

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Comunicazioni Ottiche In Spazio Libero

Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Delle Telecomunicazioni

Relatore:
Prof. Marco Santagiustina

Presentata da:
Matteo Bernardello

A.A. 2010-2011

Sommario

L'obiettivo di ogni sistema di comunicazione è il trasferimento di informazione da un punto ad un altro. Questo processo avviene molto spesso attraverso la modulazione di un'onda elettromagnetica, cioè associando l'informazione ad un specifico parametro dell'onda stessa, detta portante. Quest'onda viene poi propagata verso la destinazione, dove il ricevitore la demodula ricavando l'informazione originale.

In base alla posizione della portante nello spettro elettromagnetico (cioè in base alla sua frequenza o lunghezza d'onda) si possono distinguere i sistemi di trasmissione principalmente in sistemi a radiofrequenza e sistemi ottici.

Scopo di questa tesina è caratterizzare i sistemi ottici non guidati, in cui la portante risiede nella regione dell'infrarosso, visibile o ultravioletto e viene propagata nello spazio circostante fino al ricevitore.

Utilizzare portanti ottiche genera diversi vantaggi quali:

- la possibilità di concentrare la potenza in fasci elettromagnetici molto stretti, con conseguente aumento della densità di potenza trasmessa;
- l'incremento della larghezza di banda del segnale modulato con l'aumento quindi della quantità di informazione trasmissibile;
- le ridotte dimensioni dei componenti;
- la possibilità di utilizzare una regione spettrale non sottoposta a licenza.

La prima parte dell'elaborato presenta la struttura di un sistema ottico generico, descrivendone i componenti quali le sorgenti, il canale e il ricevitore.

La seconda parte si focalizzerà nei sistemi ottici ad infrarosso in utilizzi indoor, confrontandoli con i sistemi a radiofrequenza e discutendo problematiche quali riflessioni e rumore generato dall'ambiente circostante.

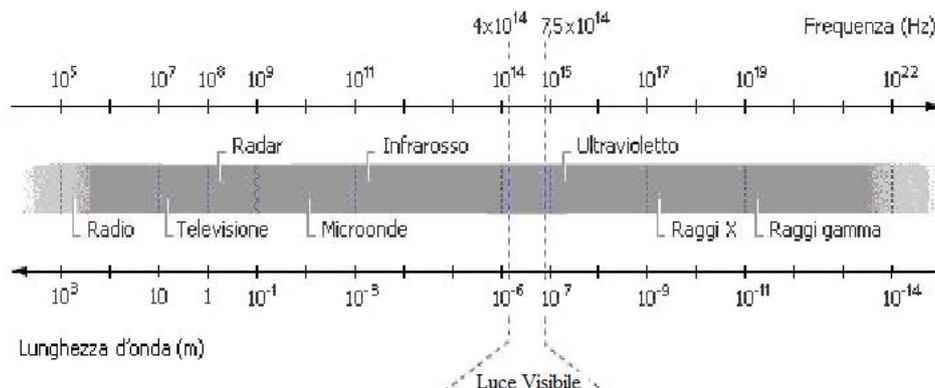


Figura 1: Spettro Elettromagnetico

Indice

I	I Sistemi Ottici: Generalità	3
1	Introduzione	4
2	La Trasmissione	6
2.1	Sorgenti Ottiche	6
2.1.1	Processo Spontaneo: Diodi LED	7
2.1.2	Processo Stimolato: Laser	7
2.2	La Modulazione	11
2.3	Il Campo Elettromagnetico Trasmesso	12
3	Il Canale Ottico	14
3.1	Il Canale Atmosferico	16
4	La Ricezione	18
4.1	Fotorilevatori	19
4.2	Background Radiation	20
4.3	Filtri Ottici	22
4.4	Il Problema Del Puntamento	22
II	I Sistemi ad Infrarosso Indoor	23
5	Introduzione	24
6	Confronto: Infrarosso vs Radiofrequenze	26
7	Topologia dei sistemi	28
8	Limitazioni del Collegamento	30
8.1	La luce dell'ambiente	30
8.2	La sicurezza dell'occhio	34
8.3	Multipath	37
9	La ricezione	39
9.1	Filtri e Concentratori	39
9.2	Fotodiodi	42
10	Sistemi correnti: IrDA	47
10.1	Specifiche e Protocolli	48
10.2	Diffusione e Popolarità	50

Parte I

I Sistemi Ottici: Generalità

Capitolo 1

Introduzione

Il diagramma a blocchi di un generico sistema di comunicazione ottico non differisce molto da altri sistemi di comunicazione:

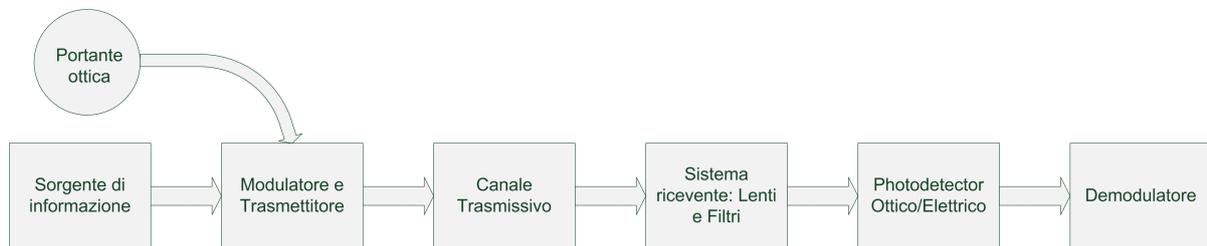


Figura 1.1: Schema a blocchi di un sistema ottico

Una sorgente produce il segnale $s(t)$ d'informazione (in forma analogica o digitale) che deve essere trasmessa e che gioca il ruolo di modulante nel blocco modulatore, affidando l'informazione ad una portante ottica. Il segnale $v(t)$ così formatosi viene propagato attraverso il canale fino al ricevitore; questo, attraverso un sistema di lenti, raccoglie parte del fascio elettromagnetico (assieme a radiazioni rumorose) e lo focalizza su un fotorilevatore, il quale converte il segnale ottico in un segnale elettrico.

Questo segnale passa (dopo un'adeguata amplificazione) attraverso il demodulatore che ricava l'informazione originaria.

Teoricamente ogni tipo di modulazione può essere applicata ad una portante ottica, come modulazioni AM, FM o PM; tuttavia altre meno convenzionali modulazioni sono largamente utilizzate: la modulazione di intensità IM (in cui l'informazione viene associata all'intensità della portante) e la modulazione di polarizzazione PLM, dove si agisce sulle caratteristiche spaziali dell'onda. Molto importanti sono anche le modulazioni numeriche PAM (modulazione di ampiezza) e PPM (modulazione di posizione).

I ricevitori ottici possono essere suddivisi in due categorie: ricevitori incoerenti e ricevitori coerenti.

I ricevitori incoerenti (Fig. 1.2a) presentano un front-end ottico in cui la lente e il fotorilevatore rivelano la potenza istantanea del fascio catturato. Questi ricevitori sono i più facili da implementare e vengono utilizzati nelle trasmissioni dette appunto "incoerenti", dove l'informazione è affidata alla potenza del segnale. La lunghezza d'onda della radiazione utilizzata determina anche la scelta del fotorilevatore.

I ricevitori coerenti (Fig. 1.2b) generano invece un campo elettromagnetico locale che viene fatto interferire con il campo ricevuto; l'onda così combinata viene poi fotorilevata. Questi fotorilevatori presentano prestazioni migliori ma anche una maggiore difficoltà

di implementazione, dovuta alla grande precisione necessaria sulla coerenza spaziale dei due fasci elettromagnetici che vengono fatti interferire.

Il sistema di lenti ha il compito di focalizzare sul fotorilevatore il campo ricevuto, permettendo così che l'area del sensore sia molto più piccola di quella della lente di ricezione. Inoltre dei filtri ottici possono essere collocati prima del fotorilevatore, con lo scopo di ridurre la quantità di radiazione indesiderata.

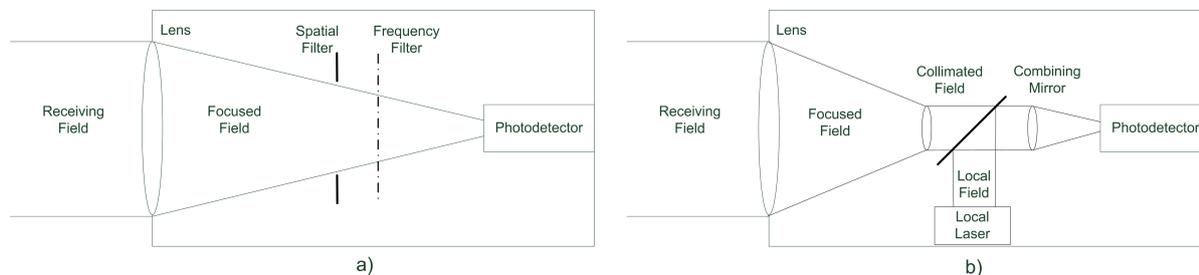


Figura 1.2: Schema di ricevitore a) incoerente e b) coerente

Capitolo 2

La Trasmissione

2.1 Sorgenti Ottiche

Un elemento chiave di ogni sistema di comunicazione ottica è la sorgente, ovvero quel dispositivo che fornisce la portante ottica da modulare. Le caratteristiche della sorgente sono infatti fondamentali per l'analisi delle prestazioni del sistema. Prima della loro classificazione e descrizione è utile però richiamare alcuni concetti fisici di base. Considereremo qui le sorgenti a semiconduttore, formate cioè da una giunzione pn .

I livelli di energia di un elettrone in un semiconduttore sono limitati a due bande, la banda di valenza e la banda di conduzione, separate da un energy gap ΔE : la banda di valenza contiene gli elettroni più fortemente legati agli atomi mentre la banda di conduzione contiene gli elettroni liberi o cariche mobili. Anche le lacune, intese come assenza di elettroni nella banda di valenza, possono costituire cariche mobili. Elettroni e lacune sono dette cariche maggioritarie rispettivamente nei semiconduttori di tipo n e nei semiconduttori di tipo p .

Il trasferimento di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione, con conseguente formazione di una coppia elettrone-lacuna, richiede un assorbimento di energia pari a:

$$\Delta E = E_c - E_v \quad (2.1)$$

differenza tra le energie della banda di conduzione e della banda di valenza.

Il processo inverso, cioè la ricombinazione tra elettrone e lacuna dovuta al passaggio dell'elettrone dalla banda di conduzione a quella di valenza, accade con un'emissione di energia pari a ΔE . Quest'energia può presentarsi in forma non radiativa o radiativa, con l'emissione cioè di un fotone avente energia:

$$\Delta E = h \cdot f \quad (2.2)$$

dove h è la costante di Planck e f è la frequenza della radiazione emessa, dipendente dalla scelta del materiale (cioè dall'energy gap ΔE).

Affinchè il processo di emissione di energia prevalga su quello di assorbimento è necessario che il numero di elettroni nella banda di conduzione sia maggiore di quella nella banda di valenza; questa situazione viene detta "inversione di popolazione", poichè non è la situazione naturale del semiconduttore. Per ottenere l'inversione di popolazione bisogna quindi fornire al sistema l'energia necessaria ad eccitare gli elettroni; in una giunzione pn questo corrisponde a polarizzarla direttamente permettendo quindi a una corrente

elettrica di attraversa la giunzione e, con l'azione detta "di pompaggio", somministrare l'energia necessaria all'inversione di popolazione.

Questo crea una condizione favorevole per la ricombinazione elettrone-lacuna, in quanto un elettrone che si sposta dalla regione n (in cui è carica maggioritaria) alla regione p (in cui diventa minoritaria) trova un grande numero di lacune con cui ricombinarsi. La loro ricombinazione implica così l'emissione di fotoni.

Il processo di decadimento degli elettroni dalla banda di conduzione a quella di valenza, che porta al processo radiativo, può essere spontaneo o stimolato.

2.1.1 Processo Spontaneo: Diodi LED

Le sorgenti LED (Light Emitting Diode) rientrano nel caso di decadimento spontaneo, in cui gli elettroni eccitati si riportano nella banda di valenza spontaneamente dopo un tempo caratteristico del materiale. In questo modo la radiazione emessa è formata da fotoni con direzione e fase aleatorie e quindi scarsamente direzionale; inoltre presentano una dispersione di cromaticità non trascurabile, ovvero la potenza in uscita è distribuita in un largo intervallo di lunghezze d'onda ($30 \div 60$ nm).

I led consentono velocità di trasmissione modeste poichè hanno un tempo di commutazione acceso-spento elevato e presentano una caratteristica corrente elettrica-potenza ottica con bassa potenza di picco, come evidenziato in figura:

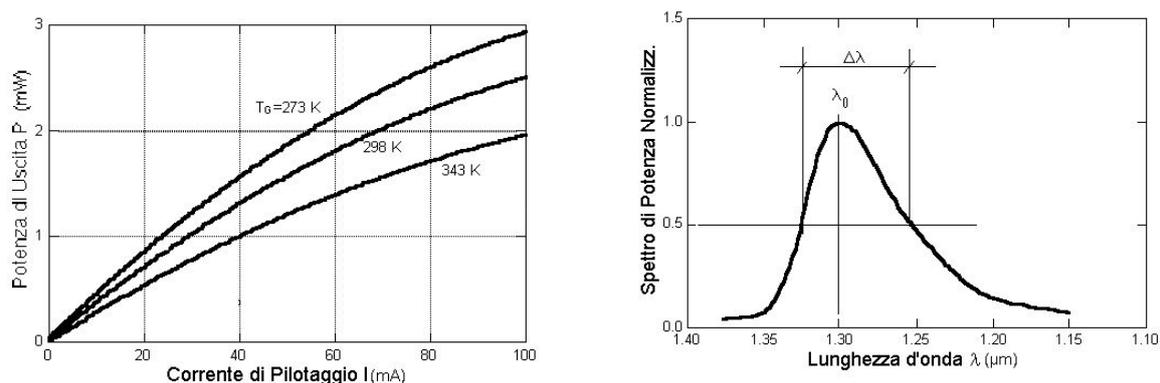


Figura 2.1: Caratteristiche di funzionamento per una sorgente LED

Tuttavia presentano anche diversi vantaggi: sono di piccole dimensioni, sono a lunga durata, richiedono una bassa corrente di pilotaggio e sono economici. Questo li rende adatti ad applicazioni consumer, cioè a corto raggio, bassa velocità di trasmissione o pochi dati da trasmettere ed economiche.

2.1.2 Processo Stimolato: Laser

I laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) rientrano tra le sorgenti ottiche a decadimento stimolato; ciò significa che un'onda elettromagnetica i cui fotoni hanno energia pari all'energy gap ΔE interagisce con gli atomi eccitati, stimolando il materiale a decadere in forma radiativa. I fotoni generati avranno così la stessa direzione e fase di quelli incidenti, formando una radiazione fortemente direzionale.

Un laser a semiconduttore (o diodo laser) è costituito principalmente da una giunzione pn e il fenomeno di ricombinazione elettrone-lacuna produce la radiazione luminosa; la

regione in cui avviene è però piuttosto estesa ($1 \div 10 \mu\text{m}$) producendo una perdita di efficienza. Un notevole miglioramento si ottiene aggiungendo tra le regioni n e p uno strato di un terzo materiale di piccolo spessore (tipicamente $0.1 \mu\text{m}$) e di indice di rifrazione superiore al resto della giunzione. Così facendo le dimensioni della regione di ricombinazione coincidono con quelle dello strato interposto, detto “regione attiva”, realizzando una elevata densità di portatori. In queste strutture, dette eterogiunzioni, la regione attiva funge da guida d’onda confinando la luce emessa in una piccola area.

