PORTATA RADAR

DEFINIZIONE

Rivelare un oggetto: confrontare l'intensità dell'eco ricevuto con una soglia. Se l'intensità dell'eco ricevuto supera tale valore si può affermare, entro certi margini di errore statistico, che l'oggetto è presente.

L'intensità dell'eco ricevuto dipende dalla distanza *R.*

Portata Radar: La massima distanza alla quale può essere rivelata la presenza di un oggetto standard (il cui modello è ben definito) con un certa affidabilità .

Si consideri un radar monostatico e sia P_I la potenza di picco irradiata dall'antenna.

Antenna isotropica ideale (ossia senza perdite): la densità di potenza D_{ISO} a distanza R dall'antenna è pari a

$$D_{ISO}(R) = \frac{P_I}{4\pi R^2}$$

PORTATA RADAR

L'ANTENNA

Guadagno di direttività G_D o brevemente "*direttività*" di antenna lungo la direzione individuata dagli angoli θ e ϕ, :

$$G_D(\theta,\phi) = \lim_{R\to\infty} \frac{D_T\left(R,\theta,\varphi\right)}{D_{ISO}\left(R\right)}$$

in cui $D_T(R,\theta,\varphi)$ è la densità di potenza (calcolata supponendo l'antenna priva di perdite) nel punto di coordinate R,θ,ϕ misurata lungo la direzione di propagazione.

PORTATA RADAR

GUADAGNO D'ANTENNA

Si può definire il guadagno di potenza o brevemente

"Guadagno" della antenna la quantità:

$$G_T(\theta,\phi) = \frac{1}{L_A} G_D(\theta,\phi)$$

$$G_T(\theta,\phi) = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \cdot \frac{D_T(\theta,\phi)}{L_A P_I}$$

$L_A P_I = P_T$ è la potenza fornita all'antenna. Il guadagno di antenna nella direzione (θ,ϕ) rappresenta l'effettiva densità di potenza, in campo lontano.

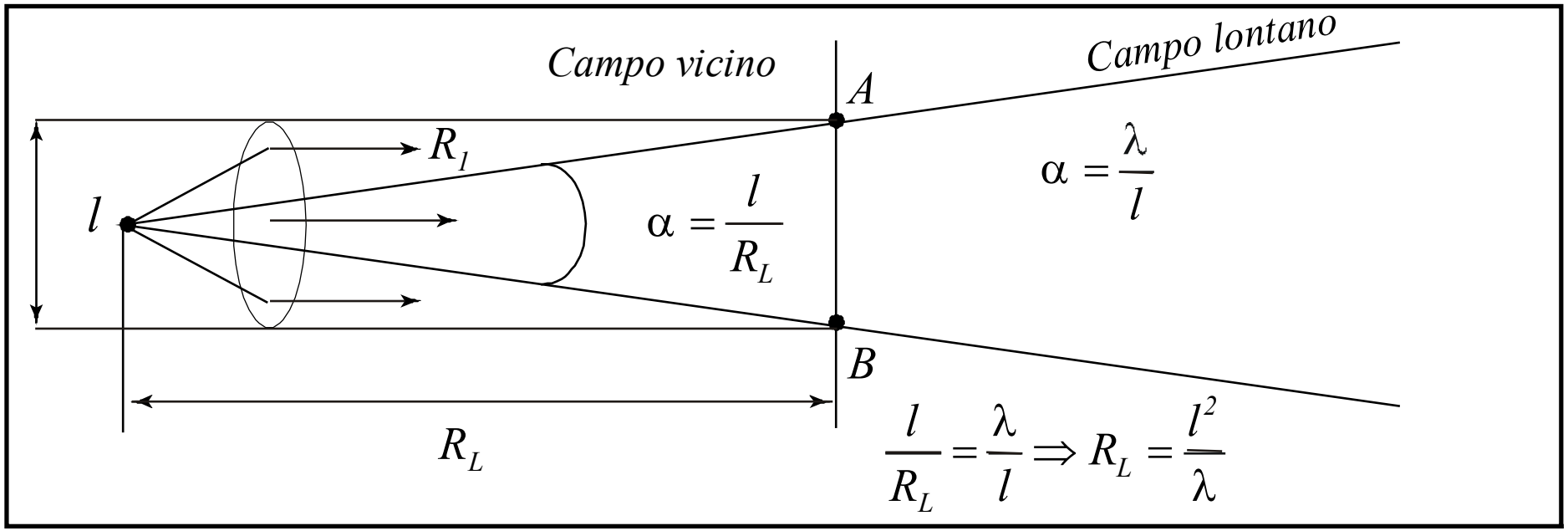
Densità reale: $$\frac{1}{L_A} D_T(\theta,\phi) = \frac{P_T}{4\pi R^2} \cdot G_T(\theta,\phi)$$

PORTATA RADAR

CAMPO LONTANO

Campo lontano: per distanze dall'antenna superiori a

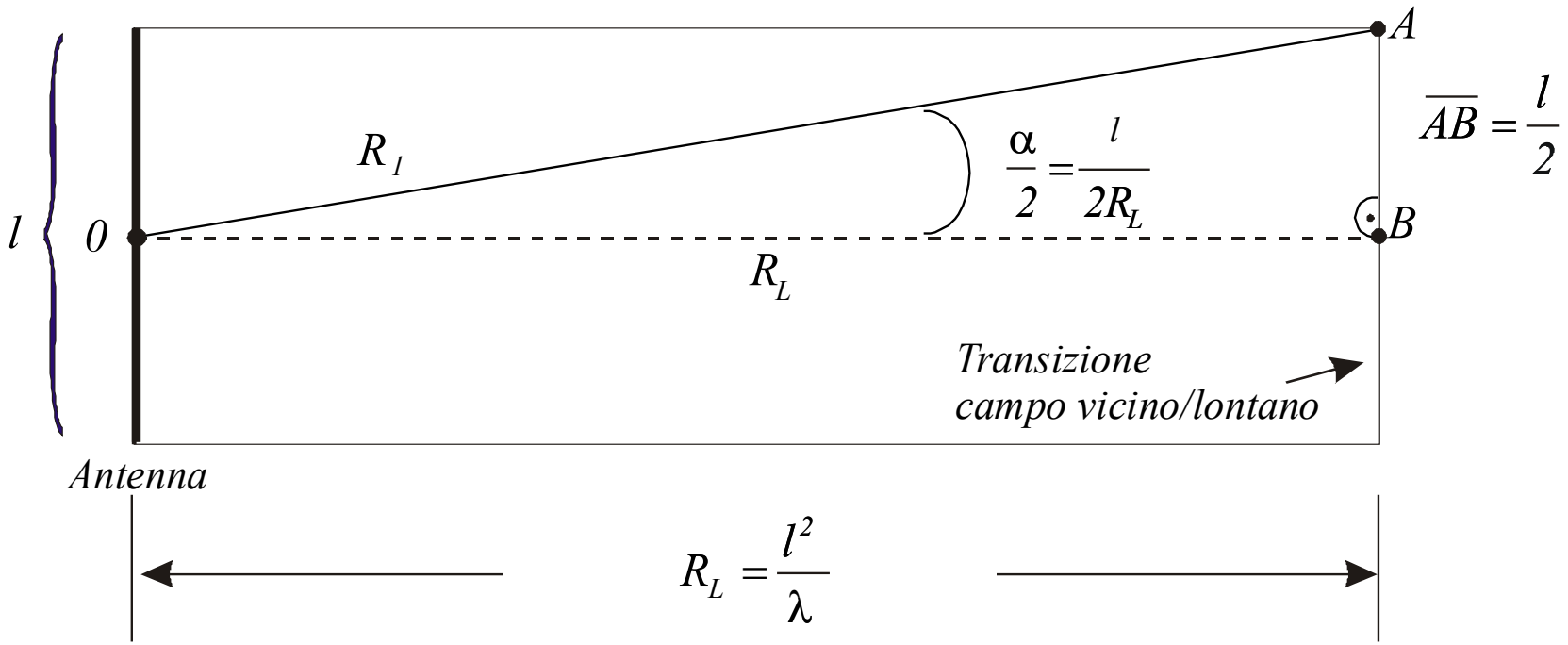
$$R_L = \frac{l^2}{\lambda}$$



Campo lontano per un'antenna a lente

PORTATA RADAR

CAMPO VICINO E CAMPO LONTANO



$$R_1^2 = R_L^2 + \frac{l^2}{4}$$

PORTATA RADAR

$$\left(\frac{R_1}{R_L}\right)^2 = 1+\frac{l^2}{4R_L^2} \cong \left(1+\frac{l^2}{8R_L^2}\right)^2 \quad se \quad l << 2R_L$$

$$\frac{R_1}{R_L} = 1+\frac{l^2}{8R_L^2}; \qquad \frac{R_1 - R_L}{R_L} = \frac{l^2}{8R_L^2}$$

$$ma \qquad R_L = \frac{l^2}{\lambda} \Rightarrow \qquad \frac{R_1 - R_L}{R_L} = \frac{l^2}{8\dfrac{l^2}{\lambda}} = \frac{\lambda}{8} \ (45°\, di\ fase)$$

PORTATA RADAR

GUADAGNO MASSIMO

Si definisce G_T come

$$G_T = G_T(\theta,\phi) \qquad \text{per} \qquad \theta = \theta_{\max}, \phi = \phi_{\max}$$

La densità di potenza effettiva irradiata sul bersaglio è pari a

$$\frac{D_T}{L_A} = \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T$$

PORTATA RADAR

RADAR CROSS SECTION

Il segnale emesso dal radar colpisce il bersaglio a distanza R e una parte della potenza incidente viene retrodiffusa verso il ricevitore. Per caratterizzare la capacità dell'oggetto nel diffondere l'energia e.m. che lo investe, viene introdotto un parametro denominato sezione trasversa radar (**Radar Cross Section: RCS**) o area equivalente. Tale grandezza ha le dimensioni di un'area e si misura in m^2 (rapporto tra potenza e densità areale di potenza).

PORTATA RADAR

RADAR CROSS SECTION

Per un radar monostatico viene definita la RCS di retrodiffusione (Back-scatter RCS spesso indicata con la lettera σ) come “la superficie di un riflettore equivalente senza perdite, in grado di produrre un eco con potenza pari a quella prodotta dal bersaglio”.

La RCS descrive il fenomeno di diffusione dell'onda e.m. che incide sull'oggetto e la RCS di backscatter è legata alla potenza che viene reirradiata verso il radar.

PORTATA RADAR

RADAR CROSS SECTION

La RCS di backscatter, σ, viene definita analiticamente come quel fattore per cui la potenza P_0 reirradiata dall'oggetto nella direzione dell'antenna ricevente (radar monostatico o bistatico) per unità di angolo solido è pari a

$$P_0 = \frac{D_T}{L_A} \cdot \sigma$$

La potenza reirradiata verso il radar è:

$$P_0 = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi R^2} \sigma$$

PORTATA RADAR

RADAR CROSS SECTION

La RCS dipenda dalla direzione con cui l'onda e.m. incide sull'oggetto ossia

$$\sigma = \sigma(\theta_{inc}, \phi_{inc}, \theta_{riflesso-versoRX}, \phi_{riflesso-versoRX})$$

La coppia di angoli $(\theta_{inc}, \phi_{inc})$ individua la direzione di incidenza dell'onda e.m. rispetto ad una terna solidale con l'oggetto. Se il radar è bistatico la RCS dipende da quattro angoli $(\theta_{inc}, \phi_{inc}, \theta_{riflesso-versoRX}, \phi_{riflesso-versoRX})$. Inoltre la RCS dipende dal materiale con cui è costruito l'oggetto e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

PORTATA RADAR

RADAR CROSS SECTION

La RCS consente di calcolare l'intensità dell'eco retrodiffuso dall'oggetto; la sua definizione elettromagnetica è

$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2}$$

in cui $|Ei|$ è il modulo del campo e.m. incidente mentre $|Er|$ è il modulo del campo riflesso dall'oggetto verso il radar ad una distanza R. L'operazione di limite indica che la misura della RCS deve essere fatta in campo lontano ossia a distanze maggiori di l_0^2/λ in cui l_0 è la dimensione caratteristica dell'oggetto.

PORTATA RADAR

RCS e A_E

Una volta determinata la potenza reirradiata dall'oggetto, P_o, verso il radar, la densità di potenza, D_R, che investe l'antenna radar:

$$D_R = \frac{P_0}{4\pi R^2}$$

Per descrivere le caratteristiche di ricezione dell'antenna radar (ossia la capacità di una antenna di captare la potenza incidente su di essa lungo una determinata direzione) si definisce l'area equivalente (o efficace) di ricezione A_E .

PORTATA RADAR

AREA EQUIVALENTE ANTENNA

La definizione della A_E è analoga a quella della RCS ma, a differenza di questa, essa è legata alla potenza che viene convogliata nel ricevitore una volta che l'onda e.m. investe l'antenna. Di solito, nella regione delle microonde l'area equivalente è pari a 0.4 ÷ 0.7 volte l'area fisica della antenna.

La potenza ricevuta dal radar è pari a

$$P_R = D_R \cdot A_E = \frac{P_T G_T A_E \sigma}{(4\pi R^2)^2}$$

PORTATA RADAR

AREA EQUIVALENTE ANTENNA

L'area efficace di una antenna A_E è legata al guadagno G_R attraverso la relazione (che si può ricavare dal principio di reciprocità applicato a una coppia di antenne):

$$A_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \qquad \Longrightarrow \qquad P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Se il radar in esame è bistatico occorre sostituire al posto di R^4 il prodotto $R_1^2 \cdot R_2^2$.

PORTATA RADAR

POTENZA RICEVUTA

Se (radar monostatico) si utilizza la stessa antenna in trasmissione e in ricezione allora $G=G_R=G_T$ e quindi

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

(equazione del radar in forma deterministica)

Attraverso tale equazione è possibile arrivare a calcolare la portata radar $R_{\max}$, come la distanza alla quale la potenza ricevuta risulta ancora maggiore (o uguale) ad un valore minimo $S_{\min}$, che consente di rivelare il bersaglio con una certa affidabilità. Il concetto di minimo segnale rivelabile (Minimum Detectable Signal: MDS) al quale è associata S_{min}, è statistico.

PORTATA RADAR

MININO SNR

Si definisce una minima potenza di segnale rivelabile come quella necessaria per rivelare il bersaglio con un'assegnata affidabilità (cioè con assegnati valori delle probabilità di rivelazione e di falso allarme

$$S_{min} = \frac{S_{min}}{P_n} \cdot P_n = \left(SNR\right)_{min} \cdot P_n$$

in cui SNR_{min} è il rapporto segnale/rumore associato al "minimo segnale rivelabile" e P_n è la potenza di rumore che si può scrivere

$$P_n = K_B B T_S$$

in cui K_B è la costante di Boltzman, B è la banda equivalente di rumore della catena ricevente e T_S è la temperatura di rumore di sistema.

PORTATA RADAR

ESPRESSIONE DI R_{max}

Una volta definito $S_{\min}$ è possibile ricavare la portata radar $R_{\max}$:

$$R_{\max} = \left(\frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right)^{1/4}$$

L'equazione è valida se la propagazione avviene nello spazio libero. In caso contrario occorre considerare un fattore di attenuazione moltiplicativo A, della potenza ricevuta P_R da inserire nell'equazione.

PORTATA RADAR

PERDITE

Se si considerano le perdite causate da fenomeni interni al radar l'equazione della portata radar diventa

$$R_{\max} = \left(\frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma A}{(4\pi)^3 L_{tot} S_{\min}} \right)^{1/4}$$

Va infine osservato che le perdite di potenza sull'antenna vengono tenute in conto considerando la funzione di guadagno G anziché la funzione di direttività.

VARIE FORME DELLA EQUAZIONE RADAR

Una volta nota la RCS è possibile risalire alla potenza ricevuta dal radar attraverso la relazione

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Se si è riusciti a calcolare $S_{\min}$ allora è possibile ricavare la portata radar $R_{\max}$

$$R_{\max} = \left(\frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma A}{(4\pi)^3 L_{tot} S_{\min}} \right)^{1/4}$$

In generale non è semplice ricavare L_{tot} e A.

