

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA



**TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DELLE
TELECOMUNICAZIONI**

**COMUNICAZIONI OTTICHE WIRELESS
INDOOR**

INDOOR OPTICAL WIRELESS COMMUNICATIONS

RELATORE: PROF. ROBERTO CORVAJA

LAUREANDO: FABIO BORTOLATO

MATRICOLA N° 580850

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

SOMMARIO

Negli ultimi anni, si è cercata un'alternativa ai sistemi a radiofrequenza e si è scoperto che essa può essere rappresentata dai sistemi wireless ottici.

Nel documento verranno considerati e descritti i sistemi ottici wireless indoor. Gli ambienti considerati, quindi, saranno stanze di abitazioni, uffici, ecc. Si prendono in esame la descrizione generale di un sistema ottico wireless con le sue configurazioni topologiche e le tecniche di modulazione che vengono utilizzate.

In seguito saranno analizzati i problemi che deve affrontare un progettista di tali sistemi. Infine, dopo una breve descrizione delle tecniche di accesso multiplo, verrà presentata l'evoluzione futura in questo campo.



Fig. i: Led bianco

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	STRATO FISICO	3
2.1	Descrizione di un sistema OW indoor	3
2.1.1	Trasmettitore	4
2.1.2	Ricevitore	5
2.2	Tecniche di modulazione	7
2.2.1	On-Off Keying (OOK)	7
2.2.2	Pulse Modulation (PM)	8
2.2.3	Prestazioni degli schemi OOK, PPM e DPIM comparate	11
2.2.4	Modulazioni a sottoportante multipla (OFDM ottico)	18
2.3	Topologia del sistema	20
2.3.1	Sistemi a radiazione infrarossa diretta (DBIR)	21
2.3.2	Sistemi a radiazione infrarossa diffusa (DFIR)	22
2.3.3	Sistemi a radiazione infrarossa quasi-diffusa (QDIR)	22
3	DESIGN CHALLENGES	24
3.1	Il canale ottico wireless	24
3.2	Sicurezza per gli occhi	26
3.3	Interferenza dovuta alla luce ambientale	29
3.4	Perdite nella propagazione libera	29
4	ACCESSO MULTIPLO	32
4.1	Tecniche di accesso multiplo	32
4.1.1	Tecniche di multiplazione elettriche	33

4.1.2	Tecniche di multiplazione ottiche	34
4.2	Multiple input multiple output (MIMO)	34
4.2.1	MIMO utilizzando collegamenti SISO paralleli	34
4.2.2	MIMO utilizzando modulazione spaziale	35
5	EVOLUZIONE FUTURA	
	Errore. Il segnalibro non è definito.	
	Bibliografia	40

1 INTRODUZIONE

Il numero di persone che utilizzano reti wireless indoor è in rapido aumento. Questo richiede interconnessioni flessibili attraverso i sistemi di comunicazione centralizzati o distribuiti. Il metodo tradizionale per eseguire questi collegamenti è il collegamento fisico via cavo che però presenta dei problemi a livello di installazione ed espansione.

I sistemi wireless, invece, sono molto più facili da installare e da espandere ed offrono all'utente una maggiore mobilità. Essi possono essere realizzati sia con tecnologia ad infrarossi (IR) che con sistemi a radiofrequenza (RF).

Per problemi di spettro disponibile ristretto e di interferenza, i sistemi RF hanno lo svantaggio di poter operare solo a determinate frequenze. Inoltre, soffrono di problemi di sicurezza in quanto la radiazione elettromagnetica passa attraverso i muri e, quindi, non è possibile confinarla. Per questi motivi, negli ultimi anni, è stata presa in forte considerazione l'idea di realizzare sistemi wireless con tecnologia ottica.

Proprietà	Radio	Infrarossi	Implicazioni per la tecnologia IR
Regolamentazione larghezza di banda	Si	No	Non sono richieste licenze Elevata compatibilità
Passaggio attraverso i muri	Si	No	Minor mobilità Sicurezza maggiore Possibilità di riutilizzo della portante in stanze attigue
Multipath	Si	Si	Problemi ad alti data rate ISI
Rumore dominante	Altre utenze	Luce ambientale	Corto raggio di copertura

Tab. 1.: Tecnologie RF e IR comparate

Come si può vedere dalla Tab.1, il wireless ottico (OW) ha delle potenzialità che lo rendono una valida alternativa ai sistemi a radiofrequenza. Inoltre, i dispositivi usati per la trasmissione e ricezione, ovvero led/laser e fotodiodi sono a buon mercato se comparati con dispositivi RF. Una delle caratteristiche più importanti elencate in tabella è che il segnale ottico non passa attraverso i muri. Quest'ultima peculiarità rende semplice realizzare una rete a singola cella per stanza. Come esempio, si può prendere un complesso di uffici, dove tutte le sale potranno utilizzare le stesse portanti formando un'architettura cellulare. A fronte di questi punti di forza il wireless ottico (OW) sta diventando popolare in vari ambienti come case, uffici, studi medici, industrie e stabilimenti d'affari.

Anche se l'infrarosso offre notevoli vantaggi come mezzo di comunicazione indoor, ha anche degli svantaggi. Molti aspetti danneggiano le performance dei sistemi di trasmissione indoor, alcuni dei quali sono la velocità relativamente limitata dei dispositivi opto-elettronici, il rumore causato dalla luce ambientale e le perdite di percorso che rendono necessaria un'alta potenza di trasmissione. Quest'ultima a sua volta è soggetta a limitazioni per preservare gli occhi e risparmiare energia. Non è facile, quindi, progettare delle reti ottiche wireless in quanto bisogna tenere conto di diversi parametri e restrizioni.

2 STRATO FISICO

2.1 Descrizione di un sistema OW indoor

Un sistema di comunicazioni ottiche non guidate non differisce concettualmente dagli altri sistemi di comunicazione a radiofrequenza ma ha la peculiarità di utilizzare la propagazione libera delle onde ottiche.

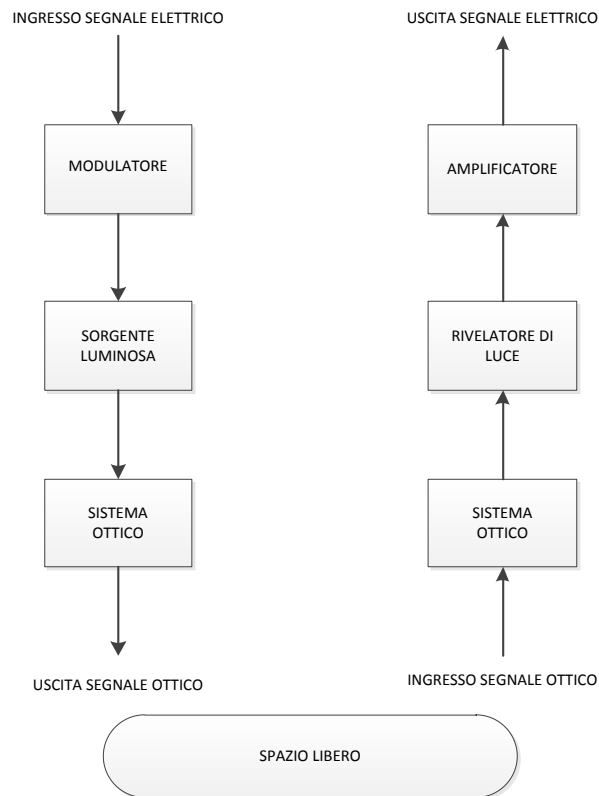


Fig. 1: Schema a blocchi di un tipico sistema OW indoor

Una configurazione come quella rappresentata in Fig.1 è costituita da una sorgente luminosa, lo spazio aperto come mezzo di propagazione e da un ricevitore. L'informazione, tipicamente sotto forma digitale, è l'ingresso per un circuito elettronico che modula la portante ottica in seguito emessa dalla sorgente. L'output della sorgente passa attraverso un sistema ottico, formato da lenti per il puntamento e la focalizzazione del fascio, e poi è spedita nel mezzo trasmissivo (aria). Il segnale

ricevuto allo stesso modo passa attraverso il sistema ottico di ricezione che questa volta agisce come un telescopio ovvero focalizza il fascio diffuso sull'area di foto-rivelazione.

I sistemi OW usano tecnologia infrarossa (IR) con collegamenti a modulazione di intensità (realizzata variando la corrente di polarizzazione di LED o LD) e rivelazione diretta della portante ottica (realizzata da fotodiodi PIN o APD che producono una corrente elettrica proporzionale alla potenza ottica che li incide).

Quando si opera con apparati ottici wireless la lunghezza d'onda prescelta va da 780nm a 950nm. Questo intervallo è scelto in ragione del fatto che vi è basso costo di LED e diodi laser (LD) e, inoltre, questa banda coincide con il picco di minor costo e più bassa capacità parassita dei fotodiodi al silicio.

2.1.1 Trasmettitore

Una componente fondamentale in un sistema di comunicazioni è la sorgente. Le sue proprietà, infatti, giocano un ruolo cruciale nella determinazione delle prestazioni del sistema. Per il trasmettitore OW si considerano due possibili scelte, entrambe basate sulle proprietà della giunzione a semiconduttore: i diodi laser (LD) e i led. Queste due categorie si differenziano le une dalle altre sia per le prestazioni ottenibili, sia per i principi di funzionamento.

Caratteristica	Light-Emitting Diodes	Diodi Laser
Larghezza spettrale (λ)	25-100 nm	$<10^{-5}$ fino a 5 nm
Modulation Bandwidth	Decine di KHz-Decine di MHz	Decine di MHz-Decine di GHz
Efficienza di conversione E/O	10-20%	30-70%
Sicurezza per gli occhi	In generale considerato sicuro	Deve essere reso sicuro (specialmente per $\lambda < 1400$ nm)
Costo	Basso	Medio-Alto
Tempo di commutazione acceso-spento	Elevato	Molto minore rispetto ai LED
Luce generata	Fortemente incoerente e scarsamente direzionale	Elevato grado di coerenza ed alta direzionalità

Tab. 2: Confronto tra led e laser

Se si osserva la Tab.2, si può notare che i laser sarebbero preferibili rispetto ai led perché possono generare potenza maggiore, possono operare in una più ampia larghezza di banda e hanno caratteristica di conversione elettrico/ottica lineare. La linearità nelle conversioni di segnale è particolarmente importante quando vengono usati schemi di modulazione sofisticati come modulazione multi-portante o segnalazione multilivello. Quando è scelta una sorgente luminosa, bisogna tener conto del rischio per gli occhi e della complessità e velocità del sistema. Pur considerando che i led presentano una bassa efficienza di conversione e una velocità sensibilmente inferiore rispetto ai laser, essi vengono preferiti negli ambienti indoor per merito del loro basso costo, della relativa facilità con cui si riesce a pilotarli e del fatto che non costituiscono un pericolo per gli occhi.

