



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Propagazione troposferica in aria chiara

Introduzione

- Gli *effetti troposferici* sono importanti per la propagazione e.m. a frequenze superiori a circa 30 MHz. Gli agenti che maggiormente influenzano la propagazione troposferica in aria chiara sono:
 - Variazioni temporali e spaziali dell'indice di rifrazione.
 - Assorbimenti dei gas atmosferici.
- Quando non sono presenti idrometeore, la troposfera si presenta come una miscela di diversi gas. Si possono individuare:
 - una componente umida, costituita dal vapor d'acqua;
 - una componente secca, costituita da altri elementi.
- La concentrazione del vapor d'acqua è fortemente variabile con le condizioni climatiche. Va da un minimo di 0.001% ad un massimo di 5%. La suddivisione interna della componente secca, invece, è circa costante: il 78.1% è costituito da azoto, il 20.9% da ossigeno, l'1% da altri gas.

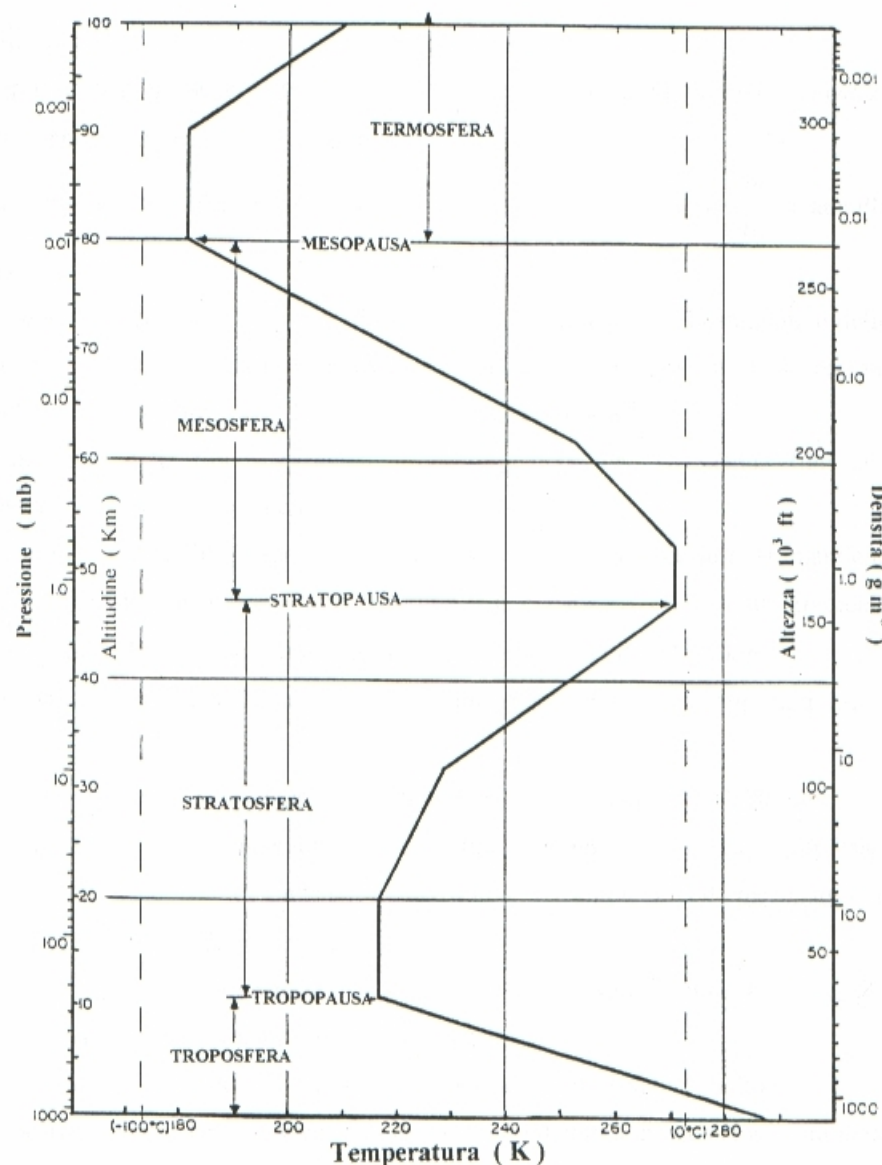
Composizione atmosfera

- Miscela di gas (componente secca) (vedi tabella)
- H_2O allo stato gassoso (vapor d'acqua)
- Idrosoli (goccioline d'acqua che costituiscono le nubi, foschie, nebbie)
- Criosoli (particelle di ghiaccio non precipitante in nubi convettive e cirri)
- Aerosoli (idrosolubili o a base di silicati)
- Idrometeore liquide o ghiacciate precipitanti in nubi con pioggia (gocce di pioggia, ghiaccio precipitante, graupel, neve)

Costituente	Simbolo	Contenuto (% in vol.)	Peso molecolare
Azoto	N_2	78.084	28.0134
Ossigeno	O_2	20.9476	31.9988
Argon	Ar	0.934	39.948
Anidride carbonica*	CO_2	0.0314	44.0099
Neon	Ne	0.001818	20.183
Elio	He	0.000524	4.0026
Krypton	Kr	0.000114	83.80
Xenon	Xe	0.0000087	131.30
Idrogeno	H_2	0.00005	2.0159
Metano*	CH_4	0.0002	16.0430
Ossido di Azoto	N_2O	0.00005	44.0128
Ozono*	O_3	Estate: 0 - 0.000007	47.9982
		Inverno: 0 - 0.000002	47.9982
Anidride solforosa*	SO_2	0 - 0.0001	64.0628
Biossido di azoto*	NO_2	0 - 0.000002	46.0055
Ammoniaca*	NH_3	0 - tracce	17.03061
Ossido di carbonio*	CO	0 - tracce	28.0105
Iodio	I_2	0 - 0.000001	253.809

Composizione percentuale gas atmosfera secca (clean and dry) al livello del mare

Struttura verticale dell'atmosfera



Troposfera: gradiente di temperatura dT/dz negativo $\approx -6.5 \text{ K km}^{-1}$

Stratosfera: dT/dz positivo 1 K km^{-1} e poi di 2.8 K km^{-1}

Mesosfera: T decresce fino ai valori più bassi del profilo

Profili di temperatura troposfera e stratosfera determinati da riscaldamento per irraggiamento della superficie e assorbimento di UV da Ozono

Livello della tropopausa: 8-10 km inverno/poli; 15-16 km estate/regioni calde

90% della massa dell'atmosfera nei primi 16 km

La troposfera è sede dei fenomeni che determinano condizioni meteorologiche

Ulteriori componenti: acqua in forma di vapore, gocce di acqua liquida nelle nubi, gocce di pioggia, ghiaccio e aggregati precipitanti e non; nebbie, aerosoli

Profili di variabili meteorologiche

- Modello per il profilo di temperatura $T(z)$ (z indica la quota):

$$T(z) = T(0) + g_T z \quad \text{per} \quad 0 \leq z \leq 11 \text{ km}$$

$$T(z) = T(11) \quad \text{per} \quad 11 \leq z \leq 20 \text{ km}$$

$$T(z) = T(11) + (z - 20) \quad \text{per} \quad 20 \leq z \leq 32 \text{ km}$$

$T(0)$: temperatura al livello del mare

$g_T \approx -6.5 \text{ K km}^{-1}$: gradiente di temperatura nella troposfera

- Modello per il profilo di densità dell'aria secca $\rho_a(z)$:

$$\rho_a(z) = \rho_a(0) \exp(-z/H_1)$$

$\rho_a(0)$: densità dell'aria al livello del mare

$H_1 = 9.5 \text{ km}$: scala di decadimento per la densità dell'aria

- Modello per il profilo di pressione:

$$P(z) = P(0) \exp(-z/H_2)$$

$P(0)$: pressione atmosferica al livello del mare

$H_2 = 7.7 \text{ km}$: scala di decadimento per la pressione

- Modello per il profilo di densità del vapor d'acqua atmosferico:

$$\rho_v(z) = \rho_v(0) \exp(-z/H_3)$$

$\rho_v(0)$: = densità media di vapore al livello del mare

$H_3 = 2 \text{ km}$: scala di decadimento per il vapor d'acqua



Modelli dielettrici e polarizzabilità

Studio macroscopico dell'interazione radiazione-mezzo

- In un materiale immerso in un campo elettrico, l'applicazione del campo produce un *dipolo indotto* a causa della deformazione della distribuzione della carica (baricentro $q^+ \neq$ baricentro q^-) e, se il materiale ha già un dipolo permanente (p.es. acqua), anche un'*orientazione del dipolo*.
- A seconda della frequenza del campo elettrico incidente, questo meccanismo (polarizzazione) è efficace su costituenti diversi della materia: gli elettroni, gli atomi e le molecole hanno tempi di risposta molto diversi tra loro. A μ onde si deve considerare la *polarizzazione molecolare*.
- La grandezza macroscopica che descrive il fenomeno è l'*intensità di polarizzazione P*:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad [\chi: \text{suscettività dielettrica}]$$

$$\chi = N \gamma_{\text{mol}} = N (\gamma_d + \gamma_o) = \varepsilon_r - 1$$

[γ_{mol} : polarizzabilità molecolare, γ_d : polarizzabilità per deformazione, γ_o : polarizzabilità per orientamento, N : num. di molecole per unità di volume]

Indice di rifrazione in funzione della polarizzabilità

- Se il materiale è un gas (aria) di peso molecolare M e densità ρ_a , detti N_A il num. di Avogadro e R la costante universale dei gas, per l'equazione dei gas perfetti si ha:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r - 1 &= N(\gamma_d + \gamma_o) = \rho_a (N_A / M)(\gamma_d + \gamma_o) = \\ &= [\rho_a / M = P / RT] = \frac{P}{T} \frac{N_A}{R} (\gamma_d + \gamma_o) = \frac{P}{T} \kappa (\gamma_d + \gamma_o)\end{aligned}$$

Inoltre:

$$\begin{aligned}n &= \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{1 + (\varepsilon_r - 1)} \approx 1 + (\varepsilon_r - 1) / 2 \Rightarrow \\ n - 1 &\approx (\varepsilon_r - 1) / 2 = \frac{P}{T} (\kappa / 2) (\gamma_d + \gamma_o) = \frac{P}{T} \kappa' (\gamma_d + \gamma_o)\end{aligned}$$

- Considerando che in atmosfera predominano i contributi di ossigeno e vapore acqueo (polare), possiamo considerare tali contributi separatamente:

$$n - 1 = \frac{P}{T} \kappa' (\gamma_d + \gamma_o) = \frac{P_d}{T} \kappa_d \gamma_{dd} + \frac{P_w}{T} \kappa_w (\gamma_{dw} + \gamma_{ow})$$

P_d pressione parziale componente secca (*dry*) atmosfera; P_w pressione parziale vapor d'acqua (componente *wet*); $P = P_d + P_w$ pressione totale.

γ_{dd} : polarizzabilità per deformazione componente *dry*; γ_{dw} e γ_{ow} polarizzabilità della componente *wet* per deformazione ed orientamento, rispettivamente.

Polarizzabilità per deformazione (1/2)

- Secondo il modello di Lorenz (cariche vincolate) se $p=ql$ è il momento del dipolo indotto dall'applicazione di un campo elettrico, si ha, per il II° principio della dinamica:

$$m \frac{d^2 l}{dt^2} = q \mathcal{E} - \beta \frac{dl}{dt} - kl \Rightarrow (q/m) \left[q \mathcal{E} = m \frac{d^2 l}{dt^2} + \beta \frac{dl}{dt} + kl \right] \Rightarrow$$

$$(q^2/m) \mathcal{E} = \frac{d^2 l}{dt^2} + (\beta/m) \frac{dl}{dt} + (k/m) l$$

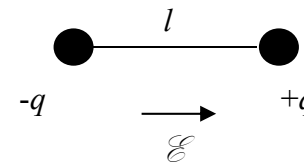
l ed \mathcal{E} : variabili nel dominio del tempo

Poniamo: $\beta/m = 2\alpha$: costante di smorzamento

$k/m = \omega_0^2$, ω_0 : pulsazione di risonanza

Nel dominio della frequenza si ha :

$$p = (q^2/m) \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\omega\alpha} E$$



- Teniamo conto che: $\chi = N\gamma_d$ e che: $\chi = P/\epsilon_0 E \rightarrow \gamma_d = P/N\epsilon_0 E$. Essendo inoltre $P=Np$, si ricava:

$$\gamma_d = p/\epsilon_0 E \Rightarrow \gamma_d = (q^2/m\epsilon_0) \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\omega\alpha}$$

Polarizzabilità per deformazione (2/2)

- Considerando che, come visto analizzando la teoria quantistica della radiazione, si ha un numero discreto di modi di vibrazione, detto M tale numero si ha:

$$\gamma_d = \sum_{i=1}^M \frac{q_i^2}{m_i \varepsilon_0} \frac{1}{\omega_{0i}^2 - \omega^2 + 2j\omega\alpha_i} \Rightarrow$$

$$\text{Per } \omega \ll \omega_{0i} : \gamma_d = \sum_{i=1}^M \frac{q_i^2}{m_i \varepsilon_0} \frac{1}{\omega_{0i}^2} = \gamma_{d(a)} \quad (a)$$

$$\text{Per } \omega \gg \omega_{0i} : \gamma_d = \sum_{i=1}^M \left(-\frac{q_i^2}{m_i \varepsilon_0} \frac{1}{\omega^2} \right) = \gamma_{d(b)} \quad (b)$$

I termini (a) e (b) non dipendono dalle variabili atmosferiche. Inoltre il termine (a) è non dispersivo

