

WIRELINE AND WIRELESS NETWORKS

1. INFO PRELIMINARI

1.1. Commutazione di circuito

. Per garantire elevata qualità del servizio (es. sistema telefonico), si può instaurare una connessione, riservare banda, spazio e tempo di CPU, ed ogni pacchetto viene instradato seguendo lo stesso percorso.

1.2. Commutazione di pacchetto

. Ogni pacchetto viene instradato indipendentemente da gli altri. Un esempio di protocollo che usa commutazione di pacchetto è IP.

1.3. Tecniche di accesso al mezzo da parte di utenti

. Un canale di trasmissione può essere rappresentato nei domini tempo/frequenza.

1.3.1. TDMA

. TDMA (accesso multiplo a divisione di tempo), suddivide l'accesso al canale in intervalli temporali che rappresentano le varie opportunità trasmissive.

Viene assegnato un time slot a ciascun utente, per tutta la banda a disposizione.

Svantaggio: il numero di utenti è limitato al numero di time slots.

Non tutto il time slot è a disposizione dell'utente, vengono mantenuti piccoli intervalli vuoti (tempi di guardia), per evitare interferenza e garantire il sincronismo. (Sincronismo serve all'utente per capire quale sia il suo time slot).

1.3.2. FDMA

. **Viene assegnata una porzione di banda a ciascun utente per tutta la durata temporale.**

Con FDMA (accesso multiplo a divisione di frequenza) solo un utente può trasmettere alla **stessa frequenza** alla volta.

Vantaggio: è possibile riservare la comunicazione del canale per tutto il tempo a tutti gli utenti (il numero di utenti non è più limitato dai time slots).

Svantaggio: la comunicazione avviene a banda stretta (basso bit rate).

Gli utenti si devono accordare su N frequenze, si rendono necessari N ricevitori.

1.3.3. GSM

. Tecnica di accesso misto FDMA, TDMA.

Viene assegnata una sottobanda ed un time slot a ciascun utente.

In questo modo il numero di utenti che possono avviare una comunicazione è maggiore. Tuttavia il bit rate è ancora basso.

Caratteristiche di FDMA-TDMA nel 2G:

- La banda viene divisa in 124 portanti (canali di banda 200 KHz).
- 8 slot di tempo su ogni portante.

1.3.4. Da GSM a GPRS

. Si riservano 8 connessioni per un utente.

1.3.5. Da GPRS a UMTS

.

1.3.6. CDMA

. **Viene assegnata tutta la banda per tutta la durata temporale a ciascun utente. Gli utenti si distinguono in base a delle chiavi.**

La chiave si costruisce a partire da un codice, una sequenza di ± 1 nota alla rete e assegnata ad ogni utente, si tratta di codici ortogonali tra loro (prodotto scalare = 0).

WCDMA accesso multiplo a divisione di codice.

GENERAZIONE	TECNICA DI ACCESSO AL MEZZO	STANDARD
1G	FDMA analogico	AMPS (non è uno standard mondiale)
2G	accesso misto FDMA, TDMA digitale	GSM (sistema globale per comunicazioni mobili)
2.5G	oltre voce anche dati	GPRS, EDGE
3G	CDMA, SCDMA, WCDMA	UMTS
3.5G		
3.9G	OFDMA	
4G	OFDMA	LTE, IP based
5G		

TABLE 1. sum up

1.4. Modulazione

. Il segnale che contiene l'informazione da trasmettere viene modulato, ovvero modificato, in modo da adattarlo alle caratteristiche del canale di comunicazione e renderlo idoneo per il trasporto attraverso il canale stesso. La modulazione serve a: aumentare la distanza di trasmissione, ottimizzare l'uso della banda di frequenza, migliorare la qualità di trasmissione

1.4.1. *FSK. Nella modulazione FSK, i dati da trasmettere sono rappresentati da diversi valori di frequenza, dove ogni frequenza corrisponde a un diverso simbolo binario (cioè 0 o 1).* Per trasmettere i dati digitali, un modulatore FSK cambia la frequenza di un segnale portante tra le frequenze f_1 e f_2 (che corrispondono ai due simboli binari 0 e 1).

Ad esempio, se i dati binari sono "10101100", il modulatore emette una sequenza di frequenze che corrisponde alle frequenze f_1 e f_2 per ogni bit della sequenza. Al ricevitore, un demodulatore FSK rileva le variazioni di frequenza del segnale portante e le ritraduce in dati binari.

L'FSK è relativamente immune al rumore e alle interferenze, ha un'ampiezza di banda ridotta rispetto ad altre tecniche di modulazione, il che consente un uso più efficiente dello spettro disponibile.

1.5. ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

. L'ADSL è una tecnologia di connessione a banda larga utilizzata per trasmettere dati digitali attraverso le linee telefoniche tradizionali in rame. L'ADSL consente di trasmettere dati digitali ad alta velocità sulla stessa linea telefonica senza interferire con le chiamate telefoniche. L'ADSL supporta una velocità di download più elevata rispetto alla velocità di upload, la maggior parte degli utenti richiede maggiori velocità di download per accedere a contenuti multimediali. La tecnologia ADSL è stata superata dalla fibra ottica, ma rimane comunque molto diffusa.

Part 1. From 1G to 5G: le diverse generazioni di tecnologie di telecomunicazione mobile

2. 1G

Con 1G si intendono i primi standard di trasmissione dati attraverso la rete di telefonia mobile. Le reti 1G trasmettevano i dati secondo uno standard **analogico**.

- (1) La **Mobile Station** è il dispositivo mobile che consente agli utenti di comunicare con la rete PSTN.
- (2) La **PSTN** (Public Switched Telephone Network) è una rete a commutazione di circuito che consente di connettere telefoni fissi in tutto il mondo.

La rete PSTN è composta da una serie di commutatori telefonici (switch) interconnessi che consentono alle chiamate di essere instradate tra i telefoni collegati alla rete.

Questi switch sono in grado di instradare le chiamate a destinazioni diverse, sia all'interno della rete PSTN che in altre reti di telecomunicazioni, come la rete cellulare o Internet.

La PSTN sta gradualmente diventando obsoleta e sta venendo sostituita da sistemi di telecomunicazioni più avanzati come la Voice over IP (VoIP).

- (3) La **Base Station** è l'infrastruttura che consente ai vari MS di comunicare tra loro e con la rete PSTN. La Base Station è costituita da una serie di antenne e di apparati di trasmissione e ricezione, ed è situata in posizioni strategiche per garantire una copertura adeguata dell'area geografica in cui si trova. Quando un telefono cellulare si connette alla rete, viene identificato dalla Base Station più vicina, che funge da "porta d'ingresso" alla rete PSTN.
- (4) Una **cella** è un'area geografica definita all'interno della quale gli MS possono comunicare con una BS, che a sua volta trasmette i segnali alla rete PSTN.

Riassumendo: Una Base Station (BS) fa da intermediario, tramite una serie di apparati di controllo, tra l'utente mobile (MS) e la rete telefonica pubblica (PSTN).

Altri concetti interessanti:

- **Traffico di segnalazione indipendente dall'informazione:** le informazioni di controllo (segnalazione) e quelle di contenuto (informazione utente) venivano trasmesse separatamente sulla PSTN.
- **Indipendenza dalla posizione dell'utente:** si consente ai telefoni cellulari di comunicare ovunque senza essere limitati dalla posizione dell'utente. Questo anche grazie alla comunicazione tra database che contengono informazioni sugli abbonati (info sulle configurazioni, sullo stato della rete).

2.1. Standard AMPS

. AMPS (Advanced Mobile Phone Systems) è uno standard di comunicazione wireless utilizzati per fornire servizi di telefonia mobile.

AMPS utilizzava una combinazione di tecnologie FDMA e FDD.

- **FDMA (Frequency Division Multiple Access)** è una tecnologia di accesso multiplo al canale a divisione di frequenza. **Viene assegnata una porzione di banda a ciascun utente per tutta la durata temporale.** Con FDMA solo un utente può trasmettere alla stessa frequenza alla volta.
Vantaggio: è possibile riservare la comunicazione del canale per tutto il tempo a tutti gli utenti (il numero di utenti non è più limitato dai time slots).
Svantaggio: la comunicazione avviene a banda stretta (basso bit rate). Inoltre gli utenti si devono accordare su N frequenze, si rendono necessari N ricevitori.
- **FDD (Frequency Division Duplex)** è una tecnologia che consente la trasmissione simultanea di dati in entrambe le direzioni (doppio flusso) su un canale radio. Questa tecnologia divide la banda disponibile in due bande separate: una per la trasmissione e una per la ricezione.

2.2. Funzionamento di un sistema AMPS

. Il sistema AMPS assegna in maniera flessibile:

- Un canale dei 416 canali disponibili ad una MS per le trasmissioni da MS a BS (uplink). Il canale è nella banda 824-849 MHz.
- Un canale per le trasmissioni dalle BS alle MS (downlink) nella banda 869-894 MHz
- Ogni canale ha una larghezza di banda di 30 KHz, la larghezza di banda rappresenta la quantità di spazio nella banda utilizzata per trasmettere un segnale specifico. Questa larghezza di banda è sufficiente per trasmettere la voce umana con una buona qualità di trasmissione, ma è relativamente limitata rispetto ai sistemi di telecomunicazioni mobili di generazioni successive

L'assegnazione dei canali avviene in funzione della potenza del segnale, in modo da garantire una buona qualità di trasmissione.

Inoltre, la stessa banda viene assegnata a diverse celle, ma le celle adiacenti utilizzano sottobande diverse per minimizzare le interferenze. Questo fenomeno si chiama “**riuso delle frequenze**”, e permette di utilizzare in modo più efficiente la banda disponibile e di aumentare la capacità del sistema.

3. 2G

Il 2G è stato un passo in avanti rispetto a 1G, poiché ha introdotto la trasmissione **digitale** del segnale audio, migliorando la qualità delle chiamate e consentendo una maggiore efficienza nella gestione delle risorse di rete.

3.1. Standard GSM

. GSM (Global System for Mobile Communications) è uno standard di comunicazione wireless utilizzato per fornire servizi di telefonia mobile a livello mondiale.

Il sistema GSM utilizza una tecnica di accesso misto **FDMA, TDMA**.

Viene assegnata una sottobanda ed un time slot a ciascun utente.

In questo modo il numero di utenti che possono avviare una comunicazione è maggiore. Tuttavia il bit rate è ancora basso.

- La banda viene divisa in 124 portanti (canali di banda 200 KHz).
- 8 slot di tempo su ogni portante (vuol dire che 8 utenti dividono una sottobanda tra le 124 disponibili).

GSM ha consentito ai telefoni cellulari di diventare dispositivi di comunicazione globali, offrendo servizi di roaming (commutazione automatica fra diverse reti grazie all'interoperabilità). Ha anche reso possibili molti altri servizi, come gli SMS (Short Message Service), l'invio di immagini e la navigazione su Internet.

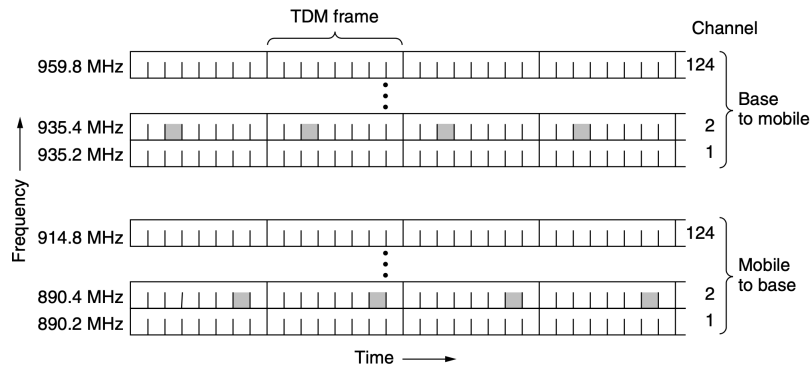


FIGURE 1. GSM usa 124 sottobande (canali), ciascuno usa 8 time slot. L'uplink per GSM-900 è nella banda tra 890-915MHz, mentre il downlink è nella banda tra 935-960 MHz. (Con GSM-1800 le frequenze sono diverse).

3.1.1. FH: Frequency Hopping

. FH è una tecnica utilizzata per migliorare la sicurezza e la resistenza alle interferenze delle comunicazioni. In pratica, il sistema trasmette il segnale su diverse frequenze in rapida successione (in questo caso 217 cambi di frequenza al secondo), FH può ridurre il rumore e migliorare la qualità della trasmissione.

Che calcolo si può fare?

3.1.2. FEC: Forward Error Correction

. FEC è una tecnica utilizzata per correggere gli errori di trasmissione. In pratica, il sistema aggiunge informazioni ridondanti ai dati trasmessi in modo da poter correggere gli eventuali errori che si verificano durante la trasmissione. In questo modo, il destinatario può ricevere i dati in modo corretto anche se alcuni bit sono stati persi o danneggiati durante la trasmissione.

3.1.3. Interleaving

. L'interleaving è una tecnica utilizzata per ridurre gli effetti della perdita di frame. In pratica, il sistema divide i dati in pacchetti più piccoli, che vengono trasmessi in sequenza su canali diversi. In questo modo, se un canale è soggetto a interferenze o perdita di dati, solo una piccola parte dei dati verrà persa, invece di un intero pacchetto. Inoltre, i pacchetti vengono trasmessi in modo non sequenziale, in modo da ridurre la possibilità che si perda un gran numero di bit in rapida successione.

3.1.4. GMSK

. Il 2G utilizza come tecnica di modulazione GMSK. In GMSK la forma d'onda FSK viene fatta passare attraverso un filtro gaussiano prima della trasmissione. Il motivo per cui la forma d'onda FSK viene filtrata attraverso un filtro gaussiano è quello di ridurre l'interferenza intersimbolica (ISI).

