

Capitolo 6

Scenario simulativo e modello di mobilità degli utenti

In questo capitolo vengono descritti la struttura dell'ambiente di simulazione ed il modello di mobilità degli utenti che sono stati utilizzati come punto di partenza per lo sviluppo del simulatore di entrambi i sistemi di comunicazione mobile a pacchetto GPRS e UMTS, ponendo particolare attenzione agli obiettivi prefissati ed alle motivazioni che hanno portato ad effettuare le scelte che stanno alla base del progetto.

6.1 Finalità e caratteristiche generali del simulatore

Gli anni '90 si sono distinti nell'ambito delle telecomunicazioni per l'ampia diffusione ed il grande successo che ha avuto sul mercato la telefonia cellulare. In Italia la prima grande comparsa del telefono cellulare si è avuta alla fine degli anni '80 con il sistema analogico TACS, per poi passare in anni più recenti al sistema numerico GSM, il cui successo commerciale ancora oggi non accenna a diminuire. Attualmente si stanno introducendo nelle reti GSM le potenzialità offerte dal GPRS per supportare il trasferimento di dati a pacchetto con velocità che possono arrivare fino a circa 170 kbit/s, molto maggiori dei 9.6 kbit/s e dei 14.4 kbit/s raggiungibili dal GSM; inoltre è prevista per il 2002 l'introduzione della nuova tecnologia UMTS, la quale permetterà di arrivare fino ad una velocità di trasferimento di 2Mbit/s in downlink, rendendo quindi

possibile un'agile navigazione all'interno dei siti WWW e la nascita di nuovi servizi.

La necessità dello sviluppo di un simulatore per questi due sistemi è dovuto al particolare interesse che il Politecnico di Torino ed il centro di ricerca Motorola hanno dimostrato di avere nei riguardi delle prestazioni che GPRS e UMTS possono offrire nell'ambito del trasferimento di dati a pacchetto e nell'analisi del loro comportamento in presenza di sorgenti di traffico diverse.

Essendo l'attenzione maggiormente rivolta ai protocolli di comunicazione piuttosto che alle problematiche di trasmissione dei segnali veri e propri sul canale radiomobile, il software è stato sviluppato semplificando tutto ciò che riguarda la simulazione del *link* radio. Per questo motivo si è preferito utilizzare, quando possibile, il materiale presente in letteratura, per non dover impegnare parte del tempo di simulazione per ottenere risultati già ricavati ed utilizzabili. Dovendo progettare integralmente uno strumento di simulazione, in seguito ad un'accurata analisi degli standard, sono state individuate tutte le caratteristiche comuni ai due sistemi, in modo tale da poter prima creare una base unificata sia per GPRS che per UMTS, per poi sviluppare separatamente su di essa i due sistemi con i loro aspetti caratterizzanti.

Il lavoro di questa tesi di laurea consiste nello studio e nell'analisi del livello MAC di entrambi i sistemi mediante un simulatore. Il progetto segue una fase preliminare di sviluppo che tiene in considerazione la necessità di future estensioni come l'introduzione di nuovi livelli di protocollo, tramite poche, semplici ed immediate modifiche del codice, in modo da poter utilizzare uno strumento completo e flessibile allo stesso tempo.

Viste le finalità che questa tesi si pone è stato scelto come linguaggio di programmazione il C++ che meglio si adatta alla necessità di realizzare uno strumento simulativo modulare e complesso. Dato che GPRS e UMTS sono due sistemi basati su di una struttura temporale suddivisa in trame (*frame*) e quindi soggetta a forti vincoli temporali, si è preferito realizzare un simulatore di tipo sincrono in cui il minimo incremento temporale corrisponde proprio alla durata di una trama, ovvero rispettivamente 4.616 ms e 10 ms. A questo nucleo sincrono è stato poi sovrapposto un gestore di eventi, che permette di scatenare tutte le procedure che governano il funzionamento del sistema.

