

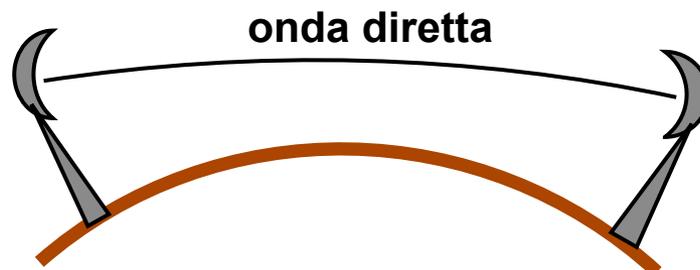
A - TEORIA DELLA PROPAGAZIONE RADIO IN AMBIENTE REALE

- Effetto di gas atmosferici e idrometeore
 - Attenuazione supplementare da gas atmosferici
 - Attenuazione supplementare da pioggia
 - Propagazione ionosferica, troposcatter
- Propagazione in mezzi con disomogenità distribuita – Propagazione troposferica
 - Cenni di ottica geometrica in mezzi con n debolmente variabile.
 - Propagazione in mezzi a stratificazione piana e sferica. Propagazione troposferica, orizzonte radio e rettificazione del suolo/raggio
- Propagazione in mezzi con disomogenità concentrate – Propagazione in presenza di ostacoli
 - Riflessione del suolo, diffrazione da knife-edge, ellissoide di Fresnel
 - Metodi per il calcolo della diffrazione da ostacoli
 - Teoria geometrica della propagazione: trasmissione attraverso uno strato, diffrazione da spigolo. Propagazione multicammino.

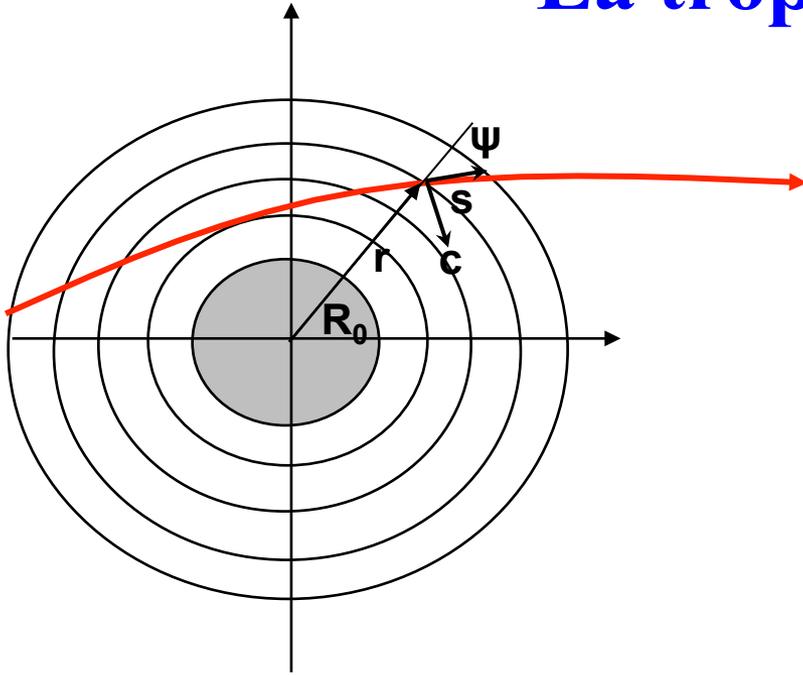


La troposfera (1/3)

- Troposfera: parte inferiore della atmosfera terrestre, dal suolo all' inizio della tropopausa, ove sono presenti le correnti a getto. Essa è caratterizzata da temperatura calante con la quota
 - altezza media: 9 km ai poli, 17 km all' equatore; in Italia varia da 7 km (tempo perturbato) a 13 km (bel tempo)
- La troposfera può essere caratterizzata, ai fini elettromagnetici, con un indice di rifrazione n che è funzione delle grandezze che caratterizzano l' atmosfera: temperatura, pressione e contenuto di vapore d' acqua.
- Inoltre n varia decrescendo esponenzialmente con la quota
- La propagazione di onde elettromagnetiche subisce quindi deviazioni come visto nella parte di Ottica Geometrica Classica.
- E' utile prevedere queste deviazioni sia per calcolare l' esatta attenuazione, sia per il puntamento delle antenne, sia per calcolare l' orizzonte radio



