

# Indice

Introduzione.....	1
<b>Capitolo 1 - Le tecnologie wireless</b>	
1.1 Introduzione.....	1
1.2 Sistemi cellulari.....	2
1.2.1 Cenni storici.....	2
1.2.2 Sistemi radiomobili di prima generazione.....	3
1.2.3 Sistemi radiomobili di seconda generazione.....	4
1.2.4 Sistemi radiomobili di terza generazione (UMTS).....	6
1.3 Bluetooth.....	8
1.3.1 Caratteristiche e connessioni.....	9
1.3.2 Topologia della rete.....	10
1.4 WiMAX.....	11
1.4.1 Caratteristiche.....	12
1.4.2 Elementi e connessioni.....	17
1.5 Reti di sensori (WSN).....	18
1.5.1 Applicazioni delle WSN.....	19
1.5.1.1 Lo standard ZigBee (IEEE 802.15.4).....	21
1.5.1.2 Sistemi RFID.....	23
1.6 LAN senza fili (WLAN).....	25
1.6.1 Storia e standardizzazione.....	25
1.6.2 Dispositivi.....	27
1.6.3 Lo standard IEEE 802.11 e le sue estensioni.....	27
1.6.4 Topologie di WLAN.....	31
1.6.5 Vantaggi e svantaggi delle WLAN.....	32
<b>Capitolo 2 – Livello fisico e livello MAC dello standard IEEE 802.11g</b>	
2.1 Introduzione.....	34
2.2 Pila protocollare TCP/IP e architetture dell'IEEE 802.11g.....	35
2.3 Livello fisico ERP(EXTENDED RATE PHY) dell'802.11g.....	37

---

2.3.1 Primitive del livello fisico .....	38
2.3.2 Extended rate PLCP sublayer.....	40
2.3.3 Modulazioni obbligatorie ERP (DSSS/CCK e OFDM) .....	45
2.3.4 Modulazioni opzionali ERP (PBCC e CCK-OFDM).....	50
2.4 Livello MAC dell'IEEE 802.11g.....	52
2.4.1 DCF (Distributed Coordination Function) .....	53
2.4.2 PCF (Point Coordination Function) .....	57
2.4.3 Frammentazione e riassemblaggio.....	61
2.4.4 IFS (Inter Frame Space) .....	62
2.4.5 Modalità di connessione ad una BSS.....	63
2.4.6 Sincronizzazione e roaming.....	64
2.5 Tipi e formati del frame 802.11 .....	65
2.5.1 Formati di frame 802.11 .....	68

### **Capitolo 3 – Il modello di canale**

3.1 Introduzione .....	69
3.2 Fenomeni di propagazione per comunicazioni senza filo.....	69
3.3 Caratterizzazione dei canali con multipath fading .....	74
3.3.1 Funzioni di correlazione del canale e spettro di potenza .....	76
3.4 Effetto delle caratteristiche del segnale sulla scelta di un modello di canale.....	79
3.5 Analisi di un canale non selettivo a fading lento .....	81
3.5.1 Modellazione mediante catena di Markov a stati finiti.....	82
3.5.2 Partizionamento del SNR nel modello FSMC .....	89

### **Capitolo 4 – Ambiente di misura**

4.1 Introduzione .....	91
4.2 Strumentazione e metodologie.....	92
4.2.1 Strumenti di misura utilizzati per la rilevazione dei dati.....	94
4.2.2 Rilevamento dati.....	101
4.3 Dati rilevati e utilizzo.....	104

### **Capitolo 5 – Analisi delle misure effettuate e modellazione di canale**

5.1 Introduzione .....	106
5.2 Analisi delle misure del Rapporto Segnale Rumore (Signal to Noise Ratio – SNR) .....	106

5.3 Analisi delle misure della perdita di pacchetto (Packet Error Rate – PER) .....	113
5.4 Derivazione di alcune grandezze caratteristiche del modello Markoviano basato su campioni reali.....	129
Conclusioni e sviluppi futuri.....	138
Bibliografia.....	

## Introduzione

Il lavoro di tesi, qui presentato, si occupa fundamentalmente dell'analisi delle performance e della modellazione dei canali di comunicazione per reti wireless. Per eseguire tale lavoro sono stati definiti, rilevati e calcolati i parametri che maggiormente caratterizzano una rete wireless.

La rapida e sempre crescente evoluzione delle attività umane ha reso l'informazione uno dei beni più importanti in termini economici e sociali. L'aumento della richiesta di telecomunicazioni ha portato allo sviluppo vertiginoso di Internet.