Per utilizzare i laser, che producono un fascio di radiazione stretto, si ricorre a un sistema di lenti atto ad ottenere luce diffusa. Facendo questo si ottiene un doppio risultato, si riesce a coprire un'area più vasta e si riduce la potenza per unità di superficie rendendo l'ambiente più "eye safe".

2.1.2 Ricevitore

Anche se esistono molte somiglianze tra un ricevitore progettato per fibra ottica e uno per un collegamento wireless, esistono due fondamentali differenze: la prima è la presenza di luce ambientale e la seconda è che l'SNR di un sistema ottico wireless dipende dal quadrato della potenza media ricevuta.

La potenza della luce ambientale è superiore rispetto alla potenza del segnale, di circa 25dB. Se l'effetto non è mitigato, quindi, il rischio è quello che il segnale utile venga sopraffatto e che l'amplificatore terminale saturi.

Poiché, inoltre, la potenza trasmessa è limitata dai parametri sulla sicurezza per gli occhi e dal consumo, è necessario un ricevitore con un largo collettore.

Per tentare di risolvere o di attenuare questi problemi è necessario utilizzare filtri ottici e concentratori. Sovrapponendo strati di film sottile, con differenti indici di rifrazione, vengono creati i filtri ottici che possono essere utilizzati per selezionare una banda stretta di radiazione (fino a 1nm). Questa banda è molto utile per eliminare la luce di background, bisogna però assicurarsi che la luce trasmessa sia centrata

all'interno di tale banda, quindi è necessario l'utilizzo di laser. Se invece si utilizza un filtro passa alto, si può utilizzare la naturale risposta in frequenza di un fotodiodo al silicio. Quest'ultima, infatti, non risponde per lunghezze d'onda superiori a 1100 nm circa e la combinazione filtro-fotodiodo realizza effettivamente una risposta passa-banda.

L'aumento dell'area di foto-rivelazione, crea un aumento della capacità parassita del ricevitore e, di fatto, una riduzione della velocità del sistema. Per questo motivo vengono utilizzati dei concentratori ottici, ovvero delle lenti in grado di riflettere i raggi verso il foto-rivelatore in modo da aumentarne l'area effettiva. I concentratori possono essere di diverse dimensioni e geometrie in base alle applicazioni che si vogliono ottenere.

L'elemento principale di un ricevitore è il fotodiodo. I fotodiodi sono dispositivi che convertono il segnale ottico in elettrico basandosi essenzialmente sulla foto-generazione di coppie elettrone lacuna. Essi possono essere di due tipi: i diodi PIN e i fotodiodi a valanga (APD).

I fotodiodi PIN sono più comunemente usati per merito del loro basso costo, la loro tolleranza alle variazioni di temperatura e il fatto che operano con voltaggio di alimentazione basso. Essi, però, sono meno sensibili di circa 10-15 dB rispetto agli APD. Si deve quindi compensare, aumentando la potenza trasmessa e usando una lente con un diametro abbastanza grande. I diodi a valanga, invece, offrono la possibilità di sfruttare una potenza maggiore in ricezione e questo rende il collegamento più robusto riducendo la criticità di mirare perfettamente la lente. Inoltre i diodi APD hanno un buon guadagno interno che aumenta il rapporto segnale rumore nei confronti del rumore termico.

La scelta tra PIN e APD va fatta in base alle specifiche del collegamento. I fotodiodi PIN sono a basso costo, richiedono tensione di alimentazione ridotta, quindi sono a basso consumo, e hanno una buona velocità di risposta. Per contro, gli APD offrono una maggiore sensibilità, come detto in precedenza.

Di solito per sistemi indoor, che sono applicazioni consumer dove è prevalente l'aspetto costo, vengono utilizzati i fotodiodi PIN.

2.2 Tecniche di modulazione

In un sistema OW indoor sono possibili svariate tecniche di modulazione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi. Poiché una fonte luminosa emette una quantità limitata di potenza ottica, le prestazioni di uno schema di modulazione si valutano in base alla potenza media richiesta dal ricevitore per garantire un determinato errore a una data velocità. I ricevitori a singolo elemento, che consistono di un collettore la cui uscita è accoppiata a un singolo foto-rivelatore, prediligono l'uso di un'ampia area di foto-rivelazione, tipicamente 1 cm^2 . L'uso di un ricevitore dotato di una zona di rivelazione così estesa, oltre ad incrementare il rapporto segnale rumore, aumenta anche le dimensioni dell'area di copertura. Tuttavia, la capacità parassita associata a un rivelatore così ampio, limita la larghezza di banda del ricevitore e, quindi, bisogna tenere in particolare considerazione l'efficienza spettrale della modulazione utilizzata.

Non è possibile adottare una comunicazione ottica coerente (nella quale si sfruttano le caratteristiche del campo elettrico come per una portante RF) in quanto, nell'onda ricevuta, si presentano fenomeni di interferenza. Per questo motivo l'unica possibilità è di impiegare alcuni schemi di modulazione d'intensità e rivelazione diretta (IM/DD) ovvero On-Off Keying (OOK), Pulse Modulation (PM) e Sub-carrier modulation (OFDM ottico).

2.2.1 On-Off Keying (OOK)

Tra tutti i vari schemi di modulazione IM/DD, l'OOK è la più semplice. In questo schema di modulazione, uno zero è rappresentato da un valore nullo di intensità mentre un valore positivo qualsiasi di intensità rappresenta un uno. Prima di essere trasmessa, l'informazione è codificata RZ oppure NRZ (Fig.2). Gli impulsi possono avere differenti duty cycle.

L'OOK-RZ, rispetto alla controparte NRZ, richiede un aumento di banda in ricezione di un fattore $1/d$ (dove d rappresenta il duty cycle) ma si ha un miglioramento in termini di potenza media disponibile poiché è possibile incrementare la potenza di picco di un fattore $1/d$.

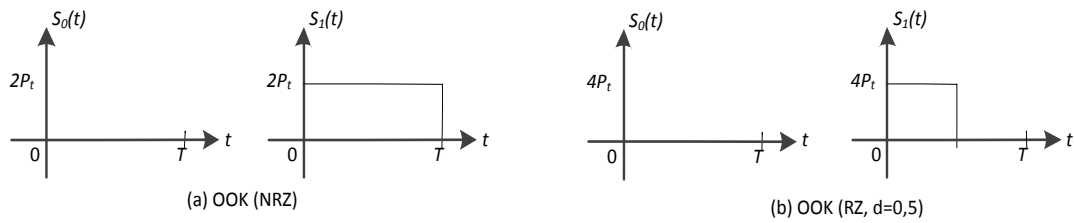


Fig. 2: Simboli NRZ e RZ con duty cycle $d = 0.5$

2.2.2 Pulse Modulation (PM)

La modulazione OOK non è adatta a garantire l'efficienza, in termini di potenza, richiesta dalla gran parte delle applicazioni wireless.

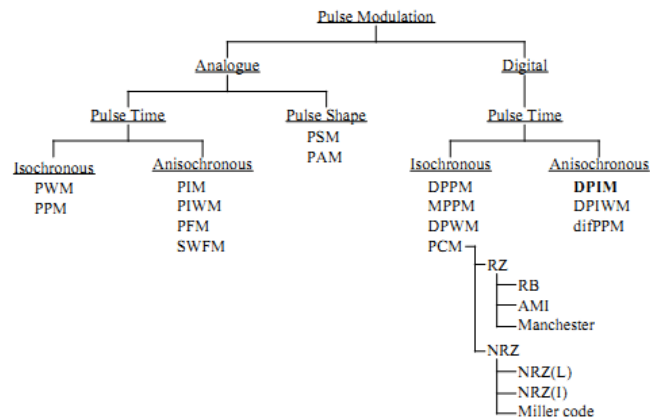


Fig. 3: Albero delle modulazioni impulsive

Per questo motivo, sono utilizzati altri schemi di modulazione, conosciuti col nome di modulazioni impulsive (Fig.3). Queste tecniche di modulazione garantiscono trasmissione dati ad alta velocità, migliorando l'efficienza in potenza con un costo relativamente limitato di larghezza di banda. Alcune modulazioni che saranno approfondite in seguito sono: pulse-position modulation (PPM), differential pulse-position modulation (DPPM) e digital pulse interval modulation (DPIM).

2.2.2.1 Pulse-position modulation (PPM)

La PPM è considerata da molti la tecnica di modulazione migliore per sistemi di comunicazione che usano modulazioni di intensità e rivelazione diretta (IM/DD) e

potenza limitata. Essa consiste nel mappare M bit in un alfabeto di L simboli, con $L = 2^M$. Per ogni singolo periodo di simbolo, sono presenti L slot dei quali uno è occupato dall'impulso e gli altri $L - 1$ hanno valore nullo. L'informazione è codificata dalla posizione che occupa l'impulso all'interno del simbolo. Come esempio possiamo prendere una 4-PPM, mostrata in Fig.4, la quale utilizza 4 simboli per rappresentare 2 bit.

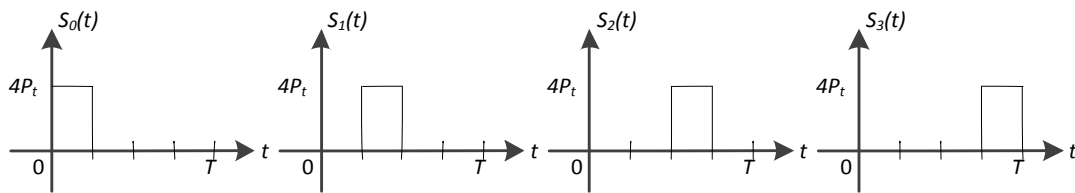


Fig. 4: Possibili simboli di una 4-PPM

Sebbene la PPM offra una buona efficienza in termini di potenza, aumentando il numero di bit per simbolo, M , si ha una notevole riduzione dell'efficienza spettrale. La PPM è largamente usata nei sistemi di comunicazione wireless ed è lo schema di modulazione scelto per la realizzazione del protocollo IEEE 802.11 su sistemi basati sulla tecnologia IR. È inoltre utilizzato nei collegamenti Infrared Data Association (IrDA) seriali a 4 Mbps.

Se comparata con l'OOK, la modulazione impulsiva richiede un aumento della complessità del sistema affinché venga garantita la sincronizzazione sia dello slot sia del simbolo al ricevitore.

2.2.2.2 Differential PPM (DPPM)

La DPPM è una semplice variazione della PPM che consente di migliorare l'efficienza in termini di larghezza di banda e potenza. Nella Fig. 5 viene fatto un confronto tra i simboli della 4-PPM (a) e della 4-DPPM (b). Ogni simbolo per la 4-PPM consiste di 4 slot dei quali uno è "alto" ovvero contiene un impulso e gli altri tre sono "bassi", ovvero sono settati a zero. Un simbolo 4-DPPM è ottenuto dal corrispondente simbolo 4-PPM cancellando tutti gli slot posti a zero che seguono lo slot "alto".