Per quanto riguarda UMTS, un mobile può trasmettere, se abilitato, per un intervallo minimo di tempo che corrisponde proprio alla trama, quindi non è necessario scendere ad un livello temporale più fine quale quello del time slot,

poiché i tempi di simulazione diventerebbero eccessivi, senza ottenere sensibili vantaggi.

Per GPRS sarebbe possibile realizzare un simulatore sulla base di un radio block, in quanto i dati vengono trasmessi sempre tramite blocchi che occupano lo stesso time slot su quattro trame successive. Tuttavia vi è un canale, il PRACH, sul quale i terminali mobili trasmettono per il tempo di un singolo time slot su una sola trama; questo vuol dire che se si utilizzasse il radio block come incremento temporale minimo, si perderebbe la possibilità di simulare, coerentemente agli standard, tutte le procedure di accesso al PRACH. Anche per GPRS, quindi, è stata scelta la trama come unità temporale.

Il software sviluppato può effettuare non solo simulazioni di trasmissioni in uplink o in downlink separatamente, ma è stata prevista anche la possibilità di effettuare simulazioni di scenari in cui coesistono mobili in uplink e downlink. La diversificazione tra mobili uplink e downlink è stata fatta per permettere di ottenere elaborazioni che fossero mirate agli scopi della simulazione. Questa scelta permette quindi di allocare nella memoria del calcolatore soltanto quelle strutture dati che effettivamente saranno utilizzate nel corso della specifica simulazione, ottenendo come risultato un risparmio di risorse dell'elaboratore ed una riduzione dei tempi di calcolo.

6.2 Spazio di simulazione

6.2.1 Topologia

La topologia più semplice da utilizzare nello sviluppo di un simulatore per sistemi cellulari è quella costituita da una sola cella. Per cella si intende l'insieme dei punti dello spazio in cui il segnale della stazione radio base, che fa capo a quella cella, viene ricevuto da un terminale mobile con livelli di potenza superiori a quelli di tutte le altre stazioni radio base. Tuttavia, un sistema di questo tipo non permetterebbe di realizzare le procedure che stanno alla base del funzionamento dei sistemi cellulari come gli *handover*, ovvero tutte le funzionalità della rete che permettono il passaggio dei mobili da una cella a quella adiacente. Volendo, inoltre, conoscere nel dettaglio quali sono le prestazioni che GPRS e UMTS possono offrire in quanto sistemi radiomobili, l'utilizzo di una sola cella risulterebbe alquanto restrittivo.

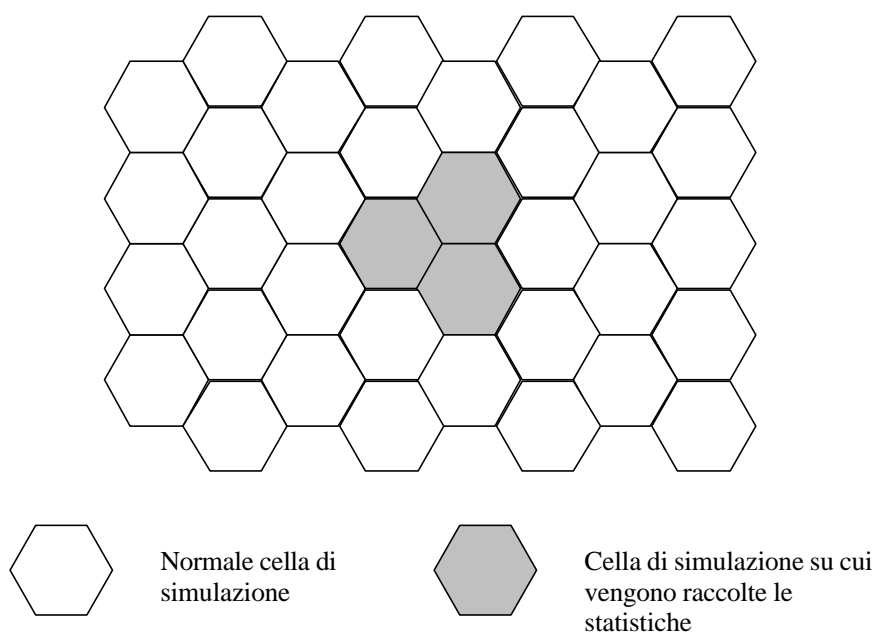


Figura 6.1: Topologia aperta

Appurato quindi che risulta conveniente utilizzare un insieme costituito da un certo numero di celle, è ora possibile scegliere tra due diverse topologie:

