie alla spuria dell'oscillatore locale, avrà la frequenza $f_{LO} - f_0 = f_i$ cioè coincide con il valore centrale della media frequenza. Se l'oscillatore locale fosse privo di spurie questo segnale non sarebbe presente.

La potenza dei segnali all'uscita del mixer sarà:

- potenza del segnale indesiderato (interferente) alla frequenza $f_{IF} + \Delta f_i$;

$$P_{i_IF_dBm} = P_{i_RF_dBm} + G_C.$$

- potenza del segnale indesiderato alla frequenza f_{IF} ;

$$P_{S_IF_dBm} = G_C + P_{i_RF_dBm} - A_{SLO_dB}$$

Dopo il filtro passa banda di media frequenza la situazione cambierà

- il segnale indesiderato alla frequenza f_{IF} subirà una leggera attenuazione dovuta alla perdita di inserzione del filtro IF;

$$P'_{S_IF_dBm} = P_{S_IF_dBm} - A_{FIF_IB_dB}$$

$$P'_{S_IF_dBm} = G_C + P_{i_RF_dBm} - A_{SLO_dB} - A_{FIF_IB_dB}$$

- il segnale indesiderato (interferente) alla frequenza $f_{IF} + \Delta f_i$ subirà anche l'attenuazione fuori banda del filtro IF,

$$P'_{i_IF_dBm} = P_{i_IF_dBm} - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB}$$

$$P'_{i_IF_dBm} = P_{i_RF_dBm} + G_C - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB}$$

Il segnale spurio in banda IF a frequenza f_{IF} è provocato dalla spuria dell'oscillatore locale P_{S_LO} e viene convertito con una attenuazione che va a sommarsi al guadagno di conversione G_C , questa attenuazione corrisponde alla attenuazione del segnale spurio dell'oscillatore locale A_{S_LO} . Tutto questo è valido se la spuria f_{S_LO} viene considerata come una banda laterale della portante f_{LO} provocata da una modulazione disturbante.

La presenza di un segnale spurio sull'oscillatore locale ha fatto sì che all'uscita della media frequenza si generi un segnale indesiderato sulla stessa frequenza del segnale utile. I segnali interferenti presenti all'ingresso del demodulatore sono due, P'_{i_IF} e P'_{S_IF} , le loro potenze si sommano.

Si può attenuare P'_{i_IF} aumentando la selettività del ricevitore, mentre per attenuare P'_{S_IF} si deve migliorare la qualità dell'oscillatore locale aumentando la sua purezza spettrale.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

4. LO non ideale, segnale utile + segnale interferente

Consideriamo ora di mantenere la situazione descritta nel paragrafo precedente, ma con la presenza del segnale utile alla frequenza f_0 , che nel caso precedente era assente. Esiste il segnale interferente, f_i e l'oscillatore locale contiene un segnale spurio, f_{S_LO} , alla distanza Δf_i da f_{LO} . Figura 4.

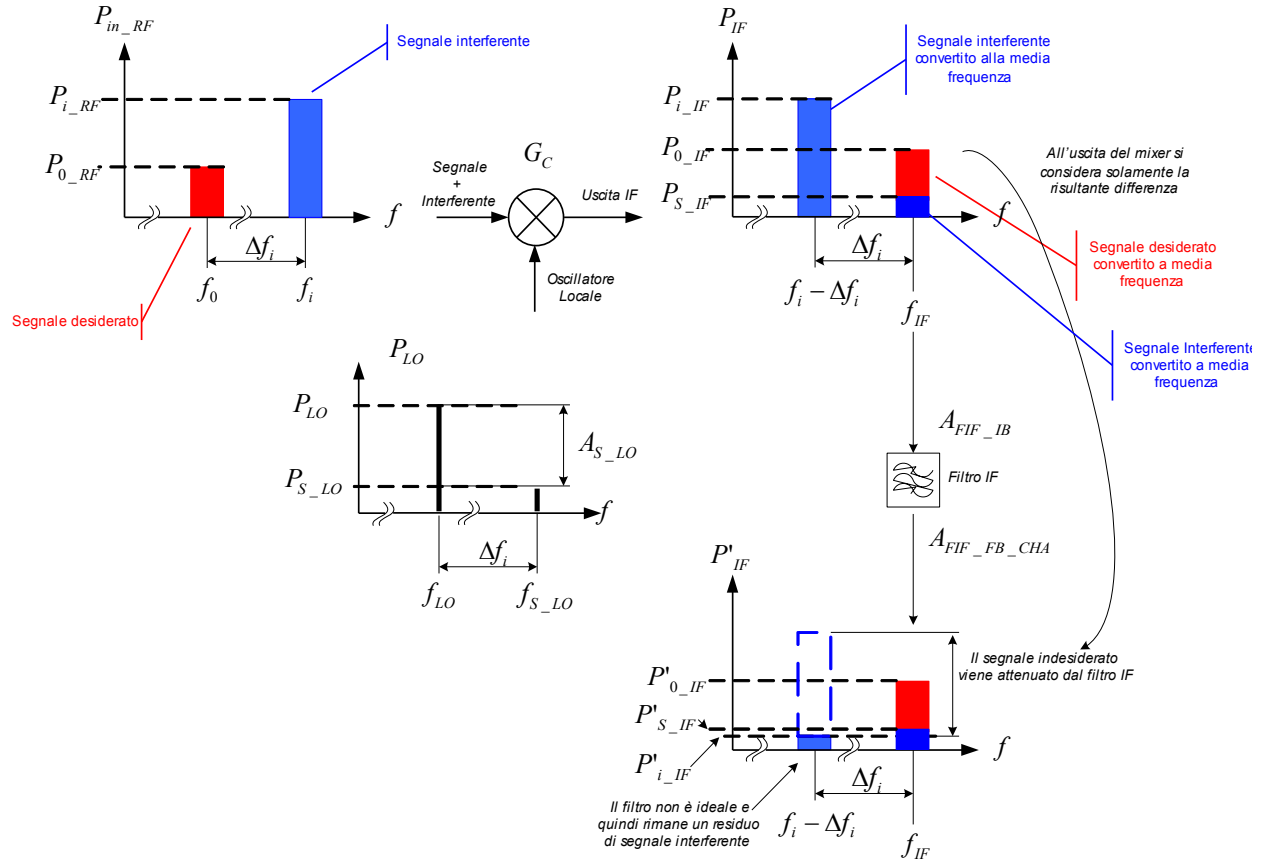


Figura 4

Il segnale utile, convertito in media frequenza (uscita del mixer), f_{IF} , avrà un livello di potenza di

