

TELECOM ITALIA

FUTURE CENTRE



Ciclo di incontri
**“Il futuro
della comunicazione”**

La comunicazione in Natura

Tecnologie per comunicare

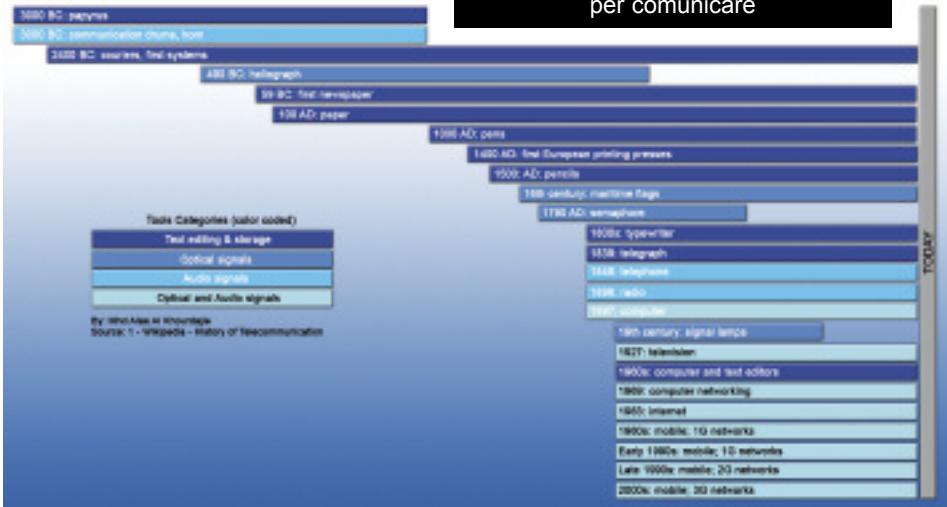
Le infrastrutture di comunicazione

Comunicare tra 5 anni

Abbiamo visto come nel mondo animale l'evoluzione abbia affinato numerosi sistemi per permettere la comunicazione. L'uomo ha utilizzato da subito i sistemi di comunicazione propri della specie, la voce, udito, gestualità e vista (l'olfatto nella specie Homo non è particolarmente sviluppato e sostanzialmente non è utilizzato per la comunicazione anche se, da qualche tempo, i ricercatori hanno notato come certi odori portino a favorire alcuni comportamenti, ad esempio il profumo di vaniglia stimola le persone ad acquistare...).

In un tempo relativamente breve, se paragonato ai tempi della evoluzione naturale, l'uomo ha utilizzato strumenti, via via più sofisticati, per comunicare. Tamburi, segnali di fumo, specchi... e tanti altri ancora.

Figura 1 - Evoluzione degli strumenti per comunicare



In questo eBook ci concentriamo su quegli strumenti che formano la struttura portante della comunicazione odierna e in particolare sulle tecnologie che li rendono possibili.

● *Un po' di teoria della Comunicazione*

Comunicare vuol dire trasmettere una informazione da una persona ad un'altra, spesso avvalendosi, e questo è quanto vogliamo esplorare, di strumenti appositi. In senso lato usiamo il termine comunicare anche quando la comunicazione avviene tra una persona e una macchina ed anche quando questa avviene tra due macchine; vedremo più avanti alcuni elementi che differenziano questi tipi di comunicazione. Quanto vediamo in questa parte si applica a tutti questi tipi di comunicazione.

L'informazione viene codificata in un modo specifico dipendente dal mezzo utilizzato. Nella comunicazione possiamo distinguere questi elementi:

- il segnale;
- il disturbo;
- la propagazione (l'attenuazione che subisce il segnale durante il percorso).



Figura 2 - Segnale, Disturbo, Propagazione, Mezzo

Questi tre elementi sono legati tra loro in generale e, nello specifico, le caratteristiche del legame dipendono dal mezzo utilizzato per effettuare la comunicazione, ad esempio via radio piuttosto che tramite un filo.

Il **segnale** deve essere in grado di essere recepito dal ricevente con il contenuto informativo integro, deve cioè essere possibile per il ricevente capire l'informazione contenuta nel segnale. In genere, a meno che non si sia in un ambiente appositamente progettato a questo scopo, come una camera anecoica, in ogni comunicazione accanto al segnale è presente un **disturbo** che complica la corretta comprensione del segnale da parte del ricevente.

Ad esempio, in una discoteca la nostra voce (segnale) può diventare incomprensibile al nostro interlocutore per il gran frastuono pre-

Figura 3 - Camera Anecoica



sente nell'ambiente, una autoradio può improvvisamente mettersi a gracchiare quando il segnale che riceve dalla stazione trasmittente si confonde con onde elettromagnetiche emesse da un elettrodotto (questo spiega come mai si sentano "disturbi" in presenza di motori elettrici: le onde elettromagnetiche emesse dai motori "disturbano" il segnale che si vuole ricevere). Il disturbo dipende anche dal modo in cui il segnale è codificato. Tornando all'esempio della radio, se stiamo ascoltando un segnale AM (modulazione di ampiezza) questo è disturbato dalla presenza di un elettrodotto (o anche di un motore elettrico come quello del phon) mentre se il segnale che stiamo ascoltando è codificato in FM non viene disturbato (o lo viene in modo impercettibile al nostro orecchio). Ecco spiegato il successo delle radio FM (modulazione di frequenza)

Si noti che il disturbo può anche essere costituito dalla presenza di altri segnali che vanno ad interferire con il segnale oggetto del nostro interesse. Ad esempio, in discoteca il frastuono che ci rende difficile capire cosa ci stia cercando di dire l'amico è in gran parte composto dai tanti segnali (conversazioni) che le persone presenti si stanno scambiando oltre, ovviamente, dal megasegnale (mega per il... volume) costituito dalla musica..

Il segnale, una volta emesso, si **propaga** nel mezzo che separa il trasmettitore dal ricevitore. In questo percorso parte della sua energia iniziale viene assorbita da vari "ostacoli" che trova sul suo cammino per cui diminuisce (**attenuazione**) l'energia associata al segnale rendendolo sempre più debole fino ad arrivare ad un punto in cui il ricevente non è più in grado di riconoscerne il contenuto. Pensando nuovamente alla discoteca, quando ci accorgiamo che il frastuono è tale da non riuscire a capire quello che ci sta dicendo l'amico ci avviciniamo alla sua bocca: il volume (l'energia) del suono emesso dalla sua bocca non cambia ma essendo il nostro orecchio più vicino riusciamo a sentire cosa ci dice.

Ricordiamo che l'energia non si "perde" ma si "disperde" nel senso

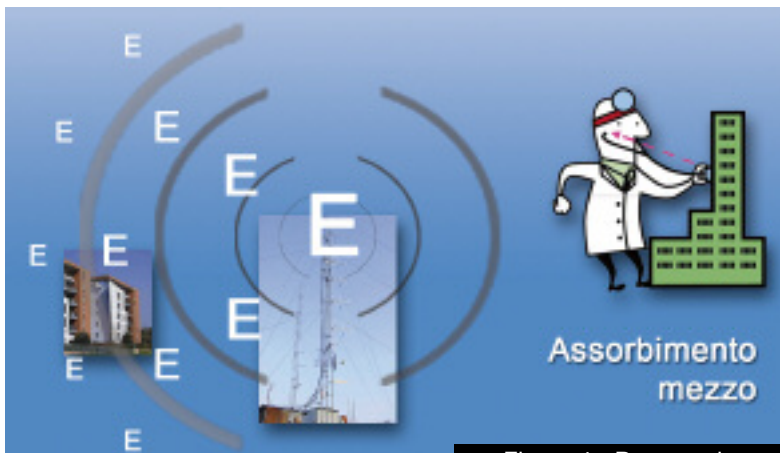


Figura 4 - Propagazione

che quella che rimane disponibile al ricevente diminuisce quanto più questo è distante dal trasmettente. La differenza (quella che è andata dispersa) è stata assorbita dall'ambiente, nel caso della discoteca questo significa i divani (assorbono molto bene il suono, le pareti, invece, tendono a rifletterlo creando disturbi) ma anche le varie orecchie delle tante persone presenti e la cui maggioranza percepirà quella energia in termini di disturbo.

L'informazione viene **codificata** all'interno del segnale in modo da adattarla al mezzo trasmissivo. Una codifica è ad esempio quella che veniva utilizzata nel telegrafo in cui ad ogni lettera corrispondeva un insieme definito di punti e linee. Il punto era effettuato chiudendo il circuito per un breve tempo, la linea per un tempo più lungo. La chiusura del circuito da parte del trasmettitore era percepita come un suono breve (punto) o lungo (linea) dal ricevitore che provvedeva poi a decodificare le sequenze in lettere.