- **Topologia aperta**
- **Topologia chiusa o ripiegata**

Il primo tipo di topologia è costituito da un semplice insieme di celle disposte su di uno spazio piano. La simulazione viene effettuata su tutte le celle appartenenti a tale insieme, ma le statistiche utili per comprendere ed analizzare le prestazioni del sistema è necessario che siano raccolte soltanto su un ristretto gruppo situato approssimativamente al centro dell'area simulata (fig. 6.1). Il motivo per cui risulta indispensabile agire in questo modo è essenzialmente dovuto al fatto che si vuole evitare l'effetto di bordo. Quest'ultimo è il fenomeno che si verifica quando un terminale mobile si avvicina ai bordi dello spazio di simulazione: in prossimità delle celle di confine il numero dei segnali interferenti provenienti dalle BTS adiacenti risulta essere minore di quello che si ha per celle situate al centro della topologia, in quanto le celle esterne, proprio per come è stato costruito lo scenario, si trovano ad avere un numero di celle adiacenti minore di quelle

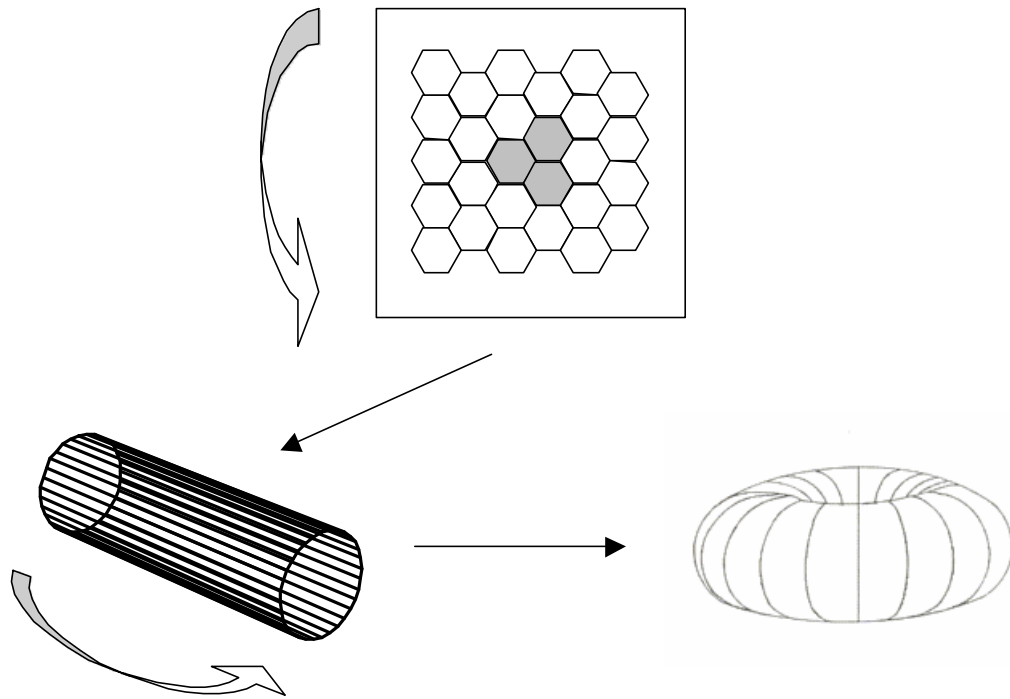


Figura 6.2: Trasformazione dallo spazio piano allo spazio toroidale

interne. L'effetto di bordo porterebbe quindi a falsare le statistiche se queste fossero raccolte indistintamente in tutte le celle.