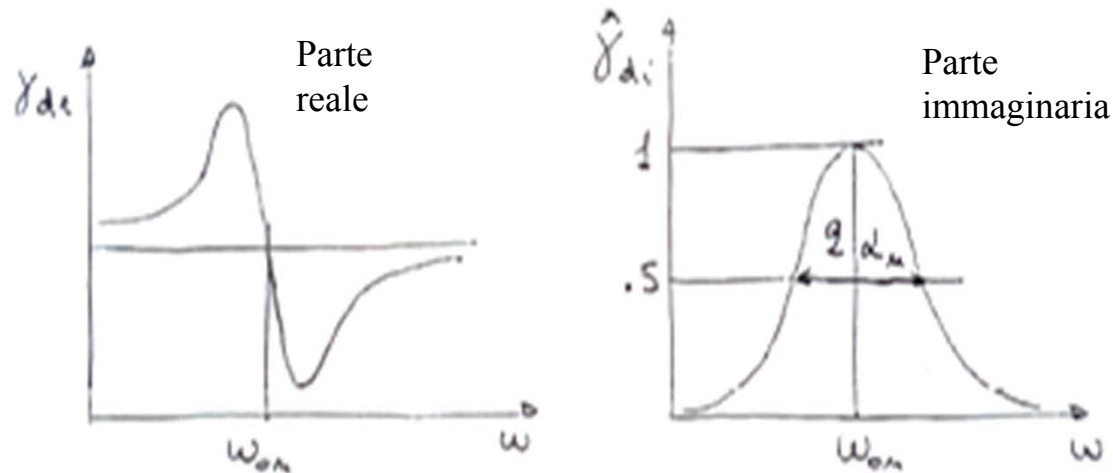
In prossimità dell' n -esima risonanza, ossia per $\omega \approx \omega_{0n}$:

$$\gamma_d = \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_{di} + \sum_{i=n+1}^M \gamma_{di} + \frac{q_n^2}{2m_n \varepsilon_0 \omega_{0n}} \frac{\Delta\omega - j\alpha_n}{\Delta\omega^2 + \alpha_n^2} \Rightarrow$$

$$\gamma_d = \gamma_{d(a)} + \gamma_{d(b)} + \frac{q_n^2}{2m_n \varepsilon_0 \omega_{0n}} \frac{\Delta\omega - j\alpha_n}{\Delta\omega^2 + \alpha_n^2}$$

con: $\Delta\omega = \omega_{0n} - \omega$

Forma di Lorentz della linea di assorbimento



L'andamento della parte immaginaria riportata (forma della linea di assorbimento) è detto di Lorentz, con

$$S_n = \frac{q_n^2}{4m_n f_{0n}}; \quad F_n = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha_n}{(f_{0n} - f)^2 + \alpha_n^2}$$

dove α_n : parametro di larghezza della riga di assorbimento

S_n : fattore di intensità; F_n : fattore di forma

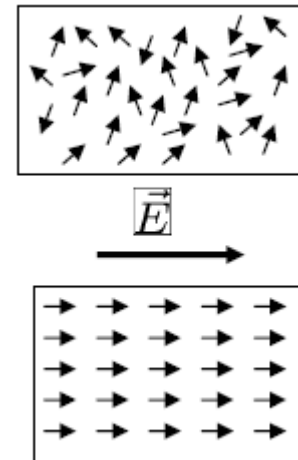
Quella scritta sopra è la più semplice delle espressioni dei fattori di forma e intensità ed è valida per piccoli valori di α , ossia in alta atmosfera dove gli effetti collisionali sono ridotti. Ne sono state proposte diverse.

Polarizzabilità per orientamento

- Per descrivere la polarizzabilità per orientamento ci si riferisce solitamente al rotatore rigido.
- Le molecole di alcune sostanze presentano un momento di dipolo intrinseco: in assenza di un campo esterno l'orientazione delle molecole è casuale, a causa dell'agitazione termica, ed il campo complessivo è nullo.
- In presenza di un campo esterno, i singoli dipoli tendono ad orientarsi nella direzione del campo. La polarizzazione macroscopica che ne deriva è il risultato di un equilibrio statistico tra l'effetto di allineamento del campo e quello di disordine dell'agitazione termica.
- Il valor medio della polarizzabilità per orientamento per una specie di molecole con momento di dipolo intrinseco p_0 può essere espresso, *lontano dalle risonanze*, da:

$$\gamma_0 = p_0^2 / (3 \epsilon_0 K T)$$

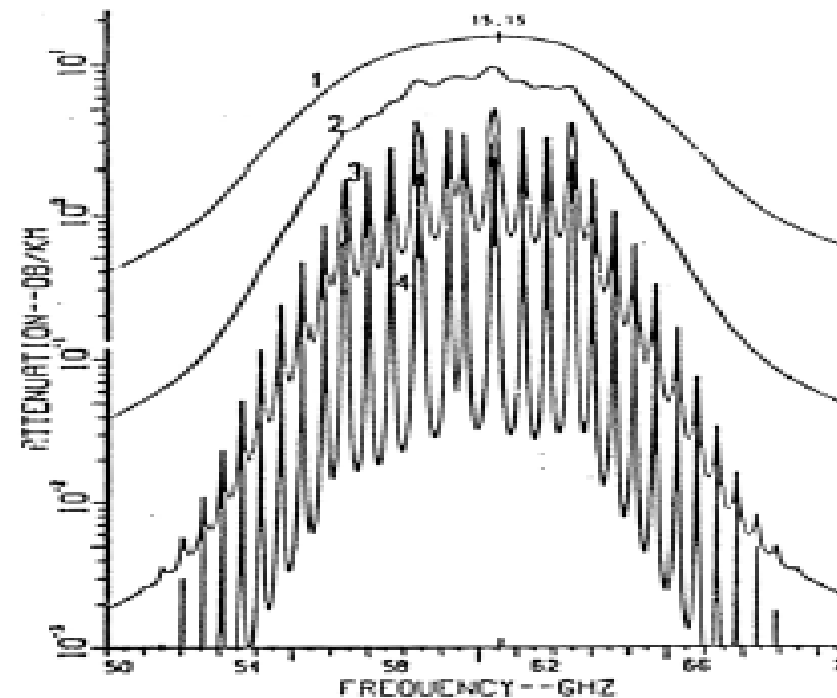
- In corrispondenza alle risonanze, si ha sempre un andamento del tipo di quello illustrato nella pagina precedente e descritto quindi dal fattore di forma F e da quello di intensità S .



Complesso dell'ossigeno a 60 GHz

- La polarizzabilità per deformazione γ_{dd} è l'unica componente dovuta all'O₂ se siamo lontani dai picchi di assorbimento a 60 e 118 GHz. Questi ultimi sono invece dovuti ad *interazione con momento magnetico di spin*. L'O₂ possiede infatti un momento di dipolo magnetico intrinseco che ne rende possibile **linee di assorbimento puramente rotazionali** a 60 GHz e a 118.75 GHz.
- A 60 GHz il fenomeno è composito, dovuto cioè alla sovrapposizione di diverse righe adiacenti. A quote basse, l'allargamento collisionale confonde le righe in una unica banda.

Curve	h km
1	0
2	10
3	20
4	30





Rifrattività troposferica

Rifrattività a microonde

- Abbiamo visto che lo studio macroscopico dell'interazione tra radiazione e mezzo ci ha portato al seguente legame tra indice di rifrazione e polarizzabilità:

$$n - 1 = \frac{P_d}{T} \kappa_d \gamma_{dd} + \frac{P_w}{T} \kappa_w (\gamma_{dw} + \gamma_{ow})$$

- Tipicamente, al livello del mare, n assume valori nell'intervallo 1.0003-1.0004. Per ragioni di maneggevolezza numerica, è più usata la **rifrattività N** , definita come:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

- Per quanto visto in precedenza, la rifrattività avrà una *componente non dispersiva*, prevalente lontano dalle risonanze ($f \ll f_{on}$), ed una *componente dispersiva*. Quest'ultima contiene una *componente risonante* dovuta ad assorbimenti molecolari (legata a transizioni energetiche rotazionali nella banda delle microonde) ed altri termini *dispersivi ma non risonanti* dovuti alle code degli assorbimenti a frequenze superiori.

Rifrattività dispersiva (1/2)

- Il termine dispersivo contiene la componente risonante dovuta ad assorbimenti molecolari con intensità S e termini non risonanti dovuti a code di assorbimenti nell'infrarosso (deformazione), contributi dell'aria secca (O_2 , N_2), idrosoli (acqua liquida nelle nubi, foschie e nebbie)
- A microonde si può quindi scrivere, per frequenze vicine alle transizioni molecolari:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = N_0 + N'(f) + jN''(f)$$

L'atmosfera, a determinate frequenze è quindi un mezzo dispersivo e dissipativo

N_0 : componente non dispersiva

Considerando un'OPU che si propaga per un percorso x :

$$E = E_0 e^{-jkx} = E_0 e^{-jk_0 n x} = E_0 e^{-j \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{N}{10^6}\right) x} = E_0 e^{-j \frac{2\pi f}{c \cdot 10^6} (10^6 + N) x} = E_0 e^{-j 0.02096 f [10^6 + N_0 + N'(f) + jN''(f)] x} = E_0 e^{-j[\beta(f) - j\alpha(f)] x}$$

dove c è espresso in km/s e f in GHz.

Attenuazione: $\alpha_{\text{dB}} = 20 \log_{10} e^{0.02096 f N''(f)} = 20 \log_{10} e^{\alpha(f)} = 0.182 f N''(f)$ [dB/km]

Ritardo di fase: $\beta = 0.02096 f [10^6 + N_0 + N'(f)]$ rad/km

Rifrattività dispersiva (2/2)

- Considerando i vari modi (indice i) di risonanza, le componenti reale ed immaginaria di N possono essere rappresentate, *nella regione delle onde*, da espressioni del tipo:

$$N'(f) = \sum_i S_i F_i'$$
$$N''(f) = \sum_i S_i F_i'' + N_c'' + N_w'' = \sum_i S_i F_i'' + N_v'' + N_d'' + N_w''$$

- S_i è il fattore d'intensità mentre F_i' e F_i'' sono fattori di forma.
 $\sum_i S_i F_i''$ controlla l'attenuazione in corrispondenza alle righe di assorbimento

$N_c'' + N_w''$ controlla l'attenuazione in corrispondenza alle finestre trasparenti

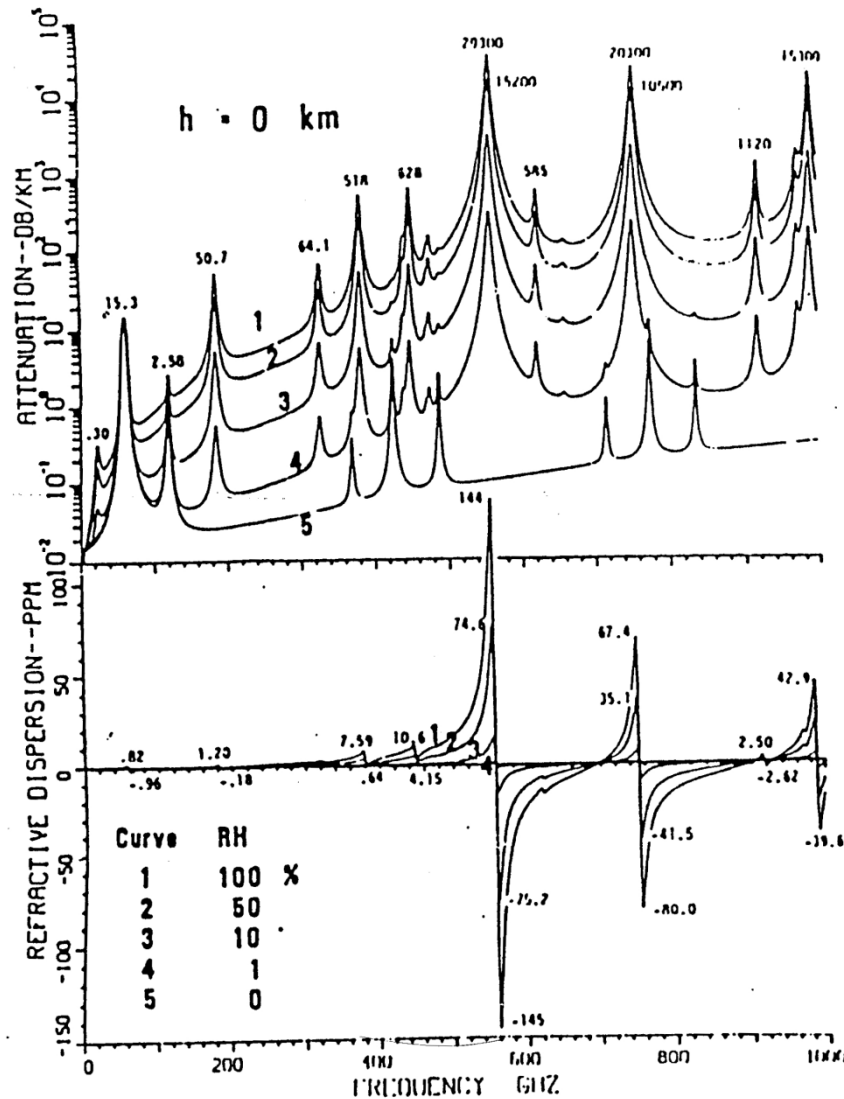
$$N_c'' = N_v'' + N_d''$$

N_v'' è dovuto alle code delle righe IR

N_d'' è dovuto all'aria secca

N_w'' è dovuto all'acqua liquida (nubi, nebbie)