3.1.5. Sincronizzazione

. Il sincronismo (di trama) consente di individuare in modo preciso l'istante di inizio del time slot relativo a ciascun canale. Affinché le diverse MS trasmettano correttamente nei propri time slots è necessario che condividano un qualche riferimento temporale. A tale scopo le BS trasmettono un segnale di sincronizzazione periodico, che viene ricevuto dai MS.

BS invia segnale di sincronizzazione → MS lo riceve → MS sa che è il suo turno quindi trasmette il proprio segnale.

Se l'MS trasmettesse il proprio segnale in ritardo (rispetto al segnale di sincronizzazione della BS), la BS riceverebbe un segnale debole o fuori sincronia (peggiorando la qualità della connessione.). Al contrario, se l'MS trasmettesse in anticipo, il segnale potrebbe generare interferenza.

La BS può ordinare a MS di anticipare l'inizio della sua trasmissione in modo da compensare il ritardo di propagazione tra MS e BS.

I canali TDMA consentono una tolleranza di temporizzazione di poco più di 100ms oltre il quale il segnale tra BS e MS non può propagarsi. Poiché le onde elettromagnetiche percorrono un km in circa 3.2 ms, la massima distanza è $\frac{100}{3.2} = \text{circa } 31 \text{ km}$.

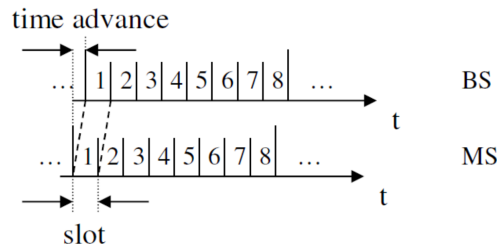


FIGURE 2. MS inizia a trasmettere il segnale in anticipo

3.2. 2G Dataframe

. Ogni TDM (Multiplexing a divisione di tempo, time slot) occupa il canale per $577 \mu s$ (incluso il guardband di $30 \mu s$). Il canale è occupato per la trasmissione di un dataframe di 148 bit.

Il frame:

- Inizia e termina con tre bit 0, per la delineazione (indicano il limite tra una slot e il successivo per aiutare il ricevitore a identificare il punto in cui inizia e finisce ogni slot).
- Contiene due campi di informazioni da 57 bit + un bit di controllo, che specifica se l'informazione trasmessa è voce o dati.
- Contiene un campo Sync (o campo di training) di 26 bit, utilizzato dal ricevitore per sincronizzarsi con il trasmettitore (e per regolare la propria frequenza di campionamento in modo da acquisire i dati in modo corretto).

Il data frame occupa il canale per $577 \mu s$, ma viene inviato ogni 4,615 msec, perché il trasmettitore condivide il canale con altre sette stazioni (8 slot di tempo su ogni portante).

La velocità lorda di ogni canale è di 270 kbps, suddivisa tra otto utenti. Tuttavia, l'overhead consuma un'ampia frazione della larghezza di banda, lasciando in definitiva 24,7 kbps di carico utile per utente prima della correzione degli errori. Dopo la correzione degli errori, rimangono 13 kbps.

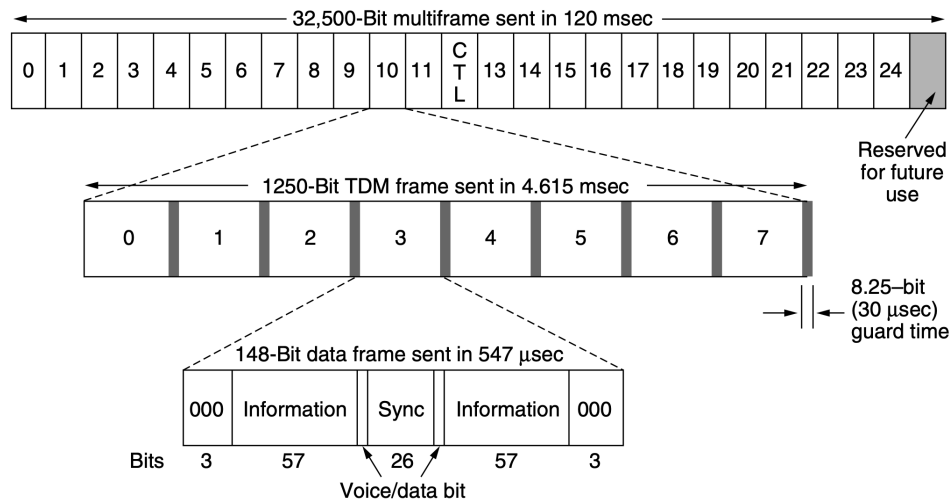


FIGURE 3. **Livello più in basso:** ogni slot TDM permette la trasmissione di 148 bit (un dataframe). **Livello intermedio:** in un canale vengono trasmessi in sequenza 8 dataframe di 8 utenti distinti (8 dataframe compongono un frame TDM). **Livello alto:** 26 frame TDM compongono un multiframe. Esiste anche un canale per i dati di controllo dalla BS verso MS (Broadcast Control Channel).

3.3. Classificazione delle celle

. La classificazione delle celle è un modo per descrivere la dimensione e la portata di una BS in una rete di telecomunicazioni cellulari.

- (1) Le **macrocelle** sono le celle più grandi e hanno una portata che può raggiungere i 31 km. Sono utilizzate in zone con traffico scarso e hanno potenze di trasmissione dell'ordine di 10 W. Le macrocelle possono essere utilizzate anche come copertura overlay, che consiste nell'aggiungere ulteriori BS per migliorare la copertura in aree con scarsa ricezione del segnale.
- (2) Le **microcelle** sono celle più piccole rispetto alle macrocelle e hanno una portata che può arrivare fino a 2 km. Sono utilizzate in aree con traffico elevato, come centri urbani o grandi complessi commerciali. Le microcelle utilizzano potenze di trasmissione inferiori rispetto alle macrocelle, in genere nell'ordine di pochi watt.
- (3) Le **small cells** sono celle che hanno una copertura locale e sono suddivise in picocelle e femtocelle.
 Le **picocelle** sono utilizzate per coprire singoli edifici o aree limitate come un campus universitario o aeroporto (alta densità di utenti). Hanno una portata di poche centinaia di metri.
 Le **femtocelle** sono utilizzate per la copertura indoor di case o piccoli edifici, come uffici o negozi. Hanno una portata ancora più limitata rispetto alle picocelle, ma possono fornire una copertura di segnale più stabile.

La portata diminuisce sempre di più, ma ci sono diversi vantaggi per adottare una rispetto ad un'altra soluzione. Ad esempio le femtocelle che sono adatte in un contesto domestico, riducono il carico sulla rete cellulare esterna (il traffico viene instradato attraverso la femtocella e non attraverso la BS esterna), riducono i costi (le femtocelle sono relativamente economiche da produrre e installare, rispetto alle BS esterne) etc...

3.4. Architettura di una rete 2G

. Appunti presi a lezione:

BS riceve/ trasmette segnale e si collega con il "cervello della rete" MTSO anche chiamato Mobile Switching Center, MTSO gestisce handover (handoff), ossia il fatto che l'utente si sposti da una BS ad un'altra. BS ha un controller che decide quali segnali vanno trasmessi.

Handover nell'1G veniva gestito in modo centralizzato (poco efficiente, può capitare che un canale non venga utilizzato e venga ancora associato ad una MS), questo viene superato con il 2G.

Appunti successivi:

La rete viene divisa in: Mobile Stations, Access Network, Core Network.

- **Access Network:** L'MS parla con la **BTS** usando un collegamento wireless che prende il nome di air interface (interfaccia aerea). Le BTS sono collegate a un **BSC** (base station controller, controllore di BS) che gestisce le risorse radio delle celle e handover dei dispositivi.
- **Core Network:** Il BSC è a sua volta collegato a un **MSC** (anche in AMPS) che instrada le chiamate e si connette alla rete telefonica fissa, PSTN (public switched telephone network). Per essere in grado di instradare le telefonate, l'MSC ha bisogno di sapere dove trovare i dispositivi mobili, per cui mantiene un database dei telefoni associati con le celle che gestisce. Questo database prende il nome di **VLR** (visitor location register). Esiste inoltre un database nella rete che fornisce l'ultima posizione nota di ogni terminale ed è chiamato **HLR** (home location register); tale database viene usato per instradare le chiamate in arrivo verso le giuste posizioni. Entrambi i database devono essere tenuti aggiornati mano a mano che i terminali mobili si spostano da una cella all'altra.

Chiarimenti: fino ad ora si è parlato genericamente di BS, tuttavia bisogna fare una distinzione tra:

La **BTS** (Base Transceiver Station) è una stazione che trasmette e riceve segnali radio da e verso gli MS. La BTS fornisce la copertura radio all'interno di una particolare area geografica, chiamata cella. La BTS trasmette le informazioni di controllo e le informazioni vocali o dati tra MS e il resto della rete.

Il **BSC** (Base Station Controller) gestisce le attività delle BTS. Il BSC gestisce l'accesso al sistema, (l'autenticazione degli utenti e l'autorizzazione all'accesso alla rete mobile), gestisce l'allocazione delle risorse radio alle MS e dell'handover dei dispositivi.

Altri chiarimenti:

L'MS è ora diviso in un dispositivo e un chip rimovibile chiamato SIM (modulo di identificazione dell'abbonato). È la SIM che permette al telefono di funzionare e contiene dati segreti che consentono all'apparecchio e alla rete di

identificarsi vicendevolmente e di cifrare le telefonate.

L'**MSC** si occupa della commutazione di circuito. Quando un utente effettua una chiamata o invia un messaggio di testo, l'MSC instrada la chiamata o il messaggio attraverso i nodi della rete. L'MSC si occupa dell'autenticazione degli abbonati, mantenimento di una posizione aggiornata per ciascun abbonato e avvio delle procedure di handover. (Durante l'handover, il BSC e il MSC lavorano insieme per garantire che la connessione del telefono cellulare non venga interrotta)

L'**SGSN**, gestisce la commutazione di pacchetto.

VLR (Visitor Location Register) memorizza stato e locazione dell'utente. È un database temporaneo che memorizza le informazioni relative all'utente che si trova in una cella della rete mobile. In pratica, ogni volta che un utente entra in un'area di copertura di una nuova cella della rete, il VLR registra temporaneamente le informazioni dell'utente, come ad esempio il numero di telefono dell'utente e la sua posizione geografica. In questo modo, l'utente è raggiungibile per dagli altri utenti della rete.

HLR (Home Location Register) memorizza il numero di telefono dell'utente, la posizione geografica dell'utente, il tipo di servizio a cui l'utente è abbonato e altre informazioni relative all'account dell'utente. L'HLR è un database permanente che conserva i dati dell'utente per tutta la durata dell'abbonamento.

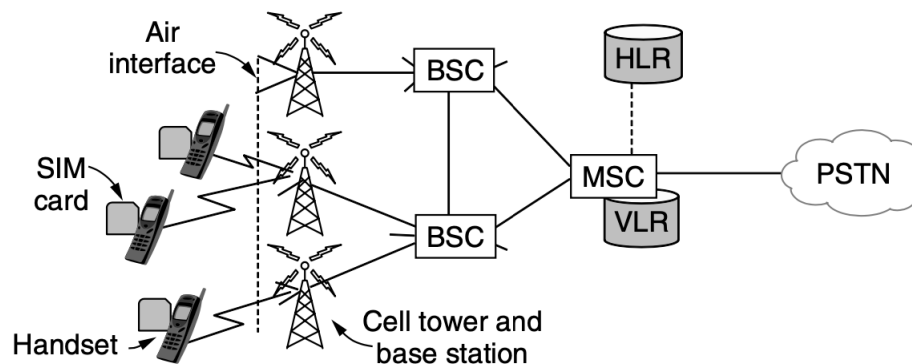


FIGURE 4. Quando una chiamata viene effettuata dall'MS il segnale radio viene ricevuto dalla BTS, la BTS instrada la chiamata al BSC. Il BSC invia la chiamata all'MSC, che consulta HLR e VLR e instrada la chiamata.

3.5. Registrazione all'interno di una rete mobile

. Appunti presi a lezione

Utente accende il cellulare e si aggancia ad una cella. La MS ascolta un segnale broadcast che si chiama **Broadcast Control Channel**. Sceglie quale cella in base alla potenza del segnale maggiore. Dopo aver scelto la BS, la MS invia segnale di richiesta di accesso (**Random Access Channel**) MS trasmette informazioni sulla sua identità. **Visitor Location Register** e **Home Location Register** acquisiscono informazioni sul fatto che MS voglia registrarsi. Una collisione si verifica se due MS usano lo stesso Random Access Channel. La BS manda le informazioni a MSTO, ora la MS è identificata. Un segnale dedicato dentro **Access Grant Channel** viene mandato a MS per garantire che la registrazione è avvenuta.

Chiamata MS → BS

MS manda segnale a Random Access Channel contenente ID del destinatario dei dati. BS riceve segnale e chiama MSTO. MSTO sceglie canale Idle (canale dati che non sta lavorando) BS lo comunica a MS che avvia la comunicazione.