$$P_{0_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{0_RF_dBm}$$

I segnali interferenti sono due, uno a frequenza f_{IF} ed una alla frequenza $f_{IF} - \Delta f_i$ i loro livelli di potenza sono:

- a f_{IF} ; $P_{S_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm} - A_{S_LO_dB}$
- a $f_{IF} - \Delta f_i$; $P_{i_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm}$

Dopo il filtro IF il livello di potenza del segnale utile sarà,

$$P'_{0_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{0_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB}$$

mentre il livello dei due segnali interferenti sarà,

- a f_{IF} ; $P'_{S_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm} - A_{S_LO_dB} - A_{FIF_IB_dB}$
- a $f_{IF} - \Delta f_i$; $P'_{i_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB}$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Il segnale interferente alla frequenza $f_{IF} - \Delta f_i$ è meno pericoloso, può essere discriminato in frequenza dal demodulatore ed il suo livello può essere attenuato sensibilmente aumentando la selettività del filtro IF. Nelle considerazioni che seguono lo si trascurerà.

L'attenuazione, in dB, fra il segnale utile ed il segnale interferente a frequenza f_{IF} all'uscita del filtro IF sarà,

$$A_{i_dB} = P'_{0_IF_dBm} - P'_{S_IF_dBm}$$

$$A_{i_dB} = G_{C_dB} + P_{0_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB} - (G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm} - A_{S_LO_dB} - A_{FIF_IB_dB})$$

$$A_{i_dB} = G_{C_dB} + P_{0_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB} - G_{C_dB} - P_{i_RF_dBm} + A_{S_LO_dB} + A_{FIF_IB_dB}$$

$$A_{i_dB} = P_{0_RF_dBm} - P_{i_RF_dBm} + A_{S_LO_dB}$$

Fissato un dato rapporto di attenuazione fra segnale utile e segnale interferente, A_i si può calcolare l'attenuazione minima che deve avere il segnale spurio dell'oscillatore locale

$$A_{S_LO_dB} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_{i_dB}$$

Questo rapporto definito sovente come $\frac{C}{I}$ deve essere superiore ad un determinato valore che viene definito dalle specifiche di sistema (GSM, DECT,.....).

Fino a qui sono state fatte considerazioni basandosi sul fatto che l'oscillatore locale abbia una sola spuria alla distanza Δf_i da f_{LO} . Questa situazione in pratica non esiste o perlomeno la presenza della spuria è accompagnata dal rumore dell'oscillatore locale stesso. La situazione spettrale più comune è quella rappresentata nelle figure 5.

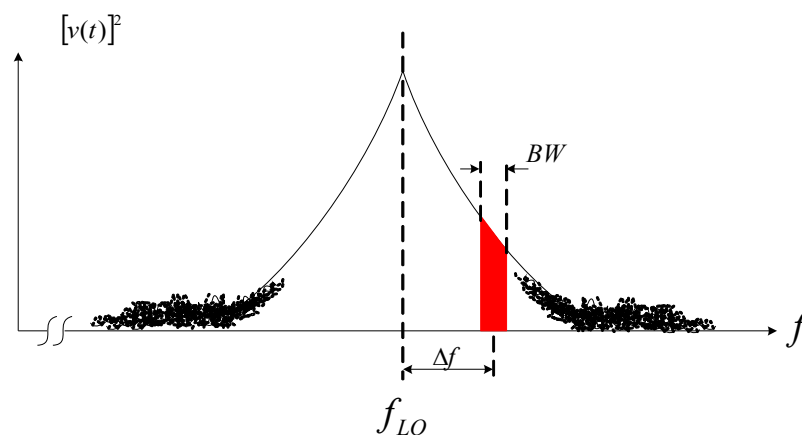


Figura 5

Nella figura 5 a è rappresentato un caso più comune in cui alla distanza Δf_i da f_{LO} si ha la presenza del solo rumore. In questo caso la conversione in banda del segnale interferente non

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

sarà provocata da un segnale spurio dell'LO, ma da una porzione di banda del rumore. Porzione che potremmo considerare rettangolare.