Attenuazione e rifrattività reale dispersiva



- Curve attenuazione $N''(f)$ e rifrattività reale dispersiva $N'(f)$ al livello del mare e per diversi valori umidità relativa RH
- Si succedono assorbimenti O_2 e H_2O (vapor d'acqua)
- In finestra attenuazione cresce con frequenza (soprattutto per *code assorbimenti IR dovuti a vapore*) e con vapor d'acqua
- Rifrattività reale si discosta poco da valore rifrattività non dispersiva fino a circa 300 GHz. Tenendo conto che *lontano dai picchi di assorbimento* l'attenuazione è bassa per $f < 200$ GHz, in tali condizioni si può assumere: $N \approx N_0$
- Da questo punto in poi parleremo solo della *componente non dispersiva*

Rifrattività non dispersiva a microonde (1/2)

- Lontano dalle risonanze atmosferiche e per $f < 200$ GHz, possiamo scrivere, per n :

$$n - 1 = \frac{P_d}{T} \kappa_d \gamma_{dd} + \frac{P_w}{T} \kappa_w (\gamma_{dw} + \gamma_{ow}) \Rightarrow$$

$$n - 1 = \kappa_1 \frac{P_d}{T} + \kappa_2 \frac{P_w}{T} + \kappa_3 \frac{P_w}{T^2}$$

Infatti lontano dalle risonanze si è ottenuto:

$$\gamma_{dd} \kappa_d = \kappa_1 \quad \text{non dipendente dai parametri atmosferici}$$

$$\gamma_{dw} \kappa_w = \kappa_2 \quad \text{non dipenden te dai parametri atmosferici}$$

$$\gamma_{ow} \kappa_w = \kappa_w p_0^2 / 3 \epsilon_0 T = \kappa_3 / T$$

- Per la rifrattività si ha quindi:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \approx N_0 = A \frac{P_d}{T} + B \frac{P_w}{T} + C \frac{P_w}{T^2} \rightarrow [A \approx B] \rightarrow$$

$$N \approx A \frac{P}{T} + C \frac{P_w}{T^2} = N_d + N_w$$

Rifrattività non dispersiva a microonde (2/2)

- A microonde: $A=77.6$ K/mbar, $C=3.73 \cdot 10^5$ K²/mbar →

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = 77.6 P/T + 3.73 \cdot 10^5 P_w/T^2$$

- A causa delle variazioni di temperatura, pressione ed umidità in atmosfera, l'indice di rifrazione n non è costante nello spazio. Nella *troposfera*, le sue variazioni sono legate a quelle dei suddetti parametri tramite la relazione scritta sopra (valida per $f < 200$ GHz e lontano dalle righe di assorbimento):

P = pressione totale atmosferica in mbar; T = temperatura in K

P_w = pressione parziale del vapor d'acqua in mbar (legata a ρ_v e T)

- Possiamo considerare separatamente le due componenti dovute all'aria secca ed al vapore acqueo:

$$N = N_d + N_w$$

N_d = parte "dry" poco variabile [$250 < N_d < 300$]

N_w = parte "wet" altamente variabile [$10 < N_w < 200$]

- L'indice di rifrazione presenta scostamenti assai piccoli rispetto all'unità. Tipicamente, al livello del mare, n assume valori nell'intervallo 1.0003-1.0004. La velocità di propagazione dell'onda e.m. $c=c_0/n$ è minore di quella nel vuoto.

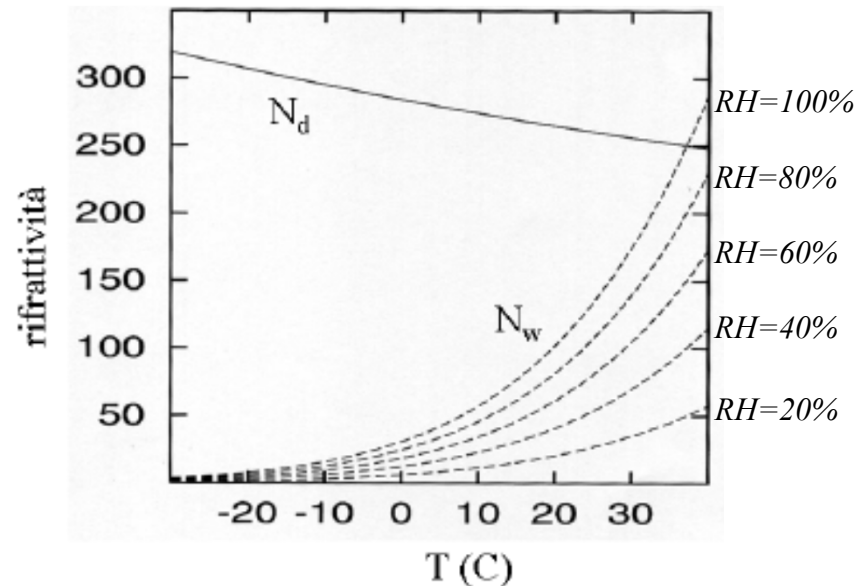
Rifrattività secca e umida (dry & wet)

La concentrazione di vapor d'acqua è spesso indicata usando la variabile umidità RH [%] data da: $RH=(P_w/P_{vs})\times 100$ (P_{vs} : pressione di vapor saturo, legata alla temperatura \rightarrow aumenta con l'aumentare di T) Per una data temperatura, il termine umido della rifrattività N_w ha un valore massimo, che corrisponde alla pressione di vapore saturo ($RH=100\%$).

La figura mostra gli andamenti dei due termini in un intervallo realistico di temperatura.

$N_d=240-300$: poco variabile;

$N_w=10-200$: molto variabile nello spazio e nel tempo causa la notevole variabilità dell'umidità



Alle basse temperature domina il termine secco, mentre alle alte temperature il termine umido può diventare dello stesso ordine di grandezza. Ne consegue che nei climi freddi e secchi la rifrattività assume valori bassi e stabili, mentre nei climi caldi e umidi assume valori elevati e con forti instabilità.

Componenti stratificata e turbolenta

- Abbiamo visto che per la rifrattività non dispersiva si ha:

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = 77.6 P/T + 3.73 \cdot 10^5 P_w/T^2$$

- Dal punto di vista della propagazione, quel che dà luogo a sensibili effetti sono le variazioni spaziali di n . In senso orizzontale tali variazioni consistono in irregolarità variabili nel tempo. In funzione della quota z , invece, esiste sempre un andamento mediamente decrescente, dovuto all'abbassamento con la quota di P e di P_w , cui si sovrappongono irregolarità locali. Si distinguono quindi:
 - Una *componente stratificata* variabile con la quota
 - Una *componente turbolenta* rapidamente variabile nel tempo e nello spazio *sovrapposta alla precedente*. E' dovuta a rimescolamento delle masse d'aria, a diverse temperature, che vengono in contatto in seguito a spostamenti verticali (*convezione*), o orizzontali (*avvezione*).
- Per la componente stratificata (andamento medio), si considera di solito un andamento esponenziale:

$$N(z) = N_s \exp(-z / z_0)$$

N_s è il valore al suolo e z_0 è la quota per cui N si riduce a $N_s e^{-1}$.

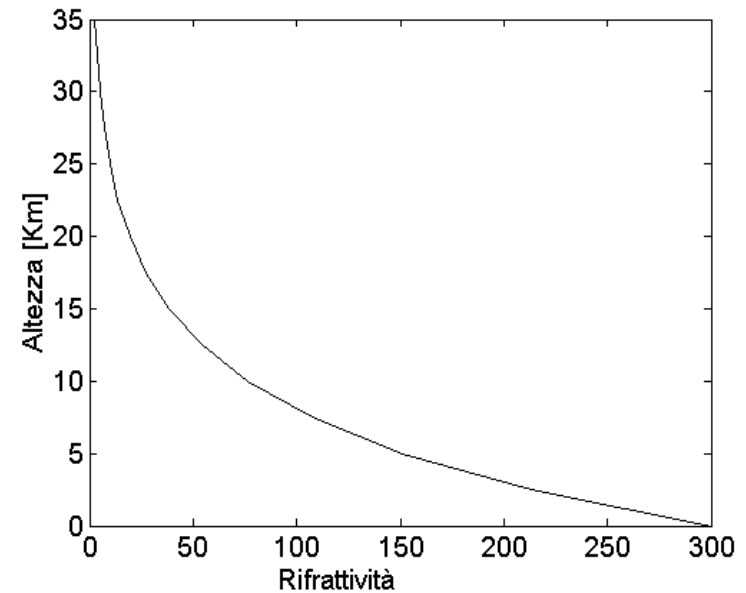
Andamento di N con la quota

andamento tipico di $N(z)$ nella bassa troposfera
(componente stratificata + componente turbolenta).



andamento di $N(z)$ fino a 35 km di altezza (solo
componente stratificata) ammettendo che $z_0=7.3$ km.

*Fino a circa 5 km l'andamento è
approssimativamente lineare*



Si noti che se l'andamento di $N(z)$ per i primi km di atmosfera può essere approssimativamente assunto lineare, si ha:

$$|\nabla N| = \text{cost}$$

gradiente medio di N nel primo km

- Il parametro più usato è il *gradiente medio nel primo chilometro*:

$$|\nabla N| = \Delta N / \Delta z = \Delta N \quad (\Delta z = 1 \text{ km}) :$$

$$\Delta N = N(1) - N_s = N_s \exp(-1/z_0) - N_s = N_s [\exp(-1/z_0) - 1]$$

con z in km.

- Si usa spesso la rifrattività a livello del mare, data da:

$$N_0 \equiv N_s = \frac{N_l}{\exp(-z_l/z_0)} \quad z_l: \text{l'altezza sul livello del mare del sito in cui è stata misurata la } N_l.$$

- A livello mondiale si hanno i seguenti valori medi di rifrattività a livello del mare e di gradiente medio nel primo km :

$$\langle N_0 \rangle = 315 \text{ unità } N ;$$

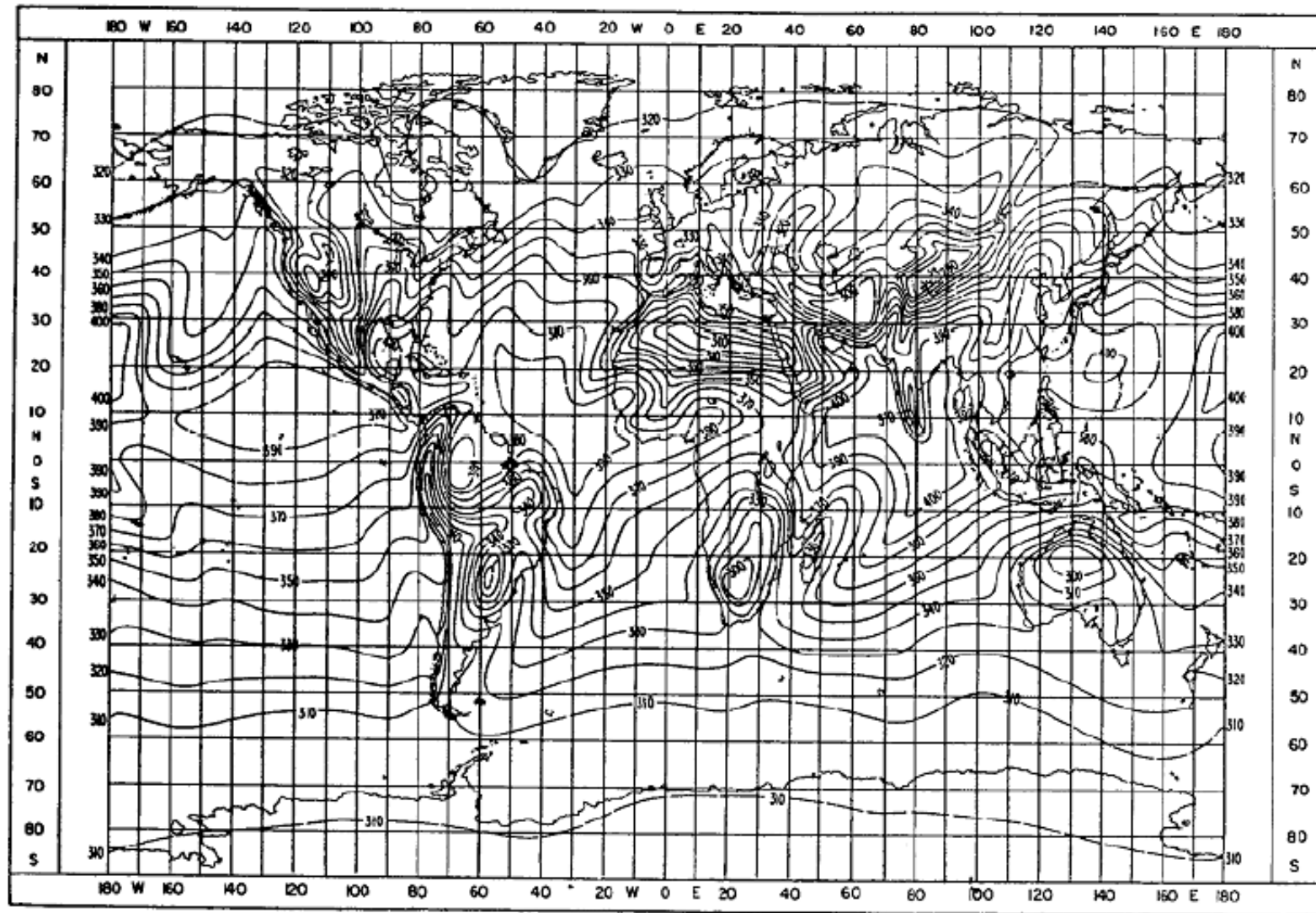
$$\langle \Delta N \rangle = -40 \text{ unità } N/\text{km};$$

- A $\Delta N = -40$ corrisponde la cosiddetta *atmosfera standard*. L'atmosfera è definita:

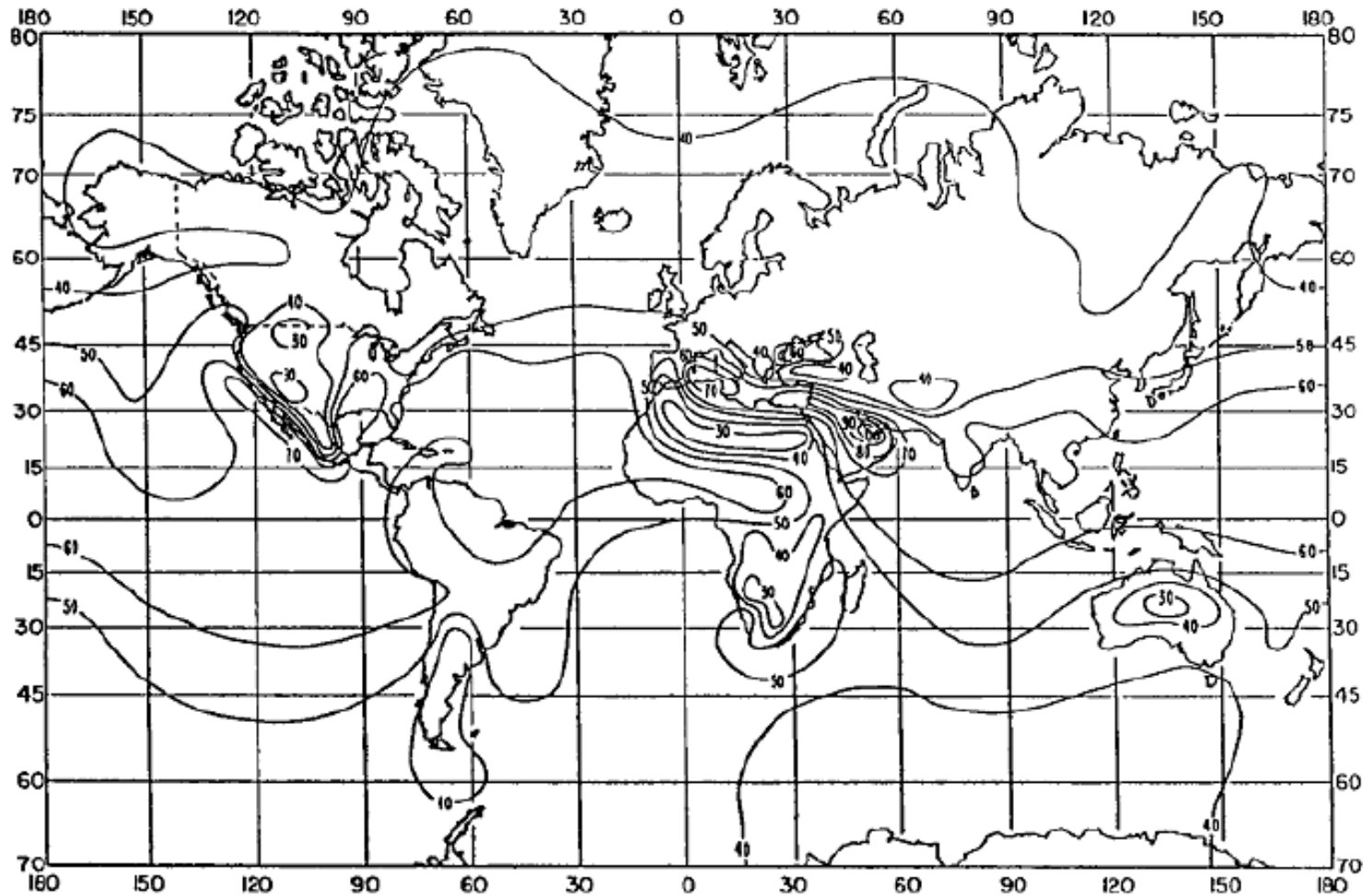
– *superstandard* per $|\Delta N| > 40$

– *substandard* per $|\Delta N| < 40$.

Valori tipici medi di N_o per il mese di agosto



Valori tipici di $|\Delta M|$ per il mese di agosto

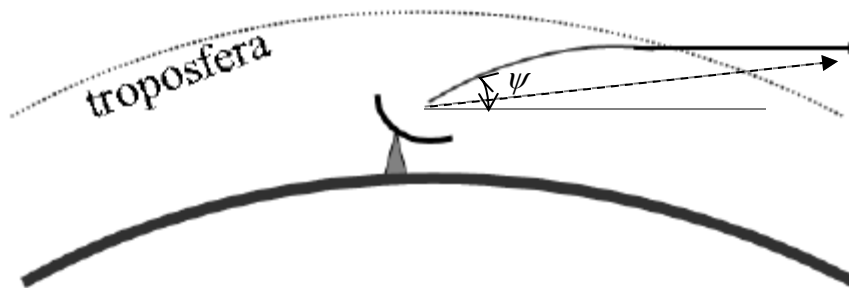




Raggi ottici e modelli equivalenti

Effetti della componente stratificata

- Per studiare gli effetti propagativi della troposfera a larga scala si usa l'approssimazione dell'OG, per cui la propagazione ha luogo lungo un raggio.
- Gli effetti propagativi dipendono dall'angolo di elevazione ψ rispetto all'orizzontale, pari all'angolo compreso tra la verticale e la direzione del vettore di curvatura. Possiamo identificare tre casi (ci concentreremo sul I°).
 - $\psi < 5^\circ$ (sistemi terrestri con frequenze dalla banda VHF in su): in situazioni normali si ha un incurvamento medio del raggio elettromagnetico, mentre in situazioni anomale si ha il condotto o effetti equivalenti a una riflessione. Ci si può attendere che in tale caso il raggio rimanga confinato nella bassa troposfera cosicché *si possa considerare il gradiente medio nel I° km*.
 - $5^\circ < \psi < 20^\circ$ (radar e telecomunicazioni via satellite con bassi angoli): si ha una variazione dell'angolo di puntamento dovuta al incurvamento del raggio ottico (vedi figura).
 - $\psi > 20^\circ$ (telecomunicazioni via satellite con alti angoli): si hanno effetti deboli.

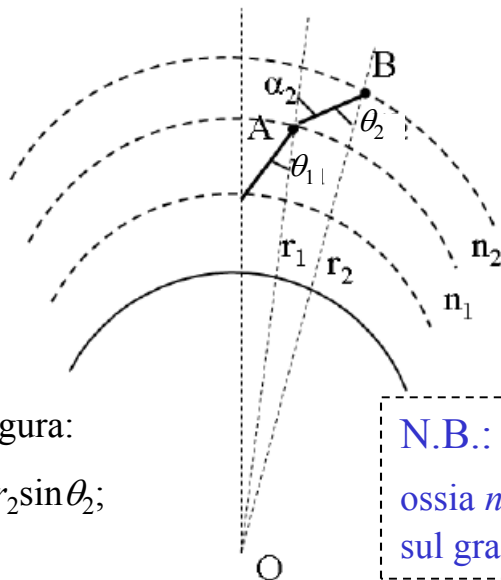


Uso OG

- Si può approssimare il profilo di n con tanti gradini. Per la legge di Snell generalizzata:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_i \sin \theta_i = \text{cost}; \quad i=2, \dots$$

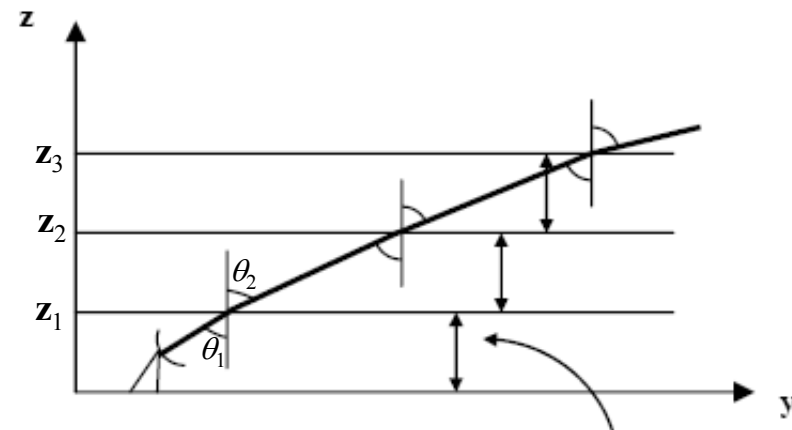
- Facendo tendere a zero lo spessore degli strati, si ottiene una curva che volge la concavità verso il basso.
- Nel caso si debba considerare la sfericità della terra, la *legge di Snell generalizzata* assume la forma seguente: $(R_{\text{Terra}} + h) n \sin \theta = \text{cost}$ (h : quota della traiettoria, R_{Terra} : raggio terrestre).



Nel caso di figura:

$$n_1 r_1 \sin \theta_1 = n_2 r_2 \sin \theta_2;$$

$$r_i = R_{\text{terra}} + h_i$$



N.B.: elevazione: $\psi = 90^\circ - \theta_1$. Per angoli di elevazione piccoli si ha $\sin \theta \sim 0$ ossia $n \sim \text{cost}$. In tal caso un modello a spezzata non è adatto e conviene basarsi sul gradiente nel 1° km.

Incurvamento del raggio ottico in atmosfera standard

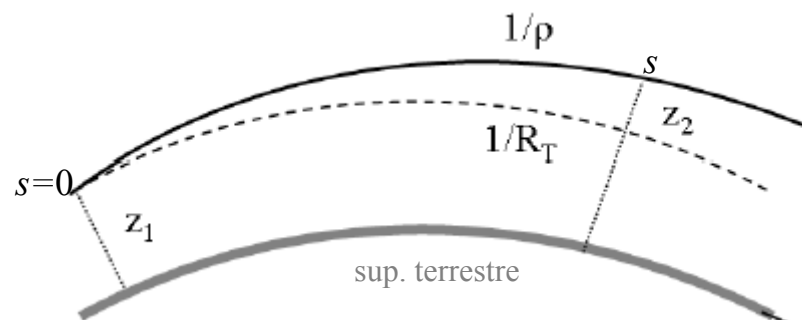
- Utilizziamo il **gradiente medio nel 1° km** ΔN . Abbiamo visto che si ha:

$$1/\rho \approx -|\nabla n| = -|\Delta N|/10^6$$

- In atmosfera standard $\Delta N = -40 \rightarrow \nabla n = -40$ p.p.m./km $\rightarrow 1/\rho = -40 \cdot 10^{-6} \text{ km}^{-1}$
- Il raggio terrestre è $R_T = 6375$ km, per cui: $1/R_T \approx 157 \cdot 10^{-6} \text{ km}^{-1}$. Ne consegue che:

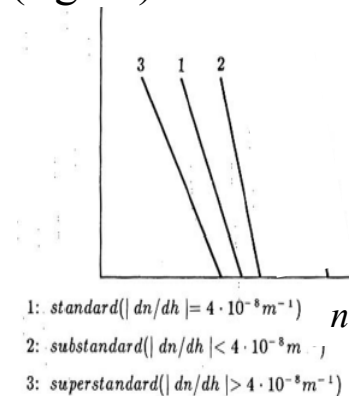
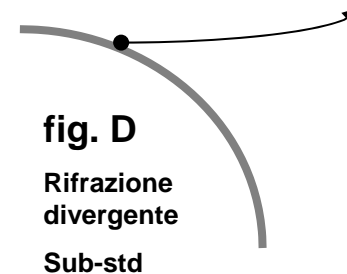
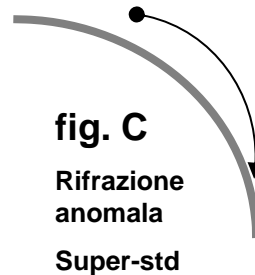
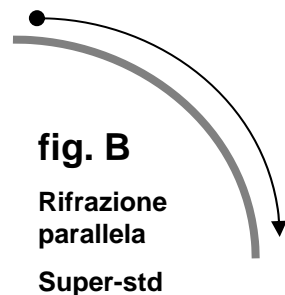
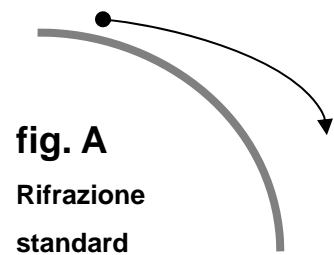
$$|1/\rho| < 1/R_T, \text{ ovvero } \rho > R_T \quad (\rho = 25000 \text{ km} \approx 4R_T)$$

- Se consideriamo un'ascissa curvilinea s sulla superficie terrestre, un raggio che, per $s=0$, si propaga ad una quota z_1 con tangente orizzontale, subisce un incurvamento verso il basso che, tuttavia, è minore di quello della superficie terrestre. **L'incurvamento è verso il basso in termini assoluti, ma verso l'alto rispetto alla superficie terrestre.** Ad una distanza s la quota del raggio sarà $z_2(s) > z_1(0)$.



Percorso del raggio ottico in funzione di ∇n

- I fenomeni di incurvamento dei raggi sono regolati dal valore di ∇n il cui comportamento è legato a condizioni climatiche e stagionali.
- Per atmosfera standard ($\nabla n = -40 \text{ ppm/km}$), il raggio è incurvato verso il basso (in termini assoluti, fig. A) e si parla di *rifrazione standard*.
 - Se $\nabla n < -40 \text{ ppm/km}$ ($|\nabla n| > 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$) si ha *rifrazione superstandard*. In certe condizioni possono aversi ∇n molto negativi (che possono originare l'effetto condotto).
 - Se $\nabla n > -40 \text{ ppm/km}$ ($|\nabla n| < 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$) si ha *rifrazione substandard*.
- Un valore notevole è $\nabla n = -157 \text{ ppm/km}$ per cui $\rho \approx R_T$ ed i raggi ottici si propagano paralleli al terreno (fig B).
- Se $\nabla n < -157 \text{ ppm/km}$ le traiettorie ottiche hanno un raggio di curvatura minore di quella terrestre (fig. C).
- In condizioni particolari $\nabla n > 0$ ed i raggi si incurvano verso l'alto (fig. D). Ovviamente se $\nabla n = 0$ i raggi sono rette (mezzo omogeneo).