E' ben nota, ormai, la costante crescita del mercato dei dispositivi per comunicazioni wireless (senza filo). Fino a qualche tempo fa la gran parte di essi era dedicata a servizi vocali, mentre ora tutti i terminali si stanno orientando verso il trasporto di dati, immagini e video, al fine di permettere una sempre più piena connettività ad Internet.

I dispositivi wireless consentono una completa mobilità da parte degli utenti all'interno di determinate aree di copertura, che possono essere anche molto ampie. Tale possibilità, insieme alla comodità di non essere collegati fisicamente ad una rete di telecomunicazione, sta portando i sistemi wireless ad una crescita costante, molto insidiosa per il primato dei dispositivi wired (cablati).

Una rete di telecomunicazioni può essere vista come una struttura in grado di instaurare, su richiesta di servizio da parte dell'utente, un collegamento per la comunicazione con un altro utente o gruppo di utenti. Le principali funzioni di una rete di telecomunicazioni sono: scegliere le opportune risorse per fare comunicare i due utenti, trasmettere effettivamente l'informazione, trasferire all'interno della rete le segnalazioni opportune per il funzionamento e amministrare le risorse di rete per permetterne l'effettivo utilizzo e la manutenzione.

La fornitura di un servizio da parte di una rete di telecomunicazioni avviene attraverso il dialogo e la cooperazione fra varie entità, residenti su macchine differenti e collegate l'una all'altra attraverso i mezzi fisici di comunicazione. In qualsiasi attività di dialogo, ogni entità si coordina con le altre mediante protocolli di comunicazione, generalmente basati sul concetto di strato: l'insieme delle funzioni viene suddiviso in una pila di strati

sovrapposti, ognuno dei quali è preposto a fornire un sottoinsieme delle funzionalità necessarie alla comunicazione con un altro sistema; il più noto, fra tutti i modelli di riferimento, è il modello ISO-OSI (International Standard Organization - Open System Interconnection) che si basa su una pila a sette strati.

Esistono due differenti tipologie di reti LAN (Local Area Network): quelle di tipo cablato (wired-LAN) e quelle che usano le onde radio come mezzo trasmissivo (wireless-LAN). Le wireless-LAN (WLAN) trasmettono e ricevono dati via etere, minimizzando il bisogno di collegamenti cablati, combinando, così, la connettività e la mobilità degli utenti, i quali possono accedere ad informazioni condivise, senza cercare un luogo per collegarsi in rete; gli amministratori del sistema, inoltre, possono implementare o ingrandire una WLAN senza installare o trasportare fili (tali opportunità di mobilità e di servizio non sono possibili con reti cablate). Altri vantaggi possono essere la velocità di installazione, l'elevata scalabilità e i costi di gestione ridotti. Utilizzando le onde radio ci sono dei pro e dei contro infatti, uno dei principali svantaggi di questo tipo di reti è che risentono dei disturbi elettromagnetici (interferenze varie) e della presenza di ostacoli composti da materia non perfettamente penetrabile dalle onde radio. Un altro svantaggio, dovuto all'uso delle onde radio, riguarda tutte le problematiche relative alla limitatezza di banda e al riuso delle frequenze.

Nel presente lavoro di tesi il canale wireless messo sotto esame è un canale WiFi IEEE 802.11, in particolare 802.11b/g. L'IEEE 802.11 è un gruppo di lavoro che si occupa della standardizzazione del livello MAC (Medium Access Control) e del livello fisico delle reti locali wireless. Il gruppo di lavoro 802.11 si è prodigato nello sviluppo di uno standard globale per sistemi radio e reti operanti nella banda di frequenza "unlicensed" dei 2.4GHz. Lo standard non specifica tecnologie o implementazione, ma semplicemente definisce le specifiche per gli strati fisico e MAC per connessioni wireless per stazioni fisse, portatili ed in movimento all'interno di un'area locale in grado di supportare velocità trasmissive multiple, scelte a seconda dello stato del mezzo e della capacità delle stazioni. Il wireless MAC supporta sia servizi connectionless, sia servizi di tipo isocrono per controllo di processi, voce e video. Lo strato fisico in qualsiasi rete definisce le caratteristiche di modulazione e trasmissione delle informazioni. Le principali modifiche dello standard 802.11g rispetto allo