La troposfera (2/3)



L'insieme terra + atmosfera può essere considerato un mezzo non omogeneo a simmetria quasi-sferica:

- $n = n(r)$
- $r = R_0 + h$
- $R_0 = 6370 \text{ Km}$ (raggio terrestre)
- $h = \text{quota}$

In condizioni medie l'indice di rifrazione vale [1]

$$n = 1 + 10^{-6} \frac{A}{T} \left(P_a + 4810 \frac{P_e}{T} \right)$$

dove

- | | |
|---|---|
| { | P_a pressione atmosferica totale (mbar) |
| | T temperatura ($^{\circ}\text{K}$) |
| | P_e pressione parziale vapor d'acqua (mbar) |
| | A costante = $77.6 \text{ }^{\circ}\text{K/mbar}$ |

La troposfera (3/3)

- Si usa scrivere anche:

$$n(r) = n(h) = 1 + 10^{-6} \cdot N(h)$$

- avendo definito $N(h) = (n(h)-1)10^{+6}$ radio rifrattività che è più facilmente tabulata e viene espressa mediante unità adimensionali dette *unità N* [2].
- In condizioni di atmosfera di riferimento o atmosfera standard l'andamento di N con la quota segue la seguente relazione

$$N(h) = N_A e^{-b_A h} \quad \text{dove} \quad \begin{cases} N_A \simeq 315 \\ b_A \simeq 1.36 \times 10^{-4} [m^{-1}] \end{cases}$$



Raggi (traiettorie) nella troposfera (1/2)

Per un mezzo a simmetria sferica la traiettoria dei raggi deve soddisfare:

$$n(r) r \sin \psi = k$$

$$n(h) (R_0 + h) \sin \psi = k$$

$$n(h) \left(1 + \frac{h}{R_0} \right) \sin \psi = \frac{k}{R_0} = K$$

$$\left(1 + 10^{-6} N(h) \right) \left(1 + \frac{h}{R_0} \right) \sin \psi = K$$

essendo solitamente $\frac{h}{R_0}$ molto piccolo e anche $10^{-6} N(h)$ si ottiene:

$$\left(n(h) + \frac{h}{R_0} \right) \sin \psi = K$$



Raggi (traiettorie) nella troposfera (2/2)

Si può definire l'indice di rifrazione modificato M [3]:

$$M(h) \stackrel{\Delta}{=} n(h) \left(1 + \frac{h}{R_0} \right) \approx n(h) + \frac{h}{R_0}$$

riconducendosi quindi a risolvere un problema a stratificazione piana, di equazione:

$$M(h) \sin \psi = K$$

L'equazione precedente può essere risolta per via numerica.

Comunque, data le piccole deviazioni da una linea retta, il raggio può essere in prima approssimazione considerato un frammento di cerchio di dato raggio. Ha interesse cioè più che altro individuare la curvatura del percorso del segnale, del raggio ottico



Curvatura dei raggi nella troposfera (1/6)

Ricordando :

$$|\vec{c}| = \frac{1}{R} = \frac{\vec{\nabla}n}{n} \cdot \hat{c}$$
$$\Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \hat{r} \cdot \hat{c}$$

Si ha:

$$\frac{dn}{dr} = \frac{dn}{dh} = 10^{-6} \frac{dN(h)}{dh}$$

Definendo quindi il gradiente verticale di rifrattività:

$$G = \frac{\Delta dN(h)}{dh} \left(= -b_A N_A e^{-b_A h} \right)$$



Curvatura dei raggi nella troposfera (2/6)

si ottiene la curvatura del raggio ottico:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \hat{r} \cdot \hat{c} = \frac{1}{n} 10^{-6} G(-\sin \psi)$$