Raggio terrestre equivalente

- Per la progettazione di un collegamento radio non è conveniente avere a che fare con raggi e.m. curvi. In ambito radio è consuetudine “*raddrizzare*” i raggi ottici distorcendo in modo fittizio la geometria terrestre.
- Il problema si imposta imponendo che, pur essendo stato “raddrizzato”, il raggio passi per gli stessi punti rispetto alla terra del caso reale. Ciò implica che si *conservi la quota della traiettoria rispetto al terreno*. Introducendo allora un **raggio terrestre equivalente** R_{eq} ed un raggio di curvatura equivalente ρ_{eq} , deve essere:

$$1/R_T - 1/\rho = 1/R_{eq} - 1/\rho_{eq}$$

$$\text{Per } \rho_{eq} = \infty, \text{ si ricava: } 1/R_{eq} = 1/R_T - 1/\rho = 1/(KR_T) \Rightarrow R_{eq} = KR_T$$

Supponendo di essere in atmosfera standard $\rho \approx 4 R_T$ e si ottiene:

$$R_{eq} = (4/3)R_T \approx 8500 \text{ km} \quad \rightarrow K=4/3$$

- In generale:

$$\frac{1}{KR_T} = \frac{1}{R_T} + \frac{dn}{dz} \Rightarrow K = \frac{1}{1 + R_T (dn/dz)} = \frac{1}{1 - R_T / \rho}$$

Visibilità in mezzo omogeneo

- Una diretta conseguenza dell'incurvamento dei raggi è l'aumento della visibilità e.m. rispetto a quella geometrica.
- Con riferimento alla figura, definiamo **visibilità e.m.** v_1 del punto P_1 ad altezza h_1 la distanza tra P_1 ed il suo orizzonte Q definito dalla tangente alla superficie terrestre (raggio R_T). E' data da:

$$v_1 = \overline{P_1Q} = \sqrt{(h_1 + R_T)^2 - R_T^2} \approx [h_1 \ll R_T] \approx \sqrt{2h_1R_T}$$

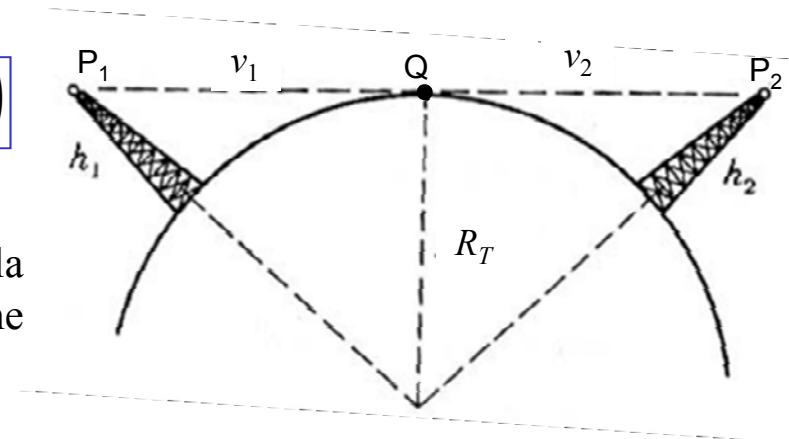
Analogamente :

$$v_2 = \overline{QP_2} \approx \sqrt{2h_2R_T}$$

- Considerando 2 punti (antenna trasmittente di altezza h_1 e ricevente di altezza h_2) la **visibilità totale** v_{TOT} è la somma delle visibilità:

$$v_{TOT} = \sqrt{2h_1R_T} + \sqrt{2h_2R_T} = \sqrt{2R_T} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

Infatti, se, mantenendo costanti le altezze h_1 e h_2 , la distanza tra P_1 e P_2 è maggiore di v_{TOT} , due antenne poste in P_1 e P_2 non saranno in visibilità geometrica



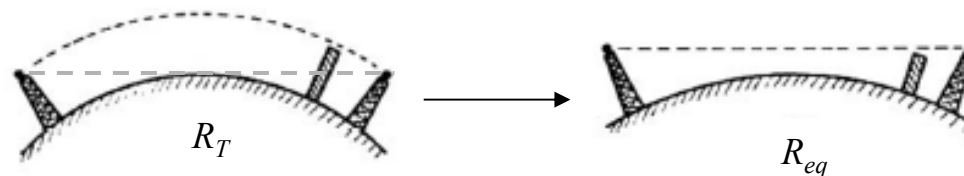
Effetti dell'incurvamento del raggio ottico

- L'incurvamento verso il basso del raggio elettromagnetico produce un *aumento della visibilità elettromagnetica*, che può essere ancora valutata con la formula precedente usando però il raggio equivalente al posto del raggio terrestre:

$$v_{TOT} = \sqrt{2R_{eq}} \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right)$$

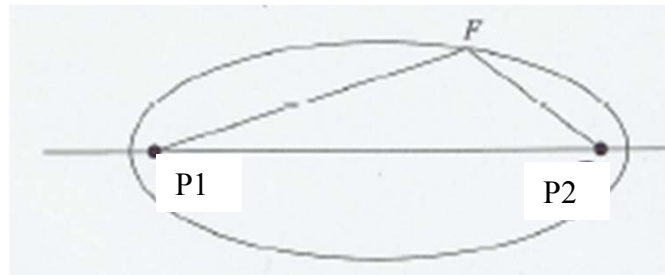


- In presenza di un ostacolo, introducendo il raggio equivalente si distorce il profilo del collegamento producendo un abbassamento dell'ostacolo. Nella situazione di figura, grazie all'incurvamento del raggio, il ricevitore non risulta più ostruito dall'ostacolo.



Primo ellissoide di Fresnel

- Nei collegamenti punto-punto, le altezze delle antenne saranno generalmente maggiori di quelle prescritte dall'equazione che definisce v_{TOT} , sia per tener conto che non sempre si è in condizioni di atmosfera standard, sia perché i punti P1 e P2 si trovano in “*penombra*” poiché il terreno intercetta parzialmente il *primo ellissoide di Fresnel*. In caso di terreno accidentato l'altezza delle antenne deve essere tale che la più piccola frazione possibile del primo ellissoide di Fresnel sia intercettata dagli ostacoli
- Formalmente, il *primo ellissoide di Fresnel* è definito come il luogo dei punti tali che la somma delle congiungenti con P1 e P2 differisce dalla distanza diretta $\overline{P1 P2}$, di $\lambda/4$ ($\pi/2$). In tal modo si raccolgono i contributi interferenti costruttivi dovuti all'onda indiretta rispetto a quella diretta.

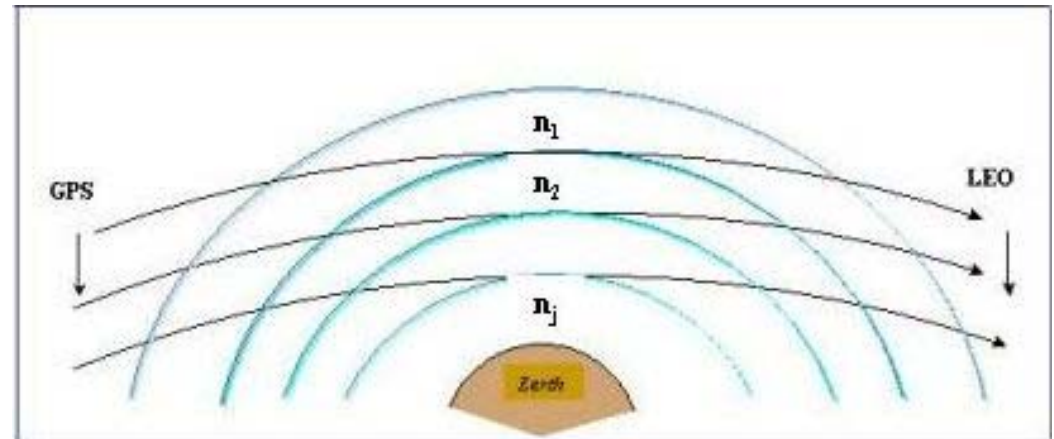
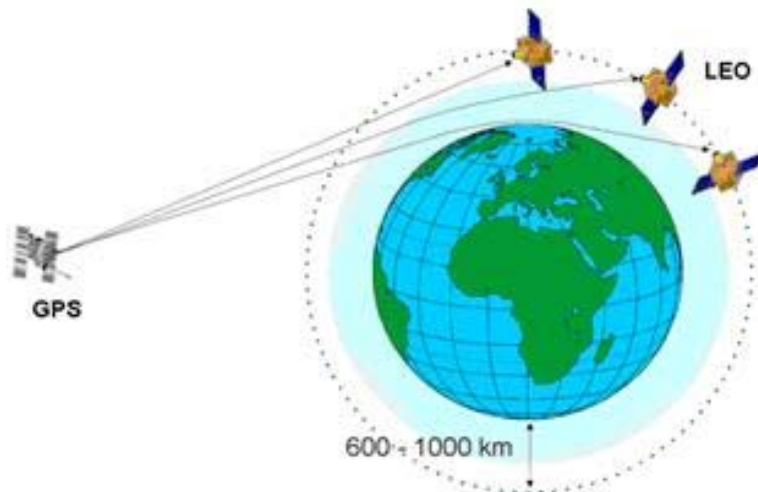


Tecnica della radio occultazione (1/3)

- La tecnica della radio occultazione (RO) permette di **stimare $n(z)$** con alta risoluzione verticale (può arrivare al centinaio di metri). Si basa sui satelliti della *costellazione Global Positioning System* (GPS) e su satelliti a bassa orbita (Low Earth Orbit: LEO) con a bordo un *ricevitore GPS* (frequenza dell'ordine di 1-1.5 GHz: banda L).
- Con il termine radio occultazione s'intende la propagazione del segnale su una traiettoria non rettilinea (incurvata dall'atmosfera) tale che esso possa essere ricevuto direttamente anche quando e ricevitore non sono in visibilità ottica (*Line Of Sight: LOS*)
- Un *evento di occultazione* si ha quando il ricevitore (Rx) GPS sorge o tramonta rispetto al trasmettitore (Tx). Il segnale GPS attraverso l'atmosfera è ritardato ($c < c_0$) ed il raggio ottico incurvato. L'incurvamento causa la ricezione del segnale da parte del Rx anche quando quest'ultimo ed il Tx *non sono ancora in visibilità*. Si parla di ricezione dietro il lembo terrestre (*Earth's limb*) ovvero tecnica di tipo *limb sounding* (antenna del Rx che punta circa tangente alla superficie terrestre).
- Un ricevitore GPS montato a bordo di un satellite LEO riesce a realizzare anche 500 occultazioni distribuite globalmente intorno alla Terra ad un costo molto basso e con una copertura quotidiana relativamente uniforme .

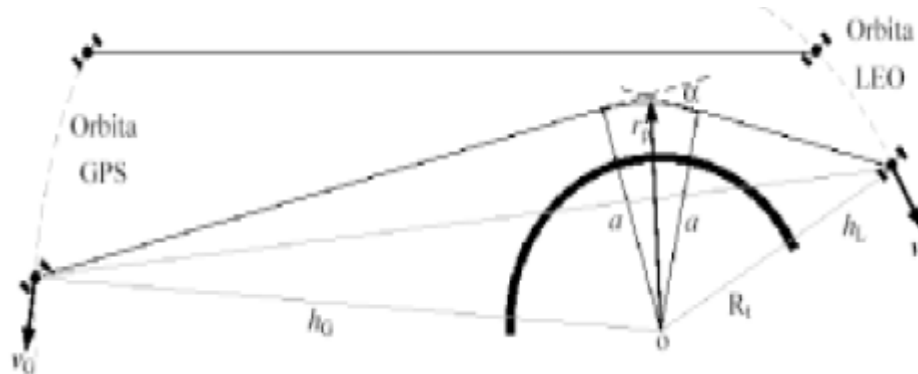
Tecnica della radio occultazione (2/3)

- Il moto relativo tra i satelliti LEO e GPS, permette la scansione verticale dell'atmosfera. Considerando la simmetria sferica, un raggio che passa attraverso l'atmosfera viene rifratto e deviato, a causa del gradiente verticale di densità. Con il cambiamento della geometria dei satelliti, le onde elettromagnetiche campionano successivamente diversi strati di atmosfera.



Tecnica della radio occultazione (3/3)

- Misurando sia il ritardo di fase che l'ampiezza del segnale ricevuto è possibile, applicando algoritmi basati sull'OG che assumono un mezzo a simmetria sferica, determinare la variazione temporale di due parametri che identificano la traiettoria del segnale: l'angolo di incurvamento α (bending angle) e il parametro di impatto a definito come la distanza tra gli asintoti della traiettoria ed il centro di massa della Terra.



- I parametri α ed a sono in relazione con $n(z)$ secondo la seguente formula:

$$\alpha = -2a \int_a^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} dr; \quad \text{con } r = R_T + z$$

- Tale formula rappresenta un integrale di Abel che può essere invertito in forma chiusa ottenendo $n(z)$.