VARIE FORME DELLA EQUAZIONE RADAR

Effetto della lunghezza d'onda

Esistono alcune forme tipiche della equazione radar che vengono riportate di seguito.

Se $A = L_{tot} = 1$

$$R_{\max} = \left(\frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right)^{1/4}$$

Quindi se si fissa il guadagno d'antenna, $R_{\max}$ è proporzionale alla radice quadrata di λ.

La relazione è valida se si suppone di aver fissato il massimo valore del guadagno di antenna G. In tal caso sono convenienti le frequenze più basse (banda L, S).

VARIE FORME DELLA EQUAZIONE RADAR

Effetto della lunghezza d'onda

Per un radar avionico vengono di solito fissate le dimensioni della antenna (per motivi di spazio occupato a bordo). L'aver fissato l'area della antenna equivale ad aver fissato l'area equivalente A_E poiché, per antenne a microonde vale la relazione:

$$A_E = \eta A_G$$

in cui η è l'efficienza di antenna (valori tipici 0.4÷0.7) e A_G è l'area geometrica. Siccome

$$A_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad \Longrightarrow \quad R_{\max} = \left(\frac{P_T A_E^2 \sigma}{(4\pi)\lambda^2 S_{\min}} \right)^{1/4}$$

Ciò spiega perché i radar avionici operano a frequenze elevate (bande X, K).

VARIE FORME DELLA EQUAZIONE RADAR

Altre considerazioni sull'equazione radar

La lunghezza d'onda scompare nella forma assunta dalla equazione radar quando viene fissato l'angolo solido Ω_S che il radar deve scandire. Fissare Ω_S significa delimitare la regione di copertura in cui si ritiene che siano presenti i bersagli.

Valori tipici sono Ω_S={360° in azimuth e da 0° a 20° oppure da 0° a 45° in elevazione}.

Approssimativamente si ha che $\Omega_S=\Theta_{az}\cdot\Theta_{el}$, in cui Θ_{az} ,Θ_{el} sono le larghezze angolari in azimuth e in elevazione.

L'angolo solido Ω_S è utilizzando un fascio stretto occupante un angolo solido a -3 dB di ampiezza pari a Ω_0, allora il numero di posizioni occupate dal fascio, N_{pos}, in un tempo t_S è pari a

$$N_{pos} = \frac{t_s}{t_D} = \frac{\Omega_s}{\Omega_0}$$

VARIE FORME DELLA EQUAZIONE RADAR

Altre considerazioni sull'equazione radar

Se si suppone che l'intensità di radiazione sia costante all'interno dell'angolo solido Ω_0 allora

$$\Omega_0 = \frac{4\pi}{G} \cong \theta_B \cdot \varphi_B$$

Se si vuole aumentare il guadagno allora Ω_0 deve decrescere e di conseguenza il numero di posizioni N_{pos} per ricoprire l'angolo Ω_S nel tempo desiderato t_s, aumenta.

Altre considerazioni sull'equazione radar

Il guadagno di antenna, trascurando le perdite,

è pari indicativamente a:

$$G = \frac{4\pi}{\Omega_0} = \frac{4\pi}{\Omega_0} \cdot \frac{\Omega_s}{\Omega_s} = \frac{4\pi}{\Omega_s} \cdot \frac{t_s}{t_D}$$

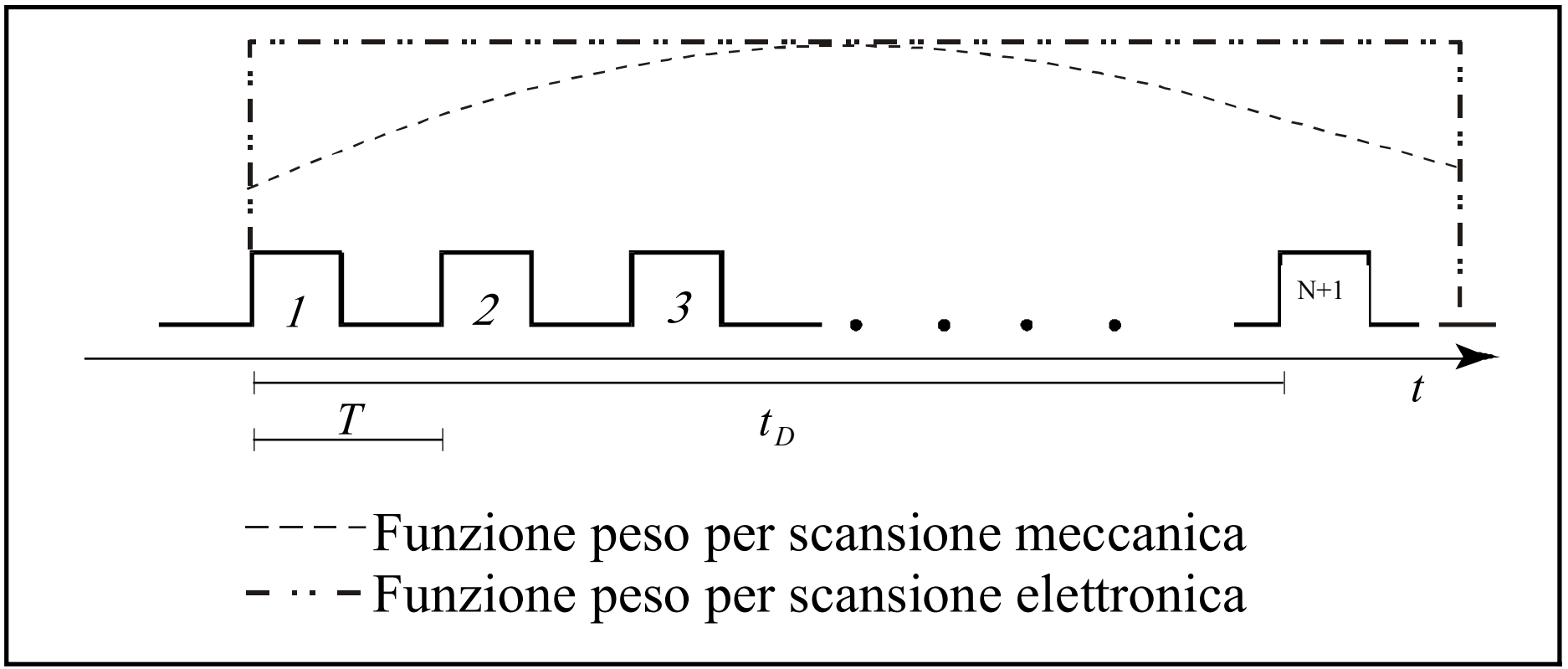
La potenza trasmessa è pari a

$$P_T = P_{media} \cdot \frac{t_D}{t_{ill}}$$

in cui t_{ill} è il tempo effettivo di illuminazione del bersaglio.

VARIE FORME DELLA EQUAZIONE RADAR

Altre considerazioni sull'equazione radar



Tempo effettivo di illuminazione del bersaglio

Essendo T il periodo di ripetizione degli impulsi e τ la loro durata:

$$t_{ill} = N\tau$$

Radar ad impulsi di durata τ e con $PRT=T$:
nel dwell time sono presenti N impulsi

$$N = \frac{t_D}{T}$$

Il duty cycle d, vale

$$d = \frac{N \cdot \tau}{t_D} \qquad \Longrightarrow \qquad P_T = P_{media} \frac{t_D}{N \cdot \tau}$$

VARIE FORME DELLA EQUAZIONE RADAR

Equazione del radar di sorveglianza

La portata radar in spazio libero è data da

$$R_{\max}^4 = \frac{P_T G_T A_E \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \quad \Longrightarrow \quad R_{\max}^4 = \frac{P_{media}}{(4\pi)^2} \cdot \frac{t_D A_E 4\pi t_s \sigma}{N\tau\, \Omega_s t_D SNR_{\min} k_B B T_s}$$

(avendo sostituito G_T con $4\pi/\Omega_s$)

e semplificando

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{media}}{4\pi} \cdot \frac{A_E \sigma t_s}{N\Omega_s SNR_{\min} k_B T_s}$$

In questa espressione il prodotto $P_{\text{media}} \cdot A_E$ è denominato fattore di potenza per apertura di antenna, mentre t_S è il tempo di scansione e Ω_S è l'angolo solido da scandire.

SIGNIFICATO STATISTICO DELLA PORTATA RADAR

La portata radar è definita come la distanza al di sotto della quale è possibile rivelare la presenza di un oggetto con assegnati valori di probabilità di errore ($1 - p_d$) e di falso allarme (p_{fa}).

In generale il concetto di 'allarme' viene definito osservando che di solito alla fine della catena ricevente di un radar l'ampiezza del segnale ricevuto (V) viene confrontata con un valore di soglia V_T.

Se $V > V_T$ si può asserire che il bersaglio è presente.

Se $V < V_T$ si può asserire che il bersaglio non è presente.

Esistono due possibilità di errore:

a) Mancata rivelazione: ossia $V < V_T$ ma il bersaglio è presente

b) Falso allarme: $V > V_T$ ma il bersaglio non è presente

SIGNIFICATO STATISTICO DELLA PORTATA RADAR

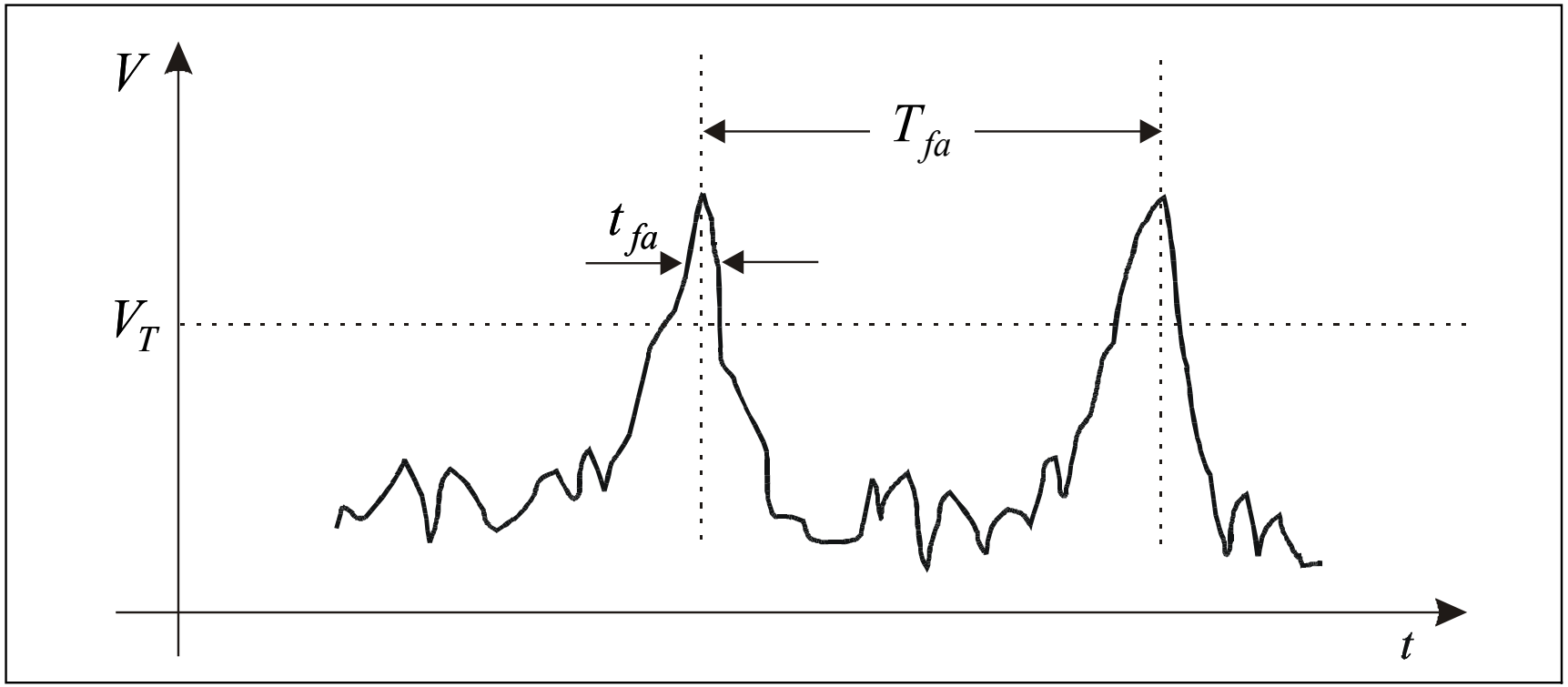
Indicando con H_0 l'ipotesi di bersaglio assente e con H_1 l'ipotesi di bersaglio presente, la probabilità di falso allarme vale:

p_{fa} = Prob $[V > V_T \mid H_o]$, quella di rivelazione è p_D = Prob $[V > V_T \mid H_1]$

DECISIONE / ***REALTA'***	**BERSAGLIO PRESENTE**	**BERSAGLIO ASSENTE**
BERSAGLIO PRESENTE H_1	OK	Mancata rivelazione $1-p_D$
BERSAGLIO ASSENTE H_0	Falso allarme p_{fa}	OK

FALSI ALLARMI

Durata media di un falso allarme : $t_{fa} \approx 1/B$



Andamento di V e falsi allarmi

LEGAME TRA PROBABILITA' DI FALSO ALLARME E BANDA

$$\Longrightarrow \qquad p_{fa} = \frac{t_{fa}}{T_{fa}} \cong \frac{1}{T_{fa} \cdot B}$$

Ad esempio per $B = 1\ MHz$ e $p_{fa} = 10^{-6}$

si ha $T_{fa} \cong 1$ secondo .

NUMERO DI FALSI ALLARME PER SCANSIONE

Riferendosi a un periodo di scansione t_s si ha che in media, delle $N_R\ N_A$ celle di risoluzione del radar, $P_{fa} \cdot N_R N_A$ superano la soglia a causa dei falsi allarmi, $\Longrightarrow$ il numero di falsi allarmi in una scansione vale, in media:

$$P_{fa} N_R N_A \quad oppure \quad P_{fa} \frac{T}{\tau} \frac{2\pi}{\theta_B}$$

$$Esempio: P_{fa} = 10^{-6},\ T = 10^{-3}\,S,\ \tau = 10^{-6}\,S,\ \theta_B = 1° \left(\frac{2\pi}{360} rad \right)$$

$\Longrightarrow$ 0.36 falsi allarme/scansione

DISTRIBUZIONE DEI FALSI ALLARMI

Nel tempo (e nello spazio scandito continuamente dal radar) i falsi allarmi sono rappresentabili come dei punti di Poisson

$$p(k,t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

con λ = frequenza degli eventi $= \frac{1}{T_{fa}} = \frac{P_{fa} \cdot B}{N}$;

ponendo $k = 0$, $p(0,t_0) = 0.5$, si ottiene

$$e^{-\lambda t_0} = 0.5$$

DISTRIBUZIONE DEI FALSI ALLARMI

t_0 tempo in cui la probabilità che un falso allarme si verifichi è 50%

$$t_0 = T_{fa} \ln 2 = 0.693 \; T_{fa}$$

Il numero medio di falsi allarmi in un tempo t vale

$$n_{fa} = \lambda t = {t}/{T_{fa}}$$

e la distribuzione nel tempo δ tra due falsi allarmi è di tipo esponenziale:

$$f(\delta) = \lambda e^{-\lambda\delta} \cdot u(\delta)$$

PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

La portata radar in spazio libero è data da

$$R_{\max}^4 = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}}$$

in cui $S_{\min}$ è la minima potenza di segnale ricevuto che consente di effettuare la rivelazione del segnale con una certa probabilità di corretta rivelazione p_d e una certa probabilità di falso allarme p_{fa} .

