

Il Campo Elettromagnetico

Se in un punto dello spazio vuoto o di un mezzo dielettrico generiamo un campo magnetico variabile, per esempio sinusoidale, con una certa frequenza, questo crea necessariamente un campo elettrico variabile con la stessa frequenza, il quale a sua volta crea un campo magnetico ugualmente variabile, e così via.

Nasce così un campo elettromagnetico in cui coesistono due campi simultaneamente variabili nel tempo, uno elettrico e uno magnetico.

Tra campo magnetico e campo elettrico si determinano continui scambi di energia, con conseguente nascita di un'onda elettromagnetica, che si propaga nello spazio sede del campo elettromagnetico, in modo libero (campo irradiato da un'antenna) o guidato (nel dielettrico tra i due fili di una linea di trasmissione, all'interno di una guida d'onda, lungo una fibra ottica); la velocità di propagazione dipende dalle caratteristiche del mezzo dielettrico considerato.

Nel vuoto (praticamente anche nell'aria a normale pressione atmosferica) vale:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3 * 10^8 \text{ m/s}$$

mentre in un dielettrico materiale la velocità è data da:

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

ciascun materiale è caratterizzato da un indice di rifrazione n dato da :

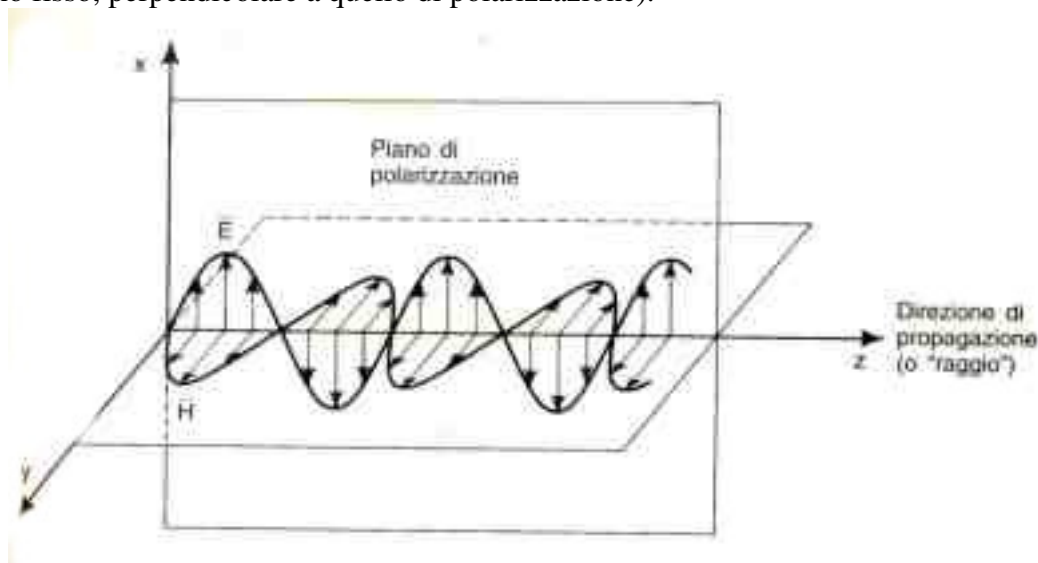
$$n = \frac{c}{u}.$$

Risulta evidente che n è sempre maggiore di uno.

Densità di Potenza

Un'onda elettromagnetica è definita, in ogni punto dello spazio in cui si propaga, da due vettori costantemente perpendicolari tra di loro: il vettore campo elettrico E ed il vettore campo magnetico H .

Nella figura si vede un'onda monocromatica polarizzata linearmente, con il vettore E che giace e trasla su un piano determinato detto piano di polarizzazione (e quindi con il vettore H che trasla su un piano fisso, perpendicolare a quello di polarizzazione).



In ogni punto dello spazio sede di un'onda elettromagnetica è definita la densità di potenza elettromagnetica S nel punto considerato uguale al prodotto fra i valori efficaci del campo elettrico e magnetico. Se E_M e H_M sono i valori massimi (ampiezze) dei due campi:

$$S = \frac{E_M H_M}{2}.$$

Nel vuoto o nello spazio libero (mezzo dielettrico privo di perdite, omogeneo e isotropo) il valore di S è inversamente proporzionale al quadrato della distanza del punto considerato dalla sorgente, poiché in assenza di perdite la potenza irradiata rimane invariata ma si distribuisce su una superficie sferica la cui area cresce con il quadrato della distanza dalla sorgente (il raggio della sfera è uguale alla distanza tra punto e sorgente).

