

LA FISICA DELLE TELECOMUNICAZIONI

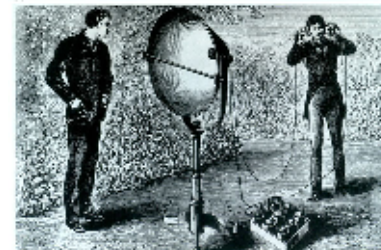
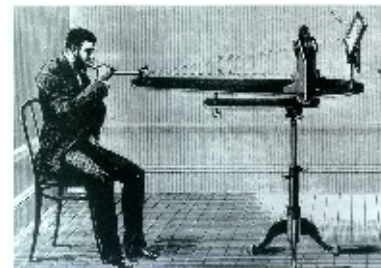
Indice

1	Onde elettromagnetiche	3
1.1	Scoperta delle onde e.m.	4
1.2	Onde e.m. e radiazione	4
1.3	Spettro elettromagnetico	5
1.4	Riflessione e rifrazione	6
2	Onde radio	7
2.1	Propagazione	7
2.2	Degradazione dei segnali	8
2.3	Attenuazione e assorbimento	8
3	Trasmissione di informazioni	9
3.1	Modulazione di un segnale	9
3.1.1	Trasmissioni Radio AM e FM	9
3.2	Le bande di frequenza	10
3.3	La larghezza di banda	12
3.3.1	La larghezza minima di banda	13
4	Le onde corte e la ionosfera	13
4.1	Struttura della ionosfera	13
4.2	Qualche curiosità	15
5	Microonde	15
6	Satelliti per comunicazione	16
7	Antenne e parabole	17
8	Le fibre ottiche	18

Introduzione

Con la parola telecomunicazione oggi giorno si intende la trasmissione a distanza di informazioni di vario tipo: voce umana, suoni, immagini, messaggi, segnalazioni, dati da elaborare al computer.

Telecomunicazione significa comunicazione a distanza (il prefisso *-tele* deriva dal greco e significa *da lontano*)



Si possono trasmettere dati a distanza usando svariate tecniche. I dispositivi più comuni sono:

Cavi elettrici Onde radio Satelliti Fibre ottiche

Il metodo usato dipende dal tipo di informazione che si vuole trasmettere (voce umana, musica ad alta fedeltà, immagini in movimento ecc), dai costi (costo del lancio di un satellite, ad esempio) e da considerazioni varie di logistica, fattibilità e così via.

Trasmissioni via cavo Per trasmissione via cavo si intende la trasmissione di segnali elettrici attraverso fili elettrici o cavi di vario genere (cavi coassiali, cavi sotterranei, cavi sottomarini).

Queste linee vengono usate per il telefono (cioè

per trasmettere nella gamma di frequenze della voce umana), il telegrafo, e in generale per dati a bassa velocità di trasmissione.

Trasmissioni via radio Nelle trasmissioni radio i segnali elettrici vengono trasmessi attraverso l'aria o lo spazio sotto forma di onde radio in bande di frequenze piuttosto strette.

La trasmissione di questo tipo di onde può avvenire grazie alle proprietà riflettenti della ionosfera

Trasmissioni via satellite Le trasmissioni via satellite fanno uso di satelliti artificiali, di solito in orbite geostazionarie, che assicurano il collegamento tra punti anche molto distanti tra loro sulla superficie terrestre.

Trasmissioni per mezzo di fibre ottiche Negli ultimi decenni lo sviluppo di materiali ultra-puri con coefficienti di assorbimento estremamente bassi ha lanciato l'uso delle fibre ottiche anche nel campo delle telecomunicazioni.

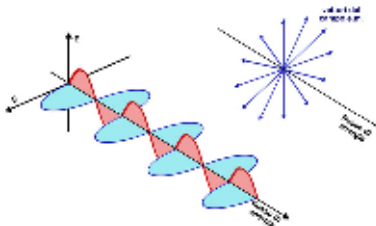
Le fibre ottiche presentano molti vantaggi rispetto ai sistemi via cavo tradizionali: costi bassi, estrema flessibilità, attenuazione minima, ottima larghezza di banda.

Infine le comunicazioni via fibra ottica hanno un enorme vantaggio su altri sistemi di telecomunicazione: sono immuni da interferenze

1 Onde elettromagnetiche

Un'onda elettromagnetica monocromatica (cioè con una ben definita frequenza e lunghezza d'onda) è costituita da un campo elettrico (denotato di solito dalla lettera **E**) e un campo magnetico (denotato dalla lettera **B**) mutuamente perpendicolari che oscillano in fase fra loro perpendicolarmente alla direzione di propagazione.

Quindi un'onda elettromagnetica consiste in realtà di due componenti accoppiate: una elettrica e una magnetica. Un'onda di questo tipo è detta **onda polarizzata piana**, e il piano di polarizzazione è il piano in cui oscilla il campo elettrico.



In termini energetici, si può pensare l'onda elettromagnetica come un flusso di energia, che nel vuoto si propaga alla velocità della luce, sotto forma di campi elettrici e magnetici. Ciascuna delle due componenti dell'onda elettromagnetica, elettrica e magnetica, trasporta la stessa quantità di energia.

Caratteristiche delle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche si propagano in linea retta (in mezzi omogenei). Vediamo ora in maggior dettaglio la **velocità** delle onde elettromagnetiche, la **lunghezza d'onda**, la **frequenza**, l'**ampiezza** e l'**intensità**.

Velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto La velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto è una quantità molto importante in fisica ed essa è denotata con un simbolo speciale: c , il cui valore numerico è appunto pari a circa 300 000 km/s, cioè $3 \hat{\text{A}} \cdot 10^8$ m/s, in notazione scientifica. Per essere proprio precisi, la velocità della luce è pari a 299 792 458 metri al secondo.

Velocità delle onde elettromagnetiche in

mezzi materiali non conduttori La velocità delle onde elettromagnetiche in un mezzo omogeneo non conduttore e non ferromagnetico è minore di quella nel vuoto: $c_m = c/n$, dove n è il cosiddetto *indice di rifrazione*.

Maggiore è l'indice di rifrazione, minore è la velocità di propagazione.

L'indice di rifrazione, di norma di valore superiore a 1, dipende dalle proprietà del mezzo, ma può assumere valori diversi al variare della frequenza dell'onda.

Un'applicazione che sfrutta gli effetti del diverso indice di rifrazione in sostanze diverse si ha nelle fibre ottiche.

Lunghezza d'onda Per lunghezza d'onda si intende la distanza spaziale occupata da un ciclo di un'onda ad un dato istante. In altre parole è la distanza fra un punto in un ciclo e il punto corrispondente nel ciclo successivo.



Le lunghezze d'onda delle onde radio vanno dal millimetro (microonde) a parecchi chilometri (ELF). La lunghezza d'onda di solito si denota con la lettera greca $\hat{\lambda}$ (lambda) e si misura in metri.

Frequenza Il numero di lunghezze d'onda o di cicli che passa per un dato punto nell'unità di tempo è la frequenza. La frequenza si denota con la lettera f oppure con la lettera greca $\hat{\nu}$ (nu) e si misura in hertz (Hz).

È chiaro da quanto è stato detto sopra che la frequenza e la lunghezza d'onda non sono indipendenti, ma sono legate tra loro attraverso la velocità dell'onda: $\hat{\lambda} \hat{\nu} = c$ nel vuoto e $\hat{\lambda} \hat{\nu} = c_m$ nei mezzi materiali.

Quindi: $\hat{\lambda}$ a frequenze maggiori corrispondono lunghezze d'onda minori. $\hat{\lambda}$ a frequenza fissa, la lunghezza d'onda varia passando da un mezzo a un altro con indice di rifrazione diverso.