Negli ultimi cento anni la codifica dell'informazione per la sua trasmissione è diventata sempre più sofisticata e con l'avvento dei computer ancora di più. Il nostro telefonino è un codificatore - decodifica-

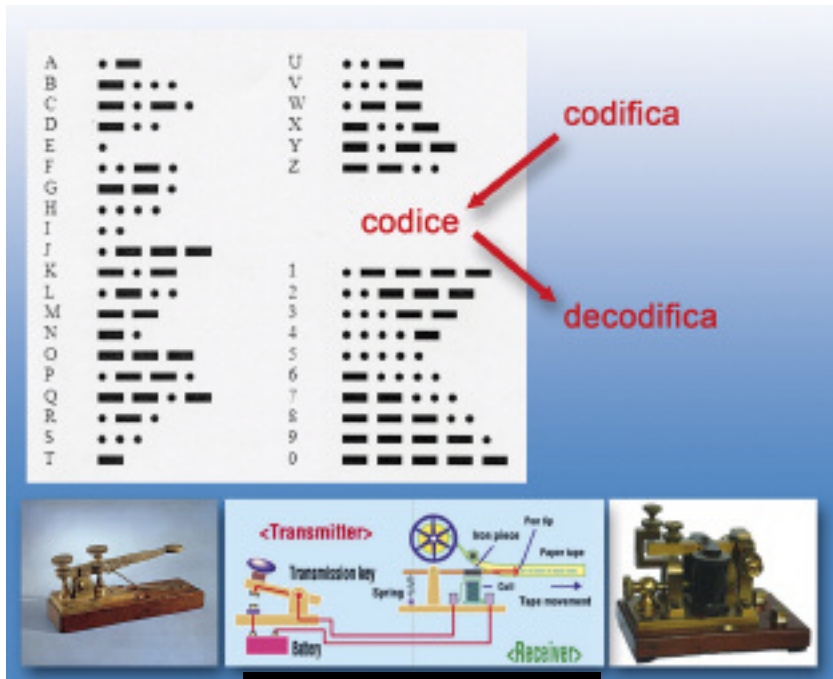


Figura 5 - Il sistema Morse

tore sofisticatissimo e utilizza un computer con maggior capacità elaborativa di quella che è stata necessaria per mandare l'uomo sulla luna.

Riprenderemo questi concetti base di segnale, disturbo, propagazione e codifica nelle parti che seguono collegandole alle diverse tecnologie oggi utilizzabili per comunicare.

● La trasduzione dell'informazione

Prendiamo in mano il telefonino, o una vecchia cornetta del telefono: la nostra voce in uscita dalla bocca deve essere convertita in un

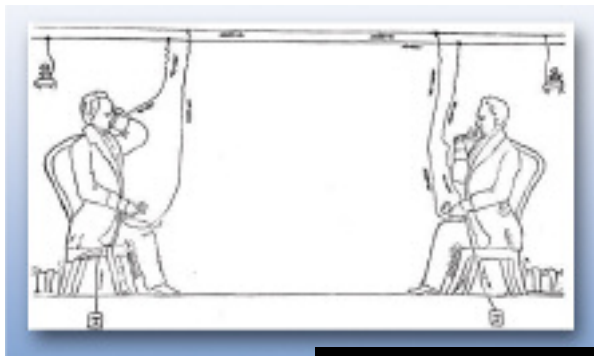


Figura 6 - L'esperimento di Meucci

segnale elettrico che sarà poi trasmesso al nostro interlocutore. Il “telefono” nasce proprio da questa traduzione! La storia della scoperta che fosse possibile effettuarla è certamente curiosa.

Dobbiamo risalire infatti al 1849 dietro le quinte del teatro de Tacon dell'Havana, a Cuba per incontrare Antonio Santi Giuseppe Meucci. Questi si era trasferito a Cuba nel 1835 e oltre a lavorare come macchinista al teatro (tecnico delle scene e delle luci, diremmo oggi) faceva anche esperimenti con l'elettricità. Alcuni suoi amici medici gli chiesero di fare delle prove su dei pazienti per stabilire la possibilità di guarire i reumatismi utilizzando scosse elettriche. Meucci in uno di questi suoi esperimenti chiese al paziente di mettersi in bocca una placca e si portò in una stanza diversa dove intendeva regolare l'intensità delle scosse.

Somministrando al paziente una scossa da 114 V (non male considerando che questo se la ricevette in bocca sulla lingua!) questo lanciò un urlo che Meucci, sorpreso, sentì arrivare dal filo che aveva collegato alle batterie. La storia non ci dice se la scossa aiutò il paziente a curare i suoi reumatismi ma ci dice che la sorpresa di Meucci si tradusse nella intuizione che si potesse trasmettere la voce utilizzando la corrente elettrica.

Quello che era successo era che l'urlo del paziente aveva modulato il flusso della corrente cambiando la resistenza offerta dal conduttore-lingua-bocca e questo segnale modulato venne convertito in suono transitando sulla giunzione con le batterie portando in vibrazione quella giunzione.

Si era trattato, ovviamente, di una circostanza estremamente fortunata: una configurazione particolare aveva portato alla trasduzione da energia sonora in modulazione elettrica e quindi alla trasduzione in suono tramite le vibrazioni indotte dal segnale modulato (e anche fortunato ritengo sia stato il paziente a non essere rimasto fulminato!).

Meucci perfezionò (ce n'era indubbiamente bisogno) il meccanismo per tradurre la voce in segnale elettrico e il segnale elettrico in suono e con questo nacque il telefono, non la telefonia, però; per questa era necessario inventare la rete di telecomunicazioni!

Come è facile immaginare la trasduzione da voce ad elettrico, e quindi da elettrico a sonoro, lasciava parecchio a desiderare in termini di fedeltà di riproduzione. Anche la soluzione adottata da Graham Bell non era molto meglio: si basava su di un microfono "liquido" in cui una scatoletta contenente acqua e acido solforico (in piccola quantità) e chiusa da una membrana variava la sua resistenza sotto la pressione esercitata dalle onde sonore modulando il segnale elettrico.



Figura 7 - La storia del microfono in immagini

La voce che entrava in quello che oggi chiamiamo microfono usciva dall'altoparlante appena intellegibile.

La parte di trasduzione elettrica-sonoro migliorò rapidamente, quella da voce a elettrico ebbe un miglioramento più lento. Il primo miglioramento significativo fu dovuto ad Edison con la invenzione del microfono a carbone nel 1878.

Da allora i progressi e la varietà di sistemi per convertire la voce e il suono in segnali elettrici sono stati notevoli. Oggi abbiamo, in ordine di diffusione, microfoni a condensatore, microfoni dinamici, microfoni capacitivi, microfoni basati sull'effetto piezoelettrico (compressione di cristalli), microfoni a nastro (vibrazione indotta su di un sottilissimo nastro all'interno di un campo magnetico), microfoni ottici, molto sensibili, che rilevano il cambiamento di intensità di un fascio di luce attraversato da onde sonore, microfoni laser usabili per raccogliere il suono in punti distanti, cose da spie; il raggio laser puntato su di una finestra viene riflesso dal vetro e questa riflessione viene modulata dalle vibrazioni che il vetro ha quando sono presenti suoni nella stanza. Il microfono, oltre ad essere diventato in grado di effettuare una trasduzione fedele del suono che gli arriva, è anche diventato molto più piccolo. Ora può arrivare ad avere la dimensione di un granello di sabbia e diventa quindi possibile inserirlo in qualunque oggetto. Questi oggetti miniaturizzati si chiamano MEMS (MicroElectromechanical Systems).

Il passaggio da segnale elettrico a suono è relativamente più semplice ma anche in questo caso i progressi non sono mancati, basti pensare alle dimensioni: dalle "cornette" di una volta siamo arrivati ad altoparlanti che possono essere inseriti nell'orecchio. Inoltre, la fedeltà nella riproduzione del suono è cresciuta enormemente anche se, ad oggi, la qualità della voce non è così buona. Il problema, però, non sta nel microfono o nell'altoparlante ma nel sistema di trasmissione.



Figura 8 - La storia dell'altoparlante in immagini

● *Mettere l'informazione in un segnale*

Pensiamo per un attimo a cosa è un “segnale”. In termini molto semplici un segnale è un qualcosa che attira l'attenzione, che si distingue dall'ambiente circostante. È proprio nella diversità che riusciamo a catturare l'informazione. Immaginiamo di avere una lampadina. Potremmo associare un significato al fatto che sia spenta piuttosto che sia accesa. Questo ci permette, però, di associare un'unica informazione. Se vogliamo associare più informazioni, dobbiamo escogitare un codice più complesso. Ad esempio sfruttare il fattore tempo. Potremmo accendere due volte in un secondo la lampadina per comunicare che vogliamo iniziare a trasmettere una informazione e quindi stabilire una associazione che leghi i numeri di accensioni/spegnimento in un secondo ad una specifica informazione: due lampi ha

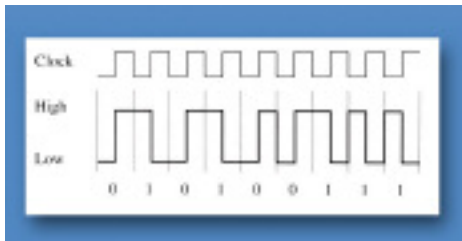


Figura 9 - La codifica del segnale

vinto il Milan, tre ha vinto l'Inter...e così via. Il limite in questo sistema di segnalazione è dato dal numero di cicli accensione/spegnimento che si è in grado di rilevare in un secondo (circa cinque per il nostro occhio, svariati miliardi per un sistema ottico).