standard 802.11 riguardano le specifiche operative del livello fisico PHY, detto Extended Rate PHY (ERP), che gli consentono di operare a velocità fino a 54Mbps nella banda 2.4 GHz, garantendo comunque una piena compatibilità con i già esistenti sistemi Wi-Fi (802.11b). Tali specifiche permettono all'ERP di utilizzare le due modulazioni obbligatorie DSSS/CCK (Direct Sequenze Spread Spectrum con Complementary Code Keying) e OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); la prima per garantire la compatibilità con i sistemi 802.11b e la seconda per la trasmissione a data rate superiori ai 11 Mbit/s, queste due modulazioni sono dette obbligatorie in quanto ogni dispositivo 802.11g deve supportarle. Oltre alle due modulazioni obbligatorie ci sono le due modulazioni opzionali PBCC (Packet Binary Convolutional Coding) e DSSS/CCK-OFDM, che possono essere implementate a discrezione del costruttore. Le modulazioni OFDM, PBCC e CCK-OFDM sono state progettate per coesistere con i sistemi 802.11 e 802.11b. Tale coesistenza è ottenuta in vari modi, inclusi i protocolli CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access /Collision Avoidance) e la frammentazione dei MSDU (Message Send Data Unit). Lo standard IEEE 802.11g costituisce inoltre un importante passo verso la realizzazione di sistemi dual-band (2.4 GHz e 5 GHz). Infatti la tecnica OFDM è già utilizzata per le operazioni a 5GHz quindi l'implementazione di 802.11g non richiede complesse modifiche hardware.

Per quanto riguarda invece la funzionalità standard fornita dal livello MAC del protocollo 802.11 è coordinare le stazioni della rete nell'accesso al canale attraverso informazioni di controllo che possono essere fornite implicitamente dal canale stesso, per mezzo del carrier sensing con il quale si conosce se il canale è libero oppure occupato. Oltre alle funzionalità standard, il MAC 802.11 supporta delle funzionalità aggiuntive, tipiche dei livelli superiori dello stack protocollare, come la gestione della frammentazione del Protocol Data Unit, la ritrasmissione dei pacchetti e la gestione dell'acknowledgement. Il protocollo MAC 802.11 è leggermente diverso da quello Ethernet, dove si usa il protocollo CSMA/CD, a causa della complessità intrinseca dell'ambiente wireless. Con Ethernet una stazione si limita ad aspettare che il mezzo di trasmissione diventi silenzioso e, quindi, inizia a trasmettere; in ambiente wireless questa situazione non regge perché non è sempre vero che il segnale si propaga in maniera broadcast e raggiunge tutte le stazioni. Tale problema è conosciuto con il

termine “hide stations” (stazioni nascoste): poiché non tutte le stazioni sono all’interno del campo radio delle altre, le trasmissioni che avvengono in una parte della cella possono non essere ricevute in un’altra parte della stessa cella. Bisogna dunque introdurre dei meccanismi per fare in modo che tutte le stazioni possano capire se il mezzo radio è occupato. A tale scopo 802.11 supporta due modalità operative di accesso. Nella prima, chiamata DCF (Distributed Coordination Function), è previsto l’accesso a contesa e non utilizza alcun tipo di controllo centrale, nell’altra, chiamata PCF (Point Coordination Function), è previsto l’accesso senza contesa e usa la stazione base per controllare tutta l’attività della cella. Tutte le implementazioni devono supportare DCF, che si adatta meglio e offre migliori risultati quando è applicato ad architetture wireless; al contrario PCF è opzionale. Come accennato, ai numerosi vantaggi offerti dalle comunicazioni wireless (portabilità, alta connettività e bassi costi) si affiancano delle problematiche, che non bisogna per niente trascurare, legate soprattutto alla propagazione del segnale (in termini di degradazione e interferenze). Uno dei più importanti fenomeni nella trasmissione di segnali in sistemi radiomobili digitali è costituito dall’attenuazione ambientale, derivante sia dalla distanza tra ricevitore e trasmettitore, sia dalla presenza di ostacoli lungo il link che, bloccando il segnale, creano delle distorsioni e delle vere e proprie zone d’ombra per l’utente (si pensi agli edifici, alle colline e agli altri veicoli che s’incontrano durante una comunicazione mobile). Se consideriamo la propagazione esclusivamente nello spazio aperto, l’attenuazione del segnale è data principalmente dal path-loss, mentre nelle zone urbane e rurali si verificano ulteriori fenomeni, dovuti all’atmosfera e alla presenza di ostacoli lungo il cammino: dispersione, trasmissione, rifrazione, shadowing e assorbimento atmosferico. A questi si deve aggiungere il fenomeno della riflessione del fascio elettromagnetico, che genera percorsi aggiuntivi lungo i quali il segnale si propaga (multipath fading): il fascio è soggetto ad una diffusione ritardata, ovvero le singole componenti riflesse giungono a destinazione ad istanti diversi, creando una vera e propria frantumazione del segnale. Mentre nelle comunicazioni satellitari e nelle trasmissioni a microonde punto-a-punto tale fenomeno è trascurabile, nella telefonia mobile vi è una grande quantità di ostacoli (quindi di riflessioni), per cui il ricevitore rileverà più copie del segnale, che si presentano a ritardi variabili. Il termine evanescenza (o fading) fa riferimento alla variazione temporale della potenza del