Ampiezza Abbiamo visto che le onde elet-

tromagnetiche sono costituite da un campo elettrico e un campo magnetico mutuamente perpendicolari che oscillano in fase fra loro perpendicolarmente alla direzione di propagazione.

Per ampiezza si intende il valore massimo che viene raggiunto dall'oscillazione. Per esempio, nel caso di un'onda marina l'ampiezza è l'altezza massima dell'onda.

In un'onda elettromagnetica le ampiezze dei due campi (quello elettrico e quello magnetico) non sono indipendenti, ma sono legate fra loro: in questo senso i due campi sono accoppiati.

Intensità L'intensità di un'onda elettromagnetica è l'energia che passa attraverso un'area unitaria nell'unità di tempo e si misura in watt/m²: è cioè l'energia che attraversa in ogni secondo una superficie di un metro quadrato.

Si può dimostrare che l'intensità è proporzionale al prodotto delle ampiezze del campo elettrico e del campo magnetico; e siccome questi ultimi due sono proporzionali tra loro, in ultima analisi l'intensità è proporzionale al quadrato dell'ampiezza del campo elettrico.

1.1 Scoperta delle onde e.m.

Fino alla fine del diciannovesimo secolo le onde elettromagnetiche erano sconosciute e si pensava che la luce fosse costituita da onde elastiche che si propagavano in un mezzo con proprietà estremamente esotiche, chiamato etere, che permeava completamente lo spazio.

Poi vennero il fisico scozzese *James Clerk Maxwell* (1831-1879) che predisse l'esistenza delle onde elettromagnetiche e il fisico tedesco *Heinrich Hertz* (1857-1894) che, per mezzo di esperimenti di interferenza che davano luogo a onde stazionarie, verificò sperimentalmente al di là di ogni dubbio l'esistenza di onde elettromagnetiche nel range delle radiofrequenze.

La velocità delle radio onde nel vuoto fu misurata e trovata uguale a quella della luce. Anche le proprietà di riflessione, rifrazione e polarizzazione di queste radio onde erano analoghe a

quelle della luce.

Conclusione: la luce è costituita da nient'altro che onde elettromagnetiche.

1.2 Onde e.m. e radiazione

Onde elettromagnetiche o Radiazioni elettromagnetiche?

Sono la stessa cosa. La parola **onde** sottolinea l'aspetto ondulatorio, la parola **radiazione** invece l'aspetto energetico, essendo la radiazione l'energia trasportata dall'onda.

In termini classici, le onde elettromagnetiche sono costituite da onde di campi elettrici e magnetici che propagandosi trasportano energia.

In termini quantistici, la radiazione elettromagnetica è il flusso di fotoni (cioè i 'quanti' di luce) attraverso lo spazio. I *fotoni* sono pacchetti di energia che si muovono alla velocità della luce.

I due concetti sono legati attraverso la formula $E = hf$, che indica che E , l'energia di un quanto o fotone, e f , la frequenza dell'onda, sono proporzionali e la costante di proporzionalità è h , la cosiddetta costante di Planck.

In altre parole, onde a frequenze più alte sono più energetiche (a parità di intensità).

L'energia elettromagnetica proviene in ultima analisi dal Sole. La vita sulla Terra si fonda sulla trasformazione di questa energia per mezzo della fotosintesi nelle piante o della biosintesi negli animali.

Gli occhi di molti animali, incluso l'uomo, si sono evoluti in modo tale da essere particolarmente sensibili alla luce, che è una parte dello spettro elettromagnetico.

Praticamente tutti i combustibili essenziali alla società moderna (gas, petrolio, carbone) contengono l'energia ricevuta dal Sole milioni di anni fa. L'energia nucleare è l'unica forma di energia non originata dal Sole.

Le radiazioni elettromagnetiche generate dall'uomo oggi si incontrano dappertutto: la televisione riceve onde elettromagnetiche

generate dalle stazioni trasmettenti, telefonini ricevono onde radio, i forni a microonde scaldano i cibi, gli aeroplani sono guidati da onde radar, le lampadine da illuminazione generano onde luminose, e così via.

Non tutte le radiazioni elettromagnetiche sono benefiche per l'uomo, come sappiamo: le radiazioni ultraviolette possono provocare scottature e certi tipi di radiazioni ultraviolette sono addirittura dannosi alla vita; i raggi X sono usati a scopi terapeutici e diagnostici in medicina, ma è bene che le esposizioni a questi raggi siano ridotte.

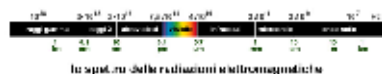
1.3 Spettro elettromagnetico

Cos'è lo spettro elettromagnetico?



Il famoso esperimento di *Newton*, in cui la luce passa attraverso un prisma, provò che la luce del Sole è in realtà composta di una mescolanza di luce di svariati colori, che sono anche i colori dell'arcobaleno. Newton adottò la parola latina *spectrum* per descrivere l'insieme di questi colori (che è quindi lo spettro, l'immagine, della luce bianca).

Quando poi si è scoperto che la luce visibile non è che una piccola parte di una più vasta gamma di fenomeni, vale a dire che è un caso particolare di onde elettromagnetiche, il significato della parola spettro si è esteso a descrivere le diverse bande di frequenza delle radiazioni elettromagnetiche.



Le onde elettromagnetiche coprono un vasto intervallo di frequenze e lunghezze d'onda e vengono suddivise in vari tipi.

Le lunghezze d'onda variano dalle centinaia di chilometri a dimensioni dell'ordine del nucleo atomico (10^{-13} m, pari a un decimillesimo di milionesimo di metro). Le corrispondenti frequenze variano quindi da qualche kHz a un numero di Hz dell'ordine di 10^{22} (1 seguito da 22 zeri). L'energia dei fotoni varia proporzionalmente alla frequenza.

È chiaro che parti diverse dello spettro elettromagnetico abbiano proprietà molto diverse fra loro. Per esempio, onde i cui *fotoni* hanno energie dell'ordine dell'energia caratteristica degli elettroni negli atomi (radiazione infrarossa, visibile e ultravioletta) interagiscono fortemente con atomi e molecole. Onde di grande lunghezza d'onda (onde radio) con fotoni di debole energia in generale interagiscono debolmente con la materia. Onde altamente energetiche (raggi X o gamma) la cui lunghezza d'onda è paragonabile alle dimensioni nucleari producono effetti profondi a livello nucleare, appunto.

Ecco una **classificazione delle onde** elettromagnetiche, dalle frequenze più basse verso le più alte: **Onde Radio** Queste onde vengono generate da apparecchi elettronici, in genere circuiti oscillanti, e vengono impiegate nelle trasmissioni televisive e radio.

Le onde radio sono divise in bande di frequenze, a seconda dell'uso che ne viene fatto nei sistemi di telecomunicazione.

Microonde Anche queste onde sono generate da apparecchiature elettroniche e vengono utilizzate ad esempio nei radar, nei sistemi di comunicazione via satellite, per riscaldare cibi (come nel forno a microonde).

Infrarosso Queste onde sono prodotte da molecole e corpi caldi. Con apparecchiature sensibili ai raggi infrarossi è possibile 'vedere' al bui persone e animali a sangue caldo. Le onde infrarosse sono usate parecchio nell'industria, in medicina, in astronomia...

Luce visibile La luce visibile è una banda molto stretta di lunghezze d'onda (dal violetto al rosso) alle quali il nostro occhio è sensibile.

La luce è prodotta da atomi e molecole come conseguenza di aggiustamenti interni degli

elettroni.

Ultravioletto Le lunghezze d'onda diventano sempre più piccole, le frequenze sempre maggiori e i fotoni sempre più energetici.

