CORSO DI ELETTRONICA DELLE TELECOMUNICAZIONI

LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE RADIO

G. Lullo

A. A. 2005-2006

Ref.:
- F.E. Terman, "Electronic and Radio Engineering", 4th Ed., McGraw-Hill.
- D.C. Green, "Radio Communications", Longman-Pearson Ed. Ltd.
- A. Paraboni, M. D'Amico, "Radiopropagazione", McGraw-Hill.

W. Hewlett D. Packard F. Terman

(Stanford – 1952)

La propagazione delle onde radio da un'antenna trasmittente ad una ricevente può avvenire in diversi modi:

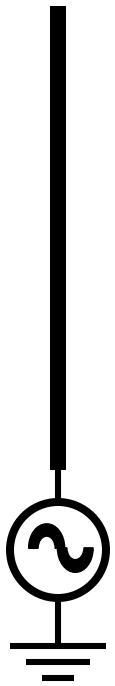
- onda di superficie (*ground wave*);
- onda ionosferica (*sky wave*);
- onda troposferica (*space wave*);
- diffusione troposferica (*scattering*);
- satellite per telecomunicazione.

BANDE DI FREQUENZA

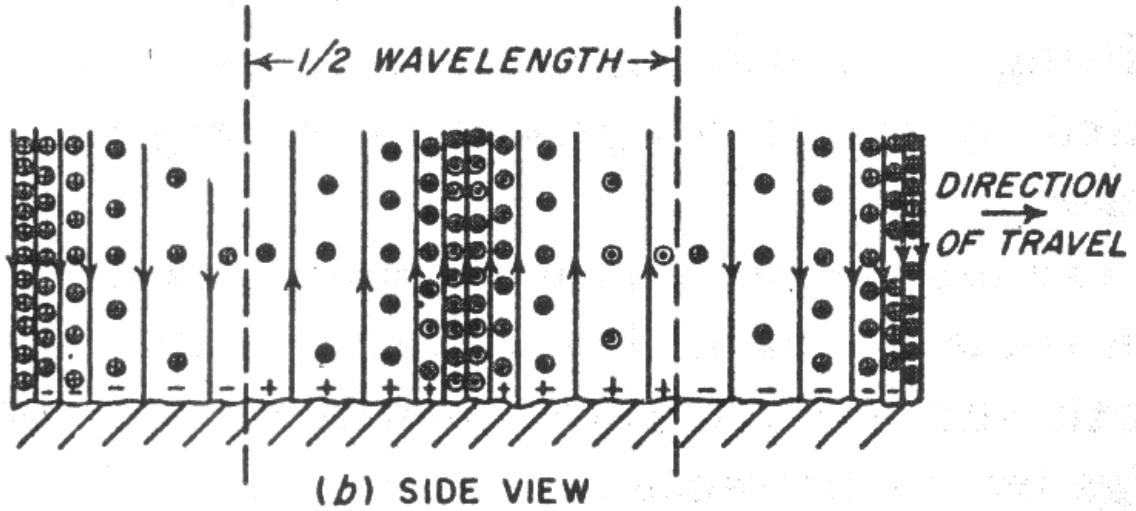
10 – 30 KHz	Very Low Freq.	VLF	100 – 10 km
30 – 300 KHz	Low Freq.	LF	10 – 1 km
0,3 – 3 MHz	Medium Freq.	MF	1 – 0,1 km
3 – 30 MHz	High Freq.	HF	100 – 10 m
30 – 300 MHz	Very High Freq.	VHF	10 – 1 m
0,3 – 3 GHz	Ultra High Freq.	UHF	100 – 10 cm
3 – 30 GHz	Super High Freq.	SHF	10 – 1 cm

ONDA DI SUPERFICIE O TERRA (GROUND WAVE)

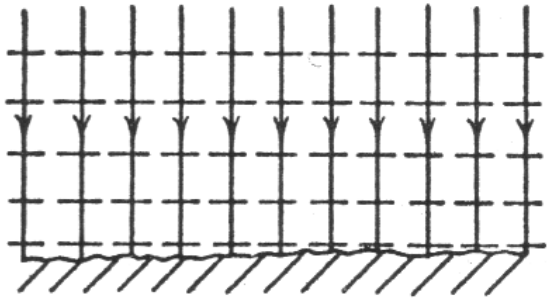
Si utilizza nelle bande VLF, LF e parte bassa delle MF



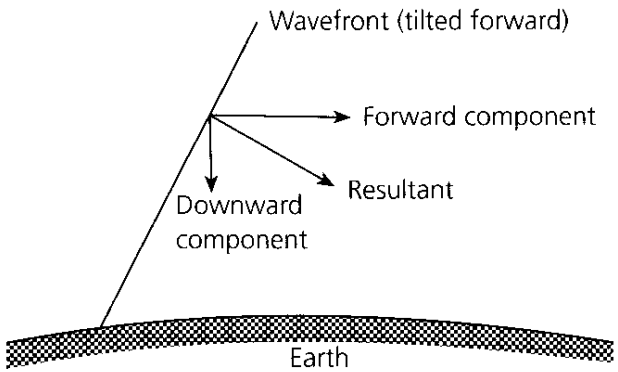
λ/4
pol. vert.



(b) SIDE VIEW



(a) FRONT VIEW



ONDA DI SUPERFICIE O TERRA (GROUND WAVE)

Attenuazione (analisi di Sommerfeld)

- Il campo elettrico sarebbe inversamente proporzionale alla distanza (attenuazione in spazio libero).
- A causa delle perdite di potenza nel terreno, l'attenuazione è superiore.

$E_D = K\, E_1 / D$ V/m con E_1 campo a 1km dal trasmett., D distanza in km
K fattore di attenuazione

Se l'antenna è un monopolo corto (omnidirez. e direzionalità verticale tipo coseno):

$E_D = (K\, 300 \sqrt{P_T}) / D$ mV/m con P_T potenza trasmessa in kW

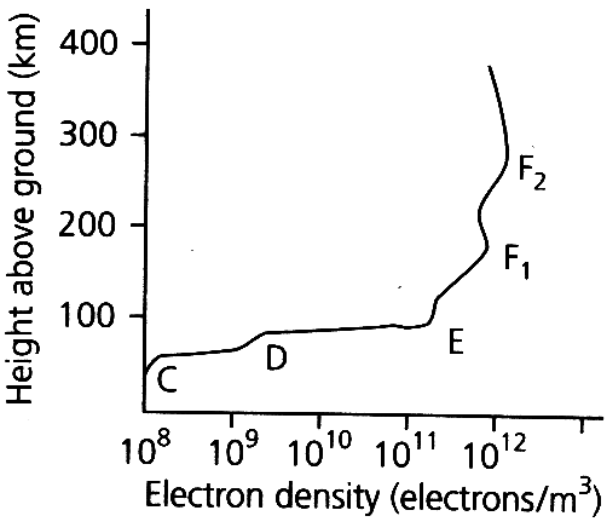
K dipende da frequenza, distanza, conducibilità e costante dielettrica del terreno. A breve distanza dal trasmett. $K \approx 1$. All'aumentare della distanza, K tende a diventare inv. proporz. a D. Inoltre K è inv. proporz. a f^2.

