

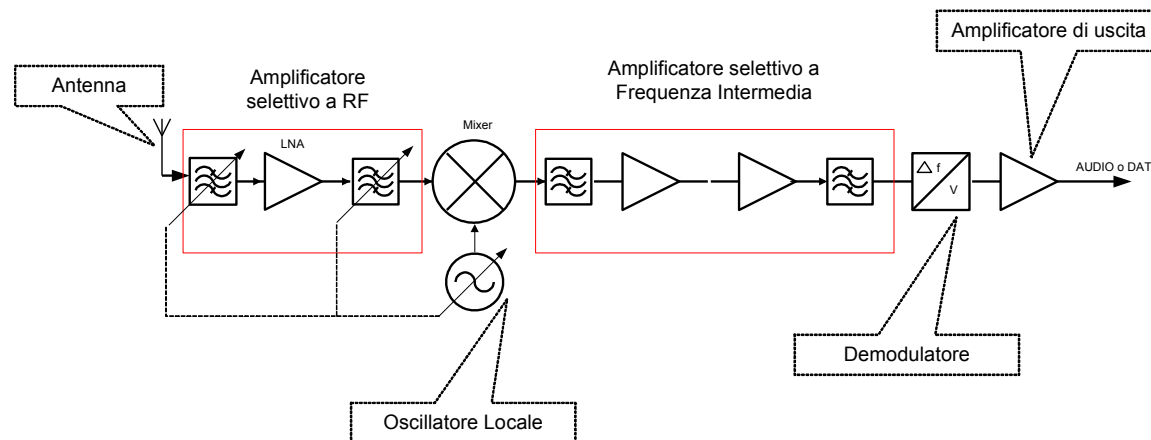
Elettronica per le telecomunicazioni

AA 2014 2015

Marco Zubalic

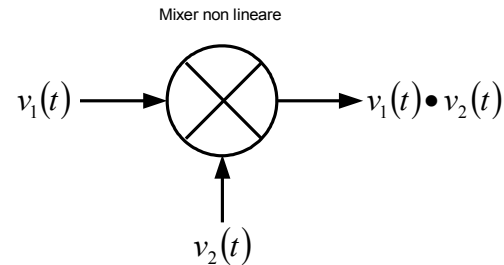
Ricevitore

Ricevitore SUPERETERODINA

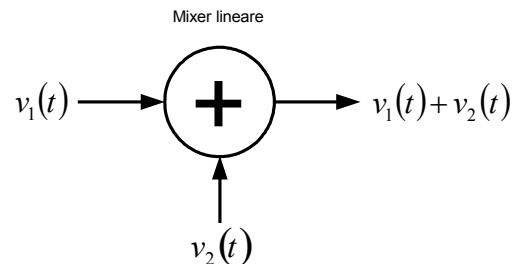


La conversione di frequenza

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

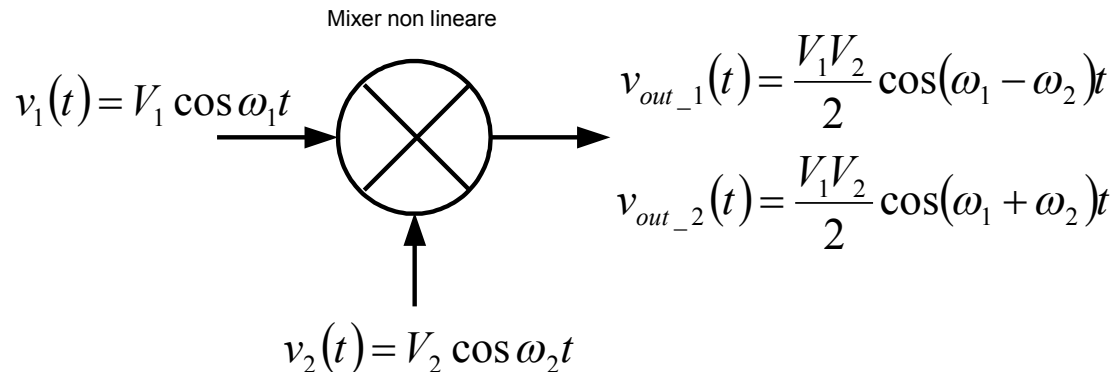
Se utilizziamo il mixer (moltiplicatore) per effettuare una moltiplicazione fra due funzioni trigonometriche, otteniamo quanto segue.

Le formule di Werner

$$\begin{aligned} \sin \alpha \bullet \sin \beta &= \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \\ \cos \alpha \bullet \cos \beta &= \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)] \end{aligned}$$

che nel caso del mixer

$$\begin{aligned} v_1(t) &= V_1 \cos \omega_1 t \\ v_2(t) &= V_2 \cos \omega_2 t \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad v_1(t) \bullet v_2(t) = \frac{V_1 V_2}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t]$$