Structure of a GSM network

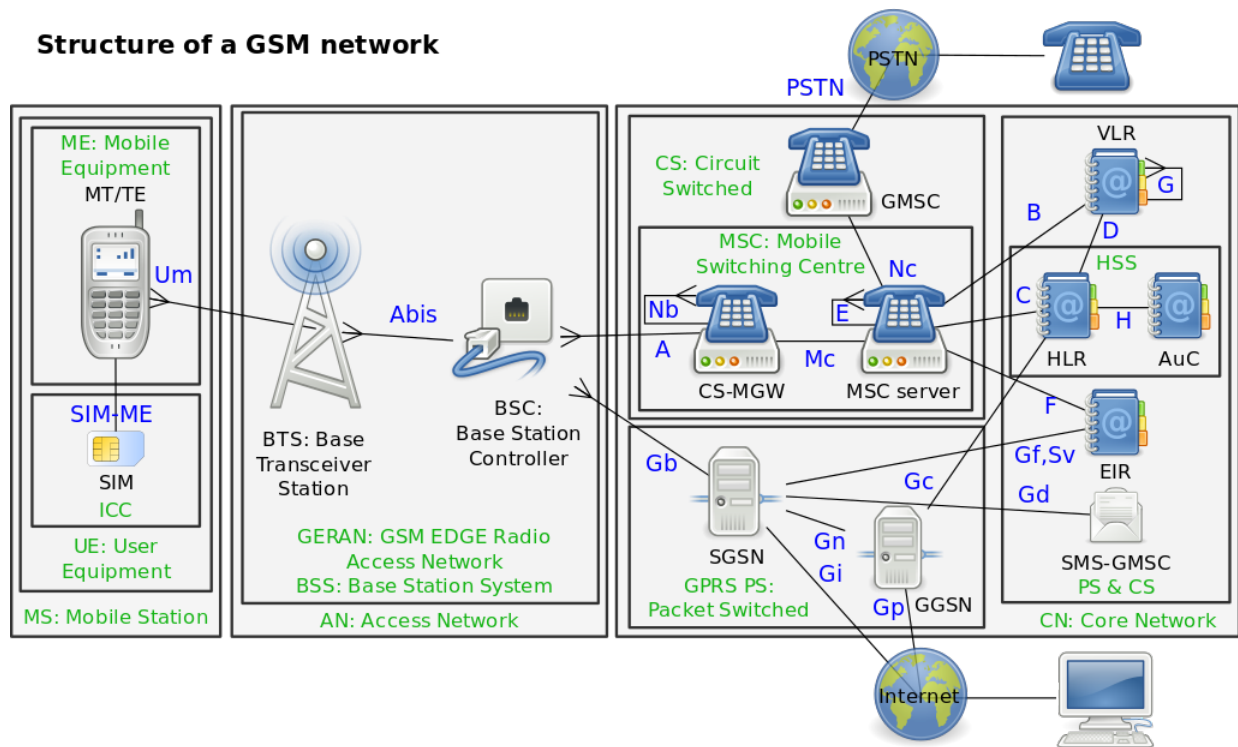


FIGURE 5. Architettura GSM da 2.5G

Chiamata BS → MS

Esiste canale Paging Channel (cerca-persone) tutti gli MS ascoltano sul quel canale. Quando viene richiesta la connessione di un MS (MS se ne accorge grazie a Paging Channel), MS richiede Random Access Channel.

Appunti successivi:

- Ogni telefono ha un numero seriale (IMEI) e un numero di telefono. Quando viene acceso, il telefono ascolta il segnale broadcast trasmesso dalle BS per trovare il segnale più potente. Il segnale inviato dalle BS viene trasmesso sul **Broadcast Control Channel** e contiene 1. il codice identificativo della BS 2. le informazioni sui canali attualmente in uso.
- L'MS stima la potenza ricevuta da tutte le BS vicine e sceglie la migliore. L'MS invia il segnale di richiesta di accesso sul **Random Access Channel** in cui comunica il numero seriale e il numero di telefono alla BS.
Il Random Access Channel viene utilizzato per la registrazione quando si entra in una cella, e quando l'MS deve effettuare una chiamata. La MS esegue una procedura di accesso casuale inviando la richiesta. Se ci sono più richieste contemporanee c'è collisione e le MS che hanno colliso ritentano dopo un ritardo casuale. La registrazione va comunque ripetuta ogni mezz'ora, una BS memorizza l'MS temporaneamente.
- Quando la BS riceve il segnale, aggiorna l'MSC che registra la presenza del nuovo cliente. Se la registrazione è avvenuta con successo la BS invia la risposta di conferma di registrazione all'MS sull'**Access Grant Channel**.
- Per fare una telefonata, il telefono trasmette il numero da chiamare e la propria identità attraverso il **Random Access Channel**. La BS quando riceve la richiesta informa l'MSC.
- L'MSC cerca un **idle channel** da assegnare alla chiamata. Se ne trova uno, comunica il numero del canale all'MS (su quale canale?). L'MS allora passa automaticamente al canale che gli è stato assegnato e attende che la persona chiamata risponda.
- Le chiamate in arrivo funzionano in modo diverso. Intanto, tutti gli MS anche se inattivi rimangono in ascolto sul **Paging Channel** per rilevare eventuali messaggi inviati loro.
L'MSC principale del *destinatario* riceve un pacchetto che ha la funzione di individuare il *destinatario*. Poi viene trasmesso un pacchetto verso la BS della cella dove si trova il *destinatario*, la BS successivamente trasmette in broadcast attraverso il **Paging Channel** un messaggio la cui forma è: "Unità 14, ci sei?".

Il *destinatario della chiamata* per notificare la sua presenza e richiedere il canale utilizza il **Random Access Channel**.

La BS invia quindi un messaggio del tipo: “Unità 14, c’è una chiamata per te sul canale 3”. A questo punto, il *destinatario della chiamata* passa al canale 3 e inizia a squillare.

3.6. Autenticazione e Cifratura

• Appunti presi a lezione:

Codifica e decodifica tra i vari vantaggi hanno la riduzione delle interferenze.

Una chiave contenuta nella SIM (K_i) e la chiave di cifratura che si chiama K_c .

La MS genera una sequenza random di bit (in chiaro) e la invia alla BS.

BS cifra la sequenza random e ottiene la chiave

BS invia un responso (non la chiave)

Appunti successivi:

L’obiettivo dell’Autenticazione e Cifratura è evitare usi non consentiti ed intercettazioni (mediante procedure di certificazione ed autenticazione) e ridurre gli effetti delle interferenze (jamming).

La cifratura si basa su due chiavi:

- la chiave segreta K_i (contenuta nella SIM e nell’AuC del MSC)
- la chiave di cifratura K_c .
- La K_c vale solo per una conversazione. La K_i non viene mai trasmessa

L’AuC è un componente di sicurezza fondamentale (si trova anche nel disegno dell’architettura di una rete 2G) e si occupa dell’autenticazione dell’utente e della cifratura delle comunicazioni tra il telefono e la rete. L’AuC utilizza l’algoritmo di autenticazione A3 e la chiave di autenticazione K_i per **verificare l’identità** dell’utente e l’algoritmo di cifratura A5 e la chiave di cifratura K_c per **cifrare le comunicazioni** tra il telefono e la rete.

- (1) L’ AuC invia un numero casuale (Random Number, RN) alla MS.
- (2) Ambedue (AuC e MS) eseguono un algoritmo che fornisce la chiave di cifratura K_c ed un responso che viene trasmesso dalla MS all’AuC.
- (3) L’AuC verifica che il responso ricevuto dalla MS sia identico a quella da lui generato (autenticazione).

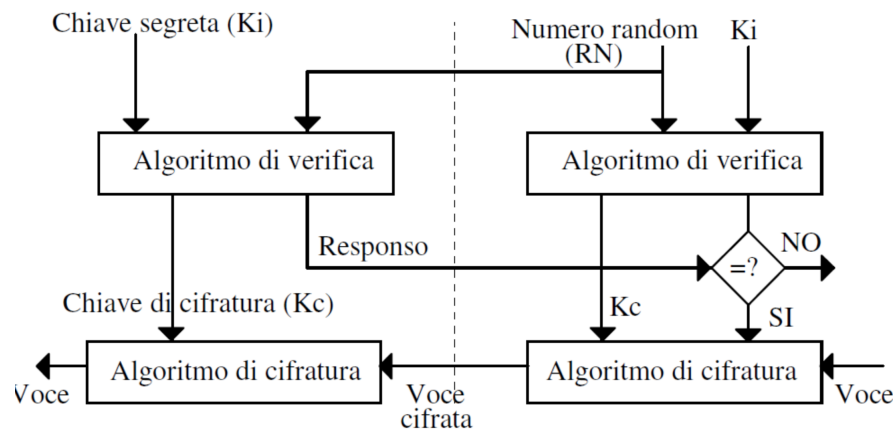


FIGURE 6. Warning: questo è quello che ho capito io, ma ci sono delle contraddizioni con quanto detto in classe. Sia l’MS che la BS eseguono un algoritmo di verifica che prende in input K_i e RN. Il Random Number viene generato dalla BS e inviato a MS. L’esito dell’algoritmo di verifica è la chiave K_c . MS invia un responso (non la chiave) alla BS. Se i due responsi coincidono, allora l’autenticazione ha avuto successo e si può procedere con la cifratura.

4. 2.5G

Caratteristiche:

- Da GSM lo standard diventa GPRS (General Packet Radio Service). GPRS ha introdotto l’utilizzo di commutazione a pacchetto, che ha reso la trasmissione dati più efficiente (usando i canali TDMA della rete GSM).

- L'uplink e il downlink vengono gestiti su due canali distinti. (È FDD o no?)
- L'Allocazione delle risorse radio viene fatta on demand.
- Vengono offerti servizi Point-to-Point (interconnessione fra reti internet), Point-to-Multipoint (chiamate di gruppo e chiamate multicast), Messaggistica MMS

Quindi per la voce viene utilizzata la rete GSM, per i dati la rete GPRS / EDGE / EGPRS.

Componenti della commutazione di pacchetto,

- **SGSN** (Serving GPRS Support Node). Riceve i pacchetti IP destinati alla MS. Connesso al registro HLR, per acquisire informazioni su QoS dell'utente gestito.
- **GGSN** (Gateway GPRS Support Nodes). Connette la rete cellulare a Internet. Ha una tabella con l'indirizzo IP dell'SGSN associato al MS con un dato indirizzo IP.

Il pacchetto diretto al MS viene incapsulato in un pacchetto con l'indirizzo dell' SGSN (tunneling o encapsulated IP). Il pacchetto comprende due coppie di indirizzi IP: mobile-nodo IP con cui dialoga, coppia SGSN-GGSN tramite i quali ha luogo lo scambio.

5. 2.9G

EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) è un'evoluzione di GPRS che ha introdotto ulteriori miglioramenti nella velocità di trasmissione dei dati. Con EDGE, la velocità di trasmissione dei dati che può essere raggiunta è di 384 kbps, circa tre volte più veloce rispetto alla velocità massima di GPRS.

L'efficienza può essere migliorata attraverso il controllo della qualità del segnale, noto come "Link Quality Control". Questo controllo prevede l'adattamento della codifica del segnale in base alla qualità del canale, che può variare a seconda di fattori come la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore o le interferenze presenti nell'ambiente.

Il sistema utilizza la "Link Adaptation" per stimare il rapporto segnale/rumore SIR (Signal to Interference Ratio) e selezionare la modulazione e lo schema di codifica più adatti a garantire una trasmissione affidabile e con la massima efficienza. In particolare, il sistema utilizza la modulazione 8-PSK, che consente di trasmettere 3 bit per simbolo, garantendo quindi una maggiore efficienza spettrale rispetto alla modulazione GMSK.

Dopo EDGE lo standard diventa UMTS.

5.1. Handover

. Nella rete GSM la modalità di gestione dell'handover è di tipo hard, ovvero prima dell'assegnazione della nuova risorsa, è necessario rilasciare quella in uso.

Nelle reti UMTS, invece, è possibile di ricevere segnali da più celle contemporaneamente (il che produce il vantaggio di poter usare minore potenza in emissione e conseguentemente avere minori problemi di interferenza)

Sfruttando questa funzionalità di macrodiversità, si opera il soft handover, in cui la riallocazione di risorse, avviene senza la necessità di rilascio della risorsa precedente.

6. 3G

Come anticipato lo standard utilizzato è UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) che si basa su WCDMA (Accesso multiplo a divisione di codice).

Adotta la commutazione di pacchetto per i servizi dati, mantenendo la commutazione di circuito per la voce, come nel GSM.

Il traffico dati (Internet, videochiamate, video) supera di molto il traffico voce, per soddisfare queste usigenze si usa WCDMA che usa banda variabile (questo non era possibile con 2G, 2.5G e varianti). Per gestire in modo efficiente questo traffico dati, vengono utilizzate tecnologie intelligenti come le antenne direzionali, che possono essere orientate in modo da coprire diversi settori (celle) e fornire una copertura migliore (invece di irradiarlo uniformemente in tutte le direzioni). Un'altra tecnica è la Multi User Detection (MUD), che consente al sistema di distinguere e separare diversi segnali provenienti da più utenti simultaneamente, riducendo le interferenze e migliorando la qualità del segnale.

Sopra è stato citato il concetto di banda variabile. Si riferisce alla capacità di adattare la larghezza di banda di un canale di comunicazione in base alle esigenze effettive del traffico che viaggia su quel canale. Quando un utente richiede una maggiore capacità di trasmissione dati, la rete può allocare dinamicamente una maggiore banda per soddisfare le sue esigenze. Viceversa, se l'utente ha bisogno di meno banda, la rete può assegnare meno banda,

liberando così la banda per altri utenti. Questo si traduce in una maggiore efficienza e capacità della rete.