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

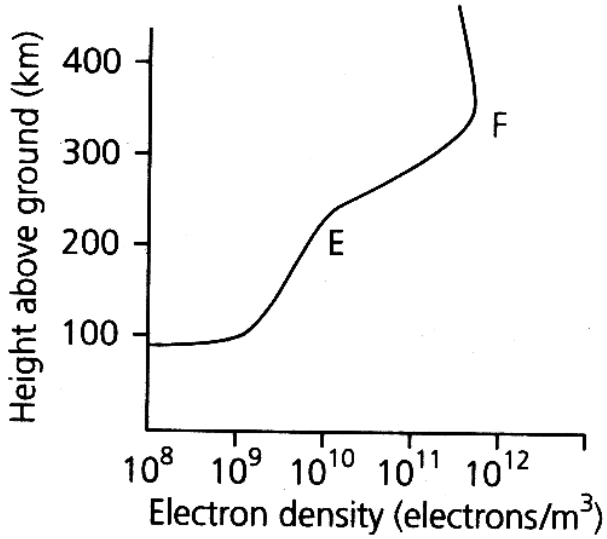
La Terra è circondata da:

- Troposfera, dove avvengono i fenomeni metereologici (0 – 10km);
- Stratosfera (10 – 50 km);
- Ionosfera, dove la radiazione solare, UV et al., genera elettroni liberi ed ioni ad elevata densità (50 – 400 km).

giorno



notte

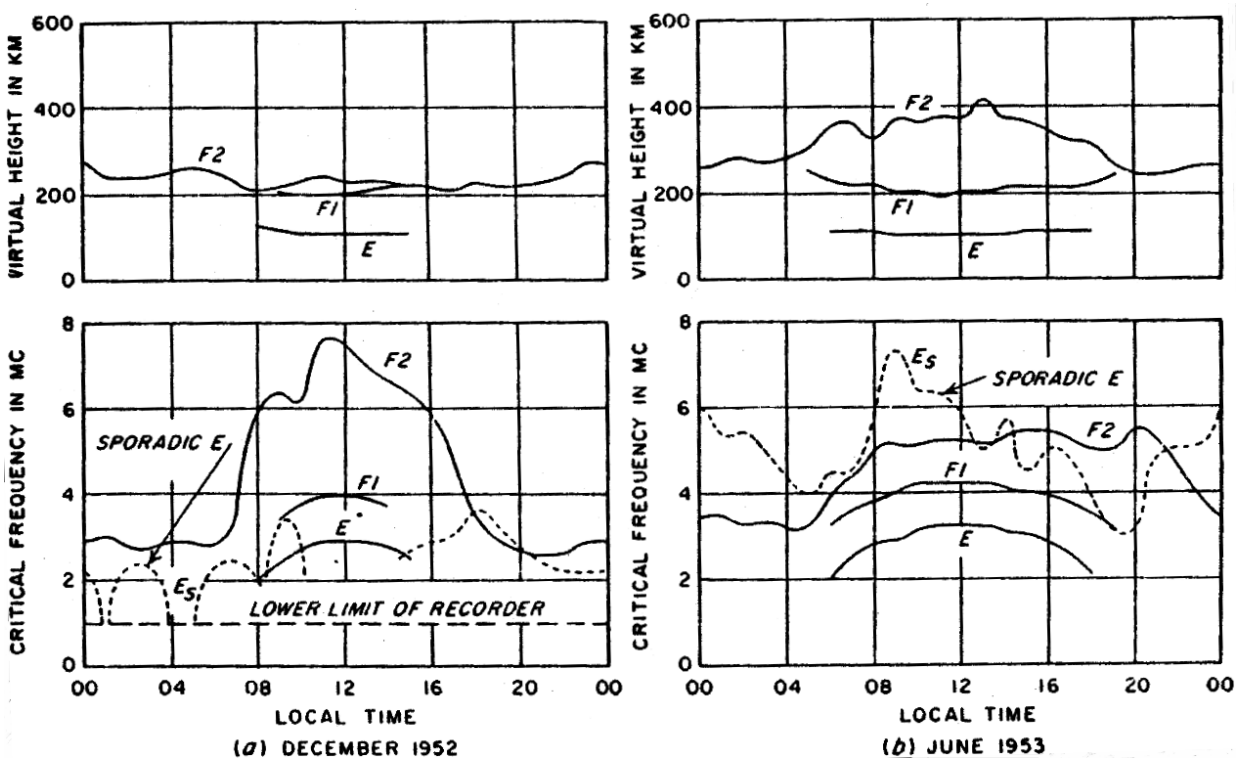


D	50-90	km
E	110	km
F_1	220	km
F_2	250-350	km
E_{spor}	90-130	km

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

La posizione e la densità degli strati sono influenzate da:

- ora del giorno (buio o illuminazione);
- posizione sulla Terra (latitudine);
- periodo dell'anno (inverno o estate);
- ciclo di attività solare – numero di macchie solari (periodo 11 anni).



ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

Quando le onde attraversano la ionosfera, il campo elettrico esercita una forza sugli elettroni liberi, che vengono accelerati. L'effetto sugli ioni è di gran lunga inferiore, a causa del loro notevole peso.

Si consideri uno spazio di 1 m^3 in cui il campo sia $E = E_m \sin\omega t$ V/m

La capacità del cubo è $C = \varepsilon_o S/d$; la corrente $i = C\, dV/dt$ con $V = E \cdot d$.

La densità di corrente capacitiva risulta $j_c = \omega\, \varepsilon_o E_m \cos\omega t$ A/m^2

Un elettrone di massa m e carica e a causa del campo si muove secondo:

$-Ee = m\, dv/dt$, che integrata dà $v = (e/m\omega)\, E_m \cos\omega t$

La densità di corrente in presenza di una densita elettronica N (m^{-3}) risulta:

$j_e = -Nev = -\,(Ne^2/m\omega)\, E_m \cos\omega t$

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

Pertanto la densità di corrente complessiva è:

$j = j_c + j_e = \omega\, [\varepsilon_o - (Ne^2/m\omega^2)]\, E_m \cos\omega t$

per cui $\varepsilon_R = 1 - (Ne^2/m\omega^2\varepsilon_o)$

L'indice di rifrazione risulta: $n = \sqrt{\varepsilon_R} = \sqrt{[1 - (Ne^2/m\omega^2\varepsilon_o)]}$

Sostituendo: $n = \sqrt{[1 - (81\, N / f^2)]}$

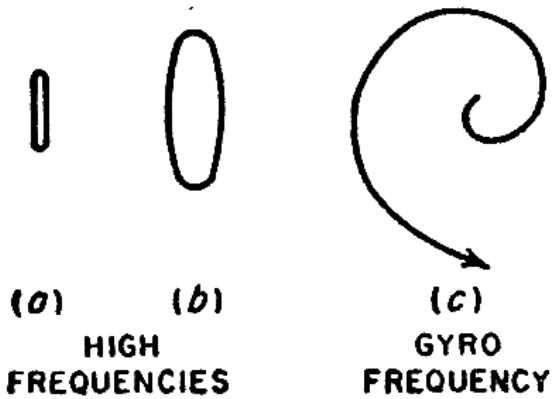
Si può usare la legge di Snell per calcolare la rifrazione delle onde negli strati ionosferici: $n_i \sin\theta_i = n_r \sin\theta_r$

L'indice di rifrazione è in genere minore dell'unità.

Può annullarsi per: $f = \sqrt{(81\, N)}$

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

Effetti del campo magnetico terrestre:



• Gli elettroni si muovono non oscillando lungo la direzione del campo elettrico, ma seguendo una traiettoria ellittica. La polarizzazione da lineare diventa ellittica (rotaz. di Faraday).

• Al diminuire delle frequenza gli effetti del c.m.t. sono più marcati; si raggiunge la *risonanza di ciclotone* e la traiettoria diventa una spirale con raggio (e velocità) crescente. Si ha notevolissimo assorbimento di energia. La **girofrequenza** si ha attorno 1400kHz.

•A causa del campo magnetico, la propagazione dipende dall'angolo tra campo elettrico e magnetico terrestre: emergono fenomeni di **birifrangenza** per cui si crea un *raggio ordinario* ed uno *straordinario*, con polarizzazione ellittica, aventi traiettoria e velocità diverse.