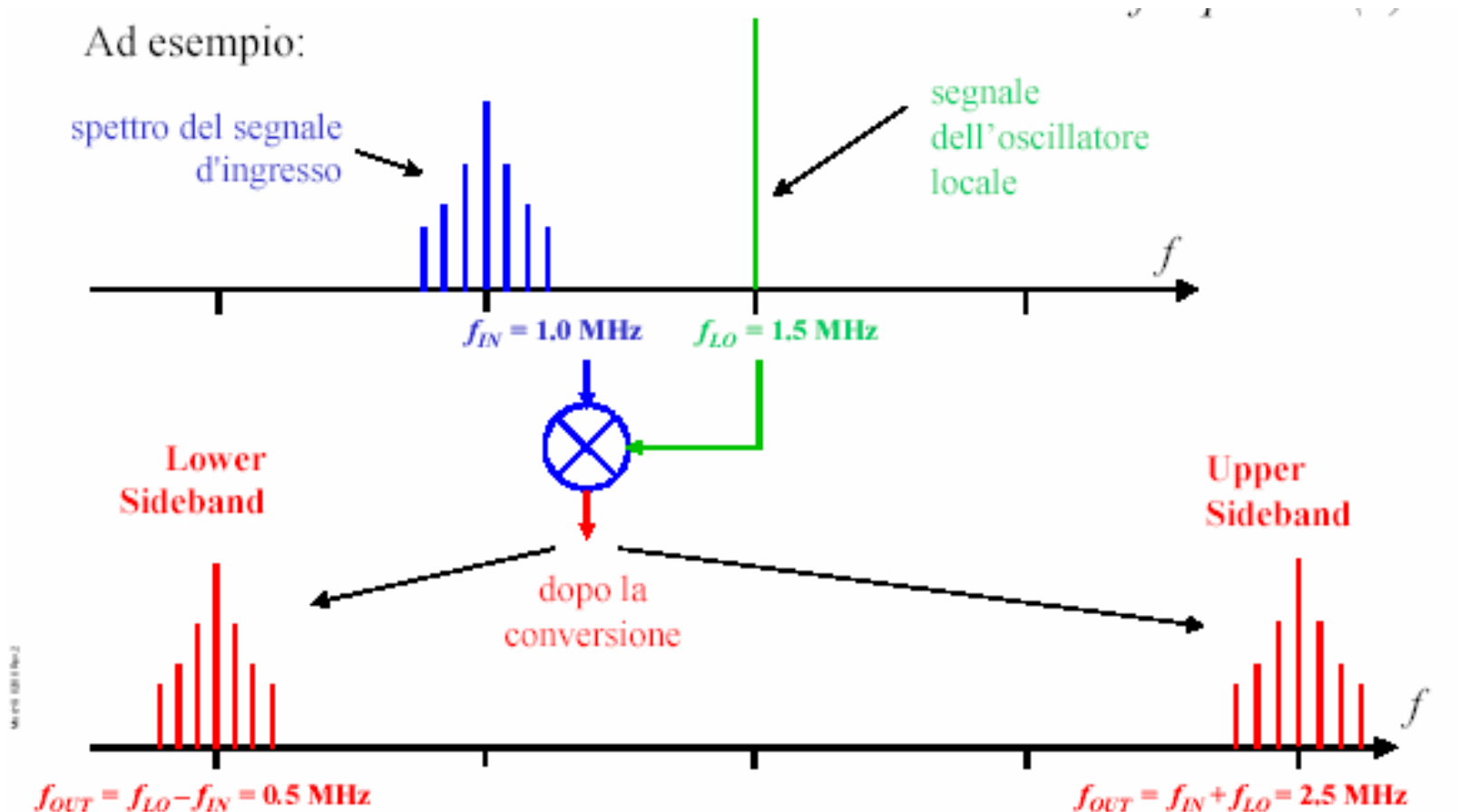


Il mixer nel dominio della frequenza

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

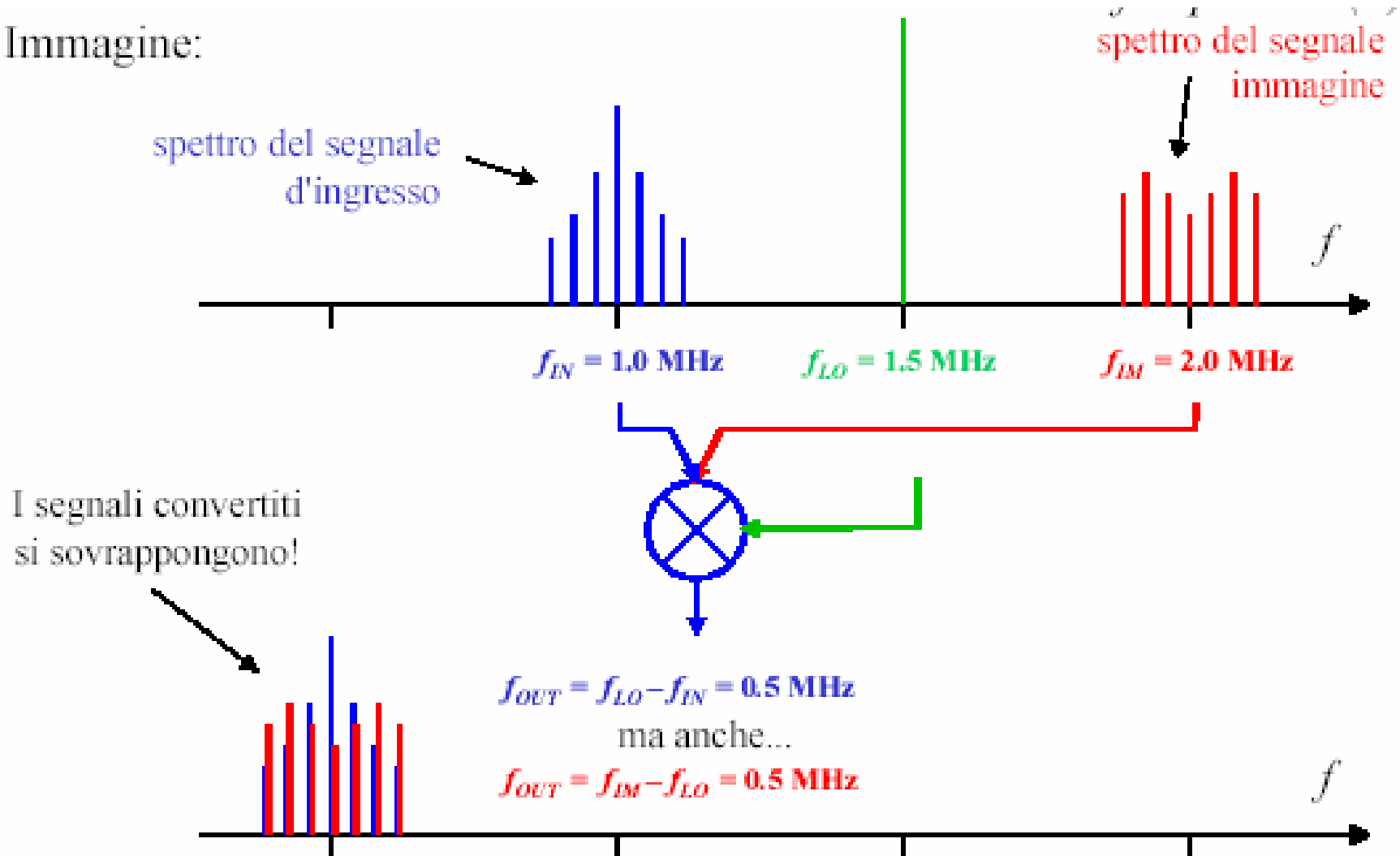
$$v_{out_2}(t) = \frac{V_1 V_2}{2} \cos(2\pi f_1 + 2\pi f_2)t$$

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



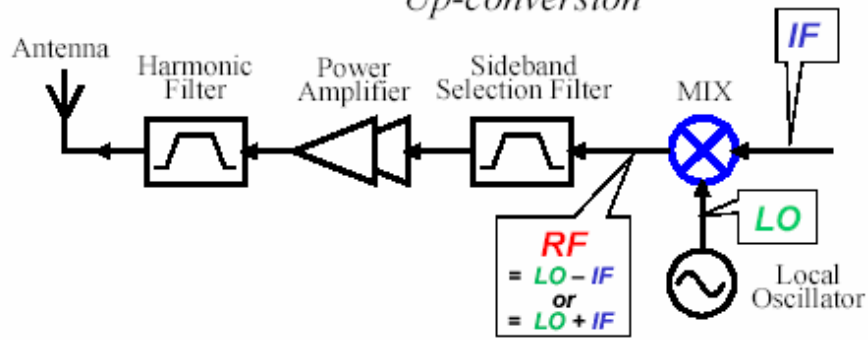
La frequenza immagine

Immagine:

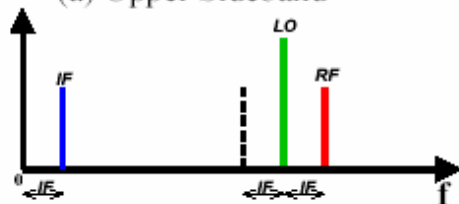


La conversione verso l'alto o verso il basso

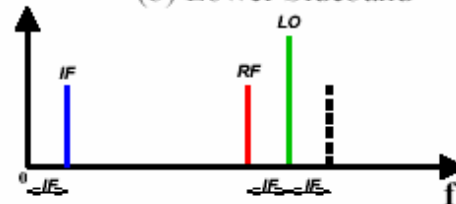
Up-conversion



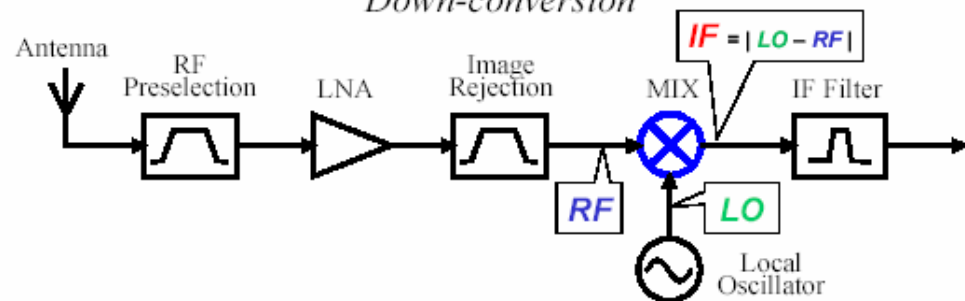
(a) Upper Sideband



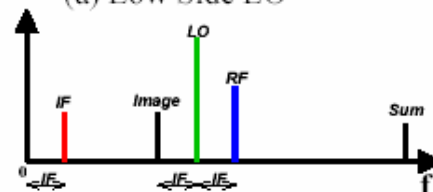
(b) Lower Sideband



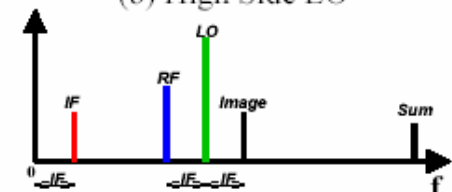
Down-conversion



(a) Low Side LO



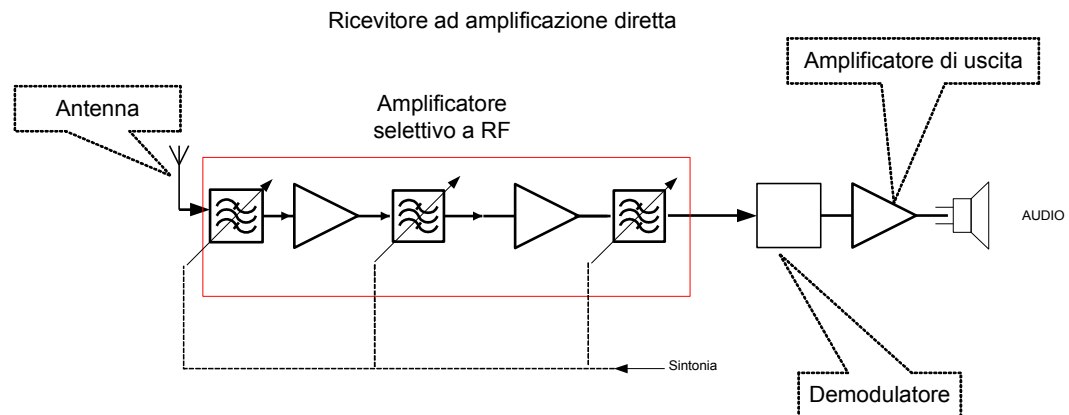
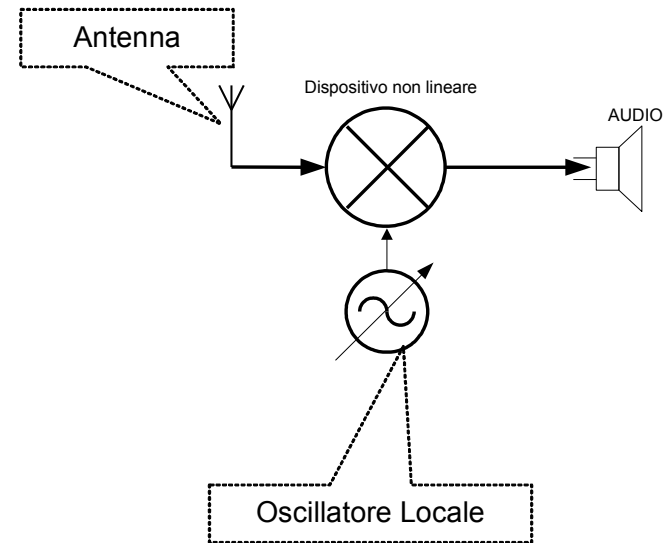
(b) High Side LO



L'eterodina ed il ricevitore ad amplificazione diretta

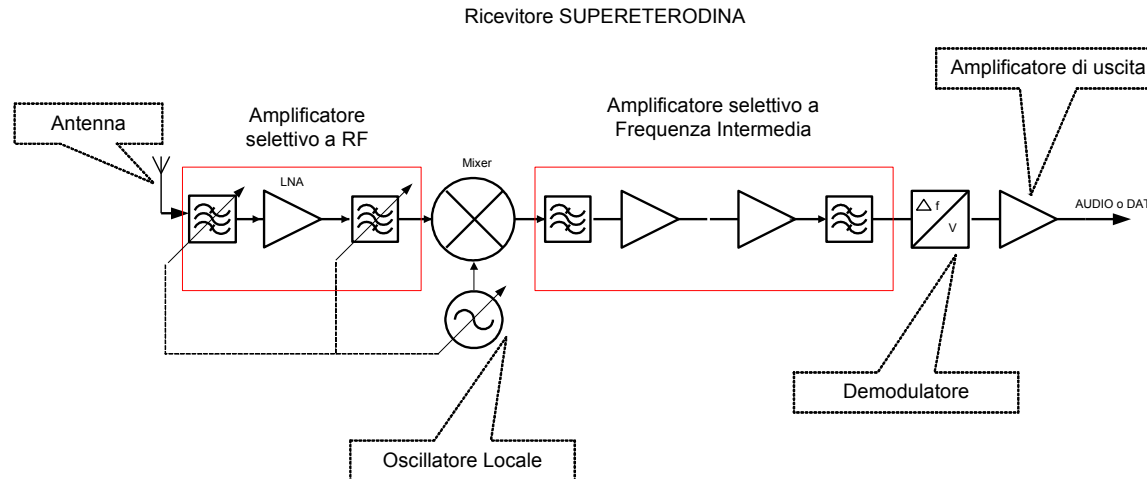
Il nome di **eterodina** fu inventato da **Fessenden** (scienziato canadese, circa 1900), dal greco **heteros** = differente e da **dynamis** = potenza.