Inoltre si era visto che:

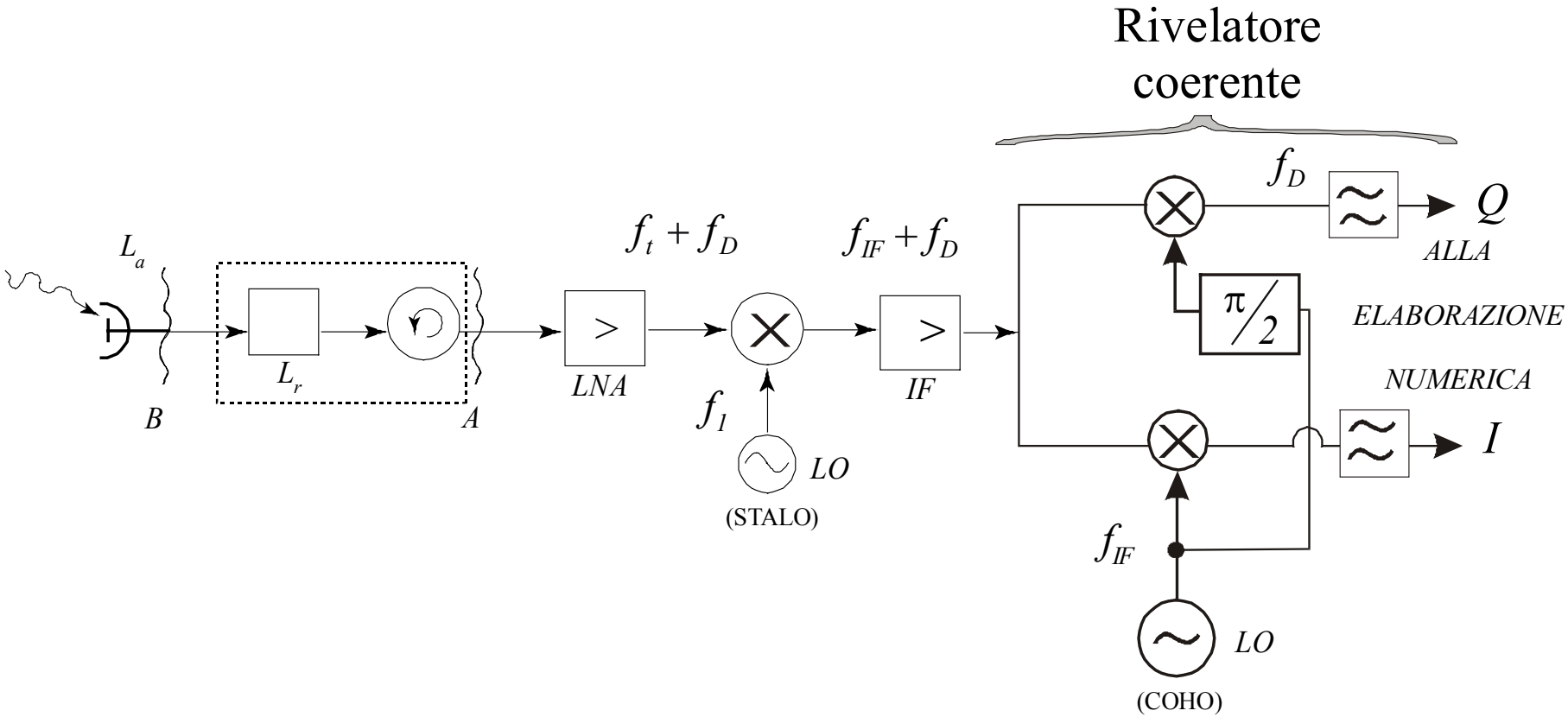
$$S_{\min} = SNR_{\min} P_n$$

PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Ai fini del calcolo della potenza di rumore occorre considerare i contributi di rumore prodotti dalla emissione spontanea dell'atmosfera, dalle precipitazioni, dalla emissione naturale di sorgenti esterne all'atmosfera come il sole. Vanno infine considerati anche gli effetti delle superfici terrene e marine.

PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Sottosistema di ricezione radar: antenna, conversioni RF e duplexer, amplificatore RF, convertitore, amplificatore IF (tipicamente : $f_1 = f_t - 30MHz,\ f_{IF} = 30MHz$)



PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Fattori di perdita

a) L'antenna è un elemento che ha perdite poiché non tutta la potenza che incide sull'apertura viene fornita al ricevitore. Tali perdite vengono quantificate con un fattore $L_a \geq 1$ e vengono tenute in conto nella equazione radar utilizzando la funzione di guadagno in potenza anziché la funzione di direttività.
b) La linea di trasmissione (guida d'onda o cavo coassiale) che connette l'antenna all'unità ricevitore è sede di ulteriori perdite. Esse vengono caratterizzate da un fattore L_r.
c) Anche il duplexer deve essere considerato come un elemento che introduce delle perdite, come pure l'eventuale giunto rotante.
d) La linea di trasmissione che collega il duplexer all'amplificatore o al convertitore di frequenza RF è sede di ulteriori perdite.

Il sottosistema di ricezione a radiofrequenza (RF) è di solito costituito da un amplificatore a basso rumore (LNA) o in altri casi da un più economico mixer a RF.

Fattori di perdita

A valle del LNA si ha un mixer in grado di convertire il segnale in ingresso a frequenza intermedia (IF). Dopo il mixer viene posto un amplificatore di elevato guadagno che opera a frequenza intermedia.

Per il calcolo della potenza del rumore totale introdotto dai singoli sottosistemi ci si riferisce, di solito, all'ingresso del primo elemento attivo e tutti gli elementi a monte sono visti come elementi che introducono soltanto perdite.

Fattori di perdita

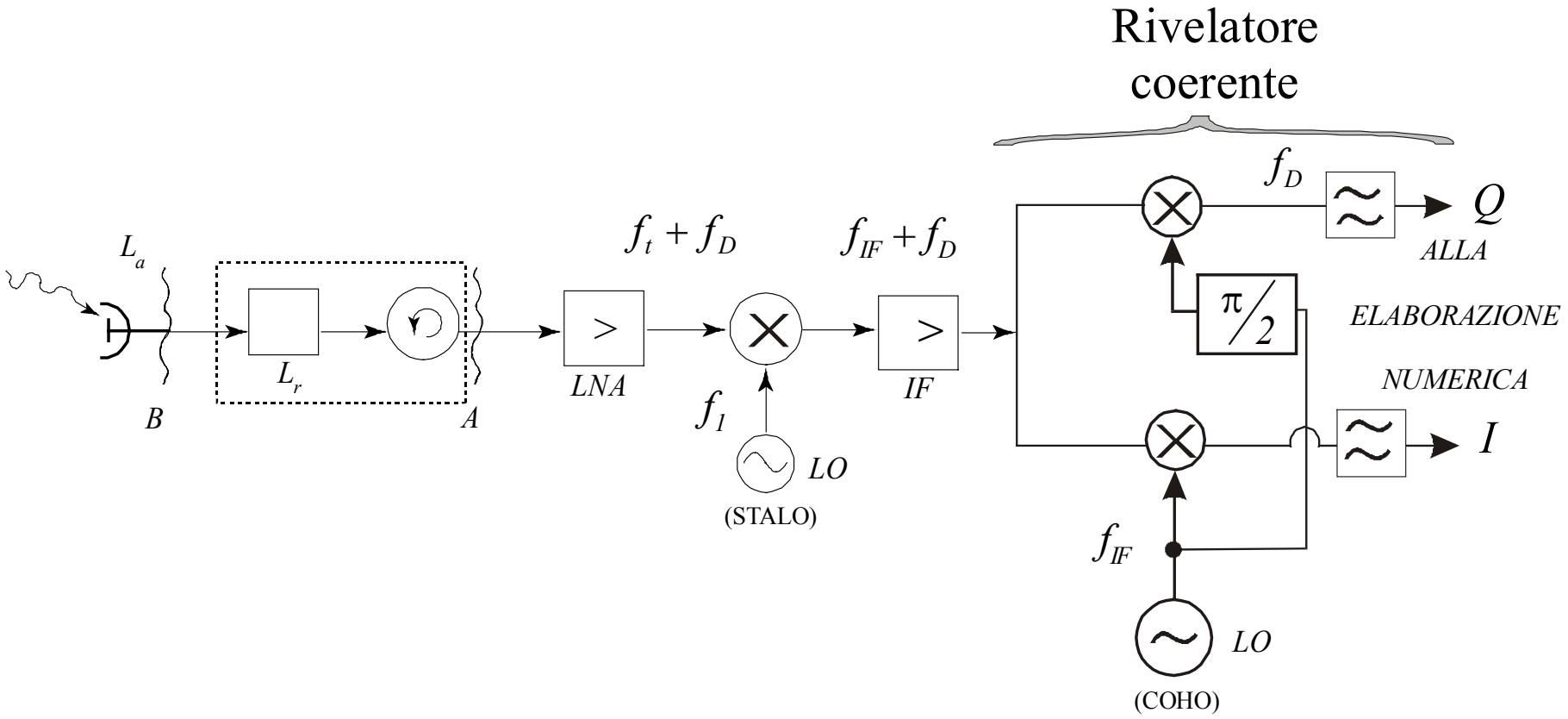
Utilizzando l'equazione del radar, il rapporto Segnale-Rumore per un bersaglio a distanza R è pari a

$$SNR = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 P_N}$$

Di solito tale rapporto è riferito al singolo impulso ricevuto all'ingresso del primo elemento attivo. Di conseguenza devono essere indicate anche le perdite prodotte dalla catena ricevente a monte del primo elemento attivo.

PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Sottosistema di ricezione radar:
antenna, conversioni RF e duplexer, amplificatore RF, convertitore, amplificatore IF (tipicamente : $f_1 = f_t - 30MHz,\ f_{IF} = 30MHz$)



Fattori di perdita

Se tali perdite vengono indicate con L_A allora

$$SNR_A = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_A P_{NA}}$$

in cui P_{NA} è la potenza di rumore calcolata all'ingresso del LNA (o del mixer).

Fattori di perdita

Se il calcolo del rapporto *SNR* fosse effettuato nel punto B della catena, nella $SNR_A = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_A P_{NA}}$ si dovrebbe considerare il termine $P_{nB} \cdot L_B$ e ovviamente SNR_B.

Va infatti tenuto presente che il rapporto *SNR* dipende dal punto della catena in cui esso viene calcolato.

Fattori di perdita

E' da notare che poiché il guadagno dell'amplificatore a basso rumore è dell'ordine di 20 dB è possibile trascurare il contributo di rumore degli stadi ad esso successivi. Se $R = R_{\max}$ il rapporto segnale rumore calcolato è pari a $SNR_{\min}$ che consente di rivelare un bersaglio secondo assegnate p_{fa} e p_d.

Fattori di perdita

Occorre determinare anche la potenza del rumore captato dalla antenna.

Nota la "temperatura di brillanza" $T_B(\theta, \varphi)$ delle sorgenti viste dall'antenna, la potenza del rumore d'antenna da esse generato è: $P_{ANT} = k_B T_A B$

dove T_A si ottiene come media, su tutto l'angolo solido, di $T_B(\theta, \varphi)$ pesata col guadagno d'antenna $G(\theta, \varphi)$ e dove B è la larghezza di banda.

Fattori di perdita

La potenza di rumore captata dall'antenna viene di solito espressa in termini di una temperatura equivalente di rumore che si misura in Kelvin.

Oltre alla temperatura di rumore, occorre considerare anche un fattore di perdita dell'antenna.

Fattori di perdita

Esistono altri contributi di rumore e di perdita provocati da altri sottosistemi come il giunto rotante (perdita tipica di 0.2 dB), il duplexer (perdita tipica di 0.2 dB) etc..

Tutti questi contributi di perdita vanno sommati e il rapporto segnale rumore viene calcolato, convenzionalmente, all'ingresso del primo elemento attivo della catena ricevente (ossia LNA o mixer), ma è possibile anche riferirsi all'uscita dell'antenna.

Procedure standard per il calcolo della portata

1. **Metodo di Blake** (in cui ci si riferisce all'uscita dell'antenna, oggi è il più usato)

Si usa la relazione

$$R^4_{\max} = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 SNR_{\min} k_B T_S B_n L}$$

in cui il fattore L è pari a

$$L = L_T L_P^2 L_{PROP}^2$$

T_S: temperatura di sistema (inclusiva delle perdite in ricezione - calcolata all'uscita dell'antenna prima del tratto a RF)

Procedure standard per il calcolo della portata

2. **Metodo di Hall** (ci si riferisce a monte del 1° elemento attivo)

La formula utilizzata è riportata di seguito

$$R_{\max} = 239.474 \sqrt[4]{\frac{P_T G^2 \sigma \tau}{f^2 T_n SNR_{\min} L_T \boldsymbol{L_r} L_p^2 L_{PROP}^2}}$$

in cui al posto della cifra di rumore caratterizzante la parte attiva del ricevitore si è utilizzata la temperatura equivalente di rumore T_n e al posto di B_n si è posto $1/\tau$. B_n è la banda equivalente di rumore.

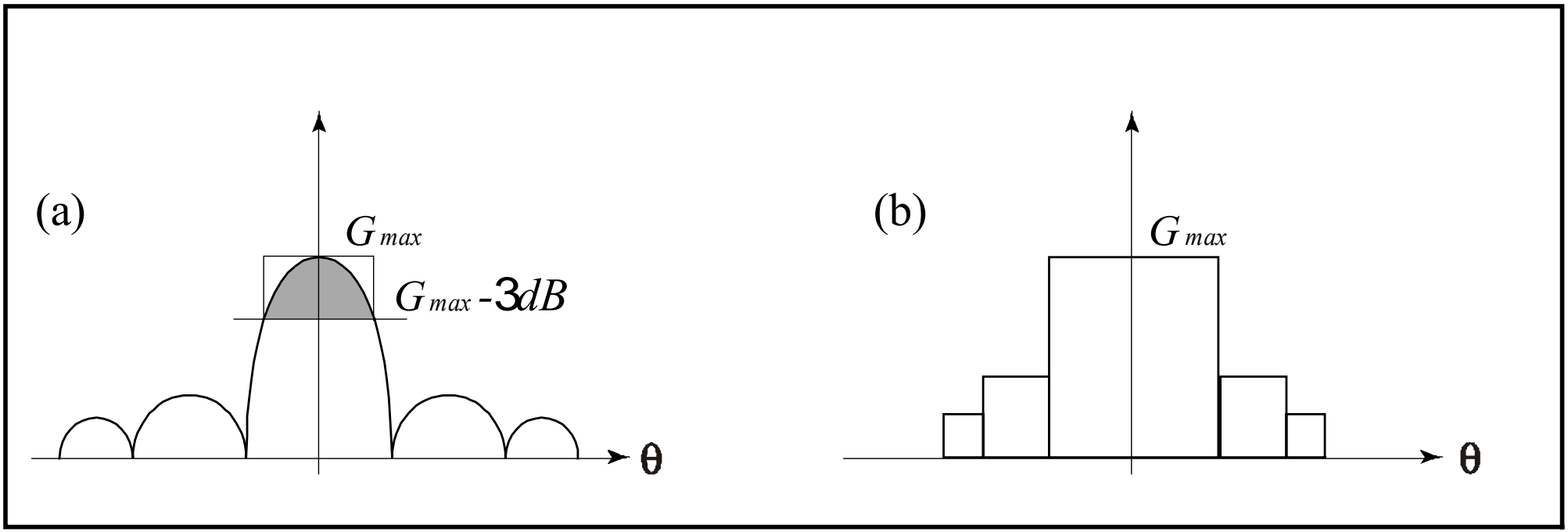
T_n : temperatura equivalente di rumore (K) (calcolata prima dell'LNA)

NB: P_T *in KW*, τ *in* μs , f *in MHz*, σ *in* m^2

Perdite dovute al pattern d’antenna

La differenza tra la somma dei quadrati delle ampiezze degli impulsi ricevuti considerando il pattern di antenna reale e la somma dei quadrati delle ampiezze degli impulsi ricevuti considerando il pattern di antenna squadrato è rappresentativa della perdita del pattern di antenna. Per un fascio di antenna di forma gaussiana tale perdita è dell'ordine di 1.6 dB.

