
Rivelazione

Rivelare la presenza del segnale utile

Esempi di rivelazione della presenza del segnale

- **Radar:** rivelazione della presenza di segnale al tempo t_0 ,
→ presenza del bersaglio che lo ha riflesso a distanza $R_0 = c t_0/2$
- **Sistema di localizzazione:** rivelazione della presenza di segnale al tempo t_0 ,
→ presenza del segnale emesso da un punto di riferimento
- **WiFi:** rivelazione della presenza del segnale di beacon
→ inizializzazione della connessione fra dispositivo e router

Teoria della decisione (I)

Rivelazione \Rightarrow esempio di decisione binaria: il radar deve decidere tra **due ipotesi**:

- **segnale utile assente**: segnale ricevuto \equiv solo disturbo (\mathbf{H}_0);
- **segnale utile presente**: segnale ricevuto \equiv segnale utile più disturbo (\mathbf{H}_1);



Prob. di rivelazione, falso allarme e miss

Si prende una decisione sulla base delle osservazioni.

In questo caso, l'osservazione è costituita dal campione dell'involuppo complesso all'istante t_0 per cui si vuole rivelare la presenza del segnale:

$$\tilde{r} = \tilde{r}(t_0)$$

Decisione \rightarrow	H_0	H_1
Situazione reale		
M_0	Corretta rivelazione dell'assenza del segnale (probabilità $1-P_{fa}$)	Falso Allarme (P_{fa} = probabilità di falso allarme)
M_1	Miss ($P_{miss} = 1 - P_d$ probabilità di miss)	Corretta Rivelazione (P_d = probabilità di rivelazione)

Teoria della decisione (II)

Nella decisione binaria si possono commettere due diversi tipi di errore:

- errore di **falso allarme**: è vera l'ipotesi H_0 ma si decide per l'ipotesi $H_1 \Rightarrow$ il disturbo viene riconosciuto come segnale utile: fissata la regola di decisione la probabilità di falso allarme (P_{fa}) è data da

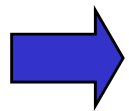
$$P_{fa} = \int_{\Omega_1} p(\tilde{r} / M_0) d\tilde{r}$$

**PROBABILITA'
DI FALSO
ALLARME**

- errore di **mancata rivelazione**: è vera l'ipotesi H_1 ma si decide per l'ipotesi $H_0 \Rightarrow$ il segnale utile viene riconosciuto come disturbo: fissata la regola di decisione la probabilità di mancata rivelazione ($1-P_d$) è data da

$$1 - P_d = \int_{\Omega_0} p(\tilde{r} / M_1) d\tilde{r}$$

**PROBABILITA' DI
MANCATA
RIVELAZIONE**



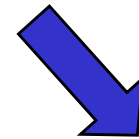
La partizione $\{\Omega_0, \Omega_1\}$ dello spazio delle osservazioni Ω dipende dal criterio di decisione adottato: **il criterio di decisione usato è il criterio di Neyman-Pearson.**

Teoria della decisione (III)

Nel criterio di decisione di Neyman-Pearson la partizione è individuata in modo tale che:

- ▶ la probabilità di falso allarme sia pari ad un valore costante preassegnato ($P_{fa} = \alpha_0$) \Rightarrow **condizione CFAR: Constant False Alarm Rate**;
- ▶ la probabilità di mancata rivelazione sia minimizzata ovvero sia massimizzata la probabilità di rivelazione (P_d max);