Con l'invenzione del triodo, - **de Forest (1913)** - si cominciarono ad usare i ricevitori ad **amplificazione diretta**, ma avevano dei limiti nella selettività.



Il ricevitore supereterodina

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**.



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,...).

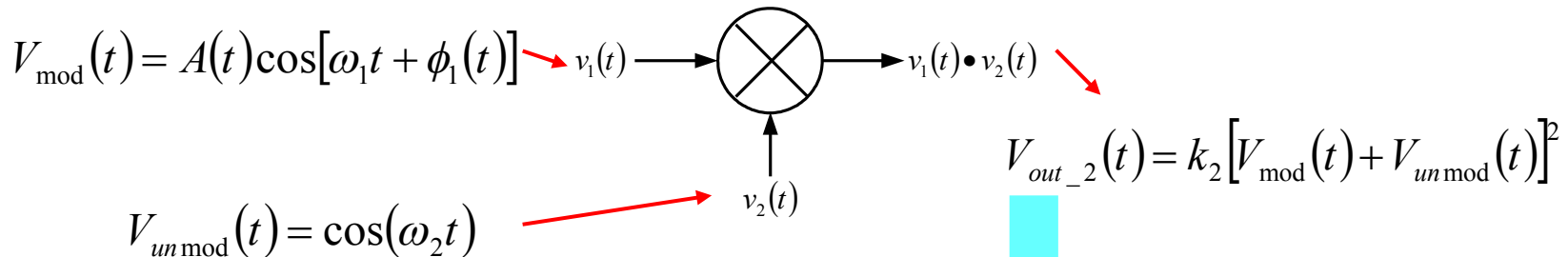
Uno degli svantaggi è che la frequenza generata dall'oscillatore locale può raggiungere l'antenna ed essere irradiata come portante indesiderata.

La conversione del 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

$$V_{out_2}(t) = k_2 V_{in}^2(t)$$

Mixer non lineare



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

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

Vengono conservate le informazioni contenute nella modulazione

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

Questi due sono i segnali desiderati

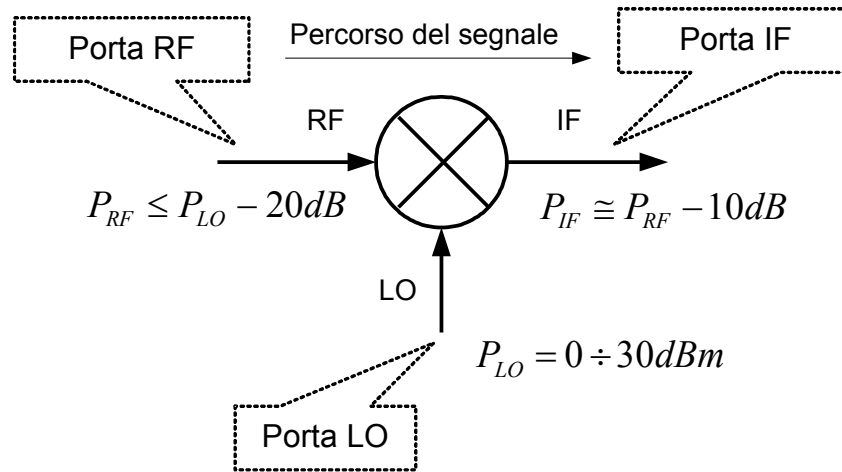
Le caratteristiche del mixer

Le principali caratteristiche di un mixer sono:

- La gamma di frequenza di funzionamento,
- Il guadagno, può essere anche negativo nel qual caso 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,
- Gli aspetti ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni....),
- Il costo.

Le caratteristiche del mixer

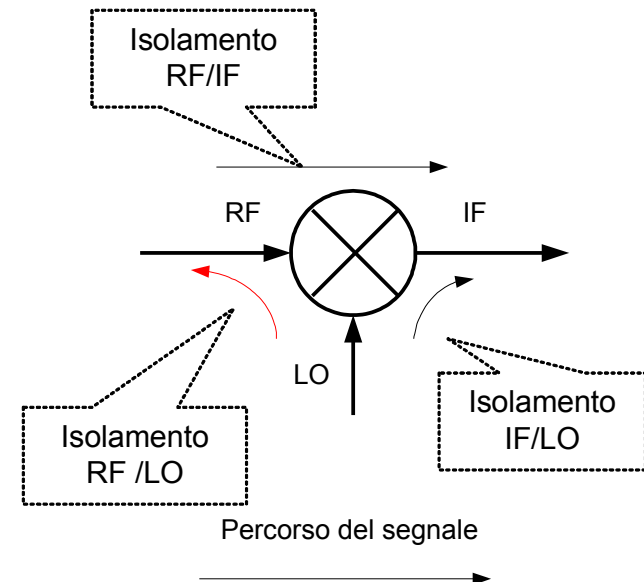
Il guadagno, la perdita di conversione



$$CL_{SUM} = \frac{P_{IF_SUM}}{P_{RF}}$$

$$CL_{DIFF} = \frac{P_{IF_DIFF}}{P_{RF}}$$

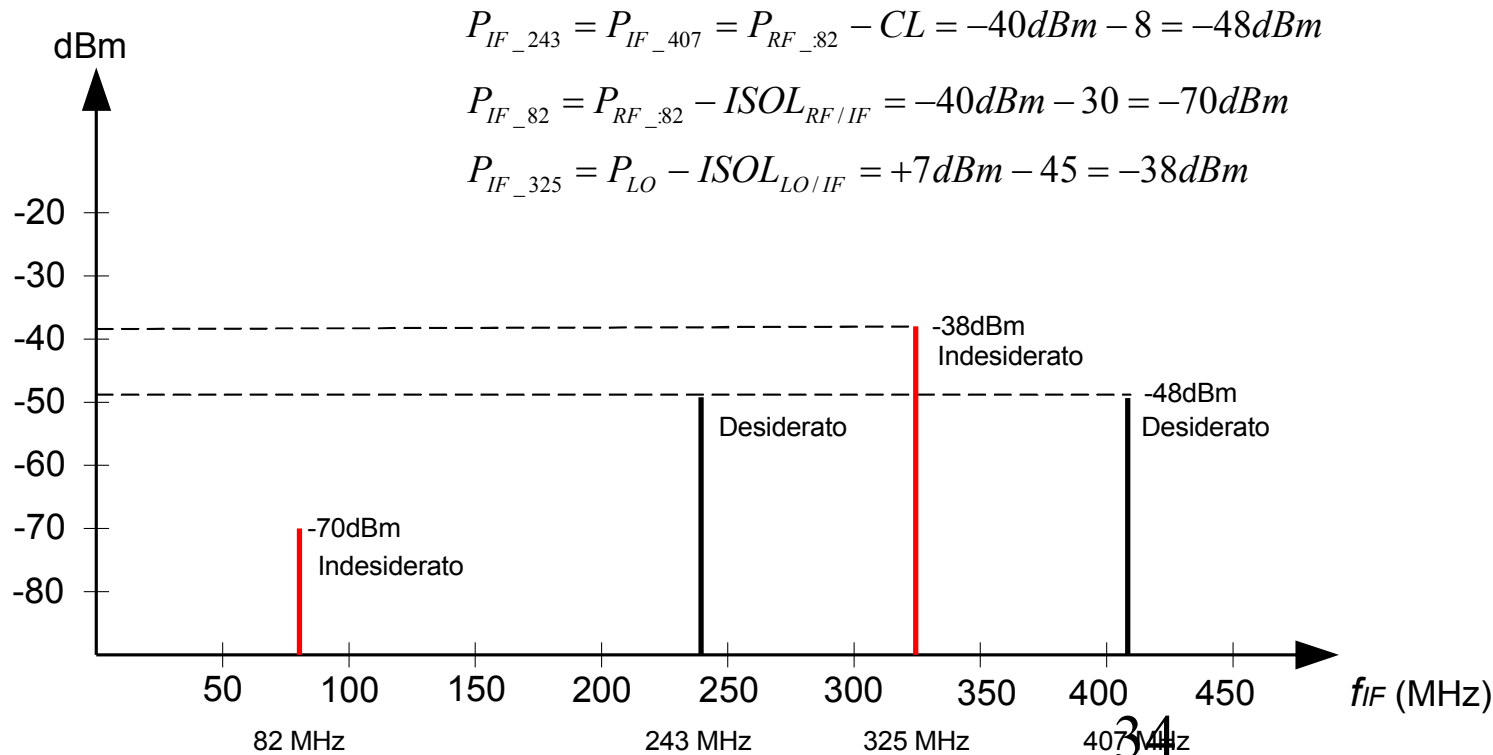
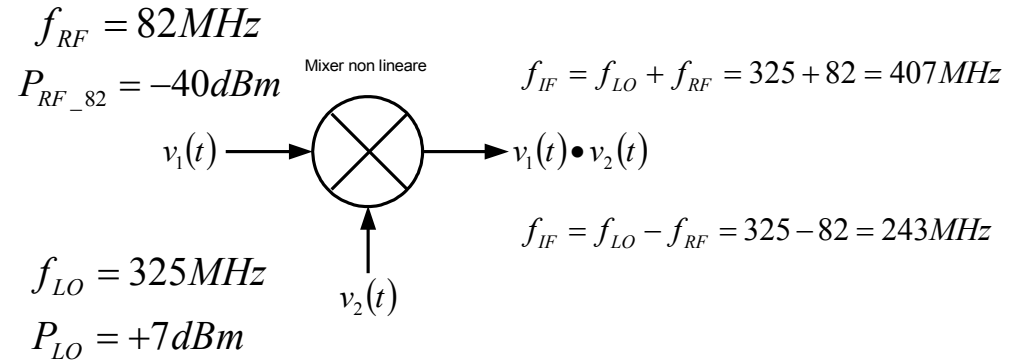
L'isolamento fra le porte



Le caratteristiche del mixer - Esempio

Si consideri un mixer con le seguenti caratteristiche:

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

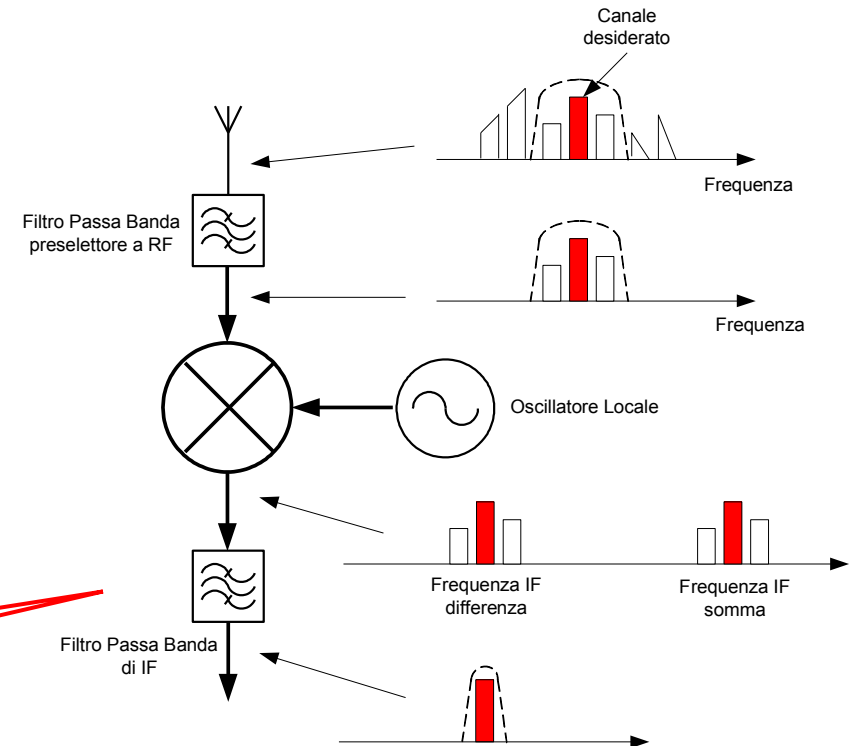


I filtri della supereterodina

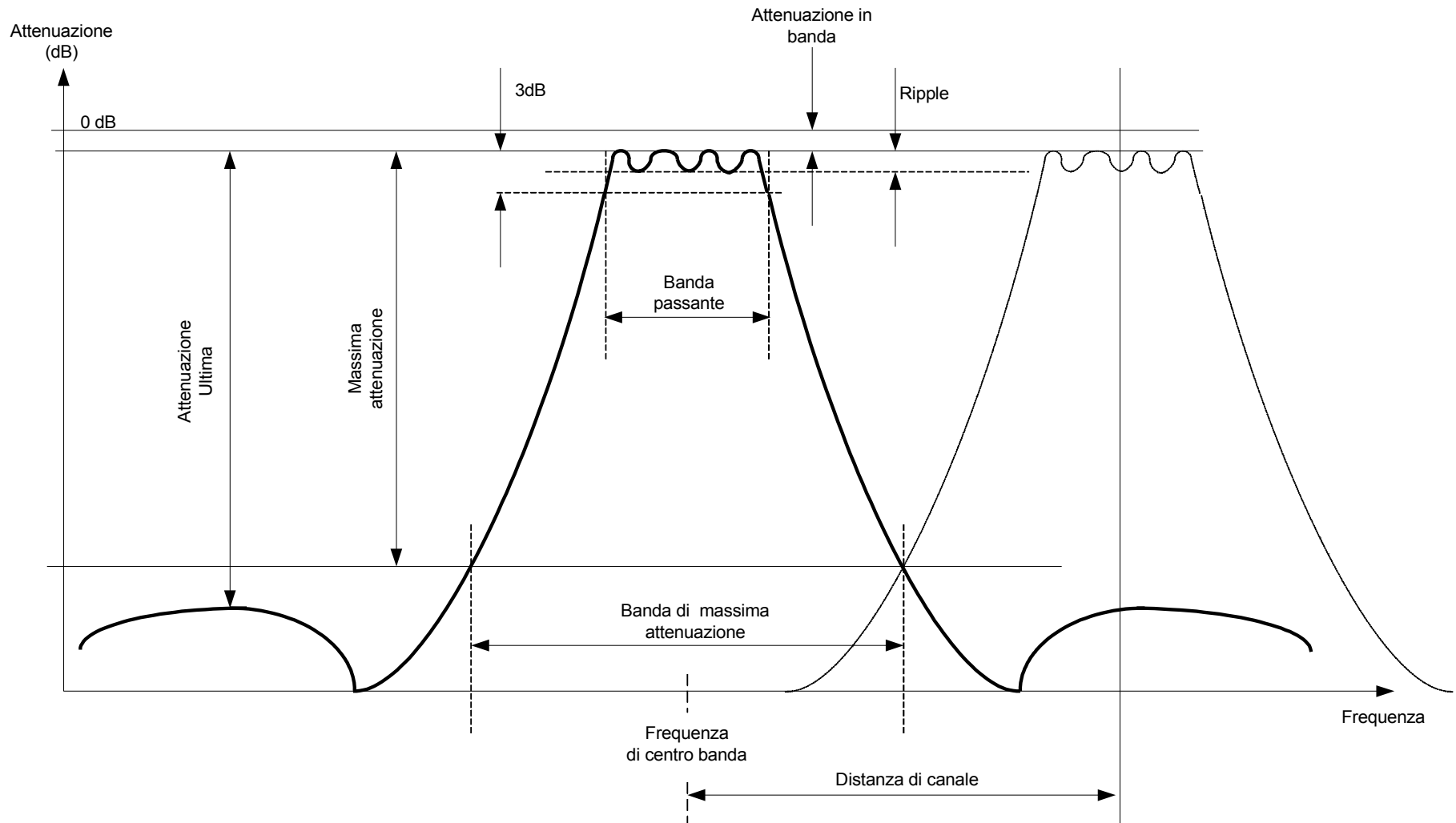
Il filtro di ingresso (preselettore) serve a :

- limitare la banda,
- ad attenuare la frequenza immagine,
- ad attenuare i prodotti di intermodulazione di SO.

Il filtro di frequenza intermedia definisce la selettività (statica) del ricevitore.



I filtri della supereterodina



I filtri della supereterodina

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

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

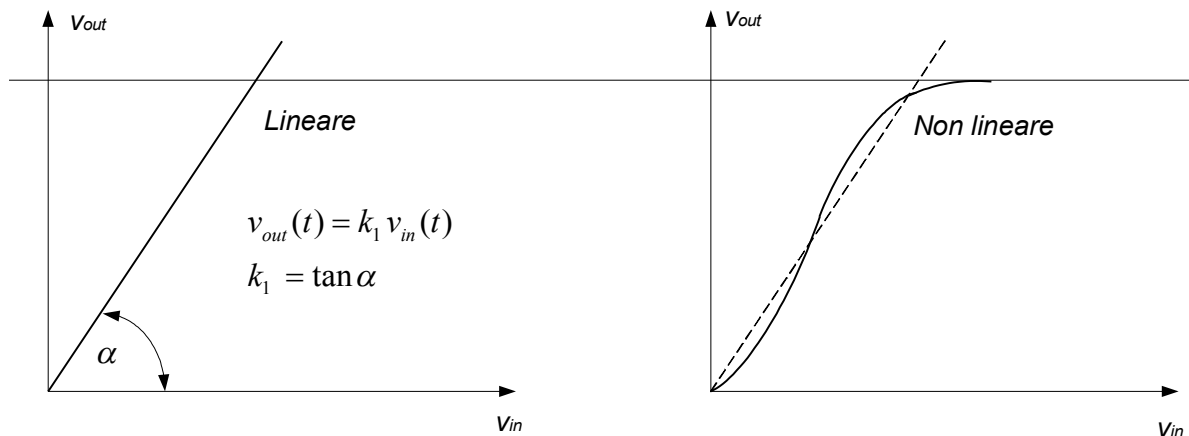
Le sue caratteristiche principali sono:

- La gamma di frequenza di funzionamento
- Il guadagno, che può essere anche variabile e in questo caso va definita la gamma di variazione
- La 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 di polarizzazione necessario
- La tensione di alimentazione
- L'assorbimento di corrente
- Le sue dimensioni fisiche, il tipo di connessione
- Gli aspetti ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni....)
- Il costo

L'amplificatore a basso rumore, LNA

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

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



Se l'amplificatore non è perfettamente lineare la sua caratteristica di trasferimento non è più esprimibile con una semplice legge lineare, ma diventa:

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

L'oscillatore locale

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 sulle OM, da 540 kHz a 1600 kHz, con un valore tipico di IF = 455 kHz, l'oscillatore dovrà lavorare nella gamma da 955 kHz a 2055 kHz oppure nella gamma da 85 kHz a 1145 kHz .

In genere gli oscillatori vengono sintonizzati variando uno dei due elementi del loro circuito risonante LC, di solito si agisce sulla C.

$$f_{\min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\max}}}$$

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\min}}}$$

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

$$f_{LO} > f_{RF} \quad \rightarrow \quad \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{2055}{995} \right)^2 = 4,27$$

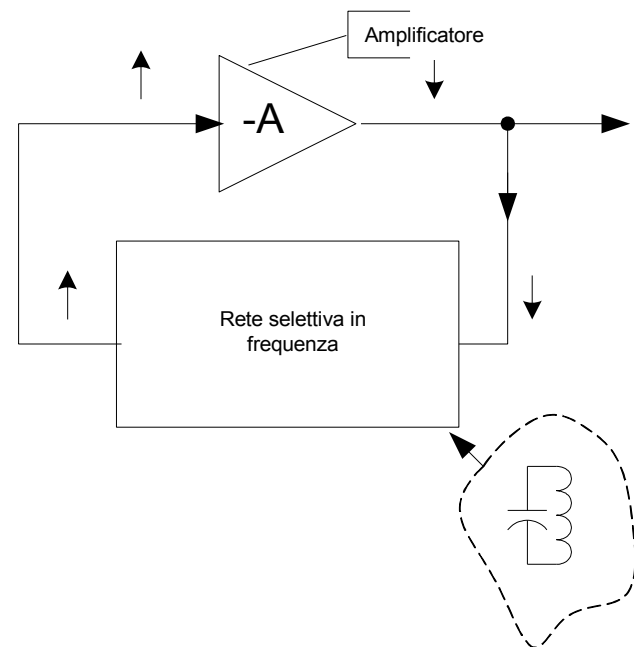
$$f_{LO} < f_{RF} \quad \rightarrow \quad \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{1145}{85} \right)^2 = 181,46$$

Valore
difficile da
ottenere

L'oscillatore locale

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. Sono molto stabili.