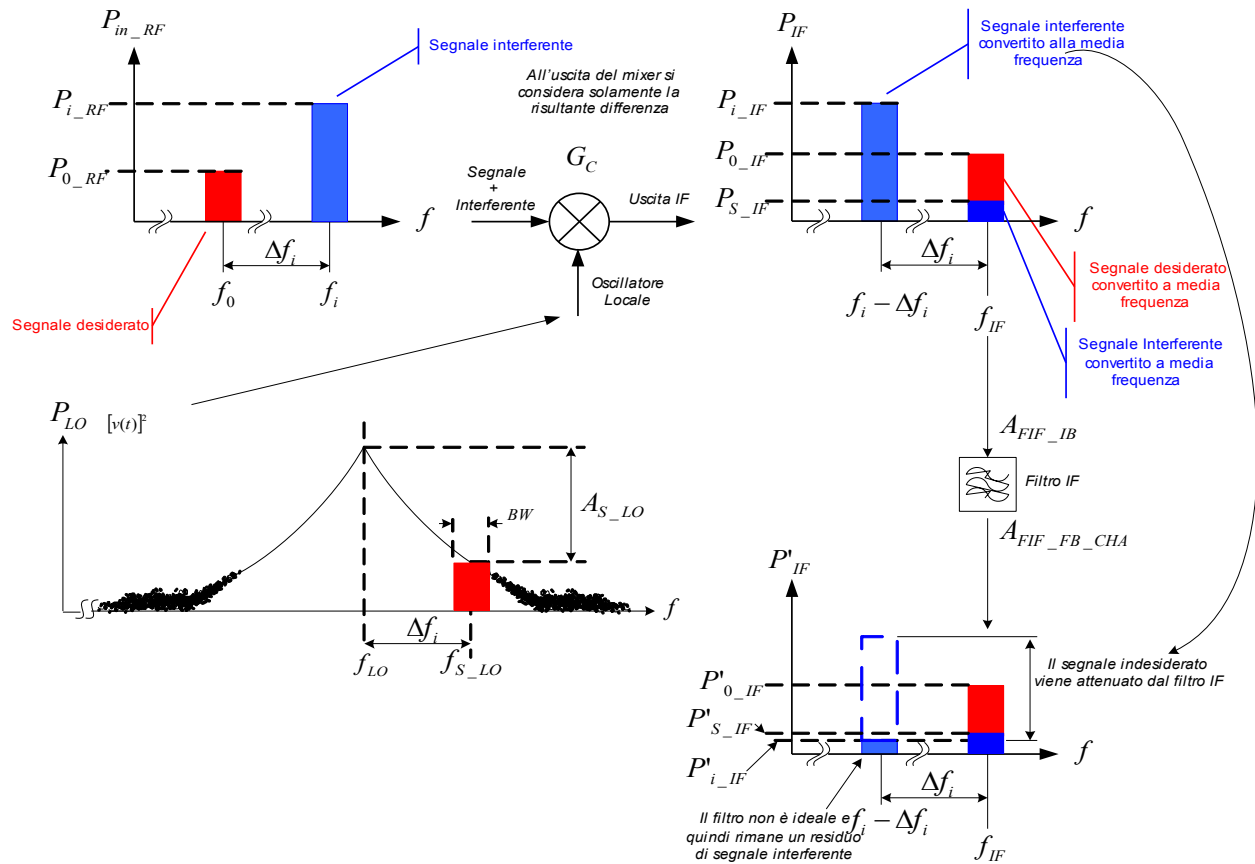


Figura 6

La relazione, appena scritta, $A_{S_LO_dB} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_{i_dB}$ è valida per livelli di potenza misurati in una banda di frequenza uguale alla banda passante (BW) del ricevitore.

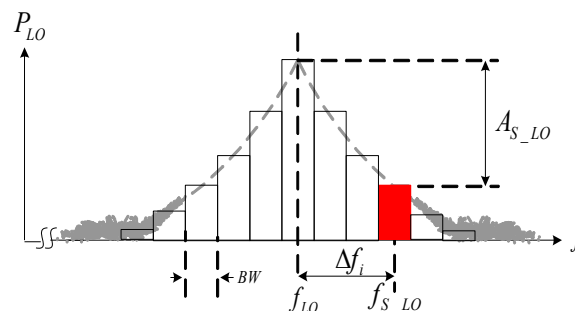


Figura 7

Nella realtà si avrà del rumore piuttosto che un segnale discreto, rumore che occuperà una banda di frequenza, quindi la potenza del rumore dovrà essere integrata in una a banda di frequenza, BW (Hz), banda che sarà la stessa di quella del filtro IF del ricevitore. In modo macroscopico lo spettro dell'oscillatore locale potrà essere rappresentato a scalini di larghezza BW e di ampiezza decrescente all'aumentare di Δf_i (figura 7).

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

La potenza del rumore sulle bande adiacenti di un ricevitore viene solitamente misurata in una banda di frequenza unitaria (1Hz) ed espressa in $\frac{dB_c}{Hz}$ specificato per un valore di Δf .

Approssimando l'area di integrazione del rumore ad un rettangolo si potrà tenere conto di una correzione dovuta alla larghezza di banda del rumore pari a $10\log(BW)$

per cui la relazione $A_{S_LO_dB} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_{i_dB}$ diventa

$$A_{S_LO_dBc/Hz} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_{i_dB} + 10\log(BW) \frac{dBc}{Hz}$$

che di solito viene espressa

$$PN(\Delta f_c) \frac{dBc}{Hz} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + \left(\frac{C}{I}\right)_{dB} + 10\log(BW) \frac{dBc}{Hz}$$

che esprime anche l'attenuazione del rumore (principalmente di fase) ad una data distanza dalla portante e misurato in una banda di 1 Hz (Figura 8).

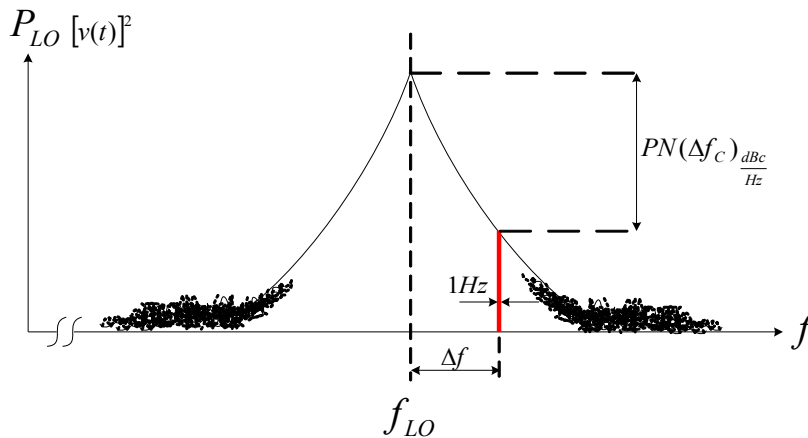


Figura 8

Solitamente il livello del segnale desiderato, P_{0_RF} , quello del segnale interferente, P_{i_RF} , ed il rapporto $\frac{C}{I}$ fanno parte delle specifiche di sistema.