Il principio di funzionamento di un laser si basa sulla retroazione positiva. La giunzione pn , polarizzata direttamente, presenta un guadagno ottico come conseguenza dell’iniezione di corrente, producendo la conversione elettrico-ottica. Inoltre la giunzione è racchiusa in una struttura geometrica tale da permettere il feed-back ottico; in altre parole una parte della luce amplificata viene riflessa per essere re-amplificata, producendo l’oscillazione quando il guadagno è abbastanza elevato da sostenere le inevitabili perdite. La retroazione ottica è l’elemento che distingue un laser da un amplificatore ottico a semiconduttore.

Una struttura laser di base è costituita dalla cavità Fabry-Perot, mostrata schematicamente in figura:

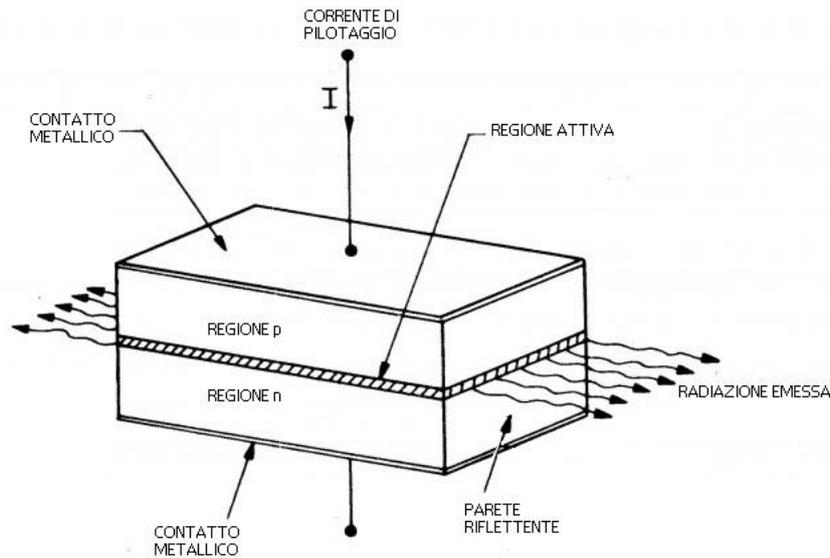


Figura 2.2: Laser basato su cavità Fabry-Perot

L’eterogiunzione è contenuta in una cavità rettangolare, con pareti parzialmente riflettenti su due facce opposte che fungono da specchi, provocando una parziale riflessione interna. In questo modo la luce viene riflessa avanti e indietro tra gli specchi, caratterizzata dall’amplificazione delle radiazioni a certe lunghezze d’onda dovute a interferenze costruttive. Questa risonanza avviene quando la distanza tra gli specchi coincide con un multiplo intero della metà della lunghezza d’onda desiderata, ovvero :

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad n \in Z \quad (2.3)$$

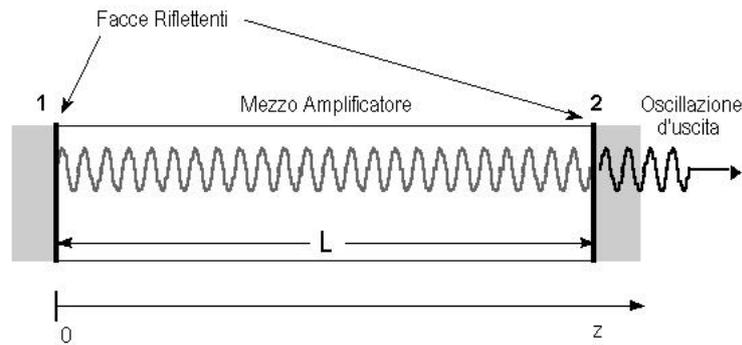


Figura 2.3: Interferenza costruttiva

Questo però non è sufficiente per ottenere l'effetto laser; è necessario infatti che il guadagno ottico sia tale da supplire alle perdite dovute anche ad emissione spontanea e ricombinazione non radiativa. La minima corrente di pompaggio richiesta per ottenere l'effetto laser è detta corrente di soglia I_s del laser: per $I \geq I_s$ quindi il guadagno ottico è superiore all'attenuazione. In figura si mostrano diverse caratteristiche della potenza ottica in funzione della corrente di pompaggio, in cui si evidenzia anche la sua dipendenza dalla temperatura:

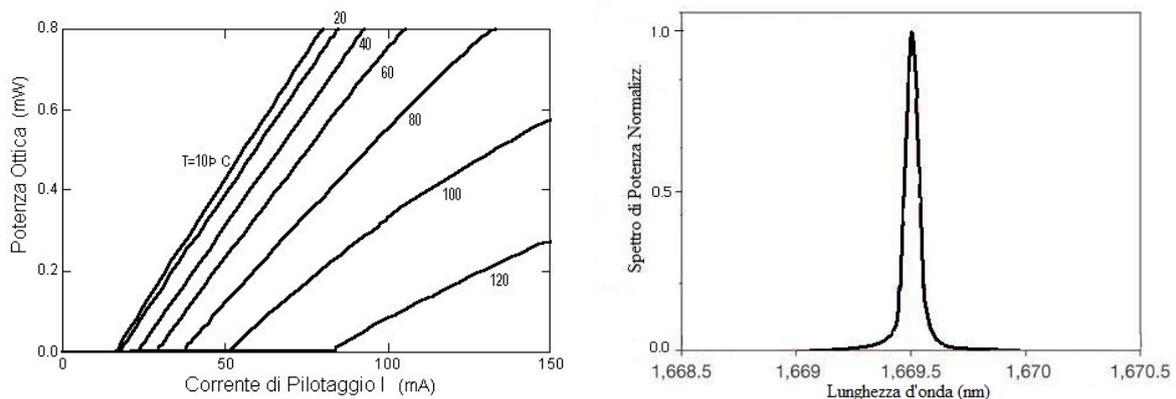


Figura 2.4: Caratteristiche di funzionamento per una sorgente Laser

Dalla relazione $L = n \lambda/2$ si evince che per più di una radiazione vale l'interferenza costruttiva e che quindi più di una radiazione viene amplificata, precisamente tutte le lunghezze d'onda

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n \in Z \quad (2.4)$$

soddisfano la condizione.

Lo spettro di emissione è così caratterizzato da più frequenze discrete modulate dalla curva di guadagno, ognuna delle quali identifica un modo longitudinale: si dice allora che il laser è un laser multimodale.

Laser a Singolo Modo Longitudinale

Le prestazioni del laser appena descritto possono essere migliorate permettendo a un solo modo longitudinale di essere trasmesso, ottenendo così la monocromaticità del fascio. Per fare questo si rimuovono le pareti riflettenti dalla cavità Fabry-Perot e si introducono perdite differenti in funzione della lunghezza d'onda. Diversi approcci sono possibili, ma i più comuni sono:

- DBR, Distributed Bragg Reflector;
- DFB, Distributed FeedBack.

Entrambi utilizzano un reticolo di rifrazione di Bragg (posto sulle facce laterali o lungo tutta la regione attiva) che concettualmente non è altro che una variazione periodica dell'indice di rifrazione. In questo modo la struttura si comporta come un mezzo quasi trasparente a certe lunghezze d'onda, e come un mezzo quasi totalmente riflettente ad altre lunghezze d'onda, permettendo l'interferenza costruttiva solo alle frequenze relative al periodo del reticolo di Bragg utilizzato.

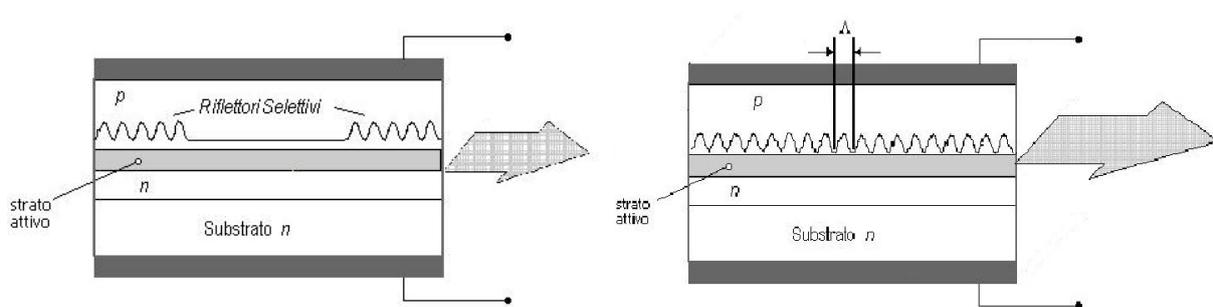


Figura 2.5: Strutture di Laser DBR e DFB

2.2 La Modulazione

La sorgente ottica può essere modulata sia direttamente che esternamente, con differenti prestazioni e costi. La modulazione diretta avviene associando al segnale di informazione la corrente di polarizzazione della giunzione; poichè la potenza ottica è legata a tale corrente di pilotaggio, l'intensità del segnale viene modulata dall'informazione. Questo metodo è il più economico e semplice da implementare. Poichè però variazioni della corrente di pilotaggio possono produrre variazioni dell'indice di rifrazione, possono dare luogo anche ad una modulazione di frequenza indesiderata: questo effetto, detto "chirp", produce un significativo allargamento dello spettro di uscita del laser. La modulazione diretta viene quindi evitata in applicazioni che necessitano di prestazioni elevate, su lunghe distanze o ad alti bit rate di trasmissione.

La modulazione esterna permette invece di eliminare l'effetto chirp: secondo questo approccio la potenza in uscita del laser è costante e viene modulata in seguito da un attenuatore (o phase shifter). Un tipico modulatore esterno implementa un interferometro Mach-Zehnder.

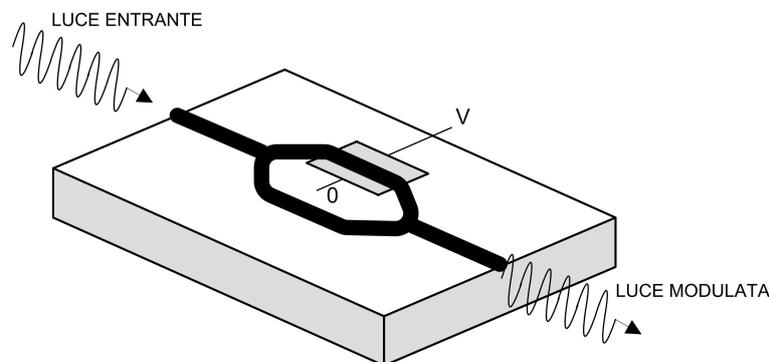


Figura 2.6: Interferometro Mach-Zehnder

In questo dispositivo la luce entrante viene divisa in due fasci uguali e poi ricombinata in uscita. Applicando agli elettrodi una tensione V si genera un cambiamento dell'indice di rifrazione e un relativo sfasamento nel punto in cui i due fasci vengono fatti interferire. Quando non è presente una tensione all'ingresso lo sfasamento è nullo e quindi la luce esce senza essere attenuata; quando la tensione produce uno sfasamento di π si genera un'interferenza distruttiva che annulla il segnale. Questo approccio, garantendo prestazioni migliori, è però più costoso poichè necessita di componenti aggiuntivi di elevata precisione.

2.3 Il Campo Elettromagnetico Trasmesso

Il campo elettromagnetico emesso dalla superficie radiante della sorgente è caratterizzato dall'angolo solido di emissione Ω_s e dalla funzione di luminosità $B(\theta)$ [$W/sr \cdot m^2$] che indica la distribuzione della potenza in uscita da una unità di superficie della sorgente in una certa direzione data dall'angolo planare θ .

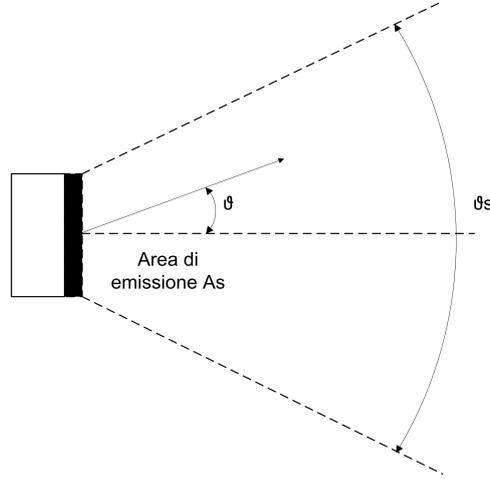


Figura 2.7: Angolo di emissione

Considerando una sorgente ottica uniforme, cioè tale che la funzione di luminosità sia costante per ogni direzione all'interno dell'angolo di emissione ($B(\theta) = B$), la potenza trasmessa può essere scritta come:

$$P_t = B \cdot A_s \cdot \Omega_s \quad [W] \quad (2.5)$$

dove A_s è l'area radiante. L'angolo di emissione può essere associato al corrispondente angolo planare θ_s dalla:

$$\Omega_s = 2\pi \left[1 - \cos \left(\frac{\theta_s}{2} \right) \right] \quad [sr] \quad (2.6)$$

L'angolo θ_s è la proiezione dell'angolo solido Ω_s su di un piano che ne attraversa il centro, ed è detto anche "apertura planare del fascio".

Il campo emesso può anche essere raccolto e rifocalizzato da una combinazione di lenti convergenti e divergenti, detto sistema di beam forming. Idealmente le lenti convergenti focalizzano il campo in un punto e le lenti divergenti lo espandono per creare un fascio collimato, in cui i raggi sono tra loro paralleli.

Nella pratica però il fascio collimato si espande durante la propagazione aumentando il proprio diametro d_z secondo la relazione:

$$d_z = d_t \cdot \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{d_t^2} \right)^2 \right]} \quad [m] \quad (2.7)$$

dove λ è la lunghezza d'onda del fascio, d_t è il diametro della lente di uscita e z è la distanza dalla lente stessa.

In un punto posto nella regione di campo vicino, ovvero per

$$\frac{\lambda \cdot z}{d_t^2} < 1 \quad (2.8)$$

la luce appare collimata, con un diametro di apertura pari al diametro d_t della lente. Se invece ci poniamo nella condizione complementare di campo lontano il fascio emerge da un singolo punto e il diametro aumenta con la distanza. In questo caso il fascio ha un'apertura planare θ_t pari a:

$$\theta_t \cong \frac{\lambda}{d_t} \quad [rad] \quad (2.9)$$

e quindi è confinato in un angolo solido Ω_t dato dalla:

$$\Omega_t = 2\pi \left[1 - \cos \left(\frac{\theta_t}{2} \right) \right] \cong \frac{\pi}{4} \cdot \theta_t^2 \quad [sr] \quad (2.10)$$

dove l'approssimazione vale per angoli θ_t piccoli, ipotesi concordante con la situazione di trasmissioni direttive.