segnale ricevuto provocata da cambiamenti nel mezzo di trasmissione o nei percorsi. In un ambiente fisso il fading è influenzato dalle variazioni nelle condizioni atmosferiche (per esempio dalle piogge); in un ambiente mobile, dove un'antenna è in costante movimento rispetto all'altra, la posizione relativa dei vari ostacoli cambia nel corso del tempo, creando effetti di trasmissione complessi. Provando a trasmettere un segnale digitale in due istanti temporali diversi e ben separati, i due segnali ricevuti saranno differenti, anche se si usa lo stesso canale di comunicazione: ciò è dovuto ai continui cambiamenti delle caratteristiche fisiche del mezzo, che avvengono in maniera del tutto casuale (si dice perciò che il link è dotato di una risposta all'impulso random e tempo-variante). Infatti, se effettuiamo l'esperimento con un segnale di durata molto piccola (idealmente un impulso) attraverso un canale soggetto a multipath fading, il segnale ricevuto appare come un treno d'impulsi, la cui forma varia ad ogni tentativo (numero, ampiezza e ritardo relativo degli impulsi ricevuti non sono mai identici nelle diverse prove).

L'unico modo di descrivere il link, allora, è quello di ricorrere ad una trattazione statistica, che consideri la natura tempo-variante del canale stesso; in particolare il nostro studio si è basato su un processo stocastico, quale quello di Markov, che si presta bene a descrivere l'andamento del canale nel tempo (in termini di errori di trasmissione e degradazione). I modelli di fading più utilizzati sono due: quello di Rayleigh (spesso usato quando sono presenti più percorsi indiretti tra il trasmettitore e il ricevitore e non esiste un percorso dominante, come per esempio il percorso ottico diretto) e quello di Rice (che caratterizza meglio una situazione in cui vi è un percorso diretto più una serie di segnali indiretti multipath). Il modello di Rice viene frequentemente applicato per gli ambienti interni, mentre il modello di Rayleigh caratterizza principalmente gli ambienti esterni.

Per legare il processo stocastico al modello di canale occorre partizionare i possibili valori del rapporto segnale-rumore ricevuto in un numero finito d'intervalli, associandone uno a ciascuno stato della catena e ottenendone le grandezze caratteristiche (in questo modo si tiene conto delle caratteristiche fisiche e del comportamento tempo-variante del canale, per il quale assumiamo che l'involuppo della funzione di trasferimento sia distribuito secondo Rayleigh).



Nello specifico, il modello adottato nel nostro lavoro è stato particolarizzato per lo standard IEEE 802.11b/g, basato su una frequenza di lavoro di 2.4GHz, la catena di Markov relativa al link prevede 3 stati, ognuno dei quali rappresenta un intervallo di rapporto S/N (Signal to Noise ratio – S.N.R.); l'evanescenza descritta dal processo markoviano è di tipo slow, ovvero l'evoluzione della catena può essere considerata “lenta” rispetto alla trasmissione dei pacchetti.

Per analizzare le performance del canale e per eseguirne la modellazione è stato necessario rilevare alcuni dati. Uno dei parametri di merito più importanti per il dimensionamento dei sistemi di telecomunicazioni è il rapporto segnale/rumore, spesso abbreviato con la sigla inglese SNR (Signal to Noise Ratio) o S/N anche nell'uso italiano; è una grandezza numerica che mette in relazione la potenza del segnale utile rispetto a quella del rumore in un qualsiasi sistema di acquisizione, elaborazione o trasmissione dell'informazione. Più è basso l'SNR, infatti, e più sarà difficoltosa la ricezione del segnale. Il rapporto segnale/rumore è un numero puro, dato dal rapporto fra due grandezze omogenee, che esprime quanto il segnale sia più potente del rumore nel sistema considerato.