Vi sono poi due altri problemi strettamente legati al precedente: il primo è quello della difficoltà di stabilire una sorta di confine tra le celle interne e quelle esterne, mentre il secondo è quello di come debbano essere considerate le statistiche dei mobili che pur avendo iniziato un trasferimento di dati all'interno o all'esterno delle celle centrali, si trovino a dover attraversare il confine tra queste celle ed il resto della rete. La gestione della topologia aperta è relativamente semplice, ma i tempi di simulazione sono molto più elevati di quelli strettamente necessari a raccogliere le statistiche sulle celle centrali.

Il secondo tipo di topologia che è possibile adottare è quella chiusa (o ripiegata). In questo caso, le celle utilizzate non sono più disposte su uno spazio piano come nel caso precedente, ma su uno spazio toroidale derivante dal ripiegamento dello spazio piano su se stesso nei due sensi verticale e orizzontale (fig. 6.2). All'interno di questa nuova struttura, tutte le celle utilizzate per la simulazione possono essere usate per la raccolta delle

statistiche. Infatti non è più possibile individuare celle di bordo o celle interne, poiché ognuna di esse risulta essere uguale a tutte le altre sotto ogni punto di vista. Questa tecnica risulta, quindi, essere più efficiente di quella precedente sia perché si sfruttano effettivamente tutte le celle che vengono simulate ma anche perché, a parità di numero di celle, si colleziona una quantità maggiore di statistiche, permettendo di ridurre notevolmente i tempi di simulazione. Allo stesso tempo però, questa tecnica ha lo svantaggio di richiedere una maggiore complessità nella gestione del sistema e della mobilità degli utenti; inoltre questo tipo di struttura non è realizzabile con un numero qualsiasi di celle, ma soltanto tramite insiemi ben definiti. Un ulteriore problema a cui si va incontro è quello di ottenere risultati troppo correlati se si considerano degli spazi di simulazione troppo piccoli, costituiti cioè da un numero di celle troppo esiguo; la soluzione a tale problema è semplice in quanto la correlazione diminuisce velocemente al crescere del numero di celle del sistema. Inoltre per avere la stessa correlazione in senso verticale come in quello orizzontale è necessario adottare uno spazio piano quadrato; tale spazio dovrà poi essere richiuso per formare lo spazio toroidale, le cui dimensioni risultino essere le stesse su entrambi gli assi cartesiani.

6.2.2 Suddivisione dello spazio in pixel

Una delle tante peculiarità del canale radiomobile è data dal fatto che il segnale ricevuto varia molto velocemente nel tempo a causa di diversi fattori come sarà spiegato nel paragrafo 6.4. Uno di questi è proprio legato al fatto che il terminale si sposta continuamente nello spazio, variando di conseguenza le proprietà del canale radio sul quale trasmette e riceve informazioni dalla BTS.

Volendo realizzare un simulatore che analizzi il comportamento dei protocolli utilizzati dai sistemi GPRS e UMTS sulla tratta radio, è evidente che sarebbe necessario aggiornare costantemente i livelli di potenza ricevuti dai vari terminali mobili al variare della loro posizione all'interno dell'ambiente che è stato scelto. Soddisfare questo requisito significherebbe dover effettuare il calcolo dell'attenuazione dei vari segnali ricevuti ogni volta che fosse necessario conoscere il valore dei livelli di potenza, con il conseguente rallentamento della simulazione. Inoltre, come è stato detto precedentemente, lo scopo principale del simulatore è quello di permettere lo studio delle prestazioni dei protocolli, in particolare del livello MAC, e non quello di analizzare il livello fisico riguardante la trasmissione e la ricezione dei segnali