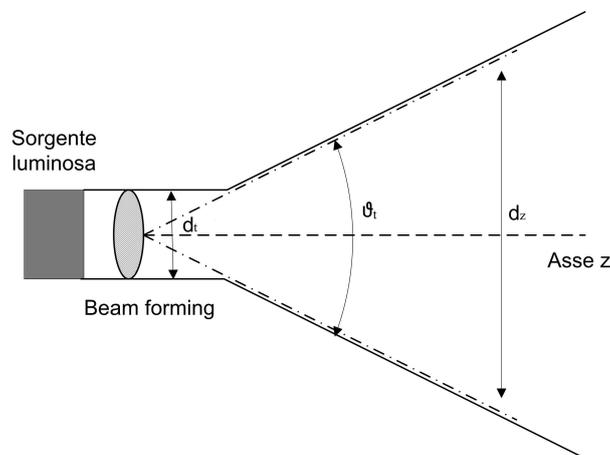


Figura 2.8: Sistema di beam forming

Dalla teoria delle antenne, un trasmettitore con apertura del fascio pari a Ω_t presenta un guadagno pari a:

$$G_t = \frac{4\pi}{\Omega_t} \cong \left(\frac{4d_t}{\lambda} \right)^2 \quad (2.11)$$

Da qui il vantaggio principale di utilizzare una portante posta nella regione ottica dello spettro, in quanto presenta lunghezze d'onda molto più piccole rispetto alle portanti a radiofrequenza, quindi un guadagno molto maggiore e di conseguenza aumenta la densità di potenza che può giungere a una determinata distanza:

$$\varphi = G_t \cdot \frac{P_t}{4\pi z^2} \quad [W/m^2] \quad (2.12)$$

Capitolo 3

Il Canale Ottico

Come detto in precedenza, nei sistemi la trasmissione dell'onda elettromagnetica può essere guidata o non guidata (wireless). Interesse di questa tesina è caratterizzare i sistemi non guidati, in cui il segnale si propaga senza essere confinato all'interno di una guida d'onda. Questo tipo di trasmissione può essere utilizzata in svariati contesti:

- semplici applicazioni quali apparati domestici (televisore, stereo, ecc...) e comunicazioni a breve distanza tramite porte IrDA (tra cellulari, tra computer e periferiche);
- collegamenti indoor per la creazione di reti locali (tra elaboratori di diversi uffici) e tra edifici vicini;
- collegamenti a lunga distanza (trasmissioni Terra-spazio e spazio-spazio).

Se consideriamo un sistema di trasmissione direttivo in cui l'antenna sorgente irradia una potenza P_t su un angolo solido Ω_t , il flusso di potenza irradiata alla distanza z è pari a:

$$\varphi = G_t \cdot \frac{P_t}{4\pi z^2} \quad [W/m^2] \quad (3.1)$$

dove G_t è il guadagno dell'antenna.

Quindi un'antenna ricevente di area (ortogonale al fascio) A_r posta ad una certa distanza z , cattura una potenza pari a:

$$P_r = \varphi A_r = G_t \cdot \frac{P_t}{4\pi z^2} A_r \quad [W] \quad (3.2)$$

La situazione è schematizzata in figura:

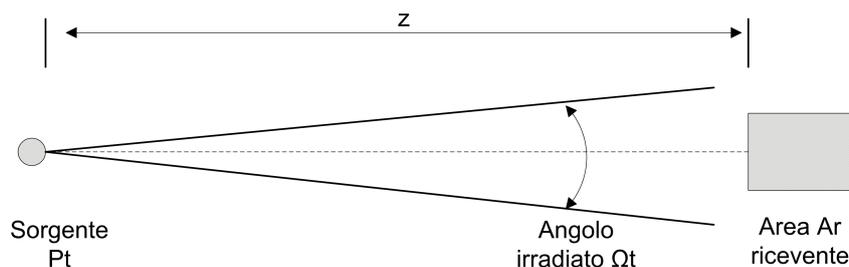


Figura 3.1: Schema del collegamento

Questa relazione valida per qualsiasi campo elettromagnetico prodotto da una sorgente con guadagno G_t , può essere riscritta nella forma:

$$P_r = P_t G_t L_p G_r \quad (3.3)$$

nota anche come formula di Friis, in cui si è definito il guadagno dell'antenna ricevente come:

$$G_r = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) A_r \quad (3.4)$$

Il termine L_p è detto attenuazione di spazio libero ed è pari a:

$$L_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi z} \right)^2 \quad (3.5)$$

Il contributo di questo fattore dipende solo dalla distanza z e non dalla natura del mezzo trasmissivo; in particolare non dipende dalla lunghezza d'onda λ associata all'onda elettromagnetica come erroneamente si potrebbe pensare.

Quando però il mezzo di propagazione non è lo spazio libero, si deve tener conto di effetti addizionali che tendono ad alterare i livelli di potenza e fasi dei fronti d'onda. Queste alterazioni dipendono dalla lunghezza d'onda e sono dovute principalmente all'interazione con disomogeneità del mezzo; esse diventano importanti quando la lunghezza d'onda è paragonabile alle dimensioni di queste particelle.

Una sintetica classificazione delle perdite introdotte dal mezzo può essere la seguente:

Perdite per assorbimento

In questi fenomeni una frazione di energia del fascio elettromagnetico che incide sulla disomogeneità del mezzo viene trattenuta dalle particelle. L'assorbimento che l'onda ottica subisce dipende fortemente dalla lunghezza d'onda, quindi il mezzo può essere caratterizzato da alcuni intervalli di frequenze in cui questa attenuazione è accettabile.

Perdite per scattering

Le perdite per scattering sono dovute all'interazione tra i fotoni e le particelle costituenti il mezzo; si tratta infatti di deviazioni in ogni direzione dei raggi del fascio luminoso:

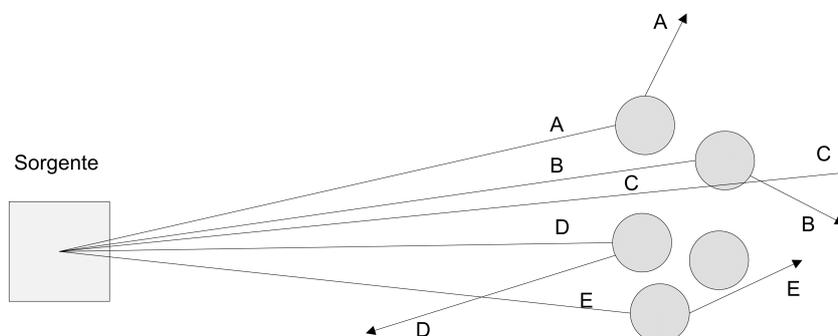


Figura 3.2: Perdite per Scattering

Un effetto particolare dovuto allo scattering è il multipath, ovvero i raggi diffusi dovuti a successive deviazioni possono giungere comunque al ricevitore, in cui si sommano

al raggio che ha seguito il percorso diretto. Questi raggi arrivano dunque con ritardo e quindi con uno sfasamento rispetto al raggio diretto, sfasamento che produce una distorsione del campo ricevuto. Poichè scattering e assorbimento sono legati tra loro, un fotone che incide contro una particella del mezzo subisce un assorbimento di energia. In questo modo il raggio deviato più volte avrà un'intensità minore rispetto al raggio diretto, rendendo l'effetto distorsivo meno significativo.

Perdite per rifrazione

Le perdite per rifrazione consistono appunto nella rifrazione del fascio e quindi in un cambiamento della sua direzione di propagazione. Questo può essere dovuto alla presenza di ostacoli nel percorso oppure a una variazione dell'indice di rifrazione. Ovviamente anche questo effetto è fortemente legato alla lunghezza d'onda.

3.1 Il Canale Atmosferico

L'atmosfera è composta da un insieme di gas, atomi, vapore acqueo e anche agenti inquinanti intrappolati dal campo gravitazionale terrestre. La più alta concentrazione di particelle si ha nella troposfera (che si estende fino ad un'altezza di 10-15 km), mentre va a diminuire con l'aumento dell'altitudine attraverso la ionosfera.

Perdite di potenza e distorsione sono causate dall'assorbimento e scattering del fascio elettromagnetico da parte delle particelle e questi effetti si fanno più evidenti all'avvicinarsi della lunghezza d'onda alle dimensioni fisiche dei corpuscoli; poichè queste variano dai millimetri ai micrometri, l'atmosfera può essere deleteria per le trasmissioni ottiche a certe lunghezze d'onda.

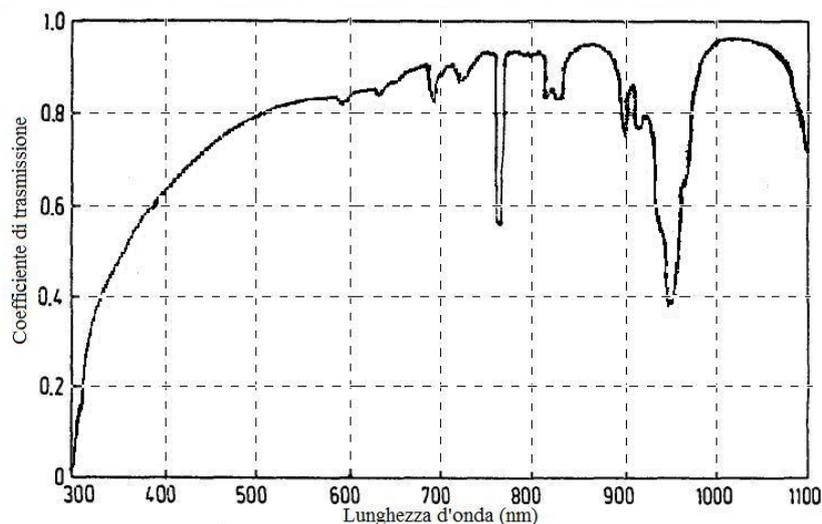


Figura 3.3: Coefficiente di trasmissione dell'atmosfera

Gli effetti sulla comunicazione dipendono anche dal tipo di collegamento:

- per collegamenti indoor l'assorbimento può essere quasi trascurabile, data la breve tratta percorsa dalla radiazione;

- per collegamenti Terra-spazio bisogna, oltre che tener conto di assorbimento e scattering, differenziare le considerazioni tra up-link e down-link, in quanto il trasmettitore si trova in posizioni diverse nei due casi.

Inoltre le condizioni atmosferiche influiscono notevolmente sulla trasmissione poichè possono aumentare la densità di particelle presenti nel percorso della radiazione. Possono presentarsi approssimativamente tre situazioni: cielo limpido (clear air), presenza di nuvole e pioggia.

La condizione di clear air è la situazione ottimale, caratterizzata da visibilità a lungo raggio e bassa attenuazione; in ogni caso però possono essere presenti correnti o gradienti di temperatura producenti cambiamenti dell'indice di rifrazione e conseguenti deviazioni del fascio.

La presenza di nuvole influisce in base alla quantità, altitudine e tipo di nuvole.

La pioggia invece costituisce la peggiore condizione a causa delle gocce che deviano il percorso della luce.

I parametri più importanti del mezzo sono le dimensioni delle particelle e la loro concentrazione volumetrica:

- bassa densità di larghi corpuscoli tendono a enfatizzare l'effetto di assorbimento rispetto allo scattering;
- alta densità di piccole particelle invece producono principalmente scattering e variazioni di fase lungo il fronte d'onda, ovvero "rottura del fascio".

Capitolo 4

La Ricezione

Nei ricevitori ottici il fascio in arrivo è focalizzato da un sistema di lenti sulla superficie del fotorivelatore, creando un campo focalizzato che rappresenta il campo osservato dalla lente.

Un semplice sistema è costituito da una lente di diametro d e area A_r e dal fotorivelatore posto sul piano focale della lente stessa (alla distanza f_c); il campo nel piano focale è usualmente detto campo difratto.

Considerando un'onda piana che investe la lente, il campo ricevuto sarà:

$$f_r(t, x, y) = \begin{cases} a_0 \cdot e^{j2\pi f_0 t} & \text{se } (x, y) \in A_r \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (4.1)$$

e, dalla teoria della diffrazione di Fraunhofer, il campo difratto risulterà una figura ad anelli concentrici, o fascio di Airy.

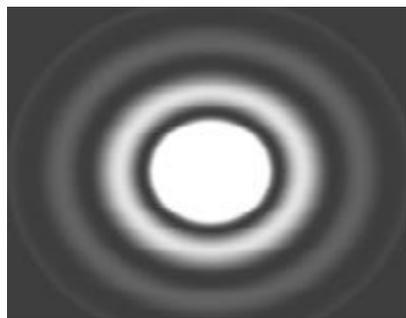
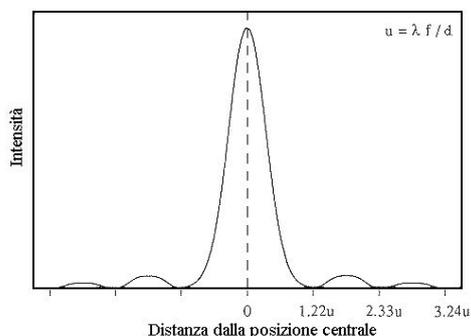


Figura 4.1: Andamento del campo difratto

Il lobo centrale, che contiene la maggior parte dell'energia (circa l'84 %), ha una larghezza pari a $2.44\lambda f_c/d$ nel piano focale. Poichè però generalmente le lenti vengono progettate con una lunghezza focale circa pari al diametro della lente stessa, il lobo centrale occupa una larghezza di circa 2.44λ , dell'ordine cioè dei micron, ovvero molto più piccola della dimensioni della lente.

Si può quindi definire l'apertura angolare del fascio difratto come:

$$\Omega_{dl} = \frac{\lambda^2}{A_r} \pi^2 1.22 \quad (4.2)$$

che diminuisce all'aumentare della frequenza.

Questo fa sì che le dimensioni del fotorivelatore possano essere minori rispetto a quelle della lente. Teoricamente il fotorivelatore potrebbe avere un'area pari a quella occupata dall'anello principale, ma in pratica è più grande, in modo da poter rilevare anche la potenza degli anelli concentrici.

Si definisce allora l'angolo solido Ω_{fv} (field of view) come l'angolo entro il quale devono arrivare le onde piane per poter essere proiettate sulla superficie fotorivelatrice di diametro d_d e area A_d :

$$\Omega_{fv} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_d}{f_c} \right)^2 = \frac{A_d}{f_c^2} \quad (4.3)$$

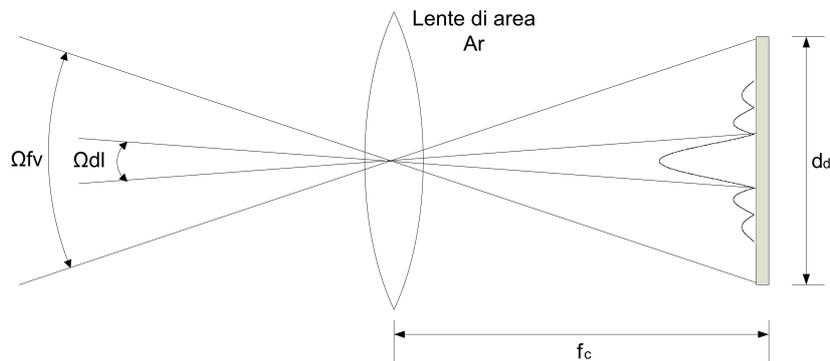


Figura 4.2: Angolo visivo dell'apparato ricevente

4.1 Fotorilevatori

I fotorilevatori sono tutti quei dispositivi che permettono la conversione da potenza ottica a segnale elettrico (corrente o tensione), basandosi essenzialmente sulla fotogenerazione di coppie elettrone-lacuna nei semiconduttori.

I principali parametri di un fotorivelatore sono:

- Efficienza quantica η , definita come il rapporto tra il numero di fotoni rilevati (e quindi utili alla conversione) e i fotoni incidenti totali;
- Responsività R , il rapporto tra la corrente di uscita e la potenza ottica di ingresso:

$$R = \frac{I_p}{P_{in}} \quad (4.4)$$

legata all'efficienza quantica tramite la:

$$R = \eta \cdot \frac{e\lambda}{hc} \quad (4.5)$$

- Larghezza spettrale, il range di lunghezze d'onda in cui opera il fotorivelatore;
- Tempo di risposta, ovvero quanto velocemente il dispositivo risponde alle variazioni della potenza ottica in ingresso;

- Dark current (o corrente di buio) I_0 , la corrente in uscita dal dispositivo in assenza di luce incidente. Costituisce una fonte di rumore e, nei dispositivi a semiconduttore, è dovuta all'agitazione termica.