Il rapporto E_M/H_M è indipendente dal punto considerato ed è pari all'impedenza caratteristica del mezzo di propagazione, che per il vuoto assume un valore puramente ohmico (perché E e H oscillano in fase tra loro) dato da:

$$R_0 = \frac{E_M}{H_M} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \equiv 377\Omega .$$

Classificazione delle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche per radiocomunicazioni vengono classificate in base alla lunghezza d'onda λ

$$\lambda=c/f \quad c=\lambda f$$

| Numero di banda | banda | Suddivisione metrica | sigla | servizi | Caratteristiche di propagazione |
|-----------------|-------------|----------------------|-----------------------------|---|--|
| 4 | 3-30kHz | MIRIAMETRICHE | VLF(very low frequencies) | Nautici | Onda di superficie |
| 5 | 30-300kHz | CHILOMETRICHE | LF(low frequencies) | Nautici Radiodiffusione a onde lunghe | Onda di superficie |
| 6 | 300-3000kHz | ETTOMETRICHE | MF(medium frequencies) | Radiodiffusione a onde medie | Onda di superficie Onda spaziale (di notte) |
| 7 | 3-30MHz | DECAMETRICHE | HF(high frequencies) | Radiodiffusione a onde corte Radioamatori | Onda spaziale |
| 8 | 30-300MHz | METRICHE | VHF(very high frequencies) | Radiodiffusione FM TV radioamatori Servizi vari | Onda diretta |
| 9 | 300-3000MHz | DECIMETRICHE | UHF(ultra high frequencies) | TV, radiomobile Ponti radio | Onda diretta Scattering troposferico |
| 10 | 3-30GHz | CENTIMETRICHE | SHF(super high frequencies) | Ponti radio, satellite, radioastronomia, radar | Onda diretta |
| 11 | 30-300GHz | MILLI METRICHE | EHF(extra high frequencies) | Ricerche, satellite | Onda diretta |

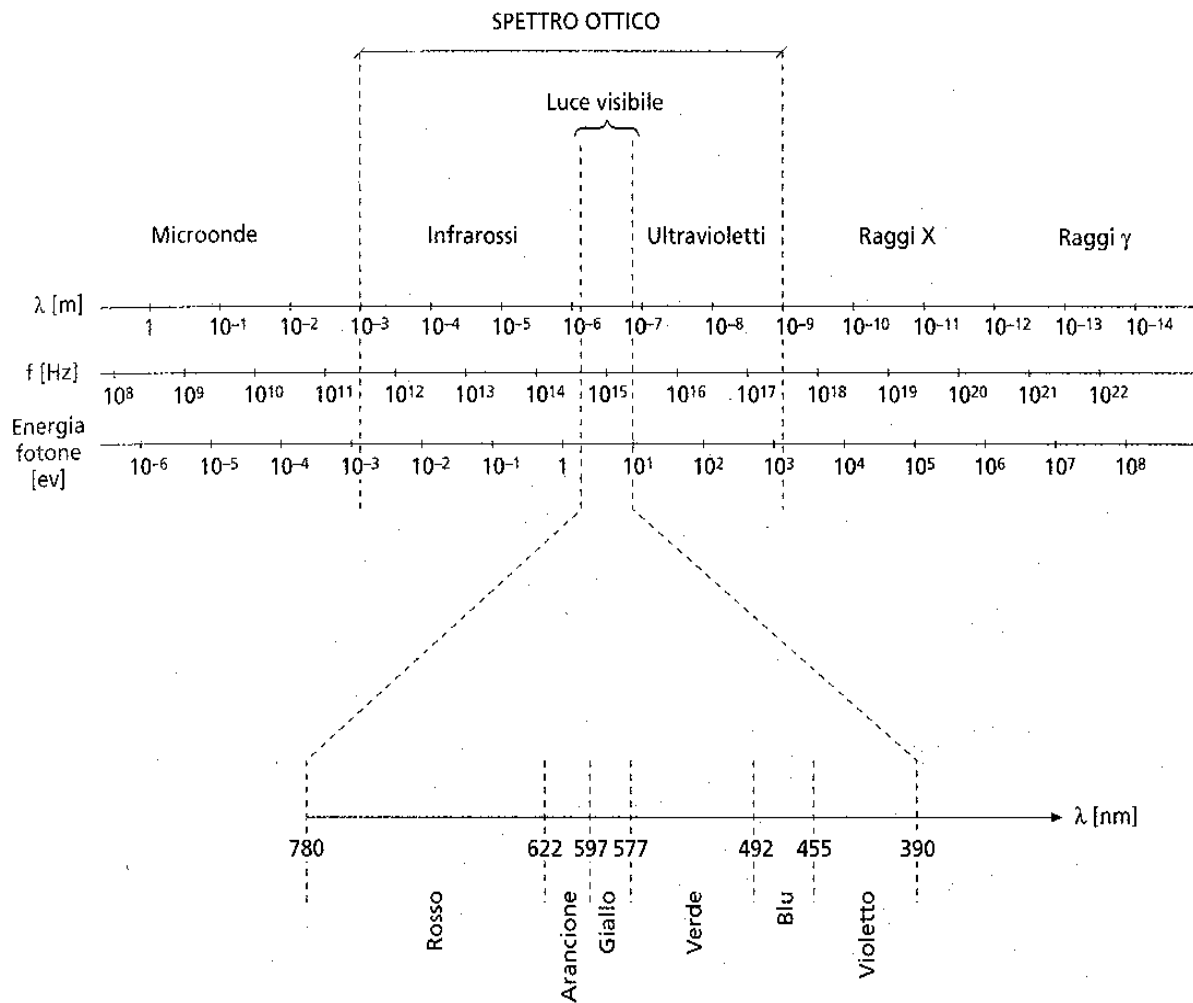
Le onde con λ inferiore al metro ma superiore all'infrarosso sono denominate **microonde**.

| Banda | Frequenza in GHz | Lunghezza d'onda in cm |
|-------|------------------|------------------------|
| P | 0,255-0,390 | |
| L | 0,39-1,55 | |
| S | 1,55-3,90 | |
| C | 3,9-6,2 | |
| X | 6,2-10,9 | |
| K | 10,9-36 | |
| Q | 36-46 | |
| V | 46-56 | |
| W | 56-100 | |

Nel vuoto il meccanismo di propagazione delle onde elettromagnetiche è indipendente dalla loro lunghezza d'onda. La potenza e.m. irradiata dall'antenna trasmittente rimane invariata nella propagazione, la densità di potenza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dall'antenna, mentre le intensità del campo elettrico e magnetico decrescono proporzionalmente con tale distanza.

