



## **TECNICHE DI RIVELAZIONE TRAMITE VLC**

*Analisi delle tecniche di localizzazione in ambienti indoor tramite Visible Light Communication (VLC)*

**Facoltà di Ingegneria dell'informazione, Informatica e Statistica  
Corso di laurea in Ingegneria Elettronica**

**Chiara Ricci**

n° matricola 1524490

**Relatore**

Prof.ssa Maria-Gabriella Di Benedetto

**Correlatore**

Dott. Giuseppe Caso

A/A 2014/2015

# **TECNICHE DI RIVELAZIONE TRAMITE VLC**

## *ANALISI DELLE TECNICHE DI LOCALIZZAZIONE IN AMBIENTI INDOOR TRAMITE VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC)*

RINGRAZIAMENTI.....	pag. 3
CAPITOLO 1. INTRODUZIONE.....	pag. 4
CAPITOLO 2. SISTEMI DI LOCALIZZAZIONE INDOOR: TECNICHE E TECNOLOGIE.....	pag. 5
2.1 Tecniche di localizzazione.....	pag. 5
2.1.1 Trilaterazione.....	pag. 5
2.1.2 Triangolazione.....	pag. 7
2.1.3 Fingerprinting.....	pag. 8
2.2 Tecnologie di localizzazione.....	pag. 10
CAPITOLO 3. VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC).....	pag. 14
3.1 Cosa si intende per Visible Light Communication?.....	pag. 14
3.2 Proprietà.....	pag. 14
3.3 Cenni alle tecnologie LED (Light Emitting Diode).....	pag. 15
3.4 Principi di funzionamento di sistemi basati su VLC.....	pag. 16
3.5 Scenari applicativi per tecnologie e sistemi VLC.....	pag. 21
CAPITOLO 4. VLC NELLE LOCALIZZAZIONI E TECNOLOGIE.....	pag. 25
4.1 Panoramica .....	pag. 25
4.2 Soluzioni ibride: un esempio.....	pag. 28
4.3 Tecnologie LED: un esempio.....	pag. 29
4.4 Altri aspetti rilevanti.....	pag. 29
CAPITOLO 5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	pag. 31
RIFERIMENTI.....	pag. 33

## RINGRAZIAMENTI

*Desidero ringraziare la prof.ssa Maria-Gabriella Di Benedetto e il Dott. Giuseppe Caso, rispettivamente relatore e correlatore di questa tesi, per la grande disponibilità e cortesia dimostratemi, per i consigli e le critiche, e per tutto l'aiuto fornito durante la stesura. A loro va tutta la mia gratitudine, anche se a me spetta la responsabilità per ogni errore contenuto.*

*Ringrazio, inoltre, i miei compagni di studio, per essere stati veri amici più che semplici compagni, e gli amici di sempre, su cui so di poter sempre contare; grazie, infine, alla mia famiglia e al mio fidanzato, perché avete creduto in me in ogni momento.*

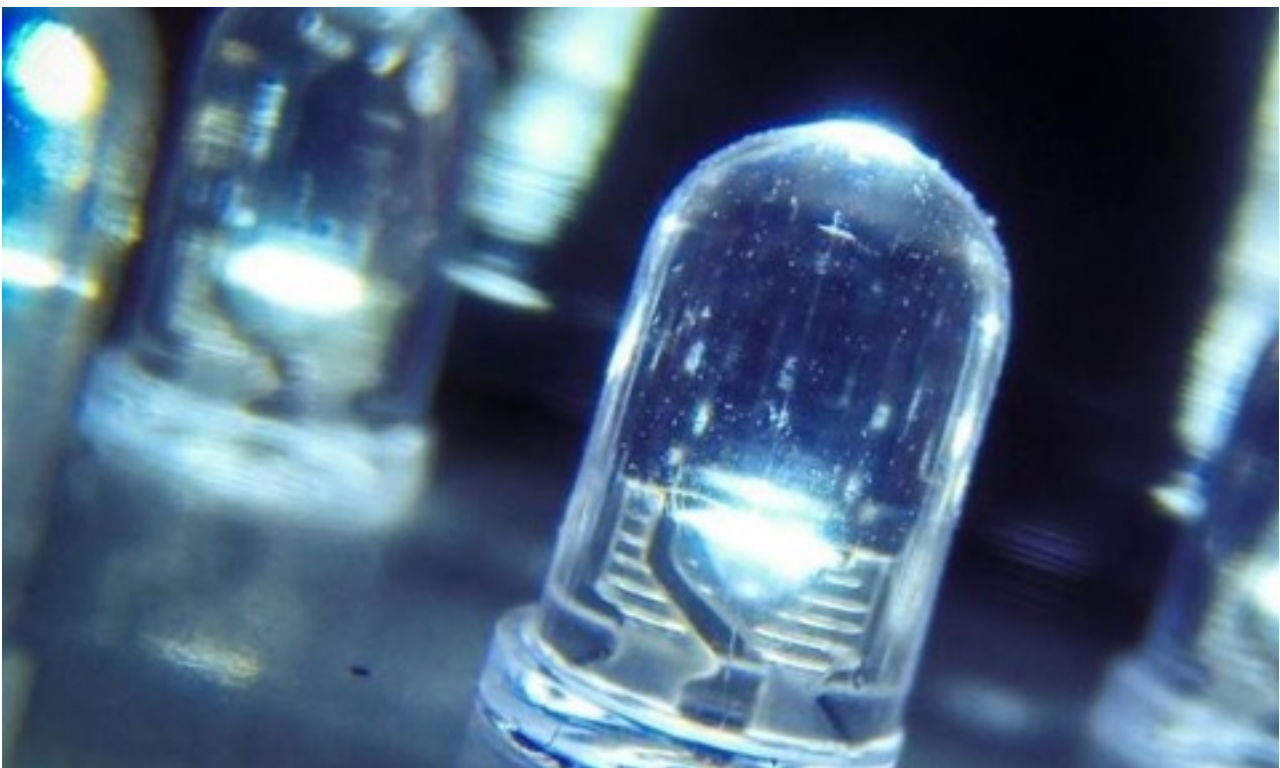
## CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

Nella fase di progettazione di nuove tecnologie senza fili, uno degli obiettivi su cui si sta ponendo particolare attenzione è quello di ottenere da esse una maggiore precisione nella localizzazione indoor, dove la tecnologia GPS (Global Positioning Systems) -ampiamente sfruttata nei sistemi di localizzazione outdoor - risulta assolutamente inadatta a tale scopo.

Questa tesi si propone di illustrare una nuova tecnologia, che usa la luce visibile per ottenere trasferimenti di dati ad alta velocità, che potrebbe trovare impiego nei sistemi di posizionamento indoor: Visible Light Communication (VLC).

La tecnologia VLC, di cui sono stati pionieri i membri del Visible Light Communication Consortium (VLCC) in Giappone, sta riscuotendo un ampio successo in tutto il mondo.

Se ne descriveranno le caratteristiche principali e se ne illustrerà il funzionamento; in particolare si analizzeranno e si descriveranno le tecniche di rivelazione indoor basati su di essa. Il tutto allo scopo di valutarne le proprietà e i suoi possibili sviluppi.



1.Una lampada a LED (archivio.panorama.it)

## CAPITOLO 2: SISTEMI DI LOCALIZZAZIONE INDOOR: TECNICHE E TECNOLOGIE UTILIZZATE

Prima di trattare le tecniche di posizionamento “VLC- based” vere e proprie, è opportuno dare una spiegazione sulle possibili tecniche di rivelazione oggi sfruttate: trilaterazione, triangolazione, fingerprinting.

### 2.1 Tecniche di localizzazione

#### 2.1.1 Trilaterazione

Tecnica di localizzazione che sfrutta il concetto di “**Time of Arrival**” (**TOA**), secondo cui la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore può essere ottenuta misurando il tempo che impiega un segnale nel propagarsi da trasmettitore a ricevitore.

In particolare, nella trilaterazione il terminale mobile cercato si trova nel punto di intersezione di tre circonferenze.

Un procedimento usato (ma non l'unico), attraverso cui la triangolazione mette in pratica questa idea, è quello che sfrutta il calcolo del **Round Trip Time (RTT)**:

0) Si considerano un trasmettitore (access point) ed un ricevitore (terminale mobile).

1) Il trasmettitore generico invia un segnale al ricevitore impiegando un certo tempo  $t_p$  detto tempo di propagazione.