Nell'ambito delle comunicazioni ottiche i fotorivelatori sono normalmente costituiti da fotodiodi, in cui la relazione ingresso-uscita è:

$$I_p = RP_{in} + I_0 \quad [A] \quad (4.6)$$

4.2 Background Radiation

In aggiunta alla potenza della sorgente del segnale di informazione, il ricevitore cattura anche radiazioni luminose provenienti dall'ambiente circostante che però non hanno nulla a che fare con l'informazione utile.

Le radiazioni di fondo che rientrano nel range di frequenze e nel campo visivo del ricevitore sono elaborate assieme al segnale utile, producendo così rumore e degradando le prestazioni della comunicazione.

Il calcolo della potenza ottica associata alla radiazione luminosa non voluta prevede la modellizzazione della sorgente di rumore in due diversi casi:

- sorgente diffusa, ovvero la radiazione è assunta coprire l'intero ambiente circostante e quindi è presente nel campo visivo di ogni ricevitore;
- sorgente discreta o puntuale, più locale ma più intensa e può essere presente o meno nel campo visivo del ricevitore.

In sistemi spaziali il cielo corrisponde a una sorgente diffusa, mentre stelle, pianeti e luna sono considerati sorgenti puntuali.

Le sorgenti diffuse sono caratterizzate dalla loro funzione spettrale di radianza $W(\lambda)$, definita come la potenza emessa alla lunghezza d'onda λ attraverso una particolare sezione, e diretta verso un determinato angolo solido in una direzione indicata [$W/(sr \cdot m^2 \cdot m)$].

Si consideri il caso generico in figura:

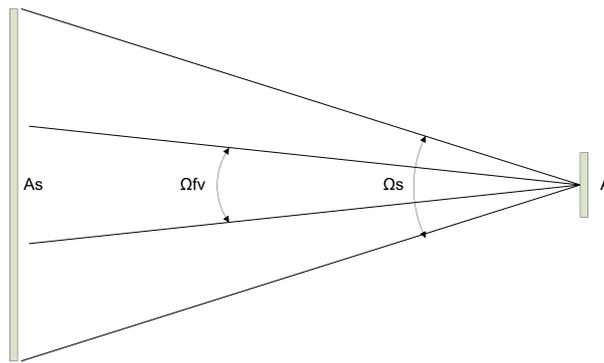


Figura 4.3: Modello per la sorgente di rumore

in cui una sorgente di rumore di area A_s è posta a una distanza z da una lente ricevente di area A . La potenza rumorosa catturata dal ricevitore in un intervallo di lunghezze d'onda $\Delta\lambda$ attorno a λ , dipende dalla porzione dell'area della sorgente presente nel suo campo visivo:

$$P_b = \begin{cases} W(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Omega_{fv} \cdot A & \text{se } \Omega_{fv} < \Omega_s \\ W(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Omega_s \cdot A & \text{se } \Omega_{fv} > \Omega_s \end{cases} \quad (4.7)$$

In queste relazioni Ω_{fv} è l'angolo solido rappresentante il campo visivo del ricevitore mentre Ω_s è l'angolo solido formato dalla sorgente, visto dal ricevitore:

$$\Omega_s \cong \frac{A_s}{z^2} \quad (4.8)$$

La maggior parte delle sorgenti di fondo si descrivono attraverso il modello del corpo nero, la cui radianza è data da:

$$W(\lambda) = \frac{c^2 \cdot h}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) \quad (4.9)$$

Per le sorgenti localizzate si può definire la funzione irradianza spettrale come:

$$W_I(\lambda) = W(\lambda)\Omega_s \quad [W/(m^2 \cdot m)] \quad (4.10)$$

e sostituendo nella formula precedente, calcolare la potenza irradiata come:

$$P_b = W_I(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot A \quad [W] \quad (4.11)$$

In applicazioni spaziali la principale sorgente di rumore è ovviamente il Sole, la cui irradianza si avvicina molto all'irradianza di un corpo nero alla temperatura di 5777°K:

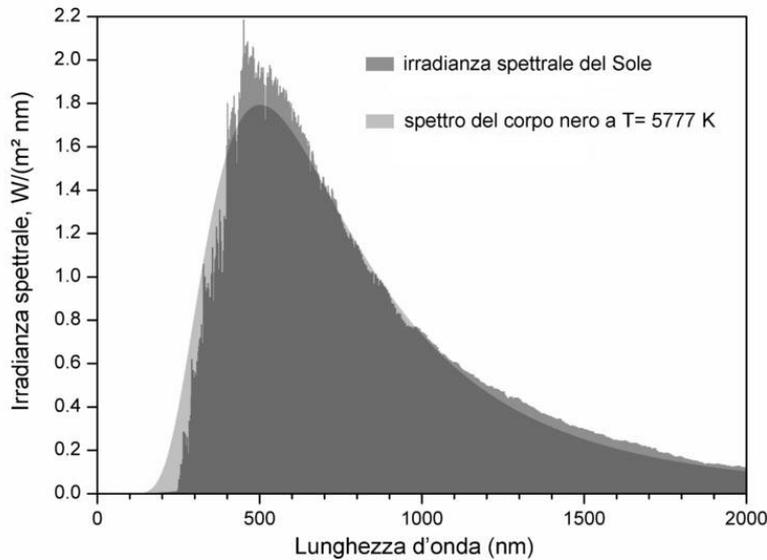


Figura 4.4: Irradianza spettrale del Sole

4.3 Filtri Ottici

I filtri ottici sono utilizzati nella ricezione durante la focalizzazione del fascio luminoso e, come i filtri usuali, hanno lo scopo di rimuovere la potenza associata al rumore, annullando le componenti a frequenze indesiderate.

Ne esistono di diverse tipologie, ma i più diffusi sono principalmente due:

- Filtri ad assorbimento. Sono composti da strati di materiale collegati o applicati sulla superficie della lente o del fotorilevatore. Questi assorbono (o riflettono) la luce incidente a determinate lunghezze d'onda, mentre risultano trasparenti (o quasi) alle frequenze volute. Le proprietà del filtro dipendono dallo spessore del rivestimento e dal materiale utilizzato.
- Filtri a interferenza. Sono dispositivi posti davanti al fotodiodo e utilizzano una cavità ottica con pareti riflettenti per produrre un guadagno ottico a certe lunghezze d'onda, e provocare interferenza distruttiva ad altre. Lo stesso risultato si può ottenere mediante strati di dielettrico a indice di rifrazione diverso, per selezionare le frequenze desiderate.

4.4 Il Problema Del Puntamento

Prima che ogni trasmissione avvenga è necessario che la potenza del campo trasmesso possa raggiungere il ricevitore: questo significa che il fascio emesso non deve solo far fronte alle perdite che il percorso e il mezzo inducono, ma deve anche essere indirizzato in una precisa direzione.

Se utilizzando le frequenze ottiche si ha una maggiore direzionalità e quindi un maggior guadagno di potenza, questo implica anche una maggiore difficoltà a coprire il ricevitore con il fascio radiato. Configurare il trasmettitore per radiare nella giusta direzione viene detto *pointing* (o *puntamento*), mentre l'operazione al ricevitore di determinare la direzione di arrivo del raggio incidente viene detta *spatial acquisition*. Queste due azioni a volte però non sono sufficienti; bisogna infatti mantenere il collegamento per tutto il tempo della comunicazione: questo viene chiamato *spatial tracking*.

Parte II

I Sistemi ad Infrarosso Indoor

Capitolo 5

Introduzione

Il bisogno di utilizzare dispositivi portatili in ambienti di lavoro o nella vita quotidiana ha accelerato durante gli anni '90 l'introduzione di collegamenti wireless. I terminali portatili sono però soggetti a limitazioni quali le dimensioni, il peso e il consumo di energia.

Anche il numero a volte esagerato di cavi e fili tra computer (ad esempio all'interno di uffici) e gli alti costi di mantenimento e riconfigurazione della rete cablata hanno facilitato tale processo.

I collegamenti wireless devono affrontare però diverse problematiche:

- la sicurezza, cioè l'informazione trasmessa non deve essere recuperabile da terzi estranei alla trasmissione stessa;
- la robustezza, cioè il collegamento deve essere sempre disponibile e flessibile ad aggirare eventuali guasti;
- le prestazioni, in termini di velocità di trasmissione;
- la semplicità di implementazione.

Quindi tali collegamenti devono poter sostituire completamente la loro controparte cablata.

Due sono state le tecnologie che potevano rispondere a tali requisiti: la trasmissione a radiofrequenza (RF) e quella ad infrarosso (IR).

La regione infrarosso comprende tutte le radiazioni elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda è compresa tra circa i 700 nm e 1 mm; fanno quindi parte della regione ottica dello spettro, assieme alle radiazioni visibili e ultravioletto. La scelta di utilizzare un fascio infrarosso anziché un fascio visibile o ultravioletto è dovuta al fatto che un collegamento ultravioletto può nuocere alla salute dell'uomo, data l'elevata energia dei fotoni a queste frequenze, mentre un collegamento nel visibile è soggetto ad una maggior interferenza luminosa (oltre alla possibilità di disturbare gli utilizzatori).

I sistemi di trasmissione IR utilizzano tre intervalli di lunghezze d'onda, dette finestre ottiche: queste sono le stesse sia per le reti guidate su fibra ottica sia per le trasmissioni in spazio libero, in quanto per queste lunghezze d'onda sono ottimizzati i dispositivi di trasmissione e ricezione (oltre che le fibre ottiche).

La prima finestra (800÷1000 nm) è stata la prima ad essere utilizzata ma, mentre è stata abbandonata dai sistemi a fibra ottica che oramai trasmettono solo nelle successive due finestre (1.25÷1.40 μm e 1.50÷1.60 μm), viene ancora largamente utilizzata nei sistemi

in spazio libero, soprattutto in semplici applicazioni (ad esempio un telecomando TV opera nell'intorno dei 900 nm). Questo accade perchè l'energia del fotone corrispondente ad una $\lambda = 800$ nm è sufficiente a ionizzare atomi di silicio, largamente disponibile a basso costo.

Capitolo 6

Confronto: Infrarosso vs Radiofrequenze

La diversa posizione nello spettro elettromagnetico delle portanti a radiofrequenza e di quelle ad infrarosso, porta per entrambe le tecnologie a vantaggi e svantaggi. Inanzitutto la regione ottica dello spettro elettromagnetico è libera in tutto il mondo, mentre la regione a radiofrequenza è regolata da enti internazionali che la suddividono per specifici utilizzi (trasmissioni militari, televisive, ecc...) e concedono licenze per alcune bande. Solo la banda ISM (Industrial, Scientific, Medical) è allocata senza licenza e quindi molto congestionata. Quindi un'azienda che vuole immettere nel mercato internazionale un prodotto dovrà cercare le convenzioni stabilite dagli enti regolatori e adattare ad esse il suo articolo, con conseguenti costi di produzione. La regione infrarosso è esente da licenze e quindi utilizzabile liberamente senza costi aggiuntivi.

Come la luce visibile, la radiazione infrarosso è naturalmente confinata nell'ambiente in cui viene generata, in quanto non oltrepassa pareti o altre barriere opache. Questo confinamento facilita la sicurezza della trasmissione contro intercettazioni (anche casuali) e offre la possibilità di implementare collegamenti in stanze adiacenti senza il bisogno di alcuna coordinazione. Utilizzando le radiofrequenze invece è necessario disporre di accorgimenti di accesso al mezzo o comunque tener conto delle possibili trasmissioni vicine. Ovviamente è garantita per gli infrarossi l'immunità a interferenze con radiazioni RF (e viceversa) che sono molto diffuse.

Un altro vantaggio per le trasmissioni IR è offerto dalla tecnologia dei dispositivi trasmettitori e ricevitori, disponibili a basso costo, piccole dimensioni e ridotto consumo energetico, tutti fattori molto importanti in prodotti portatili e di tipo consumer. I collegamenti infrarosso presentano anche alcuni svantaggi, fattori importanti che limitano la loro diffusione.

La radiazione, durante il suo percorso da trasmettitore a ricevitore, subisce forti perdite e il multipath dei raggi porta a fading e ISI.

Negli ambienti in cui operano poi, è presente una forte componente di rumore luminoso dovuto alla luce naturale del Sole o alla luce artificiale dell'impianto di illuminazione della stanza, che possono presentare componenti alle frequenze interessate dalla trasmissione.

Nello stesso modo in cui l'infrarosso offre un confinamento naturale, è anche suscettibile all'oscuramento del ricevitore dovuti a oggetti o persone. Se poi è necessario collegare più stanze tra loro bisogna ricorrere a collegamenti guidati tra gli ambienti...

Inoltre la potenza trasmessa nella regione ad infrarosso è limitata da regolamenti in-

ternazionali al fine di salvaguardare la sicurezza dell'occhio umano, con ricadute sul collegamento.

Proprietà	Radiofrequenza	Infrarosso	Implicazioni per IR
Soggetta a regolazioni?	Si	No	Non necessita di licenze Compatibilità internazionale
Passa attraverso pareti?	Si	No	Minor mobilità Minor raggio di copertura Maggior sicurezza Link indipendenti tra loro
Multipath?	Si	Si	ISI
Perdite durante il percorso?	Si	Si	Compromesso tra potenza trasmessa e sicurezza
Rumore dominante	Altri utenti RF	Luce di fondo	Raggio di copertura limitato

Tabella riassuntiva vantaggi-svantaggi

Esistono quindi applicazioni in cui sono maggiori i vantaggi presentati dalle radiofrequenze e altre in cui si adatta meglio la tecnologia IR. In particolare le radiofrequenze sono favorite in ambiti a lungo raggio o in cui la mobilità dei dispositivi è fondamentale; l'infrarosso sono favoriti in collegamenti a corta distanza o dove è necessario una compatibilità internazionale.

Capitolo 7

Topologia dei sistemi

I collegamenti ad infrarosso possono avere diverse configurazioni e risulta conveniente classificarle in accordo a due criteri.

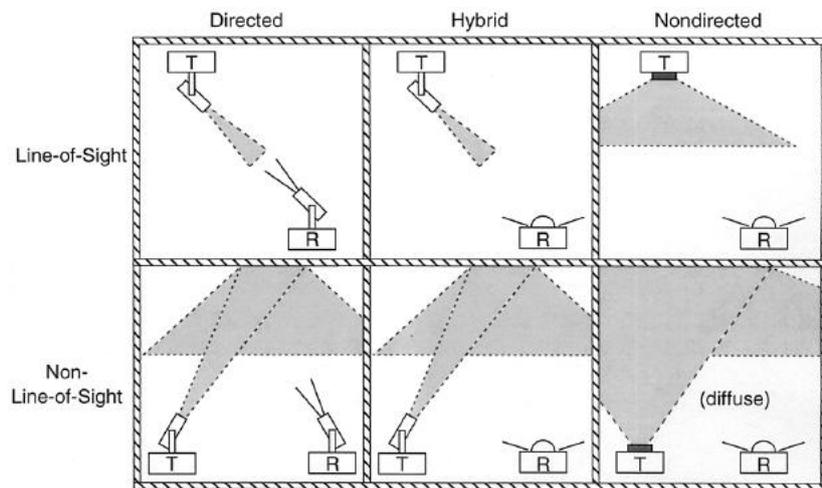


Figura 7.1: Classificazione dei sistemi ad infrarosso

Il primo criterio è basato sul grado di direzionalità del trasmettitore e del ricevitore. “Directed links” impiegano trasmettitori e ricevitori direzionali che devono essere puntati tra loro al fine di stabilire il collegamento. Questi collegamenti massimizzano l’efficienza di potenza, poichè minimizzano le perdite dovute al percorso e la ricezione della luce dell’ambiente in cui si trovano (che produce rumore).