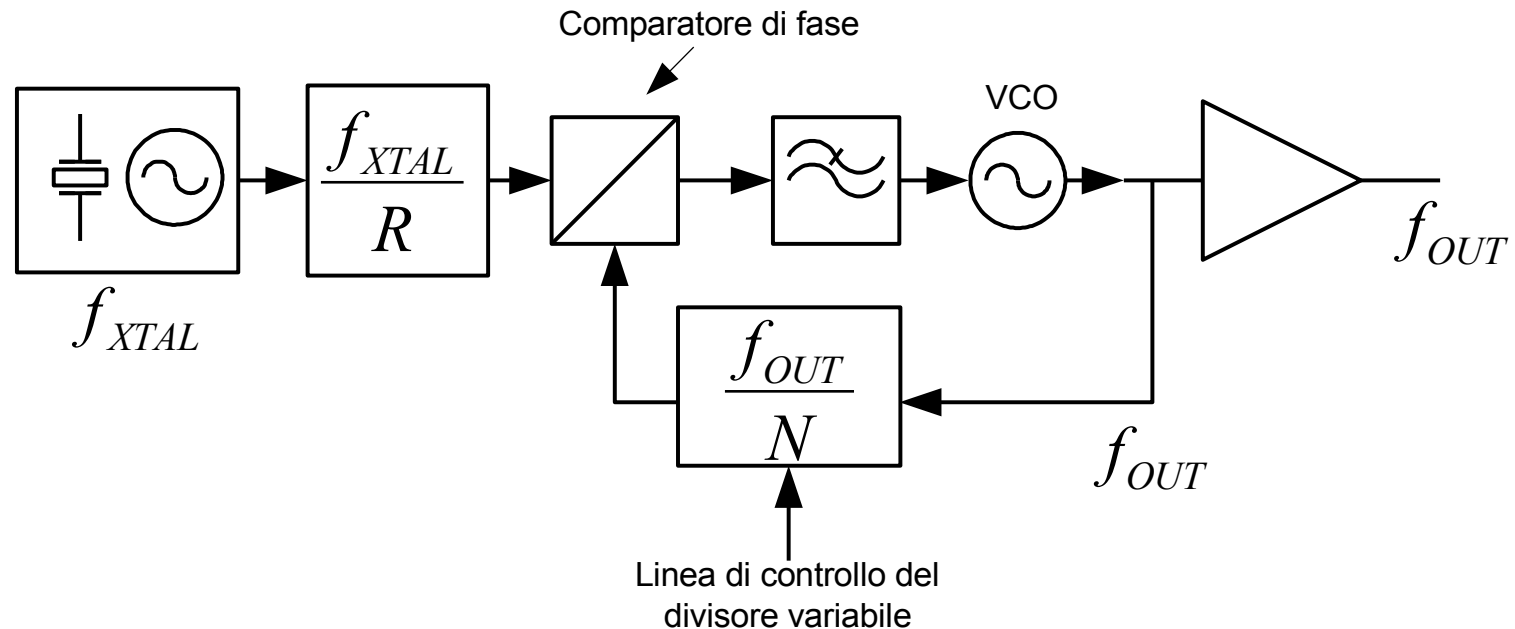


Gli oscillatori **variabili** possono essere realizzati come gli oscillatori liberi, ma la loro frequenza si può variare con continuità agendo **meccanicamente** su uno dei due elementi che costituiscono il circuito risonante (L o C). Sono poco stabili.

L'oscillatore locale

Un modo per realizzare degli oscillatori variabili stabili è quello di costruire dei **sintetizzatori di frequenza**.

Uno dei sistemi più usati è l'Anello ad Aggancio di Fase (Phase Locked Loop, PLL).



Le caratteristiche dell'oscillatore locale

Le caratteristiche principali di un oscillatore sono:

- La frequenza di oscillazione, o la **gamma di frequenza di oscillazione**.
- 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.

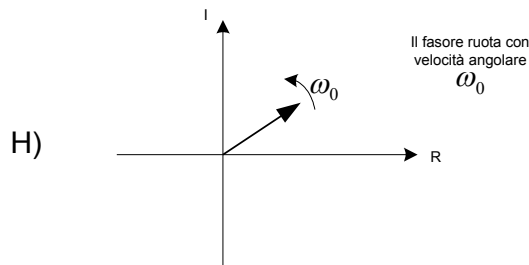
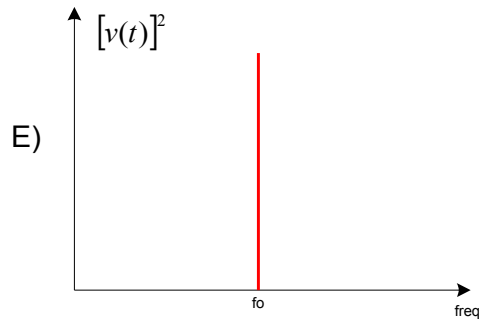
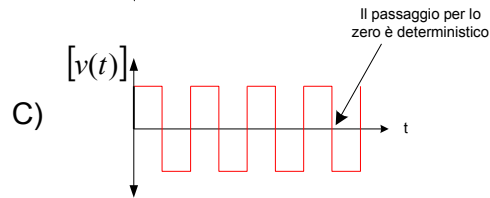
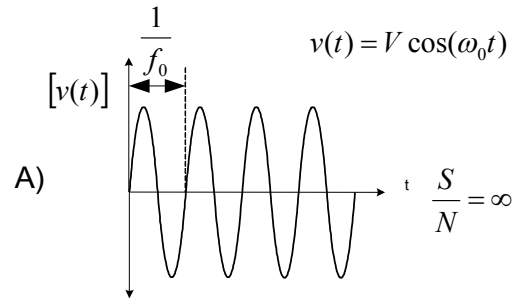
$$f_{range} = f_0 \pm \left(\frac{\Delta_{in_ppM}}{10^6} \cdot f_0 \right)$$

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

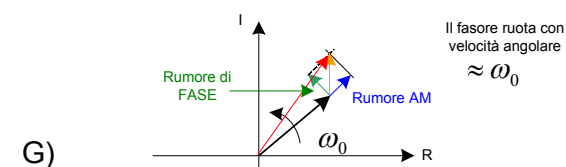
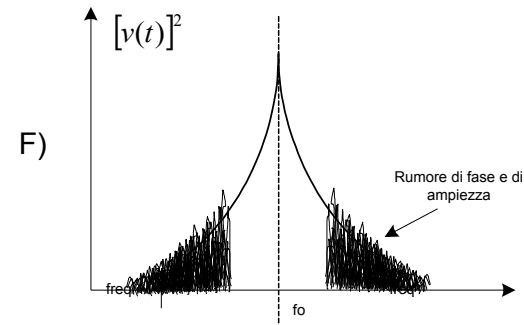
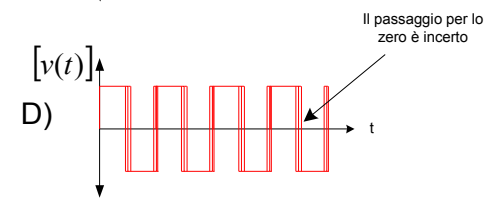
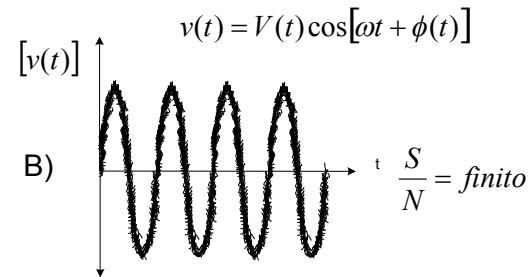
Le caratteristiche dell'oscillatore locale

La purezza spettrale

Oscillatore ideale



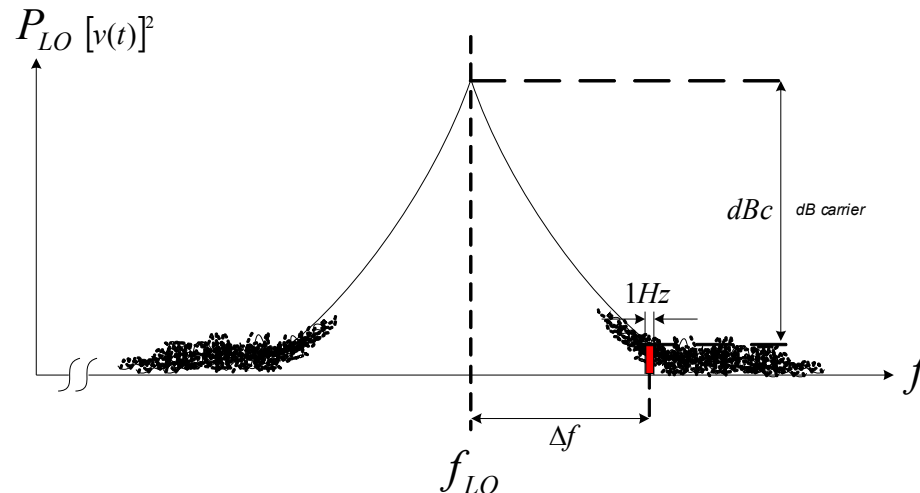
Oscillatore non ideale



Le caratteristiche dell'oscillatore locale

La purezza spettrale

Lo spettro di un oscillatore si presenta (visto con l'analizzatore di spettro) come in figura.



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**.