In ambiente terrestre invece tali modalità di propagazione non sono le stesse per tutte le lunghezze d'onda, perché è diversa l'influenza dei vari fenomeni che possono verificarsi per la presenza del suolo e dell'atmosfera, quali l'**assorbimento** (attenuazione della potenza e.m. nella propagazione), la **riflessione** (rinvio parziale o totale dell'onda verso la sorgente), la **rifrazione** (cambiamento della direzione di propagazione) la **diffrazione** (aggiramento di ostacoli di dimensioni paragonabili a quelle della lunghezza d'onda) e la **diffusione** (riflessione e diffrazione caotiche in un mezzo disomogeneo).

Il meccanismo della propagazione va studiato in base alle lunghezze d'onda interessate.



Come evidenziato da questo spettro, le onde elettromagnetiche possono essere considerate come composte da fotoni. Un fotone è una particella senza massa e senza carica ma con una certa quantità di energia che può essere ceduta ad eventuali ostacoli (tale energia viene ceduta a elettroni o protoni ovvero a particelle cariche).

L'energia E del fotone è legata alla frequenza f dell'onda elettromagnetica dalla relazione

$$E = hf$$

Dove $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js è la costante di Planck.

Ottica geometrica : descrive la propagazione della luce tramite **raggi luminosi**, con i quali si visualizza la direzione di propagazione. È un metodo approssimato valido quando la lunghezza dell'onda e.m. è molto minore delle dimensioni dell'ostacolo che incontra.

Ottica fisica : descrive la propagazione della luce tramite i **modi di propagazione**, soluzioni delle equazioni di Maxwell che descrivono in modo completo e preciso i fenomeni elettromagnetici.

Riflessione e rifrazione delle onde elettromagnetiche

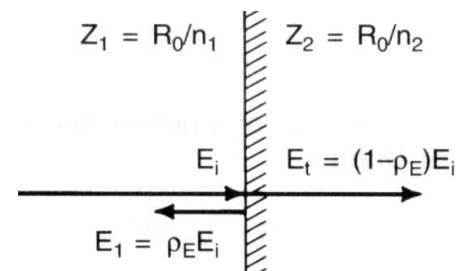
Quando un'onda e.m., propagandosi, passa da un mezzo con indice di rifrazione n_1 ad un altro con indice di rifrazione $n_2 \neq n_1$, in corrispondenza della superficie di separazione fra i due mezzi si ha un cambiamento della velocità di propagazione, che determina una parziale riflessione ed una eventuale rifrazione.

Nel caso di **incidenza normale** (la direzione di propagazione è perpendicolare alla superficie di separazione) **si produce soltanto riflessione**. Il coefficiente di riflessione è il rapporto fra le ampiezze del campo elettrico riflesso e incidente

$$\rho_E = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

la riflettanza è la frazione di potenza elettromagnetica riflessa

$$\rho = \frac{P_r}{P_i} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$



Nel caso di **incidenza obliqua**, definiti i raggi incidente, riflesso e rifratto e i rispettivi angoli si ha:

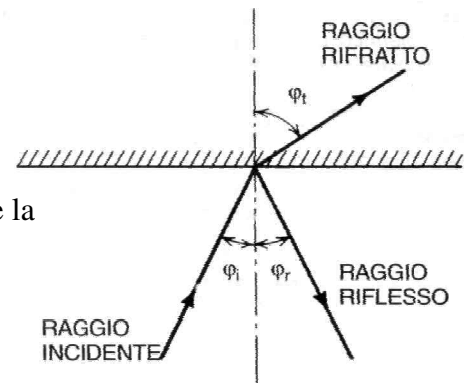
1. i tre raggi giacciono sullo stesso piano
2. $\varphi_r = \varphi_i$
3. $n_1 \sin \varphi_i = n_2 \sin \varphi_t$ (legge di Snell)

se l'angolo φ_t è uguale a 90° siamo nella condizione limite oltre la quale si ha riflessione totale, ovvero non esiste raggio rifratto.

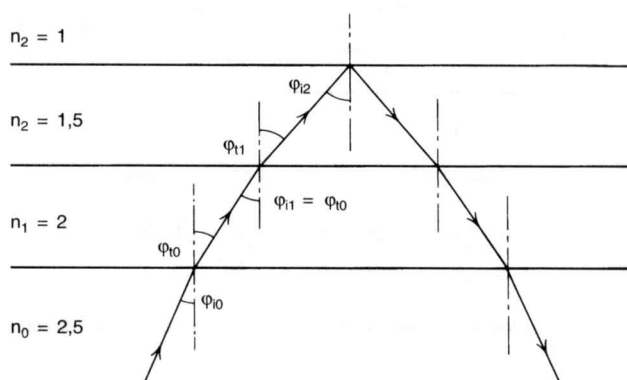
Solo se $n_2 < n_1$ si può avere riflessione totale quando

$$\varphi_i \geq \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$

se $n_2 > n_1$ si avranno sempre raggio riflesso e rifratto, ovvero non si può avere riflessione totale.