Perdite dovute al pattern d'antenna



REALE

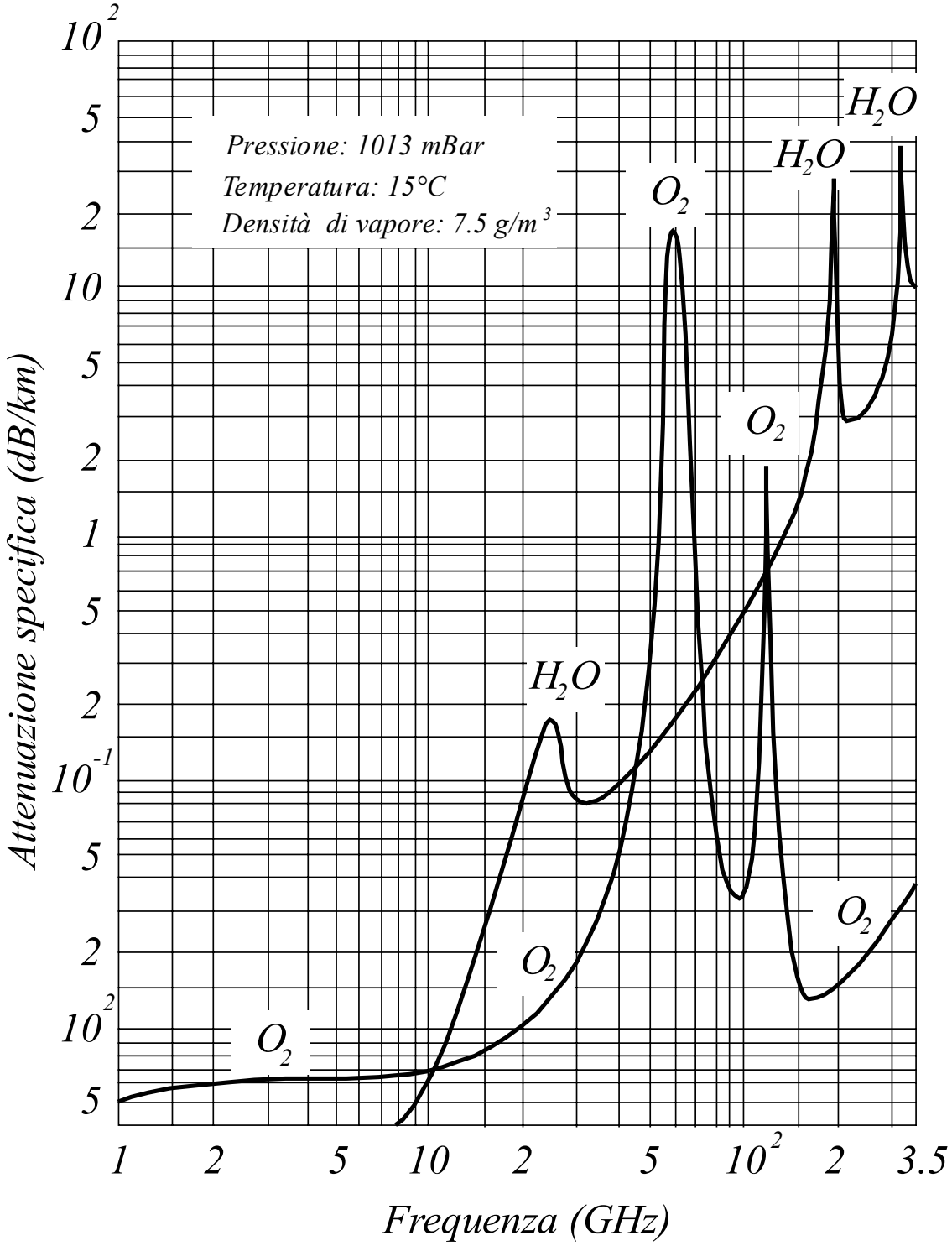
IDEALE

PRINCIPALI PERDITE DI SISTEMA

1. perdite per propagazione: dovute all'assorbimento dell'energia e.m. da parte dei costituenti atmosferici;
2. perdite in trasmissione: dovute alle connessioni fra trasmettitore e antenna;
3. perdite in ricezione: dovuti alle connessioni tra antenna e ricevitore;
4. perdite per forma del fascio di antenna;
5. perdite per disadattamento e di elaborazione dei dati ricevuti.

PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

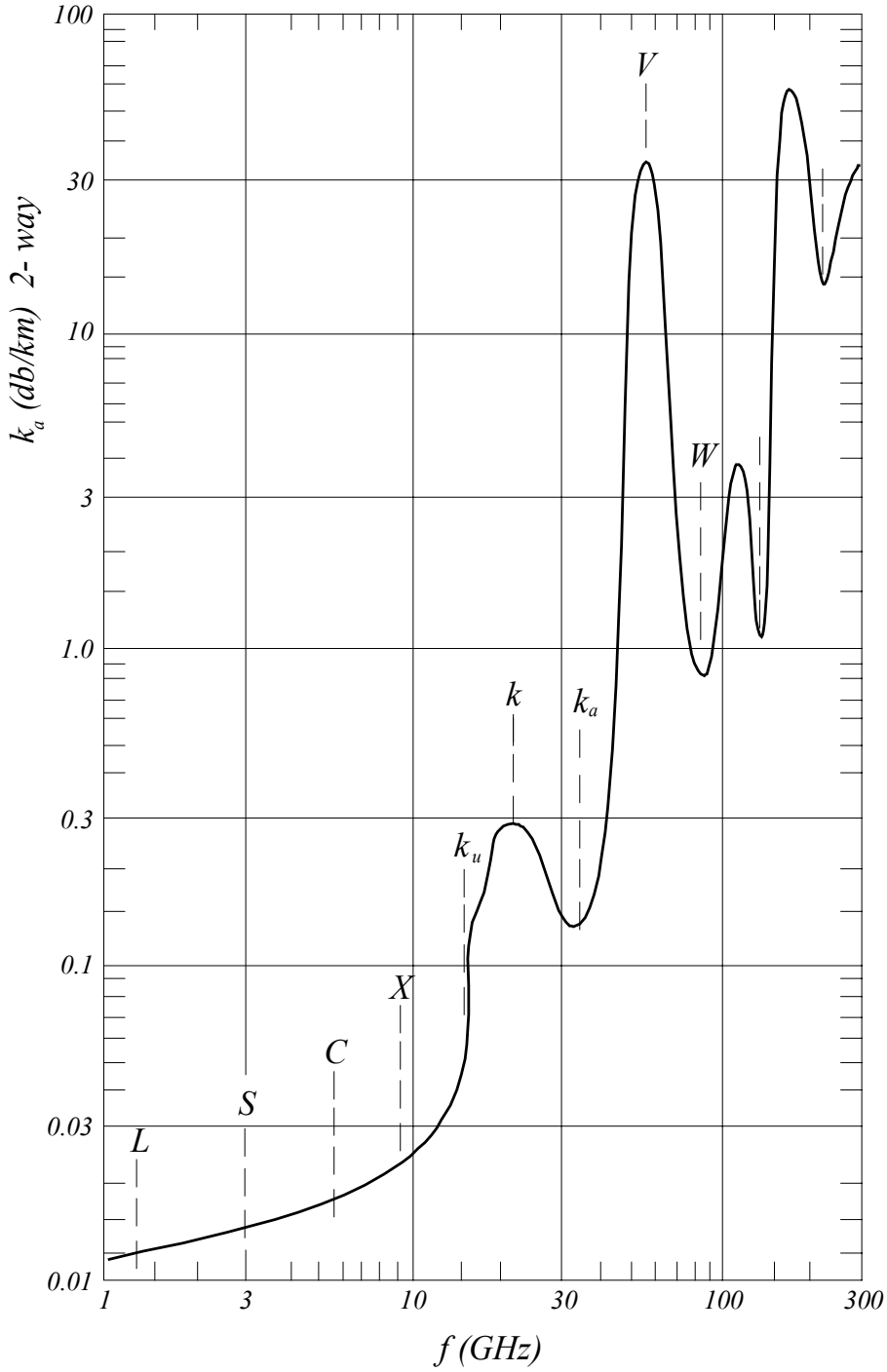
Assorbimento dei gas atmosferici al variare della frequenza



Attenuazione specifica (una via) dovuta ai gas presenti nella atmosfera

PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

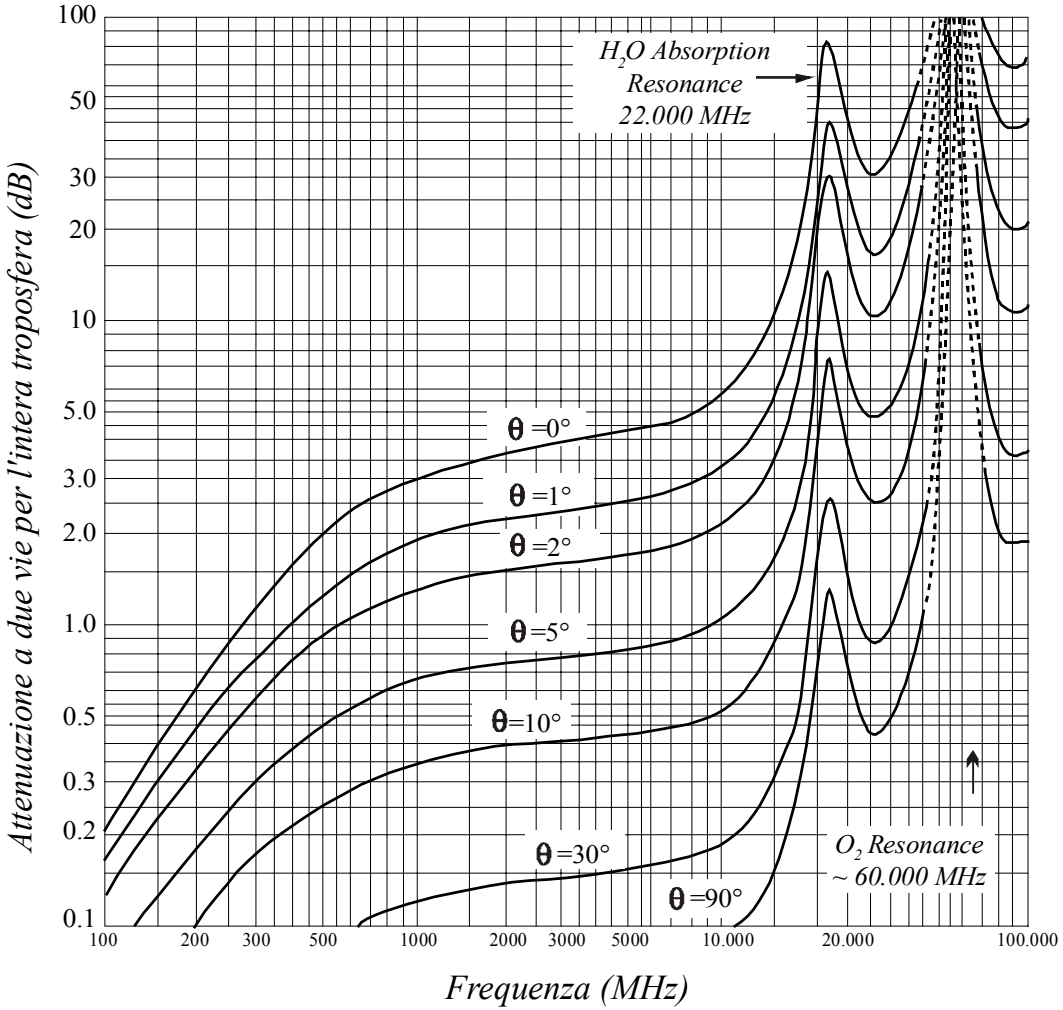
Attenuazione tipica (a due vie) dell'aria chiara per unità di percorso

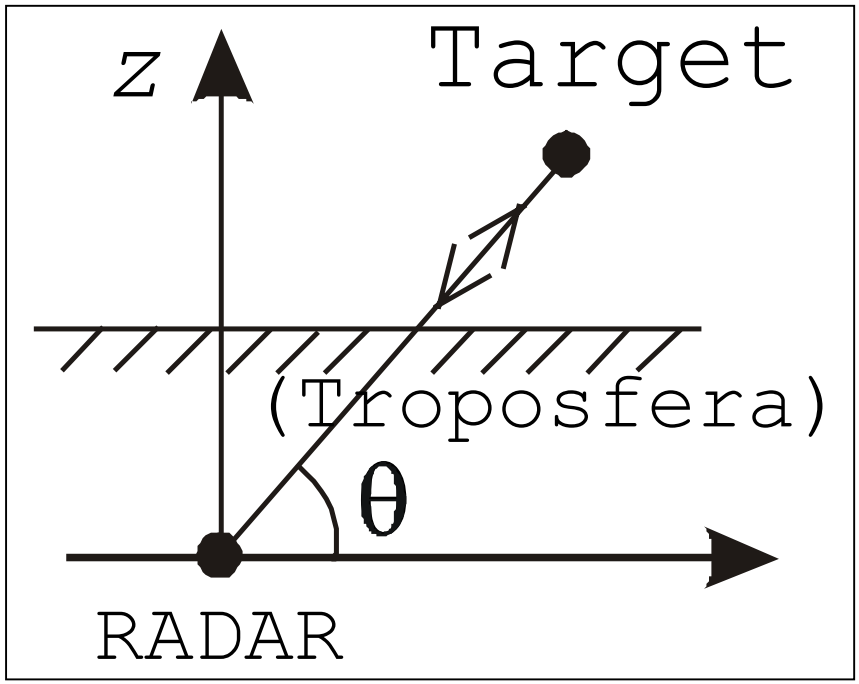


PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Attenuazione dovuta all'intera troposfera al variare della frequenza e dell'angolo θ rispetto al piano orizzontale (angolo di elevazione).

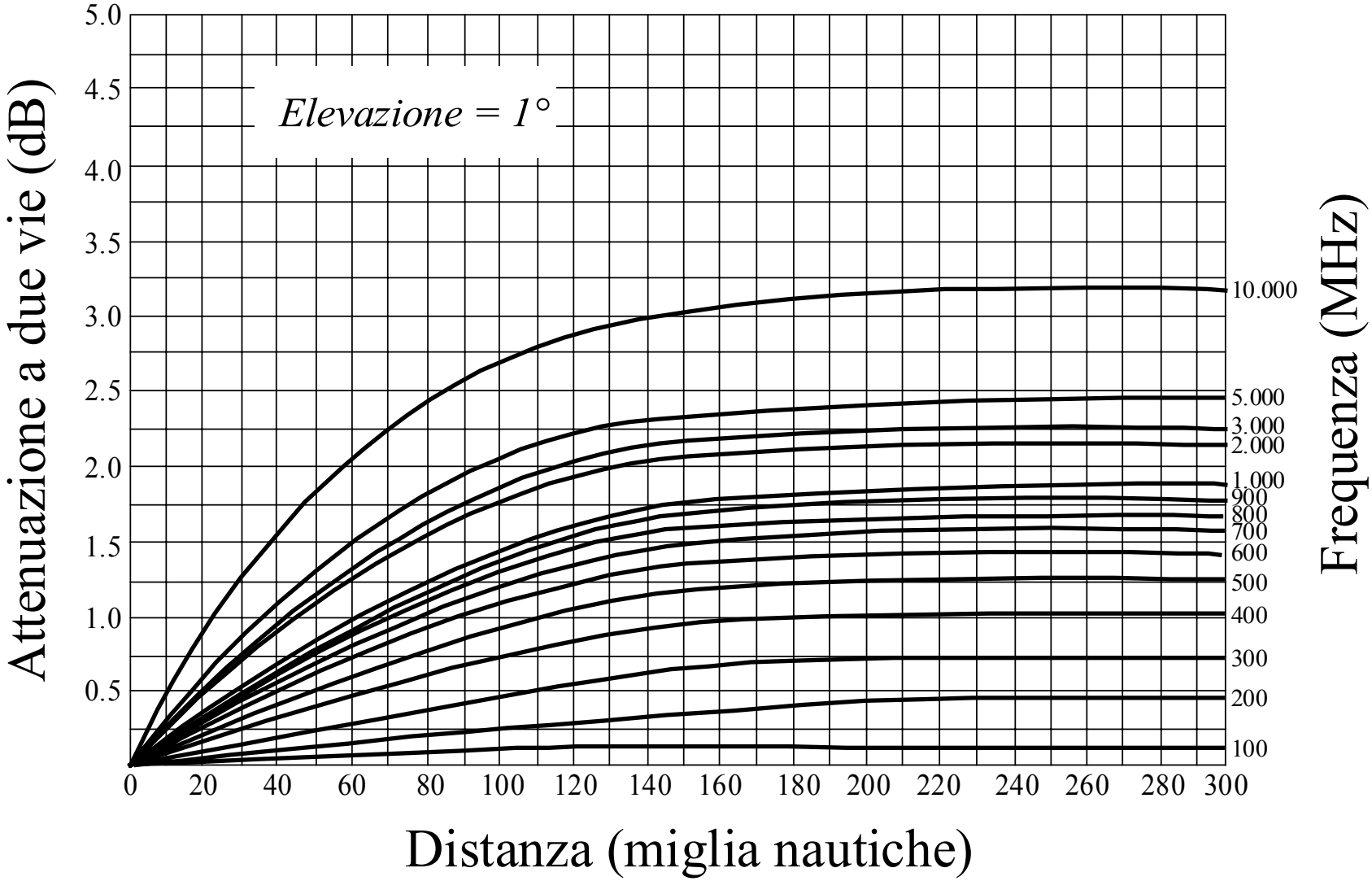
Il modello atmosferico ICAO - vapore acqueo alla superficie 7.5 g/m^3