Per i collegamenti di interesse (collegamenti di terra) $\psi \cong \frac{\pi}{2}$ e analogamente si può assumere $n \approx 1$ al denominatore, quindi:

$$\frac{1}{R} \approx -10^{-6} G$$

In collegamenti terrestri h varia poco sulla traiettoria, quindi anche G e $1/R$ variano poco: si possono considerare costanti lungo il raggio

Nel caso di *atmosfera standard* e a quote basse G vale [2]:

$$G_{st} \cong -40 \text{ N/Km}$$



Curvatura dei raggi nella troposfera (3/6)

In tal caso si ottiene dalle espressioni precedenti un valore costante, R_s , detto raggio standard pari a:

$$R = R_{st} = 4R_0 \approx 25.500 \text{ km}$$

Non sempre si è in condizioni di atmosfera standard, dipende dalla pressione e dagli altri elementi di cui è costituita l'atmosfera.

I parametri di $n(h)$ variano e quindi varia G

Si fa riferimento allora al cosiddetto indice troposferico o fattore correttivo del raggio terrestre [2] (effective Earth-radius factor) definito come:

$$K^{\Delta} = \frac{R}{R - R_0} = \frac{1}{1 - \frac{1}{R} R_0} = \frac{1}{1 + 10^{-6} G \cdot R_0} = \frac{157}{157 + G}$$

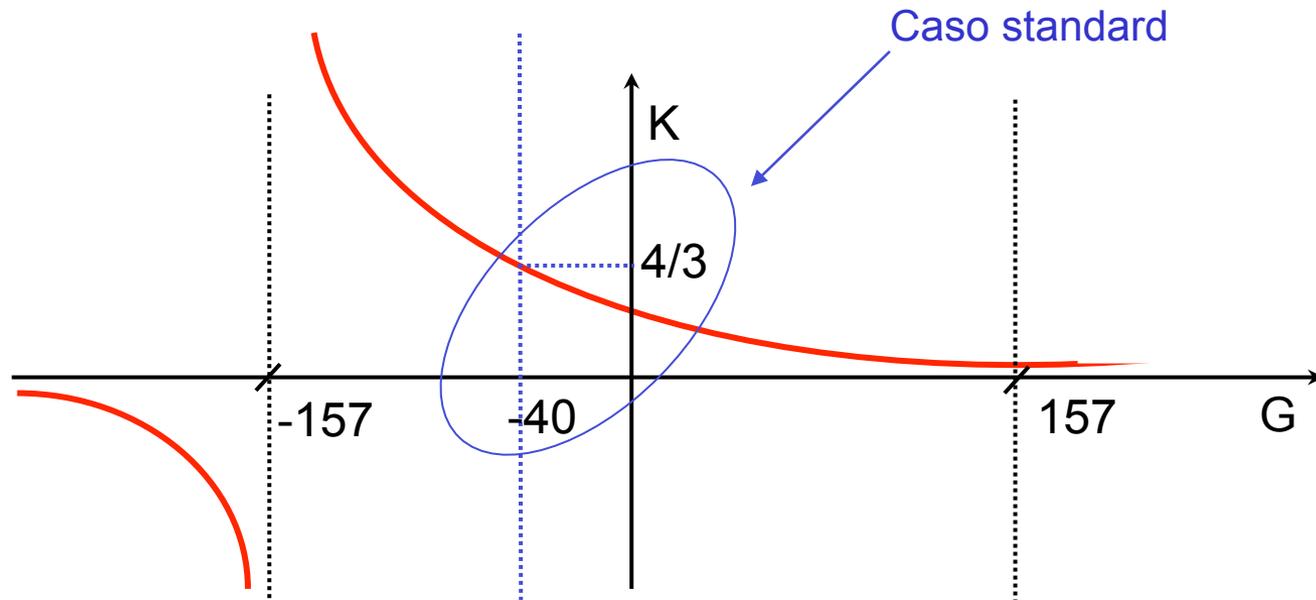


Curvatura dei raggi nella troposfera (4/6)

- E quindi nel caso di atmosfera standard si ottiene l'indice troposferico standard:

$$K_{st} = \frac{R_{st}}{R_{st} - R_0} = \frac{4}{3}$$

$$K = \frac{157}{157 + G}$$



Curvatura dei raggi nella troposfera (5/6)