6.1. UMTS

• RNC (Radio Network Controller) controlla i node B connessi ad esso. Il fatto che RNC controlli più BS (Node

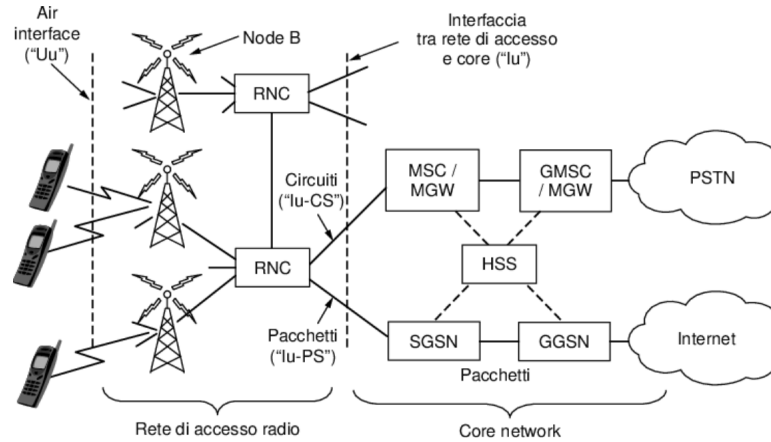


FIGURE 7. Architettura di una rete UMTS. Si divide (anche se nel disegno i nomi sono leggermente diversi) in **UE** (User Equipment), rete di accesso **UTRAN** (Universal Terrestrial Radio Access Network) e **CN** (Core Network). Le entità appartenenti alla Core Network e all'UTRAN comunicano mediante collegamenti dedicati (interfaccia Iu). UTRAN e UE comunicano via radio (interfaccia Uu). **Node B** è la BS che può servire più celle, **RNC** (Radio Network Controller) controlla i node B connessi ad esso. La Core Network supporta sia commutazione di circuito che di pacchetto.

B) si chiama macrodiversità. In questo modo posso fare un **soft handover**, senza avere interruzione di servizio. Un utente si può interfacciare con due node B diversi.

6.2. Premessa

• FDMA e TDMA dividono tempo e frequenza. Assegno ad un utente 1 delle 124 frequenze e 8 time slot (clock BS agganciato al clock del MS).

6.3. CDMA (Accesso multiplo a divisione di codice)

• Viene assegnata tutta la banda per tutta la durata temporale a ciascun utente. Gli utenti si distinguono in base a delle chiavi.

La chiave si costruisce a partire da un codice, una sequenza di ± 1 nota alla rete e assegnata ad ogni utente, i codici sono ortogonali tra loro (se moltiplico due chip uno ad uno, la somma deve venire zero).

I codici 1. devono essere ortogonali tra loro e 2. hanno lunghezza variabile. La lunghezza del codice influenza quanta banda viene assegnata ad un utente. Se il codice è più corto, viene assegnata più banda (?) .

Il punto centrale di CDMA è essere in grado di estrarre il segnale e rifiutare tutto il resto come rumore.

6.3.1. Funzionamento di CDMA

- Ad ogni stazione viene assegnata una sequenza di chip, un codice univoco di m bit. Per trasmettere un bit con valore 1 una stazione invia la sua sequenza di chip, mentre per trasmettere uno 0 ne invia la negazione.
- Aumentare l'informazione che deve essere spedita (avere un altro numero di chip/s) comporta una necessità di banda per il CDMA maggiore.
- Quando due stazioni trasmettono contemporaneamente le loro sequenze bipolari si sommano linearmente. Ad esempio, se in un dato istante 3 stazioni trasmettono $+1$ e una trasmette -1 , sarà ricevuto un segnale di $+2$ (è possibile fare un ragionamento analogo in termine di livelli di tensione, ragionando in Volt).
- Il recupero si effettua calcolando il prodotto tra il segnale ricevuto e la sequenza di chip nota.

- In questo modo CDMA consente di assegnare banda a tutti gli utenti (anche la stessa no frequency planning e time scheduling), il limite del numero di utenti in una cella non è rigido come nel GSM, e si guadagna una forte immunità all'interferenza (perché il rumore e le interferenze nell'operazione di despreading vengono appiattite).

Sopra è stato scritto: “Per trasmettere un bit con valore 1 una stazione invia la sua sequenza di chip, mentre per trasmettere uno 0 ne invia la negazione.” Questa frase descrive il prodotto tra il segnale originale e il codice assegnato. Questo prodotto ha come risultato lo spreading (allargamento) della banda. Questa tecnica di codifica si chiama DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum.

Tecnica dello Spread Spectrum = spettro del segnale * codice.

6.3.2. Direct Sequence (codifica diretta) Spread Spectrum (spettro del segnale * codice)

. Il segnale viene moltiplicato per una sequenza di spreading (sequenza di chip) determinando così un'espansione dello spettro. In ricezione il segnale viene rimoltiplicato per la stessa sequenza in modo da ricostruire il segnale trasmesso.

Prendere un segnale e moltiplicarlo per un codice ha come conseguenza → allargare la banda.

L'occupazione in Hz nel dominio della frequenza del segnale modulato è più o meno equivalente al bit rate.

Tutti i segnali condividono la stessa banda (2100 MHz), gli utenti vengono distinti in base al codice.

Questa tecnica ha dei vantaggi (già citati):

- (1) permette agli utenti di utilizzare tutta la banda per tutta la durata temporale e contemporaneamente di distinguere i diversi utenti (poiché corrisponderanno a codice diversi)
- (2) fornisce forte immunità all'interferenza (perché il rumore e le interferenze nell'operazione di despreading vengono appiattite).

6.3.3. Vantaggi CDMA.

- In generale un canale è occupato solo il 40% del tempo. Nei sistemi TDM o FDM non è possibile riassegnare i time slot o le frequenze quando il canale non è occupato. Nei sistemi CDMA, quando l'utente non trasmette, si riduce l'interferenza per gli altri utenti.
- Permette i soft handover, cambiando il codice.
- Nell'Uplink non è possibile utilizzare segnali ortogonali utilizzati nel Downlink per problemi di sincronizzazione, bensì vengono usate **Sequenze Pseudorandom Noise** non sincrone.
- Le celle adiacenti non possono utilizzare gli stessi codici.
- Le dimensioni di una cella si restringono al crescere del bit rate del servizio offerto o del numero di utenti presenti. Si cerca un tradeoff tra capacità e copertura.

Poche celle di grandi dimensioni e bit rate ridotti. Se la cella è grande → assegno << banda.

Molte celle di piccole dimensioni e bit rate elevati. Se restringo cella → assegno >> banda.

6.4. SCDMA (Synchronous CDMA)

.

6.5. WCDMA (Accesso multiplo a divisione di codice a banda larga)

. CDMA viene studiato anche nella sua versione Wideband, ossia a banda larga. CDMA utilizza una larghezza di banda di 1,25 MHz, mentre WCDMA utilizza una larghezza di banda di 5 MHz o superiore.

Sia le BS che le MS sono asincrone (non è necessario il planning dei time slot e delle frequenze)

WCDMA supera il problema di **multipath fading**, che consiste nel fatto che alla BS arrivano più copie dello stesso segnale inviato da MS (rimbalzato e ritardato). Il multipath fading può essere ridotto utilizzando la tecnica MIMO (Multiple Input Multiple Output), che permette di utilizzare due o più antenne al ricevitore per migliorare la qualità del segnale ricevuto.

6.5.1. MIMO

. Un'antenna riceve più copie dello stesso segnale (multipath fading).

Si può risolvere avendo 2 antenne che trasmettono e 2 che ricevono (confronto i segnali ricevuti tra di loro).

È una delle possibili tipologie di antenna intelligente: una schiera di singole antenne che elabora il segnale.

I nostri cellulari hanno solo un'antenna, però they behave come se avessero più antenne.

6.5.2. Analisi del bit rate in WCDMA, come la tecnica DSSS influenza il bit rate in WCDMA.

. Se il numero di chip è maggiore allora il bit rate è minore. Se il numero di chip è maggiore allora la larghezza di banda è minore

- L'intervallo di tempo tra due chip consecutivi è fisso e di conseguenza il chip-rate è fisso 3.84 Mchip/s.
- 5 MHz è la banda assegnata a tutti gli utenti.



durata del codice nel tempo = $260 \cdot 4 \text{ ms}$

↑ ↑

n. chip.

durata = $260 \cdot 256 \text{ ms}$

↑

n. chip.

durata di 1 chip.
Il reciproco è il
chip rate: $\frac{1}{260} = 3,84 \text{ Mchip/s}$

bit rate = $3,84 \text{ Mchip/s}$ = 960 Kbps

~~4 chip/s~~

bit rate = $\frac{3,84}{256} = 15 \text{ kbps}$

Conseguenza: numero di chip >> → bit rate <<

Però: numero di chip >> → larghezza di banda >>

Queste due affermazioni sono in contraddizione?

FIGURE 8. In genere, maggiore è il valore dello spreading factor (numero di chip del codice), maggiore è la larghezza di banda utilizzata per la trasmissione del segnale e maggiore è la distanza di copertura del segnale, ma minore è la velocità di trasmissione dati (bit rate). Utilizzando una maggiore potenza del segnale in trasmissione aumenta la copertura del segnale, si riducono gli effetti del rumore e delle interferenze, quindi potrebbe “compensare” un numero di chip uno SF un po’ grandino.

- Se voglio dare più banda ad un utente, gli do un codice più corto (?).
- Nel dominio del tempo:

Un codice corto di 4 chip fa sì che la durata del codice nel tempo è:
durata = 260 (intervallo di tempo tra due chip consecutivi) * 4 chip

Il bit rate che sto assegnando ad un utente (che è il reciproco di $260 \cdot 4$) è $(3.84 \text{ Mchip/s} / 4 \text{ chip})$

Bit rate varia tra 15 Kbps (se codice 256 chip) e 960 Kbps (se codice 4 chip).’

Coesistono più aspetti:

- (1) Se uso spreading factor basso (SF) la codifica non è robusta rispetto all’interferenza, al contrario se lo spreading factor è alto si riduce l’interferenza.
- (2) Se uso spreading factor basso (SF) avrò bit rate elevati. È necessario trasmettere a potenze elevate.

7. 3.5G APPUNTI PRESI A LEZIONE

Include la tecnologia Multiple Input/Multiple Output (MIMO) già accennata.
(TDMA, FDMA superato da CDMA), WCDMA viene superato da OFDM.

7.1. OFDM (divisione di sottoportante ortogonale). Quando vengono inviati dati digitali è possibile dividere lo spettro in maniera efficiente anche senza usare le bande di guardia. OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, multiplexing a divisione di frequenze ortogonali) divide la banda del canale in molte sottoportanti che inviano dati in maniera indipendente.

Queste sottoportanti sono stipate una a ridosso dell'altra nel dominio delle frequenze, per cui ogni sottoportante si estende in quelle adiacenti.

Tuttavia la risposta in frequenza di ogni sottoportante è progettata in maniera tale da essere zero in corrispondenza del centro delle sottoportanti a essa adiacenti. Può quindi essere campionata nella frequenza centrale senza interferenza da parte dei vicini.

Per far funzionare tutto questo è richiesto un tempo di guardia per ripetere un sottoinsieme dei simboli trasmessi, in maniera tale da ottenere la risposta in frequenza richiesta. Tuttavia, questa aggiunta spreca meno risorse di quelle richieste da molte bande di guardia.

Rect nel tempo \rightarrow Sinc in frequenza,

Si utilizzano sottoportanti vicine, sovrapposte, per sfruttare meglio la banda. Il concetto è: divisione della banda.

In che modo: Sinc sovrapposte che si annullano nel punto massimo delle altre (Bande ortogonali).

Vantaggio rispetto alla divisione di frequenza FDMA: efficienza, non bisogna utilizzare guard band.

Come viene gestita la sovrapposizione delle Sinc? Non vengono usati filtri, bensì:

- (1) prendo segnale da trasmettere.
- (2) lo parallelizzo (divido segnale in 40 flussi diversi).
- (3) moltiplico per la sottoportante.
- (4) lo modulo.
- (5) lo sommo insieme.
- (6) Si usa trasformata di Fourier discreta FFT.
- (7) In ricezione invece di usare filtri si riconosce il segnale del singolo utente facendo l'inversa della FFT.

Standard IMT2000 per 3G

IMTAdvanced per 4G = solo commutazione a pacchetto, solo OFDM ...

IMT2020 per 5G.

Part 2. Richiami protocolli sui di rete

8. PROGETTO DI UNA RETE

8.1. Affidabilità

. Se c'è un errore nella comunicazione un 1 logico potrebbe arrivare sotto la soglia dell'1 (e verrà letto come uno 0).

Se c'è numero nella comunicazione uno 0 logico potrebbe arrivare sopra la soglia dello 0 (e verrà letto come uno 1).

Per questo vanno applicati degli algoritmi di codifica di canale.

Queste tecniche rientrano nel FEC, (Forward Error Correction) che consiste nell'inviare 11 invece di 1, 00 invece di 0. Se arriva: 01 o 10 si rileva l'errore. Esegue detection ma non prevention.

Allora si trasmette 111 o 000, basta che 1 sia ripetuto due volte che rilevo e correggo UN SOLO errore.

Introduco ridondanza ma trasmetto informazioni più lentamente.

Il secondo teorema di Shannon dice che la capacità di trasmettere bit al secondo assume un valore proporzionale alla banda di occupazione del segnale (? da chiarire).

Il FEC non è l'unica strada: ARQ consiste nel richiedere la ritrasmissione dei dati (non è possibile per i sistemi real time).

Il rumore può dipendere:

- dal fading: problemi atmosferici
- multipath fading

Questi problemi non ci sono nelle trasmissioni cablate.

Il Bit Error Rate (BER) per una rete cablata dipende da molti fattori, come la qualità del cavo, la lunghezza del cavo, il tipo di connettori, la qualità delle interfacce dei dispositivi di rete, il livello di rumore ambientale e così via. Un esempio potrebbe essere BER pari 10^{-9} . Il BER non dipende dal bit rate (ossia dalla velocità di trasmissione).

8.2. Scalabilità, Sicurezza

.