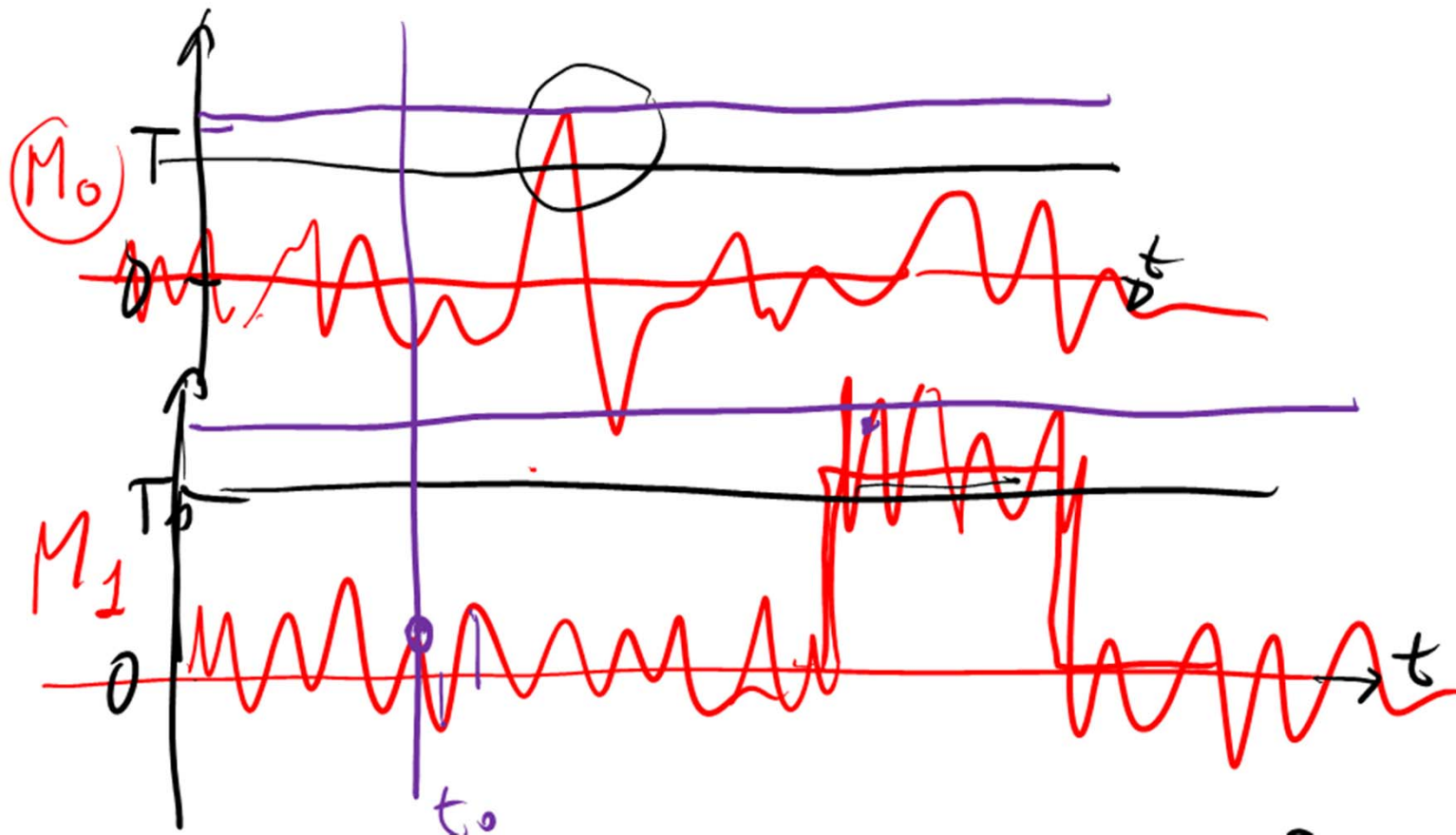
$$\left. \begin{array}{l} \{\Omega_0, \Omega_1\} \\ \text{tale che} \end{array} \right\} \begin{cases} P_{fa} = \int_{\Omega_1} p(\tilde{r} / M_0) d\tilde{r} = \alpha_0 \\ P_d = \int_{\Omega_1} p(\tilde{r} / M_1) d\tilde{r} \quad \textit{massima} \end{cases}$$



Problema di massimizzazione vincolata \Rightarrow problema risolvibile con i moltiplicatori di Lagrange.

Decisore a soglia sul modulo

- Criterio di decisione:*
- decido per H_1 se $r = |\tilde{r}| > T$
 - decido per H_0 se $r = |\tilde{r}| < T$



Prestazioni di rivelazione

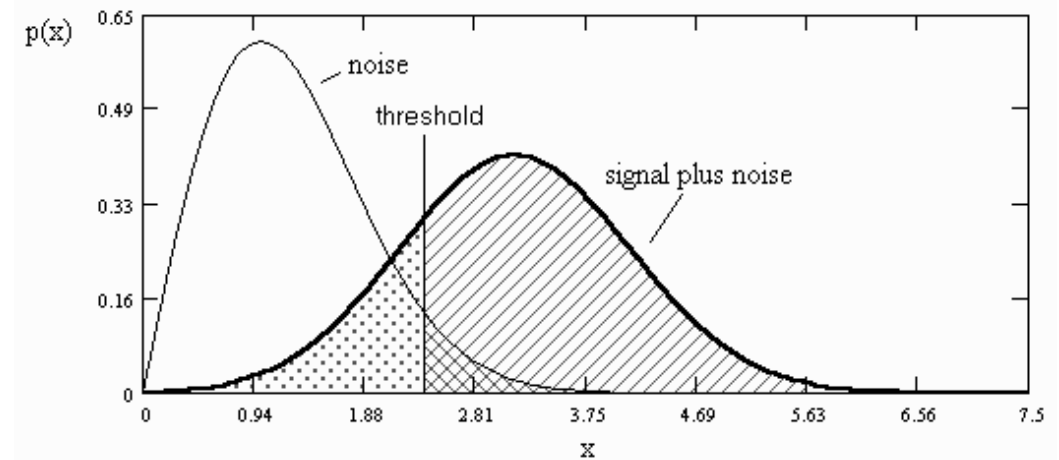
Probabilità di superare la soglia:

$$\text{Prob}\{r > T\} = \int_T^{\infty} p_r(r) dr$$

Quindi:

$$P_{fa} = \text{Prob}\{r > T \mid H_0\} = \int_T^{\infty} p_r(r \mid M_0) dr$$

$$P_d = \text{Prob}\{r > T \mid H_1\} = \int_T^{\infty} p_r(r \mid M_1) dr$$



Ipotesi H_0 (M_0)

$$H_0: \quad \tilde{r} = r_I + j r_Q = \tilde{n} = n_I + j n_Q$$

disturbo \tilde{n} = variabile aleatoria Gaussiana complessa con

valor medio = 0

varianza σ_d^2

r_I e r_Q sono variabili Gaussianhe reali con

valor medio = 0

varianza $\sigma_n^2 = \sigma_d^2 / 2$

$$p(r_I, r_Q | H_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_d} \exp\left\{-\frac{r_I^2}{\sigma_d^2}\right\} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_d} \exp\left\{-\frac{r_Q^2}{\sigma_d^2}\right\} = \frac{1}{\pi \sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{r_I^2 + r_Q^2}{\sigma_d^2}\right\}$$

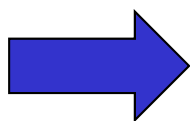
Richiamo DDP Rayleigh

$$p(\tilde{r} | H_0) = \frac{1}{\pi \sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_d^2} |\tilde{r}|^2\right\} \quad \begin{cases} r = |\tilde{r}| = \sqrt{r_I^2 + r_Q^2} \\ \phi = \angle \tilde{r} = \text{arctg}(r_Q / r_I) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} r_I = r \cdot \cos \phi \\ r_Q = r \cdot \sin \phi \end{cases}$$

$$p_{\tilde{r}}(\tilde{r} | H_0) d\tilde{r} = p_{r_I, r_Q}(r_I, r_Q | H_0) dr_I dr_Q = \quad d\tilde{r} = dr_I dr_Q = r dr d\phi$$

$$= p_{r_I, r_Q}(r \cdot \cos \phi, r \cdot \sin \phi | H_0) \cdot r dr d\phi = p_{r, \phi}(r, \phi | H_0) dr d\phi$$

$$p_{r, \phi}(r, \phi | H_0) = p_{r_I, r_Q}(r \cdot \cos \phi, r \cdot \sin \phi | H_0) \cdot r$$



$$p_{r, \phi}(r, \phi | H_0) = \frac{r}{\pi \sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_d^2} r^2\right\}$$

DDP Rayleigh

$$p_r(r | H_0) = \int_0^{2\pi} p_{r, \phi}(r, \phi | H_0) d\phi = \int_0^{2\pi} \frac{r}{\pi \sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_d^2} r^2\right\} d\phi = \frac{2r}{\sigma_d^2} e^{-\frac{r^2}{\sigma_d^2}}$$

Probabilità di falso allarme – soglia fissa

Sotto l'ipotesi H_0 ($a=0$) ho un Falso Allarme se $r = |\tilde{r}| > T$

$$p_r(r | H_0) = \frac{2r}{\sigma_d^2} e^{-\frac{r^2}{\sigma_d^2}}$$

$$\text{Prob}\{r > T | H_0\} = \int_T^{\infty} p_r(r | H_0) dr = \int_T^{\infty} \frac{2r}{\sigma_d^2} e^{-\frac{r^2}{\sigma_d^2}} dr = \int_{T^2/\sigma_d^2}^{\infty} e^{-t} dt = \left[-e^{-t}\right]_{T^2/\sigma_d^2}^{\infty} = e^{-\frac{T^2}{\sigma_d^2}}$$

$$P_{fa} = \text{Prob}\{r > T | H_0\} = \int_T^{\infty} p_r(r | H_0) dr = e^{-\frac{T^2}{\sigma_d^2}}$$

Probabilità di falso allarme P_{fa}

$$P_{fa} = \int_T^{\infty} p_r(r / M_0) dr = \int_T^{\infty} \frac{r}{\sigma_n^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_n^2}} dr = e^{-\frac{T^2}{2\sigma_n^2}}$$

Il livello di falso allarme dipende dalla soglia T e dalla potenza del rumore σ_n^2 : (disturbo $\sigma_n^2 = \sigma_d^2/2$) fissato il valore di P_{fa} desiderata e nota la potenza di rumore σ_n^2 risulta individuato il livello di soglia T .