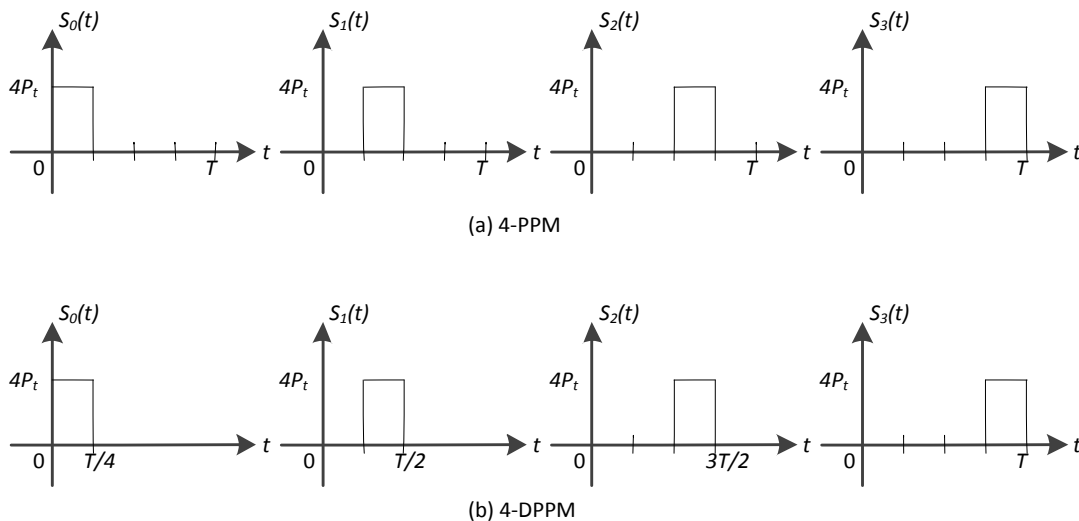


Fig. 5: 4-PPM e 4-DPPM a confronto

Uno dei vantaggi della DPPM rispetto alla PPM è che la sincronizzazione di simbolo non è necessaria ma, cosa più importante, la DPPM permette di raggiungere più alti livelli di efficienza in termini di banda e di potenza rispetto alla PPM.

2.2.2.3 Differential pulse interval modulation (DPIM)

In ogni simbolo della modulazione PPM, gli slot vuoti che precedono e seguono l'impulso sono ridondanti ed è questa ridondanza che è rimossa quando si utilizza la DPIM. Come la PPM, essa mappa M bit in un alfabeto di $L = 2^M$ simboli. La durata dei simboli è variabile, ed è determinata dal contenuto informativo del simbolo. Ogni simbolo inizia con un impulso seguito da uno slot di guardia (per evitare di trovarsi in presenza di due impulsi consecutivi) e da un numero di slot vuoti pari al valore decimale dei bit codificati. In questo modo un simbolo che codifica M bit di dati è rappresentato da un impulso a potenza costante in uno slot, seguito da k slot a potenza nulla, con $1 \leq k \leq L$ come mostrato in Fig.6. Per fare un confronto visivo in Fig.6 sono anche inseriti simboli modulati OOK e PPM. La minima e la massima lunghezza di un simbolo sono rispettivamente $2T_s$ e $(L + 1)T_s$ secondi, con T_s durata di uno slot.

La modulazione DPIM, se comparata con la PPM, offre un'alta capacità di trasmissione che tende a $2M$ bit per simbolo, doppia rispetto all'OOK oppure alla

PPM in quanto, in media, un simbolo DPIM senza lo slot di guardia è lungo metà rispetto a un simbolo PPM.

Poiché lo stesso data rate medio è supportato da una modulazione DPIM con metà degli slot della PPM, si ha un incremento dell'efficienza spettrale ma, all'aumento del duty cycle, corrisponde una riduzione dell'efficienza in termini di potenza. La Fig.6(b) mostra come per una 4-DPIM si abbia una potenza media di circa 6,8 dB più bassa dell'OOK, ma più alta di 2,8 dB circa rispetto alla PPM.

La maggior capacità della DPIM può essere utilizzata anche per inviare bit di ridondanza in modo da poter correggere in ricezione eventuali errori in base al bit error rate voluto.

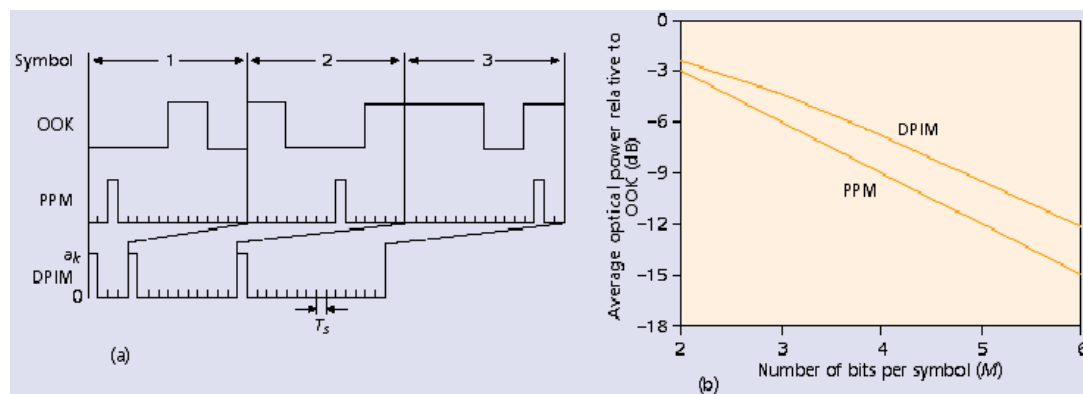


Fig. 6: Struttura dei simboli DPIM e (b) potenza media normalizzata all'OOK rispetto al numero di bit per simbolo

2.2.3 Prestazioni degli schemi OOK, PPM e DPIM comparate

La configurazione topologica migliore, da un punto di vista utente, è sicuramente il collegamento diffuso (vedi sezione 2.3). Esso fa affidamento sulla riflessione della luce sulle superfici come soffitto, pareti, tavoli e quant'altro, presenti all'interno di una stanza ed è suscettibile sia ai disturbi dovuti alla luce ambientale che alle attenuazioni di segnale e all'interferenza inter-simbolica dovuta alla propagazione multipath. Questi fattori rendono necessaria la trasmissione di elevati livelli di potenza. Come già detto in precedenza, però, i trasmettitori sono limitati dalle norme in materia di sicurezza per gli occhi e, inoltre, dal consumo

energetico. Sarebbe quindi desiderabile uno schema di modulazione che permetta un efficiente utilizzo di potenza.

Di solito i ricevitori richiedono l'uso di un'area di rivelazione considerevole, questo provoca un aumento della capacità del sistema limitando la larghezza di banda. Quindi, bisogna considerare in maniera importante anche l'efficienza spettrale di uno schema di modulazione.

2.2.3.1 Efficienza in potenza

A. OOK

Si considera il problema di determinare la probabilità d'errore per uno schema di modulazione che utilizza L simboli in presenza di rumore gaussiano bianco, assumendo di utilizzare un criterio di decisione a massima verosimiglianza (ML) e trascurando l'ISI. Il trasmettitore invia informazioni ad un bit rate R_b [bit/s] trasmettendo uno degli L simboli $\{x_0(t), x_1(t), x_2(t), \dots, x_L(t)\}$, con $x(t)$ che rappresenta potenza ottica, ogni $T = \frac{\log_2 L}{R_b}$ secondi e il canale sia AWGN con potenza spettrale N_0 . Per prevenire l'ISI, ogni segnale è confinato all'interno dell'intervallo $[0, T)$. L'insieme dei segnali soddisfa le seguenti proprietà:

- $\overline{x(t)} \geq 0$ con $\overline{x(t)}$ valore medio del simbolo;
- $\overline{x(t)} \leq P$;
- la potenza media è $\frac{1}{L} \sum_i \overline{x_i(t)} = P$.

Per semplificare l'analisi, poniamo che il bit error rate (BER) sia determinato dai simboli adiacenti :

$$BER = Q\left(\frac{d_{min}}{2\sqrt{N_0}}\right) \quad (1)$$

dove d_{min} è la minima distanza euclidea tra ogni coppia di simboli,

$$d_{min}^2 = \min \int [X_i(t) - X_j(t)]^2 dt \quad (2)$$

e la funzione Q è si riferisce alla funzione d'errore

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2x}} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \right]. \quad (3)$$

La minima distanza tra due segnali OOK è

$$d_{OOK} = \frac{2P}{\sqrt{R_b}} \quad (4)$$

e, con riferimento all'equazione (1), il BER per una modulazione OOK è

$$Q \left(\frac{P}{\sqrt{N_0 R_b}} \right). \quad (5)$$

Useremo in seguito l'OOK come punto di riferimento per gli altri schemi di modulazione. La potenza richiesta da una modulazione OOK per raggiungere un dato BER è:

$$P_{OOK} = \sqrt{N_0 R_b} Q^{-1}(BER). \quad (6)$$

La potenza richiesta da ogni altro schema di modulazione per raggiungere lo stesso bit error rate è approssimativamente:

$$P = \left(\frac{d_{OOK}}{d_{min}} \right) P_{OOK}. \quad (7)$$

Per caratterizzare la richiesta di potenza per ogni altro schema di modulazione useremo il rapporto d_{OOK}/d_{min} .

B.PPM

Un segnale PPM può essere espresso come

$$X(t) = LP \sum_{k=0}^{L-1} c_k p\left(t - \frac{kT}{L}\right) \quad (8)$$

dove $[c_0, c_1, \dots, c_{L-1}]$ è la codeword PPM e $p(t)$ è un impulso rettangolare di durata T/L e altezza unitaria. Tutti i simboli sono equidistanti, con:

$$d^2 = 2LP^2 \frac{\log_2 L}{R_b} \quad (9)$$

La potenza media richiesta è dunque:

$$\frac{P_{PPM}}{P_{OOK}} \approx \frac{d_{OOK}}{d_{min}} = \sqrt{\frac{2}{L \log_2 L}} \quad (10)$$

Quindi, per ogni L maggiore di due, la PPM richiede una potenza ottica inferiore rispetto all'OOK.