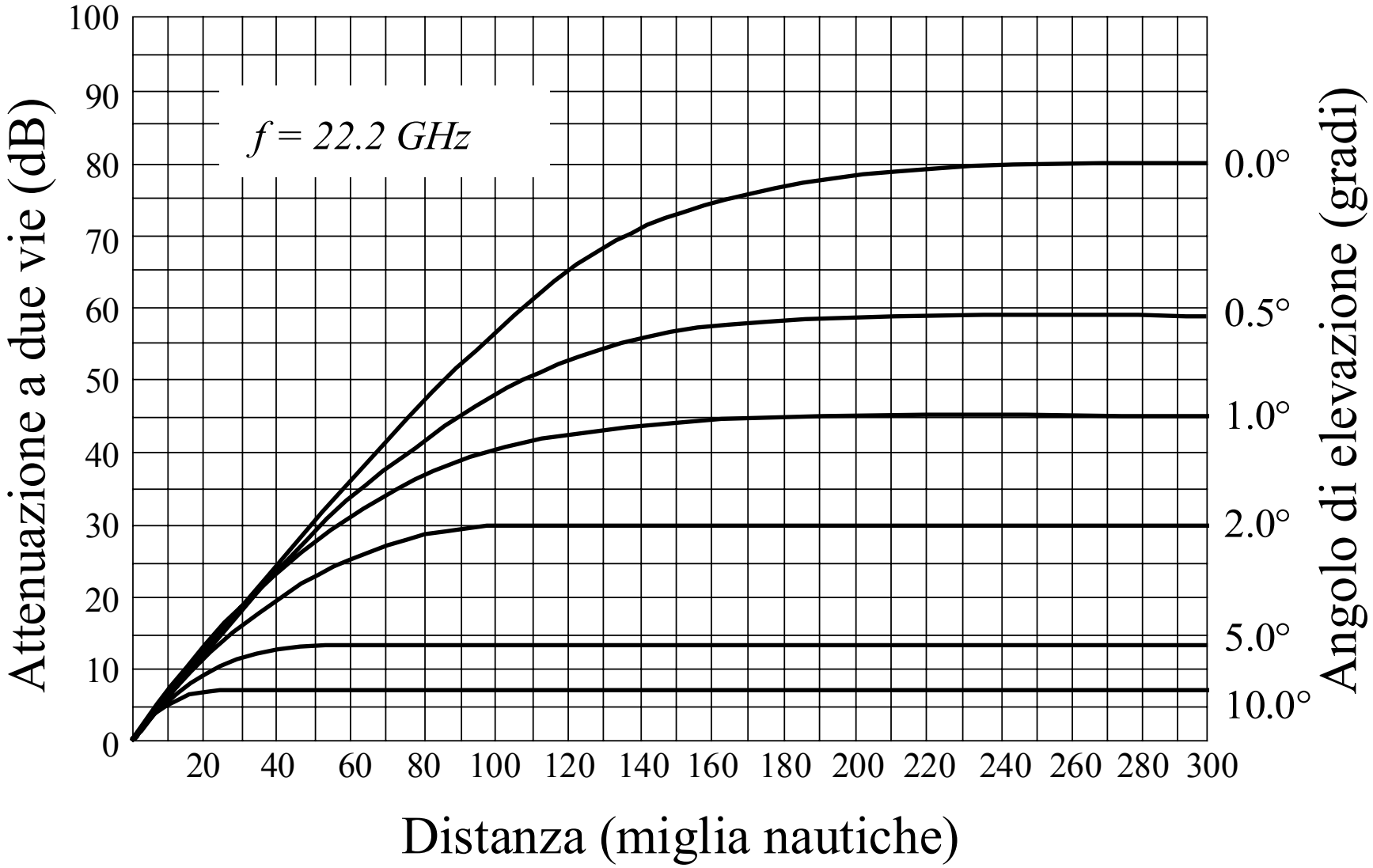
PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Attenuazione (a due vie) al variare della distanza per un'elevazione di 1°



PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Attenuazione (a due vie) al variare dell'angolo di elevazione



PERDITE DI SISTEMA; PROPAGAZIONE (ASSORBIMENTO E RIFLESSIONI); ORIZZONTE RADAR

Se sono presenti dei fenomeni di precipitazione (pioggia, neve, grandine) occorre considerare anche i fenomeni di assorbimento e di diffusione prodotti dalle idrometeore.

Se non si conosce la portata e si desidera tenere in conto l'attenuazione si può operare secondo una procedura iterativa: si calcola la portata R_0 per attenuazione nulla; si moltiplica R_0 per l'attenuazione specifica in dB/km e si calcola la portata R_1 con questa attenuazione; si moltiplica R_1 (ovviamente $R_1<R_0$) per l'attenuazione specifica e così via finché $\left(R_{N-1}-R_N\right)/R_{N-1}<\varepsilon$.

RUMORE D'ANTENNA

Per caratterizzare completamente gli effetti sul sistema ricevente occorre anche calcolare i contributi di rumore prodotti dai vari agenti atmosferici e dalle sorgenti cosmiche come il sole. Si noti che il sole è una potente sorgente di radioonde (utile per calibrazione in angolo).

In generale è difficile modellizzare il complesso di questi fenomeni rumorosi e ci si limita a fornire una temperatura equivalente di rumore, detta temperatura di antenna, T_a. Essa tiene conto del contributo di rumore prodotto dalle sorgenti cosmiche e dalla emissione atmosferica. Una volta nota la T_a, la densità di potenza di rumore per unità di banda captata dall'antenna è pari a kT_a (in cui k è la costante di Boltzmann).

TEMPERATURA D'ANTENNA

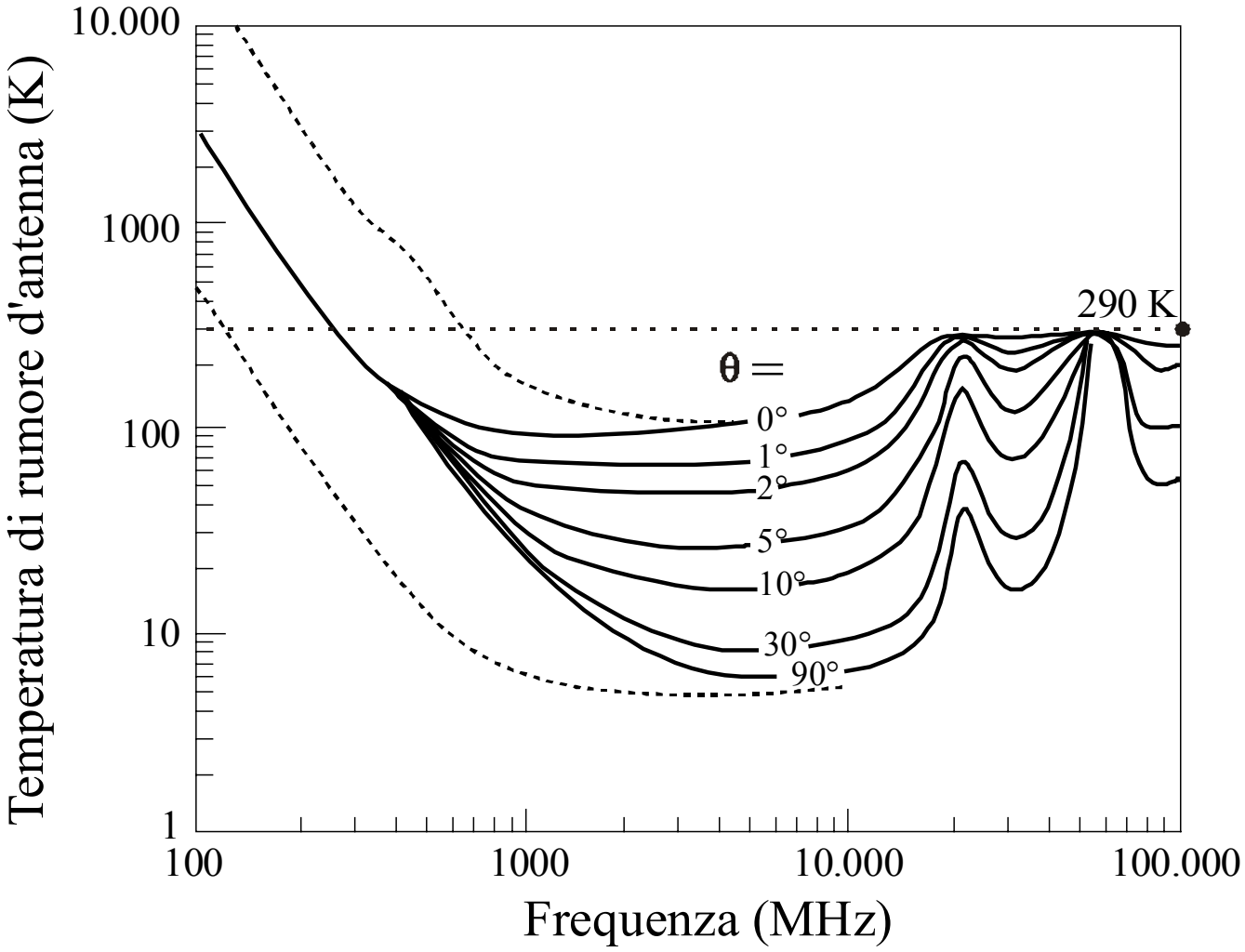
La temperatura di antenna viene definita nelle ipotesi di

a) antenna ideale (assenza di perdite)

b) antenna senza lobi che puntano sul terreno.

Sotto tali ipotesi vengono costruite le curve in cui è riportata la temperatura di antenna in funzione della frequenza di operazione al variare dell'angolo di elevazione del fascio di antenna.

TEMPERATURA D'ANTENNA



Temperatura di rumore di un'antenna ideale al variare della frequenza e dell'angolo di elevazione. Le curve intere si riferiscono a condizioni medie per il rumore galattico, con il sole in un lobo di guadagno unitario, attività solare 10 volte quella di quiete, e radiazione cosmica di corpo nero a 2.7 K. La curva tratteggiata superiore vale per attività solare 100 volte quella di quiete e massimo rumore galattico, con $\theta = 0°$. La curva tratteggiata inferiore è per minimo rumore galattico e assenza di rumore solare, con $\theta = 90°$

Calcolo della temperatura di rumore T_S per una tipica catena ricevente radar

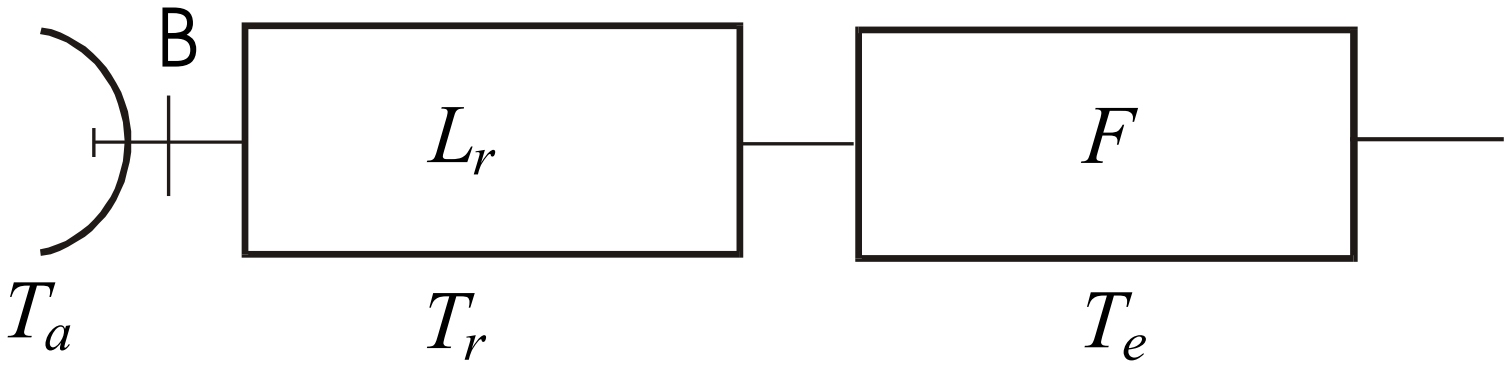
Se si utilizza la formula di Blake, la temperatura di rumore "di sistema" T_S deve essere determinata in relazione alla catena ricevente. Nelle ipotesi di adattamento tra i vari componenti della catena, la temperatura di rumore di un attenuatore è legata alla sua attenuazione (loss: L_r) attraverso la relazione $T_r = T_{RF}(L_r - 1)$.

Se si dispone della cifra di rumore F di un certo sottosistema la temperatura equivalente di rumore corrispondente può essere determinata attraverso la relazione $T_e = T_0(F-1), \;\; T_0 = 290K$.

Calcolo della temperatura di rumore T_S per una tipica catena ricevente radar

La densità di potenza di rumore alla bocca di antenna è pari a kT_S in cui T_S è data da

$$T_s = T_a + \left(T_r / L_r + T_e\right) L_r = T_s = T_a + T_r + L_r T_e$$

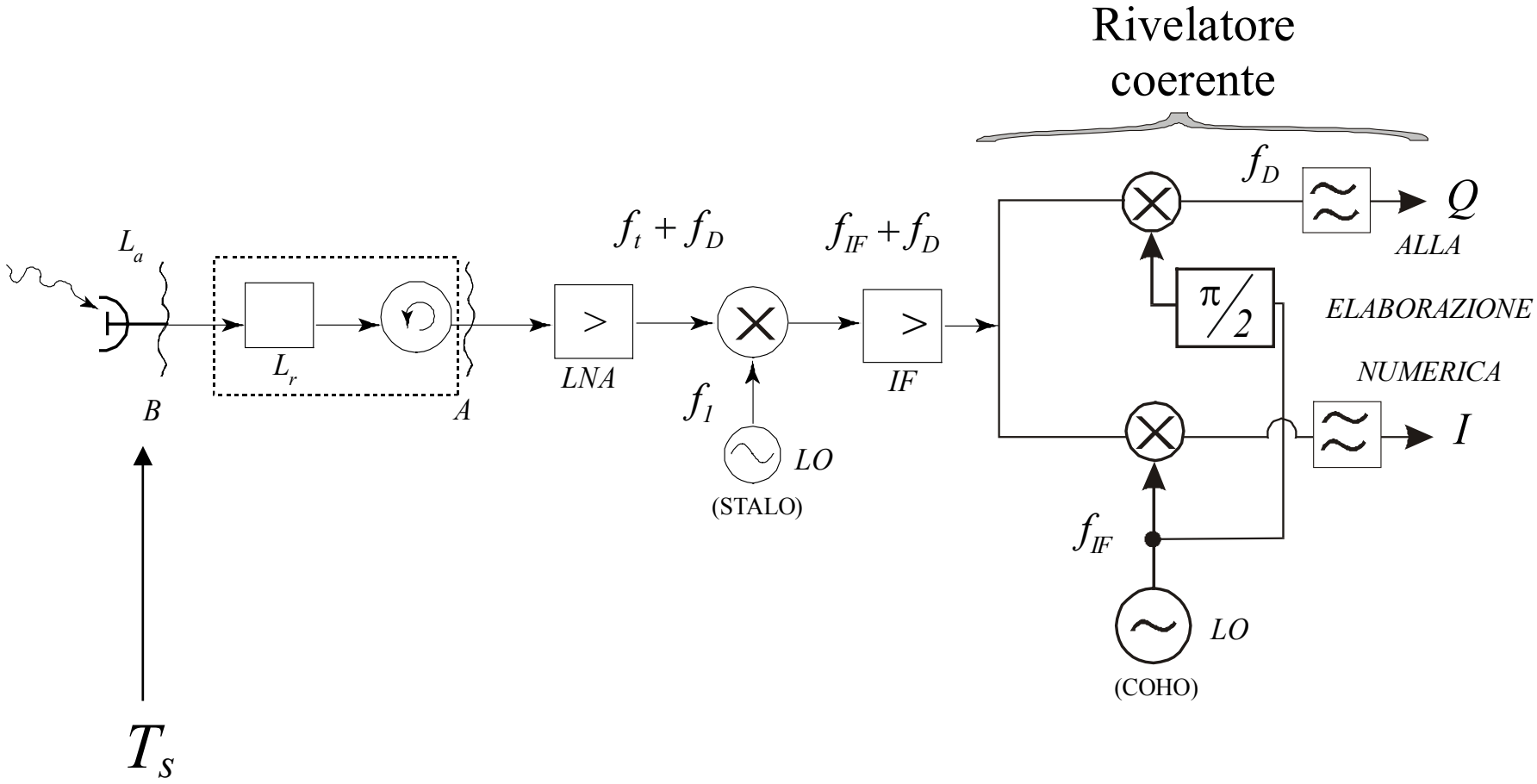


$$T_e = (F-1) T_0$$

dove T_a è la temperatura di rumore d'antenna, T_r quella delle connessioni RF e T_e quella del ricevitore.