Si potrebbe, però, fare anche di meglio. Anzichè associare a priori una informazione ad un certo numero di cicli, il che richiede a priori di sapere, sia da parte di chi invia sia da parte di chi riceve, le diverse corrispondenze, si potrebbe utilizzare un codice di rappresentazione, ad esempio associando alla lettera A un ciclo, alla B due cicli e così via. In questo modo in ogni secondo riusciremmo a trasmettere una lettera e quindi potremmo anzichè trasmettere l'informazione, descriverla. È possibile anche utilizzare un sistema diverso per la codifica. Anzichè basarsi sul numero di cicli nell'unità di tempo si potrebbe predeterminare il numero di cicli, ad esempio 64.000 in un secondo, e quindi associare alla presenza o meno di una "accensione" un valore 1 o 0, rispettivamente. In questo modo riusciamo a raccogliere ogni secondo 64.000 "bit" e in questa stringa possiamo scrivere quello che vogliamo. Ad esempio la stringa 11010000 potrebbe corrispondere alla lettera A, quella 11010001 la lettera B e così via. Vedete che nell'esempio che ho fatto ho utilizzato 8 cicli (bit) per associare una lettera. Gi 8 bit non sono stati scelti a caso, costituiscono 1 Byte, e il codice utilizzato è quello ASCII per la codifica di lettere dell'alfabeto in bit.

Quegli stessi bit possiamo anche utilizzarli per codificare altre tipologie di informazioni. Per codificare la voce possiamo effettuare un campionamento a distanza talmente ravvicinata che la riproduzione

della voce campionata sia praticamente indistinguibile dall'originale. È abbastanza intuitivo che quanti più campioni vengono utilizzati e quanto più ciascun campione è in grado di rappresentare con precisione l'elemento campionato tanto maggiore sarà la fedeltà del segnale all'originale e quindi la possibilità di riproduzione del segnale in una voce perfettamente riprodotta. È altrettanto intuitivo che quanto maggiore è la frequenza di campionamento e quanto più fedele (quanti più bit sono utilizzati per esprimere il singolo campionamento) tanto maggiore sarà il numero di bit necessari per ogni secondo di codifica della voce. Nelle telecomunicazioni si è iniziato nel 1958 con campionamenti risultanti in 64.000 bit ogni secondo (in Europa, 56.000 negli USA), per il telefonino, invece, si utilizzano 14.400 bit al secondo (di qui la qualità inferiore della voce, che rimane comunque perfettamente intelleggibile).

Supponiamo di avere una capacità di trasmettere 2 milioni di bit in un secondo. Se la trasmissione della voce in una conversazione telefonica richiede "solo" 64.000 bit al secondo è ovvio che sarà possibile trasmettere altre 31 conversazioni ($32 \cdot 64.000 = 2.048.000$). Chiaramente non possiamo trasmettere prima un secondo di voce relativa ad una conversazione, poi quello relativa ad un'altra e così via in quanto introdurremmo un ritardo nella comunicazione (appunto di un secondo visto che aspetteremmo un secondo prima di trasmettere i 64.000 bit relativi). Quello che possiamo fare, e che facciamo in telecomunicazioni, è di inviare il pacchetto di 8 bit (1 byte di nuovo!) corrispondente ad un campionamento di una conversazione, quindi 8 bit della seconda, e a seguire fino ad arrivare agli 8 bit della trentaduesima per poi ricominciare da capo dalla prima. In questo modo il ritardo si annulla, in quanto ogni campionamento è immediatamente trasmesso.

Utilizzando 8 bit siamo in grado di esprimere 256 diversi "valori" della voce, come se avessimo un mosaico di suoni in cui ogni tessera viene presa da un campionario di 256 varianti. Con 256 valori è in

in grado di generare e trattare correttamente questi 196.000 bit al secondo).

È anche possibile codificare in bit un'immagine e anche qui la fedeltà dell'immagine codificata dipende da quanti bit siamo disponibili a utilizzare, oltre, ovviamente, dalle dimensioni dell'immagine in fase di riproduzione (è inutile avere una definizione di 4M pixel se poi i pixel disponibili sul dispositivo di riproduzione sono solo 2M pixel (come nel caso della televisione HD). Per ogni pixel vengono in genere utilizzati 3 byte.

A differenza del suono, per le immagini e per i filmati (che non sono altro che una serie di immagini che devono essere fornite a frequenza prestabilita) è possibile ridurre il numero di bit necessari a rappresentare una informazione, un meccanismo che si chiama **compressione**. Intuitivamente, se siamo in presenza di una foto in cui una buona parte è costituita dal cielo si può condensare l'informazione relativa ai pixel del cielo descrivendo la loro posizione e il colore, invece di ripetere per ogni pixel questa informazione. Per un approfondimento su questo tema si può consultare l'eBook sulla fotografia digitale.

Sono partito a descrivere come mettere una informazione in un segnale con l'esempio di accensione e spegnimento di una lampadina. Ho poi descritto come si possano utilizzare dei meccanismi di codifica dell'informazione tramite una sua rappresentazione con stringhe di bit.

Prima di affrontare il tema delle varie tecnologie per il trasporto dell'informazione conviene considerare per un attimo come si può codificare il valore di un bit all'interno di un segnale portato da un campo elettromagnetico. La luce di una lampadina è un esempio di campo elettromagnetico ma l'approccio seguito nell'esempio di accendere e spegnere la lampadina, cioè di associare il valore del bit alla presenza o assenza del campo elettromagnetico è troppo rozzo per consentire di trasmettere grandi quantità di informazioni.

Quello che viene fatto è di cambiare alcune caratteristiche di un

campo elettromagnetico associando a questo cambiamento il riconoscimento del valore del bit.

Il primo meccanismo utilizzato è stato una logica estensione del ciclo “acceso – spento”: anzichè legare l’informazione al fatto che vi sia un campo elettromagnetico la si lega alla intensità di questo campo. In questo modo è possibile codificare un maggior numero di informazioni in quanto l’intensità del campo può avere molti valori. Quanti? Dipende ovviamente dai valori di minimo e di massimo del campo ma anche, soprattutto, dalla capacità di distinguere le intensità. Se, infatti, abbiamo un intervallo tra minimo e massimo pari a 10 e riusciamo a distinguere variazioni pari ad 1 riusciremo a codificare 10 valori mentre se riusciamo a distinguere variazioni pari a 0,1 riusciremo a codificare 100 valori. Questo sistema di codifica si chiama a **modulazione d’ampiezza**.

Un problema della modulazione d’ampiezza è che la presenza di altri campi elettromagnetici può portare a variazioni dell’intensità di

campo e quindi il ricevente inter-cetterà valori non corretti. Immaginiamo di avere un segnale di livello 1,3 e di leggerlo mentre stiamo passando sotto un elettrodotto. La corrente elettrica che passa nei cavi sopra la nostra testa genera un campo elettromagnetico (oscillante a 50Hz) che in un certo istante si aggiungerà al campo che trasporta il segnale facendoci leg-

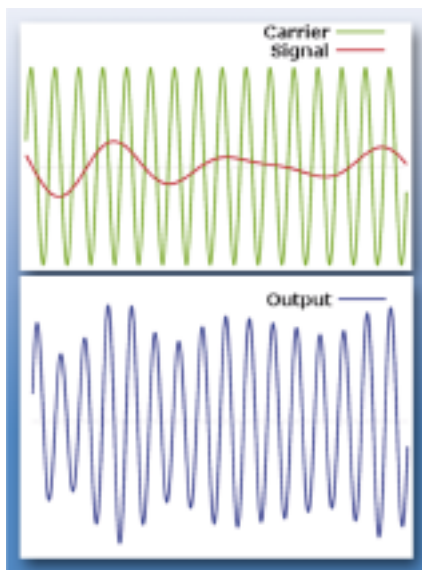


Figura 11 - La codifica in modulazione d’ampiezza

gere un valore di 1,5 e in un istante successivo sottrarrà al campo del segnale facendoci leggere 1,2. Ecco che la nostra ricezione risulta scorretta (disturbata). Sono i gracchiamenti che disturbano le ricezioni radio in AM (Amplitude Modulation).