2) Il ricevitore, dopo un certo ritardo  $t_d$ , rimanda al trasmettitore un segnale (detto di acknowledgement), impiegando di nuovo  $t_p$ . A questo punto, possiamo calcolare

$$\text{RTT} = 2 * t_p + t_d \quad \text{cioè} \quad t_p = (\text{RTT} - t_d) / 2$$

sapendo che il segnale si muove alla velocità della luce  $c = 3 * 10^8$  m/s, la distanza di trasmissione del segnale da trasmettitore a ricevitore è:

$$d = c * t_p$$

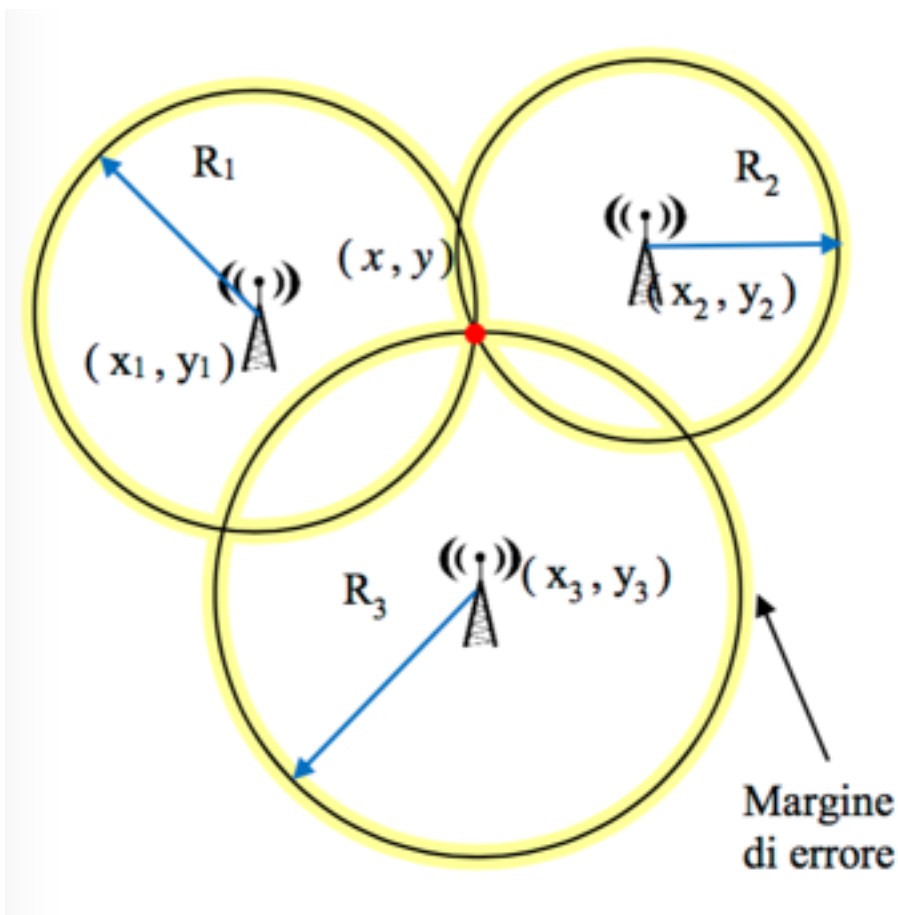
Possiamo allora tracciare una circonferenza di raggio  $d$  e di centro l'i-esimo trasmettitore, in modo tale che il terminale mobile si trovi teoricamente sulla circonferenza:

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} = d$$

dove  $(x_i, y_i)$  è la posizione del  $i$ -esimo trasmettitore,  $(x, y)$  è la posizione del terminale mobile,  $d$  è la distanza tra il terminale mobile e l' $i$ -esimo trasmettitore. Questa è la fine di una prima fase, la fase di "ranging".

Segue una fase di "positioning", secondo cui mettendo a sistema le equazioni di 3 trasmettitori -e se i trasmettitori e il ricevitore fossero tutti sincronizzati- si otterrebbe il punto di intersezione delle tre circonferenze e dunque la posizione esatta del terminale mobile. Nella realtà questo risultato è molto difficile da raggiungere, ma è comunque possibile restringere l'area di ricerca ad una zona molto piccola.

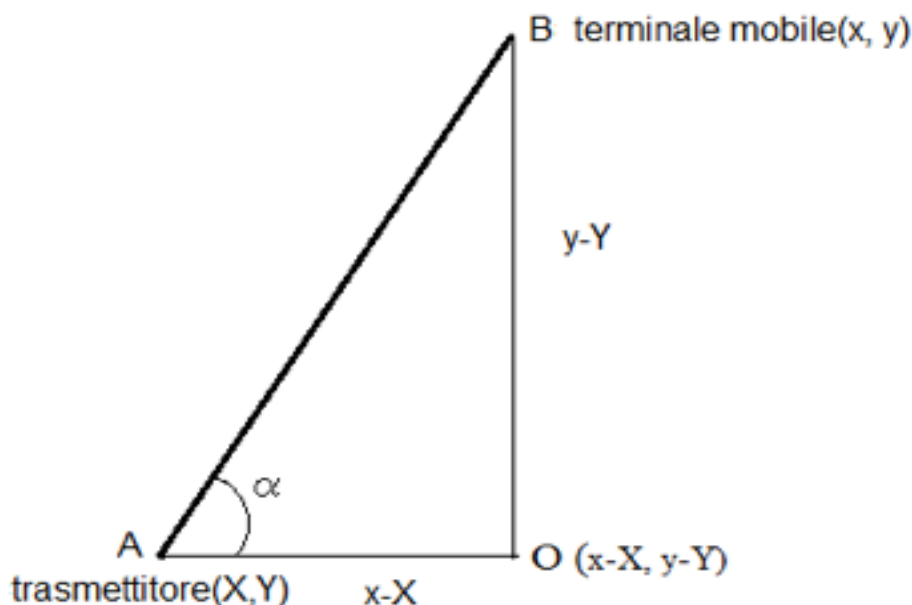
Si ottiene una situazione del genere:



2. Trilaterazione realizzata tramite TOA (E. Tinti, "Metodi e strumenti per localizzazioni indoor")

## 2.1.2 Triangolazione

Tecnica di localizzazione che sfrutta il principio di "Angle of Arrival" (AOA), simile al TOA ma con la differenza che qui vengono misurati gli angoli per stimare la posizione del terminale. In particolare, si individua la posizione di un punto attraverso l'angolo con cui il segnale arriva a due sensori di coordinate note. Per ottenere le coordinate a partire da misure di angoli, si utilizzano le formule della trigonometria: in un triangolo rettangolo, la misura di un cateto è pari al prodotto tra l'altro cateto e la tangente dell'angolo opposto (oppure la cotangente dell'angolo adiacente).



3. Funzionamento base della triangolazione. Misurazione distanza terminale mobile-trasmettitore generico

Facendo riferimento all'immagine, si ottiene un importante risultato:

$$BO = y - Y = (x - X) \cdot \tan \alpha \quad \text{quindi} \quad y = Y + (x - X) \cdot \tan \alpha$$

poiché ci interessa stimare la posizione del terminale mobile, dunque ci interessa stimare le sue coordinate  $x$  e  $y$ , saranno necessarie due misurazioni da due trasmettitori diversi e risolvere il sistema di due equazioni:

$$\begin{cases} y = Y_1 + (x - X_1) \cdot \tan \alpha_1 \\ y = Y_2 + (x - X_2) \cdot \tan \alpha_2 \end{cases}$$

L'intersezione delle due direzioni forniscono la posizione stimata.

Sono richieste dunque due misurazioni (anziché tre come nella trilaterazione), ma per una maggiore accuratezza di misura bisogna sfruttare antenne molto precise, il che si traduce in costi più alti. Inoltre, per una buona misurazione bisogna considerare la presenza di "line of sight", cioè evitare che altri oggetti si interpongano tra l'oggetto da localizzare e il trasmettitore.

### 2.1.3 Fingerprinting

Tecnica di localizzazione che si basa sul principio di **Received Signal Strength (RSS)**: nota la potenza con cui viene trasmesso il segnale e la potenza con cui tale segnale arriva al ricevitore, è possibile calcolarne l'attenuazione. Dall'attenuazione, direttamente proporzionale alla distanza, e da modelli teorici basati sulla legge di propagazione del segnale, si può ricavare la distanza.

La tecnica del fingerprinting si svolge su 2 fasi:

0) si considerano un trasmettitore (access point) e un ricevitore (terminale mobile)

1) "*offline phase*": Nell'ambiente in cui si vuole operare, si considerano dei punti detti "reference points" (punti di riferimento). Per ogni reference point si rilevano le potenze percepite da tutti gli access point, la cui posizione non è nota a priori. Ad ogni reference point, dunque, avrò un vettore con tutte le potenze percepite da tutti gli access point (nel caso di access point non percepiti gli viene assegnato un valore arbitrario molto minore rispetto ai valori rilevati). I componenti di ciascun vettore diventano l'RSS dell'access point i-esimo nel reference point i-esimo. A misurazioni concluse, i vettori vengono memorizzati in un data base.

La fase offline è forse la più critica in assoluto, in quanto da essa si determina l'accuratezza della stima (dovuta, infatti, al numero e alla distribuzione dei punti di riferimento).