C.DPIM

Il segnale DPIM può essere descritto come:

$$X(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a \Phi \left[t - T_s \left(2k + \sum_{m=-\infty}^{k-1} S_m \right) \right] \quad (11)$$

con $\Phi(t) = \sqrt{\frac{L+1}{T}} p(t)$ che rappresenta un impulso rettangolare unitario di durata $T/(L+1)$ e ampiezza a , T_s è la durata dello slot e S ($S_m \in S$) è la sequenza dati stocastica che rappresenta l'informazione codificata DPIM. Dalla formula (11) si evince che il simbolo DPIM ha lunghezza variabile. I simboli, comunque sono equidistanti. La lunghezza media di un simbolo è $(L+3)T_s/2$. Assumendo che il sistema DPIM codifichi M bit per simbolo la durata di uno slot è scelta in base alla durata massima della trasmissione di M bit trasmessi con l'OOK, ovvero T , quindi $T_s = T/(L+1)$. Anche la potenza ottica è variabile, ma la potenza media trasmessa

può essere calcolata usando la lunghezza media di un simbolo. Nella formula (11) a è scelta in modo tale che la potenza ottica media sia P . Quindi si ha:

$$a = \frac{L+3}{2\sqrt{L+1}} \bar{P}\sqrt{T} = \frac{(L+3)d_{OOK}}{4} \sqrt{\frac{\log_2 L}{L+1}} \quad (12)$$

E

$$d_{OOK} = \frac{4a}{L+3} \sqrt{\frac{L+1}{\log_2 L}} \quad (13)$$

$$d_{min} = \sqrt{2a} \quad (14)$$

$$\frac{\bar{P}_{DPIM}}{P_{OOK}} = \frac{d_{min}}{d_{OOK}} = \frac{4\sqrt{\frac{L+1}{\log_2 L}}}{L+3\sqrt{2}} \quad (15)$$

La Fig.6(b) mostra come, nel caso di $M=4$, la DPIM richiede 5.1 dB di potenza ottica in meno rispetto all'OOK ma richiede 2.4 dB in più rispetto alla PPM.

2.2.3.2 Efficienza spettrale

Assumiamo che il trasmettitore invii dati a una data velocità di bit/s. Ogni simbolo ha M bit con $M = \log_2 L$. Per la modulazione OOK la larghezza di banda è approssimabile a R_b , cioè $B_{OOK} = R_b$, ovvero l'inverso della larghezza dell'impulso. Per lo schema PPM, la larghezza di banda richiesta è approssimabile all'inverso della durata di uno slot, cioè $B_{PPM} = \frac{L}{T} = \frac{LR_b}{\log_2 L}$. Per la DPIM, bisogna tenere presente che il data rate non è costante. Bisogna quindi usare il bit rate medio e il symbol rate medio. La larghezza di banda, quindi, basata sulla durata media del simbolo e relativa alla modulazione OOK, è la seguente: $B_{DPIM} = [(L+3)R_b]/(2\log_2 L)$. Come mostra la Fig.7 la richiesta di banda della PPM è circa doppia rispetto alla DPIM per $M > 2$.

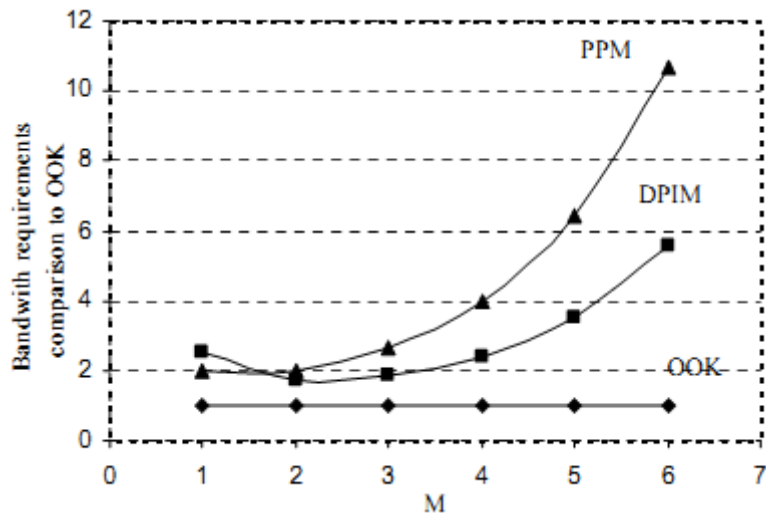


Fig. 7: Larghezze di banda comparate

La Fig.8, invece, mostra la power spectral density (PSD), della OOK-NRZ, 8-PPM e 8-DPIM. A parità di potenza ottica trasmessa, assumendo che sia usato un impulso rettangolare, il grafico riporta che la 8-DPIM e la 8-PPM richiedono una larghezza di banda maggiore rispettivamente di ~1,8 e ~2,7 volte la banda dell'OOK per avere lo stesso data rate.

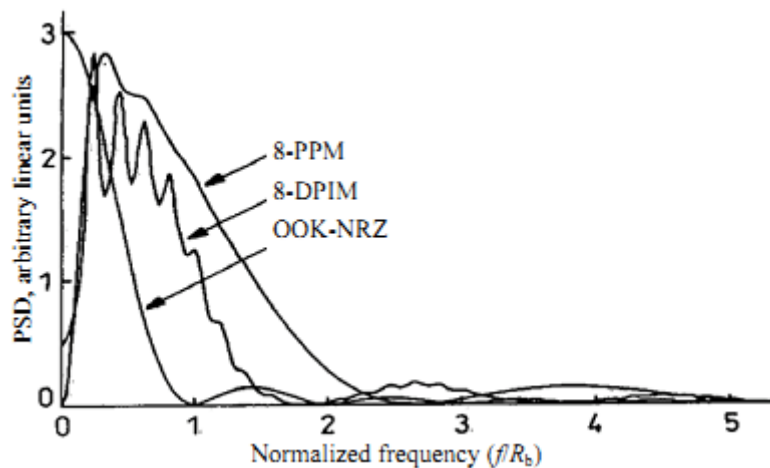


Fig. 8: PSD per OOK-NRZ, 8-DPIM e 8-PPM

2.2.3.3 Capacità trasmissiva

La PPM ha la stessa capacità di trasmissione dell'OOK ma la PPM è più efficiente in termini di potenza. La DPIM, invece, può offrire una capacità di

trasmissione maggiore. Assumendo che la capacità per una OOK/PPM sia M bit/simbolo e il periodo di simbolo sia T_{sOOK} , per la DPIM il periodo di simbolo sarà:

$$T_{sDPIM} = \bar{n}T_s = \frac{L+3}{2(L+1)} T_{sOOK} \quad (16)$$

e la capacità di trasmissione della DPIM quindi:

$$C_{DPIM} = \frac{T_{sOOK}}{T_{sDPIM}} M = \frac{2(L+1)}{L+3} M. \quad (17)$$

Dal momento che la lunghezza media di un simbolo DPIM, non considerando lo slot di guardia, è metà della lunghezza di un simbolo OOK/PPM, la capacità di trasmissione cresce al crescere di M . Quando M è abbastanza grande, la capacità di trasmissione tende a $2M$, doppia rispetto alla capacità degli altri 2 schemi (Fig.9).

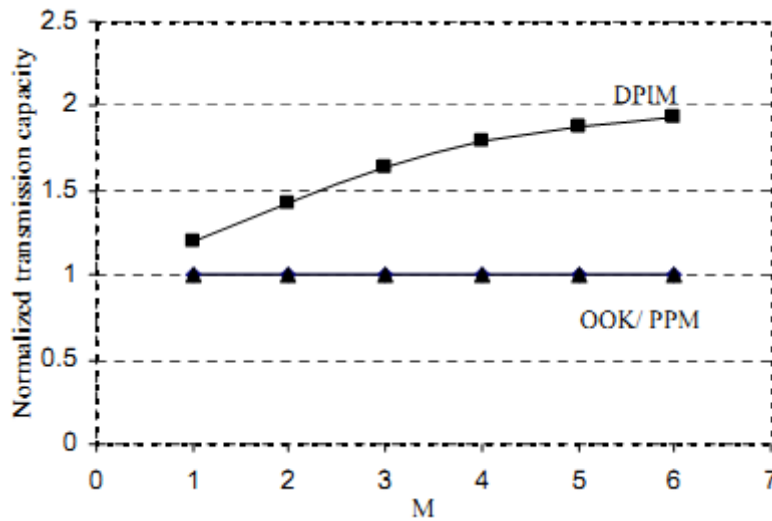


Fig. 9: Capacità di trasmissione DPIM normalizzata

Per le comunicazioni ottiche wireless, la maggiore capacità di trasmissione della DPIM può essere utilizzata in svariati modi. Può essere inviato lo stesso data rate con metà della banda della PPM aumentando, quindi, l'efficienza spettrale. Si può, inoltre, supportare un numero superiore di bit per simbolo senza aumentare la diminuire il periodo di slot. Infine, è possibile utilizzare la capacità di trasmissione

della DPIM inserendo dei bit di ridondanza nel codice in modo da permettere lo stesso bit error rate con minore potenza trasmessa.

La tabella successiva riassume i parametri fin qui descritti normalizzati rispetto alla modulazione OOK.

Modulazione	Larghezza di banda	Potenza richiesta	Capacità trasmissiva
OOK	R_b	1	$\log_2 L$
PPM	$\frac{LR_b}{\log_2 L}$	$\sqrt{\frac{2}{L \log_2 L}}$	$\log_2 L$
DPIM	$\frac{(L+3)R_b}{2 \log_2 L}$	$\frac{4 \sqrt{\frac{L+1}{\log_2 L}}}{L+3\sqrt{2}}$	$\frac{2(L+1)}{L+3} M$

Tab. 3: OOK, PPM e DPIM a confronto

2.2.4 Modulazioni a sottoportante multipla (OFDM ottico)

Gli schemi di modulazione a singola portante come OOK e PPM, quando vengono superate velocità dell'ordine dei 100 Mbps richiedono un'elevata larghezza di banda e soffrono di problemi di ISI dovuta a multipath.

Ogni qual volta gruppi di bit modulano frequenze radio differenti, la modulazione è chiamata modulazione a sottoportante multipla (MSM). Nella MSM la frequenza di simbolo è ridotta su ogni sottoportante per avere in totale lo stesso bit-rate. In questo modo ogni sottoportante diventa un segnale a banda stretta e, dal momento che non è soggetto a grandi distorsioni, il ricevitore non ha bisogno di equalizzatore.

L'Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) è una tecnica di modulazione a sottoportante multipla nella quale ogni portante è modulata con una modulazione di tipo convenzionale con basso symbol rate, in modo da mantenere un data rate simile agli schemi a singola portante. Il vantaggio primario dell'OFDM rispetto agli schemi a singola portante è la possibilità di comunicare anche in condizioni pessime del canale, il secondo vantaggio è che la riduzione del symbol

rate sulle singole portanti porta ad una riduzione dell'ISI. La possibilità di combinare l'OFDM con ogni altro schema di accesso multiplo la rende preferibile rispetto alle altre tecniche. Nei sistemi ottici IM, la modulazione OFDM comunemente usata in RF, deve essere modificata in quanto non si dispongono delle necessarie informazioni sulla frequenza e sulla fase. Sono usati 2 schemi per realizzare l'OFDM nei sistemi ottici IM/DD: il primo è l'OFDM "DC-biased optical" (DCO-OFDM) e il secondo è l'OFDM "asymmetrically clipped optical" (ACO-OFDM) (vedi Fig 10.).

Quando l'OFDM è usato in sistemi a radio frequenza, il segnale complesso OFDM in banda base è usato per modulare l'ampiezza o la fase della portante radio. Per contro, nei sistemi ottici wireless che usano IM/DD, il segnale in banda base modula l'intensità della portante e non la sua ampiezza o la sua fase. Questo significa che il segnale deve essere reale e positivo. Un segnale OFDM reale può essere creato vincolando l'input della Fast Fourier Trasform inversa, in modo da avere simmetria Hermitiana e può essere reso positivo anche aggiungendo una componente continua come accade per la DCO-OFDM. La ACO-OFDM è ottenuta, invece, ponendo a zero e trasmettendo solo la parte positiva della forma d'onda OFDM.