Si possono distinguere i seguenti casi in base al valore di G:

$G > -40 \quad \rightarrow \quad K < K_S \quad \rightarrow \quad \underline{\text{atmosfera substandard}}$

$G = -40 \quad \rightarrow \quad K = K_S \quad \rightarrow \quad \underline{\text{atmosfera standard}}$

$G < -40 \quad \rightarrow \quad K > K_S \quad \rightarrow \quad \underline{\text{atmosfera superstandard}}$

Atmosfera substandard: curvatura minore o addirittura inversione di curvatura dei raggi (la traiettoria ha una concavità verso l'alto).

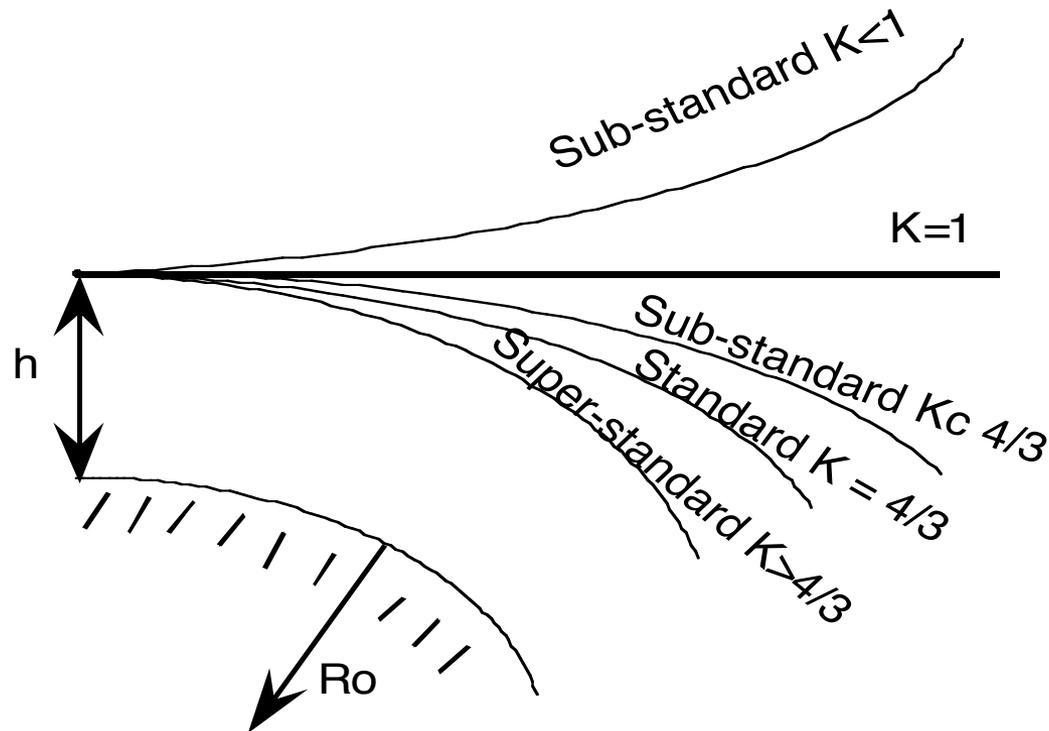
Atmosfera superstandard: i raggi hanno una curvatura ancora più marcata cambiando così la visibilità radio e l'orizzonte radio

$G = -157 \text{ N/Km}$ $R = R_0$ e $K \rightarrow \infty$ i raggi hanno la stessa curvatura della terra e possono in teoria non avere orizzonte radio.

$G = 0$ e $K = 1$ il raggio è rettilineo e si parla di *atmosfera omogenea*



Curvatura dei raggi nella troposfera (6/6)



È chiaro che, per ogni valore di K fra due terminali radio si ha una diversa situazione di ostruzione da parte dell' ellissoide terrestre.