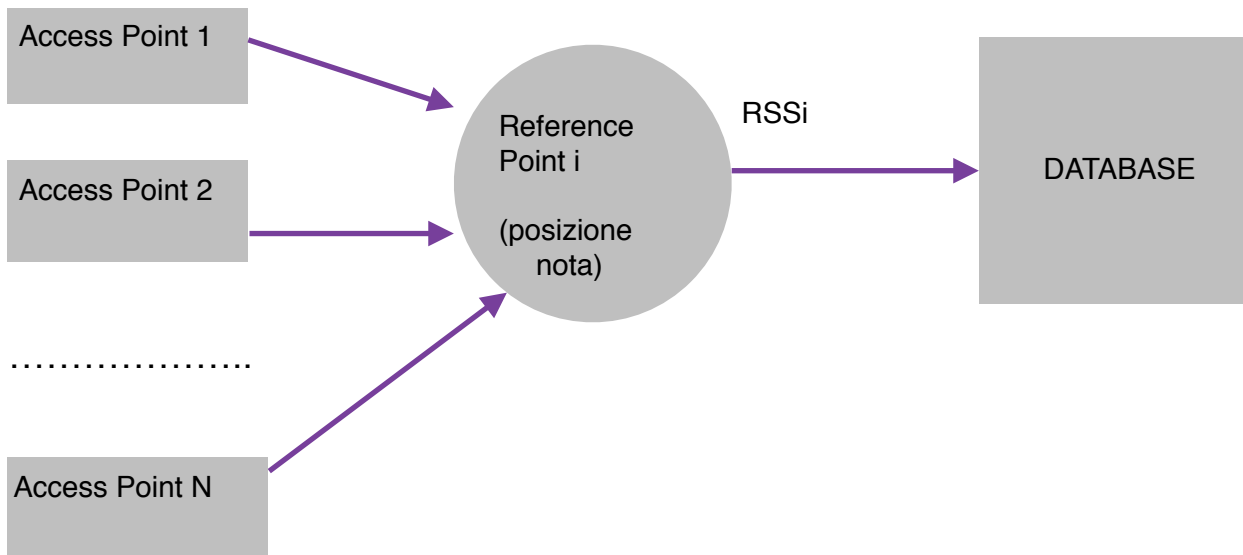
2) "*online phase*": viene mandato, dal terminale, un vettore di potenza al database con tutte le potenze percepite da ciascun access point. Tramite un algoritmo si comparano i valori ottenuti in questa fase e i valori ottenuti nella fase offline, si selezionano i reference point ritenuti più "simili" al vettore inviato nella fase online e, infine, si determina la posizione del terminale.



Gli algoritmi “di similarità” più interessanti vengono citati in Shin et al. [11] e sono il NN (Nearest Neighbour) Algorithm, che sfrutta solo un “vicino”, il KNN (K-Nearest Neighbour) Algorithm, che fissa a priori un numero K di reference point “vicini”, e il EWKNN (Enhanced Weighted K-Nearest Neighbour) Algorithm, che seleziona la soglia K dinamicamente, migliorando l’accuratezza di misura e dunque garantendo un errore molto più piccolo degli altri. A questi si aggiungono il “Minimum Mean Square Error Algorithm” (MMSE), che considera la minima distanza tra il terminale e il reference point generico, e il “Maximum Likelihood” Algorithm (ML), che tenta un approccio più probabilistico.

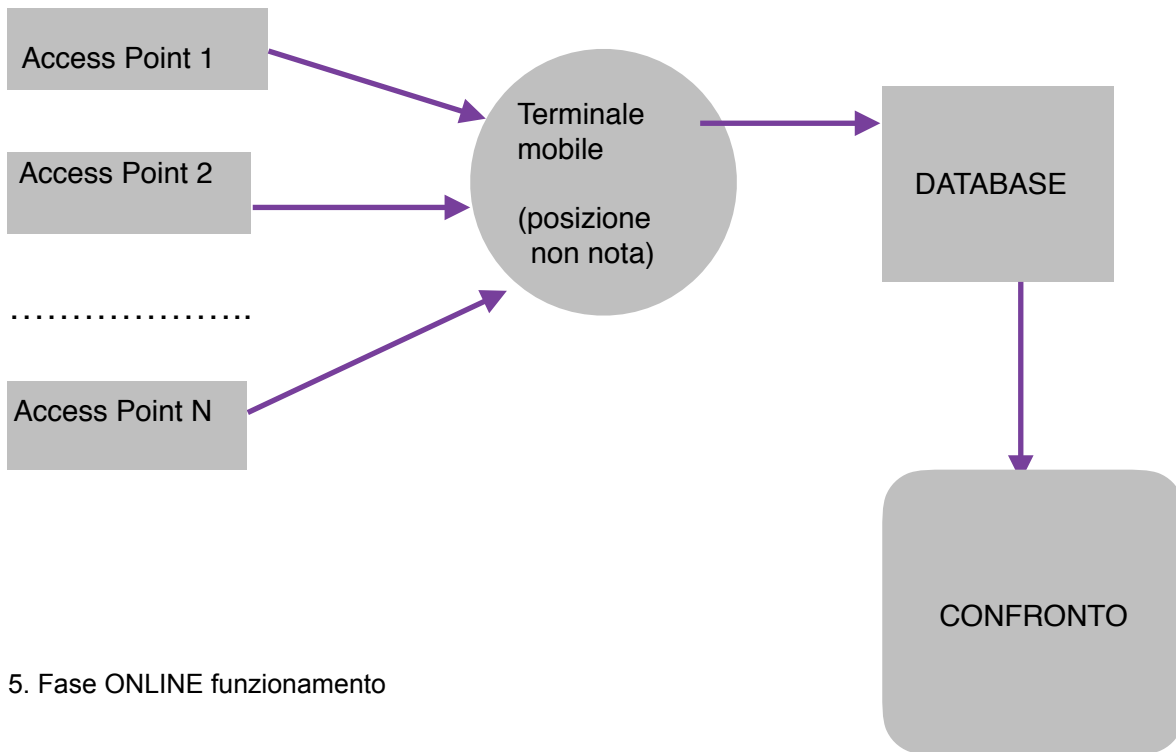
Schema riassuntivo:

### 1) OFFLINE PHASE



4. Fase OFFLINE funzionamento

## 2) ONLINE PHASE



### Aspetti positivi

Semplice da realizzare
una volta superata la fase offline si può operare solo la fase online

### Aspetti negativi

Richiede molta accuratezza nella fase offline
Attenzione a stabilire i criteri di "similarità", perché inciderà sulla accuratezza

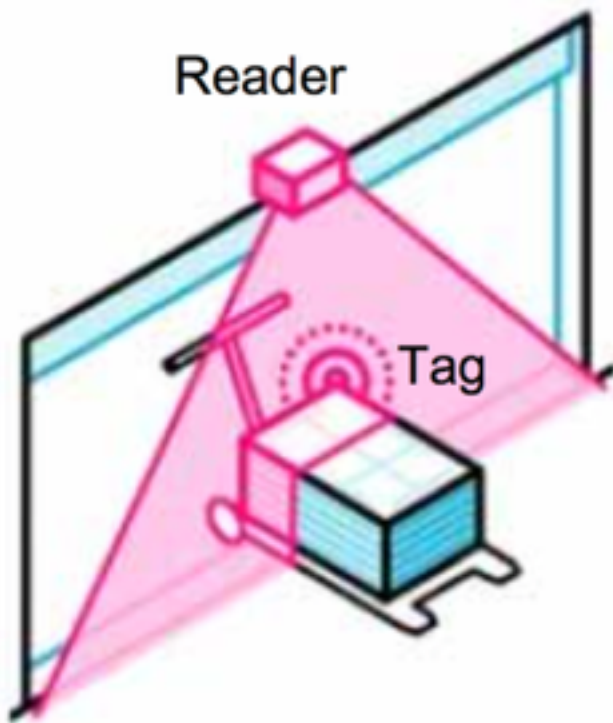
## 2.2 TECNOLOGIE DI LOCALIZZAZIONE

Attualmente è presente uno svariato numero di tecnologie adibite a servizi di rivelazione indoor. Trattiamo brevemente i più interessanti:

- **RFID (Radio Frequency Identification)**

Tecnologia di identificazione automatica che consente il monitoraggio di persone e oggetti. Ci si avvale di un transponder o tag, ricetrasmittitore che invia un segnale radio in risposta ad un comando ricevuto da una stazione remota, e di un reader, dispositivo di lettura con modulo di elaborazione dati e antenna per la generazione del campo elettromagnetico interrogante il tag.

Quando il tag transita attraverso il campo elettromagnetico prodotto dal reader viene attivato il trasferimento dell'informazione, modulando con i dati il segnale radio inviato dal tag verso il reader. Da qui è facile ricavare i vantaggi: non necessaria visibilità ottica fra reader e tag, elevate distanze e velocità di lettura, lettura contemporanea di più tag, sicurezza e programmabilità dei dati. Tuttavia, i segnali in ambienti interni sono generalmente compromessi (si potrebbe correre il rischio di rilevare tag indesiderati) e i tags hanno capacità molto limitate al momento. E' ottimo mettere in pratica questa tecnologia attraverso la trasmissione, da parte dei TAG, di segnali verso diversi reader situati in posizione fissa, al fine di consentire ad una unità di base di eseguire una accurata triangolazione.



6. Localizzazione indoor di oggetti secondo la tecnologia RFID (G. Marrocco, "La tecnologia RFID: Fondamenti fisici, limiti tecnologici e prospettive future")

- **WI-FI**

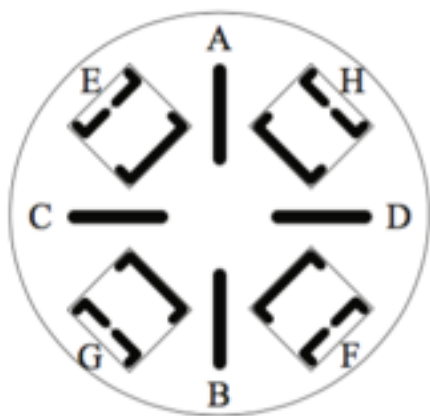
Opera a circa 2.4 GHz nella banda ISM (Industrial, Scientific and Medical).