La figura 9 mostra un caso di malfunzionamento in cui oltre al rumore è presente anche una componente spettrale non desiderata.

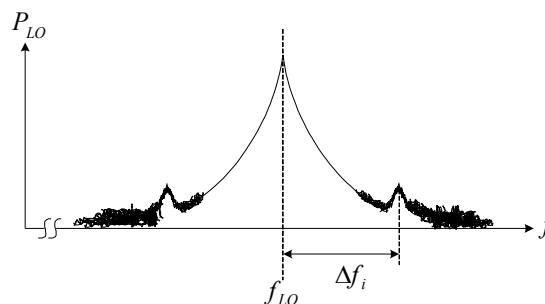


Figura 9

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

5. All'ingresso è presente il segnale utile e più segnali interferenti

Vale la pena di considerare il caso in cui all'ingresso del ricevitore sono presenti, oltre al segnale desiderato, anche i segnali sui canali adiacenti al canale del segnale utile. La figura 10 mostra il caso in cui il segnale dell'oscillatore locale è ideale.

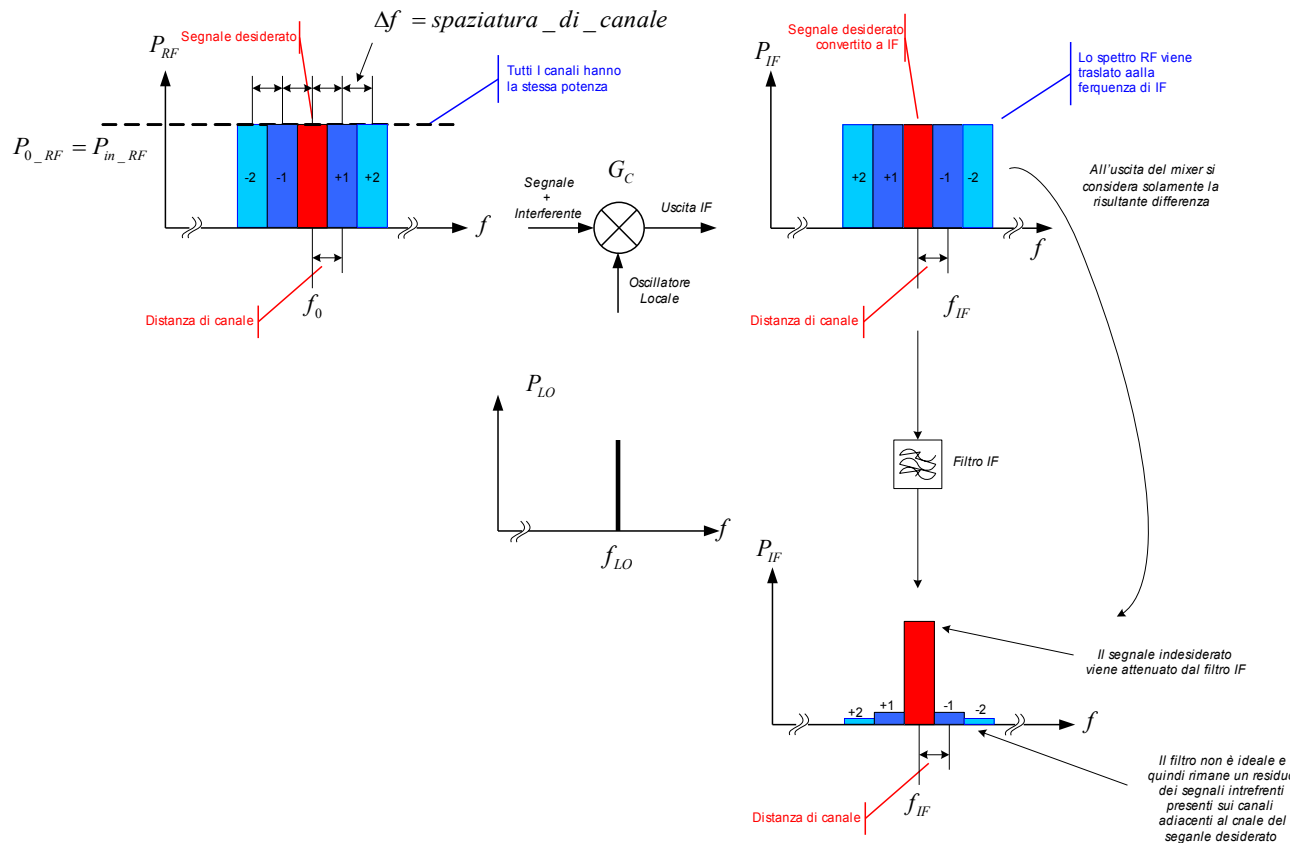


Figura 10

In queste condizioni il segnale non subisce interferenze significative da parte dei segnali presenti sui canali adiacenti che risultano fortemente attenuati dal filtro di IF.

Le cose si complicano se l'oscillatore locale non è ideale, ma è accompagnato da dei segnali spuri.