$$T = \sigma_n \sqrt{2 \ln \left(\frac{1}{P_{fa}} \right)}$$

Ipotesi H_1 (M_1)

$$H_1: \quad \tilde{r} = r_I + j r_Q = \tilde{a} + \tilde{n} = a_I + n_I + j(a_Q + n_Q)$$

disturbo \tilde{n} = variabile aleatoria Gaussiana complessa con

valor medio = \tilde{a}

varianza σ_d^2

r_I e r_Q sono variabili Gaussiane reali con

valor medio = a_I e a_Q

varianza $\sigma_n^2 = \sigma_d^2 / 2$

$$p(r_I, r_Q | H_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_d} \exp\left\{-\frac{(r_I - a_I)^2}{\sigma_d^2}\right\} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_d} \exp\left\{-\frac{(r_Q - a_Q)^2}{\sigma_d^2}\right\} = \frac{1}{\pi \sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{(r_I - a_I)^2 + (r_Q - a_Q)^2}{\sigma_d^2}\right\}$$

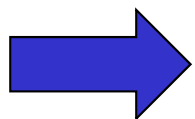
Richiamo DDP Rice (I)

$$p(\tilde{r} | a; H_1) = \frac{1}{\pi \sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_d^2} |\tilde{r} - a|^2 \right\} \quad \begin{cases} r = |\tilde{r}| = \sqrt{r_I^2 + r_Q^2} \\ \phi = \angle \tilde{r} = \arctg(r_Q / r_I) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} r_I = r \cdot \cos \phi \\ r_Q = r \cdot \sin \phi \end{cases}$$

$$p_{\tilde{r}}(\tilde{r} | a; H_1) d\tilde{r} = p_{r_I, r_Q}(r_I, r_Q | a; H_1) dr_I dr_Q = \quad d\tilde{r} = dr_I dr_Q = r dr d\phi$$

$$= p_{r_I, r_Q}(r \cdot \cos \phi, r \cdot \sin \phi | a; H_1) \cdot r dr d\phi = p_{r, \phi}(r, \phi | a; H_1) dr d\phi$$

$$p_{r, \phi}(r, \phi | a; H_1) = p_{r_I, r_Q}(r \cdot \cos \phi, r \cdot \sin \phi | a; H_1) \cdot r$$



$$p_{r, \phi}(r, \phi | a; H_1) = \frac{r}{\pi \sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_d^2} |r \cdot \cos \phi + j r \cdot \sin \phi - a|^2 \right\} =$$

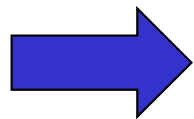
$$= \frac{r}{\pi \sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_d^2} \left[r^2 + |a|^2 - 2|a|r \cdot \cos(\phi - \angle a) \right] \right\}$$

Richiamo DDP Rice (II)

$$p_{r,\phi}(r, \phi | a; H_1) = \frac{r}{\pi \sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_d^2} \left[r^2 + |a|^2 - 2|a|r \cdot \cos(\phi - \angle a) \right] \right\}$$

$$\begin{aligned} p_r(r | a; H_1) &= \int_0^{2\pi} p_{r,\phi}(r, \phi | a; H_1) d\phi = \int_0^{2\pi} \frac{r}{\pi \sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_d^2} \left[r^2 + |a|^2 - 2|a|r \cdot \cos(\phi - \angle a) \right] \right\} d\phi = \\ &= \frac{2r}{\sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{r^2 + |a|^2}{\sigma_d^2} \right\} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp \left\{ \frac{2r|a|}{\sigma_d^2} \cdot \cos(\phi - \angle a) \right\} d\phi = \\ &= \frac{2r}{\sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{r^2 + |a|^2}{\sigma_d^2} \right\} \cdot I_0 \left[\frac{2r|a|}{\sigma_d^2} \right] \quad I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{x \cos(t)} dt \quad \left(= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cos(t)} dt \right) \end{aligned}$$

DDP Rice



$$p_r(r | \sigma; H_1) = \frac{2r}{\sigma_d^2} \exp \left\{ -\frac{r^2 + \sigma}{\sigma_d^2} \right\} \cdot I_0 \left[\frac{2r \sqrt{\sigma}}{\sigma_d^2} \right] \quad \sigma = |a|^2$$

Probabilità di rivelazione

$$p_r(r|a; H_1) = \frac{2r}{\sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{\sigma_d^2} + SNR\right\} \cdot I_0\left[2\frac{r}{\sigma_d}\sqrt{SNR}\right] \quad SNR = \frac{|a|^2}{\sigma_d^2} = \frac{\sigma}{\sigma_d^2}$$