Un modo diverso è quello di mettersi d'accordo sulla frequenza di campo elettromagnetico su cui verrà modulato il segnale, ad esempio 900 MHz (900 milioni di cicli al secondo) e quindi variare questa frequenza per la codifica del segnale. In questo caso diventa praticamente impossibile che in modo casuale un altro campo elettromagnetico presente al punto di ricezione dia fastidio, interferisca, con il ricevitore. La **modulazione di frequenza** è quindi molto più resistente a disturbi e questo è il motivo per cui le trasmissioni in FM (Frequency Modulation) sono largamente usate.

Quante sono le informazioni che possono essere codificate utilizzando la modulazione di frequenza? Abbiamo visto come per la modulazione di ampiezza questo dipenda dall'intervallo utilizzato e dalla

variazione minima che siamo in grado di distinguere. Analoga situazione per la modulazione di frequenza: la quantità di informazioni dipende dallo **spettro** disponibile e dalla variazione minima di frequenza che si riesce a riconoscere. Lo spettro è il campo di frequenze utilizzato, ad esempio da 898 MHz a 903 MHz. In questo caso lo spettro è pari a 5 MHz. In questo

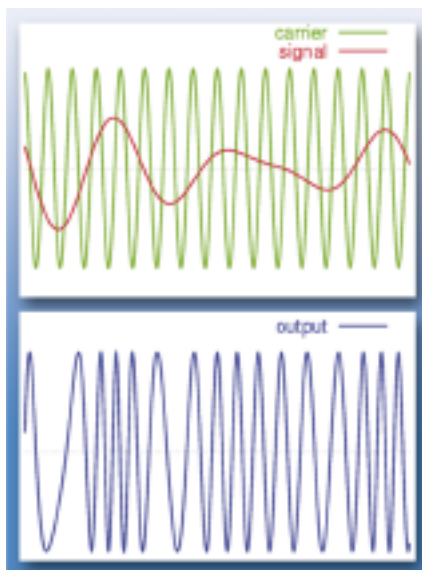


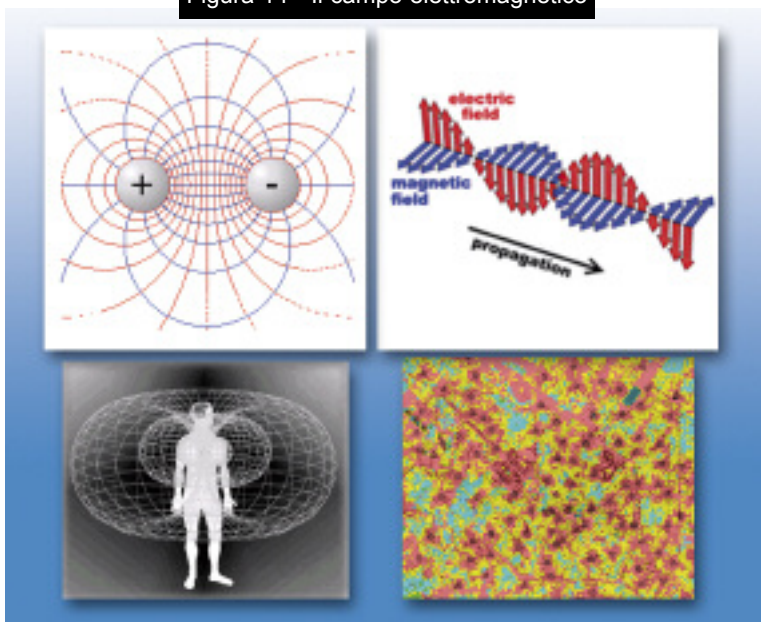
Figura 12 - La codifica in modulazione di frequenza

Nel tempo i ricercatori hanno inventato vari altri modi di codificare un segnale su di un campo elettromagnetico ma per gli scopi di questi incontri accontentiamoci di quanto abbiamo visto finora: è sufficiente a comprendere a grandi linee i sistemi di telecomunicazioni.

● *La trasmissione dell'informazione*

Abbiamo visto come nelle telecomunicazioni si utilizzi il campo elettromagnetico per codificare e trasportare le informazioni. Il campo elettromagnetico comprende sia quello che ogni giorno chiamiamo "elettricità" sia la luce, quella che percepisce il nostro occhio e anche quella che non percepisce (infrarosso e ultravioletto). Non è da moltissimo

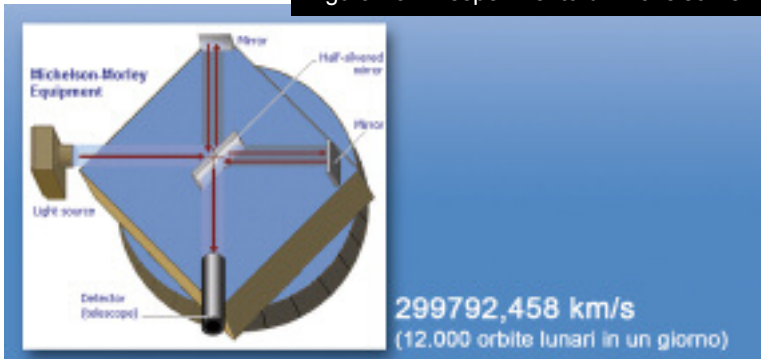
Figura 14 - Il campo elettromagnetico



tempo che gli scienziati sono riusciti a capire che elettromagnetismo e luce sono in realtà la stessa cosa. Questa scoperta è stata fatta da Maxwell a fine 1800.

Possiamo immaginare il campo elettromagnetico come delle onde che si espandono nello spazio-tempo. Un'immagine è quella di paragonarlo alle onde che possiamo vedere quando gettiamo un sasso in uno stagno. La superficie prima tranquilla dell'acqua si increspa con onde che partono dal punto in cui il sasso ha colpito l'acqua espandendosi fino a raggiungere i bordi dello stagno per poi rimbalzare indietro attenuandosi nel tempo e nello spazio. Il paragone può aiutare a capire ma non è corretto: nello stagno l'onda che vediamo è in qualche modo "trasportata" dall'acqua, se non ci fosse l'acqua non ci sarebbe onda. Per il campo elettromagnetico, invece, non c'è nulla che vibra, c'è solo il campo. Questa è una cosa non intuitiva tanto è vero che per gli scienziati l'assenza di questo mezzo che avrebbe dovuto consentire le oscillazioni del campo elettromagnetico fu un vero e proprio "shock" che portò alla rivoluzione della fisica del primo novecento. L'esperimento di Michelson e Morley dimostrò l'assenza di questo mezzo, allora chiamato "etere" e quello fu il punto di partenza dei ragionamenti che portarono Einstein alla teoria della relatività ristretta.

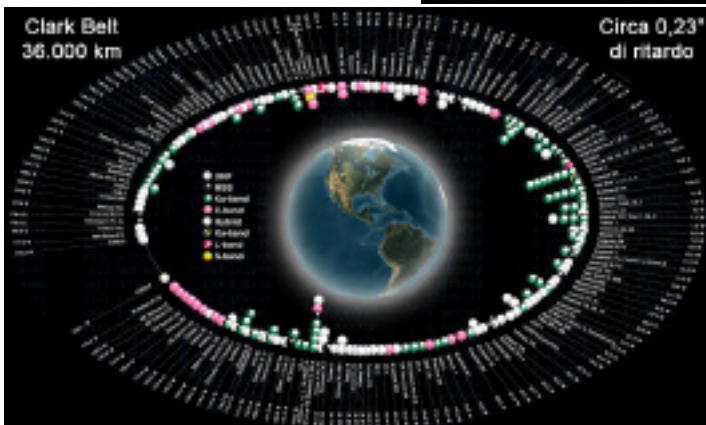
Figura 15 - L'esperimento di Michelson e Morley



Il campo elettromagnetico si “espande” alla velocità di (quasi) 300.000 km al secondo, la velocità della luce che per appunto è un campo elettromagnetico. Quindi la velocità a cui possiamo, teoricamente, trasmettere le informazioni è di 300.000 km al secondo. Questo rende praticamente istantanea la comunicazione da un capo all’altro della terra: la massima distanza tra due punti sulla superficie terrestre è di 20.000 km e quindi il ritardo introdotto dalla propagazione del campo elettromagnetico è inferiore ad un decimo di secondo. Le comunicazioni via satellite, però, utilizzano satelliti geostazionari che orbitano a 36.000 km di altitudine e quindi il campo elettromagnetico deve fare 72.000 km per arrivare a destinazione transitando dal satellite: il tempo impiegato, e quindi il ritardo introdotto, è quindi di circa 2,5 decimi di secondo, un ritardo che il nostro orecchio è in grado di percepire.