Si tratta di una tecnologia ampiamente usata nel posizionamento indoor, ma non in quello outdoor a causa del suo range limitato.

Ottenere il valore di RSS del segnale Wi-Fi non è particolarmente difficile, in quanto ogni dispositivo capace di connettersi ad una rete WLAN può accedere all'informazione sulla potenza del segnale, e per questo motivo la maggior parte dei sistemi di posizionamento con WLAN si basano su RSS, in abbinamento con la tecnica del fingerprinting. Il posizionamento basato su fingerprinting e RSS è il metodo più preciso ma prevede la costruzione di un database, con conseguente maggior carico di lavoro e costi maggiori.

- **LOCALIZZAZIONE INDOOR SENZA FILI TRAMITE ANTENNE**

Noto con l'acronimo inglese SAS (Smart Antenna System), questo sistema utilizza antenne per ricevere la potenza del segnale da un terminale mobile e inviare le informazioni sulla potenza del segnale a una stazione di elaborazione dati detta anche Access Point (AP). Queste informazioni vengono combinate per trovare la direzione di arrivo del segnale e la posizione del bersaglio mobile. Riferendoci all'articolo di Sheu, Hsu e Chen, si considerano 8 antenne direzionali che si disporranno sul piano orizzontale e sul piano verticale. Ogni piano avrà 4 antenne e ciascuna antenna coprirà una certa direzione. Combinando una antenna sul piano orizzontale e una antenna sul piano verticale, si otterranno 16 coppie di antenne. Ciascuna coppia costituisce l'Access Point sopra citato.



7. Schema illustrativo per capire la disposizione delle 8 antenne (Shiann-Tsong Sheu, Yen-Ming Hsu, Hsueh-Yi Chen, "Indoor Location Estimation Using Smart Antenna System with Virtual Fingerprint Construction Scheme")

E' interessante come questa tecnologia renda più efficace la localizzazione di terminali mobili tramite fingerprinting. Dall'access point, infatti, si effettuano misure da diversi punti di riferimento per generare misure virtuali di nuovi punti di riferimento e raccogliarli in un database. A questo punto la fase offline del fingerprinting segue la seguente procedura:

1) costruzione della radio-map che raccogli i valori RSS captati dalle 16 coppie;

2) selezione di access point utili per le operazioni di stima che si svolgeranno nella fase online.

Dalle analisi svolte si è anche notato che grazie a questo metodo è possibile ridurre il numero di access point garantendo comunque una accurata stima.

#### • **ULTRA WIDE BAND (UWB)**

Tecnologia basata sull'invio di segnali molto piccoli (anche minori del nanosecondo) e su una banda molto larga (maggiore di 500 MHz). Mostra una buona flessibilità, robustezza alle interferenze, buona precisione e il tutto a prezzi bassi. Liu et al. , nel loro articolo [18], comparano il servizio di localizzazione RFID tradizionale basato su RF con quello basato su UWB. Si nota che nei sistemi a UWB i segnali sono appunto trasmessi per una durata molto più breve di quelli usati in RF, permettendo di filtrare più facilmente il segnale e determinare quali segnali sono corretti e quali no. In più si è notato che i tag UWB consumano meno, possono operare su un'area più vasta rispetto a quelli RF e difficilmente risentono di fenomeni di interferenza.

Da sottolineare che per natura del segnale della UWB, è facile determinare con precisione il TOA da trasmettitore a ricevitore, anche in ambienti multicammino.

Di contro, si richiede una sincronizzazione precisa e soffrono di problemi di interferenza.

#### • **VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC)**

Tecnologia in fase di sviluppo che sfrutta la luce del visibile per ottenere scambi di informazioni ad alta velocità. Può essere impiegata per svariati scopi tra cui, appunto, localizzare persone o cose in ambiente indoor. Approfondiremo nel dettaglio i concetti utili per valutare la validità di questa tecnologia.

## CAPITOLO 3: VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC)

### 3.1 COSA SI INTENDE PER VLC?

Quando si parla di VLC si fa riferimento ad una fonte di illuminazione che, oltre a illuminare, può inviare informazioni utilizzando lo stesso segnale luminoso. Quindi, in termini “matematici”:

$$\text{VLC} = \text{Illuminazione} + \text{Comunicazione}$$

Si può affermare, in altre parole, che VLC si riferisce a una tecnologia di comunicazione che utilizza la *luce del visibile* come un segnale trasmettitore, l'*aria* come un mezzo di trasmissione e (generalmente) un *foto diodo* come ricevitore.

La tecnologia VLC fa la sua prima apparizione il 3 giugno 1880, data in cui Alexander Graham Bell trasmise il primo messaggio telefonico senza fili con la sua nuova invenzione: il Fotofono. Quest'ultimo risultò dunque il primo dispositivo al mondo a trasmettere informazioni senza fili a distanze di centinaia di metri.

### 3.2 PROPRIETA'

La banda delle frequenze si estende da 428 THz (700 nm) a 750 THz (400 nm)

Gli aspetti positivi di questo mezzo sono:

visibilità
sicurezza
poca dannosità per la salute
risparmio energetico

La possibilità di trasmettere velocemente e in modo sicuro una grande mole di dati attraverso la luce, consente di circoscrivere la trasmissione dei dati a un singolo ambiente (la luce, a differenza delle onde elettromagnetiche, non attraversa le pareti), oltre a permettere la trasmissione di dati in ambienti prima inesplorabili, ad esempio le profondità marine. Inoltre, il fatto di poter utilizzare la luce come mezzo di trasmissione apre nuove opportunità di

sfruttamento per i dispositivi di illuminazione già esistenti, come: insegne luminose, fari delle vetture, semafori e l'illuminazione stradale.

Un altro vantaggio risiede nella sicurezza delle trasmissioni luminose le quali, oltre a non creare interferenze pericolose in ambienti delicati (ad esempio, in una sala operatoria) possono essere sfruttate ampiamente in luoghi pubblici senza che sorgano preoccupazioni per la salute delle persone. Il tutto con un basso consumo energetico.

### Aspetti negativi rilevanti:

poco range

line of sight

(dove per line of sight si intende il percorso tra antenne: affinché la comunicazione tra le antenne non sia “compromessa” si richiede che tale percorso sia sgombro.)

Naturalmente, questa tecnologia presenta anche degli svantaggi. Uno su tutti il fatto che il fascio luminoso può essere facilmente “tagliato” o intercettato, bloccando inevitabilmente la trasmissione dei dati. Proprio per questo è consigliabile che il percorso su cui opera sia il più possibile privo di ostacoli (abbia dunque “line of sight”). Il range piuttosto limitato, inoltre, la rende inadatta a sistemi outdoor, ma utile a quelli indoor.

### **3.3 ACCENNO ALLE TECNOLOGIE A LED (LIGHT EMITTING DIODE)**

La possibilità di inviare i dati utilmente in questo modo è stata favorita dalla diffusione di lampadine a LED, dispositivi a semiconduttore simili ai chip di silicio.

Grazie alle lampadine a LED, siamo in grado di trasmettere dati a velocità molto elevate garantendo bassi costi e alta affidabilità. Di conseguenza, la rapida adozione di lampadine a LED ha creato una grande opportunità per VLC.

Vedremo in seguito la loro utilità nella trasmissione di dati.

### 3.4 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI SISTEMI DI TRASMISSIONE VLC

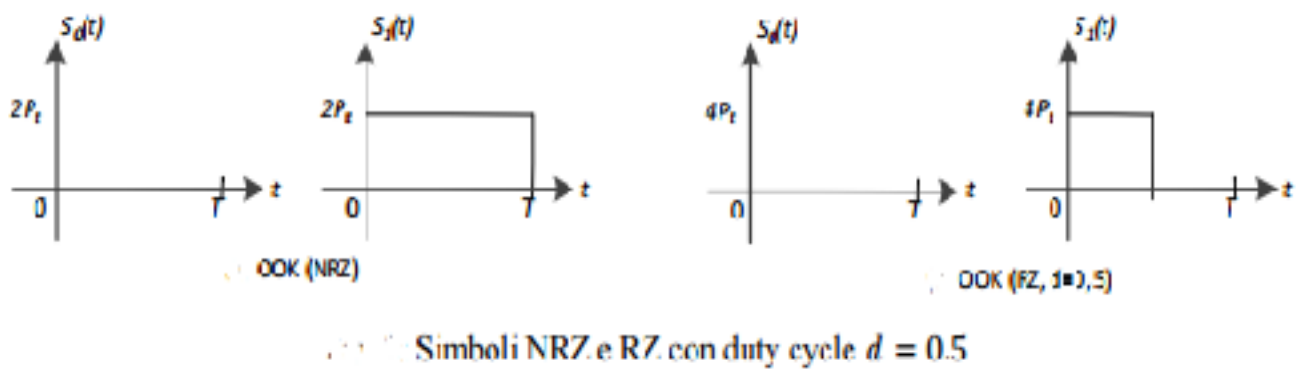
Il segreto del VLC consiste nella possibilità di accendere e spegnere singoli LED a una velocità tale che l'occhio umano non riesce a percepire la differenza. In questo modo, è possibile sfruttare una lampada LED sia come fonte di illuminazione che come dispositivo per il trasferimento di informazioni in linguaggio binario (1=acceso, 0=spento, ad esempio). Un apparecchio VLC consiste in una lampada a LED, in cui il funzionamento dei singoli diodi viene modulato in modo da codificare segnali binari, e in un ricevitore che ritrasforma la luce in un flusso di dati che può poi essere trasmesso a un qualsiasi dispositivo.