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{r > T | \sigma; H_1\} &= \text{Prob}\{r > T | \sigma; H_1\} = \int_T^{\infty} p_r(r | \sigma; H_1) dr = \\ &= \int_T^{\infty} \frac{2r}{\sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{\sigma_d^2} - SNR\right\} \cdot I_0\left[2\frac{r}{\sigma_d}\sqrt{SNR}\right] dr = \\ &= \int_{T/\sigma_d}^{\infty} 2t \exp\{-t^2 - SNR\} \cdot I_0[2t\sqrt{SNR}] dt \end{aligned}$$

Probabilità di Rivelazione – soglia fissa

Sotto l'ipotesi H_1 ($a \neq 0$) ho una rivelazione se

$$r = |\tilde{r}| = |d(t) + a| > T$$

Ora c'è un valor medio (valore complesso) pari ad “a” volte il valore della funzione di ambiguità

$$p(\tilde{r} | H_0) = \frac{1}{\pi \sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_d^2} |\tilde{r}|^2\right\} \quad \longrightarrow \quad p(\tilde{r} | a; H_1) = \frac{1}{\pi \sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_d^2} |(\tilde{r} - a)|^2\right\}$$

$$p_r(r | \sigma; H_1) = \frac{2r}{\sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + \sigma}{\sigma_d^2}\right\} \cdot I_0\left[\frac{2r \sqrt{\sigma}}{\sigma_d^2}\right]$$

$$SNR = \frac{|a|^2}{\sigma_d^2} = \frac{\sigma}{\sigma_d^2}$$

$$p_r(r | SNR; H_1) = \frac{2r}{\sigma_d^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{\sigma_d^2} - SNR\right\} \cdot I_0\left[2 \frac{r}{\sigma_d} \sqrt{SNR}\right]$$

$$P_d(SNR) = \text{Prob}\{r > T | \sigma; H_1\} = \int_{T/\sigma_d}^{\infty} 2t \exp\{-t^2 - SNR\} \cdot I_0[2t \sqrt{SNR}] dt$$

Probabilità di rivelazione P_d

$$P_d = \int_T^\infty p_r(r / M_1) dr = \int_T^\infty \frac{r}{\sigma_n^2} e^{-\frac{r^2+a^2}{2\sigma_n^2}} I_0\left(\frac{r a}{\sigma_n^2}\right) dr \cong \int_T^\infty \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} e^{-\frac{(r-a)^2}{2\sigma_n^2}} dr = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{T}{\sigma_n \sqrt{2}} - \sqrt{SNR}\right) \right]$$