Calcolo della temperatura di rumore T_S per una tipica catena ricevente radar

T_S, detta temperatura di sistema viene convenzionalmente riferita (Blake) alla bocca di antenna (B)



Calcolo della temperatura di rumore T_S per una tipica catena ricevente radar

Se non si dispone dei grafici che forniscono l'andamento della temperatura di antenna al variare delle condizioni ambientali e dell'angolo di elevazione del fascio ma è noto il fattore di perdita dell'antenna L_a, la T_a può essere calcolata attraverso la relazione

$$T_a = \frac{0.88T_a^{'} - 254}{L_a} + 290$$

in cui $T_a^{'}$ è la temperatura ideale di antenna.

Calcolo della temperatura di rumore T_S per una tipica catena ricevente radar

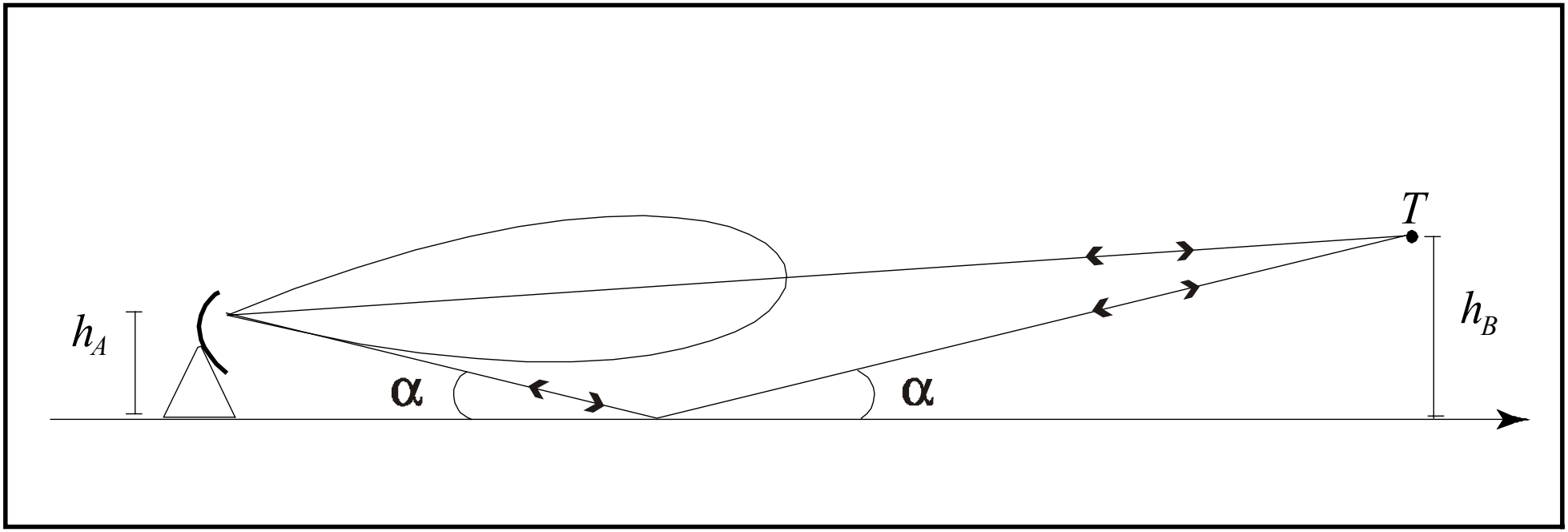
La relazione è valida nella seguente condizione: il contributo dell'emissione della superficie terrestre, supposta a *290 K*, è il *12.5%* mentre quello del rumore cosmico e atmosferico è *87.5%* del totale.

$$T_A = \left[\left(1 - \infty\right) T_a^{'} + \alpha T_0 + \left(L_a - 1\right) T_0 \right] \Big/ L_a$$

con

$$\alpha = 1/8 \cong 0.12; \quad \frac{7}{8} T_0 \cong 254$$

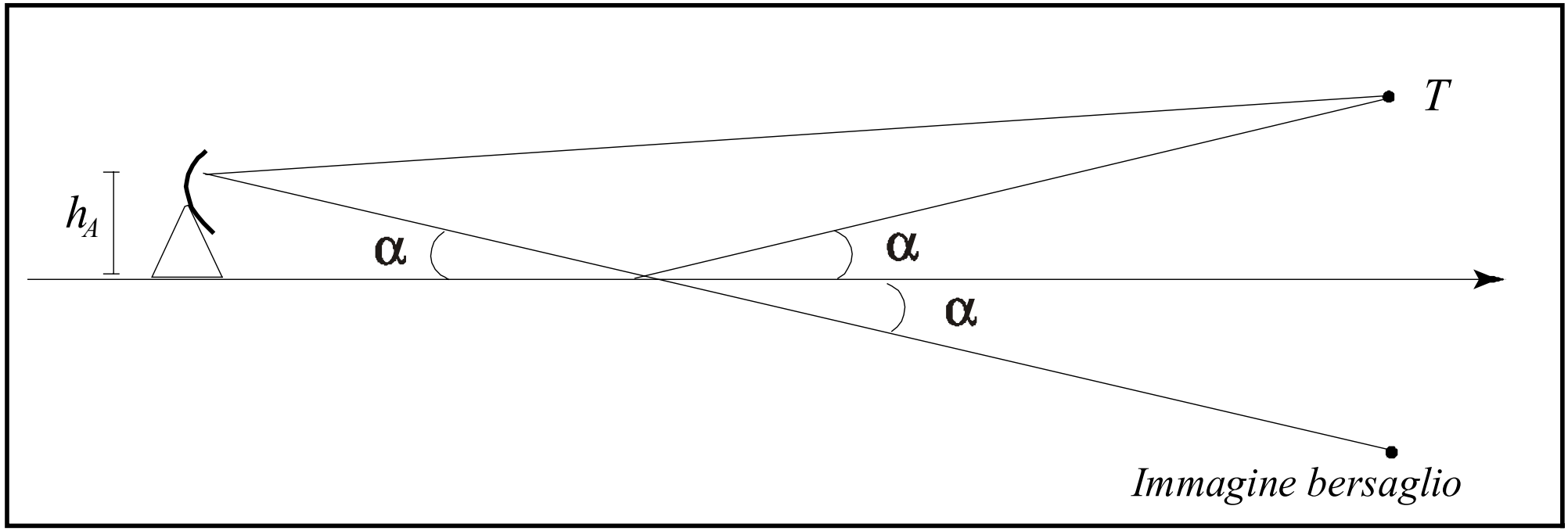
Fenomeno del multipath (multipropagazione)



Riflessioni dal terreno o dal mare

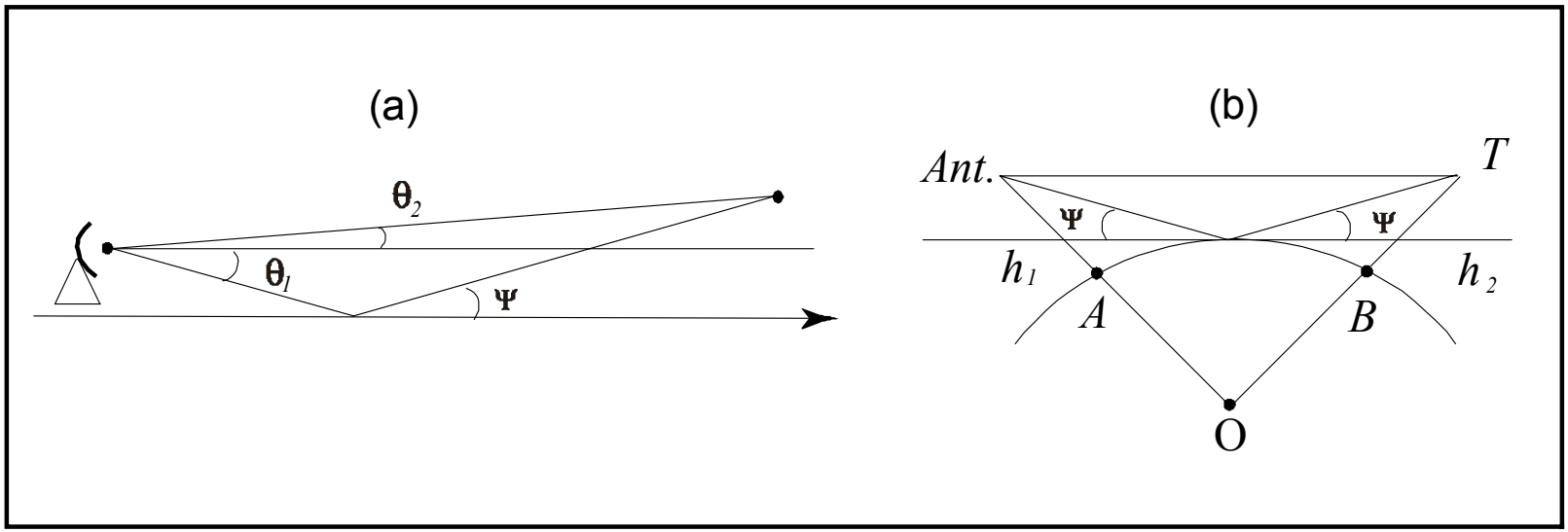
Il rapporto tra le intensità del segnale ricevuto in presenza di multipropagazione e quello dell'eco del segnale diretto che sarebbe stato ricevuto se il radar avesse operato in assenza di riflessioni viene indicato come Fattore di Propagazione, $F = f\left(h_a, h_b, \theta, \lambda\right)$ ed , in generale, dipende dall'altezza del radar h_a, dall'altezza del bersaglio h_b, dall'angolo di elevazione θ e dalla lunghezza d'onda λ associata alla frequenza di emissione. Il fenomeno di multipropagazione può essere limitante per la rivelazione di bersagli a bassa quota.

Immagine del bersaglio



Riflessioni dal terreno o dal mare

Modelli della superficie riflettente



Se si utilizza un modello a terra curva è possibile distinguere due distanze: Distanza tra antenna e bersaglio (Slant Range) e l'arco di curva *AB* che definisce il Ground Range. Per grandi distanze tali valori possono essere sensibilmente diversi e per passare da uno all'altro occorre conoscere le quote h_1 e h_2.

Riflessioni dal terreno o dal mare

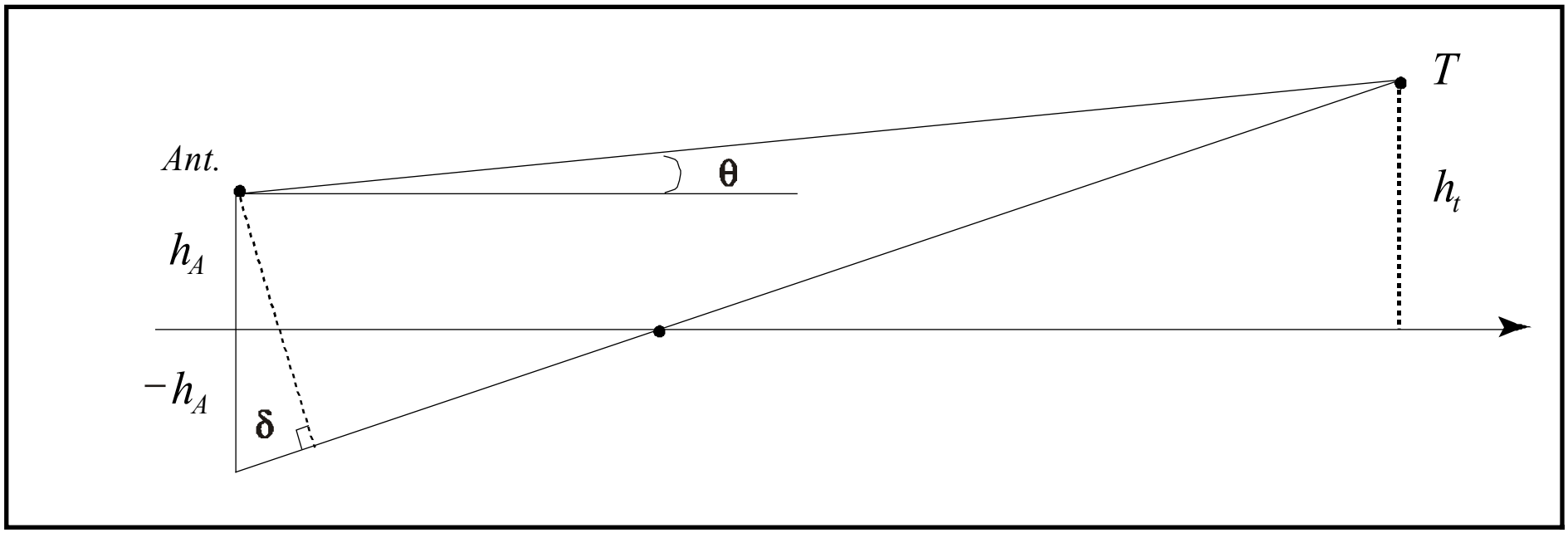
Noto F per calcolare la portata radar occorre moltiplicare la potenza ricevuta per F^4 e quindi la portata per F.

Una forma esplicita per il fattore F è la seguente

$$F = f(\theta)\left|\sqrt{1+\rho^2+2\rho\cos(\varphi+\frac{2\pi\delta}{\lambda})}\right|$$

in cui $f(\theta)$ è il guadagno di antenna in tensione a una via; ρ è il modulo del coefficiente di riflessione e φ è la fase del coefficiente di riflessione.