Effetto condotto (1/2)

- Il **condotto** è una sorta di guida d'onda generata da **strati di atmosfera in cui ∇n è fortemente negativo** ($< -157 \cdot 10^{-6} \text{ km}^{-1}$), per cui raggi hanno una curvatura maggiore di quella terrestre (fig. C pag. 28).
- L'effetto condotto è un fenomeno propagativo dovuto quindi a **profili anomali dell'indice di rifrazione** che si manifesta a livello locale. Per il suo studio si introduce un **indice di rifrazione modificato n'** che rende piana la superficie terrestre di riferimento ($R_{eq} = \infty$). Si ha:

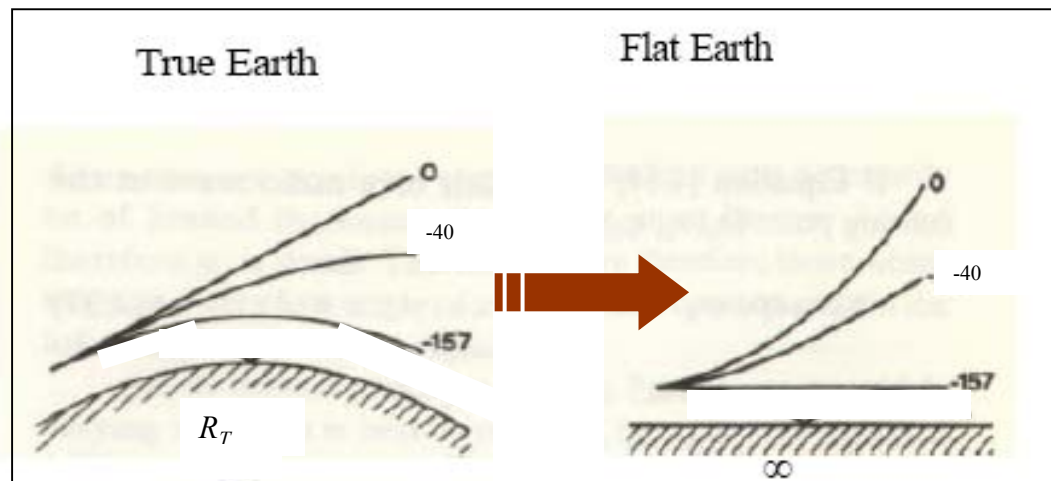
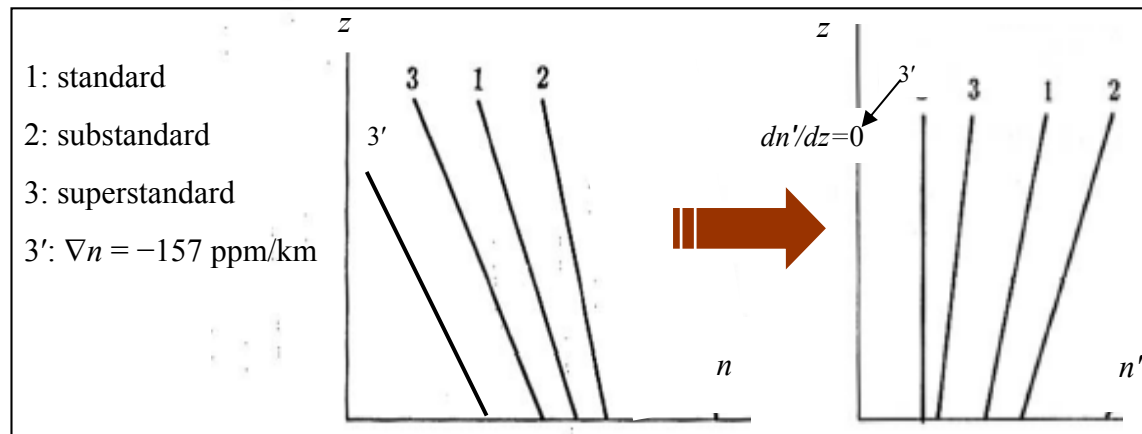
$$\frac{1}{R_T} + \frac{dn}{dz} = \frac{1}{R_{eq}} + \frac{dn'}{dz} \Rightarrow n'(z) = n(z) + z / R_T$$

Per il raggio di curvatura si ha: $1/\rho_{eq} = -\frac{dn'}{dz} = -\frac{dn}{dz} - \frac{1}{R_T} = |\nabla n| - \frac{1}{R_T}$

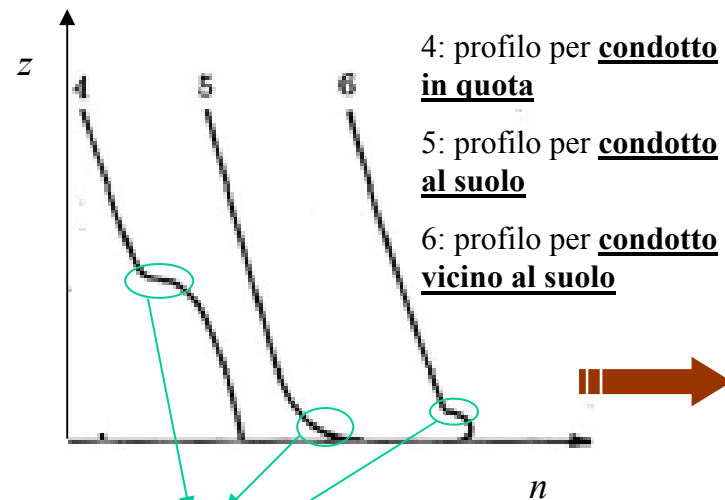
- La situazione in cui $dn'/dz=0$, corrisponde ad valore notevole $\nabla n = -157 \cdot 10^{-6}$ per cui $\rho \approx R_T$ ed i raggi ottici si propagano paralleli al terreno (fig. B pag. 28). Ragionando in termini di n' si è resa la terra piana e quindi in tale situazione il raggio è rettilineo ($\rho_{eq} = \infty$).

Effetto condotto (2/2)

Dato che $dn'/dz > 0$ implica $|\nabla n| < 1/R_T = 157 \cdot 10^{-6}$, ossia $\nabla n > -1/R_T$, abbiamo la situazione illustrata nelle figure



Profili anomali di n



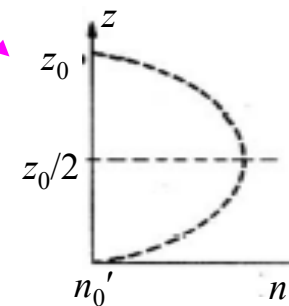
Gradiente fortemente negativo

Esempi di profili anomali (anomalie locali) che producono un possibile intrappolamento del raggio e.m. dando luogo all'effetto condotto. Sono in genere legati ad un eccesso di vapor d'acqua in atmosfera

Consideriamo la parte inferiore del profilo 6
 Esso può schematizzarsi come:

$$n'(z) = n_0' + n_1' z(z_0 - z) \quad 0 \leq z \leq z_0$$

Tra $z_0/2$ e z_0 si ha $dn'/dz < 0$, per cui il percorso elettromagnetico si incurva verso il basso rispetto alla superficie terrestre, resa piana dalla trasformazione. Tra 0 e $z_0/2$ e $dn'/dz > 0$, per cui il percorso elettromagnetico si incurva verso l'alto.



Traiettorie dei raggi in un condotto superficiale

- Perchè l'energia elettromagnetica resti intrappolata nel condotto è necessario che la quota z_t per cui il percorso ha tangente orizzontale sia minore di z_0 . Poichè n' è decrescente tra $z_0/2$ e z_0 dovrà essere: $n'(z_t) \geq n'(z_0)$.

Per la legge di Snell generalizzata:

$$n'(z_t) \sin(\pi/2) = n'(z_t) = n'(z_0/2) \sin \theta_i$$

$$\Rightarrow n'(z_0/2) \sin \theta_i \geq n'(z_0) \Rightarrow$$

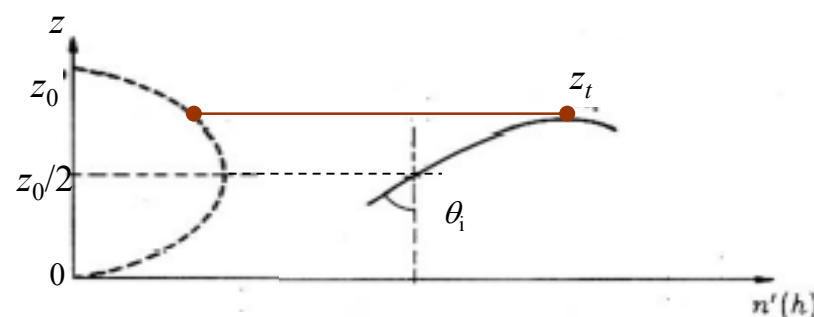
sostituendo le espressioni di $n'(z)$ del modello di schematizzazione considerato si ottiene:

$$\theta_i \geq \arcsin \frac{1}{1 + (n_1' z_0^2 / 4n_0')} = \theta_c : \text{angolo critico}$$

In genere θ_c è leggermente inferiore a 90°

\Rightarrow raggi quasi orizzontali

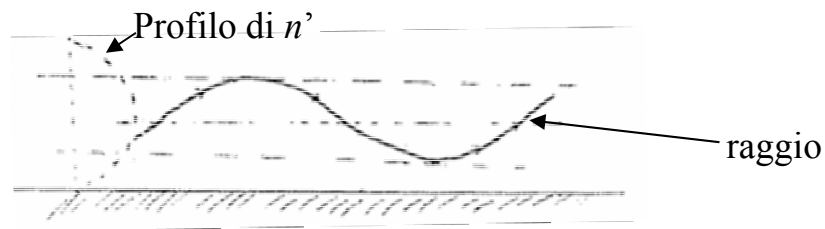
A titolo di esempio, se $n_0'=1$, $n_1'=1.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-2}$ e $z_0=20 \text{ m}$ \rightarrow l'angolo critico è 89.708°



Si noti che avendo reso piana la superficie terrestre si può usare la legge di Snell generalizzata per terra piana (più semplice)

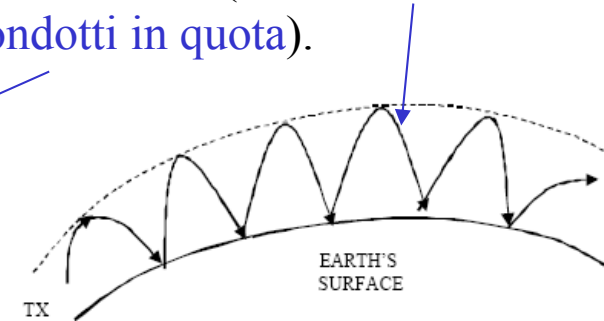
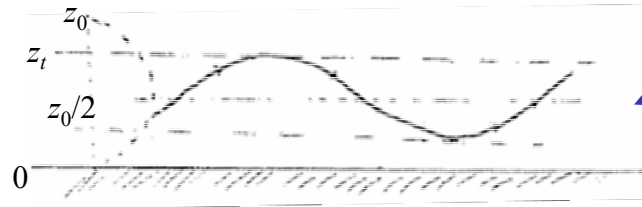
Analogia con guida dielettrica

- Dalla relazione precedente si evince che tutti i raggi con $\theta_i > \theta_c$ sono intrappolati nel condotto. In effetti c'è anche una dipendenza dalla frequenza.
- L'azione guidante di un condotto è simile a quella di una guida dielettrica che sfrutta il fenomeno della *riflessione totale* nel caso di incidenza oltre l'angolo limite (indice rifrazione mezzo 1 in cui si propaga l'onda incidente > indice rifrazione mezzo 2 in cui si propaga l'onda trasmessa).
- Si ricorda che nel caso di riflessione totale la potenza associata all'onda rifratta (onda evanescente) è totalmente reattiva per cui tutta la potenza attiva è riflessa.



Lunghezza d'onda di taglio (cut-off)

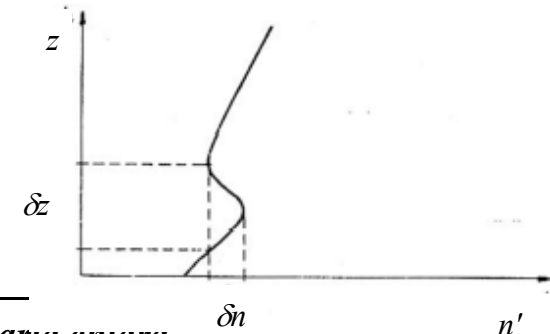
- Il condotto ha un effetto guidante: la parete superiore della guida dielettrica è la quota $z = z_t$ mentre la parete inferiore è la superficie terrestre (*condotti al suolo*) ovvero la quota inferiore del condotto stesso (*condotti in quota*).



- Il fenomeno del condotto è molto più frequente sulle superfici marine che su quelle terrestri essendo legato principalmente ad un eccesso di vapore acqueo. Lo spessore del condotto varia da pochi metri a 400-500 metri.*
- Il fenomeno del condotto ha caratteristiche di propagazione guidata e, come tale, limiti minimi di frequenza al di sotto dei quali è sotto cut-off. Se δz è lo spessore del condotto e δn indica la variazione di indice di rifrazione all'interno di esso, si dimostra che lunghezza d'onda deve soddisfare la seguente condizione approssimata:

$$\lambda < \lambda_c = 2.5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\delta N}{\delta z} - 0.157 \right)^{1/2} \delta z^{3/2} \quad [\text{m}]$$

$$\delta N = \delta n \cdot 10^6$$

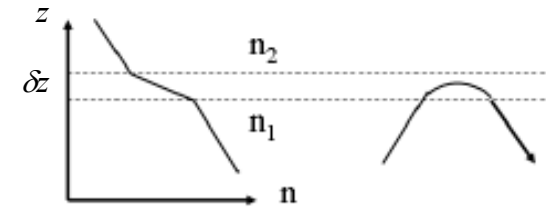




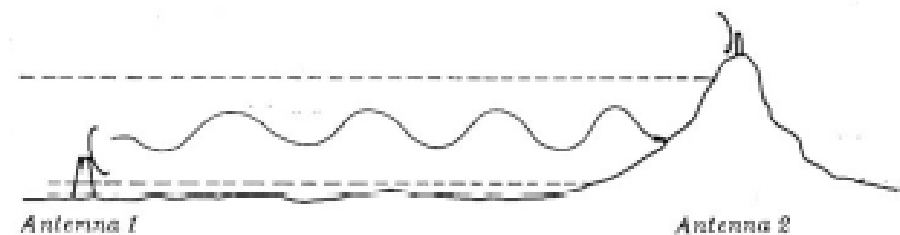
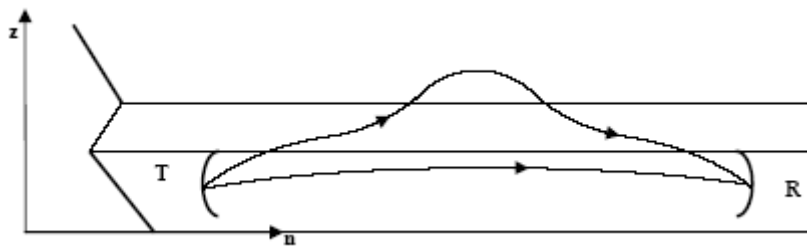
Radiopropagazione in aria chiara e aspetti statistici

Considerazioni sui condotti

- Normalmente, λ_c è tale che si hanno condotti alle frequenze UHF e superiori. A frequenze più basse invece, l'effetto di eventuali intensi gradienti di n viene ad essere simile a quello di una discontinuità (vedi figura) con conseguente riflessione. L'onda non viene intrappolata nello strato di spessore δz , ma è riflessa verso il basso.