Vediamo cosa succede quando l'oscillatore non è composto da uno spettro continuo (caso reale), ma da uno spettro composto da sole tre righe di cui una è l'LO e le altre due sono due bande laterali spurie distanti dalla frequenza di centro canale del valore della distanza di canale.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

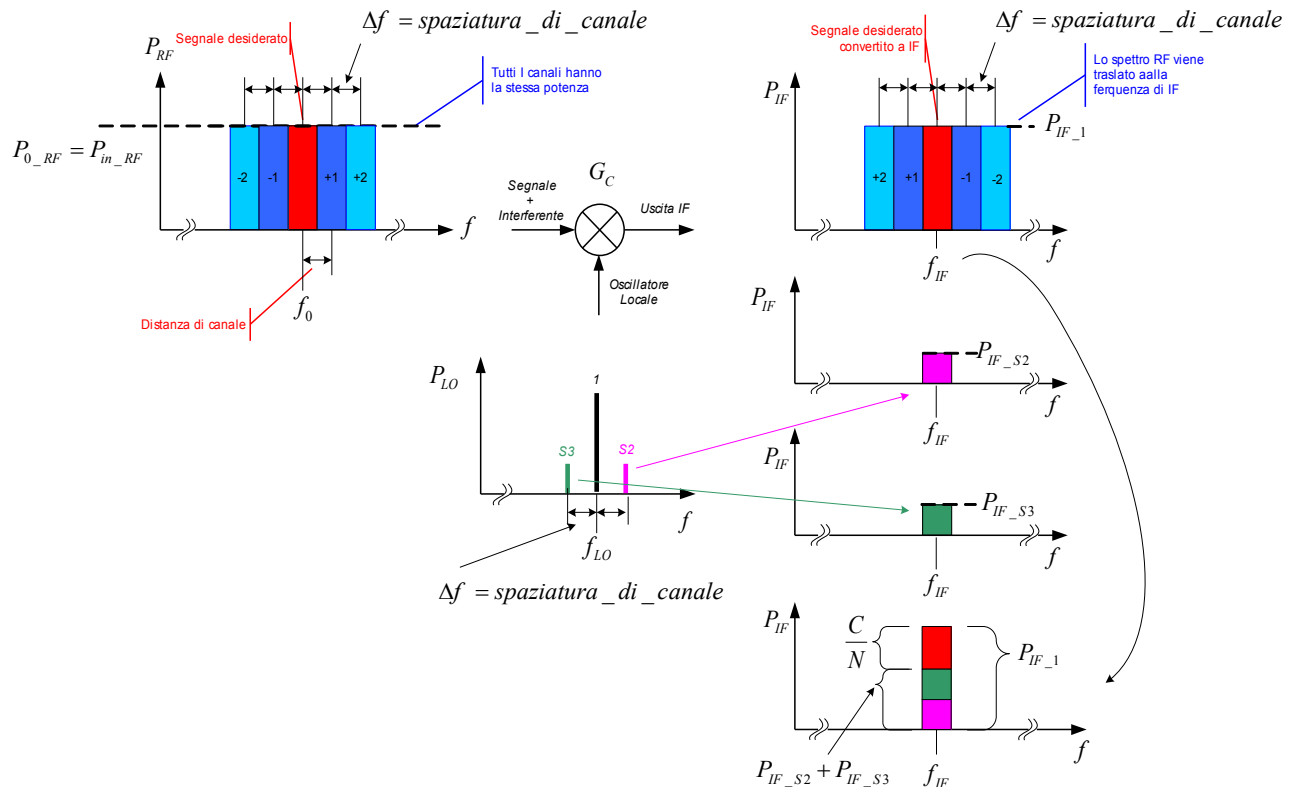


Figura 11

La componente a frequenza $f_{LO}(1)$, la fondamentale dell'oscillatore locale trasla tutto lo spettro RF a IF, sia il segnale utile che i segnali presenti sui canali adiacenti. (Per semplificare la figura 11 non sono stati disegnati i segnali dei canali adiacenti convertiti a IF dalla fondamentale dell'oscillatore locale).

La componente spuria, banda laterale superiore, dell'LO (S2) a distanza $+\Delta f_i$ provoca la conversione (a frequenza IF = a quella del segnale utile) del segnale RF presente sul canale adiacente immediatamente inferiore al canale del segnale utile (-1).

La componente spuria, banda laterale inferiore, dell'LO (S3) a distanza $-\Delta f_i$ dal segnale utile provoca la conversione in banda del segnale RF presente sul canale RF adiacente ed immediatamente superiore (+1) a quello del segnale utile.

Sulla frequenza di centro banda in Media Frequenza si trovano tre componenti, il segnale utile di potenza P_{0_IF} , il segnale interferente convertito a IF a causa della componente spuria superiore, S2, di potenza P_{IF_S2} , il segnale interferente convertito a IF a causa della componente spuria inferiore, S3, di potenza P_{IF_S3} . Questi tre segnali si sommano.

Il rapporto fra la potenza del segnale utile e la somma delle potenze dei segnali interferenti si definisce con $\frac{C}{I}$ e deve essere superiore ad un determinato valore definito dalle specifiche di sistema (GSM, DECT,).

In pratica l'oscillatore locale presenta uno spettro continuo (dovuto al rumore) e non solamente due componenti spurie discrete, per cui se sono presenti all'ingresso tutti i canali adiacenti tutti danno un contributo alla potenza del segnale interferente in banda.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Normalmente le norme che riportano i requisiti del sistema (DECT, GSM, UMTS, ...) specificano i livelli di interferenza a cui il ricevitore sarà sottoposto sui canali adiacenti. Questi livelli sono crescenti all'aumentare della distanza dal canale utile e sono specificati per un certo numero di canali, tipicamente ± 3 .

La figura 12 riporta i valori dei segnali interferenti, richiesti dalla normativa GSM, con cui provare un ricevitore di un terminale mobile. Il livello del segnale utile, P_{0_RF} , (sensibilità di riferimento) è di -102 dBm per un $BER \leq 10^{-4}$, normalmente si prende un margine di 3 dB per cui il livello del segnale utile alla sensibilità di riferimento diventa -99 dBm .