“Nondirected links” impiegano trasmettitori e ricevitori avente un ampio angolo di emissione (o cattura), aggirando così il problema del puntamento. Questi collegamenti possono essere più convenienti da utilizzare, in particolare per terminali mobili, ma necessitano di una maggiore potenza per coprire efficientemente il largo angolo di emissione. È possibile anche ottenere collegamenti ibridi, che combinano trasmettitori e ricevitori con gradi di direzionalità diversi.

La seconda classificazione tiene conto dell’esistenza o meno di un ininterrotto percorso LOS (Line Of Sight), ovvero se trasmettitore e ricevitore sono in vista tra loro. I link LOS minimizzano la distorsione dovuta a multipath, mentre i link non-LOS si affidano alle riflessioni del fascio su pareti e soffitto per creare il collegamento, incrementando la robustezza del sistema e permettendo il funzionamento anche quando ostacoli (come

persone in un ufficio) si pongono tra trasmettitore e ricevitore.

Tra le sei combinazioni possibili appare chiaro che i collegamenti “directed-LOS” aumentano l’efficienza poichè la potenza trasmessa è concentrata in uno stretto fascio ottico, rendendo possibile l’utilizzo di ricevitori aventi uno stretto angolo di cattura FOV (Field Of View). Inoltre questo tipo di sistema non risente di distorsioni dovute a multipath e una distanza massima accettabile può sempre essere determinata, per una data potenza ottica, in modo indipendente dalle proprietà riflettenti o dalla geometria della stanza (almeno fino a che è assicurata la visibilità tra i dispositivi). Lo svantaggio di questa configurazione è proprio la necessità del puntamento e dell’assenza di ostacoli.

Un caso speciale di questa topologia è il “tracked system”, che combina l’alto flusso di potenza dei sistemi LOS con un aumento dell’area di copertura; infatti utilizza un trasmettitore orientabile in grado di seguire il percorso del ricevitore mobile, assicurando il puntamento.

Una delle configurazioni più attrattive è il collegamento “nondirected-nonLOS”, più spesso indicato con “diffuse”. Sistemi in questa configurazione non richiedono nè un puntamento nè un percorso LOS tra i dispositivi, facendo uso delle proprietà riflettenti di pareti e soffitto per offrire copertura alla stanza. Questo la rende la configurazione più robusta e flessibile ma risente delle dispersioni da multipath e delle maggiori perdite durante il percorso.

Capitolo 8

Limitazioni del Collegamento

Nella realizzazione di un collegamento wireless indoor bisogna tener conto di diversi fattori che possono limitarne le prestazioni o addirittura la realizzabilità:

- la luce dell'ambiente circostante, in quanto potrebbe contenere componenti e quindi energia nella banda spettrale del sistema ottico, disturbando la corretta ricezione del segnale;
- l'obbligo di limitare la potenza ottica del trasmettitore poichè potrebbe causare danni all'occhio umano;
- le perdite in potenza o la distorsione del segnale dovuta alle diverse riflessioni della radiazione durante il percorso dal trasmettitore al ricevitore.

8.1 La luce dell'ambiente

La sorgente dominante di rumore in sistemi ottici wireless indoor è la luce dell'ambiente in cui il sistema è posto, che tipicamente è una combinazione di luce solare e radiazioni provenienti da lampade ad incandescenza e fluorescenti.

Le considerazioni potrebbero diversificarsi osservando le differenti situazioni che si possono presentare: ad esempio negli uffici le lampade a incandescenza non sono più presenti essendo state sostituite completamente dalle lampade a fluorescenza, per motivi di consumo energetico ed efficienza di illuminazione. Diversa è la situazione nelle abitazioni, in cui le lampade ad incandescenza sono ancora utilizzate.

Questi tre tipi di sorgenti luminose emettono potenza, oltre che nella parte visibile dello spettro, anche nella regione infrarosso cioè nella banda di frequenze di sensibilità del fotorivelatore. Questo porta a introdurre un rumore sul segnale utile.

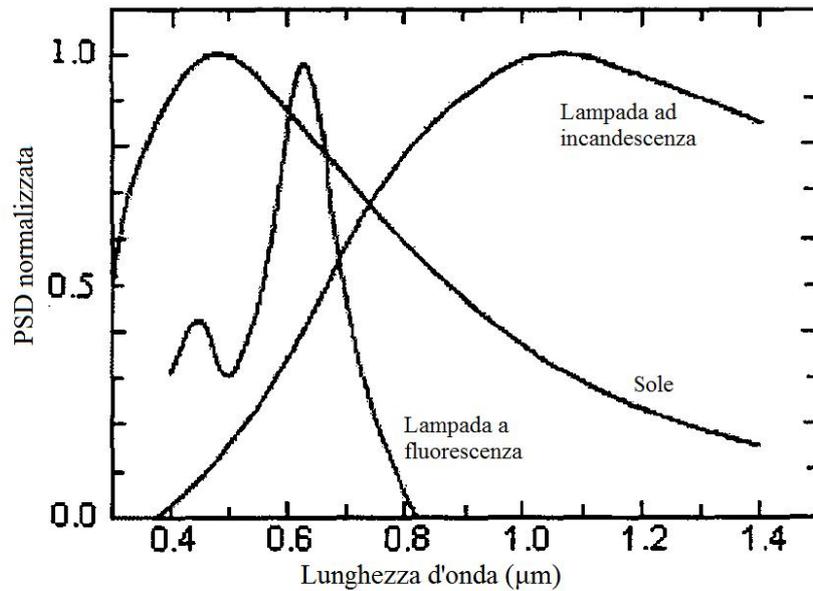


Figura 8.1: PSD delle sorgenti luminose rumorose

Il grafico mostra le Power Spectral Density delle varie sorgenti, tramite le quali si può dedurre che:

- la PSD della luce solare ha un picco intorno i 500 nm ma continua con livelli non trascurabili fino ai 1100 nm;
- le lampade ad incandescenza presentano il picco attorno i 1000 nm e comunque con alti livelli nell'intorno di tale valore;
- le lampade a fluorescenza, con picco attorno i 600 nm, si estendono solo in piccola parte nella regione ad infrarosso.

Particolare attenzione va data alla regione tra gli 800 e i 1000 nm, in cui la maggior parte dei sistemi operano data la possibilità di utilizzare fotodiodi al silicio a basso costo. In questa banda però sia la luce naturale del Sole che quella artificiale degli impianti di illuminazione producono rumore.

La caratterizzazione si diversifica però tra luce naturale e artificiale, in quanto la luce del Sole è circa stazionaria (dipendente dalla rotazione terrestre, quindi lentamente variabile) mentre quella artificiale non è costante nel tempo, con veloci e ampie variazioni di intensità. Quindi la luce artificiale non solo introduce rumore, ma produce anche interferenze dovute a variazioni della potenza ottica sul fotodiodo.

Gli effetti della luce dell'ambiente in cui opera il sistema ottico vengono combattuti attraverso filtri ottici e usuali filtri elettronici passa-alto nel circuito seguente il fotorivelatore. La scelta dei filtri passa-alto è dovuta alle considerazioni sperimentali [?] che lo spettro della potenza del segnale di interferenza è concentrato a basse frequenze.

Per la caratterizzazione dell'irradianza di background (potenza ottica per unità di area) prodotta dalle sorgenti presenti nell'ambiente circostante, è utile classificarle nel seguente modo:

- luce solare;
- lampade ad incandescenza ;

- lampade a fluorescenza munite di ballast (reattori) convenzionali;
- lampade a fluorescenza munite di ballast elettronici.

Da dati sperimentali rilevati da Moreira et al. in [?] attraverso l'esposizione di un fotodi-
odo alle varie sorgenti di rumore ottico, si ricavano i valori della corrente da esse indotta,
detta background current I_B . Inoltre queste misure sono state ripetute con l'applicazione
di un filtro ottico ad assorbimento (passa-alto con $\lambda_c = 780$ nm) di cui si può quindi
calcolare il coefficiente di trasmissione.

La tabella riporta questi dati: si può notare che la luce solare produce il più alto livello di
background current e quindi è la maggior fonte di rumore al ricevitore. Si evince anche
che la corrente I_B dovuta all'esposizione di lampade fluorescenti è molto più piccola,
dell'ordine dei μA . Questo significa che il sistema di comunicazione deve essere in grado
di funzionare correttamente con un ampio range di valori di background.

Un'altra importante considerazione è che il filtro ottico riduce di molto la corrente I_B
prodotta, anche se con coefficienti di trasmissione diversi per le varie sorgenti; questo è
dovuto alle differenza nello spettro ottico delle sorgenti.

Sorgente	I_B senza filtro	I_B con filtro	Coefficiente di trasmissione del filtro
Sole	$5100\mu\text{A}$	$1000\mu\text{A}$	19.6%
Lampada ad incandescenza	$31\mu\text{A}$	$20\mu\text{A}$	64.5%
Lampada a fluorescenza ballast tradizionale	$9.0\mu\text{A}$	$0.4\mu\text{A}$	4.4%
Lampada a fluorescenza ballast elettronico	$8.2\mu\text{A}$	$0.4\mu\text{A}$	4.9%

Background current per varie sorgenti

Come detto precedentemente, la luce artificiale non induce solo rumore nella fotocor-
rente, ma provoca anche interferenze; questo segnale di interferenza può essere misurato
all'uscita del ricevitore:

Lampade ad incandescenza

La forma d'onda nel dominio del tempo e la sua PSD sono mostrati in figura:

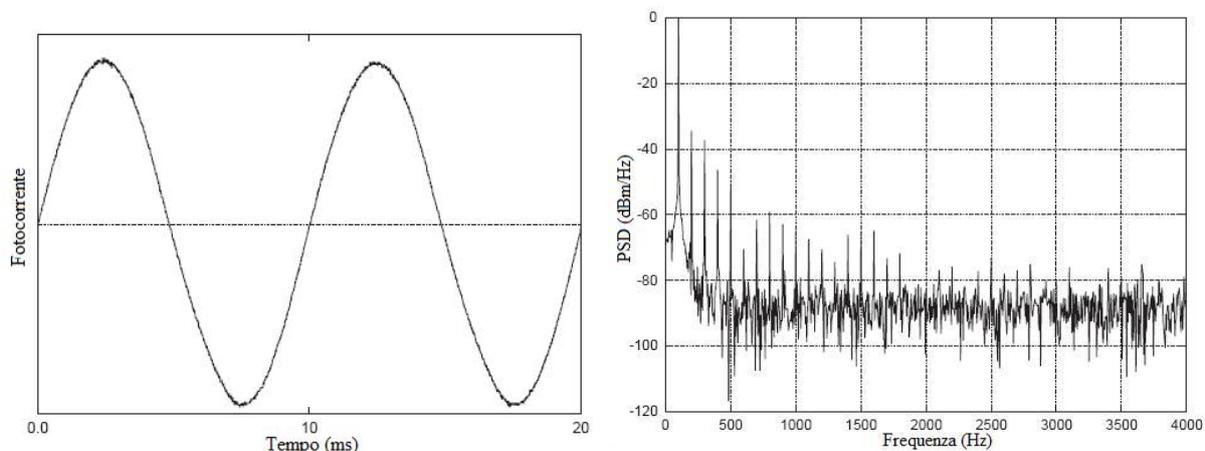


Figura 8.2: Segnale di interferenza da lampada ad incandescenza

Il segnale di interferenza prodotto da una lampada ad incandescenza è quindi una sinusoide di frequenza 100 Hz (doppia della frequenza di alimentazione). Dal suo spettro si nota che, oltre alla sinusoide a 100 Hz, solo le armoniche fino a circa 2 KHz portano una quantità di energia significativa.

Lampade a fluorescenza pilotate da ballast convenzionali

In questo caso la forma d'onda è una sinusoide distorta il cui spettro, confrontato con quello della lampada ad incandescenza, è più esteso, fino ai 20 KHz (oltre i quali la PSD non supera mai i -60 dB rispetto alla prima componente a 100 Hz).

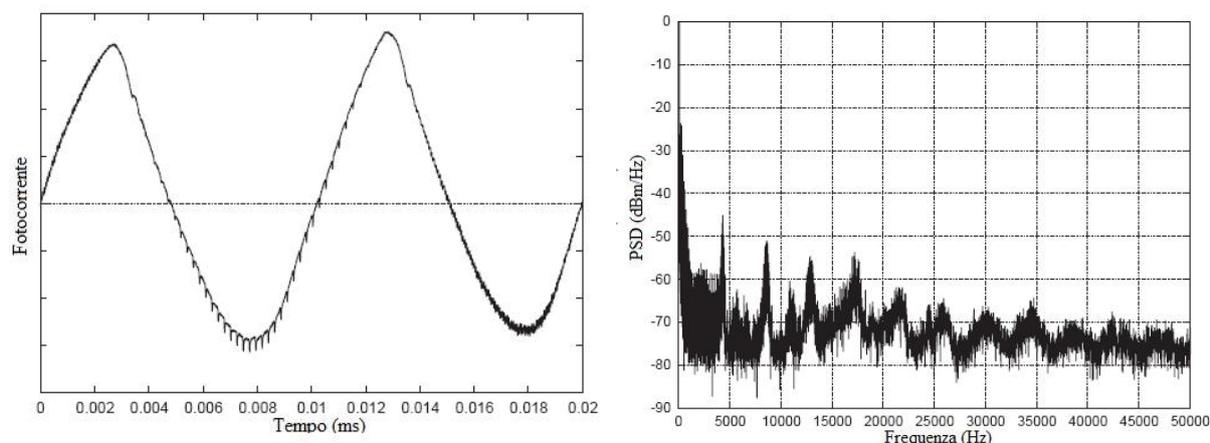


Figura 8.3: Segnale di interferenza da lampada a fluorescenza con ballast convenzionale

Lampade a fluorescenza pilotate da ballast elettronici

I ballast elettronici sono stati introdotti per ottenere una maggiore efficienza delle lampade a fluorescenza, utilizzando cioè una potenza elettrica minore per ottenere lo stesso livello di intensità luminosa. La frequenza di pilotaggio varia in un range da 20 a 40 KHz, dipendente dallo specifico apparato. Lo spettro di interferenza mostra componenti alla frequenza di pilotaggio e alle armoniche della stessa, ma anche a basse frequenze come nelle lampade a fluorescenza tradizionali.

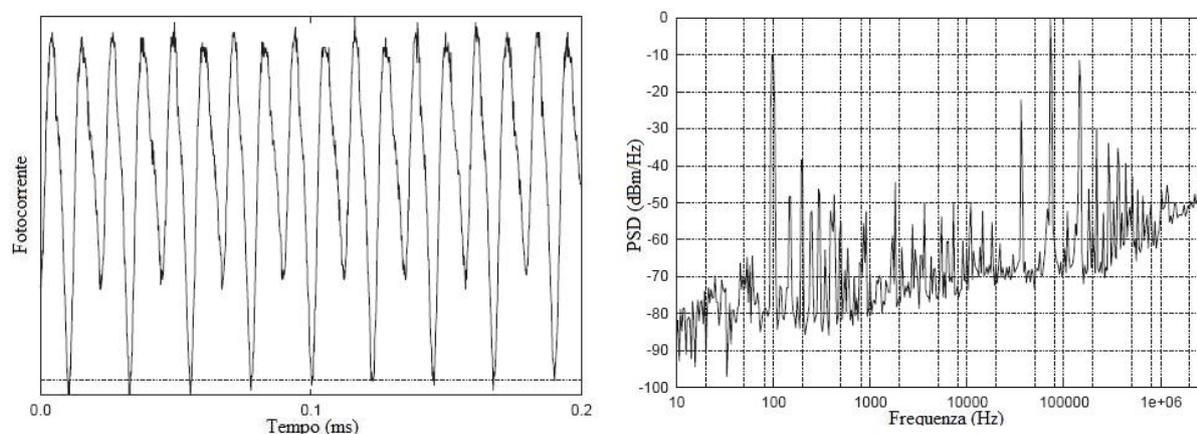


Figura 8.4: Segnale di interferenza da lampada a fluorescenza con ballast elettronico

Dai valori misurati si può ottenere la fotocorrente equivalente e quindi l'ampiezza del segnale di interferenza, mostrato in tabella.