Attenzione al fatto che gli indici di rifrazione dipendono dalla frequenza dell'onda elettromagnetica, quindi frequenze diverse vengono rifratte con angoli diversi e sia ρ_E che ρ dipendono dalla frequenza.

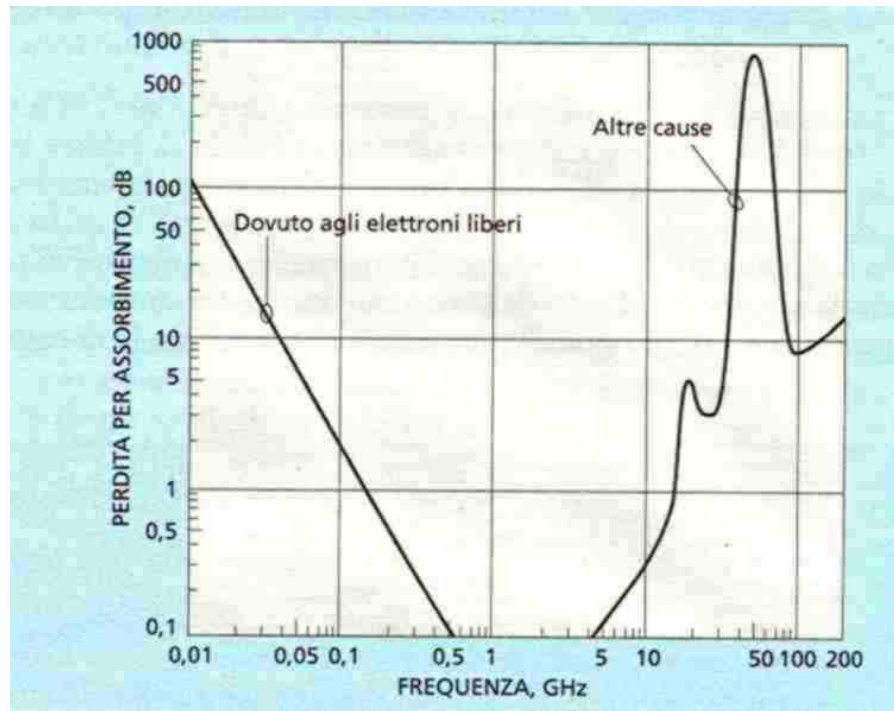


Se si susseguono più strati a diverso indice di rifrazione si può ottenere una riflessione come in figura.

Se la variazione di n è continua il raggio può descrivere un arco di circonferenza.

Assorbimento

Atomi, molecole e cariche presenti in un mezzo di propagazione possono assorbire l'energia associata ad un'onda elettromagnetica, tale assorbimento è diverso per onde di diversa frequenza. In atmosfera è importante l'assorbimento delle molecole di ossigeno, del vapor acqueo e degli elettroni.



Diffrazione

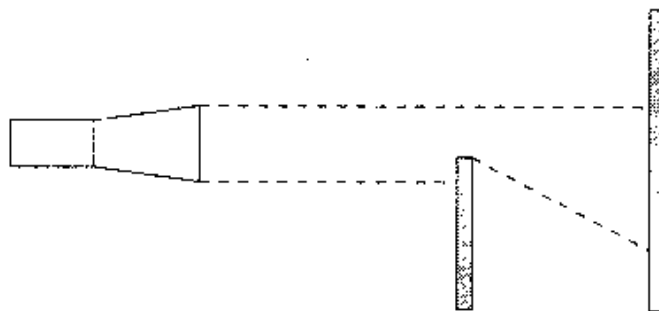
La diffrazione è quel fenomeno che avviene quando un'onda e.m. passa vicino al contorno di un oggetto che non può superare. L'onda e.m. diffonde energia anche dietro l'ostacolo ed è come se si "incurvasse" attorno al margine dell'ostacolo stesso.

Il fenomeno è ben visibile se si punta una lampada che emette un fascio di luce ben concentrato contro uno schermo, interponendo un ostacolo non trasparente. Invece di avere un'ombra perfettamente delineata sullo schermo in corrispondenza dell'ostacolo, si ha una diffusione della luce anche dietro di esso. La luce ha quindi in parte "aggirato" l'ostacolo.

La diffrazione aumenta con la lunghezza d'onda, cosicché le onde radio di bassa frequenza s'incurvano notevolmente attorno agli ostacoli, riuscendo in tal modo a superarli. E quindi per questo motivo che le onde radio di bassa frequenza possono seguire la curvatura terrestre.

La diffrazione è spiegata dal principio di Huygen, il quale afferma che ogni punto del fronte di un'onda e.m. può essere considerato una sorgente di irradiazione (isotropica).