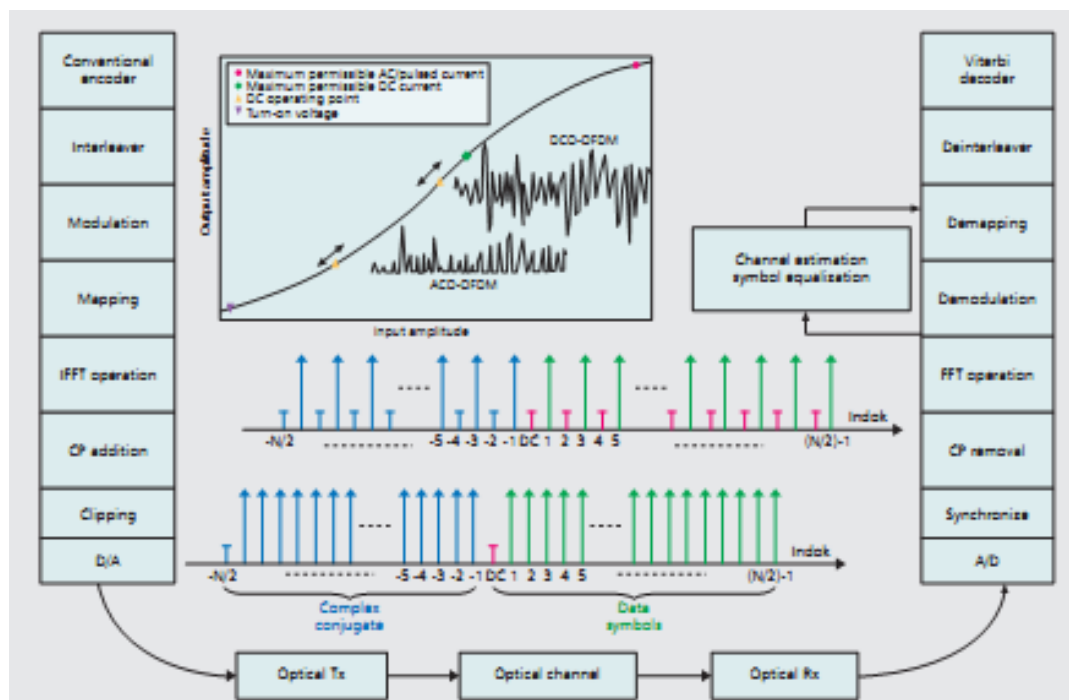


Fig. 10: Schema a blocchi di DCO-OFDM e ACO-OFDM con relazione tensione d'ingresso-corrente

d'uscita di un led

Si possono ricavare molteplici vantaggi dall'uso delle MSM. Infatti esse sono maggiormente adatte a trasmettere flussi di bit multiplexati da una stazione base a terminali mobili. Inoltre, possono essere trasmessi segnali a banda stretta a velocità più alta senza bisogno di equalizzare per eliminare l'ISI. Infine, per il fatto di utilizzare più sottoportanti, gli schemi di modulazione MSM sono in media più robusti rispetto a OOK e L-PPM al rumore luminoso a bassa frequenza creato dalle lampade fluorescenti (Fig.10).

2.3 Topologia del sistema

I sistemi ottici wireless indoor hanno la possibilità di sfruttare varie configurazioni per il collegamento infrarosso. Queste possono essere classificate a seconda del grado di direttività del trasmettitore e del ricevitore. Un trasmettitore e un ricevitore possono avere un "field of view" (FOV) stretto o largo e, a seconda delle dimensioni del campo visivo, si possono creare sistemi di trasmissione direttivi, non direttivi e ibridi come mostrato in Fig.11.

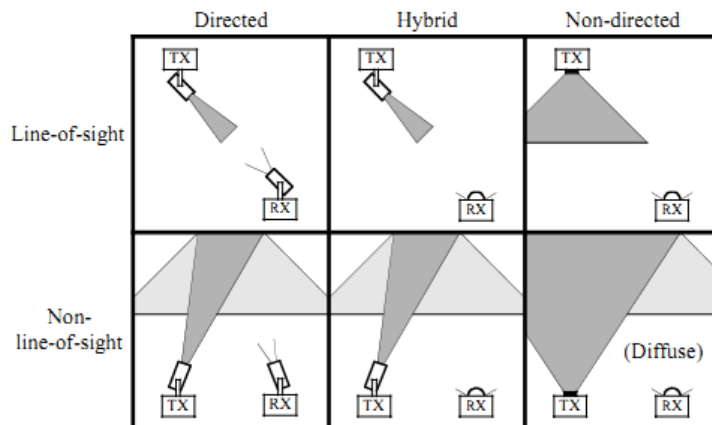


Fig. 11: Classificazione dei link infrarossi

Le tecniche di trasmissione infrarossa sono anche classificate come line of sight (LOS) e non line of sight (non-LOS). Le due configurazioni principali sono i sistemi direttivi LOS e i sistemi non direttivi non-LOS, anche chiamati sistemi diffusi. In

generale, i LOS direttivi minimizzano le perdite di percorso, massimizzano l'efficienza in potenza e possono garantire alte velocità di trasmissione.

Tali sistemi, però, richiedono calibrazione precisa e non sono in grado di supportare le trasmissioni punto-multipunto e multipunto-punto. Per di più, la possibile presenza di ostacoli come persone o cose nella line of sight, ovvero l'oscuramento, può degradare significativamente le connessioni. I sistemi non LOS (diffusi), pur supportando velocità inferiori, sono più robusti contro l'oscuramento e sono più facili da usare garantendo la mobilità.

2.3.1 Sistemi a radiazione infrarossa diretta (DBIR)

Nei sistemi a fascio di radiazione infrarossa diretta, il fascio ottico viaggia direttamente (attraverso una line of sight LOS) senza riflessioni dal trasmettitore al ricevitore. Il link ottico, usando questa tecnica, è stabilito tra due terminali fissati con dei trasmettitori e ricevitori ad alta direttività. Dal momento che non c'è mobilità, l'apertura del fascio e il campo di vista del trasmettitore e del ricevitore rispettivamente possono essere ridotti.

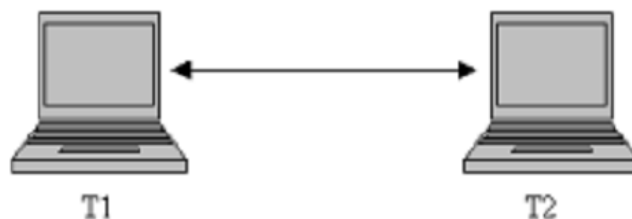


Fig. 12: DBIR

Usando questa tecnica si riducono le perdite dovute a riflessioni e rifrazioni e si massimizza l'efficienza in potenza. Inoltre sistemi che utilizzano questa tecnica possono avere velocità di trasmissione elevata. Il principale svantaggio è la mancanza di mobilità e la sensibilità all'oscuramento dovuto a persone e macchine. Il fascio stretto crea anche problemi di puntamento. Per fare in modo che anche un

operatore inesperto possa collocare il ricevitore in direzione del trasmettitore si deve optare per un fascio più largo.

2.3.2 Sistemi a radiazione infrarossa diffusa (DFIR)

Nei sistemi DFIR, ovvero a radiazione diffusa, il trasmettitore invia segnali con un largo angolo sul soffitto, in modo che una o più riflessioni del segnale arrivino al ricevitore.

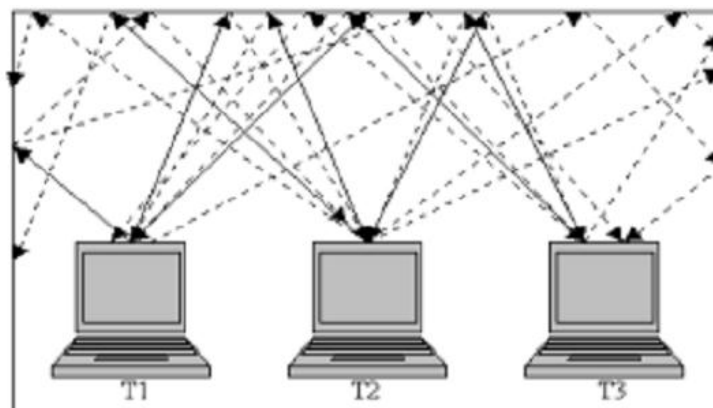


Fig. 13: DFIR

Questa è la configurazione migliore da un punto di vista utente perchè non è richiesto allineamento a priori e il sistema non richiede un percorso "in vista" per la trasmissione. Questo sistema presenta un'elevata perdita di percorso rispetto alla sua controparte DBIR, richiede potenza di trasmissione maggiore e un ricevitore con un campo di vista largo. Quando un impulso di breve durata è trasmesso con un angolo largo, viaggia attraverso percorsi multipli risultando un impulso esteso. Questo effetto è noto come dispersione multi-path, causa ISI ad elevate bit-rate. In questa configurazione la velocità dipende dalle dimensioni dell'ambiente e dai coefficienti di riflessione delle superfici al suo interno.

2.3.3 Sistemi a radiazione infrarossa quasi-diffusa (QDIR)

In generale, l'architettura QDIR è un compromesso tra DFIR e DBIR. Nei sistemi QDIR, ovvero a radiazione quasi diffusa, c'è una stazione base (BS) con

relativa copertura estesa fatta da riflettori attivi o passivi. La BS trasmette il segnale di potenza al terminale remoto (RT) e allo stesso modo quest'ultimo comunica con la stazione base. In un collegamento tra qualche terminale e la BS, essi devono essere "in vista", di conseguenza, il RT, non può essere totalmente mobile.

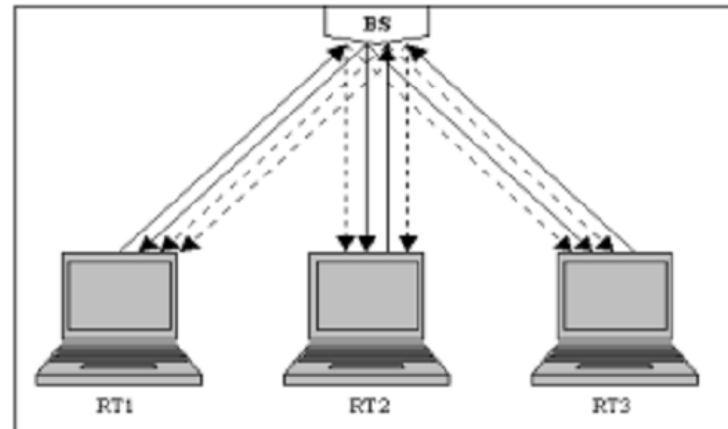


Fig. 14: QDIR

La ricetrasmittente del terminale remoto deve essere rivolta alla BS, oppure il suo campo di vista deve essere grande abbastanza da abilitare la comunicazione tra se stesso e la BS da tutte le posizioni della stanza. In un'altra configurazione di QDIR, il trasmettitore invia il segnale ottico su una determinata superficie del soffitto e si suppone che il ricevitore sia puntato verso quella superficie.