La comunicazione viene quindi effettuata utilizzando la modulazione di un campo elettromagnetico e possono essere utilizzati vari mezzi per convogliare il campo elettromagnetico. Ricordiamo che un campo elettromagnetico di per se non ha bisogno di un mezzo per espandersi ma è possibile convogliare il campo utilizzando appositi mezzi

Figura 16 - Ritardo e Satellite



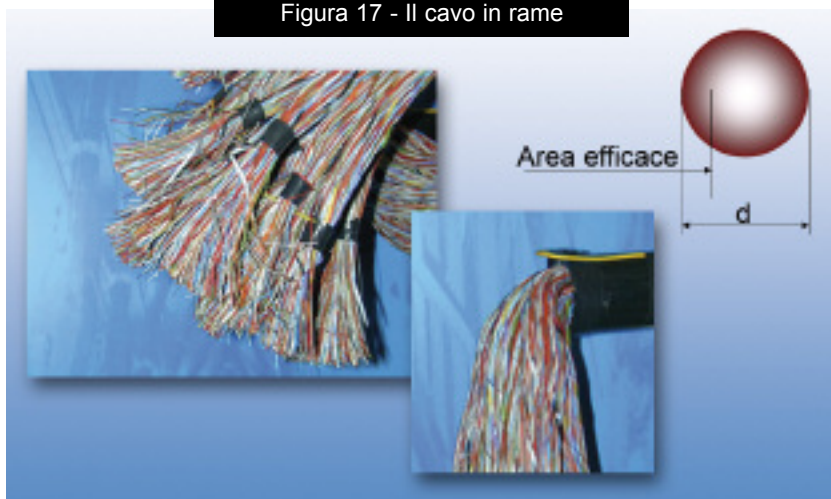
migliorando così l'efficienza energetica della trasmissione. Vediamo i due mezzi utilizzati oggi, il rame e la fibra, e la trasmissione in "aria".

● Il rame

Il rame è un ottimo conduttore di corrente elettrica, l'oro è ancora meglio ma costa troppo! Per questo motivo il rame è stato utilizzato fin da subito nelle telecomunicazioni. È un ottimo conduttore, ma non perfetto! L'elettricità che scorre in un filo di rame lo riscalda e questa trasformazione di energia elettrica in energia termica diminuisce la potenza del campo elettromagnetico. Quanto più è sottile il filo e quanto più è lungo tanto più il campo elettromagnetico si attenua. L'**attenuazione** dipende anche dalla frequenza del campo, quanto maggiore la frequenza tanto maggiore l'attenuazione.

La comunicazione utilizza una coppia di fili di rame, così come ci serve una coppia di fili di rame per far accendere una lampadina o far

Figura 17 - Il cavo in rame



funzionare un aspirapolvere. La nostra voce, convertita dal microfono in un campo elettromagnetico viaggia su questa coppia di fili, così come quella del nostro interlocutore.

Questa coppia di fili, che in telecomunicazioni si chiama “doppino”, deve essere ricoperta da un materiale isolante per evitare che i due fili toccandosi facciano un cortocircuito. I vari doppini vengono man mano raccolti in cavi sempre più grandi, come vedremo nel prossimo capitolo.

La vicinanza di fili porta ad una contaminazione, **interferenza**, da parte del campo elettromagnetico presente in un filo da parte di quello presente in un altro. Infatti, il filo di rame convoglia la corrente elettrica al suo interno ma il campo che questa genera e di cui è il risultato si estende tutto intorno al filo, oltre la guaina isolante.

Questo riduce ulteriormente, oltre al fenomeno dell’attenuazione, le possibilità di trasportare grandi quantità di informazioni.

All’inizio delle telecomunicazioni la scarsa qualità degli apparati di trasduzione e dei sistemi di controllo e amplificazione del segnale aveva ristretto la frequenza utilizzata a valori inferiori ai 10 kHz. Questa banda veniva definita “banda base”; con il miglioramento dell’elettronica si iniziò a utilizzare frequenze più elevate, “fuori banda”, per trasmettere altre informazioni che non venivano intercettate dall’altoparlante del telefono, ad esempio la filodiffusione.

A metà anni 90 i ricercatori, grazie al miglioramento dell’elettronica, riuscirono a trasmettere frequenze più elevate sul doppino e questo consentì il trasporto di un maggior numero di informazioni. Le informazioni anziché essere semplicemente modulate su una certa frequenza vengono codificate in 0 e 1 e le sequenze di questi due valori sono modulate e trasmesse. Il vantaggio di una trasmissione di segnali discreti (0 e 1 per l’appunto) offre il vantaggio di poter introdurre sistemi di controllo di correttezza. Ad esempio si potrebbero inviare una stringa di 100 “bit” e inserire al cento-unesimo un valore 1 se la somma dei precedenti 100 bit è dispari, un valore 0 se la somma è pari. Il ricevente controlla la somma e in caso di discrepanza richiede

la ritrasmissione. Non solo. Ricevente e trasmittente verificando la percentuale di errori possono accordarsi per diminuire la velocità di trasmissione in modo da assegnare ad ogni bit un tempo maggiore diminuendo quindi la probabilità di errore.

La comunicazione avviene in entrambi i versi utilizzando lo stesso doppiino, ma adottando frequenze diverse in ciascun verso. Considerando che il traffico dati, perlomeno fino ad oggi, è preponderante nella direzione dalla rete alla casa del “navigatore” (con un click si richiedono le informazioni, usando quindi pochi byte, e queste in genere sono codificate utilizzando molti byte, si pensi ad una richiesta di un filmato YouTube) sono utilizzate un maggior numero di frequenze in quella direzione consentendo quindi il trasferimento di un maggior numero di informazioni dalla rete alla casa che non in senso inverso. La comunicazione è quindi “asimmetrica” e da qui il nome ormai familiare di ADSL, Asymmetrical Digital Subscriber Line (linea digitale di utente asimmetrica). Miglioramenti dell’elettronica e quindi della sensibilità dei ricevitori permettono di aumentare il numero di frequenze utilizzabili, il numero di informazioni modulabili sulla singola frequenza e quindi il numero di informazioni inviabili nell’unità di tempo, quello che viene indicato come “**banda**”. Quanto maggiore la quantità di informazioni nell’unità di tempo tanto più abbiamo **banda larga**. La tecnologia, per quanto sofisticata, deve comunque fare i conti con interferenza ed attenuazione, due parametri che dipendono anche dalla lunghezza del doppiino utilizzato.

Come abbiamo visto i sistemi trasmissivi sono in grado di adeguare la velocità di trasferimento delle informazioni alla qualità del mezzo trasmissivo, a volte addirittura istante per istante, molto più spesso per sessione di comunicazione. Quindi la velocità, la banda effettiva supportabile, viene definita in modo dinamico. A grandi linee, però, possiamo dire che nella trasmissione su rame relativamente ad un doppiino a distanze superiori a 3,5 km corrispondono bande inferiori a 2 milioni di bit al secondo (Mbps), a due km si può arrivare a una banda



Figura 18 - La larga Banda

fino a 12 Mbps, sotto gli 800 metri si arriva a bande fino a 20 Mbps e se la distanza è inferiore a 200 metri

possiamo addirittura arrivare a 100 Mbps. In questo caso si utilizza uno spettro di frequenze di 17 MHz, altro che i 10 kHz dei primi tempi della telefonia! In Italia la lunghezza media del doppino è intorno a 1,5km e quindi, mediamente, sarebbero possibili bande intorno ai 12 Mbps. Le velocità reali, però, possono essere significativamente ridotte in dipendenza dai livelli di interferenza che crescono al crescere del numero di persone che effettuano comunicazioni dati in una certa area (i vari doppini, infatti, condividono lo stesso cavo e si disturbano l'un l'altro).

Per avere bande significativamente maggiori, su lunghe distanze, occorre usare la fibra ottica. Diamo allora un'occhiata a questo, relativamente parlando, nuovo mezzo trasmissivo.

● La fibra ottica

L'idea che si possa far percorrere ad un raggio di luce un percorso predeterminato risale al 1842, anno in cui Daniel Colladon osservò in un suo articolo, *On the reflection of a ray of light inside a parabolic liquid stream*, come un raggio di luce indirizzato all'interno di un getto d'acqua fosse da questo convogliato lungo un percorso curvo, quando l'esperienza di ogni giorno ci dice che la luce procede in linea retta.