Queste onde sono prodotte da atomi e molecole sottoposti a scariche elettriche. Il Sole genera intensi raggi ultravioletti. Questi interagiscono con gli atomi degli strati alti dell'atmosfera che vengono così ionizzati: questa parte dell'atmosfera si chiama ionosfera. Tuttavia, una piccola percentuale di radiazione ultravioletta penetra fino alla superficie della Terra: è quella che ci dà la tintarella quando ci esponiamo al sole.

La radiazione ultravioletta ionizza gli atomi e produce a livello di certi microrganismi delle reazioni chimiche tali da distruggerli. Per questo le radiazioni ultraviolette trovano applicazione in medicina e in certi processi di sterilizzazione.

Raggi X Questa parte dello spettro elettromagnetico fu scoperta nel 1895 dal fisico tedesco W. Roentgen mentre studiava i raggi catodici.

I raggi X sono causati dagli elettroni più interni degli atomi. A causa della potenza dei fotoni, i raggi X producono effetti profondi negli atomi e molecole da loro attraversati.

I raggi X sono usati in medicina: infatti il maggior assorbimento da parte delle ossa rispetto ai tessuti molli permette di radiografare, cioè 'vedere', le ossa.

Ma, come conseguenza dei processi chimici che inducono, i raggi X causano danni alle cellule dei tessuti. Poiché distruggono le cellule malate più efficacemente delle cellule sane, i raggi X sono usati in medicina nella cura di certi tipi di cancro.

Va ricordato però che i raggi X, in qualunque quantità, distruggono comunque anche dei tessuti sani: una lunga esposizione a dosaggi elevati può provocare anche la morte.

Raggi gamma

(\hat{I}^3) Queste onde elettromagnetiche estremamente energetiche sono di origine nucleare. L'energia dei fotoni è di livello

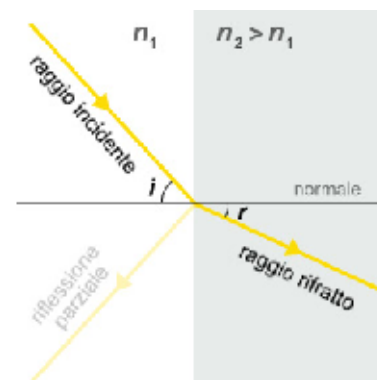
Se vengono assorbiti da organismi viventi possono provocare danni estremamente seri. Per questo la manipolazione di sostanze radioattive richiede sempre l'uso

di apposite tute protettive.

I raggi gamma sono presenti anche nella radiazione cosmica e per questo sono usati nella ricerca astronomica.

1.4 Riflessione e rifrazione

Quando un raggio di luce *incide* sulla superficie di separazione fra due materiali differenti (ad esempio aria-acqua, oppure aria-vetro), si generano un raggio *riflesso*, che torna indietro, e un raggio *rifratto* o *trasmesso* che si propaga nel secondo mezzo.



Tutti i tipi di onde, non solo quelle elettromagnetiche, presentano lo stesso tipo di comportamento.

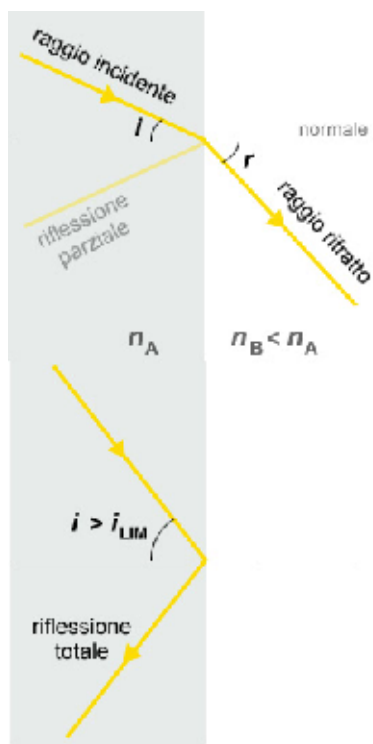
Proprietà della riflessione e rifrazione. \hat{A} . Il raggio incidente, quello riflesso, quello rifratto e la normale (perpendicolare) alla superficie di separazione tra i due mezzi giacciono tutti nello stesso piano

Inoltre gli angoli rispetto alla perpendicolare alla superficie dei raggi incidente, riflesso e rifratto sono legati fra loro.

\hat{A} . L'angolo di riflessione è uguale a quello di incidenza ($i = r$).

\hat{A} . Il rapporto tra l'angolo di rifrazione e quello di incidenza è un po' più complicato: segue la cosiddetta legge di Snell, che fa entrare in gioco gli indici di rifrazione dei due mezzi: $n_1 \sin i = n_2 \sin r$.

Riflessione interna totale e angolo limite

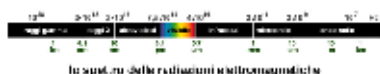


Nel caso in cui il materiale in cui viaggia il raggio incidente ha l'indice di rifrazione maggiore, il raggio rifratto si allontana dalla perpendicolare. All'aumentare dell'angolo di incidenza, aumenta l'angolo di rifrazione, finché per un certo valore dell'angolo di incidenza l'angolo rifratto è pari a 90° , cioè il raggio rifratto non penetra affatto nel secondo mezzo. Questa situazione viene detta riflessione totale e l'angolo per cui questo fenomeno avviene è l'angolo limite.

2 Onde radio

Le onde radio sono quelle onde elettromagnetiche impiegate nelle comunicazioni senza fili: vengono usate per la trasmissione della voce umana, e suoni in generale, e per la navigazione marina e aerea.

Le onde radio costituiscono una parte dell'intero spettro elettromagnetico.



Un dossier di Laura Lauro Taroni,
aggiornato al 10.03.2004

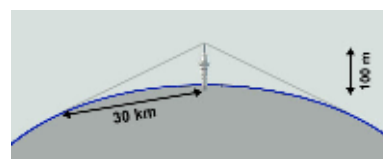
Il range di frequenze delle onde radio si estende dalle frequenze estremamente basse di pochi Hz fino alle frequenze estremamente elevate di 300 GHz (GigaHertz, cioè milioni di hertz). L'intero range viene suddiviso in *bande di frequenza*, in base all'utilizzo a cui le varie frequenze sono o possono essere adibite.

Le onde radio sono utilizzate in medicina in combinazione con forti campi magnetici per la risonanza magnetica: con questa tecnica si possono 'fotografare' a scopo diagnostico parti del corpo umano senza apparenti effetti negativi.

2.1 Propagazione

Tutte le onde elettromagnetiche, e quindi anche quelle radio, si propagano in linea retta.

Basandosi su questa considerazione, gli scienziati della fine del XIX secolo erano molto scettici sull'utilità degli esperimenti con onde radio di *Guglielmo Marconi*, in quanto la curvatura della Terra pone un limite, pari a circa 30 km, alla distanza che può essere percorsa in linea retta (cioè lungo la visuale) dalla sommità di una torre alta 100m.



La trasmissione, coronata da successo, attraverso l'Atlantico di segnali radio da parte di Marconi del 1901, obbligò gli scienziati a riconsiderare la propagazione delle onde radio nell'atmosfera terrestre e portò alla scoperta della ionosfera.

È vero infatti che *nel vuoto* le onde si propagano in linea retta, ma il problema diventa un po' più complicato quando si tiene conto della presenza dell'atmosfera terrestre e le sue interazioni con le onde radio.

<http://www.torinoscienza.it/>
© 2002 Provincia di Torino

È grazie alle proprietà riflettenti degli strati della ionosfera, situati fra 50 e 300 km di altezza dal suolo, che è possibile la trasmissione delle onde corte SW, altrimenti dette onde radio HF (ad alta frequenza), fra 3 e 30 MHz.

Ne segue anche, però, che le onde corte, poichè vengono riflesse dalla ionosfera, non possono essere utilizzate per le comunicazioni spaziali; in questo caso è necessario usare onde radio di frequenza superiore, nella banda di frequenze VHF (very high frequency) o UHF (ultra high frequency).