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

dove $dBc = dB \text{ carrier}$. (*carrier = portante, dalla modulazione*)

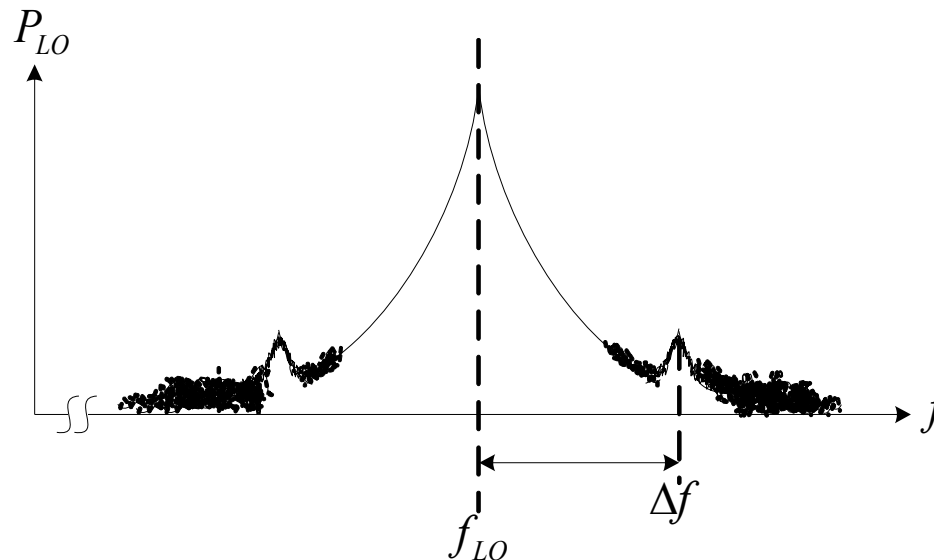
Le caratteristiche dell'oscillatore locale

La purezza spettrale

Oltre al rumore lo spettro di un oscillatore può contenere dei segnali spuri sia in vicinanza della fondamentale sia come armoniche .

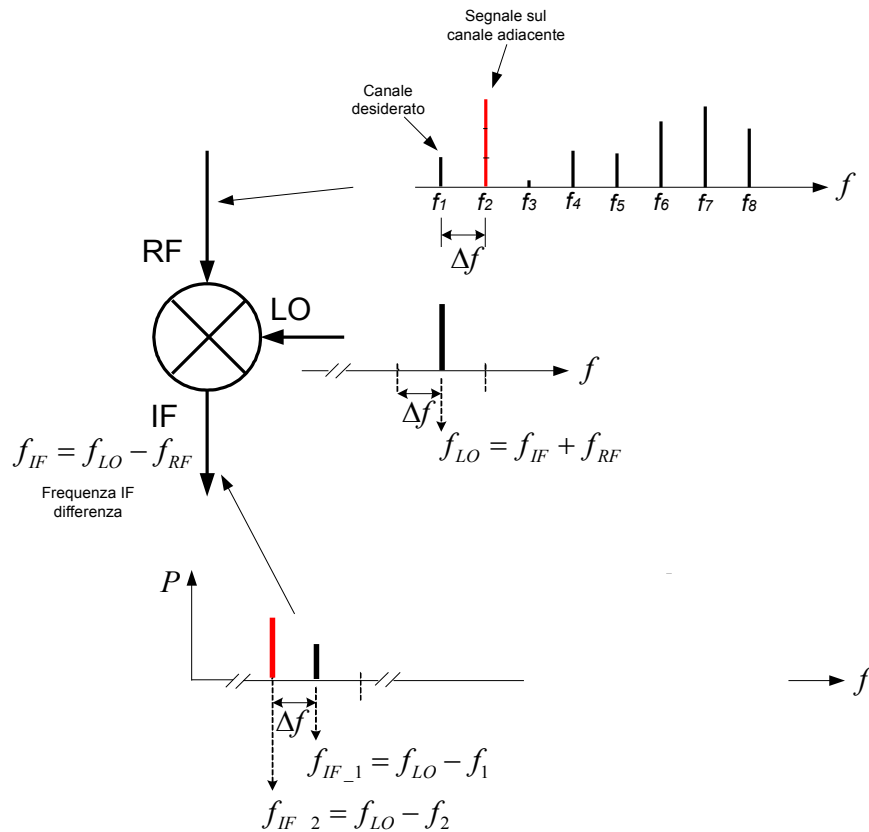
I segnali spuri in vicinanza della fondamentale sono generalmente simmetrici e sono il risultato di modulazioni spurie sia AM che FM.

La loro attenuazione si misura facendo riferimento al livello di potenza complessivo della fondamentale.