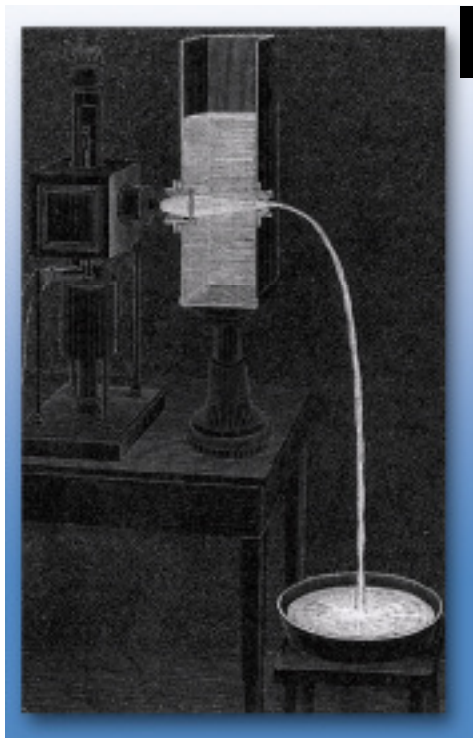


Figura 19 - La fontana di luce di Daniel Colladon

Se facciamo passare un raggio di luce dall'aria all'acqua questo si "piega" verso la perpendicolare, mentre se lo facciamo passare dall'acqua all'aria questo si "allontana" dalla perpendicolare. Se la direzione di incidenza del raggio all'interno dell'acqua è superiore a 48° il raggio non uscirà dall'acqua e resterà imbrigliato al suo interno: in

questo caso si dice che viene totalmente riflesso dalla superficie acqua-aria. L'angolo in cui si verifica questa situazione di totale riflessione è detto "angolo limite del mezzo" ed è in effetti una proprietà ottica specifica di ogni mezzo. Per l'acqua questo vale $48^\circ 27'$, per il diamante è $23^\circ 42'$. Ecco spiegata l'estrema luminosità del diamante a cui l'artigiano ha creato sfaccettature che imbrigliano la luce facendola uscire solo dalla faccia superiore che osserviamo. È come se tutta la luce dell'ambiente che colpisce da tutti i lati il diamante venisse canalizzata e fatta uscire solo dalla faccia superiore che il nostro occhio osserva. Ecco perchè i diamanti, i solitari, vengono incastonati in modo da lasciar quanto più libere le facce laterali in modo da "raccolgere" la luce.

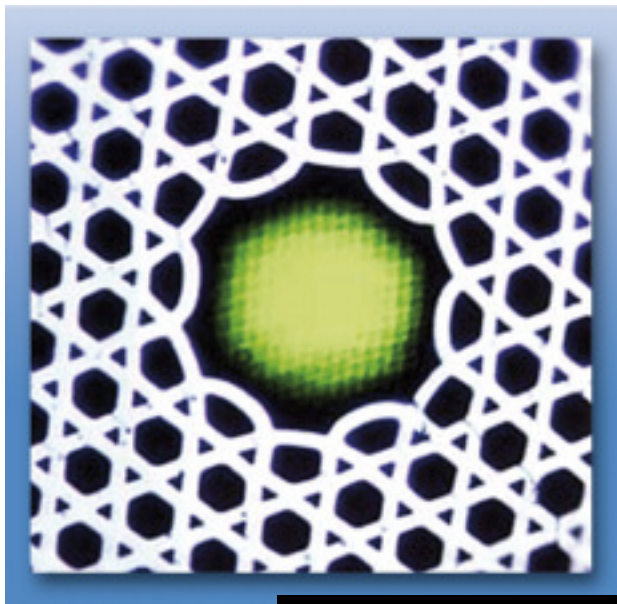


Figura 20 - Esempio di guida d'onda: il diamante

La proprietà di vari materiali di riuscire a guidare al loro interno un fascio luminoso (questi materiali devono essere trasparenti alla luce e avere una superficie con un basso angolo limite) iniziò ad essere sfruttata per osservare all'interno dello stomaco o dell'intestino dai medici nel XX secolo a seguito dell'invenzione di Kapany, un fisico, della fibra ottica nel 1952. Il brevetto del gastroscopio risale al 1956.

Un utilizzo della fibra ottica nelle telecomunicazioni risultava però impossibile per l'attenuazione del raggio luminoso dopo pochi metri di percorso nella fibra. Basta osservare un vetro bello trasparente e notare come una serie di questi vetri, quali si possono vedere da un vetraio, appoggiati l'uno sull'altro, diventi ben presto di colore scuro e poi nero al crescere dello spessore. Colore nero significa assorbimento totale della luce!

Nel 1964 Kao, un ricercatore dei Bell Labs che ha ricevuto proprio nel 2009 il premio Nobel per la sua scoperta, fece notare come l'assorbimento della luce non fosse una proprietà intrinseca del vetro, dovuta a fenomeni di scattering (sparpagliamento dei fotoni) ma fosse invece dovuta ad impurità presenti nel vetro, nel silicio. Creando del vetro, e una fibra con del silicio privo di impurità si poteva trasmettere un raggio di luce per un km con una perdita contenuta. Questa osservazione diede l'avvio alla ricerca di applicazioni della fibra ottica in telecomunicazioni. Si scoprì, nel giro di qualche anno che un opportuno inserimento di certi atomi nel silicio invece di portare ad un assorbimento del raggio luminoso ne preservava l'integrità e che certi tipi di luce, certe lunghezze d'onda, erano meno soggette a fenomeni di assorbimento. Queste lunghezze d'onda, nelle fibre usate in telecomunicazione oggi, sono intorno ai 1500nm. Una cosa che non tutti sanno è che la velocità della luce dipende dal mezzo che questa attraversa. Nel vuoto la sua velocità è di (circa) 300.000 km al secondo. In una fibra, invece, questa velocità scende a "soli" 200.000 km al secondo per cui in una telefonata tra Venezia e Sydney la nostra voce, portata dalla luce, impiega circa 1/10 di secondo.

Le fibre ottiche sembrano dei sottilissimi fili di vetro ma sono in realtà delle strutture che contengono una parte centrale, il core,, sottilissima e invisibile ad occhio nudo, di circa 8 micron

di diametro (8 millesimi

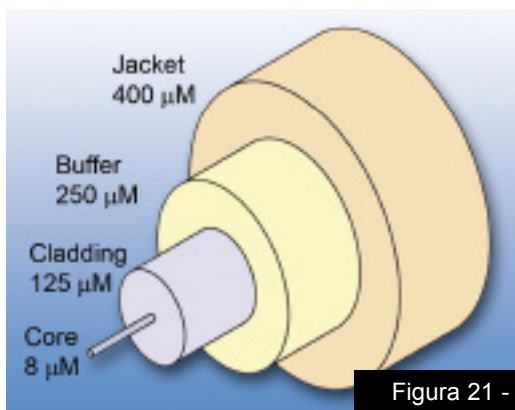


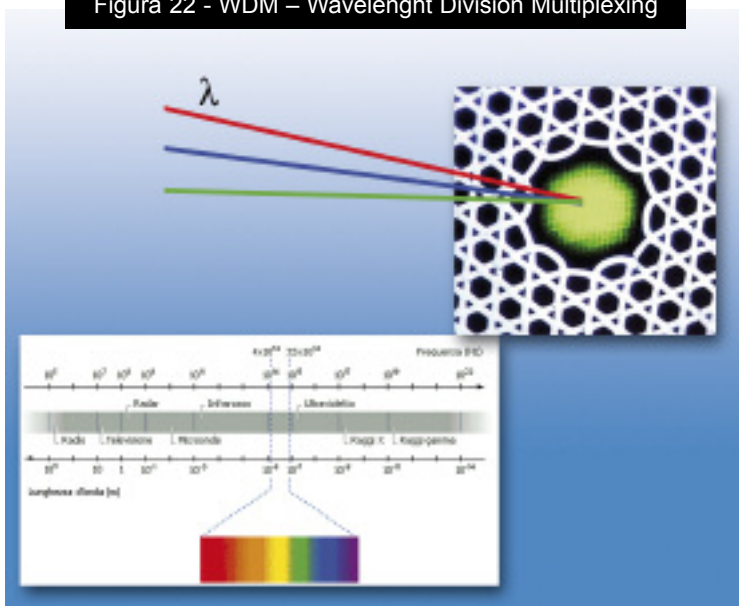
Figura 21 - Struttura di una fibra ottica

di millimetro) attorno a cui si colloca uno strato di 125 micron che fa da struttura riflettente. Sopra questo strato si colloca un riempimento di 250 micron e attorno a questo una copertura che porta l'intera fibra ad una dimensione di 400 micron (quasi mezzo millimetro).

I ricercatori, che non sono mai soddisfatti, stanno cercando il modo di inserire vari core all'interno di una singola fibra in modo da poter moltiplicare le capacità di trasporto.

Inoltre, nel core oggi vengono fatti passare vari flussi luminosi a diverse frequenze (tutte nella finestra di trasparenza della fibra) modulando i segnali su ciascuna e moltiplicando, di fatto, la capacità della fibra. Questa tecnica, chiamata WDM – Wavelength Division Multiplexing, permette oggi di moltiplicare per 40 la capacità di una fibra che su ogni singola lunghezza d'onda trasporta 40 Gbps (miliardi di bit per secondo) arrivando quindi a 1,6 Tbps (migliaia di miliardi di bit al secondo).