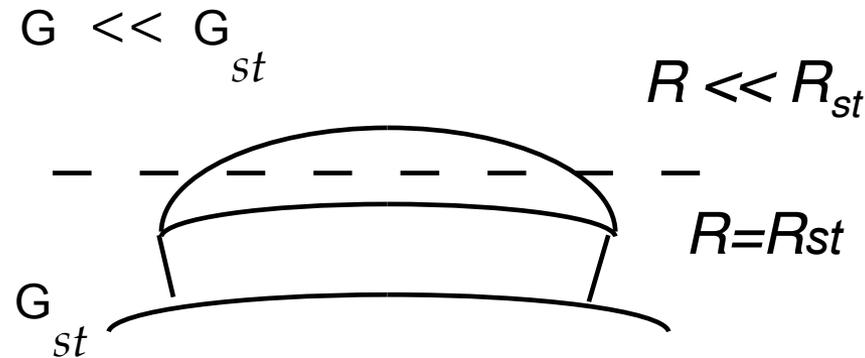
Se fra due terminali non c'è ostruzione si dice che esiste la visibilità radio: essa è normalmente maggiore di quella geometrica, perché le situazioni più probabili sono quelle vicino ai valori standard.

Fenomeno dei cammini multipli

Accade che rapide variazioni di pressione e temperatura con l'altezza possono portare a forti variazioni di $n(h)$ e quindi di G . Si può avere il fenomeno della *super-rifrazione* con ritorno a terra di un raggio (cammino) (vedi figura). È il corrispondente continuo della riflessione totale. Si hanno delle caustiche di raggi.

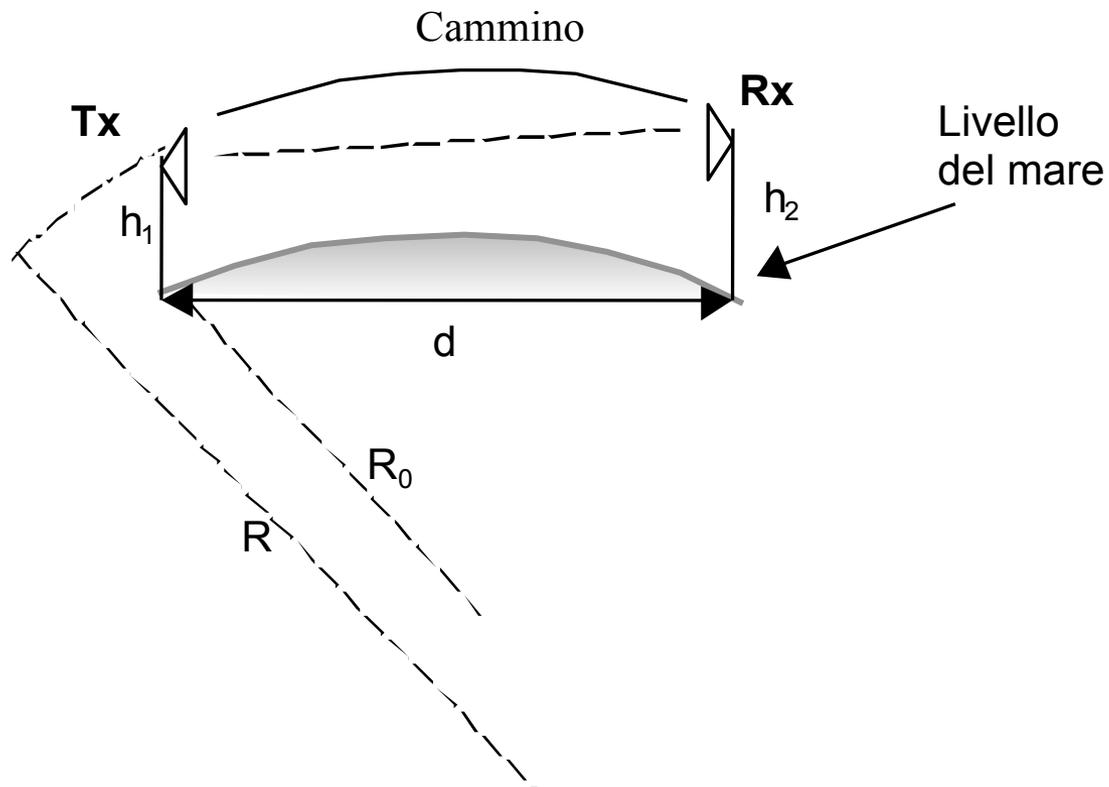
Oltre al cammino diretto si generano uno o più cammini tra Tx ed Rx.