Propagazione delle onde radio nell'atmosfera. Si possono classificare tre meccanismi con cui l'energia delle onde elettromagnetiche, in particolare quelle radio, si propaga dall'antenna trasmittente a quella ricevente.



1) **Onda diretta:** Nello spazio libero da ostacoli le radioonde si propagano in linea retta lungo la visuale, cioè secondo la congiungente delle due antenne.

2) **Onda riflessa:** due tipi a) *Onda terrestre:* È l'onda che si riflette sulla superficie del suolo b) *Onda spaziale:* È l'onda che viene riflessa dalla ionosfera

3) **Onda superficiale:** sulla superficie del suolo, sulla quale si riflette l'onda terrestre, "striscia" l'onda superficiale. Ciò può avvenire grazie al fenomeno della diffrazione, per cui quando l'onda incontra un oggetto di dimensioni dell'ordine di grandezza della sua lunghezza d'onda, essa tende a seguire il contorno dell'oggetto. L'effetto è tanto più pronunciato quan-

to più piccolo è l'oggetto. Grazie alla diffrazione le onde si propagano nelle città attorno agli edifici. L'onda superficiale viene più o meno attenuata a seconda del tipo di superficie sulla quale si propaga. Sul mare l'attenuazione è molto bassa, mentre su terreno roccioso l'attenuazione è molto forte.

2.2 Degradazione dei segnali

Le cause della degradazione dei segnali radio durante la propagazione sono molteplici.

Il rumore, che può completamente mascherare (mask) l'informazione contenuta nel segnale, e la distorsione del segnale, che lo può rendere irriconoscibile, sono due fattori in generale presenti in qualunque mezzo di telecomunicazione e generano problemi a livello di ricezione del segnale. In base alla velocità di acquisizione dell'informazione, alla qualità e alla fedeltà desiderata della ricezione e al tipo di telecomunicazione (ad esempio, se in tempo reale o no), sono state messe a punto tecniche per minimizzare questi problemi (es. conversione analogica-digitale, modulazione di frequenza e vari sistemi di codificazione).

Un metodo per migliorare la ricezione (cioè migliorare il rapporto segnale/rumore) è quello di aumentare la potenza del trasmettitore.

Tuttavia, anche in questo caso, rimane il problema dell'attenuazione, o riduzione in potenza, del segnale.

2.3 Attenuazione e assorbimento

L'attenuazione di un segnale è la riduzione in potenza del segnale durante la sua propagazione (nell'aria, nel cavo, nel filo elettrico o nella fibra ottica).

La principale causa di attenuazione è la conversione di parte dell'energia elettro-

magnetica in qualche altra forma di energia, quale il calore. Questa energia viene assorbita dal mezzo entro cui l'onda si propaga.

Nelle telecomunicazioni, di solito l'attenuazione si esprime in *decibel* (dB) per unità di distanza. Un'attenuazione di zero decibel significa che il segnale non subisce perdite; un'attenuazione di 3 dB/km significa che sulla distanza di un chilometro il segnale si riduce di un fattore 2, ovvero si dimezza.

Ad esempio, l'attenuazione tipica del vetro è dell'ordine dei 1000 dB/km, che è un valore molto alto. Questo fatto ha impedito l'applicazione pratica delle fibre ottiche per svariati decenni dopo la loro invenzione. Con lo sviluppo di materiali ultra puri con coefficienti di attenuazione dell'ordine di 1 dB/km le fibre ottiche sono diventate una realtà e hanno potuto essere impiegate per le telecomunicazioni.

3 Trasmissione di informazioni

Non si può inviare un messaggio mediante un'onda di un'unica frequenza: una tale onda procede indefinitamente sempre uguale a se stessa, cioè ogni ciclo è identico al precedente. Una tale onda non trasporta alcuna informazione al di là della sua frequenza.

Se si vuole inviare un messaggio, cioè trasmettere informazione, occorre *modulare l'onda*, cioè cambiare qualcosa in modo tale che questo qualcosa poi possa essere decodificato al suo arrivo all'apparecchio ricevente.

3.1 Modulazione di un segnale

La modulazione in elettronica è la tecnica per immettere informazione (nella forma di voce, musica, immagini o dati) su una radiofrequenza portante. Lo scopo si ottiene variando una o più caratteristiche

dell'onda a seconda dell'informazione che si vuole trasmettere.

Ci sono varie forme di modulazione, ciascuna atta ad alterare una particolare caratteristica, quali l'ampiezza (AM = amplitude modulation = modulazione di ampiezza), la frequenza (FM = Frequency Modulation = modulazione di frequenza), la fase (PM = Phase Modulation = modulazione di fase), la sequenza dell'impulso (PCM = Pulse-Coded Modulation = modulazione d'impulsi a codice), la durata dell'impulso (PDM = Pulse-Duration Modulation = modulazione della durata dell'impulso).

Le due forme di modulazione più note sono *la modulazione di ampiezza (AM) e di frequenza (FM)*.

3.1.1 Trasmissioni Radio AM e FM

AM (Amplitude Modulation) La tecnica della modulazione di ampiezza permette di imprimere dell'informazione auditiva o visiva su un'onda di una particolare frequenza, detta portante, carrier in inglese, variando l'ampiezza dell'onda portante in modo opportuno. L'AM è stato il primo metodo usato per trasmettere programmi radio.

Oltre che per le trasmissioni radio commerciali, l'AM è impiegata nelle trasmissioni radio a onde corte su lunghe distanze e nelle trasmissioni della parte video dei programmi televisivi.

Le stazioni radio AM commerciali operano a frequenze fra i 535 e i 1605 kHz (entro la banda HF), separate fra loro di 10 kHz.

Le frequenze dell'onda portante usate per la televisione vanno da 55 a 210 MHz circa (nella banda VHF, quindi). In questa banda vi è spazio disponibile per circa 30 stazioni televisive, ciascuna delle quali usa una larghezza di banda di circa 5 MHz. Se le stazioni fossero molto più numerose non

sarebbe possibile sintonizzare una singola stazione.

FM (Frequency Modulation) Nelle trasmissioni a modulazione di frequenza (FM) l'ampiezza del segnale portante è mantenuta costante, ma la sua frequenza viene alterata a seconda delle variazioni nel segnale audio che si vuole trasmettere. La tecnica della modulazione di frequenza fu sviluppata dall'ingegnere americano Edwin H. Armstrong negli anni '30, per cercare di rimediare all'interferenza e al rumore che poteva rendere le trasmissioni AM di difficile ricezione.

Le trasmissioni FM risentono molto meno di quelle AM dei disturbi causati da avverse condizioni atmosferiche (es. i temporali), da correnti elettriche e altre sorgenti di campi elettrici, che producono alterazioni nell'ampiezza dell'onda radio, ma non nella sua frequenza.

L'FM è migliore che non l'AM per la trasmissione stereofonica, per i segnali audio televisivi e per i collegamenti telefonici a lunga distanza.

Alle stazioni radio FM commerciali sono state assegnate frequenze più alte che non quelle per l'AM: il range varia da 88 a 108 MHz (nella banda VHF), e le stazioni sono distanziate di 200 kHz fra loro.

3.2 Le bande di frequenza

Fino al 1930 circa, la parte dello spettro delle onde radio sopra i 30 MHz era praticamente vuota: non esistevano segnali prodotti dall'uomo.

Ai giorni nostri, lo spettro delle frequenze radio è estremamente sfruttato e viene per comodità diviso in varie *bande di frequenza* dai 3 kHz delle frequenze molto basse (VLF) fino ai 300 GHz delle frequenze estremamente alte (EHF).

Le bande di frequenza sono divise in base alle caratteristiche che ne determinano l'impiego in certi settori piuttosto che in

altri.