Figura 22 - WDM – Wavelength Division Multiplexing



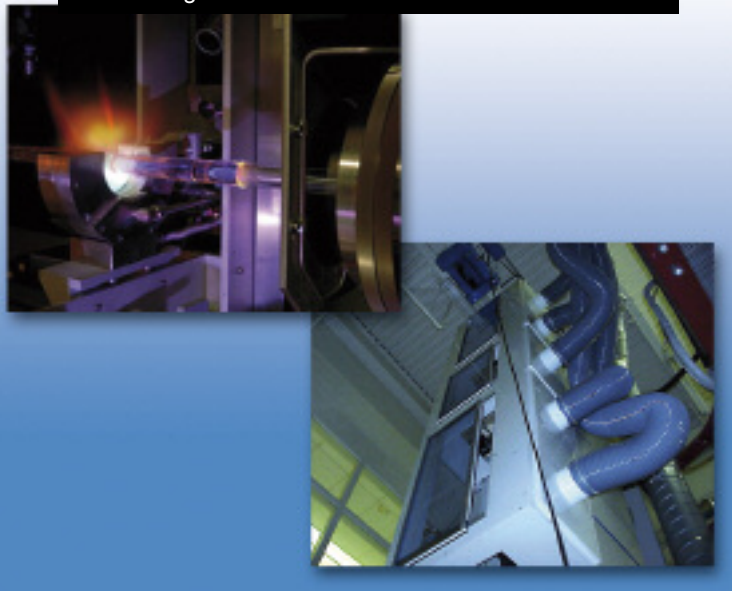
La previsione, aumentando il numero di lunghezze d'onda e la densità di informazioni su ciascuna lunghezza d'onda, è di arrivare nel 2020 a fibre in grado di trasportare 100 Tbps (centomila miliardi di bit al secondo). A queste velocità intervengono altri problemi. L'invio di 1 Tbps comporta iniettare nella fibra un raggio luminoso della potenza di qualche decina di mW. Inviare 100 Tbps richiederebbe quindi alcuni W di potenza ma oltre i 2 W il core della fibra inizia a fondere! Occorrerà quindi lavorare ancora per trovare sistemi a minor consumo energetico.

Notiamo, comunque, che la fibra consuma circa mille volte meno del rame a parità di quantità di informazioni trasportate!

Ma come si fa a realizzare questo sottilissimo filo di vetro?

Il punto di partenza è la sabbia, ovvero il silicio. Questo deve essere purificato rimuovendo tutte le impurità. A questo silicio purissimo viene aggiunto un insieme di molecole che ne alterano l'indice di rifra-

Figura 23 - La realizzazione della fibra



zione, in genere biossido di germanio o ossido di alluminio per aumentarlo o con triossido di boro o fluoruro per abbassarlo. A seconda delle caratteristiche che si vogliono fornire alla fibra si utilizza un certo drogaggio o un altro.

A questo punto si crea una preforma, cioè un cilindro di “vetro” (di quel silicio drogato) lungo circa un metro e con un diametro di una decina di cm che ha al suo interno la parte destinata a diventare il core della fibra e nella parte esterna la parte destinata a diventare la struttura riflettente (cladding). Questo cilindro viene appeso e fatto ruotare all’interno si ugelli che portano la parte terminale della preforma al punto di fusione. La preforma inizia quindi a fondere e per gravità “cola” diventando sempre più sottile. In questo processo, se necessario, si aggiungono ulteriori molecole.

La fibra viene poi protetta da una guaina e più fibre vengono assemblate in un cavo attorno ad un’anima di acciaio che sarà utilizzata per tirare il filo durante la posa.

Il processo di produzione è molto sofisticato (e ben più complesso di quello descritto) e produce da ogni preforma una ventina di km di fibra.

Oggi si iniziano a produrre anche fibre in plastica per un utilizzo domestico. Queste sono meno delicate di quelle in vetro ed hanno caratteristiche di attenuazione che non ne permettono l’uso su lunghe distanze ma che per un ambiente domestico vanno benissimo.

Abbiamo parlato di larga banda e fatto dei numeri del tipo Mbps, Gbps e Tbps. Il fatto è che è molto difficile avere un’idea di cosa significhino questi numeri.

Può essere quindi opportuno provare a fare dei paragoni per cercare di capire meglio cosa significhi veramente la “larga banda”.

Immaginiamo di non utilizzare come misura della banda il numero di bit ma di utilizzare il normale metro. Con questo, infatti, possiamo avere una migliore idea di cosa significhi l’aggettivo “larga”.

Facciamo allora corrispondere una quantità di 1 Mbps ad un metro.

Ebbene, le prime linee di trasmissione su rame che qualcuno certamente si ricorderà basate sul modem fornivano dei sentierini di 5 cm di larghezza, tanto piccoli che è persino difficile definirli sentieri. Oggi con l'ADSL arriva nelle nostre case una strada che va da 2 a 20 metri di larghezza. Venti metri corrispondono ad una strada a quattro corsie, compreso lo spartitraffico.

Utilizzando il VDSL, cosa che possiamo fare se la fibra si avvicina a meno di 200 metri da casa nostra, o magari arriva nella cantina del palazzo, la strada disponibile è larga fino a 100 m. A questo punto diventa difficile chiamarla strada. È decisamente una autostrada di quelle che si vedono nei film americani con 10 corsie per ogni senso di marcia.

La fibra che viene utilizzata nel portare le informazioni dalla rete verso le nostre case corrisponde ad una autostrada (ma ha ancora senso chiamarla così?) larga 2,5 km e prossimamente 10 km. È diven-



Figura 24 - La larga banda

tata una autostrada fluviale come il rio delle Amazzoni. Il paragone è in effetti quello tra le dimensioni del flusso di acqua che esce dal rubinetto della cucina e quella del rio delle Amazzoni.

Se poi pensiamo alle fibre, già in uso, per trasportare informazioni da una parte all'altra dell'Italia dobbiamo parlare di larghezze dell'ordine di 1000 km che in prospettiva, nel 2020, arriveranno a 100.000 km. Dobbiamo cambiare la scala per riuscire ad immaginare cosa significa. È un pò come dire che siamo partiti negli anni 90 con una capacità di trasmissione equivalente a quello che contiene una pipetta e siamo arrivati al rio delle Amazzoni!

Davvero la banda è "larga"!

● *La radio*

Per concludere, diamo un rapido sguardo alla radio, un mezzo trasmissivo in cui siamo stati pionieri nella scoperta, con Guglielmo Marconi, e oggi tra i più avanzati a livello mondiale nell'utilizzo avendo un cellulare in ogni mano.

Il campo elettromagnetico si propaga nello spazio, nell'aria come nel vuoto. L'esempio più evidente è la luce! Anche frequenze diverse, non percepibili dai nostri occhi, si propagano altrettanto bene, e sempre alla stessa velocità. Quello che cambia, al variare della frequenza, è la lunghezza d'onda.

Questi due parametri sono infatti due facce della stessa medaglia che Einstein identificò nella costanza della velocità della luce. In particolare se si moltiplica la frequenza di un campo elettromagnetico per la sua lunghezza d'onda si ottiene appunto la velocità della luce (nel vuoto, cioè circa 300.000 km al secondo). Il campo elettromagnetico utilizzato dai telefonini GSM in Italia ha una frequenza di 900 MHz, quindi la sua lunghezza d'onda è di 33 cm. Nel 3G si utilizza una frequenza di circa 2 GHz, quindi la lunghezza d'onda è di 15 cm. Per con-

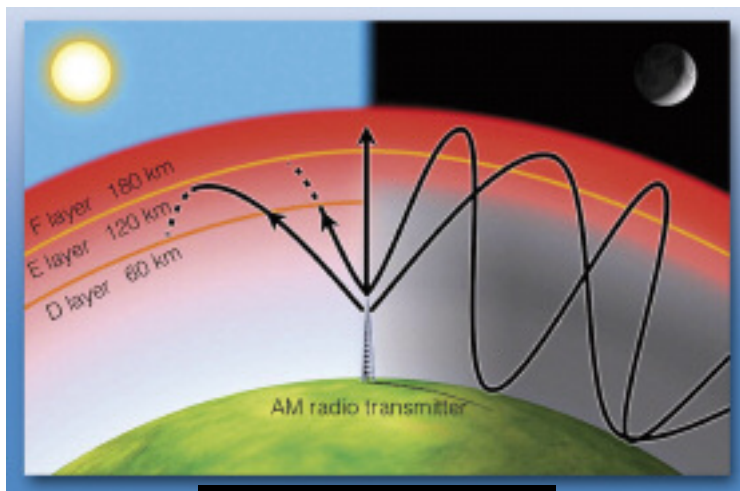


Figura 25 - Le onde radio

fronto la lunghezza d'onda della luce visibile al nostro occhio è tra i 380 e i 750 nm il che significa frequenze tra i 790 e 400 THz.

La lunghezza d'onda è importante in quanto le dimensioni dell'antenna devono essere adattate alla lunghezza d'onda che vogliamo catturare.

Marconi, studente all'università di Bologna, venne a conoscenza degli esperimenti che Hertz compì nel 1885 che dimostravano in laboratorio come si potesse generare e rilevare un campo magnetico. Iniziò anche lui a sperimentare con in mente ben chiara l'idea che si potesse utilizzare il campo elettromagnetico, che in questo caso venne chiamato radioelettrico. Il problema era costituito proprio dall'antenna. Guglielmo scoprì che mettendola a terra si aumentava notevolmente la sua capacità di ricezione. I primi esperimenti all'aperto risalgono al 1895 e in breve tempo riuscì a trasmettere un segnale oltre la collina, a una distanza di circa 1,5 km.