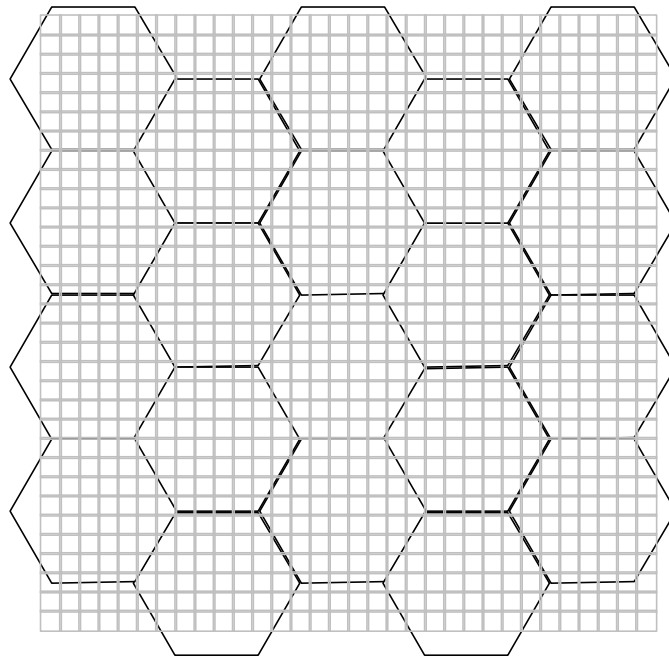


Figura 6.3: Sovrapposizione del reticolo di pixel alla struttura cellulare

radioelettrici. Per questo motivo, è stato ritenuto opportuno semplificare tutti gli aspetti riguardanti il livello fisico proprio per evitare che lo strumento software occupasse la maggior parte del tempo ad elaborare dati di link.

La soluzione adottata per rendere più agile il calcolo dei vari livelli di potenza è stata quella di introdurre un reticolo di *pixel*. Per *pixel* si intende il minimo elemento dello spazio di simulazione all'interno del quale i valori di attenuazione dalle varie BTS risultano essere costanti. (fig. 6.3). In questo modo tale spazio non risulta più essere solo suddiviso in celle, ma a loro volta le celle risultano essere suddivise in elementi di dimensioni ancora minori, ovvero in *pixel*.

Il motivo principale per cui risulta utile introdurre i *pixel* è che in questo modo si evita, ad ogni aggiornamento di posizione dei vari mobili, di andare ad effettuare le misure di potenza relative alle varie BTS presenti all'interno dell'area di simulazione per il calcolo dell'interferente I e del rapporto C/I (*carrier to interference ratio*), i quali saranno utilizzati in seguito per determinare la probabilità di errore sul bit e sul blocco (BER e BLER). In questo modo, si possono effettuare le misurazioni una volta sola all'inizio della simulazione, associando ad ogni pixel un insieme di BTS il cui segnale è

ricevuto con minore attenuazione rispetto alle altre e memorizzando per ogni BTS di questo insieme il rispettivo valore di attenuazione. Il mobile che viene a trovarsi all'interno di un *pixel*, invece di effettuare la serie di misurazioni necessarie per determinare quale BTS viene ricevuta meglio, non dovrà fare altro che leggere i valori di attenuazione che sono stati memorizzati in opportune variabili e determinare successivamente il livello di potenza ricevuto.

La suddivisione in *pixel* dell'intero spazio di simulazione risulta essere una semplificazione che comporta l'introduzione di un'approssimazione sui vari livelli di attenuazione relativi alle BTS. Il fenomeno che si verifica, infatti, è che in un qualunque punto interno ad uno stesso *pixel* si avrà lo stesso valore di attenuazione, ovvero l'attenuazione risulterà costante.

Il voler tenere in considerazione per ogni *pixel* un insieme costituito da più BTS, dipende dal fatto che non si vuole legare il concetto di cella a considerazioni puramente geometriche. Se si considera soltanto una BTS, quando un mobile viene a trovarsi su un determinato *pixel* non potrebbe far altro che comunicare con quella BTS ottenendo quindi una struttura statica. Se invece si memorizzano diverse stazioni radio base per ogni *pixel*, il mobile opererà la propria scelta non solo in base ai livelli di attenuazione, ma, come sarà spiegato meglio nel paragrafo 6.4, considerando anche i fenomeni di *fading* e *shadowing*.