**Modulazione**: In un sistema 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. 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 come ad esempio On-Off Keying (OOK), Pulse Modulation (PM) e Frequency Shift Keying (FSK).

♣ On-Off Keying (OOK): 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. 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  $1/d$ .

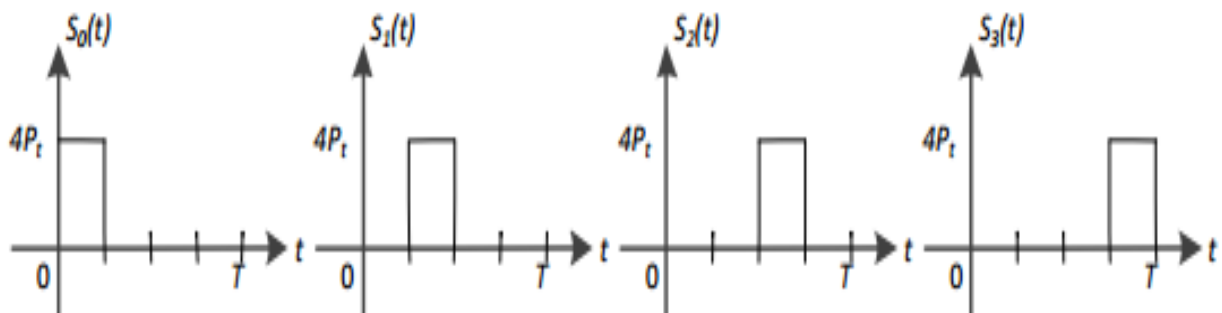
Schema a pagina seguente:





8. ( Fabio Bortolato “Comunicazioni ottiche wireless”)

♣ 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 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, la quale utilizza 4 simboli per rappresentare 2 bit.

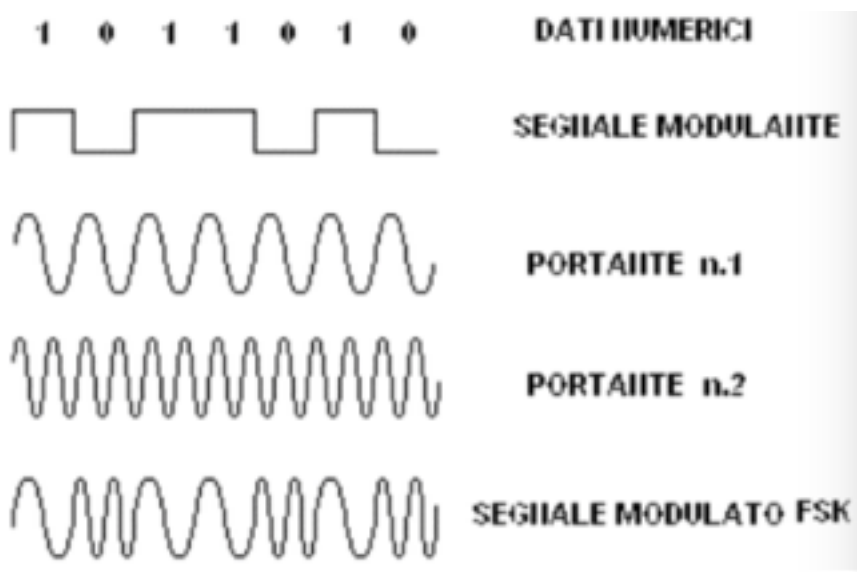


9. Modulazione PPM ( Fabio Bortolato “Comunicazioni ottiche wireless”)

♣ Frequency Shift Keying (FSK): Consiste nell'assegnare al livello logico 0 o 1 dell'informazione da trasmettere due valori distinti di frequenza portante,  $f_1$  e  $f_2$ . Durante il tempo di bit, si ha quindi trasmissione di uno dei due toni e il segnale modulato assume la seguente espressione:

$$s(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) & \text{durante la trasmissione del bit 1} \\ \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) & \text{durante la trasmissione del bit 0} \end{cases}$$

Viene tracciato uno schema a titolo di esempio:



10. Andamento FSK ([www.ilmondodelletelecomunicazioni.it](http://www.ilmondodelletelecomunicazioni.it))

**Trasmettitori:** Il segnale elettrico generato dal modulatore viene posto all'ingresso del trasmettitore, che genera un segnale ottico costituito da una sequenza di impulsi di energia luminosa. Due sono i procedimenti attraverso

cui generare luce: il primo è l'emissione spontanea, che si ottiene quando un elettrone effettua una transizione da un livello di energia più elevato a uno più basso e con conseguente emissione di un fotone di energia; il secondo è l'emissione stimolata quando un fotone di energia pari a  $E_2-E_1$ , interagisce con un atomo a un livello di energia superiore causandone il ritorno a un livello inferiore con conseguente emissione di un secondo fotone con stessa fase e stessa frequenza del primo. Si ricorda che la luce quando si propaga nello spazio libero, o in forma guidata, si comporta come un'onda, mentre quando è emessa o assorbita da un materiale, si comporta come una particella. Nella sua veste corpuscolare la luce presenta un'energia quantizzata in cui l'elemento di base, o quanto di energia, è denominato fotone. Il quanto di energia  $Q$  si esprime secondo la legge

$$Q=hf=hc/\lambda$$

Si considerano due possibili scelte: i diodi laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) e i LED (Light Emission Diode). Queste due categorie si differenziano le une dalle altre sia per le prestazioni ottenibili, sia per i principi di funzionamento.

♣ La proprietà principale del **laser** è la buona monocromaticità del segnale stesso, dovuta alla capacità del laser di emettere luce con spettro molto concentrato intorno a una particolare lunghezza d'onda con conseguente produzione di colore puro. Inoltre il laser è una sorgente di luce molto direttiva (concentra il fascio di luce in una direzione privilegiata), e produce luce coerente, essendo i fotoni generati per emissione stimolata tutti in fase (coerenza di fase), con stessa frequenza (coerenza di frequenza), e propagantisi nella stessa direzione (coerenza spaziale).

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".

♣ Un emettitore più economico è il **led**. Produce luce incoerente e poco direttiva, ma è semplice da controllare, oltre che poco costoso. Può emettere impulsi di luce con cadenza massimo intorno ai 100 MHz. Il laser può generare sequenze di impulsi molto più elevati (fino alle decine di GHz) ma richiede sistemi di controllo complessi, in particolare è sensibile alle variazioni di temperatura.

Riassumiamo in una tabella quanto detto:

Caratteristica	Light-Emitting Diodes	Diodi Laser
Larghezza spettrale ( $\lambda$ )	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-speinto	Elevato	Molto minore rispetto ai LED
Luce generata	Fortemente incoerente e scarsamente direzionale	Elevato grado di coerenza ed alta direzionalità

#### 11.(Fabio Bortolato, “Comunicazione ottiche wireless”)

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. 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.

**Ricevitore ottico (fotodiodi):** il ricevitore ottico che trasduce il segnale ottico ricevuto in segnale elettrico viene indicato come fotorivelatore. Fotorivelatori sono fotodiodi (più comuni), fototransistori (più efficiente del fotodiodo perché più sensibile alla luce, ma presenta una risposta temporale più lenta) e fotomoltiplicatori (molto più efficienti ma anche molto più costosi degli altri due).

Un tipico fotodiodo è il diodo PIN il cui nome deriva dalla presenza dei due strati, uno p e uno n, tra i quali è presente uno strato ibrido i. Il fotodiodo è polarizzato inversamente e genera una corrente quando viene colpito da un fascio di luce. Se prendiamo un diodo PIN colpito da luce di potenza W ed

energia E. L'energia E è formata da un numero di fotoni

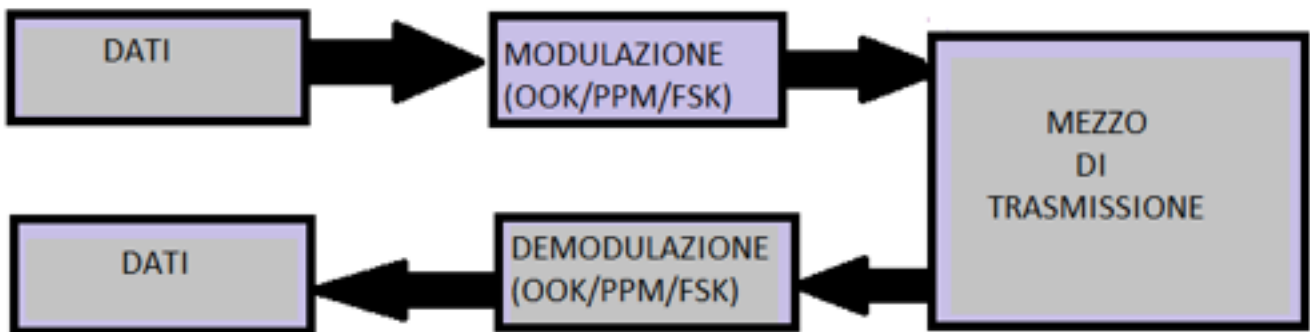
$$N=E/(hf)$$

In corrispondenza di ogni fotone, il fotodiode genera una carica elementare  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  C per cui all'uscita del diode si avrà una corrente di intensità

$$i=\eta Wq/(hf) \quad (\eta=\text{fattore di efficienza})$$

La conversione da quanto a carica elementare è un fenomeno aleatorio che può rappresentarsi come rumore detto rumore quantico. Fintanto che il segnale è di tipo ottico (frequenze elevatissime), il rumore termico è trascurabile e il rumore quantico è l'unico rumore da considerare, ma quando il segnale ha riassunto la sua natura elettrica torna ad essere considerato il rumore termico, e il rapporto segnale rumore SNR a ricevitore, dopo la conversione da ottico a elettrico, deve includere sia il rumore termico che il rumore quantico.