- L'effetto condotto può produrre forti attenuazioni su collegamenti tra antenne a causa dell'interferenza col segnale utile (figura a sx) o rendere “cieco” un radar per oggetti al di sopra di una certa quota (figura a dx). *Solo quando lo si verifica con regolarità può essere sfruttato a fini propagativi.* In tal caso sia l'antenna Tx che quella Rx devono essere all'interno del condotto.



Fenomeni a piccola scala: turbolenza

- Oltre alle variazioni su grande scala (componente stratificata), l'indice di rifrazione della troposfera presenta delle variazioni su piccola scala (componente turbolenta), legate a fenomeni turbolenti di rimescolamento di masse d'aria di caratteristiche (temperatura, umidità) diverse.
- Le variazioni spaziali dell'indice di rifrazione sono quindi descrivibili tramite una variabile aleatoria, data dalla somma di una componente media e di una componente fluttuante:

$$n(\mathbf{r}) = \langle n(\mathbf{r}) \rangle + n_1(\mathbf{r}), \quad \text{con } n_1(\mathbf{r}) \ll \langle n(\mathbf{r}) \rangle$$

- Tramite *il metodo di perturbazione di Born*, abbiamo dimostrato che il termine n_1 (moltiplicato per il campo incidente che illumina la zona turbolenta) funge da ripetitore naturale che diffonde in tutte le direzioni. In tal modo, *una parte debole di potenza può raggiungere un'antenna ricevente, anche in assenza di visibilità diretta*. Negli anni passati, gli effetti delle fluttuazioni atmosferiche erano utilizzati nei collegamenti, detti *tropodiffusione*, aldilà dell'orizzonte.
- Lo sviluppo delle telecomunicazioni via satellite ha notevolmente ridotto l'uso di questa tecnica. Per contro, le fluttuazioni dell'indice di rifrazione producono il fenomeno delle scintillazioni e possono contribuire al fenomeno dei cammini multipli (*multipath*), due fondamentali problemi nelle telecomunicazioni.

Scintillazioni troposferiche da turbolenza

- **Le scintillazioni sono variazioni rapide del segnale ricevuto**, dovute a turbolenza atmosferica, particolarmente dannose nelle trasmissioni a larga banda. Si caratterizzano tramite il parametro di log-ampiezza χ , che è definito come il logaritmo naturale del rapporto tra l'ampiezza istantanea del segnale misurato e la sua media, e tramite la varianza di scintillazione σ_χ^2 .

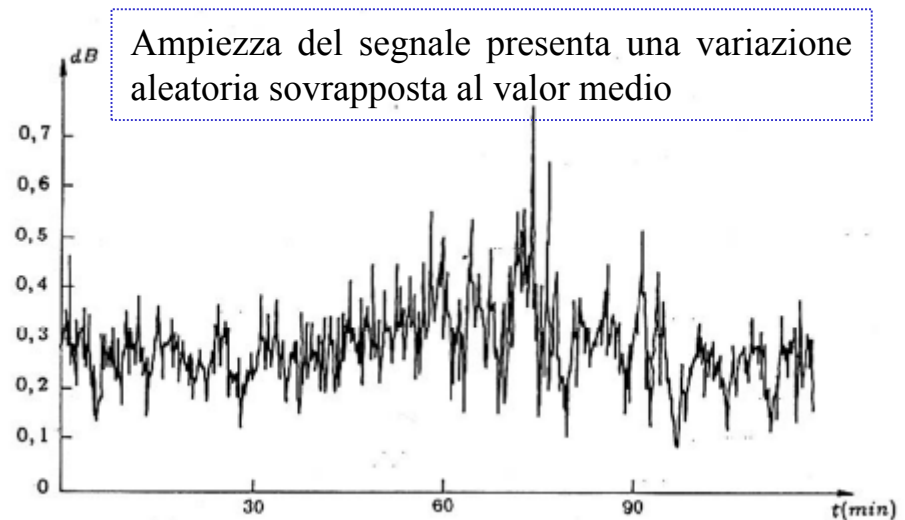
Un'espressione per σ_χ^2 è:

$$\sigma_\chi^2 = 0.307 C_n^2 k_0^{7/6} L^{11/6}$$

C_n : costante di struttura

k_0 : cost. di propagazione nel vuoto

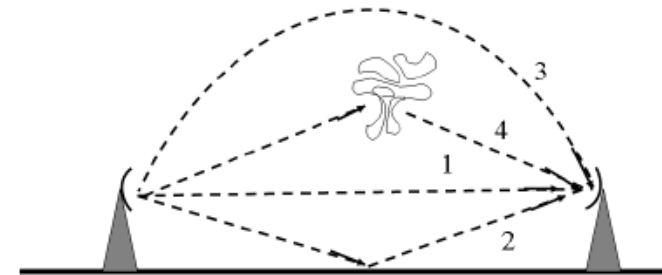
L : lunghezza della zona turbolenta
all'interno del collegamento



- L'effetto delle scintillazioni cresce circa linearmente con la frequenza (proporzionale a k_0), e cresce con C_n (contenente l'informazione sull'entità delle fluttuazioni di n) con andamento quadratico. Un esempio di scintillazione in un collegamento via-satellite è mostrato in figura. Si riferisce a registrazioni effettuate presso la stazione del Fucino ($f = 11.8$ GHz). **Le scintillazioni sono importanti per $f > 10$ GHz** soprattutto nei collegamenti via-satellite.

Cammini multipli

- Il fenomeno dei cammini multipli interessa la propagazione nei collegamenti orizzontali o comunque a bassa elevazione, quali i *ponti radio a microonde*, per $f < 10$ GHz. Sopra i 10 GHz assumono importanza considerazioni legate alla pioggia.
- Si intende come cammini multipli (*multipath*) la presenza contemporanea di due o più percorsi attraverso cui la potenza viaggia tra l'antenna trasmittente e quella ricevente. I campi dovuti ai diversi cammini si ricombinano in prossimità dell'antenna ricevente con diverse relazioni di fase, variabili nel tempo. Ne conseguono oscillazioni della potenza ricevuta che possono essere anche molto intense. Tale effetto è denominato affievolimento (*fading*) o attenuazione in aria chiara da cammino multiplo.
- I cammini multipli possono essere prodotti dalla contemporanea presenza di: cammino diretto (1), riflessioni dal terreno (2), riflessioni dovute a forti gradienti dell'indice di rifrazione (3). Le fluttuazioni dell'indice di rifrazione possono costituire un ulteriore contributo (4).



Rappresentazione statistica di attenuazione

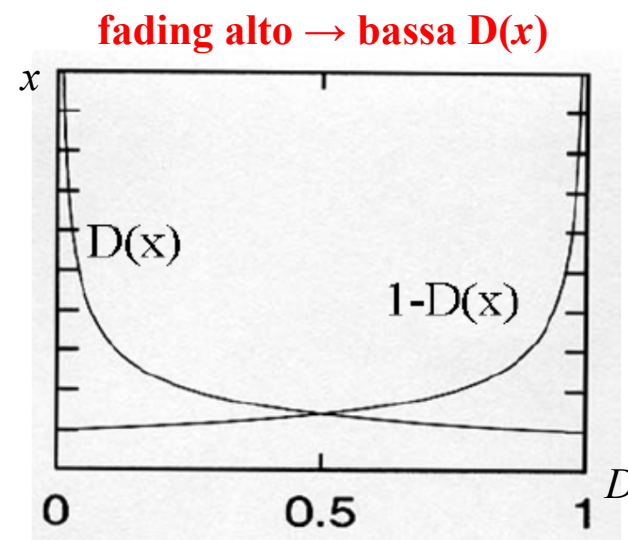
- L'effetto dell'atmosfera e di eventuali riflessioni del terreno implica che il collegamento tra due antenne abbia luogo attraverso più di un cammino. Nell'esempio di figura, $|\underline{E}_2| \sim |\underline{E}_1|$ e, poiché in prossimità dell'antenna ricevente i campi si ricombinano con una relazione di fase aleatoria, il fading può essere molto elevato.



- L'aleatorietà della fase comporta che per il fenomeno del fading si debba dare una descrizione statistica. Si usa la **distribuzione cumulativa complementare D** .
- Data una variabile aleatoria (v.a.) X , si definisce distribuzione cumulativa $D(x)$ la probabilità che X sia maggiore o uguale ad un valore x :

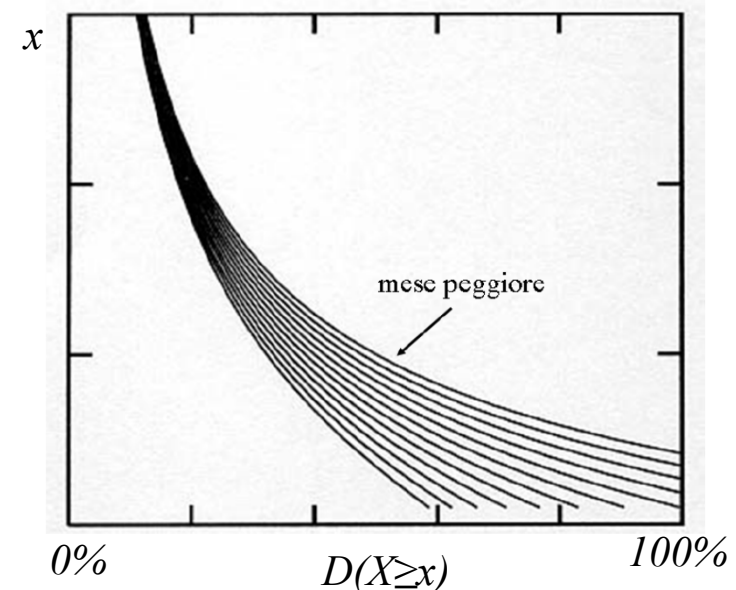
$$D(x) = \Pr(X \geq x) = 1 - \Pr(X \leq x) \quad \text{con } 0 \leq D(x) \leq 1$$

- La v.a. X può rappresentare un effetto indesiderato come il *fading*. Nella propagazione sono comunemente usate sia la $D(x)$ che la $1-D(x)$.



Concetto di mese peggiore

- In genere, gli andamenti di $D(x)$ sono ottenuti sulla base di esperimenti in cui viene registrata la variazione della variabile X in funzione del tempo, per intervalli significativamente lunghi (tipicamente, qualche anno). Spesso la $D(x)$ viene espressa in termini di **percentuale (di tempo)**, tra 0 e 100, rispetto alla base temporale scelta (1 anno = 8760 h \Rightarrow 10% = 876 h; 1% = 87,6 h).
- Poiché i processi sono generati da effetti fisici, gli andamenti ottenuti sperimentalmente sono spesso ben approssimati da funzioni tipicamente usate in statistica (gaussiana, log-normale, Rayleigh). In letteratura, i diagrammi sono in genere riportati rappresentando la variabile X in dB e/o usando una scala logaritmica per la $D(x)$.
- E' molto comune rappresentare la $D(x)$ facendo riferimento al **mese peggiore**. Registrando il processo d'interesse per molti anni e riportando separatamente le 12 distribuzioni che corrispondono ai diversi mesi dell'anno, si avranno diversi andamenti. La **distribuzione del mese peggiore** è quella per la quale, a parità di valori di D , si hanno i valori più alti di attenuazione (*fading*).



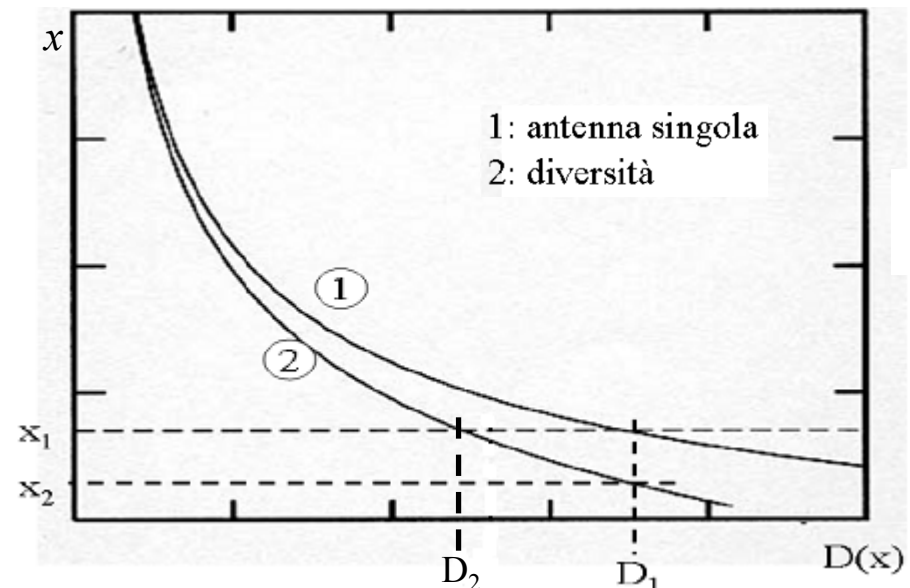
Tecniche di diversità

- Allo scopo di migliorare l'affidabilità del collegamento, possono essere usate le tecniche di diversità che consistono nel *trasmettere lo stesso segnale su due vie alternative*, scegliendo in ricezione quella alla quale corrisponde la migliore qualità di segnale ricevuto. Esistono due principali tecniche di diversità:

1. Diversità di frequenza: si trasmette la stessa informazione su due diverse frequenze affette dall'atmosfera in modo sostanzialmente diverso.
2. Diversità di spazio: si usano due diverse antenne riceventi, a distanza sufficiente da garantire una significativa incorrelazione statistica tra i due segnali ricevuti (vedi figura).