Il problema a cui si va incontro in seguito all'introduzione della suddivisione dello spazio in *pixel* è determinato dalla scelta della dimensione del lato del *pixel*: è infatti necessario trovare un compromesso tra le seguenti esigenze contrastanti:

- I *pixel* dovrebbero essere abbastanza estesi nello spazio in modo tale da non richiedere una quantità di memoria dell'elaboratore eccessiva.
- Si vorrebbe fare in modo che ad ogni aggiornamento di posizione il mobile cambiasse *pixel*.
- Bisognerebbe evitare che, nel passaggio tra due *pixel* consecutivi, la differenza tra i valori di attenuazione assumesse valori troppo elevati introducendo così un'approssimazione eccessiva.

La soluzione scelta sarà descritta nel paragrafo 6.3.

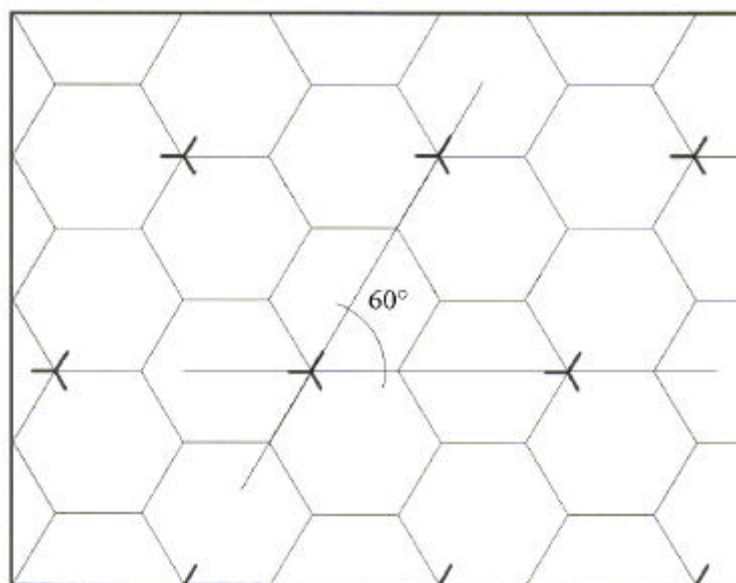


Figura 6.4: Disposizione delle BTS

6.2.3 Disposizione delle base station

Osservando la classica rappresentazione dei sistemi cellulari come insieme di elementi di forma esagonale, si può notare come le varie base station siano disposte su due assi inclinati di 60° l'uno rispetto all'altro (fig. 6.4). Nel simulatore viene utilizzata questa stessa disposizione in quanto, tramite pochi parametri d'ingresso, come il numero di *base station* per ognuno dei due assi e la distanza relativa tra due BTS, è possibile descrivere quasi completamente l'intero scenario simulativo.

Per i motivi descritti nel paragrafo 6.2.1, se si desidera lavorare su uno spazio ripiegato il numero di BTS totali (e quindi il numero di celle) non potrà essere scelto in modo casuale ma dipenderà da quante BTS sono state posizionate su ognuno degli assi. In genere se non si hanno esigenze particolari, il numero totale di BTS sarà semplicemente dato dal prodotto del numero delle BTS su ognuno dei due assi. Se invece si vuole avere lo stesso livello di correlazione su entrambe le direzioni, sarà necessario prevedere lo stesso numero di BTS su entrambi gli assi.