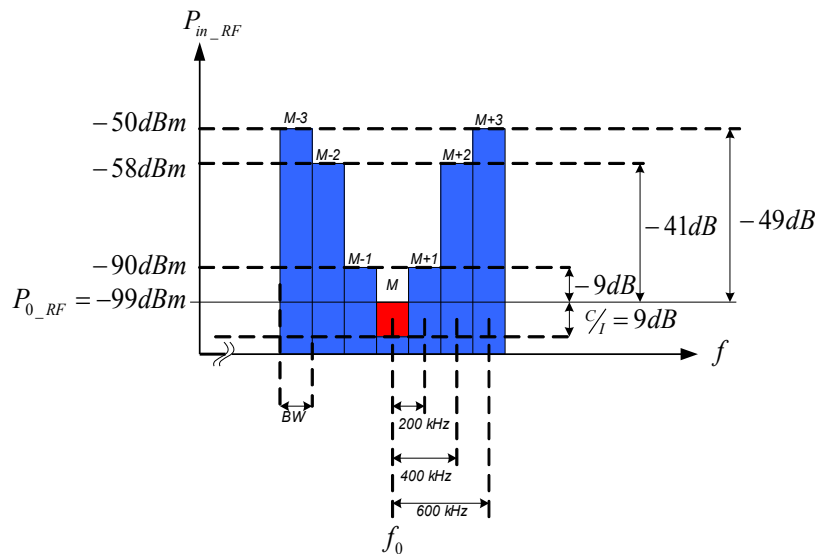


Figura 12

La figura mostra il canale occupato dal segnale utile, M , ed i 3 canali adiacenti inferiori ($M-3, M-2, M-1$) e superiori ($M+1, M+2, M+3$). In questo caso, GSM, la distanza fra i canali, Δf , è di 200 kHz e ogni canale occupa una banda $BW = 200 \text{ kHz}$, si avrà,

$$M = f_0, \quad M \pm 1 = f_0 \pm \Delta f, \quad M \pm 2 = f_0 \pm 2\Delta f, \quad M \pm 3 = f_0 \pm 3\Delta f$$

la normativa riporta i livelli di potenza del segnale interferenti, A_{CHA} , riferiti al livello della sensibilità di riferimento cioè al livello del segnale utile P_{0_RF}

Canale	Frequenza	Livello interferente (dBm)	Livello di interferenza relativo A_{CHA} (dB)	Livello segnale utile (dBm)
M	f_0		0	-99
M	f_0	-108	9	
$M \pm 1$	$f_0 \pm \Delta f$	-90	-9	
$M \pm 2$	$f_0 \pm 2\Delta f$	-58	-41	
$M \pm 3$	$f_0 \pm 3\Delta f$	-50	-49	

Tabella 1

L'interferenza co-canale, C/I , equivale alla attenuazione A_i e dipende dalle caratteristiche di sistema, nel GSM è di 9 dB . (vedere gli appunti sulla interferenza cocanale)

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Esempio

Per chiarire vediamo di calcolare l'attenuazione fuori banda alle diverse distanze di canale ($M \pm 1, M \pm 2, M \pm 3$) che dovrà avere un filtro di media frequenza in un ricevitore GSM.

Consideriamo l'oscillatore locale ideale (vedi paragrafo 1)

$$A_{i_dB} = P_{0_RF_dBm} - P_{i_RF_dBm} + A_{FIF_FB_CHA_dB}$$

$$A_{FIF_FB_CHA_dB} = A_{i_dB} - (P_{0_RF_dBm} - P_{i_RF_dBm})$$

I valori di $(P_{0_RF_dBm} - P_{i_RF_dBm})$ corrispondono ai livelli relativi riportati in tabella, si avrà,

$$\text{a } M \pm 1 \quad A_{FIF_FB_CHA_dB} = 9 - (-9) = 18dB$$

$$\text{a } M \pm 2 \quad A_{FIF_FB_CHA_dB} = 9 - (-41) = 50dB$$

$$\text{a } M \pm 3 \quad A_{FIF_FB_CHA_dB} = 9 - (-49) = 58dB$$

Con questi valori si potrà tracciare la sagoma del filtro di media frequenza.

Nei paragrafi da 1 a 5 di questi appunti si discusso di come definire la selettività del filtro IF e di come specificare la purezza spettrale dell'oscillatore locale partendo da alcune caratteristiche di sistema come:

- la potenza del segnale desiderato, P_{0_RF}
- la potenza del segnale interferente, P_{i_RF}
- il valore di C/I.

In queste considerazioni si sono fatte delle approssimazioni, ad esempio nel calcolo della attenuazione fuori banda, $A_{FIF_FB_CHA_dB}$, che il filtro IF deve fornire (*paragrafo 4*) si è trascurata il segnale alla frequenza $f_{IF} + \Delta f_i$ con

$$P'_{i_IF_dBm} = G_{C_dB} + P_{i_RF_dBm} - A_{FIF_IB_dB} - A_{FIF_FB_CHA_dB}.$$

Nella pratica si dovrà operare in modo che questo segnale interferente sia effettivamente trascurabile cioè che si verifichi la condizione $P'_{i_IF} \ll P'_{0_IF}$ (filtro di IF selettivo) oppure si dovrà tenere conto della somma di tutti i segnali interferenti presenti all'ingresso del demodulatore.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Bloccaggio

I segnali indesiderati presenti all'ingresso del ricevitore creano delle risposte spurie che cadono sul canale occupato dal segnale desiderato. Queste risposte spurie provocano un degrado del rapporto fra segnale utile e segnale interferente (C/I) all'ingresso del demodulatore.

La selettività di un ricevitore è la misura della sua capacità di essere immune ai segnali indesiderati. Nei paragrafi precedenti sono stati visti gli aspetti di selettività legati alle interferenze sui canali adiacenti $M \pm 1$, $M \pm 2$, $M \pm 3$, nelle note che seguono verranno prese in considerazione le interferenze provocate da segnali di forte intensità presenti a distanze di canale maggiori di quelle dei canali adiacenti dal canale utile (f_0).

Questo tipo di selettività viene chiamata **bloccaggio** (blocking).