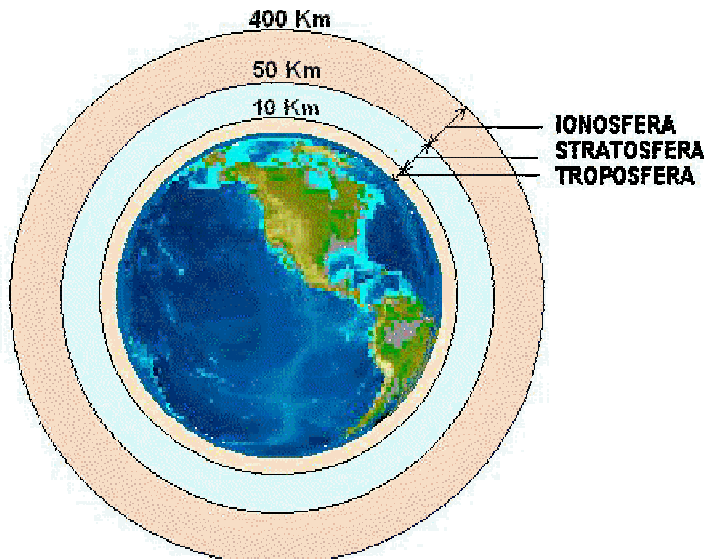
Perciò quando un'onda colpisce un ostacolo, i punti del fronte d'onda vicini all'ostacolo stesso irradiano energia anche nella regione d'ombra.



Propagazione delle radioonde in atmosfera

Di solito si suddivide l'atmosfera in tre parti:

- a) troposfera: si estende all'incirca da 0 a 10 km; è la parte più bassa dell'atmosfera, è sede dei fenomeni meteorologici; la temperatura varia molto con l'altezza;
- b) stratosfera: si estende all'incirca da 10 a 50 km; è una regione in cui la temperatura varia relativamente poco con l'altezza; non influenza molto la propagazione;



IL DISEGNO NON E' IN SCALA

c) ionosfera: si estende all'incirca da 50 a 400 km; in tale regione dell'atmosfera terrestre si manifesta una sensibile ionizzazione dei gas, ad opera soprattutto dei raggi ultravioletti provenienti dal sole, gli elettroni liberi e gli ioni positivi che si formano in un gas sottoposto a ionizzazione hanno una vita media limitata, poiché nel loro caotico e incessante movimento all'interno della massa gassosa tendono a ricostruire atomi neutri. L'equilibrio statistico tra le coppie elettrone libero-ione positivo che si formano e quelle che si ricombinano determina la densità elettronica o intensità di ionizzazione N , cioè il numero di elettroni liberi (o di ioni positivi) per unità di volume.

La velocità di ricombinazione fra elettroni liberi e ioni positivi nella ionosfera è tanto più elevata quanto maggiore è la densità dell'atmosfera.

Poiché tale densità diminuisce man mano che ci si allontana dalla terra e l'azione ionizzante è esterna all'atmosfera, l'intensità di ionizzazione cresce dal basso verso l'alto; oltre un certo limite, però, l'estrema rarefazione dell'atmosfera riduce fortemente la probabilità di urto dei fotoni ionizzanti con atomi di gas, per cui l'intensità di ionizzazione prende a decrescere.

La ionosfera si comporta come un mezzo con costante dielettrica equivalente funzione della densità elettronica e della frequenza dell'onda considerata, quindi è definito **un indice di rifrazione equivalente** :

$$n_{eq} = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}}$$

dove N = intensità di ionizzazione.

A seconda delle frequenze di lavoro, si possono avere cinque diverse modalità di propagazione per le onde e.m.:

- per onda di superficie;
- per onda diretta;
- per onda riflessa dal suolo;
- per scattering (diffusione) troposferico;
- per onda riflessa dalla ionosfera.

I primi quattro tipi vengono anche definiti come onde terrestri, perché la loro propagazione avviene nelle vicinanze della superficie terrestre (entro la troposfera), mentre l'ultimo tipo è noto anche come onda spaziale, perché le antenne puntano verso lo spazio (si possono inoltre avere collegamenti via satellite, in cui si utilizzano onde dirette spaziali e il satellite funge da ripetitore).

1) Onda di superficie

L'onda di superficie segue la superficie terrestre (diffrazione) ed è notevolmente influenzata dalle sue caratteristiche elettriche. Le onde con frequenze basse (VLF, LF) possono coprire distanze considerevoli in quanto l'attenuazione aumenta con la frequenza.

La superficie del mare attenua molto poco e quindi queste onde sono usate principalmente per i servizi nautici.

2) Onda diretta

Questo tipo di onda viaggia direttamente dal trasmettitore al ricevitore, essi perciò devono essere (quasi) visibili l'uno all'altro. Per questo motivo si parla anche di propagazione in visibilità ottica (Line Of Sight, LOS).

Questo tipo di propagazione è utilizzato per frequenze nel campo delle onde cortissime (VHF) e delle microonde (UHF, SHF, EHF). Nella realtà il percorso seguito non è rettilineo, bensì è incurvato, a causa della rifrazione dell'atmosfera, e di ciò si tiene conto nel determinare l'altezza delle antenne.