Non ammette soluzione in forma chiusa

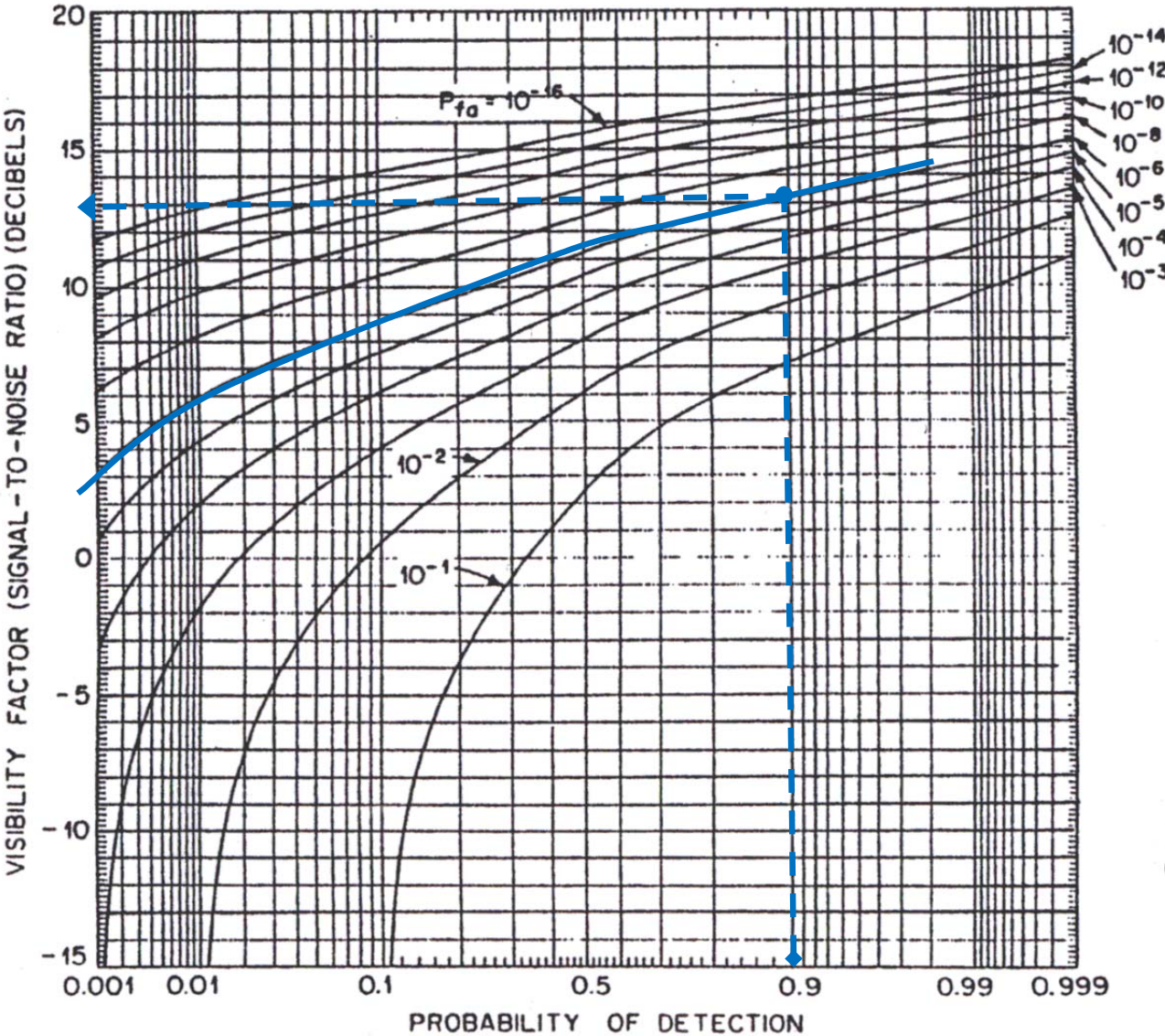
Approx
S/N alto

La probabilità di rivelazione dipende dal rapporto fra la soglia V_T e il valore rms di rumore σ_n e dal rapporto segnale a rumore SNR.

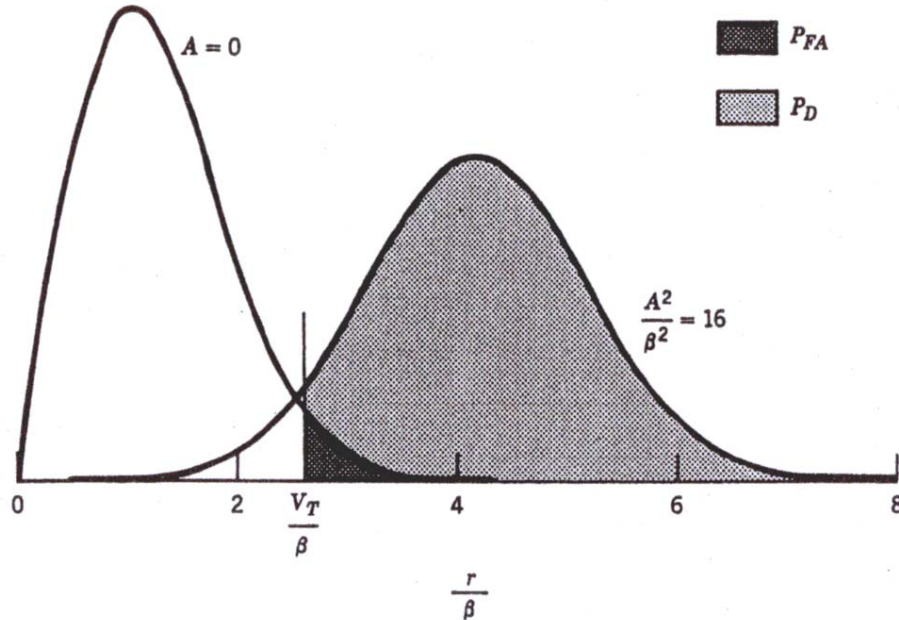
$$SNR = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} \gg 1 \Rightarrow I_0\left(\frac{r a}{\sigma_n^2}\right) \cong I_0\left(\frac{a^2}{\sigma_n^2}\right) \cong \left(2\pi \frac{a^2}{\sigma_n^2}\right)^{-\frac{1}{2}} e^{\frac{a^2}{\sigma_n^2}} \Rightarrow p_r(r / M_1) \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{(r-a)^2}{2\sigma_n^2}}$$

SNR elevato \Rightarrow Rice \cong Gaussiana

Curve di Marcum



Ad es.: per $P_{fa} = 10^{-6}$ e $P_d = 0.9$
 \Rightarrow SNR = 13 dB.