Il meccanismo con cui si forma l'interferenza è lo stesso di quello descritto nei paragrafi precedenti e dipende dalla purezza spettrale dell'oscillatore locale, cioè dalle bande laterali dovute al rumore. La principale differenza è che si prende in considerazione il rumore ad una maggiore distanza dalla portante dell'oscillatore locale

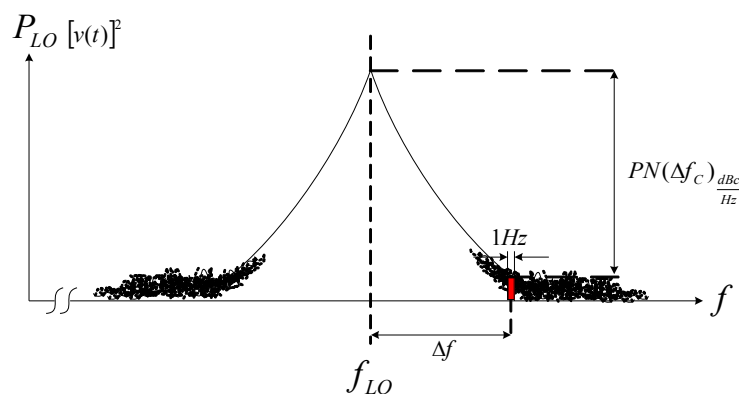


Figura 13

La figura 13 mette in evidenza che la misura del rumore di fase viene fatta ad una distanza Δf da

f_{LO} maggiore rispetto caso del canale adiacente.

La selettività ed il fattore di forma del filtro IF non contribuiscono ad attenuare il fenomeno.

La figura 14 e la Tabella 2 riportano i valori dei livelli dei segnali interferenti richiesti, per la misura del **bloccaggio**, dalla normativa GSM. Il livello del segnale utile, P_{0_RF} , (sensibilità di riferimento) è di -102 dBm per un $BER \leq 10^{-4}$, che con il margine di 3 dB diventa -99 dBm .

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

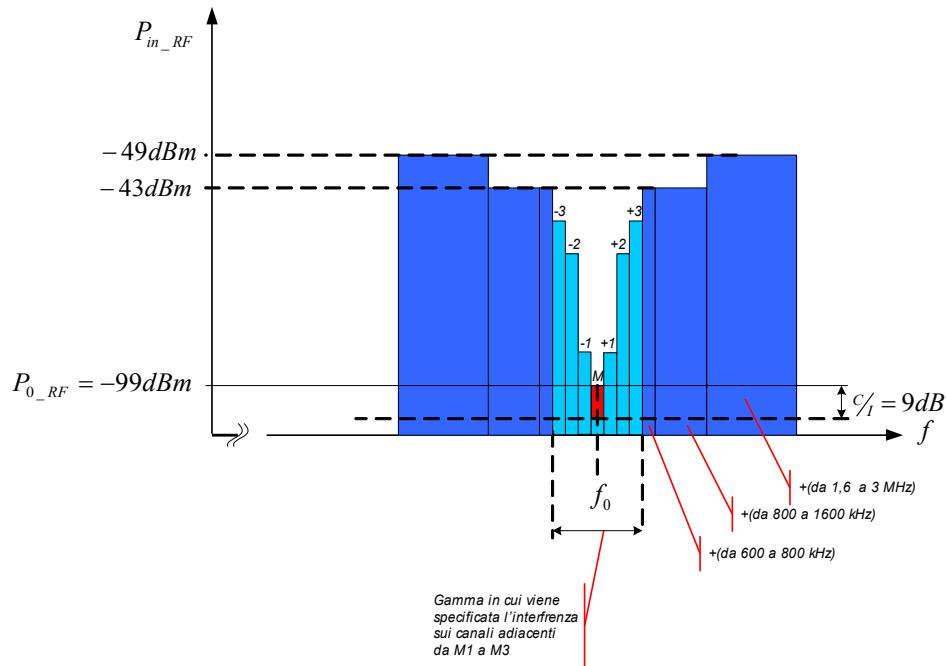


Figura 14

I valori dei segnali interferenti sono espressi in valore assoluto, dBm, e sono via via crescenti all'aumentare della distanza da f_0 .

Nella Tabella 2 sono riportati anche i valori a $\Delta f \rangle \pm 3 MHz$ da f_0 .

Banda di frequenza	Livello interferente (dBm)	Livello di interferenza relativo A_{CHA} (dB)	Livello segnale utile (dBm)
f_0		0	-99
f_0	-108	9	cocanale
	-43	-56	
	-43	-56	
$1,6MHz \geq \Delta f < 3MHz$	-33	-66	
$3MHz \geq \Delta f$	-23	-76	
Fuori banda GSM	0	-99	

Tabella 2

Il bloccaggio dipende dalla linearità degli stadi RF e del mixer, ma se si considera di operare in condizioni di linearità esso dipende solamente dal rumore dell'oscillatore locale. Quindi dalle specifiche di bloccaggio si ricavano i requisiti di purezza spettrale per l'LO. Il procedimento è lo stesso a quello descritto nei paragrafi precedenti per gli aspetti di selettività sui canali adiacenti al canale occupato dal segnale utile, varia solamente il valore del Δf che è maggiore della distanza di canale.

$$A_{S_LO_dBc/Hz} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_{i_dB} + 10 \log(BW) \frac{dBc}{Hz}$$

che esprime anche il rumore (di fase) ad una data distanza dalla portante

$$PN(\Delta f_C)_{\frac{dBc}{Hz}} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + \left(\frac{C}{I}\right)_{dB} + 10\log(BW)_{\frac{dBc}{Hz}}$$

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

le relazioni sono le stesse del paragrafo 4 , vanno applicate tenendo conto della maggiore distanza da f_0 . Vediamo un esempio

Esempio

Calcolare i requisiti di rumore di fase per un oscillatore locale da impiegarsi in un ricevitore supereterodina per un terminale mobile GSM.