Infatti nell'atmosfera "standard" la densità dell'aria decresce linearmente con l'altezza, di conseguenza nel passare da uno strato di aria più denso a uno meno denso si ha il fenomeno della rifrazione, in quanto la porzione del fronte d'onda che entra per prima nello strato meno denso viaggia più veloce e quindi si ha un incurvamento del percorso. In conclusione, a causa della rifrazione, nell'atmosfera standard le onde radio di altissima frequenza (microonde) compiono percorsi che sono all'incirca archi di circonferenza. Nello studio della propagazione delle microonde (per esempio per determinare l'altezza delle antenne) è un'utile semplificazione il considerare percorsi rettilinei. A questo scopo si definisce il concetto di terra equivalente: si considerano i percorsi delle microonde rettilinei e si tiene conto dell'incurvamento che si ha nella realtà considerando una superficie terrestre fittizia (la terra equivalente, appunto), avente raggio pari a KR_0 , dove R_0 è il raggio terrestre (circa 6367 km) e K è un'opportuna costante. Per l'atmosfera standard il valore di K è pari a $4/3$.

Poiché i percorsi delle microonde sono in realtà archi di cerchio, è possibile raggiungere antenne che sono oltre l'orizzonte visivo (si segue la curvatura terrestre).

Si definisce così l'orizzonte radio, che costituisce la massima distanza alla quale si possono porre due antenne, aventi una data altezza, affinché tra esse vi sia la propagazione per onda diretta (visibilità radio). Per quanto affermato a proposito della terra equivalente, l'orizzonte radio è pari (in condizioni standard) ai $4/3$ dell'orizzonte ottico.

Va comunque notato che per le microonde ogni ostacolo costituisce un'ostruzione del percorso e provoca "zone d'ombra" e diffrazione, inoltre, gli ostacoli possono riflettere le onde radio e quindi far giungere in ricezione segnali che hanno fatto percorsi diversi, causando così fading.

3) Onda riflessa dal suolo

L'onda riflessa dal suolo può essere utile nella comunicazione tra aerei che volano bassi e vicini, ma molto più spesso è indesiderata e dà problemi di interferenza con l'onda diretta (fading).

4) Scattering troposferico

Il fenomeno dello scattering consiste nel fatto che quando un'onda e.m. colpisce un conduttore con superficie irregolare o una zona dell'atmosfera con caratteristiche non omogenee, essa viene sì riflessa, ma è diffusa in più direzioni. Sfruttando le disomogeneità e le turbolenze della troposfera (variazioni di umidità, densità e temperatura), che provocano variazioni dell'indice di rifrazione e quindi una diffusione delle onde e.m., si possono così effettuare collegamenti in ponte radio ben oltre l'orizzonte radio.

E però necessario operare con potenze in trasmissione rilevanti e si possono coprire distanze anche di 400 km.

5) Propagazione nella ionosfera: onde spaziali (sky wave)

Ricordiamo l'indice di rifrazione equivalente

dove N = intensità di ionizzazione.

$$n_{eq} = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}}$$

L'indice di rifrazione equivalente diminuisce procedendo verso l'alto con rapidità crescente fino alla quota h_a , poi continua a decrescere sempre più lentamente fino alla quota h_M oltre la quale inizia a crescere. Quindi c'è una possibilità di riflessione di onde elettromagnetiche che però dipenderà sia dalle frequenze che dall'angolo di incidenza delle onde con la ionosfera.

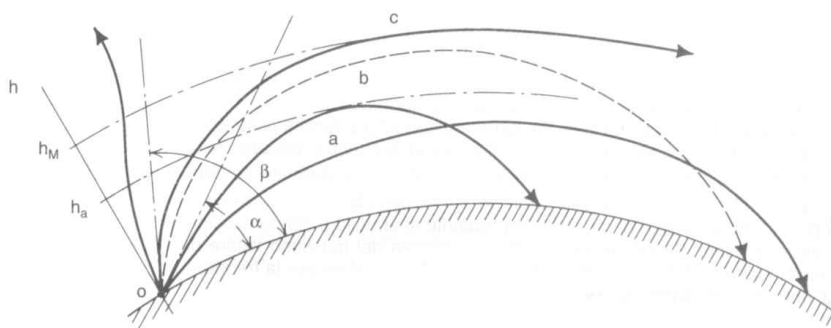
Nella ionosfera l'assorbimento è proporzionale a λ^2 (inversamente proporzionale a f^2) quindi:

a) se la frequenza, f , è molto alta ($f \gg 30$ MHz) n_{eq} risulta all'incirca pari a 1. Di conseguenza la ionosfera non modifica il percorso delle onde e.m., le quali viaggiano all'incirca in linea retta. Quindi, per esempio, nei collegamenti via satellite (che operano a frequenze molto elevate) praticamente non si risente della presenza della ionosfera.

b) per frequenze inferiori a 30 MHz n_{eq} è minore di 1. Quindi si ha rifrazione e si può anche avere riflessione, a seconda della frequenza e dell'angolo di incidenza.

Un raggio uscente dall'antenna con un piccolo angolo rispetto all'orizzonte, per effetto della rifrazione della ionosfera, viene progressivamente incurvato verso il basso fino a tornare a terra ad una grande distanza dall'antenna trasmittente.

Raggi emessi con angoli maggiori vengono riportati a terra a distanze sempre minori fino al raggio



b (emesso con angolo α) che riesce a raggiungere la quota h_a (dove la variazione dell'indice di rifrazione è più forte e quindi la rifrazione è maggiore) che torna a terra alla minima distanza dal trasmettitore.