♣ Il (semplice) schema che ne risulta è il seguente:



12. schema del sistema di trasmissione e ricezione dati VLC

### 3.5 SCENARI APPLICATIVI PER TECNOLOGIE E SISTEMI VLC

Nonostante la VLC sia una tecnologia relativamente nuova, sono già molte le applicazioni in cui viene impiegata. Nell'articolo "Visible Light Communication: Tutorial" vengono riportate alcune applicazioni:

- **"Amusement use"**: un esempio di tecnologia visibile light impiegata a scopo ludico si trova alla Yokohama National Gallery, dove l'illuminazione è sincronizzata con suoni musicali, trasmesse dalle luci basate su VLC.



Photo by Yoshio Miyairi

12. Esposizione alla Yokohama National Gallery

- **“Sound communication system”**: i suoni vengono trasmessi tramite luce visibile e controllati dalla loro combinazione. E’ possibile, dunque, utilizzare dei colori, associare ad essi uno strumento diverso e combinarli a proprio piacimento.

Esempio

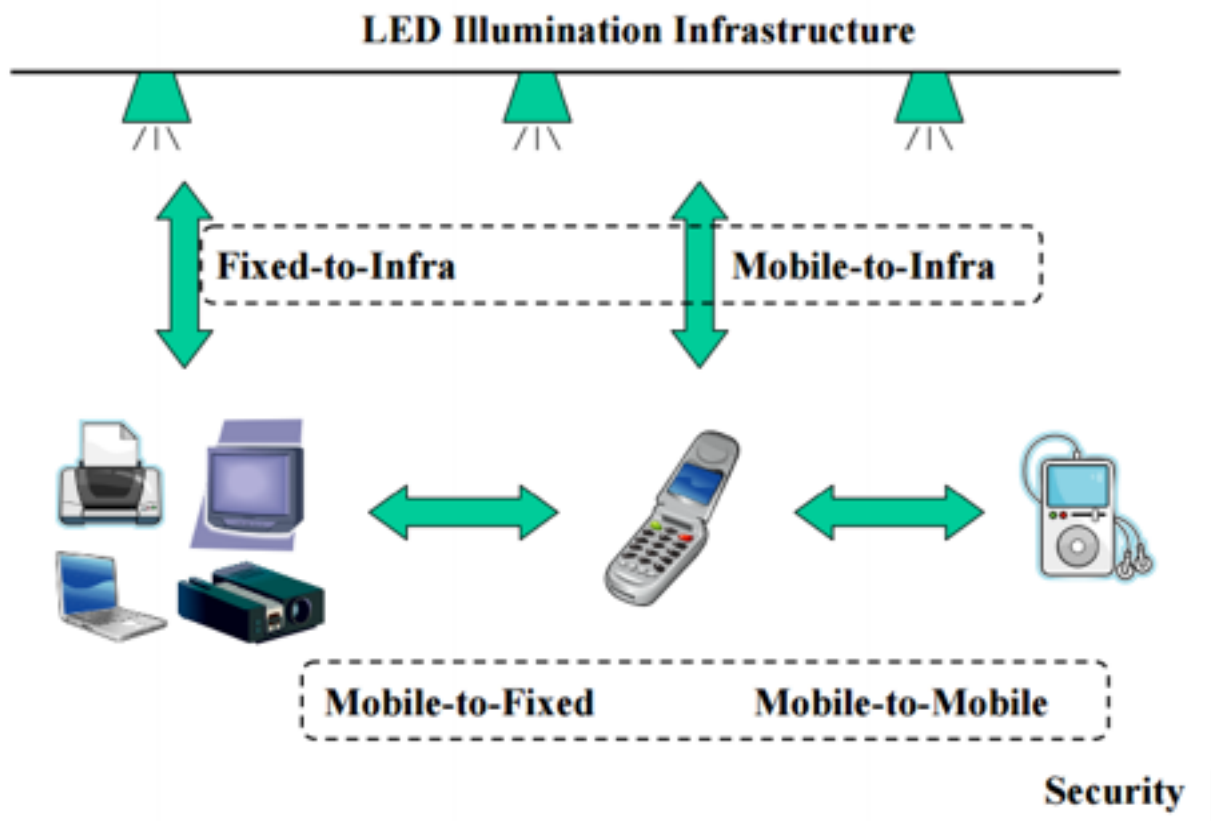
- 1) rosso:piano,
- 2) blu:batteria,
- 3) verde:chitarra;
  
- 4) rosso=piano solista;
- 5) viola(rosso+blu)=piano con batteria;
- 6) bianco(rosso+blu+verde)=piano, batteria, chitarra.



13. Esempio di RGB sound system (Visible Light Communication Consortium)



- **“Indoor navigation system”**: sistemi di diversa natura (unidirezionali, bidirezionali, ibridi) e di diverso tipo (fixed to infra, mobile to infra, mobile to fixed, mobile to mobile) con un unico scopo: rivelazione di persone o cose in spazi chiusi



#### 14. Impieghi di VLC in posizionamento indoor (“Visible Light Communication: a tutorial”)

–In questa tesi, ci focalizziamo sulle applicazioni indoor “fixed to infra” e “mobile to infra”, il cui scopo è di individuare e riconoscere un terminale *mobile* all'interno di spazi chiusi per interagire con esso e per fornirgli servizi di varia natura. Questi sistemi di posizionamento possono essere usati in luoghi chiusi in cui GPS non è accurato. Sono sistemi molto utili in casi di emergenza, per esempio negli ospedali



## CAPITOLO 4: VLC NELLE LOCALIZZAZIONI E TECNOLOGIE

### 4.1 Panoramica

Come visto prima, Visible Light Communication sfrutta la luce visibile finalizzata allo scambio di informazioni, nel nostro caso alla localizzazione di oggetti e/o persone.

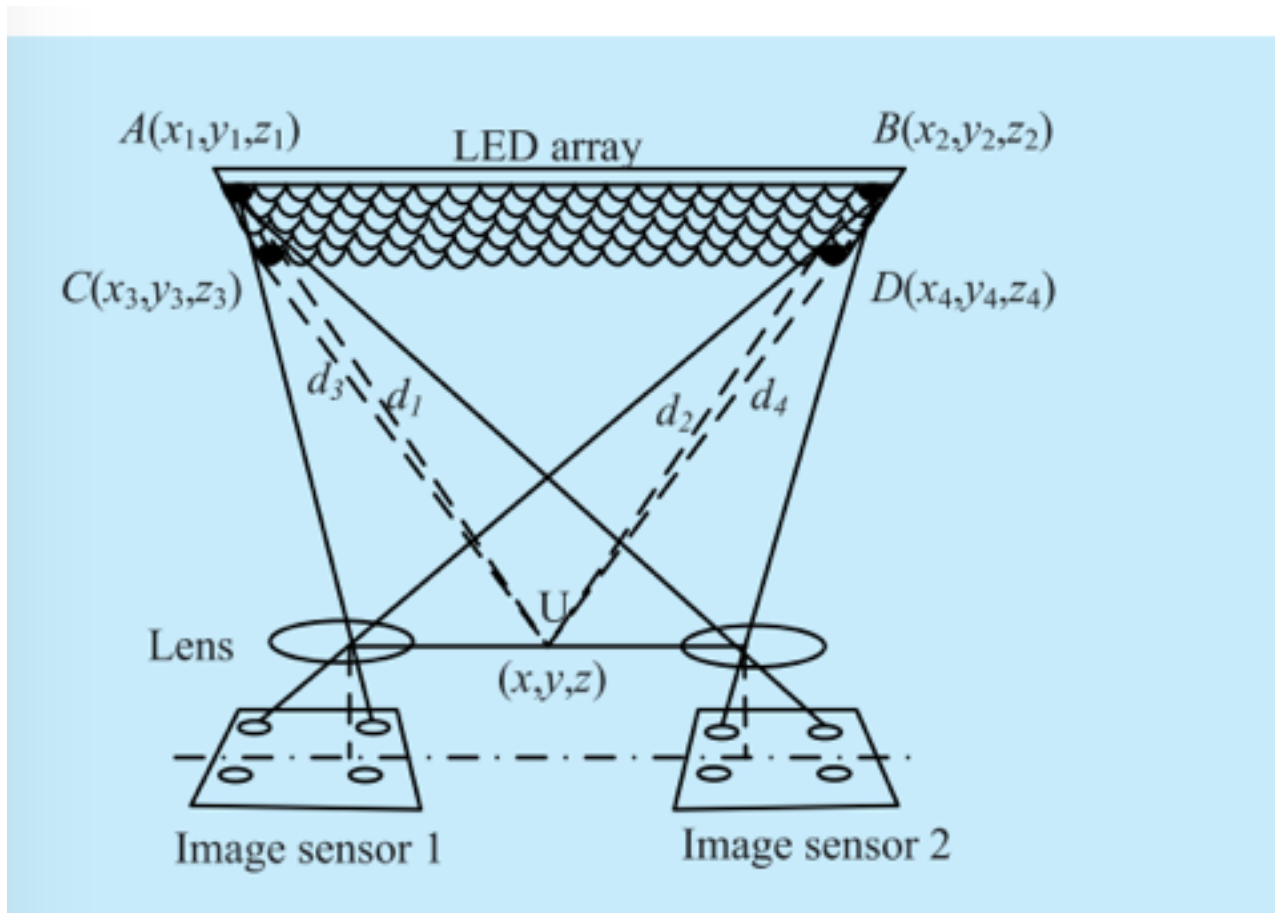
Oltre ai già citati vantaggi di VLC quali alta efficienza, basso costo e basso consumo di energia, si deve sottolineare anche il fatto che una tale tecnologia, basata sulla luce visibile, risulta meno soggetta a interferenze di campo elettromagnetico come accade nelle tecnologia a RF. Ecco il motivo per cui VLC può essere sfruttata in “aree sensibili” come ospedali e aerei.