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

Perdite e propagazione:

• Gli elettroni, urtando con le molecole dell'aria, cedono energia.
• L'energia dissipata dipende dalla pressione dell'aria, dalla velocità raggiunta dagli elettroni e dalla loro densità.
• Il maggiore assorbimento avviene dove la pressione è più alta: strato D e parte bassa dell'E.
• A parità di altre condizioni, l'assorbimento aumenta alle basse frequenze perché la velocità raggiunta dagli elettroni è maggiore, diventa massimo alla girofrequenza (MF).
• Ad alte frequenze (HF) le onde superano lo strato D e possono essere rifratte dagli strati successivi E ed F.
• Le frequenze molto alte (VHF, UHF, SHF) in genere passano attraverso la ionosfera.
• Le frequenze molto basse (VLF, LF), vedono D come uno strato ad alta conducibilità e sono riflesse.

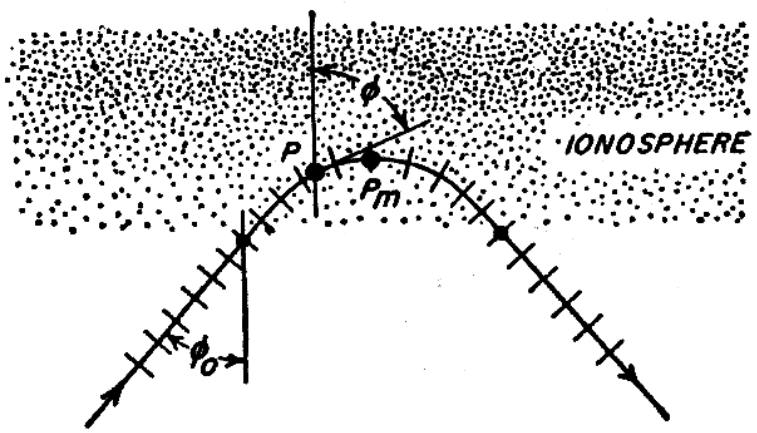
ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

Come prima visto, l'indice di rifrazione risulta: $n = \sqrt{[1 - 81\, N / f^2)]}$

Se $f^2 < 81\, N$, l'indice di rifrazione diventa immaginario, cioè nello strato si può avere solo onda evanescente.

Più in generale, negli strati ionosferici $n<1$, per cui:

veloc. fase = (veloc. luce / n) > veloc. luce



Per la legge di Snell: $n_i \sin\theta_i = n_r \sin\theta_r$
Se $n_i=1$, $\sin\theta_i = n_r \sin\theta_r$ dà la direzione di propagazione.
Nel punto P_m , "punto di riflessione", $\sin\theta_r = 1$ e ciò avviene nel punto in cui $n_r = \sin\theta_i$

Allora, minore è θ_i , minore è l'indice n_i necessario per avere riflessione totale e quindi maggiore deve essere la densità elettronica dello strato.

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

Per incidenza verticale, $\theta_i = 0°$ e la $n_r = sin\theta_i$ porta a considerare il caso di indice di rifrazione nullo.

$f = \sqrt{(81\ N)}$

Tale frequenza viene detta **frequenza critica** f_c dello strato: tutte le frequenze minori di f_c verranno riflesse indipendentemente dall'angolo di incidenza in quanto, a parità di densità elettronica, danno luogo ad un indice di rifrazione immaginario.

L'**altezza virtuale** è definita come metà del tempo che intercorre tra quando viene lanciato un impulso verticale e quando la sua eco viene ricevuta. Non è l'altezza reale dello strato di riflessione, ma apparentemente è maggiore a causa del rallentamento dell'onda nello strato ionizzato dove:

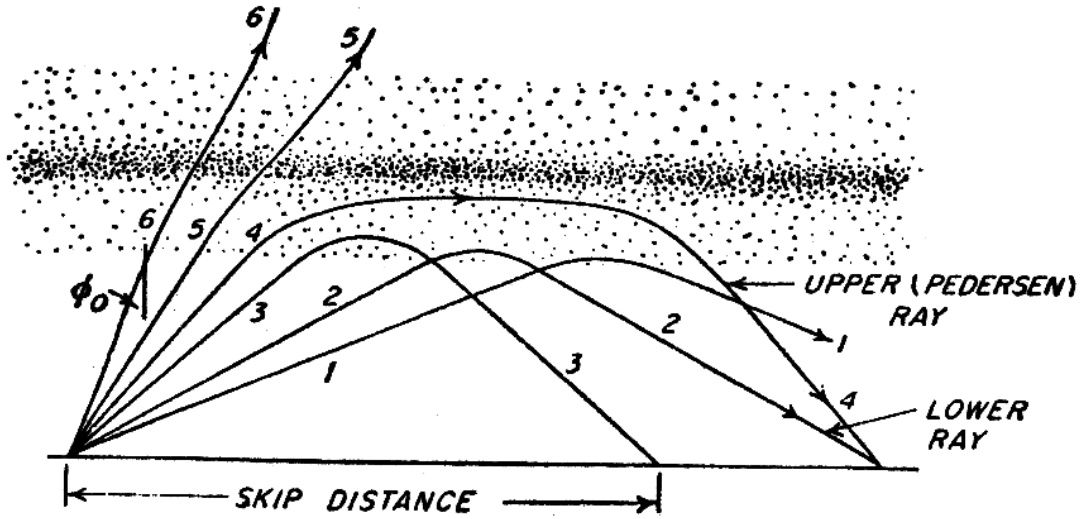
$$veloc.\ gruppo = veloc.\ luce\ \ x\ \ n$$

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

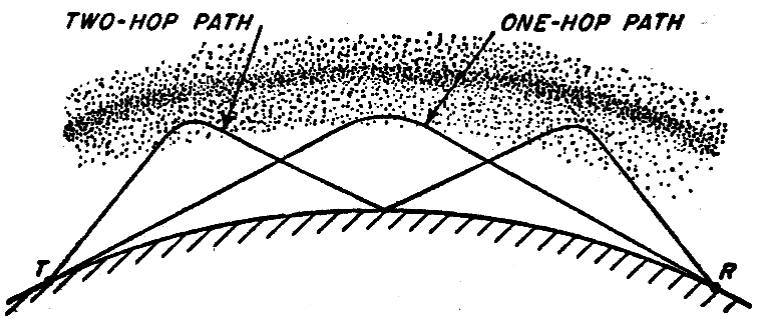
Per incidenza non verticale ed $f > f_c$, dalla $n_r = sin\theta_i$ si osserva che al diminuire di θ_i (raggi 1, 2, 3) aumenta la penetrazione nello strato ionizzato perché sono necessarie densità elettroniche N superiori per avere adeguato n_r.

Skip distance è definita, per prefissata frequenza, la minima distanza dal trasmettitore alla quale una onda ionosferica sarà riflessa sulla terra.

La frequenza alla quale un determinato punto di ricezione dista dal trasmettitore esattamente della skip distance è detta **Maximum Usable Frequency** (**MUF**). Una f > MUF non consente al raggio di tornare sulla Terra nel punto di ricezione considerato.