Vediamo le bande di frequenza e descriviamo le caratteristiche delle varie bande (ELF, VLF-MF, HF, VHF-UHF, SHF-EHF).

ELF: Extremely low frequency = frequenze estremamente basse Frequenze sotto i 3 kHz, corrispondenti a lunghezze d'onda superiori ai 100 km.

Queste onde sono usate nei sistemi di comunicazione per i sottomarini. L'acqua del mare presenta un assorbimento molto basso per onde tra i 5 e i 100 Hz.

L'effetto di queste onde sulla salute umana è sotto esame al momento. Secondo alcuni studi preliminari le onde ELF e campi magnetici oscillatori che si generano nelle vicinanze delle linee di trasmissione elettrica (o anche dalle coperte elettriche) possono avere effetti negativi sulla salute. Sono stati riportati casi nella letteratura scientifica medica per cui l'esposizione prolungata a campi magnetici di bassa intensità e di bassa frequenza pare potrebbe aumentare il rischio di leucemia, linfoma e tumori al cervello nei bambini.

VLF-LF-MF: Very low frequency, Low frequency, Medium frequency = Frequenze molto basse, frequenze basse, frequenze medie Frequenze dai 3 kHz ai 3 MHz, ovvero lunghezze d'onda da 100 km a 100 m.

Queste bande di frequenze sono usate per servizi di tipo analogico a stretta larghezza di banda, impiegati nella navigazione radio a lunga distanza, nel telegrafo marittimo e i canali di soccorso (per l'SOS) e per le trasmissioni radio AM (Amplitude Modulation).

Poiché la larghezza di banda per queste frequenze è insufficiente, non sono adatte per i servizi di telecomunicazioni a banda larga quali la televisione e le trasmissioni FM (Frequency Modulation).

Come conseguenza dell'alta conduttività dell'acqua salata, le comunicazioni ra-

dio marittime nella banda VLF possono propagarsi come onde di superficie per migliaia di chilometri.

La banda MF (medium frequency) e anche detta MW (medium waves= onde medie)

HF: High Frequency = frequenze alte Frequenze dai 3 MHz ai 30 MHz, ovvero lunghezze d'onda da 100 ai 10 m.

La banda HF alternativamente chiamata anche SW (short waves= onde corte).

La maggior parte delle radio onde nella banda HF sono allocate ai servizi di telecomunicazione vocale tra punti fissi o mobili che necessitano di larghezze di banda di meno di 12 kHz per la trasmissione. Le trasmissioni internazionali (onde corte) avvengono in questa banda che è stata suddivisa in sette bande tra 5.9 MHz e 26.1 MHz.

Queste onde si possono propagare nonostante la curvatura della Terra e possono essere ricevute da apparecchi riceventi fuori dalla portata della linea visuale diretta con gli apparecchi trasmettenti grazie alle proprietà riflettenti della ionosfera.

A causa delle variazioni delle condizioni della ionosfera, le trasmissioni in questa banda variano durante il giorno e durante l'anno. Di notte le comunicazioni fra posti lontani sono migliori, in quanto il solo strato ionosferico riflettente è lo strato più alto, il cosiddetto strato F situato intorno ai 300 Km di altitudine, col minimo di interferenze e assorbimento dei segnali radio.

Durante i massimi del ciclo undecennale delle macchie solari, la radiazione ultravioletta produce una maggiore densità di ioni e quindi degli ulteriori strati ionizzati irregolari che possono persistere anche per parecchi giorni. Questi fenomeni possono produrre disturbi nelle comunicazioni radio, come anche la possibilità di comunicazioni di solito impossibili.

VHF-UHF: Very High Frequency, Ultra High Frequency = frequenze molto alte, frequenze ultra alte Frequenze dai 30 MHz ai 3 GHz, ovvero lunghezze d'onda da 10 m ai 10 cm.

Le frequenze di questa banda sono ulteriormente suddivise in bande il cui uso è stato regolamentato e allocato a vari servizi: alle trasmissioni radio FM, ai canali della televisione VHF e UHF. La maggior parte della banda UHF è usata per i collegamenti a microonde e per la telefonia cellulare. Parte della banda è anche usata per applicazioni di radio-navigazione (strumenti automatici di atterraggio), comunicazioni militari, e controlli radio per il traffico aereo.

Le frequenze usate dai telefonini sono fra 824 e 894 MHz per il sistema analogico AMPS e fra 1.850 e 1.990 GHz per il sistema digitale GSM.

La fascia tra i 1,227 e 1,575 GHz è utilizzata per il sistema globale di posizionamento (GPS) Navstar.



Per completezza, anche se esula dal nostro argomento: ai sistemi di allarme e ai sistemi di apertura telecomandata di porte e simili sono state riservate le frequenze attorno ai 40 MHz.

I radar del controllo del traffico aereo operano alle frequenze tra i 960 MHz e i 1,215 GHz.

Contrariamente ai segnali HF, le onde radio VHF-UHF attraversano la ionos-

fera senza venire riflesse e possono quindi venire usate per le trasmissioni extraspaziali con i satelliti artificiali. Ad esempio, le comunicazioni con la stazione spaziale MIR sono fatte entro la banda di frequenza fra i 145 MHz e i 437 MHz.



Infine le onde di questa banda possono anche essere usate per trasmissioni terrestri oltre l'orizzonte utilizzando le irregolarità della troposfera (la parte bassa dell'atmosfera).

Queste irregolarità riflettono le onde in tutte le direzioni: i segnali UHF si propagano in molte direzioni e quindi si disperdono su una vasta area, cosicché solo una frazione del segnale trasmesso viene ricevuto dal ricevitore. Inoltre, le condizioni meteorologiche variabili fanno sì che il segnale sia parecchio attutito.

L'assorbimento varia anche con la frequenza del segnale e dipende anche dal particolare percorso del segnale radio. Per questo motivo le trasmissioni che dipendono crucialmente dalla diffrazione atmosferica fanno uso di potenti trasmettitori, e di tecniche o combinazioni di tecniche atte a massimizzare la qualità del segnale ricevuto a seconda del posto, del tempo e delle frequenze usate.

SHF-EHF: Super High Frequency, Extremely High Frequency = frequenze super alte, frequenze estremamente alte. Frequenze dai 3 GHz ai 300 GHz, ovvero lunghezze d'onda da 10 cm a 1 mm.

Le onde di queste bande si propagano con forte degradazione del segnale per attenuazione e per cause atmosferiche (vengono

riflesse dalle gocce di pioggia). Inoltre subiscono forti perdite di penetrazione, in particolare attorno a pareti ed edifici. Per questi motivi, queste bande di frequenze sono le bande meno usate per comunicazioni terrestri. Il vantaggio delle onde in queste bande è che permettono larghezze di banda di vari MHz, necessarie per le comunicazioni digitali ad alta velocità (fino ad 1 Gigabit al secondo).

La banda EHF in particolare viene utilizzata per comunicazioni fra satelliti e per la radionavigazione satellitare, applicazioni per le quali l'attenuazione atmosferica non è molto limitante.

3.3 La larghezza di banda

Per larghezza di banda (in inglese *bandwidth*) si intende l'intervallo di frequenze occupato da un segnale radio modulato, cioè la differenza tra le frequenze massima e minima attorno alla frequenza principale, detta portante. (Per intenderci, la frequenza dell'onda portante è quella su cui, ad esempio, si sintonizza la radio)

La capacità dell'onda portante di trasmettere informazioni è direttamente proporzionale alla larghezza di banda disponibile. In generale, più alta è la frequenza, più alta è la larghezza di banda disponibile.

Col termine larghezza di banda si indica anche il range di frequenze che un apparecchio elettronico (quale un amplificatore o un filtro) è in grado di trasmettere.

Di solito la larghezza di banda viene espressa in Hz, oppure come percentuale della radio-frequenza portante.