Riflessioni dal terreno o dal mare

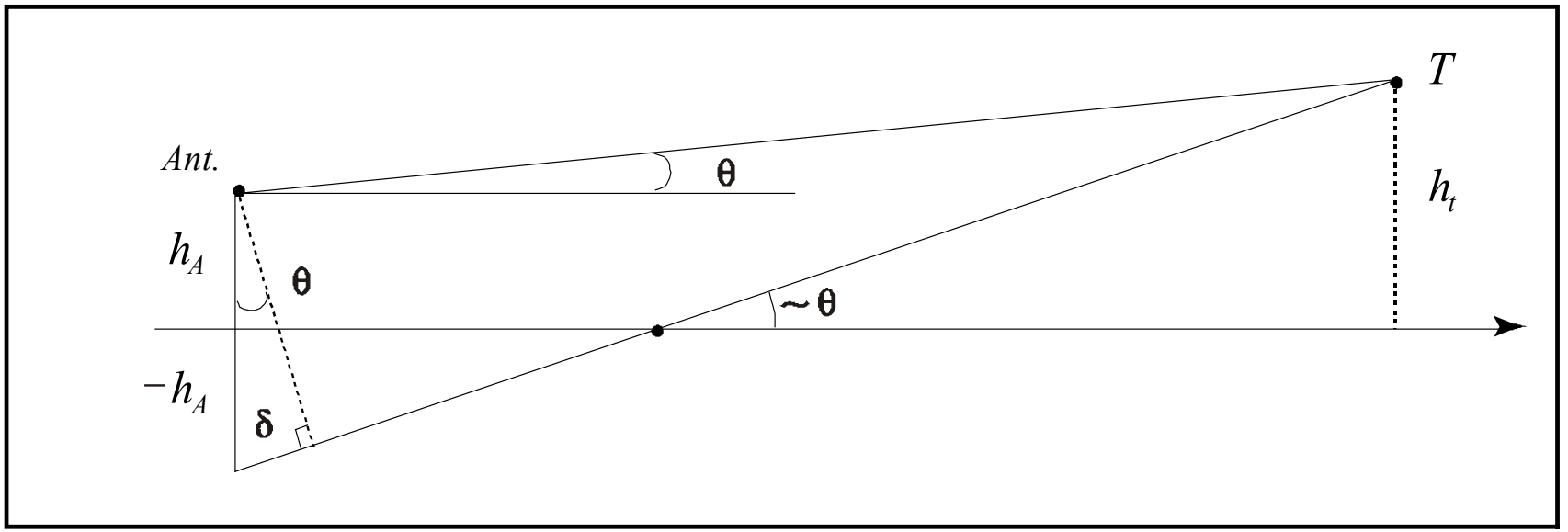


Schema geometrico per il calcolo del fattore di propagazione

Riflessioni dal terreno o dal mare

La differenza di fase tra i due cammini è pari a $$\Delta\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} + \varphi$$

in cui φ è il termine di fase dovuto al coefficiente di riflessione del terreno che viene assunto pari a $-\pi$.



Schema geometrico approssimato per bersaglio molto lontano

Riflessioni dal terreno o dal mare

La differenza di cammino δ tra il cammino riflesso e quello diretto è pari a $\delta = 2h_a \sin\theta$

Se l'angolo θ tende a zero (bersaglio all'orizzonte) i due raggi sono tali che $\delta = 0$ ma tra il cammino diretto e riflesso esiste uno sfasamento pari a π. Quindi se $\rho = 1$ i due raggi che pervengono al radar tendono a sottrarsi e il segnale ricevuto è praticamente nullo.

Più in generale, quando $\frac{2\pi}{\lambda} 2h_a sin(\theta) = \pi \cdot 2n, \quad n \quad intero$

i segnali ricevuti si sottraggono dando luogo ad una interferenza distruttiva.

Viceversa se: $\frac{4\pi}{\lambda} h_a \sin\theta = (2n+1)\pi, \quad n \quad intero$

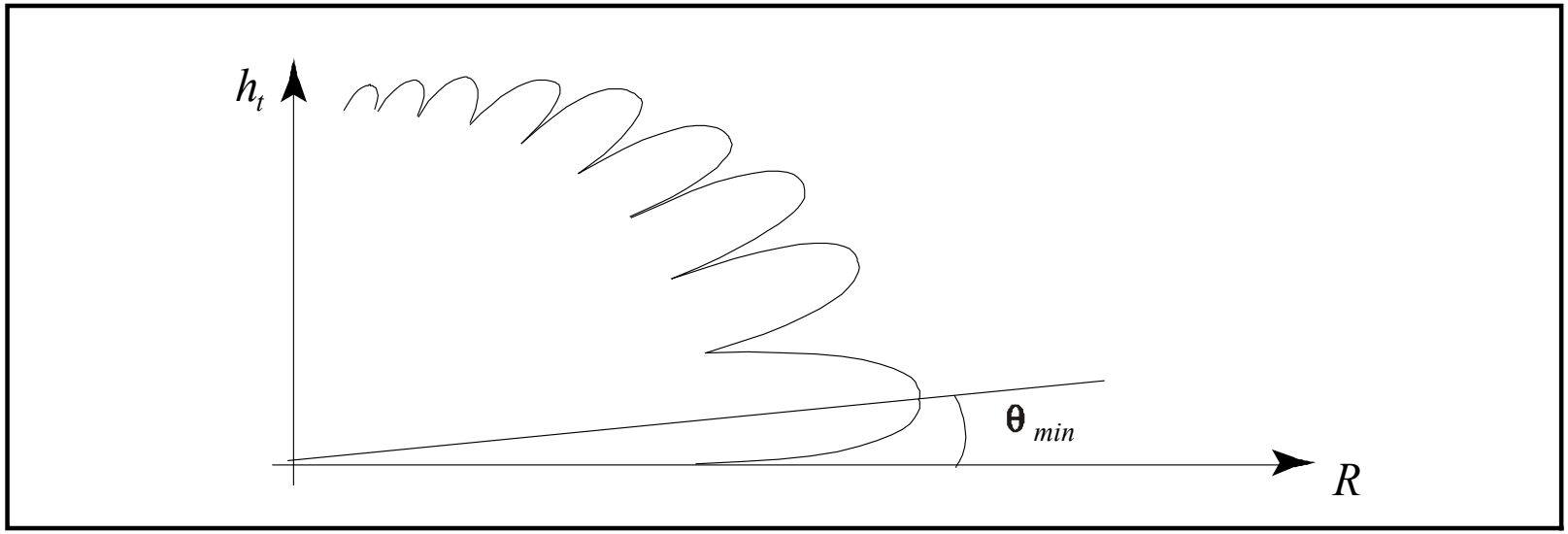
si ha interferenza costruttiva.

Riflessioni dal terreno o dal mare

Il minimo θ_0 per il quale $\Delta\phi = 0$ (interferenza costruttiva) è tale che

$$sin(\theta_0) = \frac{\lambda}{4h_a} \qquad \text{da cui} \qquad \theta_0 = arcsin\left(\frac{\lambda}{4h_a}\right)$$

Lungo tale direzione si ha un massimo.



Fenomeno del lobing nel piano distanza-elevazione

Riflessioni dal terreno o dal mare

Il diagramma ottenuto è un diagramma a margherita e descrive il fenomeno del LOBING. Quest'ultimo riguarda una modulazione della portata radar al variare della altezza del bersaglio prodotta dal fenomeno di interferenza del raggio diretto con il raggio riflesso sulla antenna.

L'andamento a margherita si esaurisce quando è possibile ritenere che l'intensità dell'eco riflesso sia diventata molto piccola a causa del pesaggio operato dal pattern di antenna.

Riflessioni dal terreno o dal mare

Se ad es. il radar deve osservare delle navi, per ridurre il fenomeno del lobing che inibisce la localizzazione di bersagli al di sotto di un angolo di elevazione pari a

$$\theta_{\min} \approx \frac{\lambda}{4h_a}$$

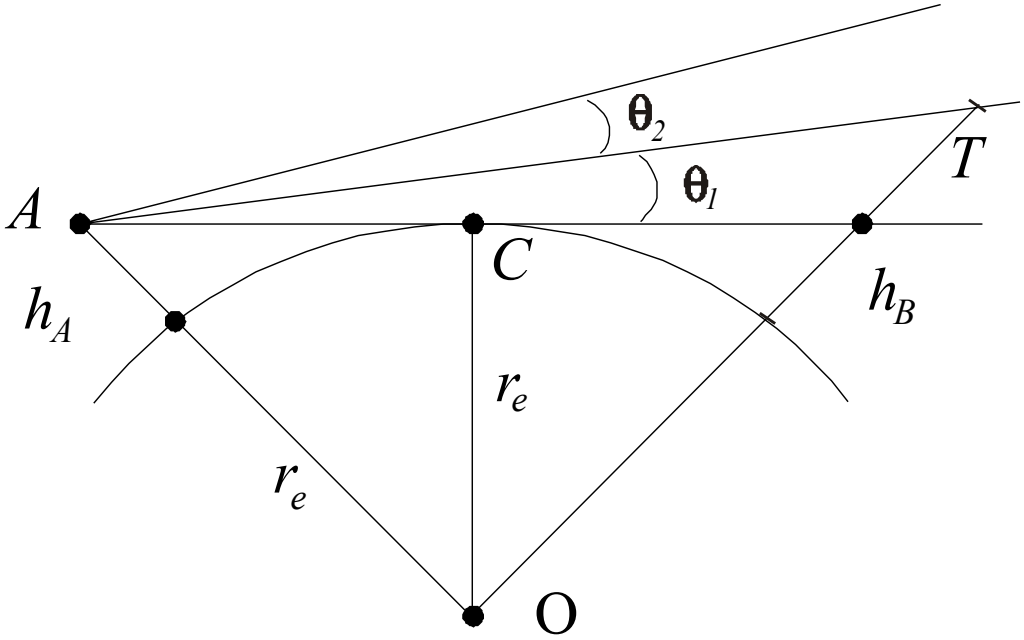
occorre usare delle lunghezze d'onda piccole in modo che $\theta_{\min}$ sia piccolo.

L'orizzonte Radar

L'atmosfera presenta proprietà variabili con la quota, si ha una variazione dell'indice di rifrazione che comporta la deflessione, rispetto alla traiettoria rettilinea, di un segnale elettromagnetico. Per usare un modello di terra curva con raggio e.m. rettilineo occorre supporre che la Terra abbia un raggio equivalente r_e pari a

$$r_e = \frac{4}{3} r_{Terra} \approx 8500km$$

L'orizzonte Radar



$$AO = h_A + r_e$$

$$OT = h_B + r_e$$

$$(r_e + h_A)^2 = d^2 + r_e^2$$

$$2h_A r_e + h_A^2 = d^2$$

L'orizzonte Radar

Se $h_A << r_e$ allora si trascura h_A^2

$$\Rightarrow \qquad d \approx \sqrt{2 h_A r_e}$$

In generale, per un oggetto a quota $h_B \neq 0$, si ha:

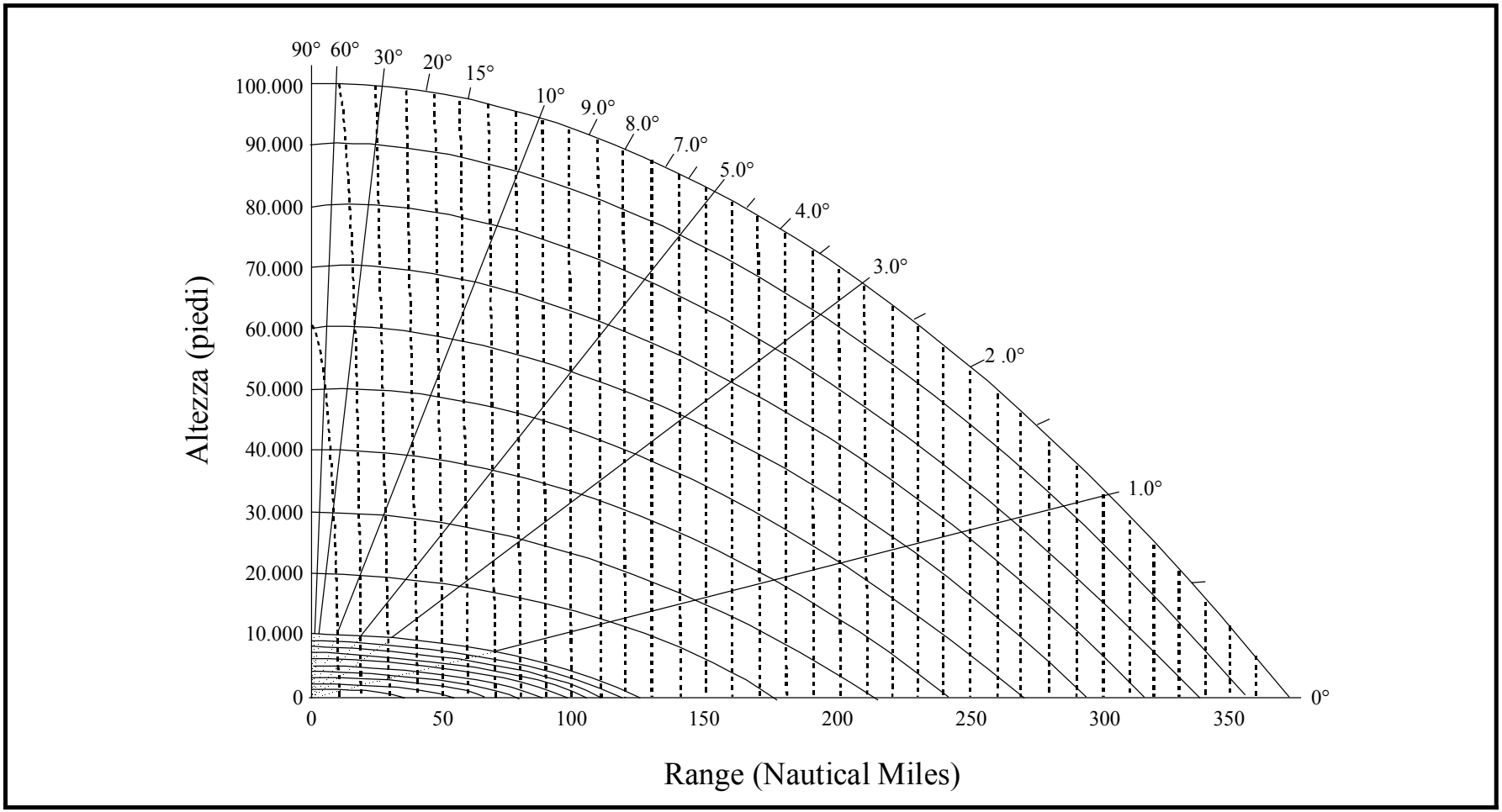
$$d \approx \sqrt{2 r_e}\,(\sqrt{h_A} + \sqrt{h_B})$$

sempre nelle ipotesi che $h_B << r_e$.