Si è quindi in una situazione di cammini multipli che, come si vedrà, può generare attenuazione e distorsione del segnale rispetto alla situazione di presenza del solo percorso diretto.



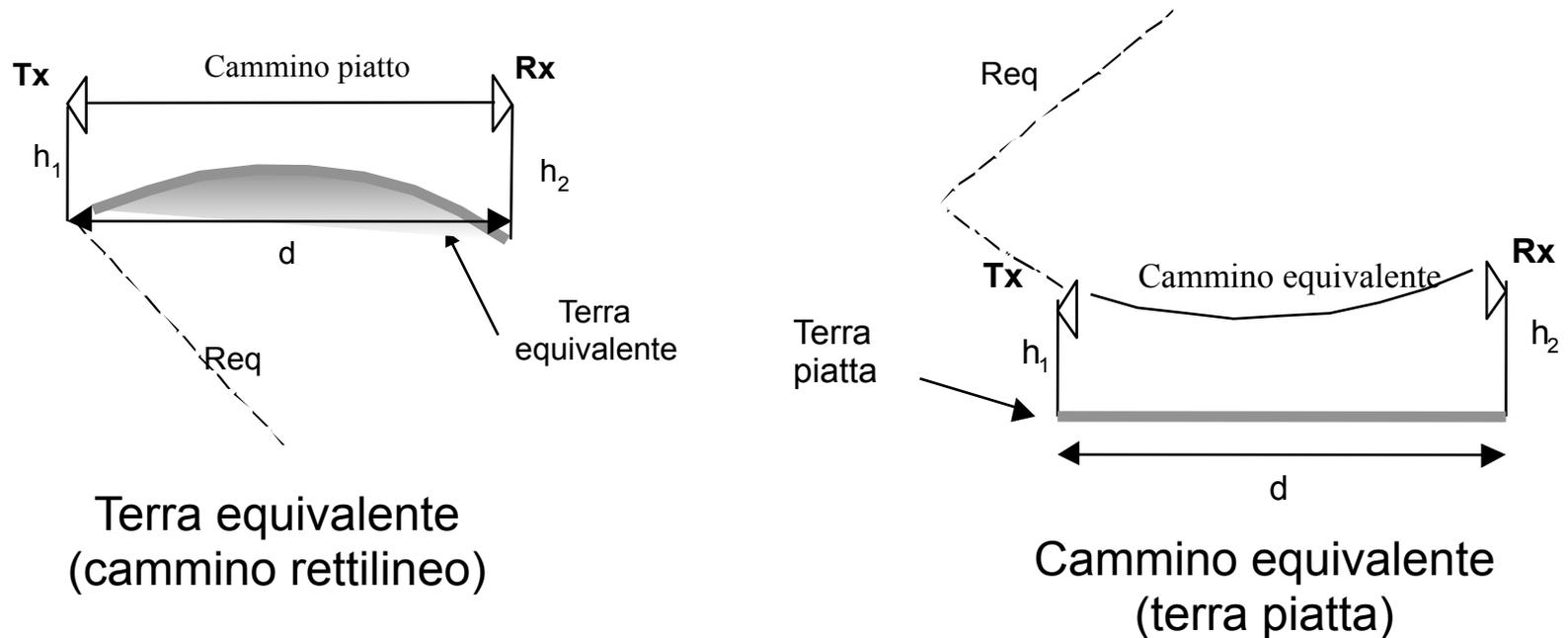
Raggio terrestre equivalente (1/6)

In un collegamento radio si devono considerare due curvature: quella dei raggi e quella terrestre



Raggio terrestre equivalente (2/6)