Sorgente	Ampiezza senza filtro	Ampiezza con filtro	Coefficiente di trasmissione del filtro
Lampada ad incandescenza	$5.5\mu\text{A}$	$3.3\mu\text{A}$	60.0%
Lampada a fluorescenza ballast tradizionale	$16.8\mu\text{A}$	$1.76\mu\text{A}$	10.5%
Lampada a fluorescenza ballast elettronico	$5.1\mu\text{A}$	$1.0\mu\text{A}$	19.6%

Valori di ampiezza del segnale di interferenza

Anche i segnali di interferenza vengono attenuati dal filtro ottico che, come in precedenza, presenta un'efficienza maggiore per le lampade a fluorescenza che per quelle ad incandescenza. Inoltre si evince che le lampade a fluorescenza pilotate da ballast elettronici producono un'interferenza di ampiezza inferiore rispetto a quelle a ballast convenzionali. Da questi dati si può facilmente dedurre che l'utilizzo del filtro ottico in sistemi wireless è di fondamentale importanza.

8.2 La sicurezza dell'occhio

La banda spettrale compresa tra i 780 nm e i 950 nm è probabilmente la miglior scelta per la maggior parte delle applicazioni, data la disponibilità di sorgenti e di fotodiodi al silicio a basso costo. Il principale svantaggio delle radiazioni entro questa banda è però legata alla sicurezza dell'occhio umano: la radiazione può attraversare la cornea ed essere focalizzata sulla retina, dove può potenzialmente produrre danni.

La cornea è invece opaca alle radiazioni con lunghezza d'onda superiore a circa 1400 nm (riducendo considerabilmente i possibili danni); una soluzione potrebbe essere quindi l'utilizzo della banda attorno ai 1550 nm. Purtroppo i fotodiodi in questa regione sono realizzati in InGaAs (Arsenurio di Indio Gallio) che hanno costi maggiori rispetto alla controparte in silicio.

I pericoli dovuti alla radiazione sono ovviamente connessi alla potenza trasmessa dalla sorgente, dal tempo di esposizione e da come il fascio viene focalizzato sulla retina: esso può essere focalizzato in un punto, in cui quindi l'energia è concentrata causando danni dovuti all'innalzamento della temperatura, o in una regione più estesa, in cui l'energia è maggiormente distribuita.

La soluzione resta quindi adottare alcune misure per rendere sicure le sorgenti, considerando che:

- maggiore è l'area da cui proviene la radiazione e maggiore sarà la sicurezza della stessa, perchè sorgenti estese formano una maggiore distribuzione sulla retina mentre sorgenti puntuali vengono focalizzate in un singolo punto;
- minore è la potenza trasmessa e più sicuro sarà il fascio emesso. Questo comporta però un'importante limitazione alle prestazioni del sistema, ad esempio dal punto di vista di una efficace copertura del ricevitore.

Una possibile soluzione è l'utilizzo di sorgenti LED al posto di sorgenti Laser, poichè presentano un'area radiativa maggiore, una divergenza maggiore e generalmente una

potenza minore. Questo però non è sempre possibile poichè in alcune applicazioni sono necessarie caratteristiche laser come ad esempio la monocromaticità del fascio.

Bisogna quindi rendere sicure (*eye-safe*) le sorgenti laser.

Il primo passo è rendere il laser una sorgente estesa: ad esso si applica un diffusore, ovvero un dispositivo ottico che rompe il fascio laser per creare una radiazione diffusa e non più proveniente da un singolo punto, rendendo estesa l'immagine sulla retina.

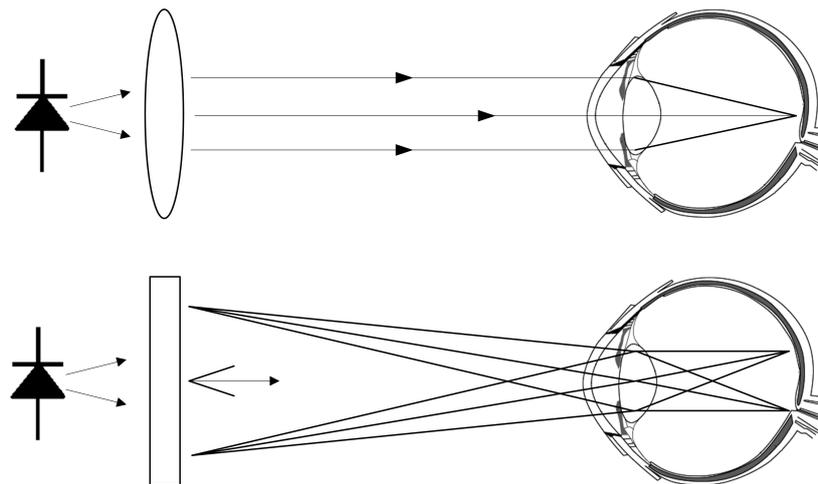


Figura 8.5: Effetti con sorgente puntuale e sorgente estesa

Inizialmente i diffusori erano di vetro (opportunitamente lavorato per creare irregolarità che interagissero disperdendo in una direzione il fascio incidente) ma, dal 1995 circa, vennero sostituiti dai diffusori olografici che presentano un significativo vantaggio rispetto alla controparte in vetro: essi possono essere progettati per produrre un fascio diffuso della forma desiderata.

Questo è molto utile ad esempio nei sistemi in cui la sorgente deve irradiare uniformemente una precisa area: l'ologramma può distribuire il fascio in tale area minimizzando la potenza dispersa al di fuori del luogo di interesse.

L'altro aspetto riguarda la limitazione della potenza emessa dal laser; esistono infatti organizzazioni (IEC International Electrotechnical Commission) che dividono le sorgenti in varie classi basandosi sul concetto dei limiti di emissione accettabili (AEL) che sono definiti per ogni classe; normalmente esprimono la potenza massima che può essere emessa in uno specifico range di lunghezza d'onda e tempo di esposizione.

Esistono poi considerazioni sulla massima esposizione possibile (MPE) alla sorgente, cioè la più alta densità di potenza (in W/cm^2) di una fonte luminosa che può essere considerata sicura (con una trascurabile probabilità di danni). La MPE è misurata per una data lunghezza d'onda e tempo di esposizione sotto le condizioni peggiori, in cui la luce viene focalizzata sulla retina nel più piccolo punto possibile e con la pupilla totalmente dilatata.

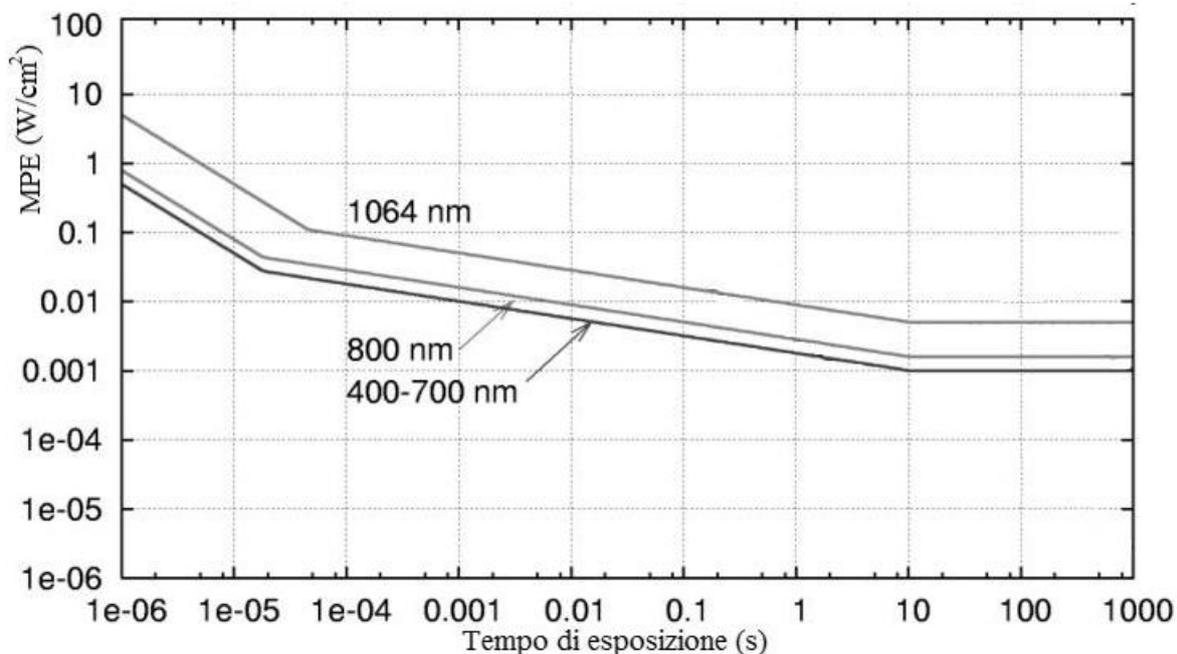


Figura 8.6: Andamento della MPE in funzione del tempo di esposizione

Secondo lo standard IEC 60825-1 i laser sono classificati in quattro classi e alcune sottoclassi. Ad esempio nella classe 1 rientrano i laser considerati sicuri sotto normali condizioni d'uso, per i quali cioè la relativa MPE non può essere oltrepassata.

Classe	IEC 60825-1
Classe 1	Sicuro sotto normali condizioni d'uso
Classe 1M	Sicuro sotto normali condizioni d'uso, eccetto per l'utilizzo di dispositivi ottici (lenti, ecc...)
Classe 2	Laser visibili. Sicuro perchè l'esposizione è limitata a 0.25 s (riflesso dell'occhio)
Classe 2M	Laser visibili. Sicuro perchè l'esposizione è limitata a 0.25 s (riflesso dell'occhio), eccetto per l'utilizzo di dispositivi ottici
Classe 3R	Sicuro se osservato con un campo visivo ristretto
Classe 3B	Pericoloso se l'occhio è esposto direttamente, ma le riflessioni diffuse sono sicure
Classe 4	Include tutti i laser non classificabili con le precedenti classi. Potenziali danni permanenti all'occhio, anche da riflessioni

Suddivisione laser IEC 60825-1

Avviene anche una differenziazione tra sorgenti puntuali e sorgenti estese: per quest'ultime infatti i limiti di potenza sono maggiori.

Questo significa che utilizzare un diffusore su una sorgente laser permette di incrementare la potenza trasmissibile e quindi le prestazioni del sistema.

8.3 Multipath

Come già detto, il multipath è quel fenomeno che avviene quando il segnale trasmesso segue percorsi diversi nel cammino verso il ricevitore. Questo è dovuto alla presenza di ostacoli e alle riflessioni che il raggio può subire da pareti, soffitti ed altri oggetti come l'arredamento dell'ambiente.

La configurazione che soffre maggiormente di questo effetto è sicuramente la “diffusa”, perchè presenta un ampio angolo di emissione e quindi il fascio emesso è più propenso ad incontrare superfici riflettenti. Inoltre questo tipo di collegamento utilizza un fotorivelatore con grande campo visivo, che cattura una quantità maggiore di luce riflessa rispetto a un rivelatore direttivo.

Al ricevitore il segnale che ha seguito il percorso diretto (cioè il più breve) si somma alle sue versioni traslate, cioè i raggi che seguendo percorsi diversi arrivano con sfasamento non nullo. Questo si traduce in allargamento degli impulsi e ISI, cioè interferenza di intersimbolo, nelle comunicazioni digitali.

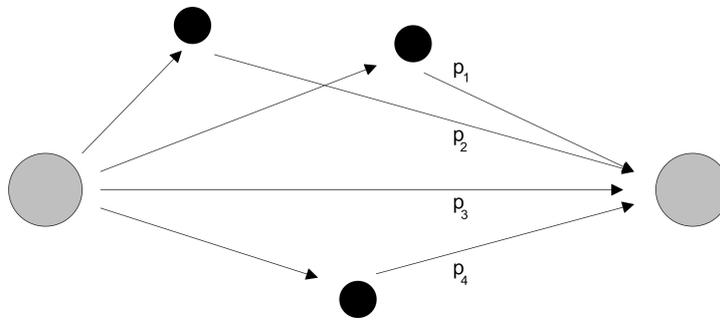


Figura 8.7: Multipath: i raggi giungono al ricevitore da diversi percorsi

Il ritardo delle versioni del segnale che hanno seguito percorsi diversi da quello diretto (e quindi più lunghi) implica che una parte di un dato simbolo si estenda anche nei simboli seguenti, quindi interferendo con il corretto rivelamento dell'informazione in essi contenuta.

Nel caso più semplice in ricezione si ha un segnale della forma:

$$r(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot g(t - nT) \quad (8.1)$$

dove a_n è il simbolo da trasmettere, $g(t)$ è la forma d'onda associata ai simboli e T è il periodo di simbolo.

Al fine di ricavare l'informazione originale, il segnale $r(t)$ viene campionato agli istanti $t_0 + kT$, dove t_0 è l'istante in cui l'impulso $g(t)$ è massimo. Quindi il k -esimo campione è dato da:

$$\begin{aligned} r_k &= r(t_0 + kT) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot g(t_0 + kT - nT) = \\ &= \underbrace{\dots + a_{k-1} \cdot g(t_0 + T)}_{\text{simboli precedenti}} + \underbrace{a_k \cdot g(t_0)}_{\text{simbolo corrente}} + \underbrace{a_{k+1} \cdot g(t_0 - T) + \dots}_{\text{simboli successivi}} = \\ &= a_k \cdot g(t_0) + i_k = a_k \cdot g(t_0) + \sum_{n \neq n_0} a_{k-n} \cdot g(t_0 - nT) \end{aligned} \quad (8.2)$$

La relazione evidenzia la necessità di massimizzare $g(t_0)$ (e quindi scegliere t_0 come l'istante in cui la forma d'onda è massima) e di annullare tutti gli altri termini, ovvero annullare $g(t_0 - nT)$. Queste considerazioni portano a formulare le condizioni di assenza di ISI che la forma d'onda $g(t)$ deve soddisfare:

$$g(t) = \begin{cases} g(t_0) \neq 0 \\ g(t_0 + kT) = 0 \quad \forall k \neq 0 \end{cases}$$

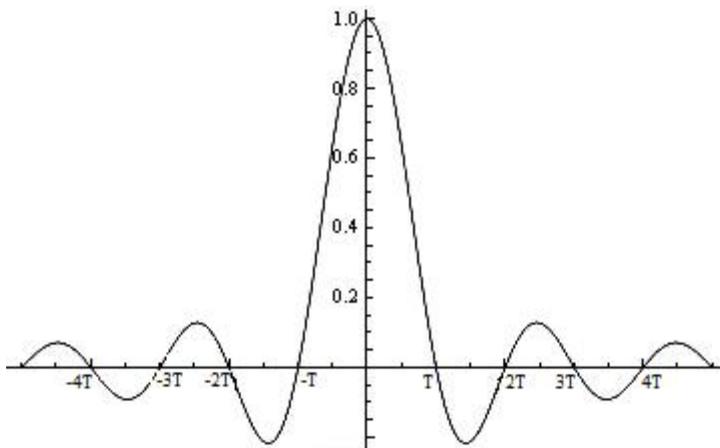


Figura 8.8: Esempio di segnale che soddisfa le condizioni

Nella pratica però questo non è sufficiente: infatti il canale attraverso il quale il segnale si propaga non può essere ideale, ma è caratterizzato da una propria risposta impulsiva $g_{ch}(t)$ (che potrebbe essere anche tempo-variante) che va a modificare la forma d'onda associata ad ogni simbolo trasmesso. Quindi in verità le condizioni di assenza di ISI sopra citate non vanno applicate alla forma d'onda associata al simbolo in trasmissione, ma alla forma d'onda risultante in ricezione, data dalla convoluzione con la risposta impulsiva del canale:

$$q(t) = g * g_{ch}(t) \quad (8.3)$$

A questa considerazione si devono aggiungere altri effetti indesiderati quali allargamento dell'impulso e jitter (ovvero lo scostamento temporale del clock di campionamento rispetto al clock ideale) che possono invalidare suddette condizioni e provocare quindi ISI.