3 DESIGN CHALLENGES

La sfida che deve affrontare chi progetta un sistema a infrarossi è il raggiungimento di un elevato SNR. Le difficoltà nascono principalmente a causa di due problemi:

- l'SNR per i sistemi IM/DD dipende dal quadrato della potenza media del segnale ricevuto, che rende necessaria la trasmissione di un alto livello di potenza;
- l'interferenza dovuta alla luce ambientale, ovvero l'introduzione di rumore bianco e rumore a bassa frequenza ciclostazionario nel ricevitore.

Oltre a questi fattori, bisogna anche tenere in considerazione le perdite di percorso e che la larghezza di banda di un sistema wireless infrarosso è limitata a causa dell'interferenza di intersimbolo. Tutti queste componenti limitano, significativamente, la velocità cui può operare il sistema.

3.1 Il canale ottico wireless

Il modello di canale OW dipende dall'intensità della luce ambientale. In ambienti poco luminosi, il segnale ricevuto può essere modellato come un processo di Poisson con intensità

$$\lambda_r(t) = \lambda_s(t) + \lambda_n(t) \quad (18)$$

con λ_s e λ_n rispettivamente proporzionali alla potenza ottica istantanea del segnale ricevuto e alla luce ambientale. Per $\lambda_n = 0$, si ha un canale isolato dalla luce ambientale, come accade per un sistema in fibra ottica. Di solito, però, i sistemi ottici wireless operano in presenza di grandi quantità di luce ambientale emanata sia da fonti naturali sia artificiali. Il valore di λ_n è solitamente alto, tra i 10^{11} e i 10^{14} fotoni al secondo a seconda della vicinanza o meno di una finestra. Di conseguenza, il rumore shot dei fotodiodi può essere modellato come additive white Gaussian noise (AWGN). Il canale può essere modellato come un sistema lineare in banda base

(Fig.15), con potenza ottica istantanea $x(t)$, corrente d'uscita $y(t)$ e risposta impulsiva $h(t)$.

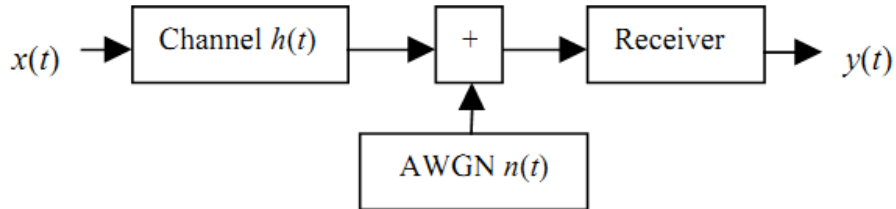


Fig. 15: Modello di canale

La corrente istantanea è data da:

$$y(t) = x(\tau) \otimes h(t - \tau) + n(t) \quad (19)$$

dove il simbolo \otimes denota la convoluzione. Poiché $x(t)$ rappresenta una potenza istantanea, essa non può mai essere negativa, quindi $x(t) \geq 0$ e la potenza ottica media trasmessa è

$$\bar{P}_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (20)$$

invece della consueta $|x(t)|^2$ utilizzata quando si parla di ampiezza. La potenza media del segnale ricevuto è data da

$$\bar{P} = H(0)\bar{P}_t \text{ con } H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (21)$$

Il rapporto segnale rumore in un collegamento è dato dalla seguente formula:

$$SNR = \frac{R^2 \bar{P}^2}{R_b N_0} = \frac{R^2 H(0)^2 \bar{P}_t^2}{R_b N_0}, \quad (22)$$

con R responsività del dispositivo e N_0 la potenza spettrale del rumore bianco bilatero.

Si nota dall'ultima formula che l'SNR dipende dal quadrato della potenza ottica media ricevuta. Questo implica che si deve trasmettere una potenza relativamente alta e il collegamento può tollerare perdite di percorso limitate.

3.2 Sicurezza per gli occhi

La sicurezza per gli occhi pone dei limiti sulla potenza ottica che deve essere trasmessa al ricevitore, limitando così il raggio d'azione del sistema. Sia i sistemi indoor che outdoor possono rappresentare un pericolo se i diodi laser operano con alta potenza di uscita. Gli standard di "eye safety" sono posti dallo standard IEC 60825-1, con la classificazione dei laser in base alla loro totale potenza emessa in classe 1, 2, 3A, 3B e 4 come mostrato nella Tab.4. Tutti i trasmettitori devono essere di classe 1 in tutti i loro componenti e, per i sistemi che impiegano sorgenti laser, la potenza trasmessa non deve eccedere 0.5 mW.

L'International Electrotechnical Commission (IEC) definisce il limite massimo di esposizione nel documento 825-1. Questo standard non distingue tra emissione laser ed emissione led. Di seguito vengono riportati alcune formule stabilite dal American National Standard Institute usate come linee guida per un corretto uso dei laser. I valori massimi di esposizione possibile (MPE) a una sorgente laser in prossimità sono:

$$MPE = 1,8CA t^{-0,25} \quad mW/cm^2 \quad \text{per } 50\mu < t < 1k \quad (23)$$

$$MPE = 0,32CA \quad mW/cm^2 \quad \text{per } 1k < t < 30k \quad (24)$$

dove t è in secondi, $CA = 10^{0,002(\lambda-700)}$ per $\lambda = 0,7\mu m - 1,05 \mu m$ e $CA = 5$ per $\lambda = 1,05\mu m - 1,4\mu m$. La retina è "al sicuro" fino a $560 mW/cm^2$ per un secondo di esposizione e fino a $100 mW/cm^2$ per esposizione che va dai 100 secondi in su e $\lambda > 1400 nm$ come mostrato in Fig.16.

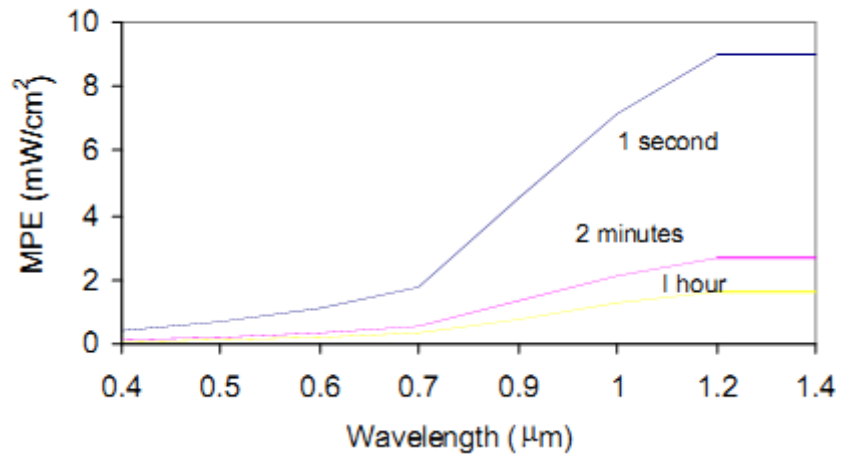


Fig. 16: Valore massimo di esposizione permessa in relazione alla lunghezza d'onda e al tempo d'esposizione a un raggio laser

Classe	Descrizione	Caratteristiche
1	Laser esenti	Il fascio di questo tipo di dispositivi è considerato innocuo perché la radiazione emessa è sempre al di sotto degli standard massimi consentiti (MPE, Massima Esposizione Permessa).
2	Laser a bassa potenza	I laser in questa classe possono emettere radiazione pericolosa, ma la loro potenza è così bassa da risultare in qualche modo dannosa solo in caso di esposizione diretta e prolungata ovvero per un tempo superiore ai 0,25 secondi. Sono compresi in questa classe i laser ad emissione continua e nel visibile (400-700 nm), con potenza ≤ 1 mW.
3A	Laser a media potenza	Sono compresi in questa classe i laser con emissione nel visibile e una potenza in uscita fino a 5mW. Possono emettere radiazioni sia nel campo del visibile che in quello dell'infrarosso e i loro fasci non sono pericolosi se osservati direttamente in maniera non continua, mentre lo possono diventare se si utilizzano strumenti che amplificano e concentrano il fascio ottico (quali microscopi, binocoli, ecc.).
3B	Laser a media potenza	I laser di classe 3B hanno potenze medie comprese tra i 5mW e i 500 mW. I laser di classe 3B sono pericolosi per gli occhi se non protetti e possono essere pericolosi per la pelle; anche le riflessioni diffuse da questi sistemi possono essere pericolosi. Devono essere prese precauzioni per evitare lo stazionamento nella direzione del fascio o del fascio riflesso da una superficie.
4	Laser ad alta potenza	Sono i laser più pericolosi in quanto, oltre ad avere una potenza tale da causare seri danni ad occhi e pelle anche se il fascio è diffuso.

Tab. 4: Classificazione dei laser secondo la norma IEC 608525-1

3.3 Interferenza dovuta alla luce ambientale

La sorgente dominante di rumore nei sistemi ottici indoor è la luce ambientale, che è tipicamente una combinazione di luce fluorescente, luce solare e luce incandescente come mostrato in Fig.17. La luce solare rappresenta una sorgente di luce ambientale non modulata che produce una corrente continua nel rivelatore.

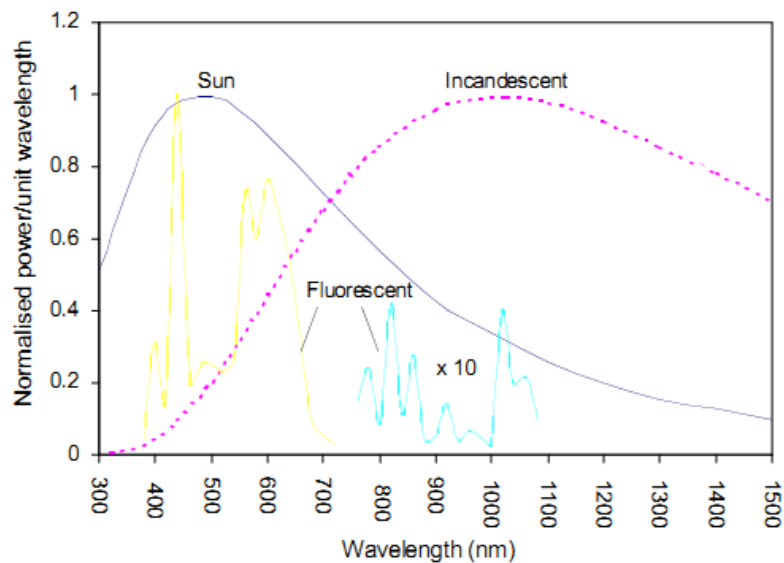


Fig. 17: Potenza ottica spettrale di sorgenti infrarosse comuni

Le lampade a incandescenza producono solo poche armoniche di ampiezza rilevante nel ricevitore. Infine, le lampade fluorescenti, possono produrre armoniche che vanno da qualche decina kHz fino a qualche MHz. Queste ultime, quindi, oltre a produrre rumore shot generano anche interferenza sul segnale ricevuto.