Marcum Function

marcumq

Generalized Marcum Q function

Syntax

`Q = marcumq(a,b)`
`Q = marcumq(a,b,m)`

Description

`Q = marcumq(a,b)` computes the Marcum Q function of `a` and `b`, defined by

$$Q(a,b) = \int_b^{\infty} x \exp\left(-\frac{(x^2 + a^2)}{2}\right) I_0(ax) dx$$

where `a` and `b` are nonnegative real numbers. In this expression, I_0 is the modified Bessel function of the first kind of zero order.

`Q = marcumq(a,b,m)` computes the generalized Marcum Q, defined by

$$Q(a,b) = \frac{1}{a^{m-1}} \int_b^{\infty} x^m \exp\left(-\frac{(x^2 + a^2)}{2}\right) I_{m-1}(ax) dx$$

where `a` and `b` are nonnegative real numbers, and `m` is a positive integer. In this expression, I_{m-1} is the modified Bessel function of the first kind of order $m-1$.

If any of the inputs is a scalar, it is expanded to the size of the other inputs.

Algorithms

`marcumq` uses the algorithm developed in [3]. The paper describes two error criteria: a relative error criterion and an absolute error criterion. `marcumq` utilizes the absolute error criterion.

References

- [1] Cantrell, P. E., and A. K. Ojha, "Comparison of Generalized Q-Function Algorithms," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-33, July, 1987, pp. 591-596.
- [2] Marcum, J. I., "A Statistical Theory of Target Detection by Pulsed Radar: Mathematical Appendix," RAND Corporation, Santa Monica, CA, Research Memorandum RM-753, July 1, 1948. Reprinted in *IRE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-6, April, 1960, pp. 59-267.
- [3] Shnidman, D. A., "The Calculation of the Probability of Detection and the Generalized Marcum Q-Function," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-35, March, 1989, pp. 389-400.

Radiotecnica e Radiolocalizzazione

Albersheim's Equation

Albersheim's equation is a closed-form approximation to the SNR required to achieve the specified detection and false alarm probabilities for a nonfluctuating target in independent and identically distributed Gaussian noise. The approximation is valid for a linear detector and is extensible to the noncoherent integration of N samples.

Let

$$A = \ln \frac{0.62}{P_{FA}}$$

and

$$B = \ln \frac{P_D}{1-P_D}$$

where P_{FA} and P_D are the false alarm and detection probabilities.

Albersheim's equation for the required SNR in dB is:

$$\text{SNR} = -5 \log_{10} N + [6.2 + 4.54 / \sqrt{N + 0.44}] \log_{10} (A + 0.12AB + 1.7B)$$

where N is the number of noncoherently integrated samples

Albersheim's Equation (II)

$$A = \ln(0.62 / P_{fa}) \qquad B = \ln\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right)$$

$$\text{per } N = 1 \quad \text{SNR}_{dB} = [6.2 + 4.54 / \sqrt{1.44}] \log_{10}(A + 0.12A \cdot B + 1.7 B)$$

$$\ln \alpha = \frac{\log_{10} \alpha}{\log_{10} e} \qquad A = \ln(0.62 / P_{fa}) = \ln(0.62) - \frac{\log_{10} P_{fa}}{\log_{10} e} \qquad B = \ln\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right) = \frac{1}{\log_{10} e} \log_{10}\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{dB} &= 9.98 \cdot \log_{10}(A + 0.12A \cdot B + 1.7 B) = \\ &= 9.98 \cdot \log_{10}\left[\ln(0.62) - \frac{\log_{10} P_{fa}}{\log_{10} e} + \left(0.12 \cdot \frac{\ln(0.62)}{\log_{10} e} + 1.7 \frac{1}{\log_{10} e}\right) \log_{10}\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right) - 0.12 \frac{\log_{10} P_{fa}}{(\log_{10} e)^2} \log_{10}\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right)\right] \end{aligned}$$

$$\text{SNR}_{dB} = 9.98 \cdot \log_{10}\left[-0.478 - 2.3 \log_{10} P_{fa} + 3.78 \log_{10}\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right) - 0.636 (\log_{10} P_{fa}) \log_{10}\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right)\right]$$

$$\text{SNR}_{dB} = 9.98 \cdot \log_{10}\left[-0.478 - 2.3 \log_{10} P_{fa} + (3.78 - 0.636 \log_{10} P_{fa}) \log_{10}\left(\frac{P_d}{1 - P_d}\right)\right]$$

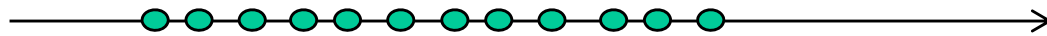
Albersheim's Equation (III)