Fissata D_1 , l'attenuazione superata decresce da x_1 a x_2 (*diversity gain factor G_D*).

Fissata x_1 , la probabilità che l'attenuazione sia superiore a x_1 decresce da D_1 a D_2 (*diversity improvement factor I_D*).



Cammini multipli: aspetti statistici

Per l'attenuazione da cammini multipli, così come per l'attenuazione dovuta a pioggia, si può dare una **descrizione statistica**.

Esempio: collegamento a 4 GHz

$P(a)=\Pr(A\leq a)=1-\Pr(A\geq a)$: probabilità che A sia inferiore al valore a

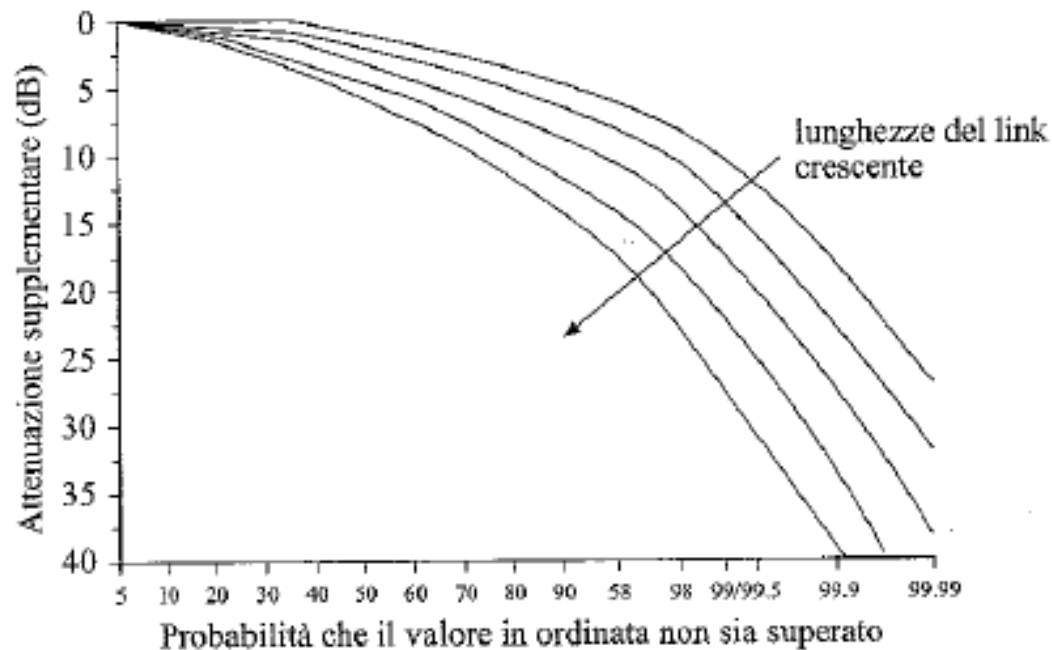


Figura 4.16 Distribuzione cumulativa dell'attenuazione supplementare (dB), per lunghezze del link di 50, 75, 100, 150 e 200 km.

Stima ITU dell'attenuazione in aria chiara

- Un metodo empirico per stimare statisticamente il *fading*, proposto da ITU-R P530, è stato sviluppato da **regressioni multiple di dati sperimentali ottenuti in 251 collegamenti, di lunghezza compresa tra 7.5 km e 185 km, appartenenti a diverse regioni climatiche, e per frequenze fino a 37 GHz**. I passi fondamentali del metodo per **collegamenti terrestri** sono:

- i. si considera il parametro dN_1 , che è il gradiente di rifrattività nei primi 65 m non ecceduto per l'1% del tempo. Per tale dato, sono disponibili mappe mondiali.
- ii. si calcola il *geoclimatic factor* K con la seguente formula empirica:

$$K = 10^{(-4.2 - 0.0029 dN_1)}$$

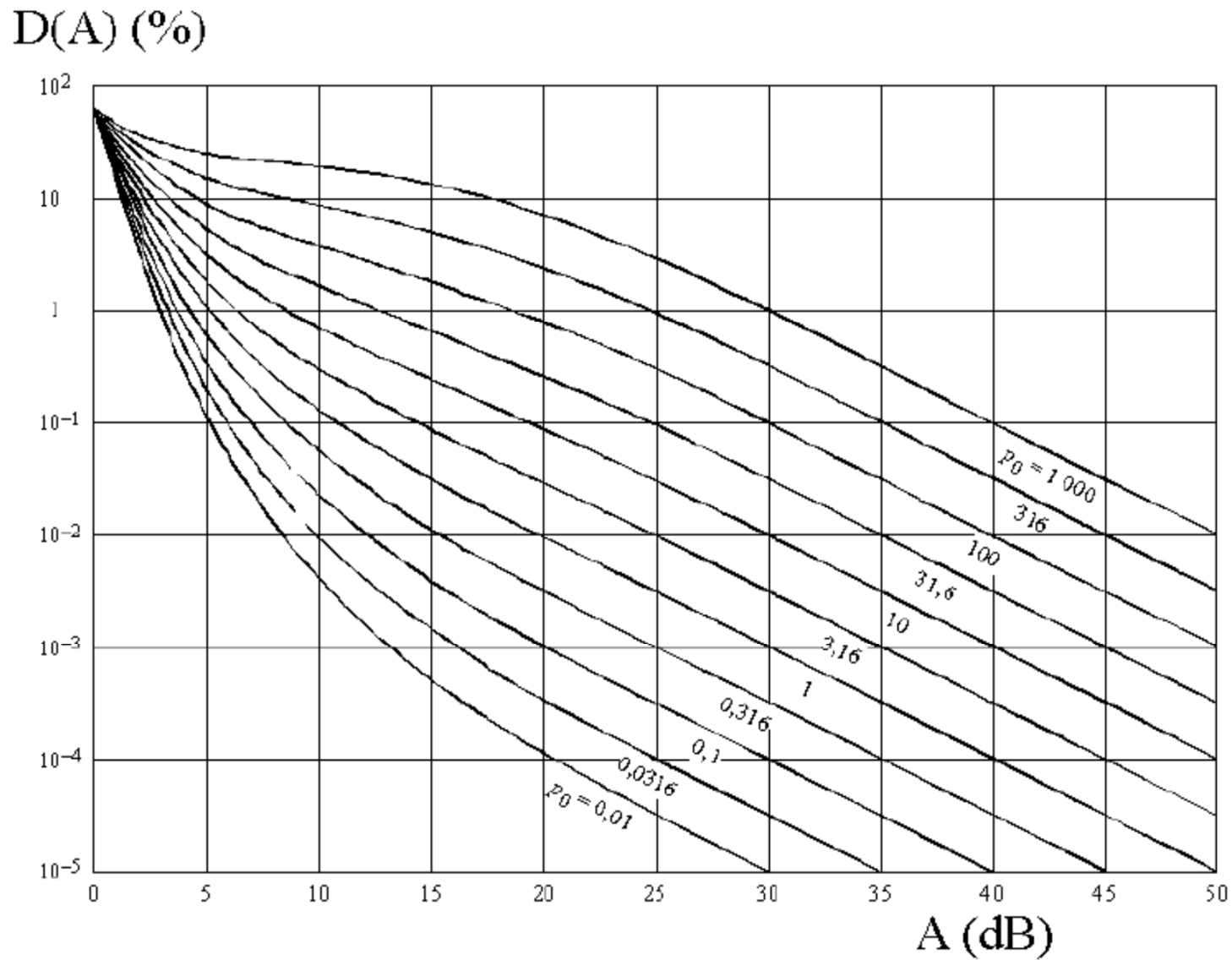
- iii. si calcola il *multipath occurrence factor* p_0 con la seguente formula empirica:

$$p_0 = Kd^{3.2} (1 + |e_p|)^{-0.97} 10^{(0.032f - 0.00085h_L)}$$

dove d è la lunghezza del collegamento (km), $|e_p|$ è l'angolo di inclinazione del collegamento (mrad), f è la frequenza (GHz) e h_L è la minima tra le quote delle antenne Tx e Rx.

- vi. Usando ancora formule empiriche, si ottengono distribuzioni cumulative di *fading*, in funzione di p_0 , riferite al mese peggiore, come quelle riportate alla pagina successiva.

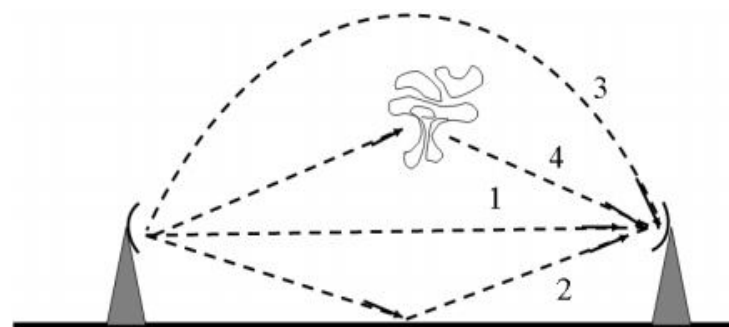
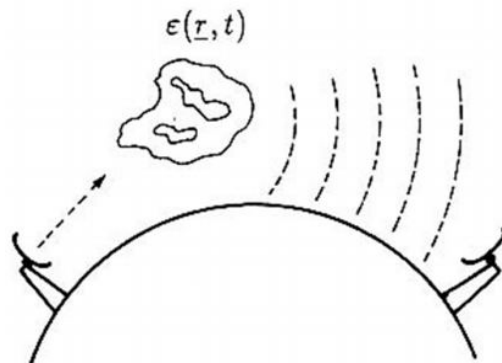
Prob. di attenuazione in aria chiara (fading)



Stima ITU della scintillazione (1)

I **parametri richiesti** per il metodo includono (**ITU-R Recommendation 618-10**):

- T: (media della) temperatura ambiente media della superficie ($^{\circ}\text{C}$) del sito per un periodo di un mese o più lungo
- H: (media della) umidità relativa media di superficie (%) del sito per un periodo di un mese o più lungo (NOTA: se non sono disponibili i dati sperimentali per T ed H, potrebbero essere usate le mappe di N_{wet} nella Recommendation ITU-R P.453; $N_{wet} = 3.732 \times 10^5 e_{wv}$ con e_{wv} pressione di vapor saturo)
- f: frequenza (Ghz), dove $4 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$
- θ : angolo di elevazione del percorso, dove $\theta \geq 4^{\circ}$
- D: diametro fisico (m) dell'antenna della stazione terrestre
- η : efficienza dell'antenna (se non è conosciuta, $\eta=0.5$ è una stima conservativa)



Stima ITU della scintillazione (2)

- **Passo 1**: per il valore di t , calcolare la saturazione della pressione del vapore acqueo, e_s (hPa), come specificato nella Recommendation ITU-R P.453.
- **Passo 2** : calcolare il termine riferito all'umidità della radio refrattività, N_{wet} , corrispondente a e_s , t e H come specificato nella Recommendation ITU-R P.453 (Passi 1 e 2 non sono necessari se N_{wet} si ottiene direttamente dalla Recommendation ITU-R P.453.)
- **Passo 3** : calcolare la deviazione standard dell'ampiezza del segnale, σ_{ref} :

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad \text{dB}$$

- **Passo 4** : calcolare la lunghezza del percorso effettiva L con la formula

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4}} + \sin \theta}$$

dove h_L è la l'altezza dello strato di turbolenza; il valore da usare è $h_L=1000$ m

- **Passo 5**: Stimare il diametro effettivo dell'antenna, D_{eff} , dal diametro geometrico, D , e l'efficienza dell'antenna η

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D$$

Stima ITU della scintillazione (3)

- **Passo 6:** calcolare il fattore di media dell'antenna dalla seguente formula:

$$g(x) = \sqrt{3.86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[\frac{11}{6} \arctan \frac{1}{x} \right] - 7.08 x^{5/6}} \quad x = 1.22 D_{eff}^2 (f / L)$$

Se l'argomento della radice quadrata è negativo (per esempio, quando $x \geq 0.7$), la predetta attenuazione dovuta alle scintillazioni per ogni percentuale di tempo è zero e i prossimi step non sono necessari

- **Passo 7:** calcolare la deviazione standard del segnale per il periodo e per il percorso di propagazione considerati

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1.2}}$$

- **Passo 8:** calcolare il fattore di percentuale del tempo, $a(p)$, per la percentuale di tempo, p , nel range di interesse $0.01 < p \leq 50$

$$a(p) = -0.061 (\log_{10} p)^3 + 0.072 (\log_{10} p)^2 - 1.71 \log_{10} p + 3.0$$

- **Passo 9:** calcolare l'attenuazione dovuta alle scintillazioni per la percentuale di tempo p dalla seguente formula

$$A_s(p) = a(p) \cdot \sigma$$

Stima ITU della scintillazione (4)