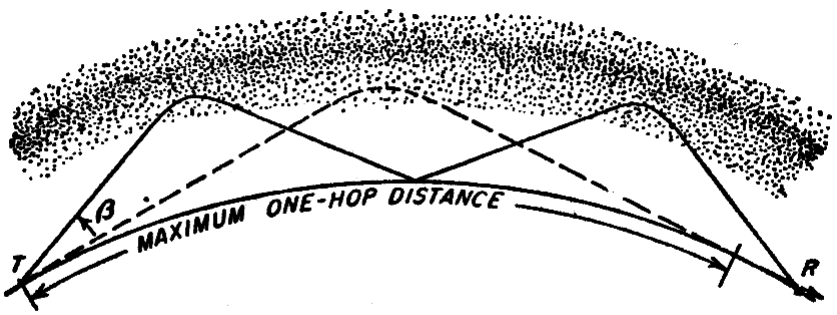


ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

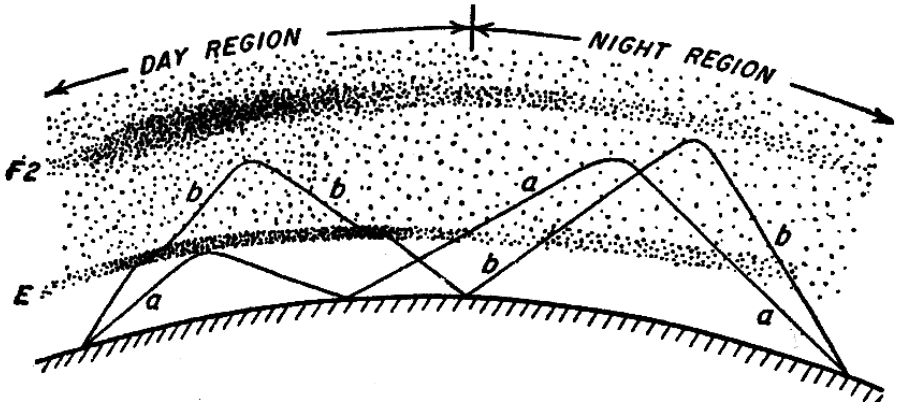


(a) SKIP DISTANCE LESS THAN HALF DISTANCE TO THE RECEIVER

Esempi di propagazione multi-hop



(b) DISTANCE TO RECEIVER GREATER THAN MAXIMUM POSSIBLE ONE-HOP DISTANCE FOR LOWER RAY



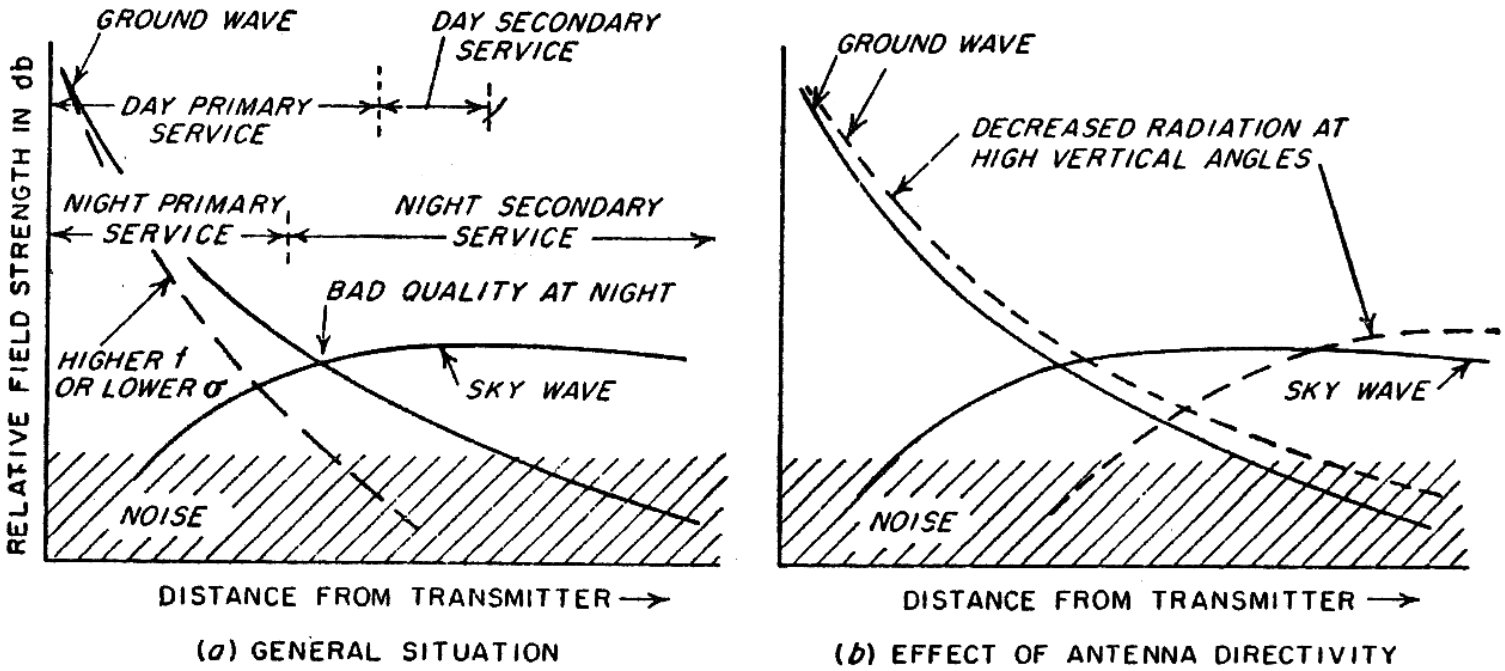
Max one-hop dist.:
2000 km (E) - 4000 km (F_2)

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

FADING

ONDA IONOSFERICA (SKY WAVE)

AREA DI SERVIZIO



ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

• Propagazione nell'atmosfera non ionizzata, fino a 10-30 km (la troposfera arriva a 10km).

• Utilizzata a frequenze superiori a 30MHz. Tali frequenze hanno forte attenuazione come onda di superficie, non sono riflesse come onde ionosferiche, ma sono sufficientemente corte da consentire antenne direttive.

• Si realizzano prevalentemente collegamenti a portata ottica (**LOS** = *Line Of Sight*), ma si può arrivare anche oltre.

• Si cerca di evitare gli effetti dovuti alla presenza del suolo, elevando le antenne ed usando antenne direttive.

• E' essenziale studiare l'andamenento dell'indice di rifrazione degli strati bassi dell'atmosfera.

ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

La International Telecommunication Union (**ITU-T**) ha definito l'**atmosfera standard**, per la quale l'indice di rifrazione n è dato dalla relazione:

$$n = 1 + [(77{,}6\ P/T) + (3{,}8 \bullet 10^5\ E/T^2)] \bullet 10^{-6}$$

T temperatura in Kelvin
P press. atmosf. in mbar
E press. parz. vap. acq. in mbar
($E \approx P / 100$)

Le variazioni dell'indice sono molto piccole.
Poiché i tre parametri decrescono con la quota, si usa una approssimazione esponenziale dell'andamento dell'indice:

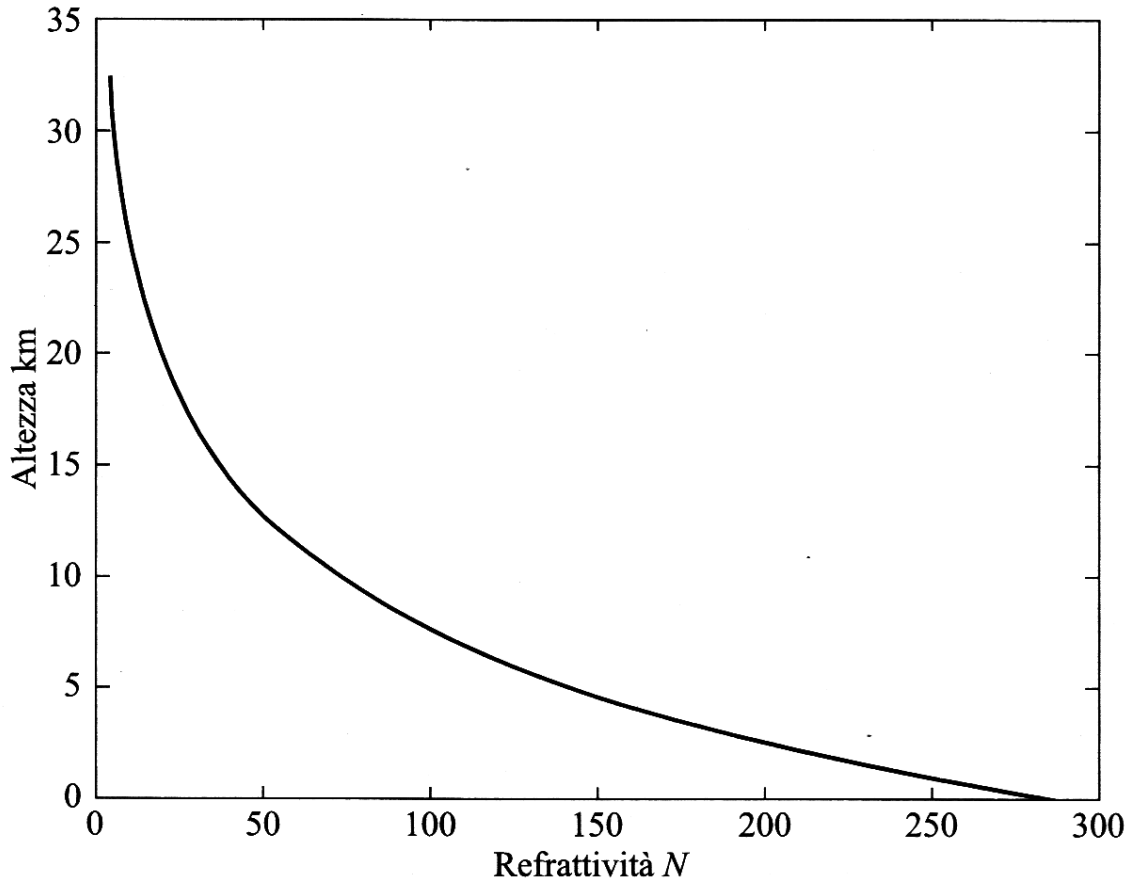
$$n = 1 + a\ e^{-bh} \qquad \text{con} \qquad a = 0{,}315 \bullet 10^{-3} \quad \text{e} \quad b = 0{,}136\ \text{km}^{-1}$$

Es.: $n = 1{,}000315$ @ h=0; $n = 1{,}00027$ @ h=1km; $n = 1{,}00024$ @ h=2km

ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

Poiché le variazioni dell'indice sono molto piccole, si preferisce lavorare con la **refrattività:** $N = (n - 1) \bullet 10^6$

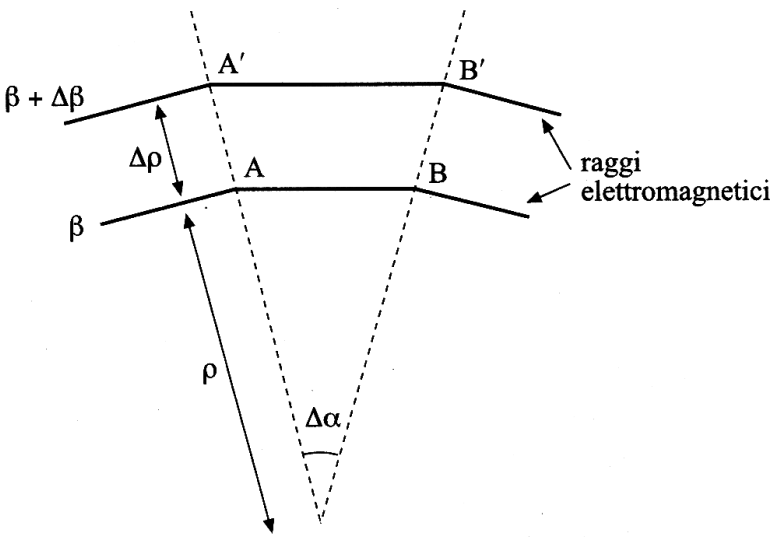
Per atmosfera standard, a livello del suolo: $N = 289$



ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

Conseguenza della variazione dell'indice di rifrazione: poiché l'indice dipende dall'altezza rispetto la superficie terrestre, che è curva, un'onda piana (raggio luminoso) che si propaga orizzontalmente viene rifratta "seguendo" la curvatura terrestre.

Calcolo del raggio di curvatura: si considerino i raggi AB ed A'B' che vengono piegati mantenendo le superfici equifase AA' e BB'. La costante di propagazione $\beta(h) = \beta_o\, n(h)$ dipende dall'altezza h.



Le variazioni di fase nei percorsi AB ed A'B' sono eguali.

$$\beta\, \rho\, \Delta\alpha = (\beta + \Delta\beta)(\rho + \Delta\rho)\, \Delta\alpha$$

Semplificando ed approssimando:

$$\beta\, \Delta\rho + \rho\, \Delta\beta \approx 0$$

ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

Questa può essere riscritta come: $\Delta\beta / \Delta\rho = -\beta / \rho$

Essendo $\beta = \beta_o\, n$, si ottiene: $\Delta n / \Delta\rho = -n / \rho$

Per piccole curvature, $\Delta\rho \approx \Delta h$, quindi: $\rho = -n\ (\Delta h / \Delta n)$

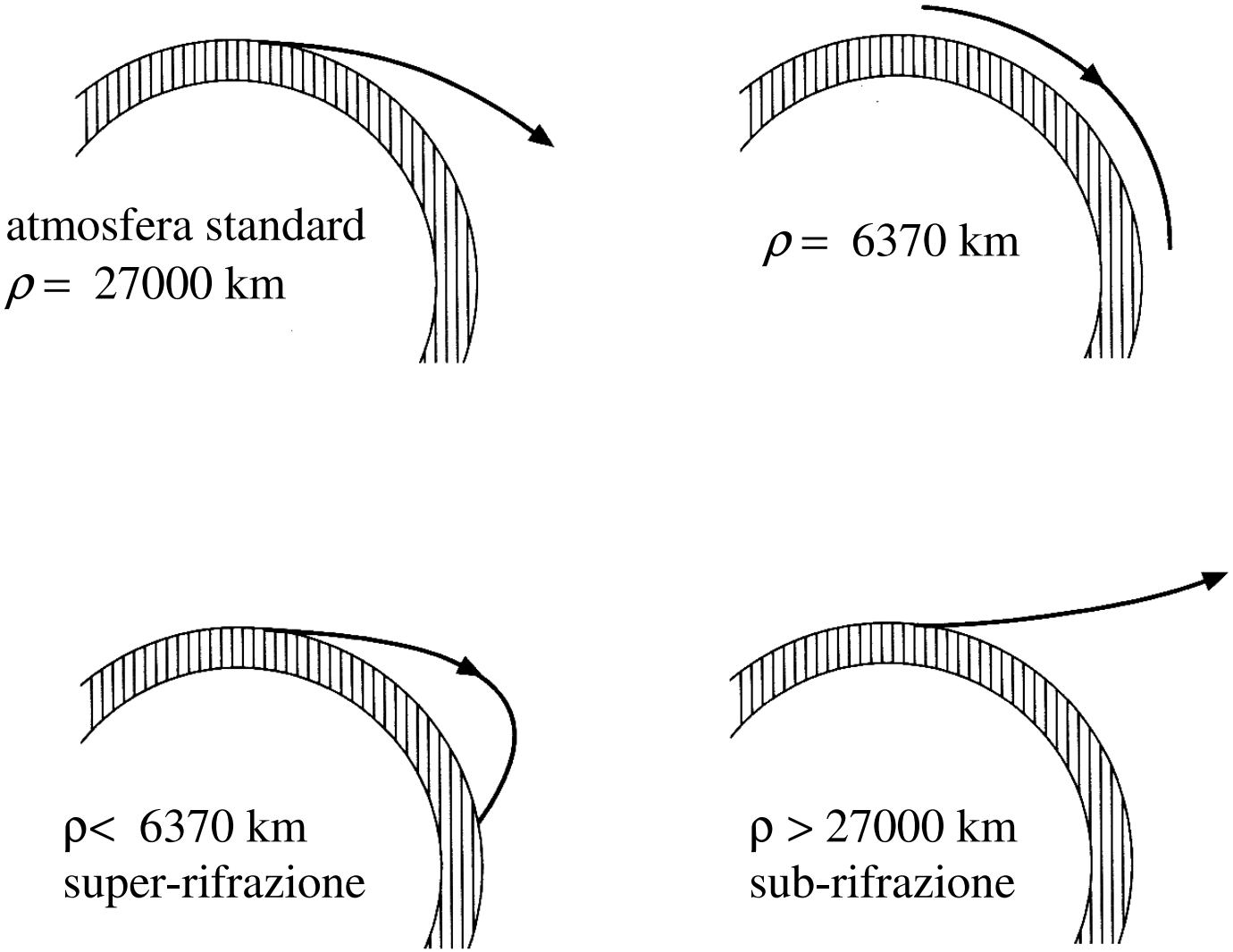
Approssimando n ad 1 ed usando la refrattività:

$$\rho = 10^6 / (-\Delta N / \Delta h)$$

Per atmosfera standard, a livello del suolo: $\Delta N / \Delta h$ = - 37 km^{-1}
da cui consegue: $\rho =$ 27000 km