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left[-0.5 - 2.3 \log_{10} P_{fa} + (3.8 - 0.6 \log_{10} P_{fa}) \log_{10} \left(\frac{P_d}{1 - P_d} \right) \right]$$

$$SNR = -0.5 - 2.3 \log_{10} P_{fa} + (3.8 - 0.6 \log_{10} P_{fa}) \log_{10} \left(\frac{P_d}{1 - P_d} \right)$$

Rivelazione su una regione in distanza

- Test di rivelazione analizzato fin qui è per l'istante t_0
- Per rivelare un potenziale segnale arrivato ad un tempo incognito fra t_{\min} e t_{\max} (tipicamente corrispondenti a distanze comprese fra distanza minima R_{\min} a distanza massima R_{\max}), è necessario ripetere il test di rivelazione per tutti i campioni del segnale analitico compresi fra t_{\min} e t_{\max} .
- Il segnale ricevuto è campionato con frequenza di campionamento: $f_s \geq B$ (B = banda del segnale trasmesso).



- Quindi, il test di rivelazione si ripete un numero di volte pari a $K = (t_{\max} - t_{\min})/T_s = (t_{\max} - t_{\min})/f_s$

Dove l'intervallo di campionamento è $T_s = 1/f_s \leq 1/B$

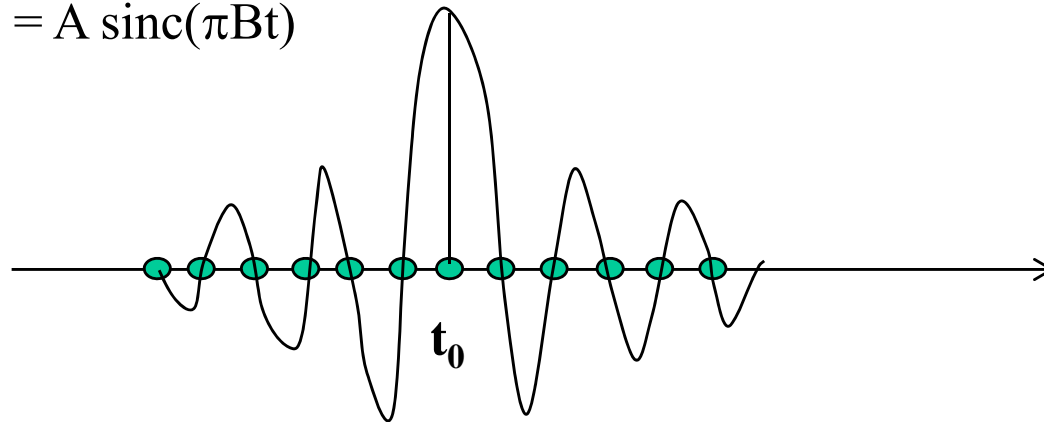
- Probabilità di falso allarme nell'intervallo?
- I campioni di rumore sono indipendenti se campionato a $f_s = B$, quindi $P_{fa}^{TOT} = P_{fa}^K$

Rivelazione su una regione in distanza (II)

- Quanti campioni occupa il segnale utile?

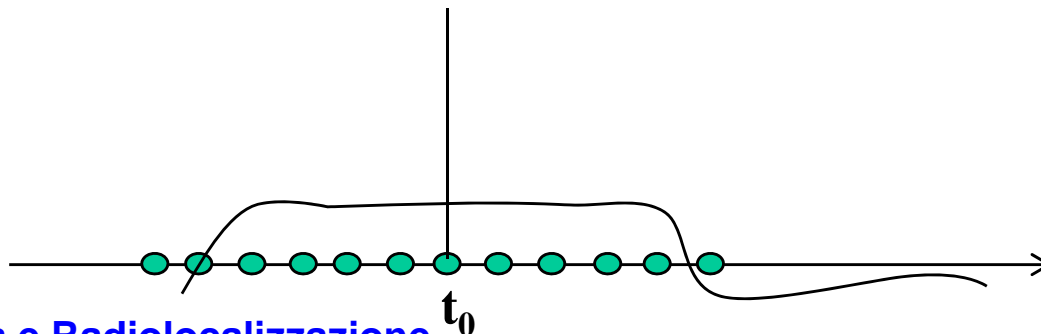
$S(f) = \text{costante}$ su banda B (spettro rettangolare con fase costante)

$$s(t) = A \text{sinc}(\pi Bt)$$



**Energia concentrata in t_0 ,
quindi in t_0 alta potenza
istantanea ed alto S/N**

Invece, se lo spettro di fase (e di ampiezza) non è costante, il segnale può essere molto meno concentrato in tempo



**Energia distribuita su un
tempo lungo, quindi in t_0
bassa potenza istantanea e
basso S/N**

Rivelazione su una regione in distanza (III)

- Dove è il segnale?
- Come è distribuita in tempo la sua energia?
- Si può raccogliere la sua energia in un istante di tempo?