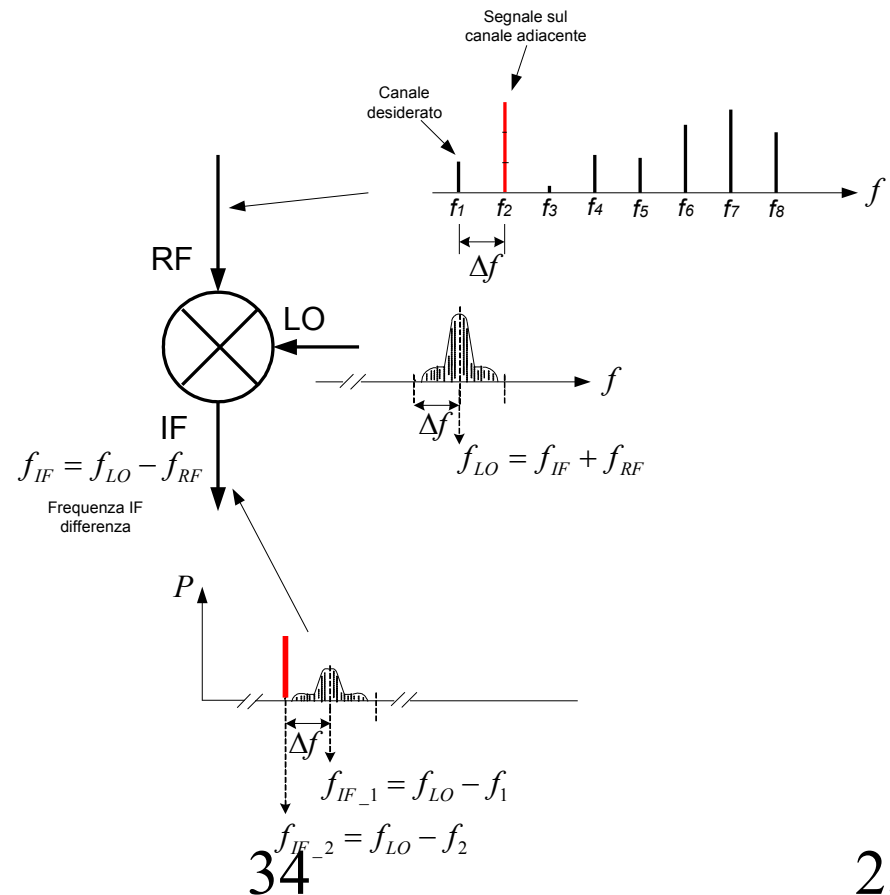


Effetto del rumore dell'oscillatore locale sulla selettività del ricevitore

LO ideale



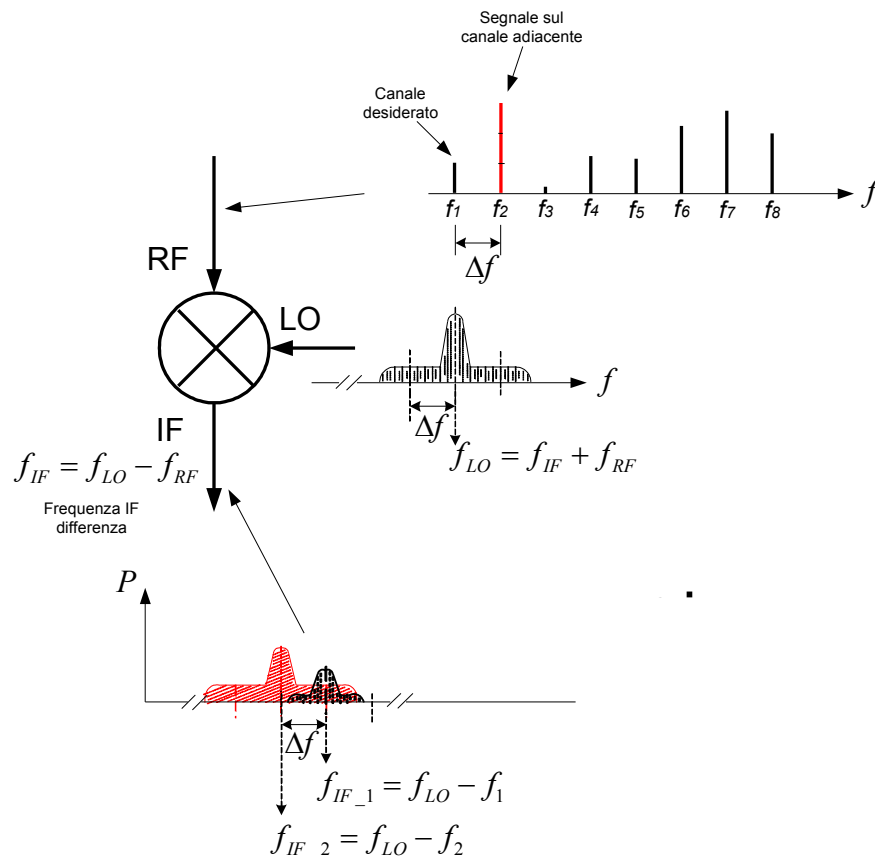
LO modulato dal rumore



Le caratteristiche dell'oscillatore locale

La purezza spettrale

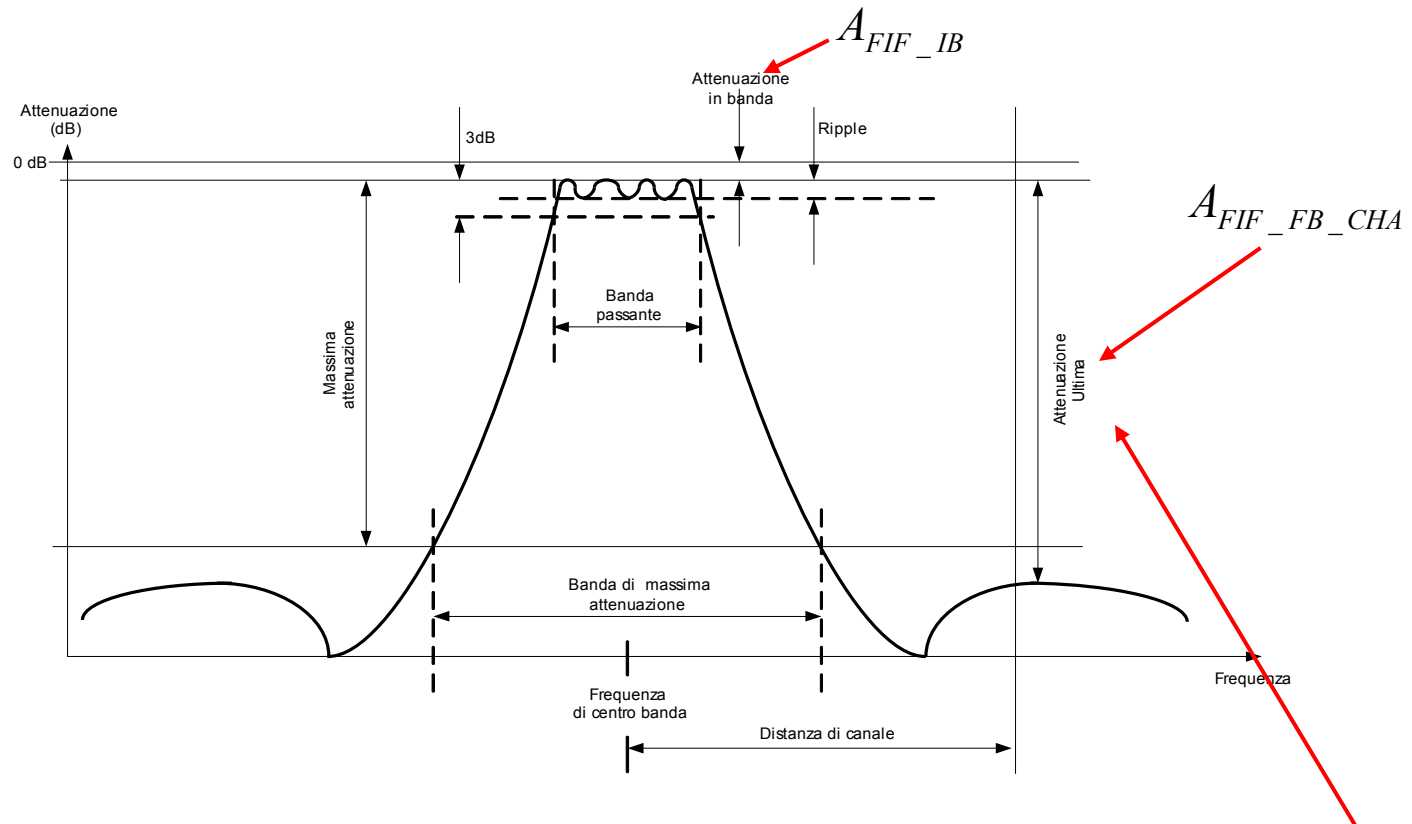
Effetto del rumore dell'oscillatore locale sulla selettività del ricevitore. La banda del rumore dell'oscillatore locale supera la larghezza di canale.



La selettività complessiva del ricevitore sarà stabilita dalla selettività del filtro a frequenza intermedia e dal livello di rumore che l'oscillatore presenta sul canale adiacente.

Il filtro a frequenza intermedia

Determina la selettività sul canale adiacente del ricevitore. È un filtro passa banda con una banda passante larga quanto basta per contenere lo spettro del segnale modulato che si deve ricevere.



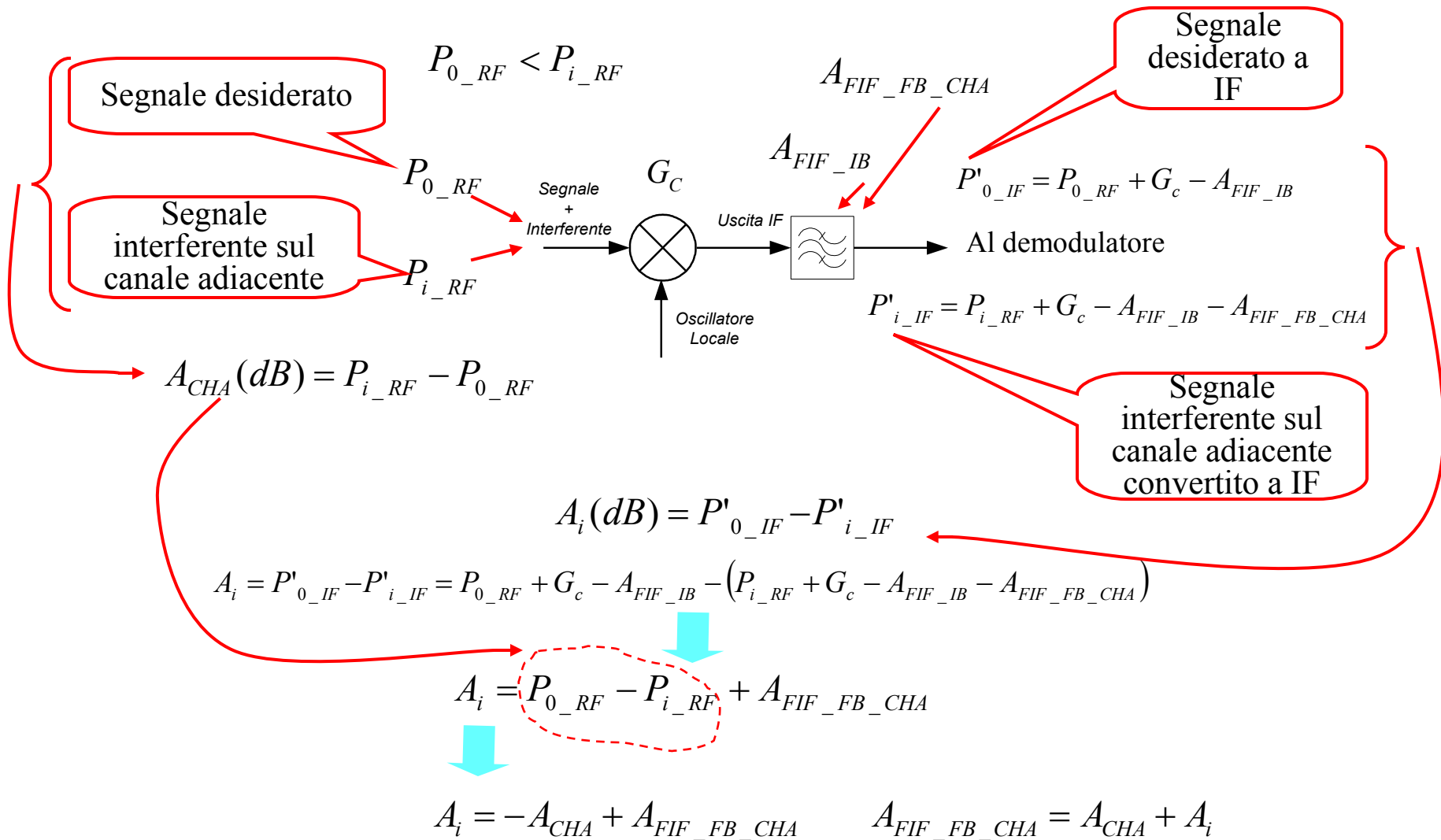
La sua attenuazione ultima alla distanza di canale determina l'attenuazione al canale adiacente.

Il filtro a frequenza intermedia

Le principali caratteristiche di un filtro di media frequenza sono:

- La frequenza di centro banda,
- La banda passante, (misurata a 3 dB),
- L'attenuazione in banda, (deve essere più piccola possibile,)
- L'attenuazione massima sul canale adiacente,
- L'attenuazione ultima o meglio l'attenuazione alla frequenza della frequenza, immagine, (solo per i ricevitori con doppia conversione di frequenza),
- Il fattore di forma,
- L'impedenza di ingresso e di uscita.
- La tecnologia con cui è stato costruito o deve esserlo,
- Le sue dimensioni fisiche, il tipo di connessione,
- Gli aspetti ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni....),
- Il costo.

Il filtro a frequenza intermedia



Il filtro a frequenza intermedia

Esempio 1

Le specifiche di sistema impongono che

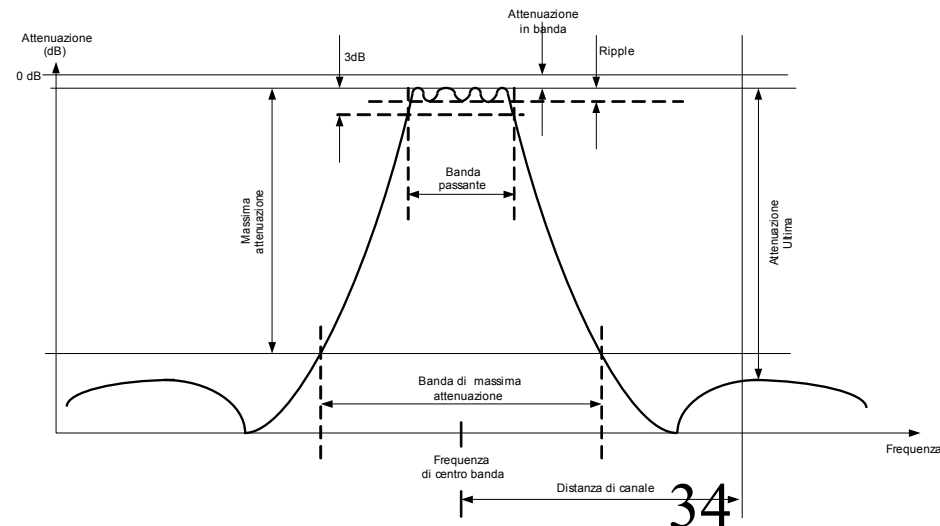
$$A_{CHA} = P_{i_RF} - P_{0_RF} = 30dB$$

e che il demodulatore per funzionare correttamente ha bisogno al suo ingresso di un rapporto segnale utile segnale interferente di