Al fine di mitigare gli effetti dell'ISI si possono proporre alcuni accorgimenti:

- progettare il sistema in modo tale da diminuire la lunghezza dell'impulso, diminuendo quindi la quantità di energia che va ad interferire con il simbolo successivo;
- utilizzare equalizzatori in ricezione, ovvero dispositivi che compensano la risposta del canale per rendere il segnale di uscita il più fedele possibile a quello di ingresso;
- implementare modulazioni o tecniche di trasmissione che presentano una maggior robustezza all'interferenza intersimbolica, ad esempio OFDM, che divide il flusso da trasmettere in più flussi paralleli con portanti ortogonali diminuendo così il bitrate di ciascun sotto-canale e quindi l'interferenza di intersimbolo.

Capitolo 9

La ricezione

9.1 Filtri e Concentratori

I ricevitori ad infrarosso per applicazioni wireless si differiscono dalle loro controparti utilizzate nelle fibre ottiche per due principali aspetti.

Come prima cosa la fonte principale di rumore nei ricevitori per fibre ottiche deriva dal segnale stesso o dalla corrente di buio del rivelatore; nelle applicazioni wireless invece il rumore predominante è dovuto all'alto livello di luce presente nell'ambiente in cui è posto il sistema.

L'altro aspetto risiede nel fatto che in sistemi a fibra ottica la potenza ricevuta è concentrata in uno stretto fascio, permettendo l'utilizzo di fotorivelatori estremamente piccoli; al contrario in ricevitori wireless l'area del fotodiodo deve essere tale da poter catturare la maggior parte del fascio possibile, che in alcuni casi può essere anche molto largo. Aumentare l'area del fotodiodo implica però un aumento delle capacità parassite e del rumore al ricevitore.

Per eliminare o attenuare questi aspetti negativi è quindi necessario utilizzare (e combinare tra loro) filtri ottici e concentratori.

Facendo susseguire più strati dielettrici si possono ottenere filtri passa-banda ad elevate prestazioni: essi si basano sulla costituzione di più cavità Fabry-Perot e quindi sul fenomeno dell'interferenza ottica per ottenere bande passanti molto sottili, fino a 1 nm. Questa stessa banda è molto utile per eliminare la maggior parte della luce di background che provoca rumore, ma bisogna assicurarsi che il segnale trasmesso sia all'interno di tale banda: questo implica l'utilizzo di sorgenti laser.

La risposta di questi filtri è però fortemente legata all'angolo di incidenza del raggio, rendendoli ideali per collegamenti diretti, ma compromettendo le prestazioni in applicazioni che richiedono un largo FOV, come nei sistemi diffusi.

Si dimostra infatti che la lunghezza d'onda di centrobanda del filtro λ_{pk} può essere approssimata dalla:

$$\lambda_{pk}(\theta) = \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2(\theta) \right]^{1/2} \quad [m] \quad (9.1)$$

dove θ è l'angolo di incidenza del raggio, λ_0 è la lunghezza d'onda di centrobanda a $\theta = 0$, n_1 è l'indice di rifrazione del mezzo da cui proviene la radiazione n_2 quello del filtro.

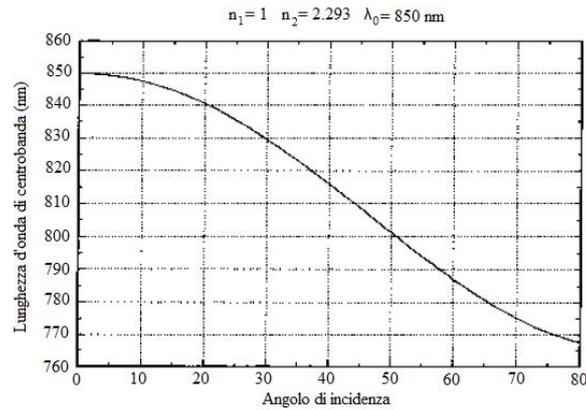


Figura 9.1: Dipendenza del centro banda dall'angolo di incidenza

La caratteristica del filtro dipende quindi dall'angolo di incidenza:

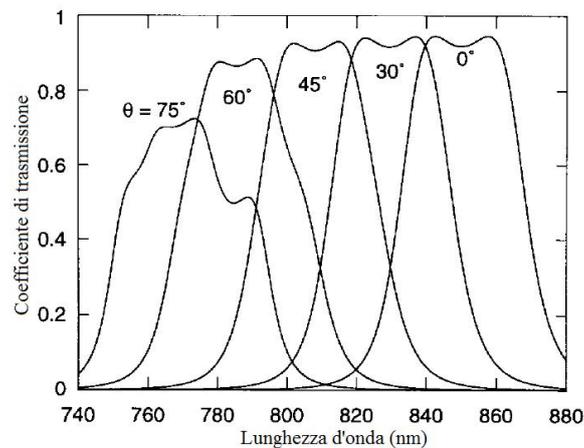


Figura 9.2: Caratteristica del filtro in funzione dell'angolo di incidenza

Una possibile alternativa a questi filtri può essere combinare un filtro passa-alto e la naturale risposta in frequenza del fotodiode al silicio. Il filtro passa-alto è costituito da vetro o plastiche che fanno passare tutte le lunghezze d'onda al di sotto di una certa lunghezza di cut-off (filtri ad assorbimento) e la loro caratteristica è sostanzialmente indipendente dall'angolo di incidenza.

Inoltre poichè il fotodiode al silicio non risponde a lunghezze d'onda superiori ai 1100 nm circa, la combinazione filtro-fotodiode realizza effettivamente una risposta passa-banda (Fig. 9.3).

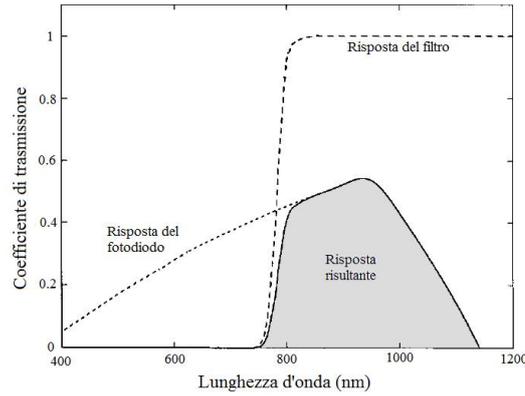


Figura 9.3: Combinazione di fotodiodo al silicio e filtro ottico passa-alto

Un ricevitore ad infrarosso cattura una potenza ottica che è proporzionale alla sua area effettiva di ricezione. Come già detto non è sempre conveniente incrementare l'area di ricezione del fotodiodo, quindi si impiega un concentratore ottico (il cui scopo è quello di riflettere i raggi entranti verso una piccola superficie cioè il fotorivelatore), per aumentarne l'area effettiva.

Risulta infatti per un ricevitore senza concentratore:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A \cdot \cos(\psi) & \text{se } 0 \leq \psi \leq \pi/2 \\ 0 & \text{se } \psi > \pi/2 \end{cases} \quad (9.2)$$

in cui A è l'area fisica del rilevatore e ψ è l'angolo con cui il raggio incide sulla sua superficie (rispetto alla normale del fotodiodo).

Aggiungendo concentratore e filtro, l'area effettiva diventa:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A \cdot T_s(\psi) \cdot g(\psi) \cdot \cos(\psi) & \text{se } 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \text{se } \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (9.3)$$

dove $T_s(\psi)$ è l'attenuazione dovuta al filtro, $g(\psi)$ è il guadagno del concentratore e Ψ_c è il campo visivo (FOV) del concentratore stesso (considerato come semiangolo, quindi normalmente $\Psi_c \leq \pi/2$).

Idealmente un concentratore avente indice di rifrazione n presenta un guadagno pari a:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_c)} & \text{se } 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \text{se } \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (9.4)$$

Quindi, diminuendo il campo visivo, il guadagno all'interno dello stesso aumenta.

I concentratori possono essere di diverse geometrie, in base alle applicazioni e prestazioni che si vogliono ottenere.

I concentratori a semisfera rappresentano un importante componente e sono largamente utilizzati nei sistemi ad infrarosso commerciali; dato il loro ampio campo visivo ($\Psi \cong \pi/2$), raggiungono un guadagno pari a $g(\psi) \cong n^2$ entro tutto il loro FOV.

Quando si utilizzano filtri passa-alto, il filtro viene posto planarmente, tra la semisfera e il fotorivelatore.

Quando invece si utilizza un filtro passa-banda non lo si pone planarmente, perchè variazioni dell'angolo di incidenza ψ del raggio sul concentratore (rispetto all'asse del fotodiodo) implicano variazioni dell'angolo di incidenza sulla superficie del filtro θ (rispetto

alla normale del filtro). Questo porta, come descritto precedentemente, alla traslazione della risposta del filtro.

Il filtro passa-banda viene quindi depositato sulla superficie esterna della semisfera, in modo tale da ricevere il raggio con piccoli valori di θ , minimizzando la tralazione della banda passante e massimizzando il coefficiente di trasmissione.

Quindi con una combinazione filtro-semisfera è possibile ottenere una piccola banda passante e un largo campo visivo.

Un altro concentratore molto utilizzato è il CPC (Compound Parabolic Concentrator) che può ottenere un maggior guadagno rispetto alla semisfera, ma presenta un minor campo visivo (adatto però ad applicazioni ad alta direzionalità). Il principale svantaggio del concentratore CPC è la sua eccessiva lunghezza, in particolare per piccoli valori di Ψ_c .

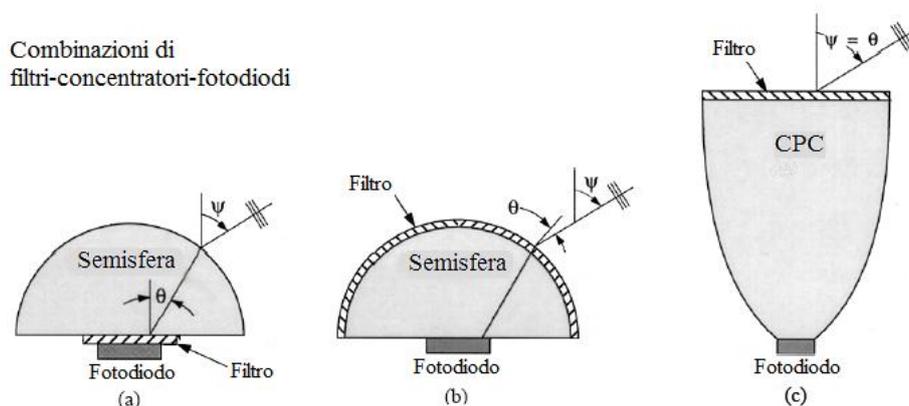


Figura 9.4: Tipi di concentratori: (a) Semisfera con filtro planare (b) Semisfera con filtro depositato (c) CPC con filtro planare

In conclusione, l'uso del concentratore permette di utilizzare un fotodiodo di dimensioni ridotte, diminuendo capacità parassite e costi. Un altro significativo vantaggio sta nel fatto che è possibile diminuire la potenza trasmessa, che può risolvere i problemi relativi alla sicurezza dell'occhio umano e riduce il consumo di potenza di alimentazione, molto importante ad esempio nei dispositivi portatili.

9.2 Fotodiodi

I fotodiodi convertono la luce direttamente in corrente elettrica e sono sostanzialmente costituiti da una giunzione pn polarizzata inversamente.

Un fotone (di energia sufficiente) incidente sulla superficie del dispositivo può essere assorbito e causare il passaggio di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione (e ovviamente la simultanea formazione di una lacuna nella banda di valenza). Questo avviene attraverso l'assorbimento dell'energia del fotone, che deve essere almeno pari all'energy gap ΔE tra le bande di valenza e conduzione, tipico del materiale scelto. Quindi, affinché l'assorbimento accada, la radiazione deve avere una lunghezza d'onda minore della cosiddetta "lunghezza d'onda di cut-off" λ_c , che garantisce un trasferimento di energia pari all'energy-gap:

$$\lambda_c = \frac{h \cdot c}{\Delta E} \quad [m] \quad (9.5)$$

In questa relazione c è la velocità della luce nel vuoto ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) e h è la costante di Plank ($h \cong 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).

Ogni coppia elettrone-lacuna così formatasi nella regione di svuotamento contribuisce all'aumento della conduttività del semiconduttore, facendo scorrere una fotocorrente pari a:

$$I_p = RP_{in} + I_0 \quad [A] \quad (9.6)$$

Dato che il materiale assorbe fotoni di ogni energia maggiore dell'energy-gap, si potrebbe suggerire di utilizzare un semiconduttore con un energy-gap piccolo, in modo da aumentare λ_c . Questo però è controproducente in quanto aumenterebbe l'influenza della corrente di buio I_0 (dovuta ad agitazione termica) nella fotocorrente totale I_p .

Un problema della giunzione pn è che la zona di svuotamento è molto sottile, per cui molta luce passa attraverso senza essere assorbita da essa.

Semiconduttore	ΔE [eV]	λ_c [μm]
Si	1.11	1.11
Ge	0.67	1.85
InGaAsP	0.89	1.39
InGaAs	0.77	1.61

Valori di energy-gap e lunghezza di cut-off dei semiconduttori più utilizzati

Note: $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Fotodiodi PIN

La soluzione del problema è aumentare lo spessore della giunzione aggiungendo uno strato debolmente drogato n (detto strato intrinseco) tra le zone p e n . Questa struttura è detta diodo PIN (p-zone, i-zone, n-zone).

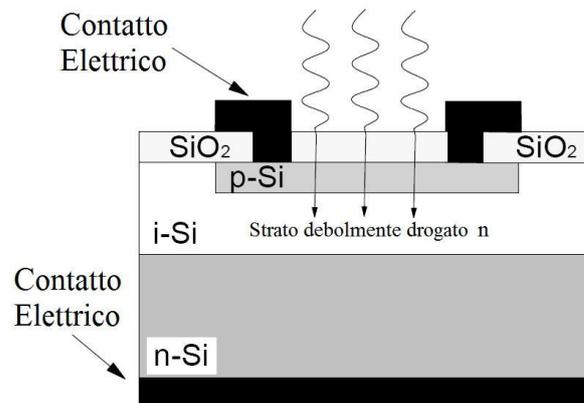


Figura 9.5: Schema di fotodiodo PIN al silicio

La zona intrinseca i presenta una bassa concentrazione di agenti dopanti e funge da zona di svuotamento, allargandola. Questo porta a una serie di vantaggi:

- aumenta la probabilità che un fotone venga assorbito, perchè è aumentato il volume del materiale assorbente;
- poichè aumenta lo spessore della giunzione, diminuisce la capacità della giunzione stessa, che porta ad un incremento della velocità di risposta del diodo;

- l'aumento della zona di svuotamento porta a favorire il processo di deriva delle cariche rispetto a quello di diffusione (che è più lento).

Il risultato finale è l'aumento della responsività e la diminuzione del tempo di risposta a qualche decina di picosecondi.