Per esempio, una stazione trasmittente AM che opera a 1 MHz (frequenza portante) ha una larghezza di banda di 10kHz oppure dell'1%. Infatti: $10\text{kHz} = 10\,000\text{ Hz}$; $1\text{ MHz} = 1\,000\,000\text{ Hz}$ e il rapporto $10\,000 / 1\,000\,000 = 0.01 = 1\%$. Per una

tale stazione la banda di frequenza si estende da 995 kHz a 1005 kHz (ricordiamo che $1 \text{ MHz} = 1000 \text{ kHz}$).

3.3.1 La larghezza minima di banda

Qual è la larghezza di banda minima? Dipende.

Facciamo degli esempi:

1. Per le conversazioni telefoniche i segnali devono essere intellegibili, ma non è necessario che siano altamente fedeli. Sperimentalmente è stato osservato che le componenti principali che rendono comprensibile il linguaggio ordinario umano sono comprese tra i 300 e i 3500 Hz. I canali riservati alle comunicazioni telefoniche hanno quindi di solito una larghezza di banda di circa 4000 Hz. Se si usano larghezze di banda più strette, il sistema telefonico è più economico, ma l'intelligibilità sarà minore.

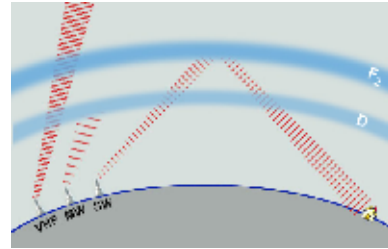
2. Per trasmissioni radio AM ad alta fedeltà, è desiderabile che la larghezza di banda comprenda le frequenze normalmente usate in musica, cioè da 30 Hz (la nota più bassa di un organo) fino a 15 kHz (nota acuta dell'ottavino). Sono state sviluppate tecniche che permettono di ottenere ciò con una larghezza di banda dell'ordine dei 5 kHz.

3. Per le trasmissioni televisive AM sono necessarie larghezze di banda molto maggiori, in quanto c'è bisogno di trasmettere informazioni che comprendano frequenze dai 20 Hz fino a circa 5 MHz.

4 Le onde corte e la ionosfera

Le onde corte (SW, short waves, o HF, high frequency) meritano un discorso a parte in quanto permettevano di mettere in comunicazione luoghi lontani fra di loro (nonostante la curvatura della Terra) ancora prima della messa in opera dei satelliti artificiali per telecomunicazioni. Ciò

è possibile perchè esistono degli strati dell'atmosfera a quote molto elevate che riflettono queste onde.



Quando la radiazione ultravioletta (UV) altamente energetica proveniente dal Sole raggiunge gli strati alti dell'atmosfera, interagisce con gli atomi lì presenti. L'energia UV ionizza gli atomi, cioè fa sì che uno o più elettroni (carichi negativamente) acquistino abbastanza energia da staccarsi dall'atomo a cui appartengono, così che quest'ultimo diventa uno ione carico positivamente. Quindi a quote fra i 50 e i 300 Km di altezza, i gas che costituiscono l'atmosfera si trovano nello stato di plasma, che è il cosiddetto quarto stato della materia, ossia gas parzialmente o totalmente ionizzato, cioè costituito di particelle cariche elettricamente: elettroni e ioni. Da qui il nome ionosfera.

La ionosfera funziona da strato riflettente per le onde corte.

4.1 Struttura della ionosfera

L'atmosfera è bombardata da radiazioni ultraviolette di diverse frequenze che vi penetrano più o meno profondamente. Di conseguenza, la struttura della ionosfera è stratificata e si possono distinguere diversi strati ad altezze diverse.

Le onde elettromagnetiche ultraviolette a frequenze più basse hanno il minore potere penetrante, e quindi producono gli strati ionizzati più distanti dal suolo (circa 300 Km); mentre le radiazioni ultraviolette a frequenze più alte penetrano più in profondità e producono strati ionizzati a quote inferiori (attorno agli 80 Km).

La densità degli ioni presenti varia a seconda dell'altezza dal suolo. Onde radio a frequenza diversa vengono riflesse da strati a densità diversa.

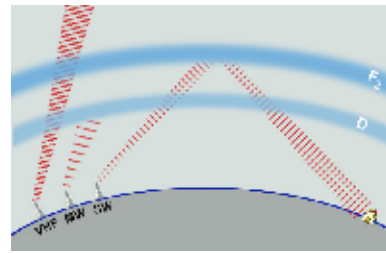
Per questo, per comunicazioni fra luoghi molto distanti fra loro, è necessario che le onde vengano riflesse dagli strati più alti della ionosfera (i cosiddetti strati F_1 e F_2 , situati attorno ai 300 Km di altezza). Le onde corte che soddisfano a questo requisito, e che vengono quindi impiegate per le trasmissioni internazionali, sono quelle con lunghezze d'onda tra i 10 e gli 60 m circa, cioè frequenze comprese approssimativamente tra i 5 e i 30 MHz.

L'angolo di elevazione del sole è un fattore importante che determina la densità degli strati ionizzati. Come conseguenza, l'altezza e lo spessore degli strati ionizzati varia da luogo a luogo e a seconda dell'ora del giorno e delle stagioni dell'anno.

La variazione diurna di questi strati è la più vistosa: quando il sole è più alto sull'orizzonte gli strati ionizzati raggiungono la massima densità e il massimo effetto sulle onde radio. Col calare della sera la densità diminuisce e continua a diminuire durante la notte, raggiungendo il minimo appena prima del sorgere del sole.

Vale la pena di ricordare, infine, il ciclo delle macchie solari di durata undecennale: durante i massimi dei cicli, che possono durare parecchi giorni o mesi a seconda della persistenza delle macchie solari, viene prodotto un ulteriore strato ionizzato di tipo E. Ricordiamo inoltre che le telecomunicazioni possono venire disturbate durante cosiddette tempeste magnetiche solari.

Strati D, E, F



1. Strato D: è lo strato più basso della ionosfera, situato ad un'altezza attorno ai 70 Km. La percentuale di ionizzazione è la più bassa nella ionosfera. Lo strato D non riflette, ma attenua fortemente le onde radio di frequenza media (MF o MW), cioè sotto i 3 MHz. Dopo il tramonto e durante la notte questo strato scompare praticamente del tutto.

2. Strato E (non in figura): è situato ad un'altezza media di 110 Km ed è anche detto strato di Kennelly-Heaviside (dai nomi del matematico inglese Oliver Heaviside e dell'ingegnere statunitense Arthur Kennelly che contemporaneamente nel 1902 predissero l'esistenza di uno strato riflettente, la ionosfera, che avrebbe permesso la riflessione delle onde radio, permettendo così le trasmissioni radio anche fra punti della Terra non a contatto diretto). Dopo il tramonto questo strato si attenua e per mezzanotte praticamente scompare. Questo strato riflette le onde corte fino a circa 20 MHz, che quindi possono essere usate per trasmissioni radio su distanze fino a circa 2500 Km.

3. Strato F. Di giorno si possono distinguere due strati: F_1 , situato a circa 200 Km, e F_2 , situato a circa 350-400 Km di quota. Di notte i due strati si combinano in un unico strato situato a circa 300 Km di altezza. Questo rimane l'unico strato ionizzato ed è quello che permette le trasmissioni notturne a lunga distanza in onde corte.

Origine dei simboli D, E, F L'origine della nomenclatura degli strati D, E ed F è piuttosto originale. Pare che l'inglese Edward V. Appleton, uno dei pionieri dello studio della ionosfera, usasse il simbolo E

per descrivere il campo elettrico dell'onda riflessa dal primo strato della ionosfera. In seguito, Appleton scoprì l'esistenza di un secondo strato, localizzato ad un'altitudine superiore al primo e usò il simbolo F in questo caso. Quando si accorse dell'esistenza di un altro strato, questa volta ad un'altitudine inferiore al primo, usò per quest'ultimo il simbolo D.