In condizioni di forte variazione d'indice, se: $\Delta N / \Delta h$ = - 157 km^{-1}
si ottiene: $\rho =$ 6370 km !!!

ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)



ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

Nel progettare un collegamento radio è scomodo tenere conto contemporaneamente della curvatura del raggio EM e della superficie terrestre.

Si preferisce lavorare con raggi EM virtualmente rettilinei. Poiché interessa, ad ogni distanza, l'altezza del raggio rispetto la superficie terrestre, si può "predistorcere" la curvatura terrestre introducendo un **raggio terrestre equivalente R_{eq}.**

Nel seguito si farà l'approssimazione di usare archi di parabola al posto di archi di circonferenza:

$$y = x^2/2R$$

dove $R = 1/y''$ è il raggio della circonferenza che si approssima.

ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

"Abbassamento dall'orizzonte" della superficie terrestre: $y_a = x^2/2R_o$

Abbassamento del raggio EM: $y_b = x^2/2\rho$

Abbass. della sup. terrestre deformata rispetto il raggio rettil.: $y_c = x^2/2R_{eq}$

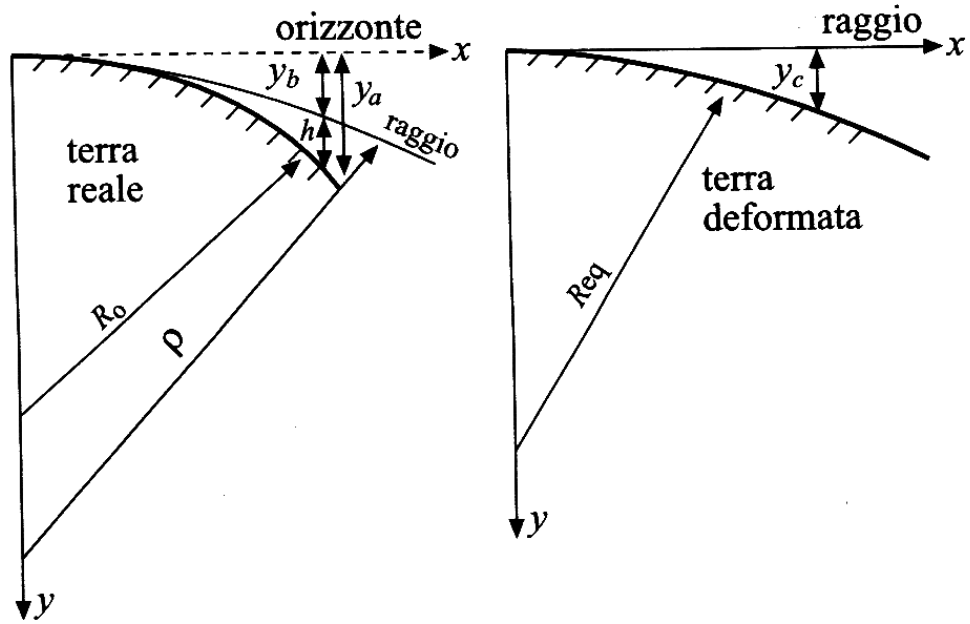
Poiché: $y_c = y_a - y_b$

si ha: $1/R_o - 1/\rho = 1/R_{eq}$

Usando la: $1/\rho = -dn/dh$

si ottiene:

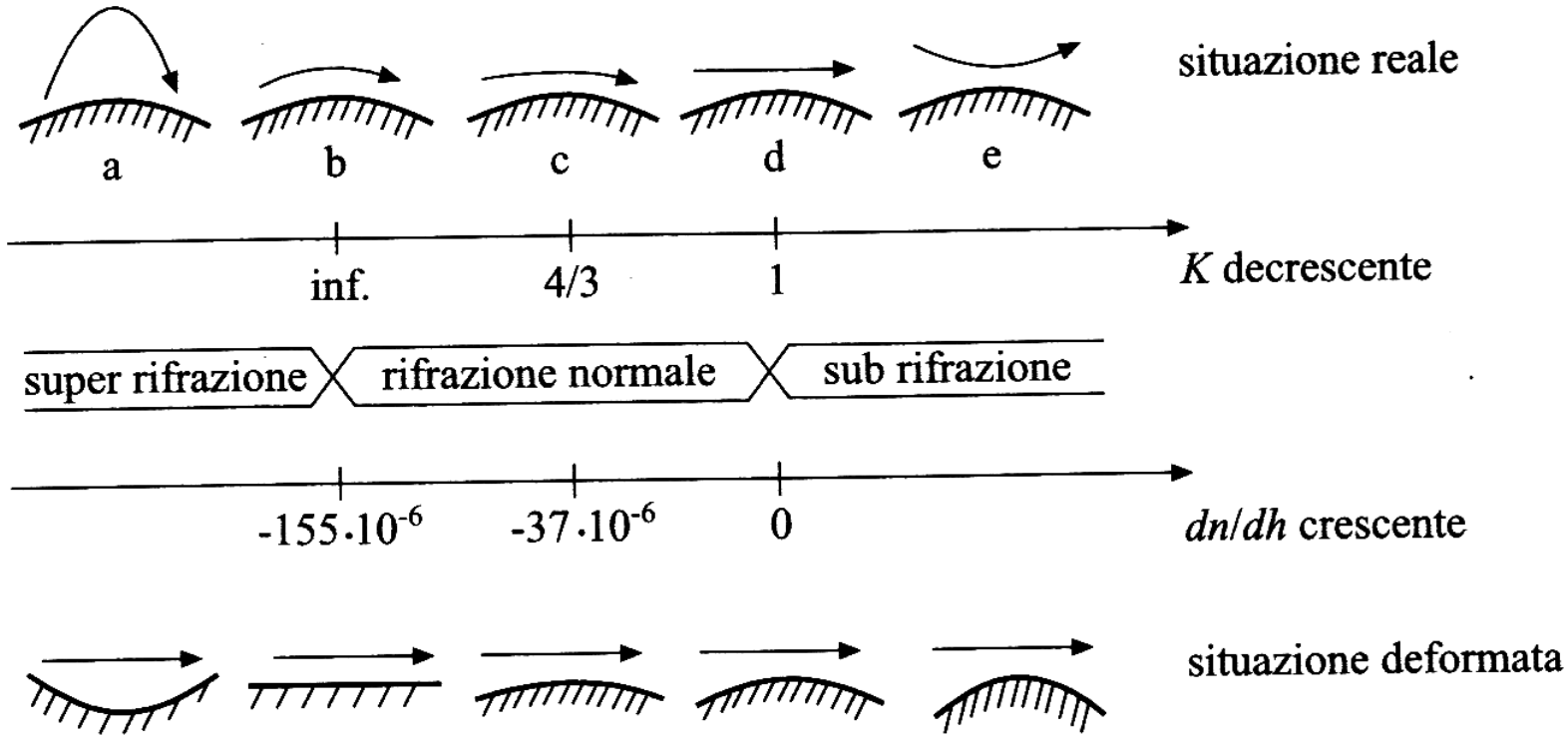
$$R_{eq} = R_o(1/(1+R_o\, dn/dh))$$



ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

In genere si usa l'espressione $R_{eq} = K\,R_o$ dove K è il **coefficiente di correzione del raggio terrestre**.