I tipici materiali utilizzati per la realizzazione di diodi PIN sono:

- il silicio (Si) per diodi operanti nella banda dai 500 ai 1100 nm, poichè il silicio ha un energy-gap di 1.11 eV e si trova a basso costo;
- il germanio (Ge) e il fosfuro di arsenurio indio gallio (InGaAsP) per diodi operanti tra i 1250 e i 1400 nm. I dispositivi in InGaAsP sono più costosi di quelli in germanio, ma offrono una maggiore sensibilità;
- arsenurio indio gallio (InGaAs) per diodi operanti tra 1500 e 1600 nm.

Resta comunque un significativo problema nei fotodiodi PIN: idealmente ogni fotone genera una sola coppia elettrone-lacuna utile alla fotocorrente. Il risultato è una corrente debole che deve far fronte alla successiva inevitabile introduzione di rumore da parte della circuiteria seguente il fotodiodo e che, per bassi valori di luce incidente, potrebbe sovrastarla.

Fotodiodi APD

Per risolvere questa problematica, sono stati introdotti i fotodiodi APD (Avalanche PhotoDiode) che amplificano il segnale durante il processo di fotorivelazione, basandosi sull'effetto della moltiplicazione dei portatori di carica.

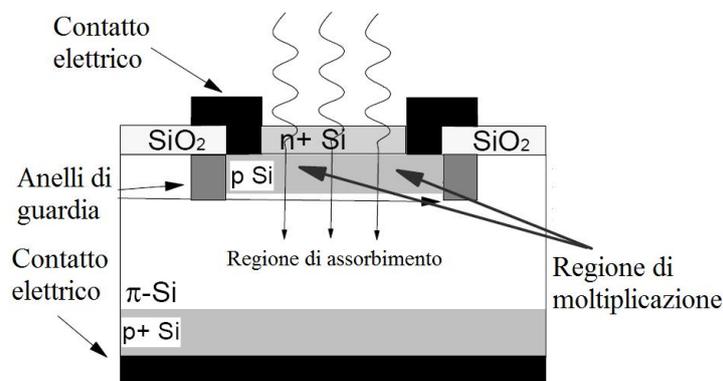


Figura 9.6: Schema di fotodiodo APD

La principale differenza strutturale tra un fotodiodo APD e un fotodiodo PIN è la sostituzione della regione *i* con una regione debolmente drogata di tipo *p*, tipicamente più larga e rinominata regione π .

Il dispositivo opera nel seguente modo:

- la giunzione viene polarizzata inversamente con una tensione dell'ordine delle decine di Volt;
- i fotoni in arrivo attraversano la giunzione $n^+ - p$ (perchè è molto sottile) e vengono assorbiti nella regione π . Questo porta alla formazione di una coppia elettrone-lacuna;

- il potenziale elettrico lungo lo strato π è sufficiente ad attrarre gli elettroni verso un contatto e le lacune verso l'altro;
- alla giunzione $n^+ - p$ il campo elettrico è così intenso che i portatori di carica sono accelerati, acquistando energia. Quando questi elettroni collidono con altri atomi producono, attraverso ionizzazione, una nuova coppia elettrone-lacuna;
- queste nuove cariche vengono a loro volta accelerate e possono collidere nuovamente, formando altre coppie elettrone-lacuna (effetto valanga). In questo modo un fotone produce più coppie utili alla conversione in fotocorrente.

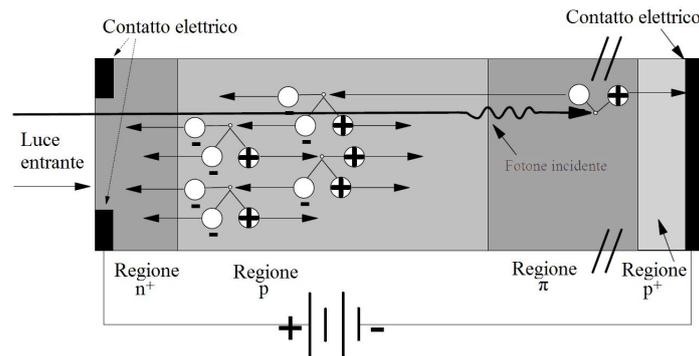


Figura 9.7: Processo fotomoltiplicativo in un APD

Un importante accorgimento riguarda la differenza di spessore tra la regione in cui avviene la moltiplicazione (vicino alla giunzione $n^+ - p$), molto sottile, e la regione π , molto larga e nella quale vengono assorbiti i fotoni. Questo è dovuto principalmente ad un motivo: il campo elettrico richiesto per accelerare sufficientemente gli elettroni è molto alto (dell'ordine di 10^6 V/m). In presenza di tale campo, le imperfezioni nel semiconduttore (come impurità o variazioni nella concentrazione dell'agente dopante) possono produrre piccole aree chiamate microplasma in cui si genera una moltiplicazione incontrollabile. Per controllare tale effetto la zona di moltiplicazione deve essere sottile. Questa è anche la ragione per cui vengono introdotti gli "anelli di guardia": ai bordi della regione di moltiplicazione è maggiore la probabilità di imperfezioni nel materiale e quindi di formazione di microplasma.

Inoltre l'intensità del campo elettrico necessario alla moltiplicazione è proporzionale allo spessore di suddetta zona, che quindi coinvolge anche la tensione di polarizzazione della giunzione.

La scelta tra fotodiodi PIN e APD va fatta in base alle necessità del collegamento:

- i fotodiodi PIN sono a basso costo, hanno una buona velocità di risposta e necessitano solo di una piccola tensione di alimentazione ($1.5 \div 3$ V) che si traduce in basso consumo;
- i fotodiodi APD offrono una maggiore sensibilità ma sono più costosi e devono essere polarizzati con una tensione alta ($12 \div 50$ V). Inoltre sono meno veloci dei PIN (in quanto la moltiplicazione a valanga delle cariche richiede un certo tempo prima di fermarsi) e introducono un livello maggiore di rumore poichè vengono accelerati anche gli elettroni resi liberi dall'agitazione termica.

In sistemi indoor si utilizzano normalmente i fotodiodi PIN, ad esclusione di alcune applicazioni (che possono essere ad esempio di ricerca) in cui la sensibilità del ricevitore gioca un ruolo chiave, o che comunque giustifica il loro costo.

Capitolo 10

Sistemi correnti: IrDA

IrDA è una tecnologia di comunicazione wireless ad infrarosso che prende il nome dall'organizzazione che l'ha standardizzata: Infrared Data Association.

Essa nacque nel giugno del 1993 dalla volontà di 50 aziende appartenenti a diversi settori (telefonia, elettronica, automobilistico, ecc...) di unificare il concetto di trasmissione ad infrarosso.

Prima del 1993 esistevano infatti più schemi per la comunicazione IR a corto raggio ognuno dei quali era adottato da singoli marchi, rendendo quindi difficile la compatibilità tra apparecchi diversi. C'era un notevole rischio che tale tecnologia non facesse presa sul mercato, non per motivi di prestazioni tecniche, ma proprio per la scarsa collaborazione tra aziende e la mancanza di una dominante e comune standardizzazione.

Queste furono le motivazioni che giustificarono la nascita di IrDA come ente riconosciuto dalle aziende fondatrici e da quelle che si aggiunsero successivamente.

Scopo dell'organizzazione era quello di sviluppare una tecnologia ad infrarosso a corto raggio, semplice da implementare, di facile utilizzo da parte dell'utente finale e che garantisse una completa compatibilità. Questi concetti si tradussero nelle prime specifiche tecniche:

- basso consumo di potenza;
- costo di implementazione nel prodotto ridotto;
- trasmissione a corto raggio, da 0 a 1 m;
- copertura angolare definita da un cono con semiangolo da 15° a 30°;
- velocità di trasmissione fino a 115,2 Kbit/s.

Con questi requisiti furono prodotte le "porte IrDA" che, col passare degli anni e con miglioramenti tecnici, si diffusero in molti dispositivi portatili e non, come computer, telefoni cellulari, fotocamere e stampanti.

10.1 Specifiche e Protocolli

Come avviene usualmente, IrDA organizza i propri livelli in uno stack, una colonna in cui gli strati rappresentano i protocolli e ognuno di essi può comunicare con il livello precedente e successivo.

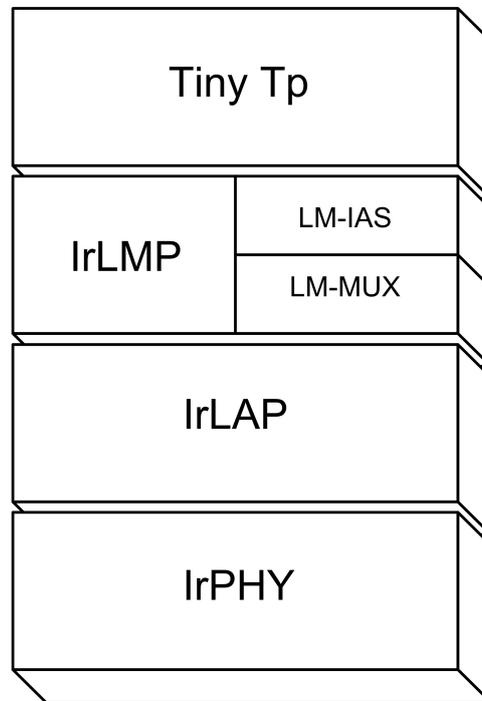


Figura 10.1: Stack dei protocolli IrDA

IrPHY

Il protocollo IrPHY (Infrared Physical Layer) costituisce il livello più basso dello stack e specifica caratteristiche tecniche quali:

- distanza massima ammissibile tra trasmettitore e ricevitore: 1 m;
- angolo di trasmissione: cono minimo di 15° (semiangolo);
- velocità di trasmissione: da 9.6 Kbit/s a 1Gbit/s;
- lunghezza d'onda utilizzata: 850 ± 30 nm;

I dispositivi IrDA comunicano con impulsi emessi nel cono di trasmissione e si richiede che un'irradianza minima sia mantenuta, affinché il segnale sia visibile alla distanza di un metro. Si richiede anche però che non sia oltrepassata un'irradianza massima che potrebbe causare "l'accecamento" del dispositivo ricevente se la distanza diventa piccola. In pratica la distanza ottimale è compresa tra 5 e 60 cm, con ricevitore al centro del cono. La trasmissione è half-duplex, ma i dispositivi possono simulare una comunicazione full-duplex alternando rapidamente la trasmissione dei dati.

La velocità di trasmissione ricade in diverse categorie:

- SIR (Serial Infrared). Comprende le velocità equivalenti a quelle di una porta seriale: 9.6 Kbit/s, 19.2 Kbit/s, 38.4 Kbit/s, 57.6 Kbit/s, 115.2 Kbit/s. Per garantire la massima compatibilità, il rilevamento e la negoziazione della trasmissione avvengono alla velocità minima di 9.6 Kbit/s;
- MIR (Medium Infrared). Nonostante sia un termine non ufficiale, viene di fatto utilizzato per indicare velocità comprese tra 576 Kbit/s e 1.152 Mbit/s
- FIR (Fast Infrared). Denota la trasmissione a 4 Mbit/s;
- VFIR (Very Fast Infrared). Utilizzato per trasmissioni a 16 Mbit/s;
- UFIR (Ultra Fast Infrared). Indica una velocità di 96 Mbit/s;
- Giga-IR. È la modalità attualmente più veloce e supporta un data rate di 512 Mbit/s e 1 Gbit/s. È stato approvato dai membri IrDA nel marzo 2009 modificando però le specifiche dei dispositivi. Per supportare tale velocità è stato utilizzato un laser di classe 1 (eye-safe) il cui raggio diverge con un semiangolo di 10° dall'asse, rendendo comunque facile il puntamento dei dispositivi.

IrLAP

Il protocollo IrLAP (Infrared Link Access Protocol) costituisce il secondo strato e rappresenta il livello DataLink del modello ISO/OSI. Le sue specifiche più importanti sono:

- controllo dell'accesso al mezzo;
- rilevamento di altri dispositivi IrDA;
- stabilimento di una connessione bidirezionale;
- negoziazione del ruolo dei dispositivi (primario/secondario).

La creazione della connessione IrDA è molto semplice: dopo aver allineato i dispositivi, il dispositivo definito "primario" inizia una ricerca e, se un ricevitore (detto "secondario") è presente nel cono di trasmissione, avviene la connessione alla massima velocità supportata da entrambi.

Regole di accesso al mezzo indicano che un dispositivo deve attendere un tempo di 500 ms prima di assumere il ruolo primario, per evitare di interrompere una connessione pre-esistente. Attivato il collegamento, il primario trasmette i dati dando però periodicamente la possibilità al secondario di rispondere.

IrLMP

Il protocollo IrLMP (Infrared Link Management Protocol) è il terzo strato delle specifiche IrDA e può essere suddiviso in due sottolivelli.

Il primo è LM-MUX (Link Management Multiplexer) che è posto sopra il protocollo IrLAP; il suo compito è principalmente fornire canali multipli e permettere lo scambio dei ruoli primario/secondario.

Il secondo sottolivello è detto LM-IAS (Link Management Information Access Service) e fornisce una coda attraverso la quale altri dispositivi possono accedere ai servizi.

Tiny TP

Tiny TP è il protocollo che si posiziona sopra il livello IrLMP e gestisce il trasporto di dati tramite segmentazione e riassettaggio, suddividendo i file trasmessi in pacchetti di dimensioni ridotte. Inoltre provvede al controllo del flusso dei dati assegnando priorità ad ogni canale logico.

10.2 Diffusione e Popolarità

Le porte IrDA si diffusero rapidamente in computer portatili e telefoni cellulari dalla metà degli anni '90 fino a circa i primi anni del 2000, quando nuove tecnologie come Bluetooth si proposero come mezzo di comunicazione a corto raggio. Il vantaggio principale di Bluetooth rispetto a IrDA è la mobilità: utilizzando infatti le frequenze radio, si riesce a coprire una distanza di circa 10 m (con livelli di potenza di consumo accettabili da parte di apparecchi portatili) senza la necessità di allineare e mantenere in vista trasmettitore e ricevitore. Questo è stato un fattore chiave che ha permesso a Bluetooth di diventare negli anni il protocollo preferito per lo scambio di file multimediali ad esempio tra telefoni cellulari, nonostante la sua velocità sia inferiore a quella raggiungibile con porte infrarossi. Con l'approvazione del progetto Giga-IR, IrDA cerca di rilanciare la trasmissione ad infrarosso, soprattutto per applicazioni in cui non è fondamentale la mobilità, ma la velocità di trasmissione (ad esempio in collegamenti tra apparati fissi).

Bibliografia

- [1] <http://www.irda.org>
- [2] C. D. Knutson, G. Diviney: *Infrared Data Communications with Irda*
- [3] G. Cariolaro, C. De Angelis, N. Laurenti: *Comunicazioni Ottiche* Padova, Libreria Progetto
- [4] R. M. Gagliardi, S. Karp: *Optical Communications* New York, J. Wiley
- [5] H. J. R. Dutton: *Understanding Optical Communications* International Technical Support Organization
- [6] Joseph M. Kahn, John R. Barry: *Wireless Infrared Communications*
- [7] A. Polizzoto: *OFDM Ottico*
- [8] R. Rameez-Iniguez, R. J. Green: *Indoor Optical Communications*
- [9] C. Singh, J. John: *A Review on Indoor Optical Wireless System*
- [10] P. L. Eardley, D. R. Wisely, D. Wood, P. McKee: *Holograms for Optical Wireless LANs*
- [11] J. C. Moreira, R. T. Valadas, A. M. de Olivera Duarte: *Optical Interference Produced by Artificial Light*