Se h_A e h_B vengono espresse in metri e d in Km allora la formula diventa $d \approx 4.12(\sqrt{h_A} + \sqrt{h_B})$

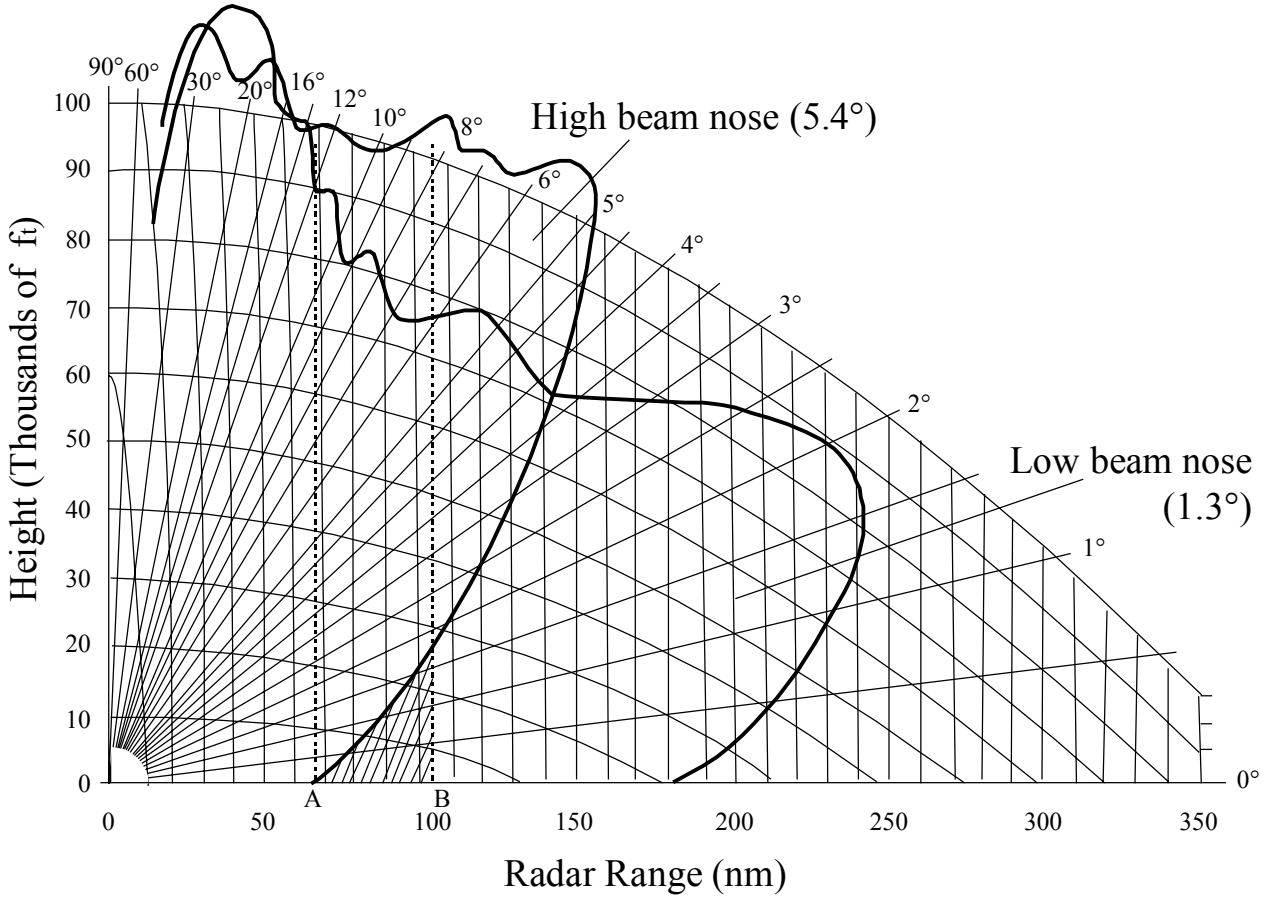
L'orizzonte Radar

Diagramma distanza-altezza-angoli (modello atmosferico standard CRPL)



L'orizzonte Radar

Esempio di diagramma di copertura

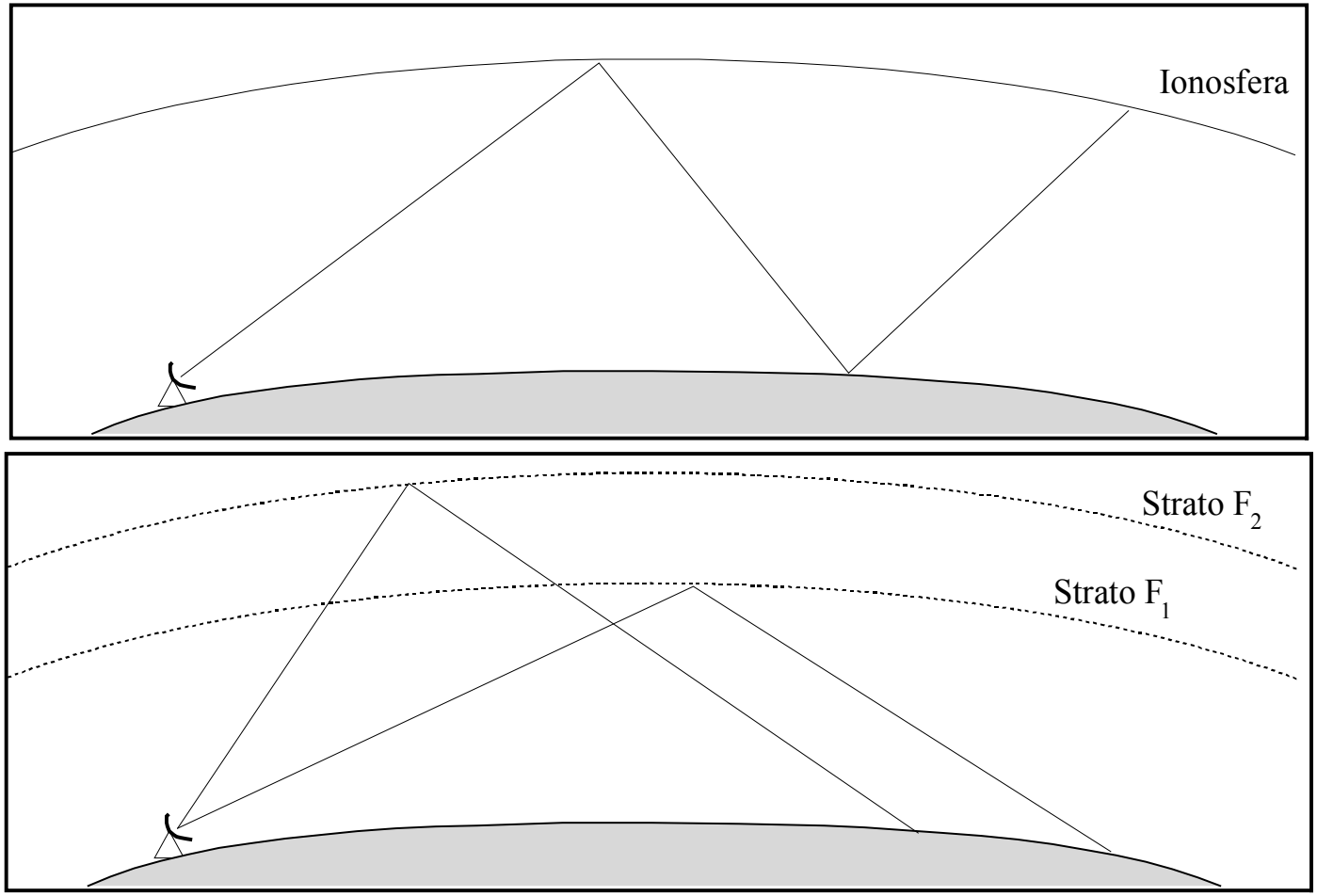


L'orizzonte Radar e l'OTH

Per vedere oggetti a bassa quota esistono varie alternative. La prima consiste nell'aumentare l'altezza del radar h_A (radar avionici o spaziali). La seconda consiste nello sfruttare la propagazione non rettilinea delle onde e.m. dovuta agli effetti di riflessione degli strati ionosferici. Per sfruttare tale effetto occorre usare un radar che operi nelle bande HF. Un simile radar viene indicato con la sigla OTH (Over The Horizon), ed è denominato "sky wave" per distinguerlo dai radar HF "groundwave" che utilizzano l'onda di terra.

L'orizzonte Radar e l'OTH

Riflessione ionosferica



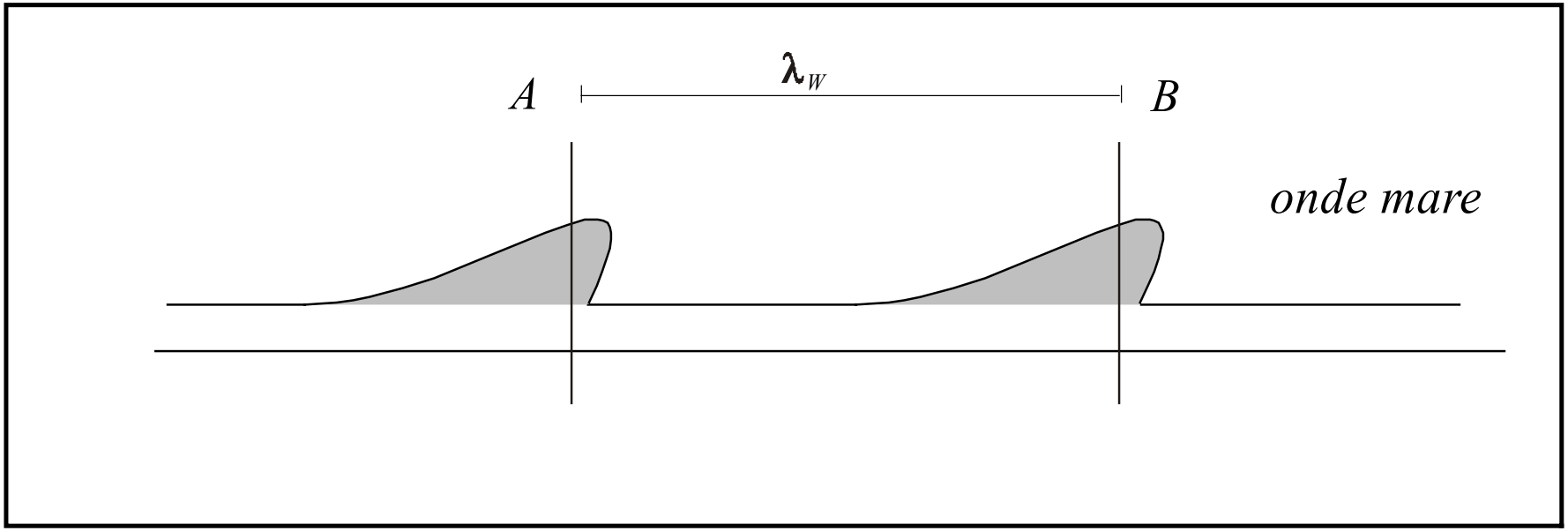
Effetto della riflessione da strati diversi della ionosfera

L'orizzonte Radar e l'OTH

Il moto ondoso può essere rilevato utilizzando il principio della riflessione di Bragg: se la superficie marina viene illuminata con un'onda e.m. la cui lunghezza d'onda è confrontabile con la lunghezza d'onda del mare si possono avere dei casi in cui echi successivi si sommano in fase. Il ritardo Δt tra le riflessioni in A e B è pari a

$$\Delta t = \frac{2\lambda_W}{c}$$

L'orizzonte Radar e l'OTH

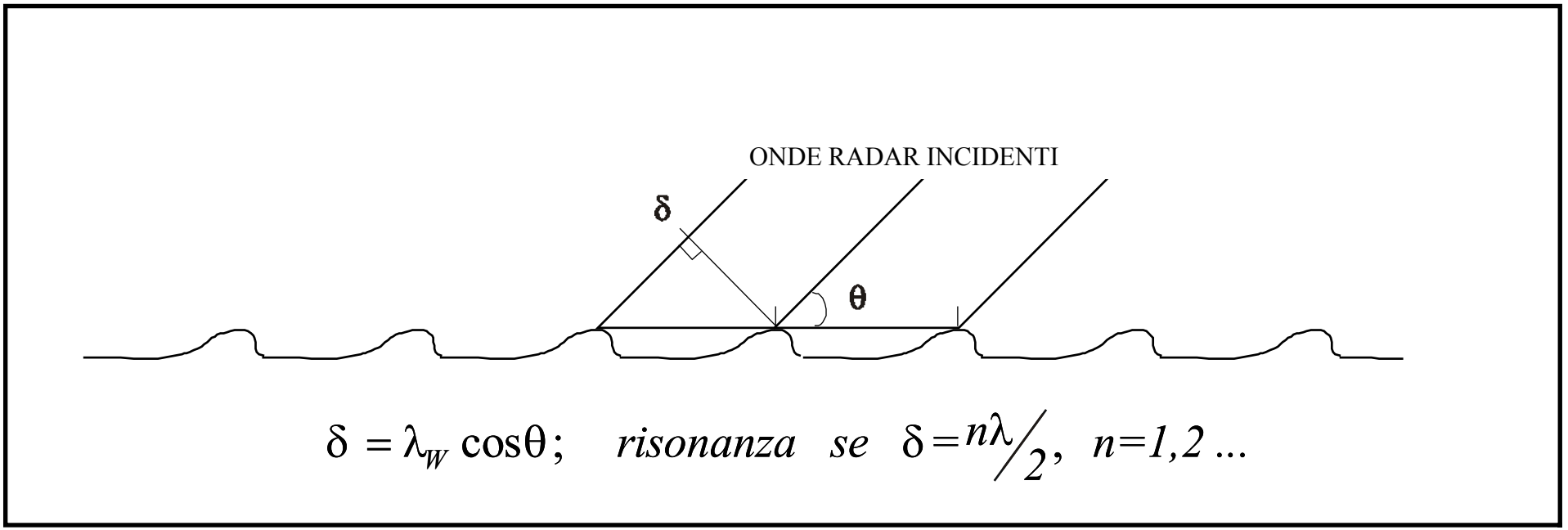


Rilevamento del moto ondoso

Se $\lambda_W = \lambda/2$ si hanno dei massimi dovuti ad una somma coerente di echi che possono essere rivelati dal radar (scattering di Bragg).

L'orizzonte Radar e l'OTH

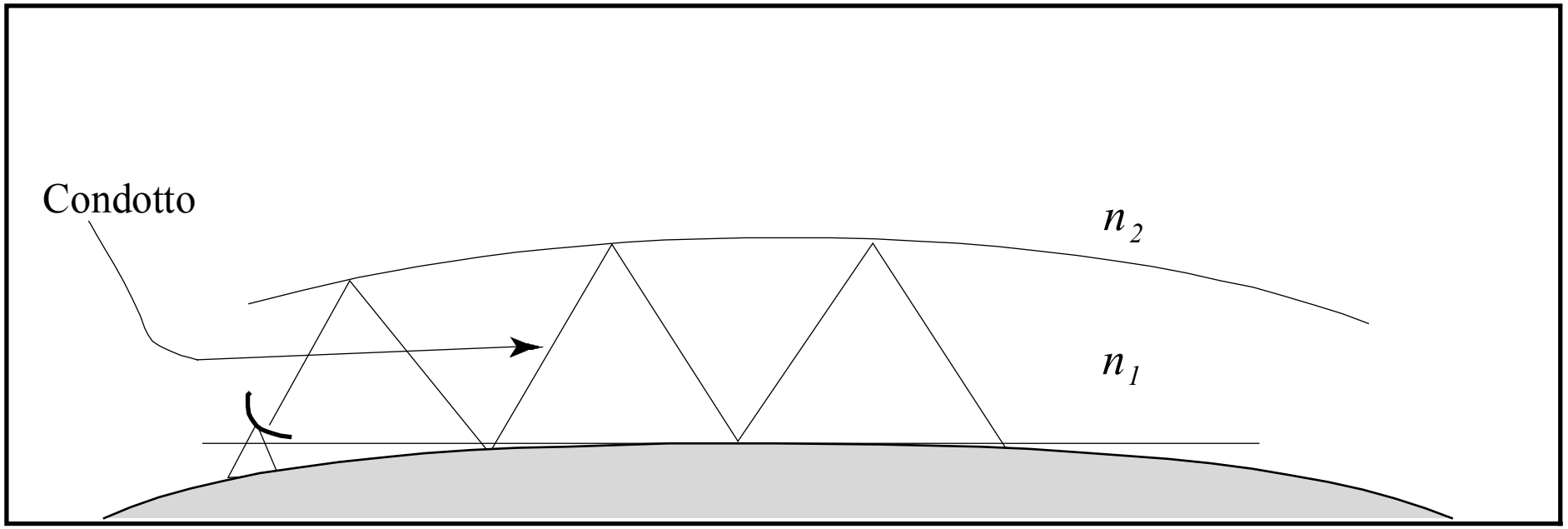
Dato che l'onda e.m. può incidere la superficie marina con un angolo di radenza (grazing) θ diverso da zero, la condizione di Bragg è: $\lambda_W \cos\theta = \lambda/2$



Angolo di incidenza sulla superficie marina

L’orizzonte Radar - Effetto condotto

Un'altra possibilità per vedere oltre l'orizzonte consiste nell'usare l'effetto condotto.



Effetto condotto

L’orizzonte Radar - Effetto condotto

Il condotto si forma quando si ha un fenomeno di inversione dell’andamento dell'indice di rifrazione al variare della quota. Lo strato di inversione deve essere abbastanza esteso in modo che l'antenna del radar sia all'interno del condotto. Un radar che opera sfruttando tale principio ha una portata elevatissima rispetto a quella in spazio libero perché l'attenuazione dovuta alla distanza R è proporzionale a R anziché a R^2. Il fenomeno però è di tipo aleatorio e quindi non può essere utilizzato con la necessaria affidabilità.