8.3. Livelli di rete

. Le architetture di rete prevedono i protocolli. Ogni livello parla con gli altri peer (altri livelli pari).

I protocolli sono indipendenti tra loro ma due livelli adiacenti comunicano tramite SAP, Service Access Point.

Lo scopo di ogni livello è quello di essere intercambiabile.

C'è la possibilità che alcuni servizi (tipo FaceTime) usino dei protocolli proprietari (non noti).

In trasmissione i pacchetti dati vengono incapsulati partendo dal livello applicativo e poi via via vengono aggiunti header dei livelli più bassi. Questo processo di incapsulamento è noto anche come "stacking dei protocolli".

In ricezione leggo gli header dal livello basso (es. Ethernet) verso l'altro (liv. applicativo).

I servizi sono reliable (affidabile, ad esempio movie downloading) o unreliable (come ad esempio VOIP).

I servizi vengono esplicitati tramite primitive. Le primitive sono operazioni che permettono ad un livello superiore ($n+1$) di usufruire dei servizi offerti dal livello inferiore (n).

Il servizio viene esplicitato tramite SAP, e riguarda due livelli uno superiore, uno inferiore.

Il protocollo invece si riferisce a delle regole che riguardano due livelli pari.

8.3.1. Funzioni

. Le funzioni e i meccanismi di controllo e gestione delle comunicazioni di rete, includono il setting up, il controllo, il multiplexing etc...

8.3.2. Standard ISO OSI

. Livello fisico definisce quali siano i cavi (fibra ottica, rame) da usare per la comunicazione e si occupa di trasportare i dati.

Il livello data link gestisce il collegamento (ad esempio memorizzando MAC address), il controllo degli errori etc...

Part 3. Cavi in rame e propagazione wireless

9. PREMESSE

9.1. Due computer si dicono connessi quando sono in grado di scambiare informazioni. Il collegamento non è necessariamente realizzato con cavi di rame; si possono usare anche fibre ottiche, microonde, luce infrarossa e satelliti per comunicazioni.

- Nel doppino telefonico, le informazioni vengono trasmesse attraverso la variazione della tensione elettrica applicata ai cavi di rame intrecciati.
- Nelle comunicazioni wireless, invece, le informazioni vengono trasmesse attraverso onde elettromagnetiche.
- Esiste sempre una grandezza fisica, variabile: la tensione elettrica nel doppino telefonico e le onde elettromagnetiche nelle comunicazioni wireless.

9.2. Onde elettromagnetiche

. Quando gli elettroni si spostano creano onde elettromagnetiche che si propagano attraverso lo spazio, anche nel vuoto (intuizione di Maxwell, esistenza provata da Hertz).

- Il numero di oscillazioni al secondo di un'onda è chiamato **frequenza** f ed è misurato in Hz.
- La distanza tra due massimi (o minimi) consecutivi è chiamata **lunghezza d'onda** λ .

Quando un'antenna di dimensioni appropriate è collegata a un circuito elettrico, le onde elettromagnetiche sono trasmesse in modo efficiente e un ricevitore posto a una certa distanza le può captare. Tutte le comunicazioni wireless si basano su questo principio.

Nel vuoto tutte le onde elettromagnetiche viaggiano alla stessa velocità, qualunque sia la loro frequenza. Questa velocità, chiamata velocità della luce c , pari a circa $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$, ossia circa 30 cm per nanosecondo. Nei cavi in rame e nelle fibre ottiche la velocità di trasmissione scende a $\frac{2}{3}c$ e diventa leggermente dipendente dalla frequenza.

La relazione fondamentale tra velocità, lunghezza d'onda e frequenza è: $\lambda * f = c$. Essendo c costante i valori di interesse da calcolare sono λ, f .

Come regola generale, quando λ è espressa in metri e f è espressa in MHz, $\lambda * f$ vale circa 300. Onde di 100 MHz sono lunghe circa 3 metri, onde di 1.000 MHz sono lunghe circa 0,3 metri e onde di 0,1 metri hanno una frequenza di 3.000 MHz.

Lo spettro elettromagnetico rappresenta tutta la gamma di frequenze. Le porzioni dello spettro indicate come **radio, microonde, infrarosso e luce visibile** si possono utilizzare per trasmettere informazioni modulando ampiezza, frequenza o fase delle onde. La luce ultravioletta, i raggi X e i raggi gamma funzionerebbero anche meglio ma sono difficili da generare e da modulare.

Shannon dimostra che **la quantità d'informazione** che un'onda elettromagnetica può trasportare **dipende dall'energia ricevuta** ed è **proporzionale alla sua banda**. Dalla figura dovrebbe dedursi come mai le fibre ottiche piacciono così tanto a chi si occupa di reti. Molti GHz di banda sono disponibili per essere sfruttati nella zona delle microonde e ancora di più nelle fibre, in quanto si collocano ancora più a destra nella scala logaritmica.

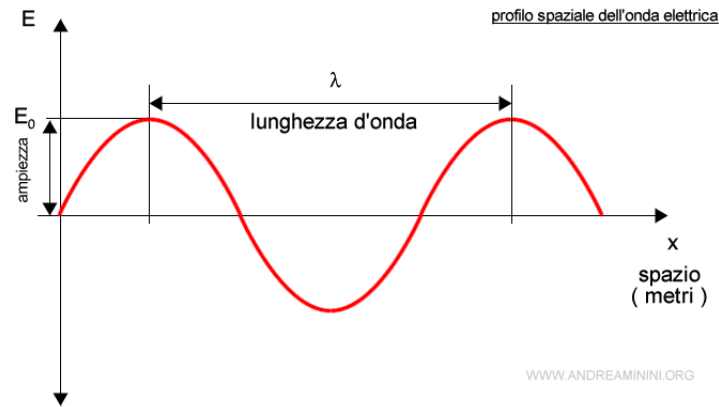


FIGURE 9. lunghezza d'onda

9.3. Onde radio, microonde, ottiche

. Le **onde radio** sono semplici da generare, possono viaggiare per lunghe distanze e attraversano facilmente gli edifici; per questi motivi sono largamente utilizzate per la comunicazione, sia all'interno delle costruzioni sia all'esterno. Le onde radio sono omnidirezionali, ossia si espandono dalla sorgente in tutte le direzioni, perciò il trasmettitore e il ricevitore non devono essere strettamente allineati.

Le proprietà delle onde radio dipendono dalla frequenza. Alle frequenze più basse, le onde radio attraversano bene gli ostacoli, ma la potenza diminuisce bruscamente allontanandosi dalla sorgente. Alle frequenze più alte, le onde radio tendono a viaggiare in linea retta e rimbalzare contro gli ostacoli. L'energia del segnale viene attenuata principalmente dalla riflessione.

Le **onde microonde** (sopra i 100 MHz) viaggiano quasi in linea retta e si mettono a fuoco facilmente. Concentrando tutta l'energia in un piccolo raggio per mezzo di un'antenna parabolica (come quella delle TV satellitari), si ottiene un rapporto segnale/rumore molto più alto, ma le antenne trasmettenti e riceventi devono essere accuratamente allineate le une con le altre. A differenza delle onde radio a bassa frequenza, le microonde non attraversano molto bene gli edifici. Inoltre le onde in ritardo possono arrivare fuori fase con le onde dirette e questo può annullare il segnale. L'effetto è noto come **multipath fading**.

Riepilogando, la comunicazione a microonde è talmente utilizzata nelle comunicazioni telefoniche su lunghe distanze, nella telefonia cellulare, nella televisione e in altre applicazioni, che si sta manifestando una grave scarsità di spettro. Questo sistema di trasmissione offre diversi vantaggi rispetto alla fibra; il principale è che non richiede alcun diritto di passaggio: acquistando un piccolo appezzamento di terreno ogni 50 Km e costruendo su di esso un'antenna a microonde è possibile scavalcare completamente il sistema telefonico e comunicare direttamente. Le microonde sono anche abbastanza economiche.

Le **onde ottiche** sono usate da secoli. Esempi di onde ottiche sono laser e LED.

Il laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) produce una luce **coerente e monocromatica**, cioè una luce che ha una sola lunghezza d'onda e che si propaga in fase. Questo lo rende particolarmente adatto per le applicazioni che richiedono una luce direzionale e precisa.

Il LED (Light Emitting Diode) produce una luce **non coerente e policromatica**, cioè una luce composta da molte lunghezze d'onda diverse e che non si propaga in fase. Questo lo rende particolarmente adatto per le applicazioni che richiedono una luce diffusa, come l'illuminazione domestica.

9.4. Diodo

. In generale, un diodo è un componente elettronico a semiconduttore che permette il passaggio della corrente elettrica in una sola direzione. Nel contesto della trasmissione di segnali ottici il diodo viene utilizzato come trasduttore elettrico-ottico. Trasforma il segnale da elettrico ad ottico.

10. CABLAGGIO STRUTTURATO

Il cablaggio strutturato è un sistema di cablaggio per le reti di computer, l'infrastruttura di cablaggio è progettata e installata in modo da fornire una base solida per la trasmissione di dati, voce e video all'interno di un edificio o di un campus. Il cablaggio strutturato prevede l'uso di standard di cablaggio uniformi, che consentono di collegare

tutti i dispositivi di rete (ad esempio, computer, telefoni, stampanti, dispositivi di sicurezza, ecc.) a una rete centrale.

Bisogna decidere quali mezzi fisici vanno utilizzati, dove posizionare i server etc...

Il cablaggio strutturato di solito comprende:

- Un'interfaccia verso la rete pubblica
- Una dorsale su cui si estendono i cavi in verticale (su più piani).
- Sistemi di canalizzazione orizzontale (all'interno del piano).

Lo standard ISO/IEC 11801 dà informazione su come effettuare il cablaggio nei vari edifici.

Il cablaggio strutturato si occupa anche di proteggere i cavi, da guasti, disturbi elettromagnetici, incidenti etc...

I costi di una LAN sono distribuiti in questo modo:

- Il software costa il 50%.
- l'infrastruttura di rete il 20% .
- l'hardware il 20% .
- resto.

11. DOPPIO TELEFONICO

Anche se esistono servizi Fiber to the home, il doppino telefonico viene spesso utilizzato nelle case per voce + dati. Il doppino telefonico è una **coppia di fili in rame** che viene utilizzato per la trasmissione delle comunicazioni telefoniche. Il segnale è costituito da una differenza di potenziale tra i due cavi della coppia (**segnale differenziale**, questo fornisce una maggiore protezione dal rumore esterno che, inuendando entrambi i cavi, mantiene inalterato il valore della differenza di potenziale.). I cavi vengono intrecciati in modo da ridurre le interferenze elettromagnetiche tra di loro e tra dispositivi circostanti. Alcune caratteristiche del doppino telefonico:

- Si utilizza il **segnale differenziale**. Un segnale viene trasmesso come differenza di potenziale tra i due fili nella coppia. Per evitare le interferenze (o diafonie) in ogni coppia di fili si usa una **frequenza di twistatura diversa**, ossia un filo ha un numero di torsioni o rotazioni su se stesso diverso dall'altro.
- Voltaggio (differenza di potenziale): i segnali telefonici sono segnali a bassa tensione, dell'ordine di grandezza di pochi millivolt (mV). Tuttavia, durante la trasmissione, questi segnali vengono amplificati a livelli di tensione più elevati prima di essere trasmessi attraverso il cavo telefonico. Generalmente si utilizza il prodotto banda al metro, per capire l'efficienza (e non solo la banda).
- Banda (frequenza): la banda dipende dalla distanza e arriva a circa qualche Mbps.
- Viene utilizzato per la telefonia e le reti ADSL.
- I doppiini possono raggiungere una lunghezza di alcuni chilometri senza bisogno di amplificazione, ma per distanze maggiori il segnale si attenua troppo ed è necessario fare uso di ripetitori. Il segnale che viaggia sul rame non si amplifica, di solito si rigenera (si riceve e si ricrea utilizzando un trasmettitore che lo rigenera).
- Esistono diverse varietà di doppiini, una comune prende il nome di categoria 5 o "Cat. 5". Un doppino di categoria 5 consiste di due cavi elettricamente isolati e intrecciati tra loro. Quattro di queste coppie (otto fili in totale) sono raccolte all'interno di una guaina di plastica che le protegge e le mantiene unite.

Come già è stato detto, Cat 5 è composto da quattro coppie. Da qui si intuisce che il doppino può essere singolo (una sola coppia) oppure in una treccia di una serie più o meno numerosa di coppie.

11.0.1. Connettore RJ 11 doppino telefonico.

Il cavo del doppino telefonico è costituito da due fili di rame intrecciati e normalmente utilizza il connettore RJ-11.

Un doppino telefonico termina in un'interfaccia fisica RJ 11. La sigla RJ-11 (Registered Jack tipo 11) indica una interfaccia fisica usata per l'attestazione di cavi destinati ai servizi telefonici e trasmissione dati. Comunemente è usata per indicare una famiglia di connettori modulari a 6 posizioni, che possono essere usati per varie applicazioni. Prevede l'uso di due soli contatti (pin, terminali elettrici).

11.0.2. Connettore RJ-45 Ethernet.

Il cavo Ethernet, invece, è un tipo di cavo utilizzato per collegare dispositivi di rete, come computer, router, switch, e per la trasmissione di dati digitali ad alta velocità. Il cavo Ethernet è costituito da quattro coppie di fili di rame intrecciati e normalmente utilizza il connettore RJ-45.

11.0.3. Cavi Ethernet: UTP, STP e FTP.

. I cavi UTP, STP e FTP seguono le specifiche standardizzate dall' ANSI che li dividono in varie categorie in base, ad esempio, al numero di intrecci e alle capacità di trasportare segnali. In generale, un cavo Ethernet utilizza 4 coppie di doppiini (8 fili), anche se esistono alcune eccezioni a questa regola, come ad esempio il cavo Ethernet crossover, che utilizza solo due coppie. Ogni doppino del cavo Ethernet viene schermato da una guaina, che aiuta

a ridurre le interferenze elettromagnetiche. Tuttavia, questa schermatura non è presente nei cavi UTP, che non hanno uno schermo esterno.