Un altro parametro importante per la valutazione delle performance del canale è la percentuale di pacchetti persi o P.E.R. (Packet Error Rate). Tali parametri sono stati misurati in modo pratico e in uno scenario quanto più possibile reale: le misure sono state eseguite in parte nel laboratorio di telematica del Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica dell'Università della Calabria, cubo 42/c VII piano (ambiente indoor) e in parte lungo il ponte Pietro Bucci del campus Universitario dell'Università della Calabria nei pressi del cubo 42/c (ambiente outdoor). Sono stati scelti volutamente tali ambienti di misura poiché le richieste di connessione alla rete in tali posti sono sempre crescenti. Negli ultimi tempi, sempre più campus universitari, aeroporti, hotel, centri commerciali e anche negozi installano AP per offrire alla loro clientela accessibilità a internet. Tali ambienti, essendo particolarmente affollati e trafficati, sono di solito rumorosi, quindi è utile effettuare delle misure al fine di valutare le reali capacità e performance di una rete Wifi. Proprio per tale motivo si è scelto di effettuare le misure nell'ambiente indicato sopra, al fine di immergere gli strumenti di misura in un ambiente identico a quello delle reali condizioni di utilizzo della rete.

Le misure sono state eseguite in condizioni di NLOS (No Line Of Sight): in questo caso sul cammino di propagazione del segnale è presente almeno un ostacolo che non permette la vista diretta tra il trasmettitore e il ricevitore; si è preferita la condizione di NLOS perché nella maggior parte delle reti wireless la visibilità tra ricevitore e trasmettitore non è garantita. Inoltre, nella modellazione del canale, abbiamo preso in considerazione il modello di Rayleigh che è spesso usato quando sono presenti più percorsi indiretti tra il trasmettitore e il ricevitore e non esiste un percorso dominante, come per esempio il percorso ottico diretto.

Per eseguire le misure e raccogliere i dati riguardanti la perdita di pacchetto e il rapporto segnale rumore sono stati utilizzati sia componenti hardware sia applicativi software. In particolare, è stato utilizzato un software in grado di eseguire la scansione di tutte le reti wireless presenti nelle vicinanze e di rilevarne il rapporto segnale rumore con una certa frequenza (nel nostro caso è stato prelevato un campione di S.N.R ogni 0,5 secondi). Un altro importante software capace di analizzare e catturare tutto il traffico dati presente su una rete è stato utilizzato per la raccolta dei dati utili alle statistiche sulla perdita di pacchetto. Con l'ausilio di tali strumenti, attraverso circa 120 ore di misurazioni sono stati catturati oltre 15GB di dati utili alle statistiche sulla perdita di pacchetto e circa 700000 campioni del rapporto segnale rumore. Per l'esecuzione delle misure è stata creata una rete ad hoc tra un personal computer (TX) e un notebook (RX). In questo modo attraverso il terminale mobile (notebook) è stato possibile effettuare le misurazioni al variare della distanza, inoltre è stata variata per ogni misura sia la potenza di trasmissione sia la dimensione dei pacchetti trasmessi sul canale. Per ogni potenza di trasmissione è stata anche calcolata la distanza massima raggiungibile dalla rete: tale distanza non è come si può pensare quella massima alla quale la rete wireless è rilevabile, bensì è la distanza massima alla quale non solo il PC e il notebook riescono a comunicare, ma la connessione deve essere affidabile e senza alcuna interruzione per un tempo considerevolmente grande.

Con i dati raccolti, per la valutazione delle performance del canale sono stati creati dei grafici, i quali descrivono l'andamento del rapporto segnale rumore al variare della distanza e della potenza e l'andamento della P.E.R. al variare della distanza della potenza e della dimensione del pacchetto.

Inoltre, con i campioni del rapporto segnale rumore misurati e tramite un'applicazione autoprodotta in linguaggio di programmazione C++ è stato possibile estrapolare alcune grandezze necessarie alla modellazione del canale tramite catene di Markov. La catena scelta per la modellazione di canale è di 3 stati, al fine di migliorare l'accuratezza del modello di Gilbert ed Elliot; inoltre in letteratura sono stati trovati articoli riguardanti la modellazione, nei quali si sostiene che con l'utilizzo di 3 stati si riesce ad avere un'ottima approssimazione.

Ogni stato della catena rappresenta un range di valori del S.N.R., attraverso l'applicazione prodotta è stato possibile calcolare la media di tutti i campioni rilevati; inoltre sono state calcolate le soglie necessarie al partizionamento, i tempi di permanenza dei campioni in ogni stato e, infine, la matrice delle probabilità di transizione; tale lavoro è stato eseguito per ogni potenza e ogni distanza di misura.

Per quanto riguarda il partizionamento, in letteratura non è suggerito uno schema ottimale, quindi, si è proceduto sperimentando un tipo di partizionamento opportunamente pensato.