In generale, per basse velocità del segnale, il rumore ambientale è la causa maggiore di degrado delle prestazioni di un sistema.

3.4 Perdite nella propagazione libera

Come tutti i sistemi wireless, il “link budget” per un sistema wireless ottico dipende dalle perdite dovute alle condizioni atmosferiche lungo il percorso di

propagazione. Dal momento che l'atmosfera indoor è esente da fenomeni meteorologici, il canale introduce attenuazione di spazio libero e fading di segnale dovuto a multipath.

L'attenuazione di spazio libero (Fig.19), invece, è la quantità di potenza trasmessa che è persa o non catturata dall'apertura del ricevitore.

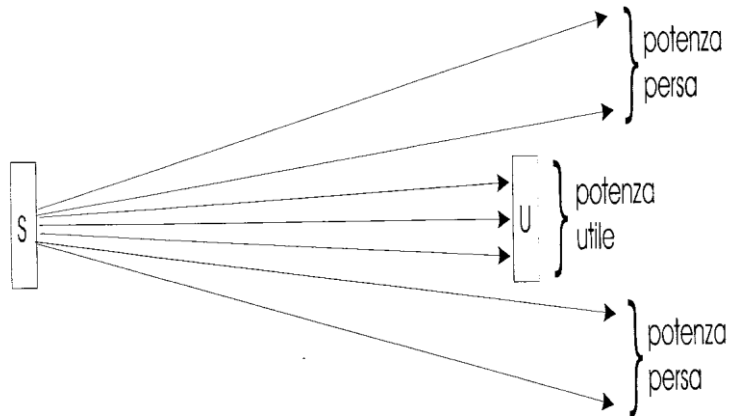


Fig. 18: Attenuazione di spazio libero

Questo fenomeno è presente in tutte le forme di trasmissione ottica non guidata (sia su breve che su lunga distanza) e la sua influenza dipende sia dalla distanza fra ricevitore e trasmettitore che dalla divergenza del fascio emesso dalla sorgente.

La dispersione di canale associata a una propagazione multipath (Fig.18), invece, è un grosso problema per le trasmissioni OW.

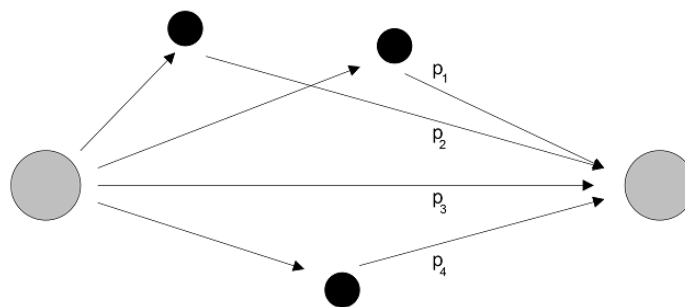


Fig. 19: Multipath

Un fenomeno siffatto capita quando il segnale trasmesso segue differenti percorsi nella strada verso il ricevitore a causa delle varie riflessioni e, solitamente, è causa di

ISI. I sistemi diffusi sono più inclini agli effetti multipath rispetto ai sistemi a fascio diretto, infatti un fascio largo è più portato ad avere riflessioni poiché è potenzialmente a contatto con più superfici. Inoltre, la maggior larghezza del FOV causa un maggior assorbimento di luce riflessa.

Al fine di ridurre l'effetto dell'ISI, oltre ad utilizzare modulazioni robuste a questo tipo di interferenza (OFDM), si può pensare adottare degli equalizzatori in ricezione oppure progettare il sistema in modo da diminuire la lunghezza dell'impulso in modo da diminuire la quantità di energia che interferisce col simbolo successivo.

4 ACCESSO MULTIPLIO

4.1 Tecniche di accesso multiplo

Le tecniche di accesso multiplo sono sviluppate per permettere a vari utenti l'accesso simultaneo alla rete.

Per coprire un'area indoor, esistono tre possibilità (Fig.20): una tipologia a singola cella, dove è impiegato un singolo access point ottico (OAP) per utente (a) o per stanza (b) oppure una tipologia dove si condividono OAP multipli (c).

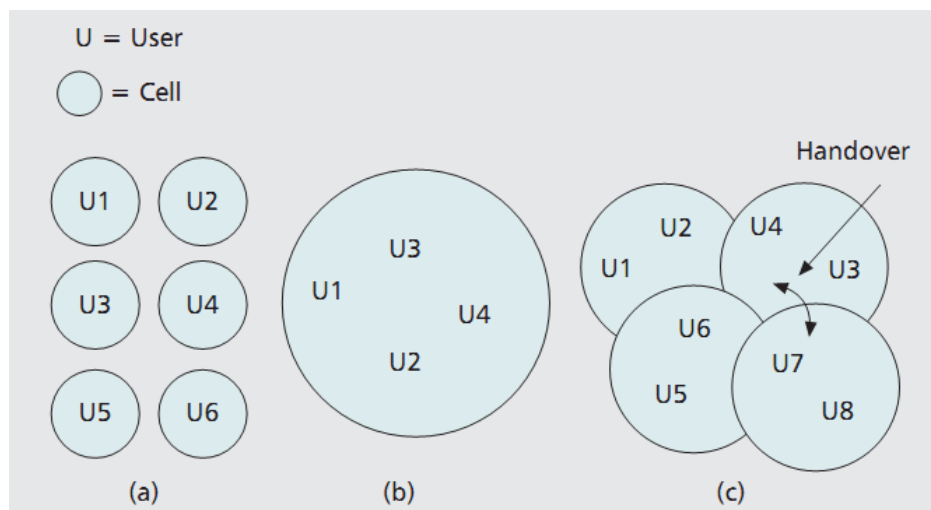


Fig. 20: Differenti topologie per la copertura indoor

La scelta della topologia della rete è fatta in base alle caratteristiche della stanza, al numero di utenti e alla mobilità richiesta dagli stessi. In una topologia a singola cella per utente, ognuno ha un access point dedicato e tutte le risorse disponibili, quindi, non è richiesto alcuno accesso multiplo. Questa topologia è funzionale ad esempio quando le lampade montate sopra i sedili degli aerei, treni o bus, sono utilizzate come OAP. Una topologia a singola cella per stanza può essere utilizzata in ambienti di dimensioni moderate, mentre, è richiesta una topologia cellulare (20-c), per esempio, per coprire una sala conferenze.

4.1.1 Tecniche di moltiplicazione elettriche

Il multiplexing elettrico può essere realizzato con 3 tecniche differenti:

1) TDMA (time-division multiple access): è una tecnica sincrona nella quale il tempo d'accesso è diviso in time slot. I time slot sono affidati all'utente, secondo criteri di data rate e QoS richiesti, per trasmettere il segnale. Questa tecnica, che non permette la comunicazione indipendente e simultanea, impiega duty cycle di breve durata per ridurre la potenza trasmessa, ma questo richiede che siano sincronizzati. Questo fattore ha portato un incrementato dell'uso della TDMA nei sistemi wireless infrarossi.

La TDMA è efficiente per trasmissioni con flusso di dati costante ma è inefficiente per trasmissioni con grandi quantità di dati poiché si riduce la capacità di trasmissione per utente.

2) FDMA (frequency-division multiple access): permette la comunicazione simultanea, usando differenti frequenze, in una topologia a singola cella per stanza. In una topologia cellulare, invece, la larghezza di banda disponibile è divisa in sotto-bande e ogni OAP è allocato all'interno di un proprio canale. In sistemi orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA), gli utenti vengono allocati in slot di tempo/frequenza che coprono diversi simboli e sotto-portanti OFDM. La tecnica FDMA è efficiente per flussi di dati costante. Il punto di forza maggiore è l'efficienza in potenza, la quale però peggiora all'aumentare del numero di utenti.

3) CDMA (code-division multiple access): con questa tecnica si assume che differenti utenti usino differenti sequenze di codici ortogonali in modo da non avere interferenze. La CDMA può essere considerata un ibrido tra TDMA e FDMA dove gli utenti operano in contemporanea nell'intera banda del segnale. Gli utenti sono separabili in quanto i codici usati per modulare i loro segnali sono rigenerati al ricevitore.

4.1.2 Tecniche di moltiplicazione ottiche

La moltiplicazione ottica si divide in :

1) **WDMA** (wavelength-division multiple access): ogni sorgente trasmette a differenti lunghezze d'onda usando emettitori a banda stretta, come per esempio i diodi laser. Il ricevitore è dotato di un filtro ottico passa banda che estrae la componente voluta dal segnale ricevuto. Il trasmettitore può essere sintonizzabile in modo tale che possa trasmettere a varie lunghezze d'onda e allo stesso modo anche la sintonizzazione del filtro in ricezione si può eseguire con un costo non indifferente in termini di complessità. In un sistema WDMA ogni utente può trasmettere simultaneamente a tutti gli altri usando diverse lunghezze d'onda.

2) **SDMA** (space-division multiple access): la lunghezza d'onda corta dei segnali ottici rende possibile una risoluzione angolare elevata. Per questo motivo, nella tecnica SDMA, si fa uso di un ricevitore angle diversity per ricevere segnali da direzioni differenti. Per esempio un hub può stabilire una LOS tra diversi trasmettitori senza problemi di interferenza di co-canale tra canali della stessa cella.

4.2 Multiple input multiple output (MIMO)

Le tecniche MIMO, che permettono di avere accesso multiplo sia in ingresso che in uscita, promettono di essere le maggiori candidate per raggiungere un alto data rate nelle applicazioni OW indoor.

4.2.1 MIMO utilizzando collegamenti SISO paralleli

Un modo per implementare un sistema indoor MIMO per comunicazioni OW è realizzare un parallelo di collegamenti single-input single-output. Una comunicazione parallela coinvolge l'invio di differenti flussi di dati usando un array di trasmettitori e un array di ricevitori accoppiati tra di loro. Questo richiede un allineamento accurato tra trasmettitore e ricevitore. Per eliminare l'interferenza tra

segnali adiacenti bisogna disporre accuratamente la struttura degli array ed intervenire sulla larghezza del fascio e sulle dimensioni del FOV.