L'angolo α è il primo angolo critico, la minima distanza corrispondente viene detta

distanza di skip.

Per angoli superiori ad α i raggi tornano a terra a distanze superiori fino ad arrivare al raggio c emesso con angolo β detto secondo angolo critico. I raggi emessi con angolo superiore a β raggiungono la quota h_M con un angolo che li porta ad essere dispersi fuori dall'atmosfera.

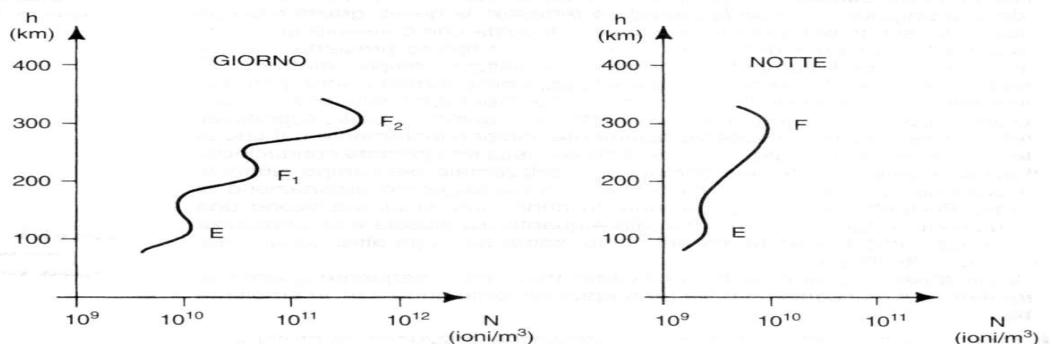
Il raggio di un'onda e.m. che si propaga nella ionosfera al di sotto di h_M si incurva progressivamente verso il basso con possibilità di subire riflessione totale, mentre al di sopra di h_M la rifrazione cambia direzione ed il raggio si incurva verso l'alto, senza possibilità di tornare verso terra.

c) Esiste una frequenza critica $f_c = 12$ MHz per cui si ha riflessione totale qualunque sia l'angolo di emissione dall'antenna (le onde più lunghe (n_{eq} immaginario) trovano la ionosfera impenetrabile e vengono riflesse come da uno specchio).

d) Esiste una minima frequenza utile al di sotto della quale si riceve un segnale troppo debole e quindi mascherato dal rumore, poiché l'assorbimento da parte della ionosfera (in particolare degli strati più bassi) aumenta con il diminuire della frequenza.

Nella realtà

l'andamento altimetrico della densità elettronica nella ionosfera è non solo complesso, ma variabile, nel tempo, tra le ore del giorno e della notte e con l'alternarsi delle stagioni.



questo spiega:

- il vario andamento della propagazione tra giorno e notte e nelle diverse stagioni;
- la fluttuazione dei segnali ricevuti (fading), dovuta alle variazioni accidentali di ionizzazione e/o all'interferenza tra onde che seguono percorsi diversi tra trasmettitore e ricevitore;
- la presenza di una zona di silenzio;
- l'esistenza di un'onda che sembra propagarsi peggio di tutte le altre (λ uguale a circa 214m, valore strettamente legato al campo magnetico terrestre); infatti, poichè le onde corte si propagano bene per via ionosferica e male per via superficiale, mentre le onde lunghe hanno comportamento opposto, appare logico che esista un'onda che si propaghi male sia nella ionosfera che in superficie.

Per una data onda corta, allontanandosi dalla stazione trasmittente si potrà pertanto osservare:

1. una prima zona nella quale giungono le onde superficiali;
2. una seconda zona, detta zona del silenzio, nella quale le onde superficiali giungono troppo attenuate, mentre la zona è troppo vicina (distanza inferiore a quella di skip) perché vi giungano le onde rifratte;
3. una zona dove arrivano due onde, dovute ai raggi uscenti dall'antenna trasmittente con angoli rispettivamente inferiori e superiori al primo angolo critico α ;
4. una zona nella quale giunge solo la prima delle due onde presenti nella terza zona (quella con angoli di proiezione inferiori ad α), perché la seconda si è perduta nella ionosfera (angoli superiori al secondo angolo critico β).

Fading

Un fenomeno molto importante che interviene nelle comunicazioni radio è il fading (affievolimento), che consiste in diminuzioni improvvise e casuali (normalmente di breve durata) della potenza di segnale fornita da un'antenna ricevente.

Vi sono diversi tipi di fading che dipendono dalle modalità di propagazione.

In un collegamento a microonde tra punti fissi e posti in visibilità ottica, si hanno principalmente i seguenti tipi di fading:

Blackout fading: se si verificano variazioni nell'indice di rifrazione dell'atmosfera rispetto alla situazione standard, provocate da variazioni climatiche, le onde e.m. si incurvano in maniera diversa da quanto avverrebbe in condizioni normali, facendo sì che all'antenna ricevente arrivi un segnale molto debole, cioè soggetto a fading. Le variazioni dell'intensità di segnale provocate da questo tipo di fading sono abbastanza lente per cui esso è noto anche come fading lento.