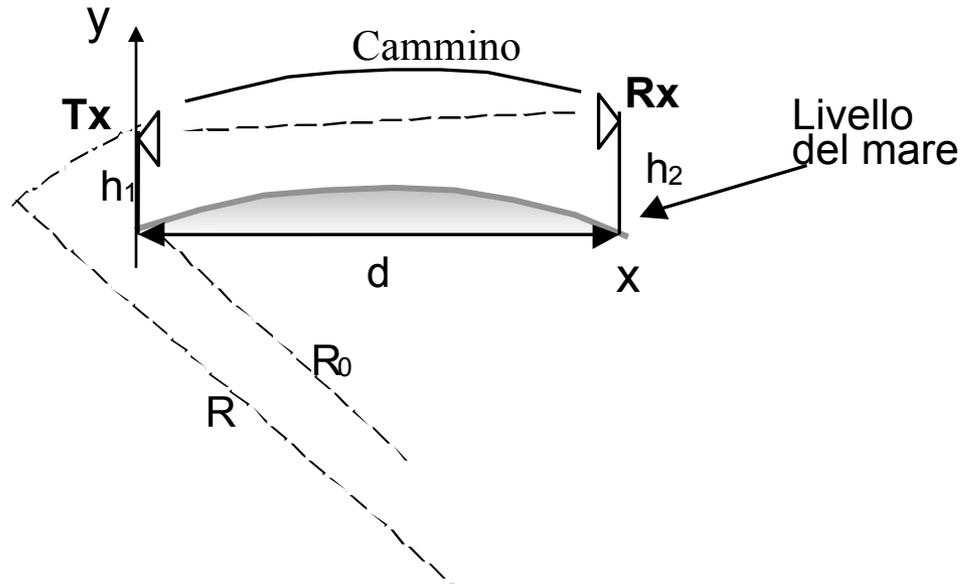
Per comodità nella progettazione del collegamento è utile eliminare una delle due curvature e ricondursi ad una sola curvatura, ad esempio quella terrestre.



Il raggio di curvatura equivalente è lo stesso nei due casi e viene definito raggio terrestre equivalente R_{eq}

Raggio terrestre equivalente (3/6)

- Nei casi di interesse quello che conta è la differenza $E(x)$ che esiste tra traiettorie dei raggi e terreno
- $E(x)$ deve sempre essere maggiore dell' altezza degli ostacoli (naturali e non) che si sopraelevano sul livello del suolo che potrebbero ostruire la visibilità radio
- $E(x)$ si può ricavare in forma grafica o attraverso una rappresentazione analitica approssimata



h_1 : altezza antenna Tx

h_2 : altezza antenna Rx

d : distanza del collegamento

$y_C(x)$: funzione cammino

$y_T(x)$: funzione profilo terrestre

Raggio terrestre equivalente (4/6)

- La curvatura delle due funzioni può essere approssimata con la derivata seconda (qui cambiata di segno perché la concavità è verso il basso) e quindi si hanno le segg eq. differenziali:

$$y''_C(x) \cong -\frac{1}{R} \quad y''_T(x) \cong -\frac{1}{R_0}$$

- Le funzioni possono essere ottenute tramite una doppia integrazione
- Per $y_C(x)$, utilizzando le condizioni iniziali $y_C(0) = h_1$ e $y_C(d) = h_2$ si ottiene:

$$y_C(x) = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{d} x - \frac{1}{2R} x(x - d)$$

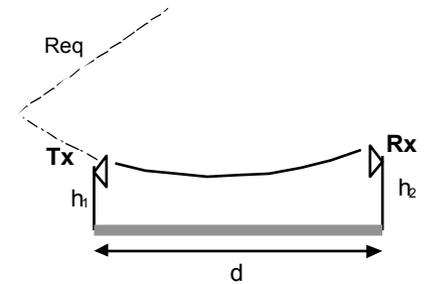
- Mentre per $y_T(x)$, con le condizioni iniziali $y_T(0) = 0$ e $y_T(d) = 0$ si ottiene:

$$y_T(x) = -\frac{x}{2R_0} (x - d)$$

Raggio terrestre equivalente (5/6)