I simboli poi sono rimasti ad identificare gli strati; lo strato F è stato ulteriormente suddiviso in due sottostrati, F_1 e F_2 , e la loro definizione si è evoluta in modo da inglobare quello che è lo stato attuale di comprensione delle proprietà fisiche e chimiche della ionosfera.

4.2 Qualche curiosità

Perché la ricezione delle trasmissioni radio a onde corte è migliore durante la notte? Di giorno le onde radio ad alta frequenza HF (o onde corte SW) sono riflesse dagli strati E, F_1 , o F_2 . Di notte persiste solo l'unico strato F situato a circa 300 Km di quota, che permette trasmissioni a lunga distanza. Di giorno le trasmissioni di queste onde radio sono disturbate dall'interferenza con le particelle cariche degli strati inferiori D, E e F_1 , mentre di notte l'interferenza è minima, in quanto gli strati inferiori svaniscono.

Perché durante il rientro delle navicelle spaziali si perdono i contatti radio per alcuni minuti? Durante il rientro di un veicolo spaziale, si genera un intenso attrito con i gas dell'atmosfera. L'attrito a sua volta si trasforma in calore, cioè energia. Questa energia ad un certo punto è sufficiente a ionizzare gli atomi attorno alla navicella spaziale, creando quindi un plasma. La densità di questo plasma 'locale' è tale da riflettere le onde radio usate nella comunicazione coi veicoli spaziali (VHF, UHF o SHF) e quindi il contatto radio si interrompe. Ad un certo punto il veicolo viene fatto rallentare dagli astronauti; questa manovra fa sì che l'attrito

sia fortemente ridotto e che quindi cessino le condizioni che davano luogo alla ionizzazione degli atomi e le comunicazioni radio possono riprendere normalmente.

5 Microonde

Col nome di microonde si designano quelle onde dello spettro elettromagnetico con lunghezze d'onda comprese tra i 30 cm e i 1 mm. Questo intervallo di lunghezze d'onda corrisponde a frequenze comprese tra 1 GHz e 300 GHz.

Quindi le microonde appartengono alle bande di frequenza UHF, SHF e EHF.

Le comunicazioni via satellite, e anche i telefonini, usano le microonde; molte case oggi possiedono un forno a microonde per cuocere.

Si tratta delle stesse microonde? Sì e no.

Sì, perché il termine microonde comprende in generale tutte quelle onde elettromagnetiche con frequenze nel range fra 1GHz e 300 GHz, con lunghezze d'onda quindi da qualche centimetro al millimetro.

No, perché le frequenze particolari e le potenze usate nei due casi sono diverse.

Le frequenze usate dai telefonini sono fra 824 e 894 MHz per il sistema analogico AMPS e fra 1.850 e 1.990 GHz per il sistema digitale GSM. La potenza del segnale dei telefonini è dell'ordine di qualche decimo di Watt.

La frequenza più comune usata nei forni a microonde è di 2.45 GHz e la potenza è intorno a un kiloWatt.

Nel forno a microonde la frequenza è stata scelta in modo da coincidere con un optimum intorno alla risonanza per l'assorbimento da parte delle molecole d'acqua. Quindi, l'acqua nei cibi assorbe le microonde e la loro energia. È questa energia assorbita che fa sì che le molecole d'ac-

qua e il cibo che le contiene aumentino di temperatura, cioè si scaldino.

La frequenza dei forni a microonde è stata ottimizzata per la molecola d'acqua allo stato liquido. Il ghiaccio assorbe l'energia dalla microonde a questa frequenza con una efficienza estremamente minore, per cui nel forno a microonde è possibile riscaldare la crema al cioccolato, senza sciogliere il gelato al centro!

Anche le microonde per telecomunicazioni scaldano e per questo motivo in generale è sconsigliato stare troppo vicini a trasmettitori a microonde o radar di forte potenza.

E i telefonini? In Inghilterra è stato fatto uno studio preliminare dall'Unione Consumatori per cercare di quantificare l'effetto dei telefonini sul cervello umano. Pare che provochino sì riscaldamento, ma che sia solo di pochi centesimi di grado, quindi trascurabile.

È vero comunque che le microonde scaldano e che temperature superiori a 43°C distruggono le cellule dei tessuti. In generale, esposizioni a microonde di potenze superiori ai 20 milliwatt per centimetro quadrato si può considerare dannosa per gli esseri viventi.

Comunque l'effetto su larga scala sulle persone del riscaldamento dovuto alle microonde è un problema nuovo, che è allo studio e su cui conclusioni definitive si potranno avere soltanto tra qualche anno.

6 Satelliti per comunicazione

I satelliti permettono telecomunicazioni tra luoghi molto distanti tra loro.

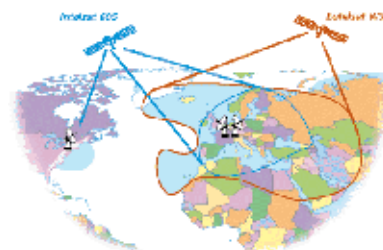
Le onde usate per questo tipo di comunicazioni sono le microonde, onde radio nel range da 1 GHz ai 300 GHz, ovvero nelle bande UHF, SHF, EHF.

Il principio è semplice: segnali radio nel range delle microonde vengono trasmessi

da una stazione terrestre ad un satellite in orbita.



L'apparecchiatura a bordo del satellite riceve i segnali, li amplifica e li trasmette verso una particolare regione della Terra dove qualunque stazione ricevente può raccogliarli.



Un sistema di comunicazione via satellite può essere messo in funzione in tempi relativamente veloci, in quanto non c'è bisogno avere accesso diretto alla zona, come sarebbe invece necessario per stendere connessioni fisiche tipo cavi o simili. Questo è un notevole vantaggio in zone geograficamente o politicamente disagiate.

Un tipico satellite per telecomunicazioni ha un certo numero di transponders. Ogni transponder consiste di un'antenna ricevente sintonizzata su un canale, o su un range di frequenze, in entrata (uplink, in inglese); di un apparecchio che scala queste frequenze al range di frequenze del canale di uscita (downlink) e di un amplificatore di potenza per fornire alle microonde in uscita una potenza adeguata. Il numero di transponders, o di canali, indica la capacità del satellite.

I segnali che viaggiano dalla terra ai satelliti devono attraversare l'atmosfera.

Un'attenuazione di 3dB (dB = *decibel*), corrispondente ad un dimezzamento (ovvero ad una variazione di un fattore 2) della potenza del segnale, è considerato eccessivo e quindi vengono evitate frequenze che vengono fortemente assorbite nell'atmosfera. Queste frequenze vengono invece adoperate per le comunicazioni, in genere militari, fra satelliti, per evitare intercettazioni da Terra.

Le bande di frequenze per comunicazioni via satellite per scopi civili sono state assegnate attraverso accordi internazionali. Ogni banda consiste di un range di frequenze per il cosiddetto uplink (collegamento dalla Terra al satellite) e di un range di frequenze più basse per il downlink (dal satellite alla Terra). Il downlink, a causa della maggior attenuazione dovuta alle perturbazioni atmosferiche, è il collegamento più delicato e per esso sono state scelte bande di frequenze inferiori all'uplink, in quanto la pioggia e l'attenuazione atmosferica perturbano meno le frequenze più basse.

Le bande più usate comprendono 1. la banda C con frequenze fra i 5.925 e i 6.425 GHz per l'uplink e frequenze tra i 3.7 e 4.2 GHz per il downlink 2. la banda K che usa frequenze tra 14 e 14.5 GHz per l'uplink e da 12.75 a 13.25 GHz per il downlink.