Esistono diversi tipi di cavi Ethernet come:

- UTP (Unshielded Twisted Pair) Il cavo UTP non ha uno **schermo esterno** e non ha un **foil di metallo** tra le coppie di doppini.
- FTP (Foil Twisted Pair) il cavo FTP ha un foil di metallo tra le coppie di doppini, ma non ha uno schermo esterno. Inoltre, il foil di metallo tra le coppie di doppini non viene di solito posto tra i doppini e la guaina esterna del cavo, ma è piuttosto posto all'interno del cavo.
- STP (Shielded Twisted Pair). invece, ha sia un foil di metallo tra le coppie di doppini che uno schermo esterno, che aiutano entrambi a ridurre le interferenze elettromagnetiche.

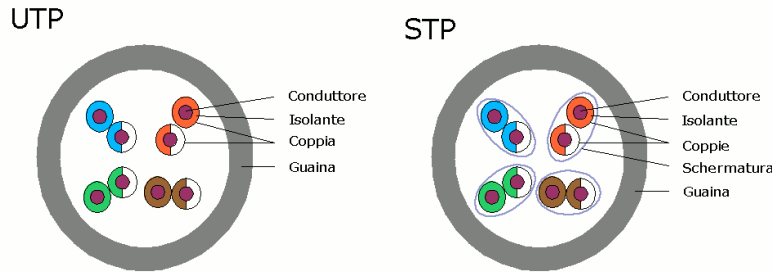


FIGURE 10. cavo Ethernet STP e UTP

L'ADSL può utilizzare sia il cavo Ethernet che il cavo coassiale per la connessione tra il modem ADSL e il computer. Tuttavia, l'uso del cavo Ethernet è diventato più comune perché consente di ottenere una migliore velocità di connessione e una maggiore stabilità rispetto al cavo coassiale. Il cavo Ethernet utilizzato per la connessione ADSL è di solito un cavo Ethernet di categoria 5 o superiore, che consente di ottenere velocità di connessione fino a 100 Mbps o più, a seconda della qualità del cavo e della distanza tra il modem ADSL e il computer.

Un'altra caratteristica dei cavi Ethernet è che se si devono collegare due dispositivi di stesso livello (ad esempio PC-PC o SWITCH-SWITCH) si utilizza un cavo di tipo incrociato (cross) mentre se si devono connettere dispositivi diversi (ad esempio PC-SWITCH), si usa un cavo diretto (patch).

12. CAVO COASSIALE

Essendo più schermato del doppino, il cavo coassiale può estendersi per distanze più lunghe e consente velocità più elevate. Superata una certa distanza è necessario utilizzare ripetitori che rigenerano il segnale periodicamente (repeater). Semplici amplificatori non sono sufficienti perché questi amplificano il rumore e gli effetti della distorsione.

Esistono due tipi di cavi coassiali: il primo a 50 ohm, l'altro tipo a 75 ohm (tipicamente usato per le trasmissioni analogiche e la TV via cavo). Un cavo coassiale è composto da un nucleo conduttore coperto da un rivestimento isolante, a sua volta circondato da un conduttore cilindrico solitamente realizzato con una calza (o maglia) di conduttori sottili, che inne è avvolto da una guaina protettiva di plastica. Riassumendo dall'interno verso l'esterno:

Anima di rame, ricoperta da materiale isolante dielettrico, ricoperta conduttore esterno intrecciato (calza o maglia), guaina di protezione di plastica. Il campo elettromagnetico si propaga tra l'anima e la maglia.

La costruzione e la schermatura del cavo coassiale forniscono ampiezza di banda ed eccellente immunità al rumore. I cavi moderni hanno un'ampiezza di banda fino a qualche GHz, ma sono stati in gran parte sostituiti dalla fibra ottica nelle tratte più lunghe (tra gli svantaggi di usare il cavo coassiale: il cavo è complesso e costoso da fabbricare, non può essere piegato troppo). Il segnale trasmesso tramite cavo coassiale si attenua di oltre $\frac{10dB}{100m}$.

13. STANDARD IEEE E ITU

Le frequenze si riferiscono alla lunghezza d'onda, ovvero la distanza tra due picchi. Il prodotto $\lambda * f = c$ rappresenta l'equazione fondamentale della fisica che lega la lunghezza d'onda (λ), la frequenza (f) e la velocità della luce (c) nell'aria o nel vuoto. Conoscere questo prodotto può essere utile nella progettazione di antenne, nella scelta della banda di frequenza per un sistema di comunicazione wireless e in altri aspetti della progettazione di sistemi di telecomunicazioni. IEEE e ITU standardizzano le diverse bande in base alla lunghezza d'onda. In generale, le onde elettromagnetiche a frequenza più elevata, come quelle nella banda SHF (Super High Frequency

$\lambda \in [10\text{cm}, 1\text{cm}]$) ed EHF (Extremely High Frequency $\lambda \in [1\text{cm}, 1\text{mm}]$), hanno una lunghezza d'onda più corta e possono trasportare una maggiore quantità di dati a una velocità maggiore rispetto alle onde a frequenza più bassa, come quelle nella banda UHF (Ultra High Frequency $\lambda \in [1\text{m}, 10\text{cm}]$). Tuttavia, le onde a frequenza più elevata hanno anche alcune limitazioni, tra cui la maggiore attenzione richiesta alla loro propagazione e la maggiore suscettibilità alle interferenze.

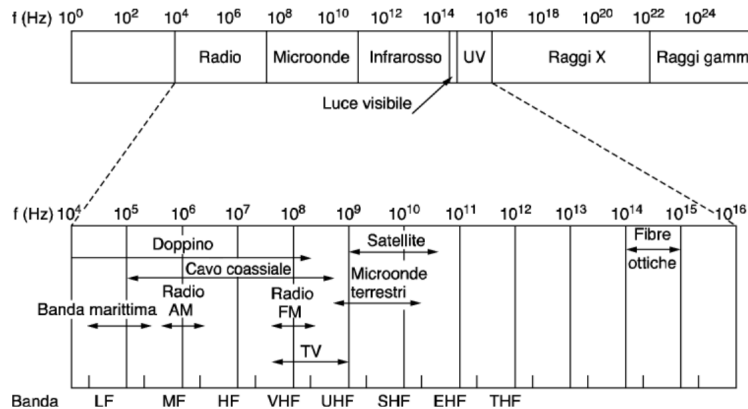


FIGURE 11. Lo spettro elettromagnetico e il suo utilizzo nella comunicazione. I termini LF, MF e HF indicano rispettivamente le frequenze basse (low), medie (medium) e alte (high). Spostandosi a destra si aggiungono i termini Very, Ultra, Super, Extremely e Tremendously High.

I segnali durante la propagazione subiscono:

- Per frequenze portanti elevate (**microonde**, con frequenza dell'ordine di centinaia o migliaia di MHz), il segnale si propaga in linea retta ed è soggetto a riflessioni da parte di oggetti di dimensioni maggiori o confrontabili con la lunghezza d'onda. La distanza di copertura (range) diminuisce.
- Per frequenze portanti basse (onde **radio**, con frequenza dell'ordine di centinaia o migliaia di kHz), il segnale si propaga come un'onda sferica e tende per diffrazione ad aggirare ostacoli di dimensioni più piccole della lunghezza d'onda. Il range di copertura, a parità di potenza elettromagnetica irradiata, è maggiore.
- Attenuazione da spazio libero: è l'attenuazione della potenza di un segnale elettromagnetico attraverso lo spazio libero (di solito l'aria). L'attenuazione è inversamente proporzionale al quadrato della distanza $\frac{1}{r^2}$.

14. FREQUENZE RADIO, MICROONDE OTTICHE

Le bande radio si comportano in modo isotropo, ovvero le onde si propagano in modo uniforme in tutte le direzioni, a meno che non vengano ostacolate da oggetti di grandi dimensioni. Ciò significa che le onde radio possono piegarsi intorno a piccoli ostacoli come edifici, alberi e altre strutture, ma non possono superare ostacoli di grandi dimensioni come le montagne.

D'altra parte, le onde a microonde hanno una direzionalità maggiore rispetto alle onde radio, il che significa che si propagano in linea retta in una direzione specifica. Ciò rende le onde a microonde utili per le comunicazioni a lunga distanza, poiché possono essere indirizzate in modo specifico verso una particolare destinazione, ma richiede anche che le antenne siano posizionate in modo preciso per garantire una buona ricezione del segnale.

Le onde radio sono utilizzate principalmente per le comunicazioni a breve distanza, come la radio FM e le comunicazioni cellulari, mentre le onde a microonde sono utilizzate per le comunicazioni a lunga distanza, come le trasmissioni televisive via satellite e le comunicazioni wireless ad alta velocità.

14.1. **Microonde.** Modulazione analogica (segnale da trasmettere continuo) o digitale (serie di impulsi):

- Nel tempo: Segnale che vogliamo trasmettere (che contiene informazione) * segnale microonde (es. $\cos(2\pi f_0 t)$). Il segnale che vogliamo trasmettere dipenderà dalla moltiplicazione tra il segnale per il coseno, che modula l'ampiezza del coseno.
- In frequenza: un segnale microonde avrà una frequenza portante $f_0 = \frac{1}{T}$. Moltiplicare per un coseno nel tempo corrisponde in frequenza a traslare il segnale che vogliamo trasmettere in f_0 (sulla portante del segnale microonde). Il segnale passa da banda base a banda passante.

Se il segnale è microonde la frequenza massima f_{max} è di circa 28 GHz. (In questo caso il contenuto informativo si troverà tra f_{max} e $-f_{max}$).

14.2. Ottiche. Il concetto è identico, ma si moltiplica per la portante ottica, e la f_{max} diventa 200 THz (un ordine di grandezza superiore a microonde). L'occupazione dello spettro è maggiore, più banda da assegnare alle varie utenze. Lo standard è di 40 GHz.

Primo concetto da assimilare: se la portante assume un valore \gg allora anche la banda è \gg .

15. OWC: OPTICAL WIRELESS COMMUNICATIONS

Sono chiamate onde ottiche quelle tra l'infrarosso e l'ultravioletto. OWC utilizza tre bande:

- Ultraviolet communications (UVC) lunghezza d'onda da 200nm a 280nm.
- Visible Light Communications (VLC) lunghezza d'onda da 390nm a 750nm.
- Free space optical Communications (FSO) lunghezza d'onda da 750nm a 1600nm.

Il mercato dell'infrarosso è estremamente esteso, tanto che è più facile trovare laser che fibra ottica. Il centro dell'infrarosso corrisponde a 1,5 nm ovvero a 200 THz. Le differenze lunghezze d'onda nel visibile corrispondono ai diversi colori, con centro nel verde. Nel near-infrared abbiamo le comunicazioni in fibra ottica, che possono sfruttare anche altre frequenze nell'infrarosso, non visibile all'occhio umano.

Trasmettitore processa segnale sotto forma di segnale elettrico in banda base o non modulato, quindi trasformata di Fourier centrata nell'origine. La conversione elettro-ottica avviene:

- tramite laser che emette luce coerente, ovvero confinata, fascio laser che si allarga poco all'aumentare della distanza, non diffrange, non si allarga il fascio oppure,
- tramite LED, utilizzati anche per illuminazione, emettono luce in modo parzialmente coerente per ampio field of view (sole incoerente per diffrazione in fascio della luce).

Informazione che si vuole trasmettere definita da seq. di 0 e 1: se viene trasmesso 1 il laser viene acceso (nell'ordine del THz). Laser e LED (Light Emitting Diode) trasmettono tramite diodo (polarizzato direttamente) un fascio luminoso, che viene ricevuto da un fotodiodo (polarizzato inversamente). Fotodiodo è progettato per prendere la luce e trasformarla in segnale elettrico.

- Il laser converte il segnale elettrico in luce ottica tramite l'emissione stimolata di fotoni.
- Il LED (Light Emitting Diode) converte il segnale elettrico in luce ottica attraverso l'emissione spontanea di fotoni. Sebbene nel contesto della trasmissione di segnali ottici il diodo venga utilizzato come trasduttore elettrico-ottico, si tratta di un'applicazione particolare.
- Il fotodiodo è un trasduttore ottico-elettrico.

Ci sono diversi vantaggi per utilizzare la banda ottica, banda maggiore, bassa latenza, mentre le frequenze a microonde vengono utilizzate pagando una concessione, le bande ottiche non sono soggette a regolamento. Tuttavia lo svantaggio è la poca mobilità (il destinatario deve essere fermo).

15.1. Trasmettitore. In generale è vero che la trasmissione di un segnale prevede diverse fasi:

- (1) Generazione del segnale. Il segnale viene generato da una sorgente.
- (2) Processamento del segnale. Il segnale viene elaborato per migliorare la qualità o per rimuovere eventuali disturbi. Questa fase potrebbe includere la filtrazione, l'amplificazione, la modulazione o la demodulazione del segnale.
- (3) Conversione del segnale. Il segnale viene convertito in un formato adatto per la trasmissione.
- (4) Trasmissione del segnale: il segnale viene trasmesso attraverso un mezzo di trasmissione, come ad esempio un cavo, un'antenna o un'onda luminosa (questo caso viene descritto a seguire).

Nell'OWC il trasmettitore lavora nel dominio elettrico e trasmettere segnali ottici. La trasmissione di un segnale prevede diverse fasi:

- (1) Generazione del segnale elettrico.
- (2) Processamento del segnale in banda base nel dominio elettrico.
- (3) Conversione elettro-ottica E/O.
- (4) Trasmissione del segnale attraverso la fibra ottica oppure wireless. La caratteristica di una comunicazione **wireless ottica** è che il trasmettitore e il ricevitore devono essere all'interno della regione illuminata field of view.