E quindi si ottiene per $E(x) = y_C(x) - y_T(x)$:

$$E(x) = y_C(x) - y_T(x) = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{d}x + \frac{x(x-d)}{2} \left[\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right]$$



Questa equazione, formamente analoga alle precedenti, fornisce derivata seconda positiva (concavità verso l'alto) pari a $1/R_{eq}$ che rappresenta perciò la curvatura equivalente

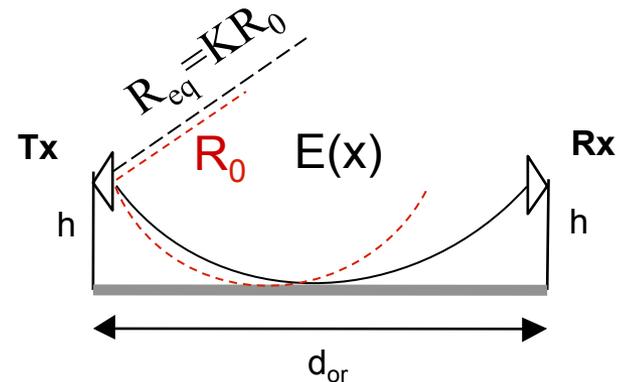
Si definiscono allora curvatura terrestre equivalente e raggio terrestre equivalente:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} = \frac{R - R_0}{R \cdot R_0} = \frac{1}{K \cdot R_0} \quad \rightarrow \quad R_{eq} = K \cdot R_0$$

Raggio terrestre equivalente (6/6)

Supponendo che $h_1=h_2=h$, si puo' calcolare l' orizzonte radio d_{or} ponendo $E(d_{or}/2)=0$. Si ricava facilmente:

$$d_{or} = 2\sqrt{2hKR_0} = 2\sqrt{2hR_{eq}}$$



Rispetto al caso di raggio rettilineo ($K=1$, orizzonte geometrico) l' orizzonte radio è maggiore. Infatti essendo $R_{eq}=KR_0 > R_0$ la curvatura è inferiore e la distanza di tangenza è superiore (vedi figura)

Effetto di condotto (1/2)

- Se si hanno strati di aria sovrapposti con differenti temperature, si può verificare una brusca variazione di dn/dh e quindi di G rispetto al valore standard e si può verificare un fenomeno chiamato condotto
- Si può avere effetto di condotto al suolo quando $G < -157$ (atmosfera fortemente superstandard). Si hanno multiple riflessioni al suolo di un cammino con curvatura maggiore della terra
- Si può avere effetto di condotto in quota quando si ha un' inversione di segno di G , cioè si ha uno strato con indice di rifrazione maggiore di quelli adiacenti (superiore ed inferiore). Un raggio rimane quindi intrappolato in una sorta di guida piana



Effetto di condotto (2/2)

- La propagazione in un condotto dà origine ad attenuazione inferiore rispetto a quella di spazio libero → la potenza si propaga in uno strato bidimensionale, e non tridimensionale, da cui in linea teorica potrebbe risultare $\alpha=1$ anziché $\alpha=2$
- Questo effetto è mitigato da attenuazione supplementare in occasione delle riflessioni sulle pareti del condotto. Soprattutto in condotti sulla superficie del mare non è raro che si originino percorsi con attenuazione inferiore a quella di spazio libero.
- L'effetto condotto è una delle cause maggiori di interferenza tra due servizi distanti, soprattutto nel campo di frequenze tra 0.8 e 3 GHz.
- Un condotto troposferico può portare ad *Evanescenze da effetto di condotto causa contemporanea insorgenza di cammini multipli* che si cancellano in controfase fra loro.
- L'insorgere di una evanescenza di condotto può a fatica essere controllata con aumento di potenza. Più generalmente, può essere opportuno ricorrere a tecniche di diversità di spazio.



Bibliografia

- [1] Rec. ITU-R P.453 "The radio refractive index: its formula and refractivity data"
- [2] Rec. ITU-R P.310 "Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media"
- [3] Rec. ITU-R P.834 "Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation"
- [4] Rec. ITU-R P.453 "The radio refractive index: its formula and refractivity data"