Lo scambio di informazioni avviene tramite le tecniche di localizzazione affrontate prima. Qui i LED saranno i trasmettitori e il terminale mobile sarà il ricevitore. Vediamo qualche modello proposto in [13]:

- Scene Analysis and Proximity (Fingerprinting): si tratta di fingerprinting applicato alla VLC, cioè raccolta di informazioni di base, seconda misurazione e confronto real time. Da un lato è molto semplice e immediata poiché non richiede calcoli complessi, ma dall’altro richiede una buona raccolta di informazioni di base che porterebbe altrimenti a stime errate.
- TDOA (Time Difference of Arrival): ogni LED ha una propria frequenza e appropriati filtri passa banda al ricevitore sono capaci di rivelare ogni frequenza. Il metodo TDOA sfrutta lo stesso principio di TOA, ovvero il tempo impiegato dal segnale per arrivare dal generico trasmettitore al ricevitore, per poi calcolarne la distanza. A differenza di TOA, che calcola il tempo di propagazione tra il ricevitore ed ogni singolo trasmettitore, TDOA sfrutta la differenza di tempo di propagazione tra gli stessi per calcolare da distanza tra i vari sensori (le cui coordinate sono già note). In questo caso non è necessario che trasmettitori e ricevitore siano sincronizzati, ma è sufficiente che lo siano i trasmettitori.
- RSS based: stima la distanza attraverso l’informazione sugli impulsi ricevuti dai vari trasmettitori. Nello scritto di Biagi, Vegni [10] viene proposto un algoritmo basato su misure RSS da almeno tre trasmettitori a LED. Ogni LED ha una sua portante per ridurre le possibili interferenze intercellulari tra i LED, il ricevitore si calcola la distanza misurando il RSS della luce del LED e infine viene stimata la posizione.

- Image Positioning: si riferisce all'utilizzo di "sensori di immagine" per il posizionamento tramite VLC. In [13] viene proposto uno schema con quattro LED e due sensori di immagine. I quattro LED trasmettono l'informazione sulla posizione, mentre i due sensori ricevono il segnale modulato dai LED che distinguono la posizione. Il punto U, al centro delle lenti, è il punto da misurare. La misura si ottiene grazie alla geometria della struttura e da particolari algoritmi sviluppati nell'articolo.

Lo schema risultante è il seguente



*Imaging positioning system*

15. (W. Chunyue, W. Lang, C. Xuefen, L. Shuangxing, S. Wenxiao, D. Jing, "The Research of Indoor Positioning Based on Visible Light Communication")

Stando ai risultati riportati in [13], quando la luce transita nel canale, circa il 3,57% subisce una prima riflessione, 1,27% subisce una seconda riflessione, il 95,16% non subisce riflessione (è la cosiddetta "luce incidente"). Questo costituisce il motivo per cui si trascura la luce riflessa e si considera

per convenienza la sola luce incidente.

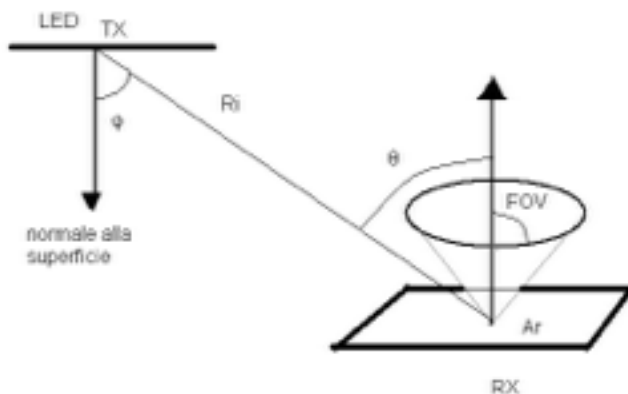
Il modello di trasmissione è quello lambertiano, che segue l'equazione

$$h_i = \begin{cases} \frac{(n+1)}{2\pi} \left[ \frac{\cos^n(\varphi_i) \cos(\theta_i)}{R_i^2} \right] A_r (t - R_i / c) & \text{se } \theta_i \leq \text{FOV} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Con:

- $n$  = numero che indica la direzionalità del segnale (nel caso di LED si pone  $n=1$ );
- $\varphi_i$  = angolo compreso tra il vettore che rappresenta la normale alla superficie in cui è posizionato il nodo di rete e il vettore distanza tra nodo e ricevitore;
- $\theta_i$  = angolo compreso tra il vettore che rappresenta la normale alla superficie in cui è posizionato il ricevitore e il vettore distanza tra nodo e ricevitore;
- $A_r$  = area del ricevitore;
- FOV = field of view, campo di visibilità;
- $R_i$  = vettore distanza tra nodo e ricevitore;
- $c$  = velocità della luce.

Lo schema risultante è il seguente:



## 4.2 Soluzioni ibride: un esempio

E' in crescita la ricerca di tecnologie "ibride", date dall'unione di tecnica di posizionamento indoor e tecnologia VLC allo scopo di ottenere un servizio di posizionamento più preciso e accurato.

Un esempio rappresentativo è il seguente:

### VLC –RSSI

Nell'articolo di Z. Jia [10], si propone un metodo di posizionamento basato su VLC per reti di sensori wireless (Wireless Sensor Networks, WSN) interni. Si propone, in particolare, un metodo ibrido basato su VLC e sui convenzionali indicatori della potenza del segnale ricevuto (RSSI) per posizionamento indoor al fine di ottenere più precisione di misura con un basso consumo energetico.

Dal sistema basato su RSSI possiamo sfruttare il fatto che se i reference point sono noti a priori, la posizione da trovare può essere stimata dagli algoritmi che abbiamo definito "di similarità".

Dal sistema basato su VLC, l'area indoor viene divisa in regioni coperte da un solo LED, in modo che ogni led abbia la sua area di copertura senza interagire con gli altri. Poiché dunque ogni LED ha un'area di copertura limitata, il ricevitore che capta il segnale da un certo LED deve trovarsi nell'area di competenza di quel LED. Più precisamente ad ogni riferimento è assegnato un proprio ID, per cui se il ricevitore capta un certo ID, la posizione del ricevitore è stimata riconducendosi all'area di competenza cui l'ID è associato. Se vengono captati più ID, la posizione è stimata nell'area di competenza di tutti gli ID captati. Sembrerebbe dunque che più nodi di riferimento si hanno, più precisa è la misura, ma ciò richiederebbe costi maggiori.

I due sistemi vengono uniti: i nodi di riferimento VLC e RSSI vengono considerati, ma prima viene effettuato l'approccio VLC, poi quello a RSSI e poi si applicano gli algoritmi per stimare la posizione precisa. Nell'articolo vengono analizzati i risultati provenienti dall'uso di MMSE algorithm e da quello di ML: ne è risultata una similarità nelle prestazioni, ma poiché il primo è più semplice da applicare è il più privilegiato.

L'accuratezza è effettivamente migliorata e il consumo di energia è effettivamente ridotto.

### 4.3 Tecnologie a LED: un esempio

Abbiamo detto che le tecnologie basate su VLC sfruttano ampiamente i LED come trasmettitori. Riprendendo il discorso al paragrafo 3.3, il LED bianco offre proprietà vantaggiose quali elevata luminosità, affidabilità, basso consumo energetico e lunga durata. Questi dispositivi sono utilizzati non solo per illuminazione di ambienti, ma anche per un sistema di comunicazione senza filo ottico.