15.1.1. *Field of View*. Il FoV (**field of view**) indica la regione in cui il segnale ottico può essere trasmesso da un trasmettitore. (es. se un trasmettitore ha un FoV di 30 gradi, significa che può trasmettere il segnale ottico solo in quella direzione e solo se il ricevitore si trova all'interno dell'area coperta da quell'angolo.) Tutti i laser hanno dei requisiti di sicurezza.

Parentesi sul concetto di field of view:

I segnali Microonde hanno un field of view di centinaia di metri quadri.

i segnali radio hanno field of view che copre aree estese.

15.1.2. *Line of Sight*. Il collegamento wireless ottico deve essere effettuato in **line of sight**, con laser ottico centrato rispetto a trasmettitore ottico deve essere centrato rispetto al trasmettitore. Se due dispositivi sono in LoS, significa che possono "vedersi" l'un l'altro e che la linea diretta tra i due è priva di ostacoli che potrebbero interferire con la trasmissione del segnale.

15.1.3. *Applicazioni*. Si tratta di una tecnologia non recente, ma ancora viene studiata, viene svolta ricerca, non è decollata. Si parla di LightFI (termine simile a WiFi) per indicare lo standard per le comunicazioni ottiche.

- (1) connessione wireless ottiche.
- (2) luce LED, viene vista luce continua ma in realtà si accende e spegne alla frequenza di 1 GHz.
- (3) nello spazio libero collegamenti ottici tra satelliti.
- (4) Si prospetta che ci siano IoT Internet of things teleguidati dalla luce (perché è direzionale, posso usare un fascio molto stretto e quindi localizzazione molto precisa).
- (5) Body Area Networks: si può riempire il corpo di sensori, si può utilizzare un tipo di comunicazione VLC
- (6) Personal Area Network: PAN
- (7) Vehicular ad hoc Networks VANET, si usano segnali ottici per guidare i veicoli
- (8) Underwater optical wireless communication: l'idea è quella di sostituire le onde acustiche (onde di pressione, spostato l'area, spostato l'acqua, si propaga a velocità $<<c$) con quelle ottiche (sono campi elettromagnetici che si propagano, quindi sia nel vuoto sia tramite mezzi, si propaga a velocità c nel vuoto, velocità ridotta nei mezzi). L'acqua rallenta l'onda elettromagnetica e si può verificare il fenomeno di scattering che attenua ancora il segnale.

15.1.4. *Decibel*. I decibel (dB) sono un'unità di misura logaritmica comunemente usata nella trasmissione di segnali ottici. In particolare, i dB vengono utilizzati per esprimere il rapporto tra la potenza del segnale ottico **trasmesso** e la potenza del segnale **ricevuto**. Per esempio, se la potenza del segnale trasmesso è di 1 milliwatt (mW) e la potenza del segnale ricevuto è di 0,1 mW, il rapporto tra le due potenze è di $\frac{1}{0,1} = 10$ e il valore in decibel corrispondente è di 10 dB.

$$x_{dB} = 10 \log_{10} x$$

$$10 \log_{10} 2 = 3dB?$$

$$10 \text{ è } 10dB$$

$$100 \text{ è } 20dB$$

$$1000 \text{ è } 30dB$$

Si utilizza la scala dBm, che misura le potenze in milliwatt $10 \log_{10} 10$ sono 10 dbm (una potenza). I segnali di potenza si possono amplificare o attenuare.. Segnale di 10 milliwatt che si propaga nello spazio libero e si attenua del fattore 10 (coefficiente di attenuazione) allora arriva al ricevitore 1 milliwatt. Potenza del segnale viene divisa per 10. In scala logaritmica dBm $10dBm$ (segnale) - 10 (attenuazione) = 0 dBm.

16. LUCE (VISIBILE, INFRAROSSO E ULTRAVIOLETTO)

La luce è un'onda elettromagnetica che si propaga nello spazio libero o nel mezzo guidato (es. fibra ottica). La luce si divide in diverse regioni dello spettro elettromagnetico, tra cui quella visibile, l'infrarosso e l'ultravioletto. Esiste un dualismo onda particella che permette di studiare il campo elettromagnetico come un insieme di fotoni.

16.1. Luce studiata come onda elettromagnetica

. Per studiare la propagazione di un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto, si fissa un asse nel tempo o nello spazio, e si nota che l'onda oscilla rispettando la relazione $\lambda * f = c$ (lunghezza d'onda * frequenza = velocità della luce)

È anche possibile usare un modello geometrico per cui la luce è composta da raggi, che può essere utile per studiare la **Riflessione**, **Rifrazione**. La luce viene considerata come una serie di raggi che si propagano in linea retta e che cambiano direzione o quando incontrano un ostacolo (o quando cambia mezzo, es. vuoto acqua).

- Un esempio di **Riflessione** si verifica quando la luce incide su uno specchio completamente riflettente. Una caratteristica della riflessione è che il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie di riflessione giacciono sullo stesso piano. L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza (legge di Snell).

Nelle telecomunicazioni un esempio può essere una sorgente di luce, come un fascio laser, che viene inviata attraverso una fibra ottica verso un fotodiodo che deve riceverlo. La luce all'interno della fibra si propaga tramite riflessioni totali interne alle pareti della fibra stessa, in modo che la luce rimanga confinata all'interno della fibra e non si disperda. Tuttavia, se la fibra incontra un ostacolo, come un angolo o una piega, una parte della luce può essere riflessa indietro lungo la fibra stessa, invece di continuare a propagarsi verso il fotodiodo.

- Un esempio di **Rifrazione** può essere una cannuccia che sembra piegata in un bicchiere d'acqua. Quando la luce incontra una superficie composta da due mezzi diversi, la luce non prosegue dritta, ma si discosta o si avvicina alla normale. Si verifica perché acqua e aria hanno **indice di rifrazione** diverso (indice di rifrazione cambia a seconda del mezzo, vuoto 1 acqua 1.3 vetro 1.5, acqua otticamente più densa dell'aria). Una conseguenza della rifrazione è che la velocità della luce nel mezzo cambia (a seconda dell'indice di rifrazione del mezzo). In particolare più il mezzo è otticamente denso, più la luce rallenta.

Attenzione: l'indice di rifrazione non dà informazioni sul fatto che il segnale si attenui o niente del genere.

Quando il raggio passa da un mezzo **meno denso (aria)** ad uno **più denso (acqua)** l'angolo di rifrazione Θ_2 è minore dell'angolo di incidenza Θ_1 (come nella figura nella slide). Invece quando passa da un mezzo più denso ad uno meno denso, il raggio si allontana dalla normale.

L'indice di rifrazione $\frac{n_1}{n_2}$ è uguale al rapporto $\frac{v_1}{v_2}$ tra la velocità della luce nel vuoto e quella nel mezzo considerato e uguale al rapporto dei seni.

Il fenomeno della **riflessione** totale viene utilizzato nella fibra ottica, il cilindro di vetro che lo compone (core) si comporta come uno specchio, inoltre il core ha indice di **rifrazione** maggiore del cladding (altro componente).

- **Diffrazione** (fenomeno che non segue più l'ottica geometrica): quando si deve far passare luce attraverso una fenditura, se la fenditura è di dimensione comparabile alla lunghezza d'onda si generano onde sferiche, la proiezione si allarga (diffrange).

Il laser ha una caratteristica che il LED non ha: la coerenza. Ossia la capacità della luce di mantenere una fase costante e uniforme, ovvero tutti i fotoni nel fascio laser hanno la stessa frequenza e sono in fase tra di loro.

D'altra parte, la luce emessa da un LED (diodo emettitore di luce) non è coerente, poiché i fotoni non sono in fase tra di loro e hanno una gamma di frequenze leggermente diverse.

Quanto alla diffrazione, **la luce laser diffrange meno rispetto alla luce emessa da un LED**. La luce laser ha una lunghezza d'onda molto più corta e una maggiore coerenza spaziale rispetto alla luce emessa da un LED. Queste proprietà permettono alla luce laser a parità della dimensione della fenditura, di diffrangersi meno rispetto alla luce emessa da un LED.

Solo nell'ottica wireless bisogna preoccuparsi della diffrazione.

- Se però la luce si propaga nell'atmosfera si verifica il fenomeno della **Diffusione** (o scattering). In particolare se le particelle hanno dimensioni molto più piccole ($< \frac{1}{10}$) della λ della luce incidente, la diffusione è isotropa (avviene con uguale intensità in tutte le direzioni).

Fenomeno che spiega perché il cielo è blu. La luce del sole è luce bianca, quando la luce solare arriva sulla Terra interagisce con le particelle presenti nell'atmosfera, come molecole di gas, particelle di polvere e goccioline d'acqua. Poiché la luce blu ha una lunghezza d'onda più corta rispetto agli altri colori, essa viene più facilmente dispersa dall'atmosfera e quindi si diffonde in tutte le direzioni.

Nella propagazione delle fibre ottiche lo scattering si verifica se ci sono impurità/ Si verifica se piove, perché le particelle dell'acqua diffondono la luce in tutte le direzioni ed il segnale laser arriva al ricevitore attenuato.

Scattering proporzionale alla quarta potenza della frequenza.

- **Interferenza**: somma dei due segnali, l'intensità totale è pari alla somma delle due intensità. (Interferometro di Young). Se sottrai in fase annulli il segnale (interferenza distruttiva) se sommi in fase il segnale raddoppi l'intensità (interferenza costruttiva).

16.2. Luce studiata come insieme di fotoni.

La legge $E = h\nu$ dice che l'energia di un fotone (o quanto) è uguale al prodotto costante di Planck * la frequenza. La materia interagisce con la luce solo come pacchetti di energia (quanti). Tramite meccanismi di 1. assorbimento (utilizzato dai fotodiodi per rilevare la luce) 2. emissione spontanea (utilizzato dai LED) 3. emissione stimolata

(laser).

La struttura di base di un diodo è: un componente elettronico costituito da una **giunzione pn**, ovvero una giunzione tra due materiali semiconduttori diversi, tipicamente silicio o germanio. Materiali semiconduttori sono il silicio, il germanio, arseniuro di gallio sono composti ternari e quaternari composti da reticolo periodico, quindi la struttura semiconduttore è tale che tutti gli elettroni sono legati tra di loro così che possono assumere energia sufficiente per passare a banda di conduzione. I semiconduttori hanno anche un'energia di banda proibita o band gap, oltre la quale è possibile far passare un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Nessun elettrone può assumere tale energia.

I fotorivelatori sono utilizzati nelle comunicazioni ottiche wireless e in fibra. Sono ricevitori e trasformano segnale ottico in elettrico. Deve esserci dispositivo che converte fotone in elettrone, quelli che usiamo in fibra ottica sono i fotodiodi, che possono essere: 1. fotodiodi PIN o 2. a valanga. I nostri cellulari hanno sensori di immagine, sono fotodiadi CCD.

Ci sono solo 3 meccanismi per interazione di fotoni (interazione luce con la materia): Il fenomeno di **assorbimento** viene usato per rivelare luce. Per generare viene usato fenomeno opposto, creando sorgente di fotoni. Posso scegliere **emissione spontanea** attraverso i LED oppure con **emissione stimolata** tramite laser.

- **Assorbimento:** I fotodiodi utilizzano l'assorbimento come meccanismo per rilevare la luce. Un diodo è una giunzione pn, (una parte di semiconduttore drogato di tipo p e di tipo n) polarizzata in inversa (come un circuito aperto, non passa corrente finché non arriva fotone). I semiconduttori sono il silicio, il germanio e arseniuro di gallio. Sono composti ternari e quaternari composti da reticolo periodico. Struttura reticolare crea semiconduttori. La struttura del semiconduttore è tale che gli elettroni possano assumere energia e passare alla cosiddetta banda di conduzione. **L'energia del fotone viene assorbita e un elettrone si sposta dalla banda di valenza (l'elettrone lascia un buco chiamato lacuna) e passa in banda di conduzione e dà luogo alla corrente. Il numero di fotoni diminuisce e si ottiene una coppia pn (p = lacuna, n = elettrone).** Per ripetere il concetto, l'elettrone assorbe l'energia del fotone ed in questo modo dalla banda di valenza riesce ad andare in banda di conduzione dando luogo a corrente (si ha in questo modo la conversione ottico-elettrica). Un fotone è un quanto di energia con vale $h\nu = E_2 - E_1$. Per ogni fotone si crea una coppia pn. Non tutti i fotoni possono essere assorbiti, l'energia del fotone deve essere maggiore dell'energia di banda gap (zona proibita). Deve essere rispettata la relazione per cui l'energia del fotone (costante di planck * frequenza) sia maggiore del band gap: $h\nu > E_{band}$. In questo modo elettrone può passare a banda di conduzione superando la banda proibita. In funzione della frequenza del fotone, o meglio della sua lunghezza d'onda, scelgo semiconduttori adeguati con band gap diverso. Ad esempio se voglio assorbire lunghezze d'onda che vanno da 800 in poi, uso semiconduttore al germanio in quanto band gap soddisfa questa condizione.

In generale, la descrizione fornita sembra corretta per quanto riguarda il funzionamento di un fotodiodo e l'assorbimento della luce nei semiconduttori. Tuttavia, ci sono alcune inesattezze o ambiguità nella descrizione che potrebbero essere chiarite:

Mentre è vero che i fotodiodi utilizzano l'assorbimento della luce per rilevare la luce, non è corretto dire che un fotodiodo è "come un circuito aperto, non passa corrente finché non arriva fotone". In realtà, quando la giunzione pn del fotodiodo è polarizzata in inversa, c'è una piccola corrente di buio che fluisce attraverso il diodo a causa di processi di generazione e ricombinazione di coppia di elettroni e lacune, ma questa corrente è molto piccola rispetto alla corrente di fotocorrente generata dall'assorbimento della luce.