Poiché $R_o = 6370$ km, in condizioni standard si ricava $R_{eq} = 8500$ km con $K = 4/3$.



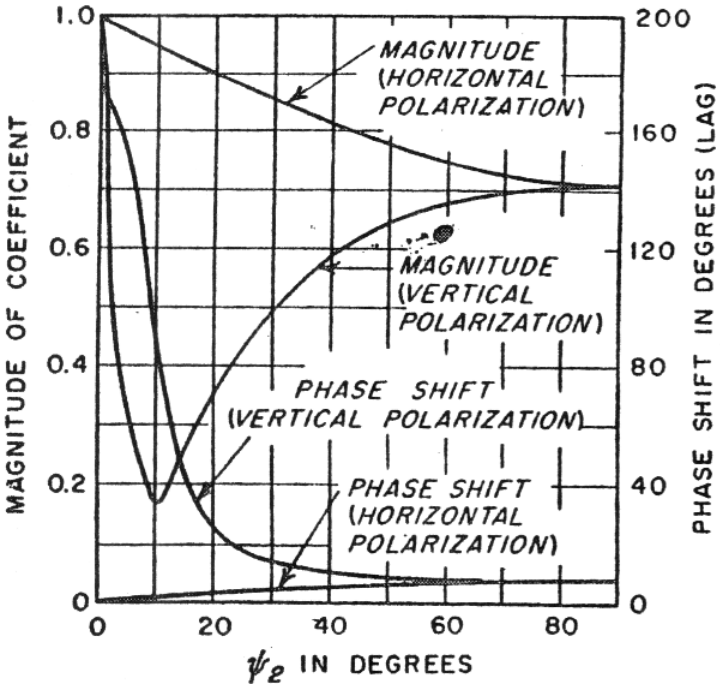
ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

Riflessione delle onde sulla superficie terrestre

Su un piano a $\sigma = \infty$ il coefficiente di riflesione Γ ha modulo unitario e fase 0° per polarizzazione verticale e orizzontale (?).

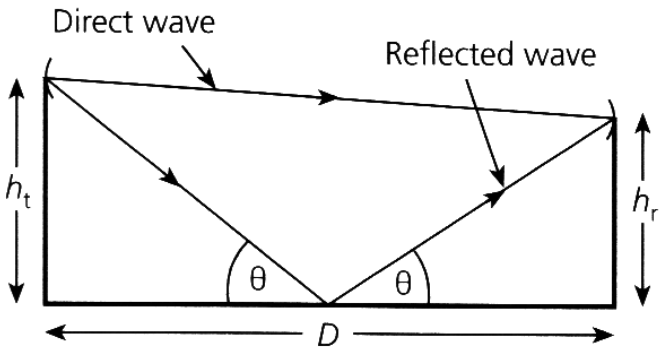
Su un terreno reale:
• in polarizzazione orizzontale, Γ ha modulo che aumenta con ψ_2 (angolo tra la direz. dell'onda ed il terreno) e fase prossima a 0°.
• in polarizzazione verticale, Γ ha modulo che diminuisce fino all'angolo di Brewster e poi risale; la fase parte da 180° per incidenza radente e poi scende verso 0°.

Comunque per incidenza radente la fase ruota di 180° in pol. V e H.

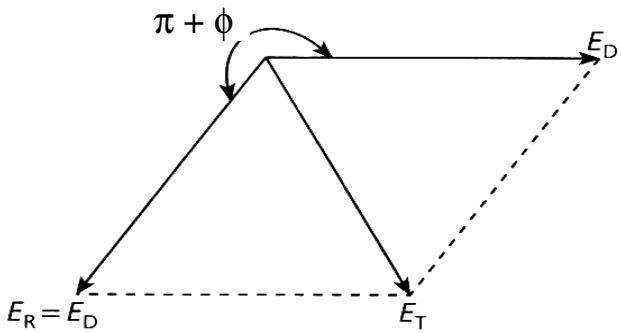


ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

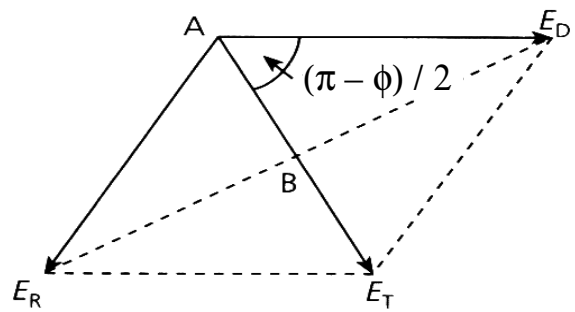
Intensità del campo ricevuto: nel caso di un collegamento LOS sono in genere presenti sia l'onda diretta, sia l'onda riflessa dal terreno.



Per semplicità si considera raggio rettilineo ($K = 4/3$) ed intensità eguali per E_D ed E_R (angolo radente).



La differenza di fase sull'antenna ricevente è data da una aliquota ϕ, pari alla differenza dei percorsi moltiplicata per $2\pi/\lambda$, più la rotazione di fase di π data dalla riflessione superficiale.



$$E_T = 2\ \mathrm{AB} = 2E_D \cos[(\pi - \phi)/2] = 2E_D \sin(\phi/2)$$

ovvero $E_T = 2E_1/D \sin(\phi/2)$

ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

Calcolo della differenza tra i due percorsi:

$$D_1 = \sqrt{[D^2+(h_t - h_r)^2]} \approx D+(h_t - h_r)^2/2D$$

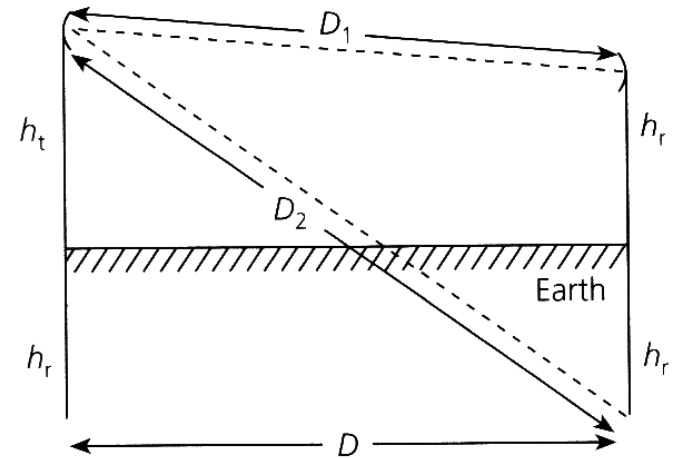
$$D_2 = \sqrt{[D^2+(h_t + h_r)^2]} \approx D+(h_t + h_r)^2/2D$$

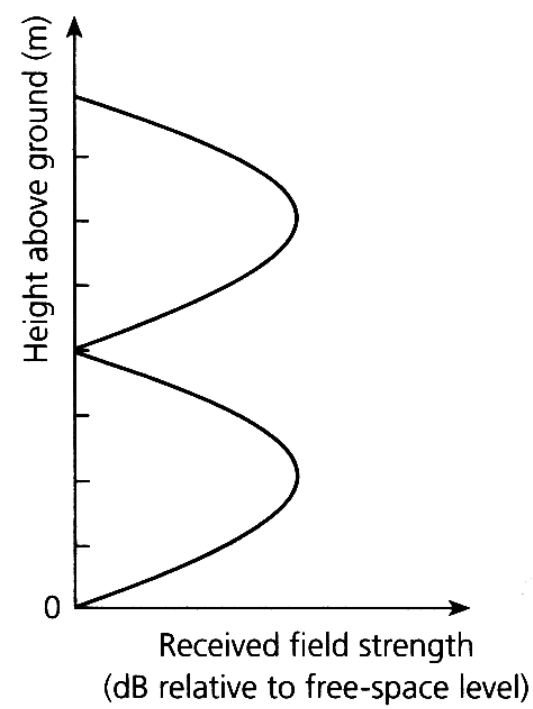
$$D_2 - D_1 = [(h_t + h_r)^2 - (h_t - h_r)^2]/2D =$$
$$= 2\, h_t\, h_r/D$$

$$\phi = (2\pi/\lambda)(2\, h_t\, h_r/D) = (4\pi\, h_t\, h_r)/\lambda D$$

$$E_T = 2E_1/D \sin[(2\pi\, h_t\, h_r)/\lambda D]$$

Per fissata distanza, l'ampiezza del campo ricevuto dipende in maniera sinusoidale dal'altezza dell'antenna ricavente.