Modulando efficacemente la luce visibile, è possibile raggiungere velocità di trasmissione dati molto elevate, e allo stesso tempo fornire illuminazione. Di conseguenza, i sistemi tradizionali interni, come uffici e case, diventano più intelligenti, fornendo servizi di alta efficienza ovvero localizzazione.

Zhou, Kavehrad e Deng [21] propongono un metodo che sfrutta LED preesistenti e riprende i risultati ottenuti in [13] e riassunti brevemente in 4.1. Tale metodo, infatti, recupera le caratteristiche del canale dalla luce incidente e stima la posizione del ricevitore risolvendo analiticamente l'equazione di trasmissione di tipo Lambertiano affrontata in 4.1.

Da un lato, come luce visibile è esente da interferenze elettromagnetiche, dall'altro sfrutta LED già presenti nell'ambiente, garantendo in generale una risoluzione superiore rispetto ai sistemi a microonde (WLAN, RFID, UWB).

### 4.4 Altri aspetti rilevanti

Durante la progettazione di sistemi VLC-based, è però necessario tenere conto di alcuni fattori che potrebbero provocare effetti negativi sul sistema stesso e su ciò che gli sta intorno.

LED flickering (sfarfallio): modulazione di un fascio di luce e di tutte le fonti luminose che operano in alternata. Può essere pericoloso, causando problemi di salute molto gravi alla vista e al cervello.

Purtroppo, a meno che una persona si trovi in un ambiente a luce naturale, tutte le sorgenti luminose alimentate dalla rete elettrica - luci ad incandescenza, alogene, fluorescenti o LED - sono soggette a flickering. La fonte è la componente a corrente alternata di alimentazione. La frequenza dello sfarfallio è generalmente pari alla frequenza di rete (di solito 50 o 60 Hz) o doppia rispetto ad essa.

I LED sono particolarmente problematici, perché l'indice di sfarfallio (o la profondità di modulazione) è tipicamente peggiore rispetto alle sorgenti luminose tradizionali. Di conseguenza, per ridurre lo sfarfallio, conviene scegliere driver LED con commutazione ad alta frequenza di buona qualità, dato che questi riducono al minimo la componente a corrente alternata dei ripple di tensione e di corrente sull'uscita, che a sua volta limita la profondità di modulazione dello sfarfallio dei LED. E, nonostante siano necessarie ulteriori ricerche per confermare il suggerimento, è anche una buona idea tenersi aggiornati sugli sviluppi per trovare nuovi driver LED che convertano la componente a corrente alternata in ripple di uscita a 150 Hz o superiore, perché dalle prime indicazioni emerse è a questa frequenza che lo sfarfallio ha un effetto trascurabile sulla salute.

Una frequenza troppo bassa causa dunque fenomeni di flickering ed effetti collaterali agli occhi umani, oltre che alla salute in generale.

Discontinuità di flusso: gli impulsi mandati dai LED devono essere ad alte frequenze per essere percepiti come flusso continuo ad occhio nudo. Secondo uno studio, la frequenza non può essere minore di 240 Hz. Per trovare il numero di aggiornamenti minimi necessari per stimare la posizione di una persona si stabilisce ogni quanto tempo la posizione deve essere determinata, e chiamiamo questo tempo T. Si considera poi la condizione sulla minima frequenza di oscuramento, ottenendo il minimo numero per cui un LED dovrebbe accendersi e spegnersi nel periodo T, cioè

$$N \geq T \cdot 240 \text{ [s} \cdot \text{Hz]}$$

Quindi, in ogni periodo T il LED dovrà spegnersi almeno N volte per non creare problemi agli occhi, e “distribuire” la potenza dell’informazione su tutte le volte in cui tale LED sarà acceso nel periodo T per far apparire la luce continua all’occhio umano.

## CAPITOLO 5: CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI

Illustrati i vantaggi (che ribadiamo essere basso consumo di energia, alta efficienza, basso costo, quasi immune a disturbi di tipo elettromagnetico) e gli svantaggi (facilità nell'essere intercettata da possibili ostacoli, range limitato) della nuova tecnologia VLC

Abbiamo trattato genericamente le tecniche di localizzazione indoor più comunemente usate quali

-TOA considera il TEMPO DI PROPAGAZIONE del segnale da trasmettitore a ricevitore. L'accuratezza dipende dalla sincronizzazione tra i due e, grazie alla elevata larghezza di banda, si abbina molto bene con la tecnologia UWB.

-AOA: considera l'ANGOLO DI ARRIVO del segnale ricevuto, richiede poche misurazioni (2 invece che tre come nel TOA) ma si richiede una maggiore precisione delle antenne, comportando costi più alti.

-RSSI si considera la POTENZA del segnale ricevuto, è molto sfruttata nel fingerprinting ed è preferita nelle tecnologie WLAN. E' utile e semplice, ma ne risentono le prestazioni per eventuali errori nella fase offline. Migliorare le prestazioni, tuttavia, si traduce in costi più alti.

E quelle basate su VLC, quali

-Scenary Analysis and Proximity: basso consumo, poca complessità, ma informazioni di base accurate sono assolutamente necessarie;

-RSSI based: elevata accuratezza, poca complessità ma performance peggiora allontanandoci dal centro dell'ambiente;

-Image sensing: alta accuratezza, alto consumo, ma complesso da realizzare.

Per evidenziare come VLC possa creare una svolta nell'area della messa in rete dei consumatori per la sua efficienza e affidabilità abbiamo visto che può essere non solo impiegata singolarmente (tecnologie a LED, paragrafo 4.3), ma anche integrata a tecnologie preesistenti.

Potrebbe, a questo proposito, rivelarsi utile se integrata ad una tecnologia RFID, poiché migliorerebbe le prestazioni nella localizzazione indoor come ad esempio la rivelazione di tag indesiderati. A questo proposito la società coreana IDRO sta già sviluppando, per la prima volta al mondo, una nuova

tecnologia detta “Visible RFID System” basata proprio sull’unione di queste due tecnologie. Sono stati infatti realizzati dei “Visible RFID tags”, che grazie alla luce visibile possono essere letti o scritti, e dei “Visible RFID readers” che selezionano intuitivamente i tag voluti tramite LED o laser.



## RIFERIMENTI

1. Fabio Deotto, “Li-Fi, il Wi-Fi del futuro è fatto di luce”, Panorama
2. Maria-Gabriella Di Benedetto, “Comunicazioni Elettriche-Fondamenti”, Pearson
3. Eun Tae Won, Dongjae Shin, D.K. Jung, Y.J. Oh, Taehan Bae, Hyuk-Choon Kwon, Chihong Cho, Jaeseung Son, Dominic O’Brien, Tae-Gyu Kang, Tom Matsumura, “Visible Light Communication : Tutorial”, Oxford University
4. Christian Pohlmann, “Visible Light Communication- Seminar Kommunikationsstandards in der Medizintechnik”
5. Dr Gordon Povey, “The Photophone – World’s first wireless communications”
6. G. Marrocco, “La tecnologia RFID: Fondamenti fisici, limiti tecnologici e prospettive future”
7. Shiann-Tsong Sheu, Yen-Ming Hsu, Hsueh-Yi Chen, “Indoor Location Estimation Using Smart Antenna System with Virtual Fingerprint Construction Scheme”, Copyright (c) IARIA, 2014
8. P. Yi, M. Yu, Z. Zhou, W. Xu, Q. Zhang e T. Zhu, «A Three-Dimensional Wireless Indoor Localization System,» Hindawi Publishing Corporation
9. E. Tinti, “Metodi e strumenti per localizzazioni indoor”, tesi
10. M. Biagi, A. M. Vegni, “LAST: a framework to localize, access, schedule and transmit in indoor VLC systems”, Journal of Lightwave Technology, vol 33
11. B. Shin, J. H. Lee, T. Lee, H. S. Kim, “Enhanced Weighted K-Nearest Neighbor algorithm for indoor Wi-Fi Positioning Systems”
12. Z. Jia, “A Visible Light Communication Based Hybrid Positioning Method for Wireless Sensor Networks”
13. W. Chunyue, W. Lang, C. Xuefen, L. Shuangxing, S. Wenxiao, D, Jing, “The Research of Indoor Positioning Based on Visible Light Communication”

14. IDRO Co., “Visible Light Communication-visible RFID system”,  
[www.idro.co.kr](http://www.idro.co.kr)
15. IDRO Co., “Visible RFID Tags”,  
[http://idro.co.kr/?btp\\_work=visible-rfid-tags](http://idro.co.kr/?btp_work=visible-rfid-tags)
16. S. Keeping, “Caratterizzazione e riduzione al minimo dello sfarfallio dei LED in applicazioni di illuminotecnica”
17. G. Giaconi, “Towards Robust Indoor Localization by Combination of Measurements”, thesis
18. H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, J. Liu, “Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems”
19. V. Piccolo, “Dislocazione ottima dei sensori per localizzazione indoor”, thesis
20. L. Liparulo, “Algoritmi ibridi per il posizionamento indoor basati su tecnologie Wi-Fi e RFID
21. Z.Zhou, M. Kavehrad, P. Deng, “Indoor positioning algorithm using light emitting diode visible light communications”