Per i limiti di sistema si fa riferimento alla tabella 2 e si tiene conto che:

- la sensibilità di riferimento è -99 dBm
- $C/I = 9$ dB,
- La banda $BW = 200$ kHz.

Soluzione

Si applica la relazione

$$PN(\Delta f_C)_{\frac{dBc}{Hz}} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + \left(\frac{C}{I}\right)_{dB} + 10\log(BW)_{\frac{dBc}{Hz}}$$

e si calcola il rumore di fase richiesto nella banda $600kHz \geq \Delta f < 800kHz$ a cui corrisponde un livello di segnale interferente di -43 dB,

$$PN(\Delta f_C)_{\frac{dBc}{Hz}} = -43 - (-99) + 9 + 10\log(2 \cdot 10^5)$$

$$PN(\Delta f_C)_{\frac{dBc}{Hz}} = -43 + 99 + 9 + 53$$

$$PN(\Delta f_C)_{\frac{dBc}{Hz}} = 118 dBm$$

Con lo stesso procedimento si calcola l'attenuazione del rumore nelle altre bande.

Riassumendo

- **LO ideale** e segnale utile più segnale interferente (paragrafo 1)

$$A_{i_dB} = P_{0_RF_dBm} - P_{i_RF_dBm} + A_{FIF_FB_CHA_dB}$$

- **LO reale** e segnale utile più segnale interferente (paragrafo 4)

$$A_{S_LO_dB} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_{i_dB}$$

$$A_{S_LO_dBc/Hz} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + A_{i_dB} + 10\log(BW)_{\frac{dBc}{Hz}}$$

$$PN(\Delta f_C)_{\frac{dBc}{Hz}} = P_{i_RF_dBm} - P_{0_RF_dBm} + \left(\frac{C}{I}\right)_{dB} + 10\log(BW)_{\frac{dBc}{Hz}}$$

La relazione si usa per il calcolo dei requisiti di purezza spettrale dell'oscillatore locale (selettività sul canale adiacente e bloccaggio)

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Gli esercizi che seguono sono relativi alle prime lezioni sulla supereterodina .

Esercizio1 (Carson pagina 363)

Disegnare lo schema a blocchi di un ricevitore supereterodina. Indicare i nomi dei singoli blocchi.

Esercizio2

Un ricevitore AM supereterodina funzionante nella gamma delle onde medie ha presente all'ingresso del mixer un segnale con frequenza $f_{RF} = 1MHz$, mentre l'oscillatore locale è sintonizzato sulla frequenza di $f_{LO} = 1455kHz$.

Quale sarà la situazione, nel dominio della frequenza, all'uscita del mixer?

Soluzione

All'uscita del mixer saranno presenti due segnali:

$$f_{IF} = f_{LO} - f_{RF} = 1455 - 1000 = 455kHz$$

e

$$f_{IF} = f_{LO} + f_{RF} = 1455 + 1000 = 2455kHz$$

Esercizio 3

In un ricevitore AM supereterodina funzionante nella gamma delle onde medie sono presenti all'ingresso del mixer due segnali con frequenza $f_{RF}' = 900kHz$ e $f_{RF}'' = 1810kHz$, mentre l'oscillatore locale è sintonizzato sulla frequenza di $f_{LO} = 1355kHz$.

Quale sarà la situazione, nel dominio della frequenza, all'uscita del mixer?

Soluzione

All'uscita del mixer saranno presenti due segnali sovrapposti e tutti e due alla frequenza di 455 kHz:

$$f_{IF} = f_{LO} - f_{RF}' = 1355 - 900 = 455kHz$$

e

$$f_{IF} = f_{LO} + f_{RF}'' = 1810 - 1355 = 455kHz$$

Esercizio 4 (Carson pagina 363)

Un ricevitore FM supereterodina è si può sintonizzare nella gamma da 88 a 108 MHz, il circuito di media frequenza lavora a 10,7 MHz. L'iniezione dell'oscillatore locale è alta (HSI).

La mescolazione sarà ottenuta per somma o per differenza? Perché?

Soluzione

La mescolazione sarà ottenuta per differenza in quanto la frequenza dell'oscillatore locale è maggiore della frequenza del segnale entrante.

01 Sistema, supereterodina, blocchi rx, selettività, f.immagine, rumore LO

Esercizio 5 (Carson pagina 363)

Un ricevitore AM supereterodina con circuito di media frequenza a 455 kHz e con l'iniezione l'oscillatore locale alta (HSI) sta ricevendo un segnale a 540 kHz, ma la ricezione viene disturbata da un segnale a 1450 kHz emesso da una stazione locale molto potente. Spiegare perché?

Soluzione

Essendo che l'iniezione dell'oscillatore locale è alta (HSI) si avrà

$$f_{LO} = f_{0_RF} + f_{IF} = 540 + 455 = 995 \text{ kHz}$$

la stazione interferente si trova a $f_{i_RF} = 1450 \text{ kHz}$ per cui

$$f_{IF} = f_{i_RF} - f_{LO} = 1450 - 995 = 455 \text{ kHz} .$$

La stazione interferente si trova sulla frequenza immagine.

Esercizio 6 (Carson pagina 364)

Un ricevitore AM supereterodina con una bassa reiezione della frequenza immagine è sintonizzato sulla stazione A con frequenza $f_{0_RF} = 1000 \text{ kHz}$, ma la sua ricezione viene disturbata dalla stazione B con frequenza $f_{i_RF} = 1350 \text{ kHz}$.

Determinare il valore della media frequenza del ricevitore?

Soluzione

Il valore della media frequenza del ricevitore è di 175 kHz.

$$|f_{IF}| = \frac{|f_{i_RF}| - |f_{0_RF}|}{2} = \frac{1350 - 1000}{2} = 175 \text{ kHz} .$$

Dove il segnale interferente con frequenza f_{i_RF} è la frequenza immagine.