$$A_i = 40dB$$

il valore minimo di attenuazione fuori banda a distanza di canale sarà dato da

$$A_{FIF_FB_CHA} = A_{CHA} + A_i \quad A_{FIF_FB_CHA} = 30 + 40 = 70dB$$

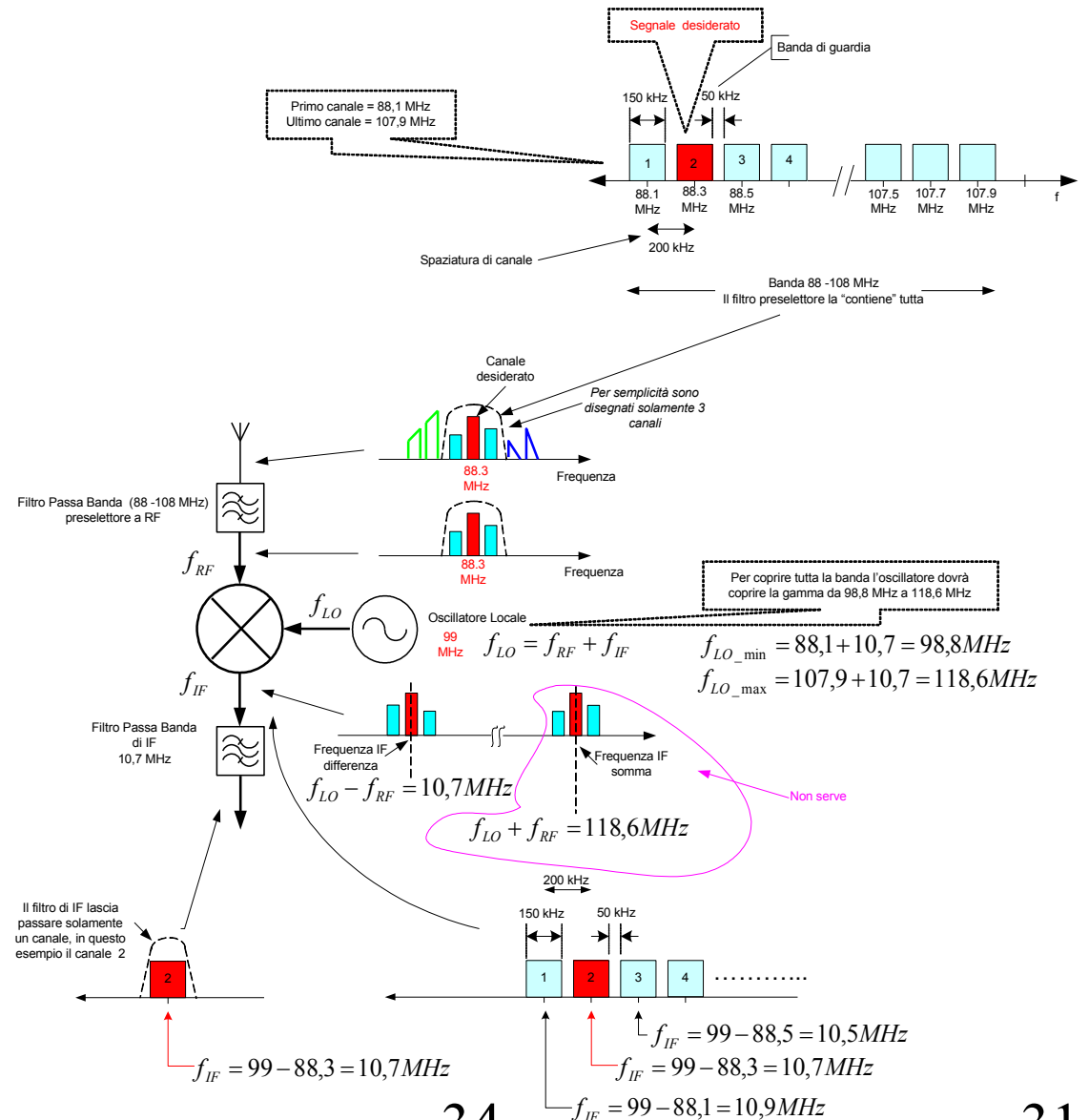


Il filtro a frequenza intermedia

Esempio 2

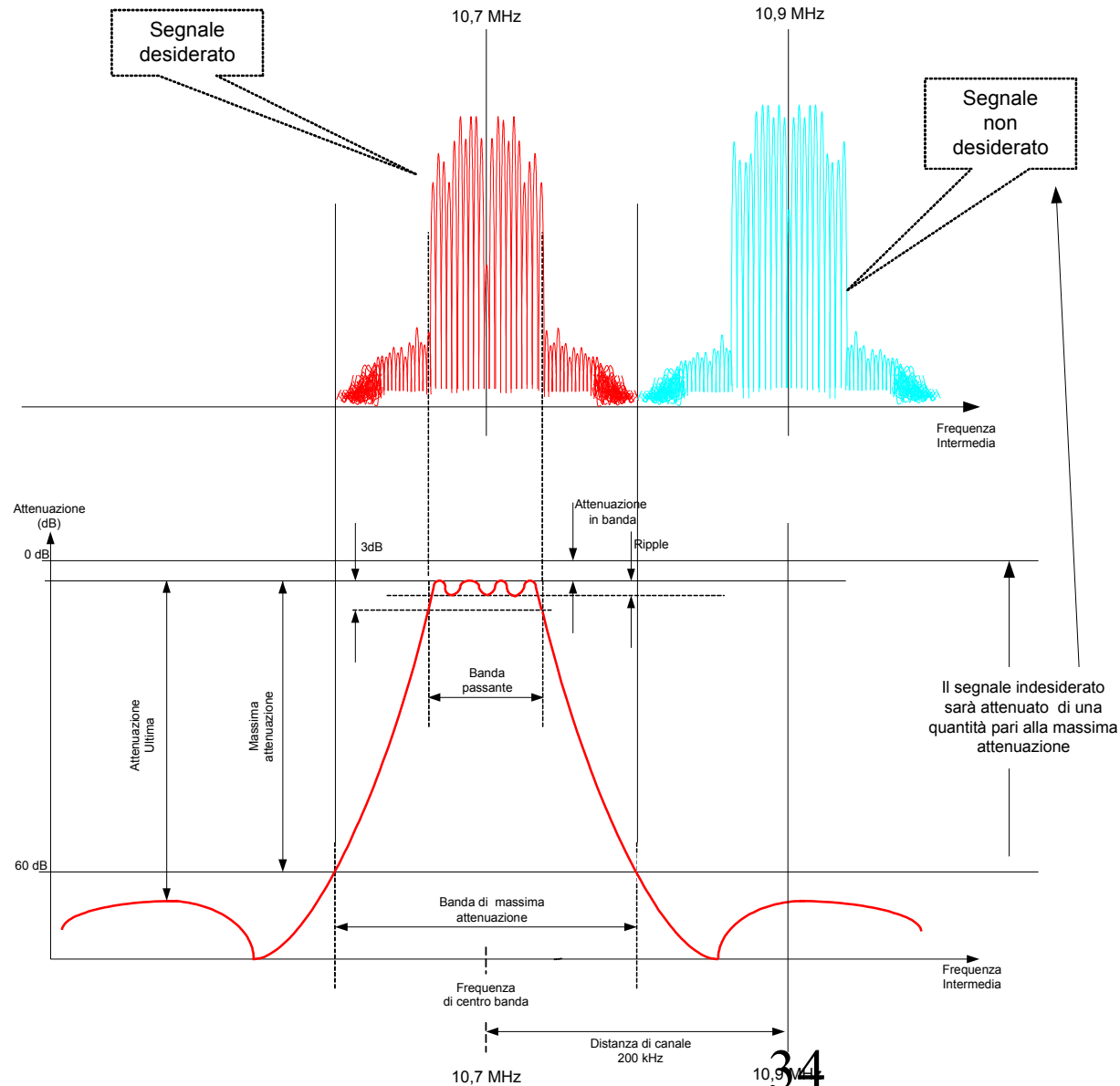
Si prende in considerazione un ricevitore per la banda VHF di radio diffusione a FM.

Il disegno mostra il meccanismo di conversione su tre canali adiacenti



Il filtro a frequenza intermedia

Esempio 2



Il filtro a frequenza intermedia

Esempio 2

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

$$f_{IF} = 10,7 \text{ MHz} \quad A_{FIF_IB} = 2 \text{ dB} \quad A_{FIF_FB_CHA200} = 70 \text{ dB}$$

Il mixer ha un guadagno di conversione di $G_C = -6 \text{ dB}$

L'LO è considerato ideale ed sintonizzato su $f_{LO} = 99 \text{ MHz}$

Il segnale utile è $P_{0_RF} = -50 \text{ dBm}$ $f_{0_RF} = 88,3 \text{ MHz}$

Il segnale indesiderato $P_{i_RF} = -30 \text{ dBm}$ $f_{i_RF} = 88,1 \text{ MHz}$

All'uscita del mixer si avrà

$$P_{0_IF} = P_{0_RF} + G_C = -50 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = -56 \text{ dBm} \quad f_{0_IF} = f_{LO} - f_{0_RF} = 99 - 88,3 = 10,7 \text{ MHz}$$

$$P_{i_IF} = P_{i_RF} + G_C = -30 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = -36 \text{ dBm} \quad f_{i_IF} = f_{LO} - f_{i_RF} = 99 - 88,1 = 10,9 \text{ MHz}$$

All'uscita del filtro

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

$$P'_{i_IF} = P_{i_IF} - A_{B_IF} - A_{U_IF_200} = -36 \text{ dBm} - 2 \text{ dB} - 70 \text{ dB} = -108 \text{ dBm} \quad f_{i_IF} = 10,9 \text{ MHz}$$

$$A_i = P'_{0_IF} - P'_{i_IF} = -56 \text{ dBm} - (-108) \text{ dB} = 50 \text{ dB}$$

Il rapporto C/I

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

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

Segnale **utile**
applicato
all'ingresso del
demodulatore

Segnale **interferente**
applicato all'ingresso
del demodulatore

Per demodulare **correttamente il segnale utile** in modo da fornire all'uscita del ricevitore un segnale con il rapporto S/N oppure con il BER specificati è necessario che al demodulatore venga fornito un segnale il cui **rapporto fra segnale utile e segnale interferente** sia entro un limite specificato.

Questo rapporto viene solitamente indicato con

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

Potenza del
segnale utile

Potenza del
segnale
interferente