La descrizione della struttura reticolare dei semiconduttori e della loro capacità di assorbire l'energia della luce per eccitare gli elettroni nella banda di conduzione è corretta. Tuttavia, la descrizione dei semiconduttori come "composti ternari e quaternari composti da reticolo periodico" potrebbe essere un po' ambigua o fuorviante. In realtà, i semiconduttori sono materiali cristallini costituiti da atomi di silicio, germanio, arseniuro di gallio, o altri elementi, organizzati in una struttura cristallina periodica. La struttura cristallina è ciò che conferisce ai semiconduttori le loro proprietà elettroniche uniche.

La descrizione della creazione di coppie di elettroni e lacune di carica dall'assorbimento della luce è corretta. Tuttavia, la descrizione della "diminuzione del numero di fotoni" potrebbe essere fuorviante. In realtà, la quantità di fotoni che vengono assorbiti dipende dalla intensità della luce e dal coefficiente di assorbimento del materiale, ma ogni fotone assorbito genera solo una coppia di elettrone e lacuna, indipendentemente dalla quantità di fotoni.

Infine, la descrizione della relazione tra l'energia del fotone e il band gap del semiconduttore è corretta. Tuttavia, la descrizione della scelta del semiconduttore in funzione della frequenza del fotone potrebbe essere fuorviante. In realtà, la lunghezza d'onda della luce è inversamente proporzionale alla sua frequenza, quindi un semiconduttore con un band gap più grande sarebbe adatto per assorbire fotoni ad una lunghezza d'onda più breve e ad una frequenza più alta, non viceversa come descritto nella descrizione.

- Emissione spontanea (LED). I LED generano la luce grazie all'emissione spontanea. Si usa sempre giunzione pn con elettrone che decide di decadere spontaneamente, l'elettrone si ricongiunge a lacuna in regione di giunzione, generando fotone di energia pari a band gap (salto di energia). Il problema dei LED è che ogni elettrone cade in maniera indipendente, generando fotoni in direzione indipendente e fase random, creando **radiazione incoerente**. Anche per i LED ho bisogno di diodo, con giunzione pn polarizzata direttamente (scorre corrente), ovvero si fa passare cariche all'interno, mandando elettroni e lacune dentro a dispositivo che si ricombinano tra di loro e formano luce (si perde energia che definisce fotone). Si parla di **diodo polarizzato direttamente** (e non inversamente come il fotodiodo). Tutto dipende dal band gap e dal semiconduttore per ottenere colore luce. No silicio e germanio per LED, ma solo arseniuro di gallio etc (limite fisico). Non esistono LED bianchi, e per fare ciò vengono mischiati 3 led blu, rosso e verde, diventando bianco. Questo perché energia che si genera dopo ricongiunzione è proporzionale a band gap e quindi a semiconduttore. Per tirare fuori i fotoni uso o una giunzione pn, prendendoli tramite led ad emissione laterale oppure in direzione ortogonale in direzione della corrente, ottenendo emissione superficiale di Burrus. Accendere vuol dire dare impulso di corrente, passano elettroni, si ricombinano e mi danno fotoni. Se non voglio emettere luce, basta non dare corrente.
- Emissione stimolata (laser, diodi polarizzati direttamente, viene messa in input una corrente). Quando un fotone incide sul semiconduttore stimola un elettrone a decadere dalla banda di conduzione a quella di valenza. L'emissione si dice stimolata perché genera un fotone esattamente identico.
 - (1) Entra un fotone
 - (2) Il fotone stimola l'elettrone a decadere
 - (3) L'elettrone si ricombina con la lacuna e genera fotone identico.

Bisogna creare **inversione di popolazione** (all'equilibrio termodinamico ci sono pochi elettroni in banda di conduzione, invece per l'emissione stimolata ne serve un elevato numero), serve un pompaggio per ottenere più elettroni in banda di conduzione che in banda di valenza. **Al laser si applica una corrente maggiore rispetto a quella che applicata al LED** (proprio per il pompaggio). Il dispositivo viene illuminato da dei fotoni, i fotoni inducono a emissione stimolata. Serve una cavità risonante (degli specchi) in maniera che stabilisca una condizione di moto stazionario, in cui i fotoni che si propagano, stimolano elettrone a decadere, i fotoni vengono poi riflessi dallo specchio e tornano indietro (si crea moto stazionario all'interno della cavità). Non servono specchi esterni, è sufficiente sfruttare la rifrazione: l'indice di rifrazione di un semiconduttore è molto alto, dell'aria molto basso, quindi riflette al 30%. L'Emissione stimolata produce una radiazione coerente. Sia laser che LED sono trasduttori, cioè è possibile passare da segnale di corrente a ottica. Se siamo sotto la corrente di soglia, si ha poca luce emessa, altrimenti si segue proporzionalmente la corrente di iniezione. Se si aumenta ancora di più si raggiunge una saturazione della curva. Posso utilizzare il laser in due modi:

- (1) Modulazione on-off keying: per trasmissione digitale accendo il laser bit 1 (impulso di corrente maggiore della soglia), lo lascio spento bit 0.
- (2) per trasmissione analogica posso convertire segnale elettrico in ottico: prendo il segnale elettrico, polarizzo il laser (corrente > corrente di soglia) e genero segnale ottico.

Spettro di emissione dei laser molto più piccolo del LED, comparabile ad impulso matematico (delta di Dirac) e sono anche più efficienti, raggiungono potenze di emissione elevate. Come per i LED i laser possono essere accoppiati, tra la regione p ed n si generano i fotoni. Successivamente la fibra viene attaccata al laser. Il dispositivo viene chiuso ermeticamente evitando che umidità crei problemi al semiconduttore.

16.2.1. Fotodiodi Pin

. Fotodiodi sono giunzioni pn, ovvero una parte definita da semiconduttore drogato di tipo p e una parte definita da semiconduttore drogato di tipo n. è polarizzato in inversa e se fotone incide, si crea coppia pn che viene accelerato da campo elettrico esterno generando corrente. P (regione drogata con lacune), N (regione drogata con elettroni), I (regione intrinseca non drogata, dove si trovano i fotoni). Vengono trascinate verso circuito esterno dando luogo a corrente. Struttura fotodiodi pin definita da regione drogata di tipo p, n e intrinseca. Fotoni illuminano e vengono assorbiti in intrinseca, generando coppia pn. Le lacune positive si spostano verso anodo, mentre elettroni verso catodo e si misura corrente. Più si manda luce con numero di fotoni che incidono su dispositivo più aumenta corrente su dispositivo in maniera proporzionale. Tipicamente sono circolari, in modo da incollare fibra e solo una

parte viene illuminata da luce, il resto cerco di renderlo buio per evitare di prendere luce da altra parte e ha uno strato anti riflessione. Si comporta come circuito aperto senza corrente e si chiude solo quando passa fotone. Si usa poi amplificatore esterno una volta trasformato segnale da ottico a elettrico. Tutti dispositivi semiconduttori funzionano male se riscaldati, perché elettroni possono passare a banda di conduzione pure senza fotone (NOME ??).

16.2.2. Fotodiodi a valanga

. La sensibilità (quanta energia luminosa ricevo e quanta corrente genero) è migliore rispetto ai PIN ma sono più costosi. e rumorosi Si applica tensione di 100 Volt, la coppia si propaga nel campo, urtano altri elettroni del reticolo, li liberano ossia creano altre coppie pn, e creano effetto a cascata. 1 fotone genera 500 elettroni lacuna. Per ripetere il concetto. La differenza di potenziale elevata porta gli elettroni ad accelerare e urtare tra di loro (e liberare altri elettroni), creando effetto a cascata.

17. FIBRA OTTICA

La fibra ottica è costituita da un nucleo (core) e da un mantello (cladding). In più rivestimento per proteggere la fibra. Indice di rifrazione del core deve essere maggiore di quello del cladding, con il fenomeno della riflessione totale. La luce viene tutta riflessa all'interno del core, rimane confinata all'interno della fibra e rimane così per chilometri. La luce attraversa il nucleo e poi "incontra" il mantello. Quando la luce raggiunge il mantello si creano un angolo di riflessione e un angolo di incidenza (uguali), parte della luce viene trasmessa nell'altro mezzo rispettando la legge di Snell (Si verificano rifrazione + riflessione, ma la situazione varia al variare dell'angolo). Se l'angolo di incidenza è più piccolo dell'angolo critico, ho perdita di luce nel mantello, altrimenti se angolo di incidenza è maggiore dell'angolo critico, il segnale viene completamente riflesso e viene trasmesso in questo modo per chilometri. . Raggiunta questa condizione tutta l'energia rimane dentro il core e ottengo riflessione totale interna. Dipende tutto dal salto d'indice (indice di rifrazione nucleo e cladding).

I raggi che danno luogo a un modo stazionario si chiamano modi di propagazione (e non sono leaky, non ci sono perdite). Il 95% delle fibre installate nel mondo sono mono-modo (serve una combinazione di caratteristiche: raggio del nucleo (core) piccolo, indice di rifrazione n, lunghezza di banda.). Al core della fibra va accoppiato il laser. Se il nucleo è piccolo la fibra è mono-modo. L'Apertura numerica (o angolo di accettazione) indica quanta luce riesco ad accoppiare dentro il nucleo.

In fibra ottica il segnale si attenua aumentando la distanza, con un andamento più o meno esponenziale. Si attenua a causa dell'assorbimento (vetro assorbe fotoni, fenomeno più raro), scattering (si creano impurità che fanno da centro di diffusione, quindi il numero di fotoni che continua a viaggiare dentro la fibra diminuisce, fenomeno più frequente), inoltre curvatura (si perde l'angolo e la luce si trasmette anche nel mantello, se la fibra è fatta in vetro (esistono delle soluzioni anche in plastica) si rompe). Tre finestre di lunghezze d'onda, tre generazioni di comunicazione in fibra ottica. La migliore è la terza finestra perché l'attenuazione è minima. Le lunghezze d'onda che si usano nelle comunicazioni in fibra ottica sono diverse, la 1550 nm per le dorsali, (es. oceaniche) per le fiber to the home 850nm.

Adesso che la capacità di banda sta diminuendo si stanno iniziando ad utilizzare fibre multi-modo e hanno un nucleo grande. Apertura numerica grande per core grande e si usano per sistemi brevi a basso costo. Le fibre multi modo vengono usate di meno per la dispersione intermodale (che limita il bit rate), se eccetto due modi quello che succede è che quando mando un impulso, uno si propaga riflettendosi mentre l'altro si propaga in modo fondamentale, ho due copie del segnale, il risultato è che il segnale si "allarghi", inoltre il segnale riflesso (non fondamentale) leggermente ritardato. Se trasmessi troppo vicini il rilevatore ne potrebbe leggere 1 solo, invece di 2 consecutivi. Tutte le dispersioni limitano il bit rate. Le fibre multimodo possono essere usate per bit rate bassi.

Attenuazione dovuta anche dalle giunzioni, per natura intrinseca o estrinseca. Bisogna evitare perdite dovute a segnale che torna indietro. Se si hanno fibre tagliate male o con aria in mezzo, queste funzionano male. Si possono avere giunti a fusione per fondere le estremità, portando temperatura dei core a livelli molto alti, così da fondere i due core. È possibile cercare di mantenere estremità a contatto, con giunti meccanici, che sono fissi e cercano di minimizzare perdite tra i diversi core, inserendo un gel per evitare aria tra core e sono una via di mezzo tra i giunti a fusione i connettori. I connettori ottici invece cercano di ridurre la return loss etc e ne esistono di diversi tipi.

18. SISTEMI DI TRASMISSIONI A MICROONDE

Basta una sola antenna per ricevere e per trasmettere, i segnali sono abbastanza direzionali (“abbastanza” perché lo sono di meno rispetto alla luce, gli ostacoli sono confrontabili con la lunghezza d’onda che nella luce è mini, se per la luce un atomo di Ossigeno è un ostacolo, per un’onda microonde un segnale stradale è un ostacolo). Le antenne sono sempre costituite da un filo elettrico in cui scorre corrente che genera un campo elettromagnetico. Anche qua abbiamo scattering e multipath, con arrivo di più copie del segnale trasmesso attenuate e ritardate, non permettendo di riconoscere esattamente segnale trasmesso. L’antenna di riferimento è l’antenna isotropa, il guadagno di un antenna viene calcolato confrontandolo con quello del radiatore isotropo (“decibel rispetto all’isotropo”, il guadagno si calcola facendo un rapporto in scala lineare ossia ad una differenza in scala dB). L’antenna delle macchine si chiama omnidirezionale, ricrea un bipolo hertziano che genera un campo elettromagnetico, si genera un campo in modo omogeneo come una sfera. Quello che importa per le antenne è la direzionalità, si può pensare di costruire un insieme di antenne direzionate e si costruisce un “Phased array”, antenne usate per i cellulari. Un cellulare ha un set di antenne.

18.1. Perdite di propagazione. Perdite di propagazione Dipendono da attenuazione del cavo. Nello spazio libero invece le perdite si studiano semplicemente considerando collegamento punto-punto tra antenna che riceve e una che trasmette. Considerando antenna isotropa, mi interessa solo segnale a microonde che arriva a ricevitore, tutto il resto della sfera non interessa, quindi densità di potenza (cioè potenza per unità di superficie) è $\frac{P_t}{4\pi d^2}$. Se sostituiamo antenna isotropa con trasmittente, moltiplico potenza per guadagno. Non si può fare nulla, se non definire antenne più performanti.