Fading da percorsi multipli (multipath fading): In condizioni normali, dovrebbe esserci un solo percorso di propagazione tra le due antenne di un collegamento in visibilità ottica. In pratica, invece, le onde e.m. emesse dal trasmettitore possono arrivare al ricevitore compiendo percorsi diversi, e quindi con fasi diverse, a causa di riflessioni provocate dal suolo, da ostacoli, da variazioni dell'indice di rifrazione che intervengono negli strati bassi dell'atmosfera.

In particolare, possono giungere al ricevitore onde in opposizione di fase che perciò tendono ad annullarsi, provocando così un affievolimento, se non addirittura una scomparsa del segnale.

La trasmissione con onda spaziale è invece soggetta a quattro tipi di fading:

Da percorsi multipli: al ricevitore può arrivare sia l'onda di superficie che l'onda spaziale ed esse possono essere in opposizione di fase.

Per polarizzazione: quando la ionosfera riflette un'onda e.m. può verificarsi una variazione della sua polarizzazione, a causa del campo magnetico terrestre, rispetto a quella dell'antenna ricevente e quindi una diminuzione dell'energia captata dall'antenna.

Per assorbimento: causato da variazioni a breve termine dell'assorbimento da parte della ionosfera.

Skip fading: causato da variazioni della distanza di skip determinate da variazioni delle condizioni della ionosfera, è prevalente all'alba e al tramonto.

Riassumiamo brevemente le caratteristiche di propagazione delle onde e.m. utilizzate per le trasmissioni radio.

VLf (Very Low Frequency) e LF (Low Frequency)

L'onda di superficie subisce attenuazioni relativamente basse e può coprire distanze molto rilevanti (anche superiori a 1000 km). L'onda spaziale si propaga per riflessione ionosferica sugli strati inferiori, in cui praticamente non penetra, per cui è poco attenuata. Le condizioni di propagazione sono abbastanza regolari. Sono richieste antenne di grandi dimensioni e trasmettitori di potenza molto elevata (con potenze dell'ordine anche del MW). Sono utilizzate prevalentemente per le comunicazioni nautiche, anche con sommergibili. La ricezione è disturbata da rumori atmosferici (fulmini ecc.) e industriali non da fading.

MF (Medium Frequency)

L'onda di superficie può arrivare a distanze dell'ordine delle centinaia di km.

L'onda spaziale è attenuata soprattutto dagli strati bassi della ionosfera, i quali svaniscono di notte. Di conseguenza durante il giorno si ha praticamente solo la ricezione dell'onda di superficie, mentre di notte si può ricevere anche l'onda spaziale. Per questo motivo dopo il tramonto si possono ricevere stazioni che trasmettono in onde medie (con modulazione di ampiezza, AM) anche a distanze molto rilevanti, grazie alla propagazione con onda spaziale. Questo può però produrre fading per interferenza tra onda di superficie e onda spaziale. Sono usate quasi esclusivamente: per la radiodiffusione (AM, valori commerciali 535-1600 kHz). L'antenna irradia prevalentemente in direzione orizzontale e normalmente si utilizza una torre autoirradiante con altezza pari a circa 0.5λ .

HF (High Frequency)

L'onda di superficie è alquanto attenuata e percorre qualche decina di km. Di prevalenza si usa così l'onda spaziale, che può fare anche salti multipli e coprire distanze rilevanti. Può però esistere una zona del silenzio, in cui non arriva né l'onda di superficie, per via dell'attenuazione rilevante, né l'onda spaziale, perché si è al di sotto della distanza di skip.

Vengono definite, in modo statistico, le MUF (Maximum Usable Frequency) oltre le quali non si ha riflessione, le LUF (Lowest Useful Frequency) sotto le quali il segnale è troppo attenuato, e anche le frequenze ottimali per trasmettere (OWF, optimum working frequency). Conviene infatti utilizzare frequenze di poco inferiori alla MUF, per avere un'attenuazione ridotta da parte della ionosfera. La propagazione avviene in condizioni variabili e molto soggette a fading. Gli apparati di trasmissione sono di minore potenza e dimensioni.

VHF (Very High Frequency) e microonde (UHF, SHF, EHF)

Si propagano con onda diretta tra antenne in visibilità. Si possono avere anche onde riflesse dal suolo che possono produrre fading da percorsi multipli (multipath fading). Poiché la propagazione avviene nella troposfera, la diversa densità di quest'ultima produce effetti di rifrazione con conseguente incurvamento del cammino di propagazione. Questo permette di avere collegamenti anche un poco oltre l'orizzonte ottico.

Si può avere inoltre la propagazione per scattering troposferico, usata per $0.5 < f < 5$ GHz e con potenze in trasmissione rilevanti, che consente di coprire distanze anche di 400 km.

L'indice equivalente della ionosfera per le onde ultracorte è pressoché unitario, per cui queste onde, se irradiate verso l'alto da antenne direttive, non vengono riflesse dalla ionosfera, ma la bucano, consentendo quindi la realizzazione di collegamenti via satellite (nelle bande SHF ed EHF).

Hanno molti campi di utilizzo, quali: trasmissioni in ponte radio, cioè collegamenti radio a microonde di tipo punto-punto, suddivisi in tratte aventi lunghezza attorno ai 50 km; trasmissioni radio commerciali (con modulazione di frequenza, FM); trasmissioni televisive; sistemi radiomobili ecc.