La larghezza di banda tipica di un canale è di 36 MHz. Questo corrisponde ad un segnale TV a colori oppure 1200 segnali telefonici, ciascuno con una larghezza di banda di 4 kHz. Il largo margine della larghezza di banda permette di ridurre la potenza necessaria al trasmettitore e avere un buon rapporto segnale/ rumore.

Potenza. La potenza necessaria per una comunicazione satellitare soddisfacente dipende dalla potenza necessaria al ricevitore a Terra e dalla frazione della potenza trasmessa dal satellite che viene ricevuta a Terra. Questa frazione è uguale al rapporto fra l'area dell'antenna ricevente a Terra e l'area coperta dal fascio. Quin-

di, nel caso di un'antenna parabolica di 30 metri di diametro di una stazione terrestre che riceve un fascio d'onde sufficientemente largo da ricoprire un intero emisfero, il rapporto fra l'area del piatto e l'area dell'emisfero terrestre è un numero molto piccolo (pari a 4×10^{-12}) e questo è la frazione della potenza trasmessa dal satellite ricevuta a Terra e corrisponde a 114 dB. Nel caso in cui il fascio dal satellite sia molto più collimato, tale da ricoprire per esempio solo l'area degli Stati Uniti d'America o dell'Europa, la potenza ricevuta è in questo secondo caso solo circa 100 dB di quella trasmessa dal satellite, cioè circa 11 dB (corrispondenti a 14 volte) più forte che nel caso precedente.

Per questo conviene avere fasci collimati, diretti specificamente verso le regioni fra cui si desidera il collegamento via satellite.

Per ottenere fasci ben collimati che ricoprono aree limitate, l'apertura dell'antenna sul satellite deve essere sufficientemente grande: infatti la larghezza del fascio di microonde è proporzionale al rapporto tra la lunghezza d'onda e il diametro dell'antenna del satellite.

7 Antenne e parabole

Cos'è un antenna? Un'antenna trasmittente è un apparecchio che irraggia energia nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche nel range delle radiofrequenze.

Un'antenna convenzionale è un conduttore o un sistema di conduttori che irraggia (antenna trasmittente) o intercetta (antenna ricevente) energia elettromagnetica.

Un'antenna trasmittente converte un segnale elettrico variabile nel tempo (ovvero la corrente alternata) in un'onda elettromagnetica che si propaga liberamente attraverso l'aria o lo spazio.

L'antenna ricevente riconverte l'onda elettromagnetica in segnale elettrico.

L'antenna per trasmissioni radio si può schematizzare come un filo conduttore di una certa lunghezza L (piccola rispetto alla lunghezza d'onda $\hat{\lambda}$ da trasmettere: $L \ll \hat{\lambda}$). Ad esempio un'antenna lunga 30 m è adeguata per trasmettere un'onda radio FM di frequenza media di 500 kHz: infatti a questa frequenza corrisponde una lunghezza d'onda $\hat{\lambda}$ di circa 600 m, ben maggiore delle dimensioni dell'antenna.

L'antenna trasmittente deve essere in grado di irraggiare in modo estremamente efficiente così che la potenza non vada sprecata, cioè l'antenna deve concentrare l'energia radio in un fascio sufficientemente collimato.

Le dimensioni di un'antenna sono determinate dalle frequenze da trasmettere o da ricevere. Man mano che si sale nelle frequenze le dimensioni dell'antenna devono essere sempre più precise.

Le antenne per trasmissioni radio sono di tipo omnidirezionale, cioè irraggiano il segnale trasmesso su una vasta area. Invece nelle trasmissioni tra due punti fissi si usano antenne direzionali che trasmettono il segnale in un fascio abbastanza ben collimato, diretto verso l'apparato ricevente.

Antenne paraboliche o parabole



Le antenne paraboliche si usano per le comunicazioni via satellite per mezzo di microonde (onde radio di lunghezza d'onda compresa approssimativamente tra il millimetro e i 10 cm, corrispondenti a frequenze da 1 a 300 GHz, cioè nelle bande UHF, SHF e EHF).

La forma a parabola del piatto fa sì che il fascio di onde sia ben collimato, cioè sia poco divergente.

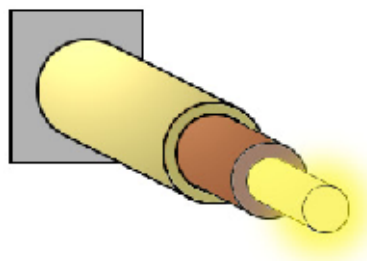
La larghezza del fascio delle microonde è proporzionale al rapporto tra la lunghezza d'onda delle microonde e il diametro del piatto. A parità di lunghezza d'onda, quindi, maggiori sono le dimensioni del piatto, più stretto è il fascio d'onde.

Un'antenna di dimensioni ridotte posta su un satellite riceverà e trasmetterà segnali su tutta l'area della Terra visibile dal satellite, circa un intero emisfero. Un'antenna di dimensioni maggiori riceverà e trasmetterà segnali su una regione terrestre molto più limitata.

Analogamente per quanto riguarda le stazioni terrestri, un'antenna di grandi dimensioni trasmette e riceve segnali solo dal satellite verso cui è puntata e non da satelliti vicini.

8 Le fibre ottiche

Una fibra ottica è costituita da un lungo cilindro interno trasparente ("core") ricoperto esternamente da un rivestimento ("cladding") di materiale opaco di indice di rifrazione minore di quello del materiale interno. Il tutto è in genere fasciato da una spessa pellicola di plastica esterna ("coating") per proteggere la fibra ottica da danni, abrasioni, ecc.



Il diametro della fibra trasparente interna varia dai 5mm ai 100 mm e il diametro del rivestimento di solito è fra i 100 e i

150 mm. Lo standard adottato per le fibre ottiche ad alta performance per uso nelle telecomunicazioni è di un diametro esterno del rivestimento di 125 μm , con diametro interno compreso fra gli 8 e i 50 μm . Per paragone, ricordiamo che un capello umano ha un diametro di circa 100 μm .

La fibra ottica funziona come una specie di specchio tubolare. La luce che entra nel core ad un certo angolo (*angolo limite*) si propaga mediante una serie di riflessioni alla superficie di separazione fra i due materiali del core e del cladding.



Le fibre ottiche hanno avuto un forte sviluppo e vengono utilizzate in un gran numero di applicazioni solo in questi ultimi anni, benchè la fisica della riflessione totale fosse ben conosciuta da lungo tempo.

Il problema stava nelle perdite che producevano un'intollerabile attenuazione del segnale. Il raggio rifratto infatti non penetrava nel materiale del rivestimento esterno, ma un po' d'energia veniva assorbita da quest'ultimo, cosicchè la luce veniva attenuata nelle riflessioni interne. In questi ultimi decenni, lo sviluppo di materiali ultra-puri con coefficienti di assorbimento estremamente bassi ha lanciato l'uso delle fibre ottiche, in medicina ad esempio, e nel campo delle telecomunicazioni.

Le fibre ottiche uniscono vari vantaggi: costi bassi, attenuazione minima, ottima larghezza di banda e la comunicazione via fibra ottica sono immuni da interferenze.

Le fibre ottiche attuali sono così trasparenti che l'intensità della luce entro un tratto di fibra ottica di 6 km viene ridotta di meno di un fattore 2: questi materiali sono circa diecimila volte più trasparenti del vetro normale!

Infine, i segnali nelle fibre ottiche sono le onde visibili (o quasi), le cui frequenze sono un milione di volte più alte delle frequenze normalmente usate nei fili telefonici: questo fatto permette alle fibre ottiche di trasportare molta più informazione. Infatti più alta è la frequenza, maggiore è la larghezza di banda disponibile e a larghezze di banda maggiori corrisponde una maggiore capacità di trasmettere informazione.