Purtroppo i suoi risultati non vennero considerati interessanti in Italia e si spostò nel 1896 a Londra all'età di 21 anni e già nell'anno succes-



Figura 26 - La prima comunicazione transatlantica

sivo dimostrò una trasmissione sull'acqua coprendo una distanza di 6 km unendo le sponde del Bristol Channel con il messaggio: Are you ready? (Sei pronto?). Il 12 dicembre 1901 avvenne la prima trasmissione transatlantica tra la Cornovaglia e St. John nel Newfoundland, oggi parte del Canada, coprendo una distanza di 3500 km.

La notorietà del telegrafo senza fili arrivò il 15 aprile 1912 quando il Titanic, l'inaffondabile, affondò non prima però di aver lanciato l'SOS tramite due operatori della Marconi International Marine Communication Company che Marconi aveva piazzato a bordo.

La creazione del campo elettromagnetico, della radiofrequenza, inizialmente era effettuata con un sistema a scintilla. Questo andava bene per mandare messaggi con il sistema Morse ma non andava affatto bene per modulare segnali sulla radiofrequenza. Per questo occorreva una fonte di campo elettromagnetico oscillante continua, la quale fu trovata nella valvola termoionica.

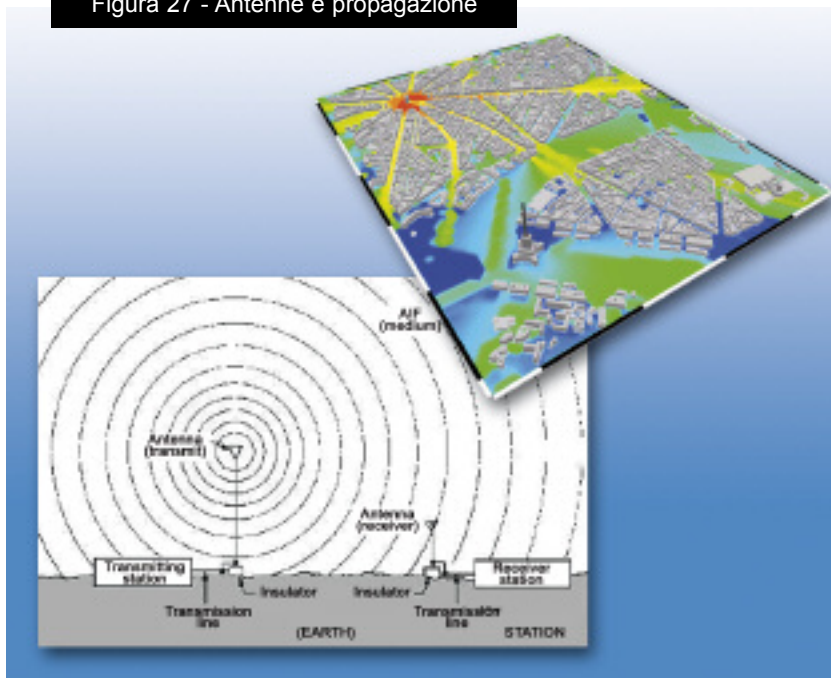
Oggi si utilizzano i transistor e con il progresso è migliorata sia la capacità di controllo delle frequenze sia quella della modulazione del segnale.

A seconda del settore di applicazione si utilizzano frequenze specifiche e adeguati sistemi di modulazione.

Lo spettro radio disponibile è limitato da due fattori. Quanto più è bassa la frequenza utilizzata tanto minori saranno le informazioni che possiamo associare e tanto maggiore la dimensione necessaria per l'antenna. In cambio, però, avremo un segnale che si propaga molto bene e viene assorbito poco dall'ambiente. Al contrario, aumentando la frequenza diminuiamo le dimensioni dell'antenna, aumentiamo il numero di informazioni che riusciamo a modulare ma perdiamo in propagazione.

Ecco spiegato come mai le antenne per la ricezione del segnale televisivo sono grandi rispetto a quelle usate da un telefonino. Per con-

Figura 27 - Antenne e propagazione

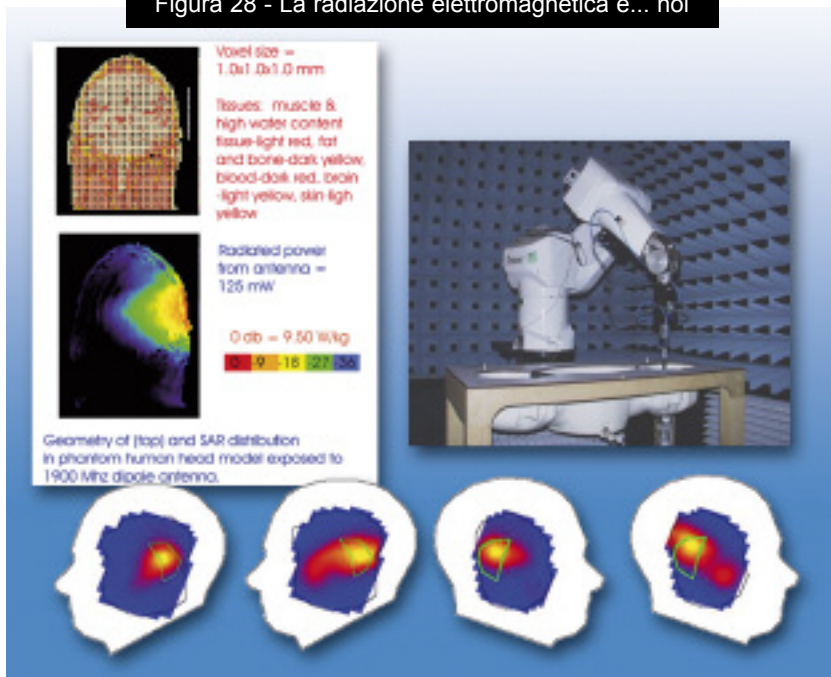


tro spesso abbiamo problemi di ricezione con il telefonino, che diventano maggiori nel caso del 3G rispetto al GSM (questo opera ad una frequenza inferiore e quindi il campo elettromagnetico viene assorbito meno dagli ostacoli, come i muri delle case o le foglie degli alberi).

Il campo elettrico può essere anche pensato come un campo di energia che si espande. L'antenna cattura parte di quell'energia (così come fanno i muri) e al suo interno decodifica il segnale associato. La domanda che molti si fanno, e per primi scienziati e medici è se questo trasferimento di energia, quando avviene tra il campo elettromagnetico e... noi possa essere dannoso.

Sappiamo, dalla seconda legge della termodinamica, che un qualunque trasferimento/trasformazione di energia provoca calore.

Figura 28 - La radiazione elettromagnetica e... noi



Questo è quanto accade, ad esempio, nel forno a microonde e ce ne accorgiamo in quanto il pollo si scalda.

Non è che si corra il rischio di essere i polli della situazione in un immenso forno a micro-onde che ormai è diventato il mondo?

Ebbene, occorre certamente studiare questi aspetti ma occorre anche capirli e metterli nella giusta prospettiva. Tutta la Terra, da quando si è formata 4,5 miliardi di anni fa, è sottoposta a campi elettromagnetici sia generati dal suo nucleo (ecco come mai funziona la bussola!) sia in arrivo dal sole (in gran parte schermati dall'ozono, che quindi è bene conservare). Con la tecnologia umana il livello di campi elettromagnetici è aumentato. Se oggi misurassimo con uno strumento il valore del campo magnetico vedremmo che questo è maggiore di quello che guidava la bussola di Flavio Gioia. Lo strumento è anche in grado di dirci quali sono i componenti di questo campo magnetico e vediamo allora che in una qualunque città la componente di campo dovuta alla televisione è molto maggiore (100 volte tanto) di quella dovuta alle antenne che consentono la comunicazione ai cellulari.

Nei laboratori si studiano questi trasferimenti di energia tra il campo elettromagnetico generato dai cellulari e i sistemi biologici, cioè noi andando proprio a misurare l'aumento di temperatura indotto dalla radiazione elettromagnetica.

Ad oggi, in tutti gli studi fatti non è stata rilevata alcuna indicazione che il campo elettromagnetico generato dai telefonini e dal suo uso, anche intenso, provochi danni. Questo, ovviamente, non esime dal continuare a monitorare eventuali effetti e ad operare per diminuire ulteriormente il campo generato dal telefonino. Questo, infatti, è l'unico di cui occorra ragionevolmente tener conto. Quello generato dalle antenne, infatti, quando arriva a noi è talmente debole rispetto a quello generato dal telefonino da poter essere tranquillamente trascurato.

Riprenderemo, comunque, questo tema parlando della comunicazione del futuro.