4.2.2 MIMO utilizzando modulazione spaziale

Un sistema MIMO alternativo, che riduce la richiesta di allineamento, può essere implementato usando la modulazione spaziale (SM). In figura è descritto un

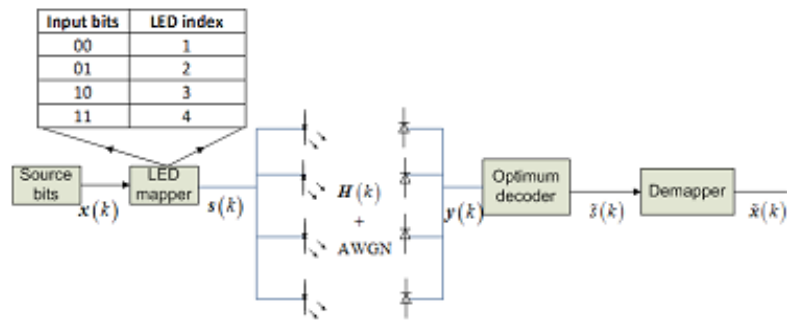


Fig. 21: Modello di sistema SM.

modello di sistema che utilizza la SM. Esso consiste di quattro unità trasmittenti ($N_t = 4$) e riceventi ($N_r = 4$). Un esempio di sequenza di bit trasmessa, al t -esimo istante di tempo, dal sistema MIMO 4×4 è ottenuta nel seguente modo, $x(k) = [[10]^{(1)}[11]^{(2)} \dots [00]^{(t)}]^T$: i bit ad ogni istante di tempo sono mappati per una delle unità trasmittenti. Il trasmettitore scelto (l) emette un'intensità luminosa $s_l = I$ ad un particolare istante di tempo e tutte le altre sorgenti rimangono inattive. Seguendo l'esempio considerato in Fig.21, la matrice che descrive la sorgente è :

$$s(k) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & I \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ I & 0 & \dots & 0 \\ 0 & I & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Ogni colonna della matrice $s(k)$ è trasmessa dalle unità trasmissive esistenti nel canale ottico $H(k)$ a specifici istanti di tempo (cioè ogni colonna rappresenta uno specifico istante di tempo).

Il fatto che sia attivo un trasmettitore per volta assicura che non ci sia interferenza al ricevitore e, inoltre, si può aumentare il data rate sia aumentando il numero di trasmettitori, sia combinando la modulazione spaziale con altre tecniche di modulazione come OOK, PPM, ecc. Il livello di intensità è un parametro di progettazione importante che deve essere impostato per garantire un determinato SNR e, inoltre, per ottenere le prestazioni migliori si deve anche tenere conto della posizioni in cui devono essere collocati i trasmettitori.

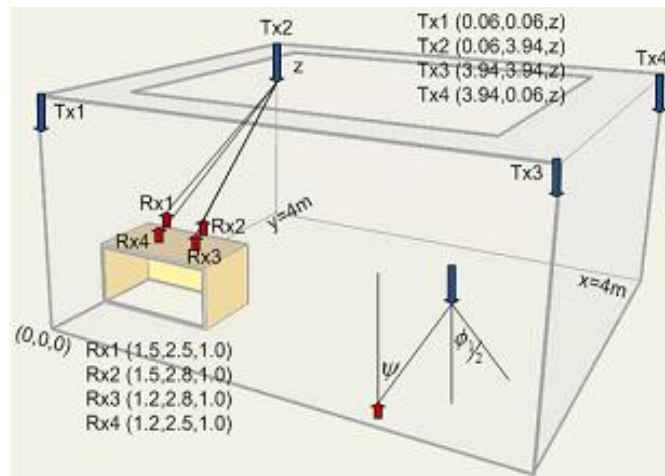


Fig. 22: Esempio di sistema MIMO ottico 4x4 in una stanza

5 EVOLUZIONE FUTURA

I sistemi wireless di quarta generazione (4G), pongono il picco di velocità di download a 100 Mb/s per comunicazioni ad alta mobilità e ad 1 Gb/s per comunicazioni a bassa mobilità. I sistemi 4G non si baseranno solamente su una singola tecnologia di accesso ma comprenderanno svariate tecnologie di accesso complementari tra di loro. È opinione comune che la tecnologia OW diverrà essenziale nelle comunicazioni a corto raggio con alto throughput. La tecnologia OW è ovviamente considerata per questo scenario in quanto dispone di numerosi fattori di merito, come per esempio la larghezza di banda estesa e non regolamentata (THz) e il basso costo dei dispositivi front-end.

5.1 Potenzialità: visible light communication (VLC)

Recentemente, la tecnologia “visible light communication” (VLC), sta suscitando molto interesse sia in ambito accademico che industriale. La spinta fondamentale è stata data innanzitutto dai progressi ottenuti nella tecnologia white led (WLED) per l’illuminazione e, soprattutto, dal fatto che è possibile utilizzare questo tipo di tecnologia sia per dare luce agli ambienti che per le trasmissioni dati wireless. Di solito i WLED sono classificati in due categorie, tricromatici (RGB, possono cambiare colore ma necessitano di tre led) e blu-chip led (led blu con sovrapposto uno strato di materiale giallo fluorescente). Per le comunicazioni VLC si utilizza di solito un percorso in vista, LOS. Con i led tricromatici è stato misurato un data rate superiore ai 400 Mb/s mentre con i blu-chip led si arriva fino ai 500 Mb/s utilizzando una versione modificata dell’OFDM.

La tecnologia VLC, di cui sono stati pionieri i componenti del visible light communication consortium (VLCC) in Giappone, sta riscuotendo un ampio successo in tutto il mondo.

Se comparata con la tecnologia IR, la tecnologia a WLED offre la possibilità di trasmettere informazioni oltre che illuminare. Le linee elettriche esistenti possono essere usate per interconnettere le unità WLED tramite la tecnologia ad onde

convogliate (power line communication-PLC). Utilizzando numerose unità WLED distribuite sul soffitto, si ha principalmente comunicazione LOS che comporta basse perdite di percorso e larghezza di banda di almeno un centinaio di MHz. Il collegamento però è sensibile e può essere perso se il dispositivo ricevitore si muove o viene ruotato. Com'è logico, è necessario implementare un meccanismo di recovery e dispositivi atti a mantenere il collegamento quando si passa da una stanza all'altra. Questi compiti sono molto impegnativi e allo stato attuale non hanno prodotto risultati apprezzabili. L'illuminazione di una stanza deve rispettare gli standard minimi richiesti, questo comporta un alto livello di SNR ($> 60 \text{ dB}$) attraverso tutta la stanza. Con i sistemi VLC, l'oscuramento è possibile fino a quando è raggiunto il minimo rapporto segnale rumore per mantenere un determinato BER. Un possibile scenario per il futuro delle comunicazioni wireless negli aerei è schematizzato in Fig.23.

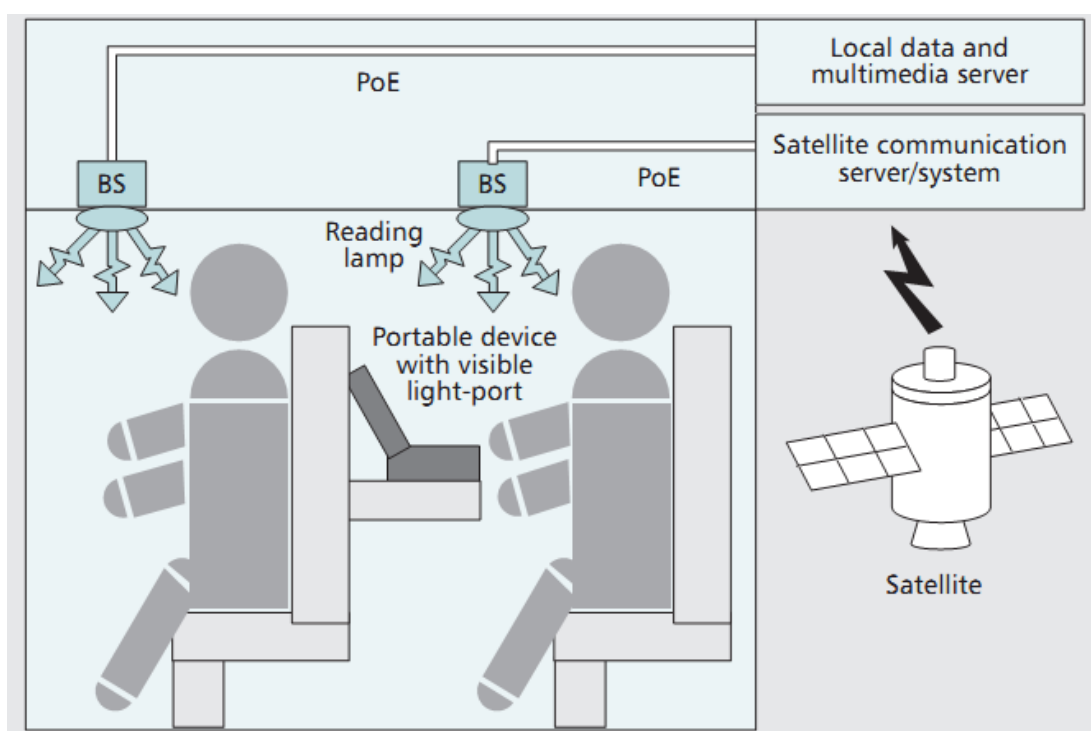


Fig. 23: Scenario futuro per una rete broadband

Il servizio è stabilito tramite attraverso la combinazione di tecnologie wireless, wired e satellitari. Al posto delle normali lampade da lettura poste sopra i sedili, verranno messe delle stazioni base (BS), implementate con tecnologia WLED, che provvede

sia a illuminazione vera e propria sia a fornire al passeggero internet e vari contenuti multimediali. La tecnologia PoE (power over Ethernet) è usata sia per trasportare il traffico dati che per alimentare la stazione base e la lampada da lettura con la necessaria potenza.

Bibliografia

- [1] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, "Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art", IEEE Communications Magazine, vol.49, n. 9, Settembre 2011
- [2] C. Singh, J. John, K.K. Tripathi, "A review on indoor optical wireless systems" reperibile su <http://home.iitk.ac.in/~yensingh/papers/OwsRev-paper1.pdf>
- [3] Z. Ghassemlooy, A.R. Hayes, "Indoor optical wireless networks" reperibile su <http://www.ee.ryerson.ca/~courses/ele885/IndoorOpticalNet.pdf>
- [4] G.Cariolaro, C. De Angelis, N.Laurenti: "Comunicazioni ottiche", Padova, Libreria Progetto
- [5] M. Bernardello, "Comunicazioni ottiche in spazio libero", reperibile su <http://tesi.cab.unipd.it>
- [6] J.M Kahn, J.R. Barry "Wireless infrared communications", Proc. (IEEE), Febbraio 1997
- [7] G. Amouzad Mahdiraji, E. Zahedi, "Comparison of Selected Digital Modulation Schemes (OOK, PPM and DPIM) for Wireless Optical Communications" 4th Student Conference on Research and Development, Shah Alam, Selangor, MALAYSIA, 27-28 June, 2006
- [8] J. Armstrong, B.J.C. Schmidt, "Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN", IEEE Communications Magazine, vol.12, n. 5, Maggio 2008
- [9] N. Benvenuto, R. Corvaja, T. Erseghe, N. Laurenti, "Communication Systems", 2007, Wiley
- [10] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, R. Mehmood, "Indoor MIMO Optical Wireless Communication Using Spatial Modulation", Proc. (IEEE) ICC 2010