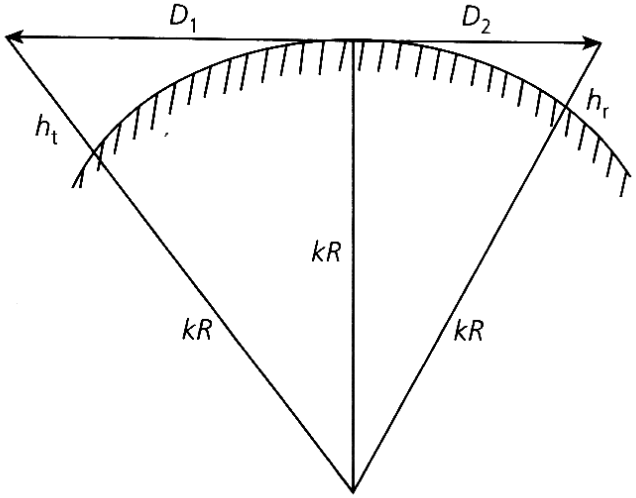




ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

Massima distanza tra antenne per collegamenti in LOS

A causa della curvatura della Terra, per ogni antenna posta ad una certa altezza di può definire un **orizzonte radio** (punto di tangenza del raggio). Grazie al fattore *K*, esso è più ampio del valore teorico.



$(h_t+KR)^2 = D_1^2+(KR)^2$ che dà: $D_1 \approx \sqrt{2(h_tKR)}$

analogamente: $D_2 \approx \sqrt{2(h_rKR)}$

per cui: $D_{max} = D_1 + D_1 = \sqrt{2(h_tKR)} + \sqrt{2(h_rKR)}$

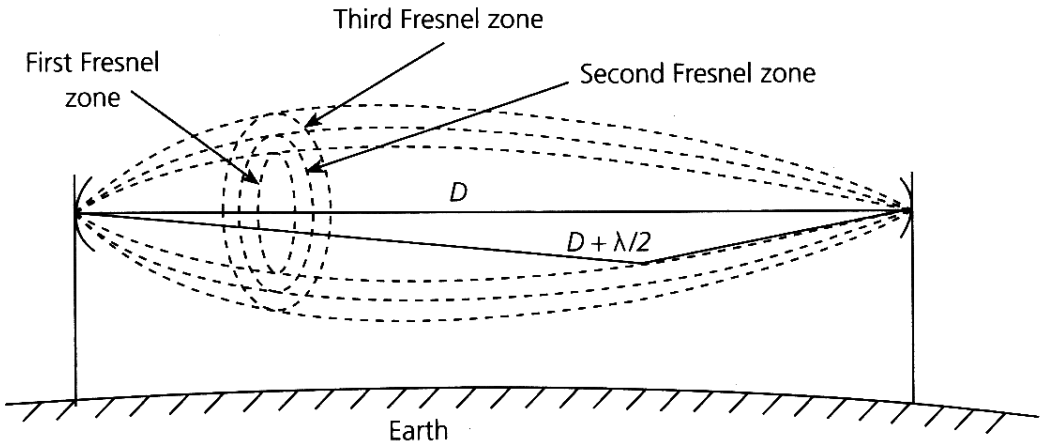
In condiz. standard, misurando *D* in km ed *h* in m:

$D_{max} = 4{,}13(\sqrt{h_t}+\sqrt{h_r})$

ONDA TROPOSFERICA (SPACE WAVE)

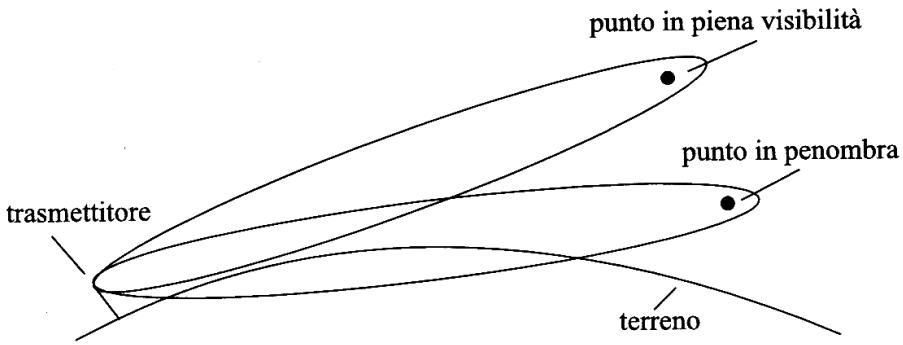
Ellissoidi (zone) di Fresnel

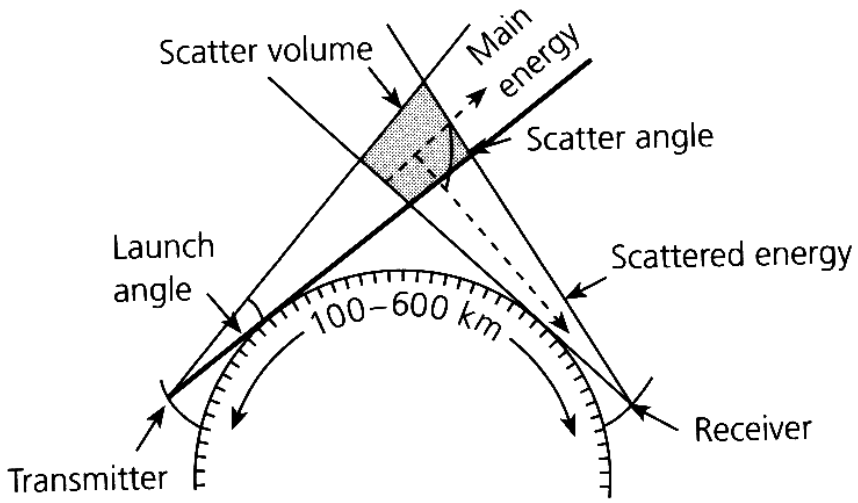
Luoghi dei punti per i quali la somma delle distanze dalle ant. TX ed RX è pari a multipli di $\lambda/2$.



Se il primo ellissoide sfiora la sup. terrestre, si ha riflessione di un'onda con fase 180° che dà interferenza distruttiva.

Un punto al di sotto dell'orizzonte (non LOS) è raggiunto dall'onda diffratta generata dalle zone di Fresnel.



DIFFUSIONE TROPOSFERICA (SCATTERING)

• Si usa per collegamenti ben oltre l'orizzonte radio.
• Si punta un'antenna TX all'orizzonte e si invia un segnale forte (kW).
• La maggior parte del segnale esce dall'atmosfera, ma una piccola parte si va in tutte le direzioni per diffusione dalle disomogeneità d'indice nella troposfera.
• Si usa sopra i 500 MHz per telefonia con le piattaforme petrolifere.