Per ottenere risultati che risentano in modo minimo della correlazione introdotta dalla struttura stessa dello spazio richiuso, sarebbe necessario effettuare simulazioni con un numero di BTS il più grande possibile; si è ritenuto, tuttavia, opportuno non utilizzare più di 64 *base station* per evitare di

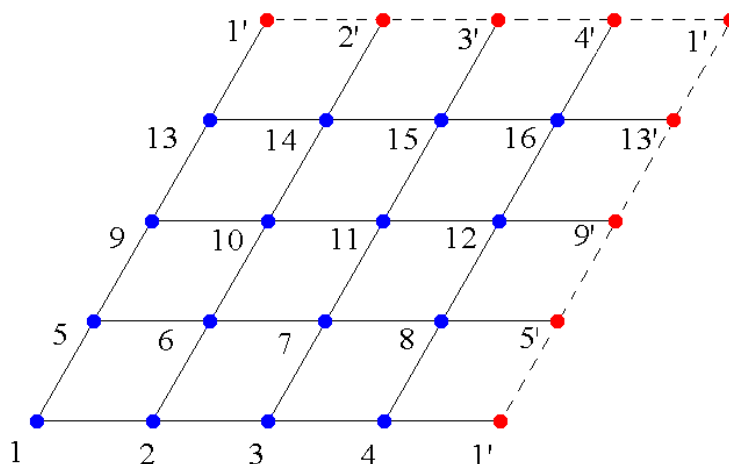


Figura 6.5: Disposizione delle BTS utilizzata nel simulatore

appesantire troppo la simulazione, che nel caso si intendesse utilizzare antenne trisetoriali a 120° permetterebbe di gestire fino a 192 celle diverse contemporaneamente. Una possibile disposizione delle BTS nel simulatore è indicata in fig. 6.5, in cui sono presenti 16 base station (4x4).

6.3 Mobilità degli utenti

6.3.1 Descrizione dei possibili ambienti di simulazione

Il concetto di mobilità degli utenti dipende dal particolare tipo di ambiente in cui essi si trovano, per cui i parametri che governano il loro movimento saranno diversi a seconda dell'ambiente che si intende studiare.

In ambito ETSI, come riportato in [4], per offrire un modello di riferimento in modo tale da poter confrontare i risultati ottenuti in seguito agli studi effettuati sul sistema di comunicazione UMTS, sono stati sviluppati tre diversi ambienti di test:

- *Indoor office*
- urbano
- extraurbano

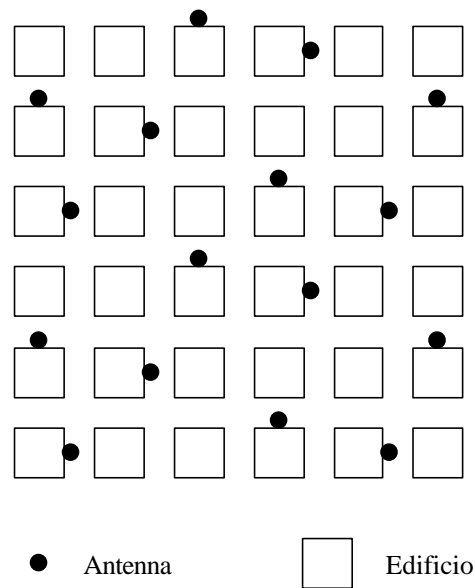


Figura 6.6: Esempio di modello Manhattan

Questi tre diversi tipi di ambienti sono solo un piccolo sottoinsieme delle molte realtà presenti sul territorio, ma consentono di coprire la grande maggioranza delle configurazioni ambientali di possibile interesse.

6.3.1.1 Ambiente *Indoor office*

Il primo ambiente, definito anche picocellulare, è quello in cui gli utenti si trovano all'interno di un edificio ed in particolare all'interno di uffici e corridoi che possono essere collocati anche su piani diversi, benché non sia previsto lo spostamento degli utenti da un piano all'altro. Gli utenti possono essere sia in movimento con velocità costante che fermi secondo una determinata densità di probabilità. Se un utente si trova in una stanza, la probabilità di continuare a restare fermo è maggiore di quella di iniziare a muoversi, mentre al contrario, un utente che si trova in un corridoio avrà una maggiore probabilità di muoversi rispetto a quella di fermarsi. In questo caso, quindi, sia la velocità che gli spazi di movimento sono ridotti. Nel simulatore sviluppato non si è preso in considerazione questo tipo di ambiente, in quanto risulta essere un contesto troppo specifico.

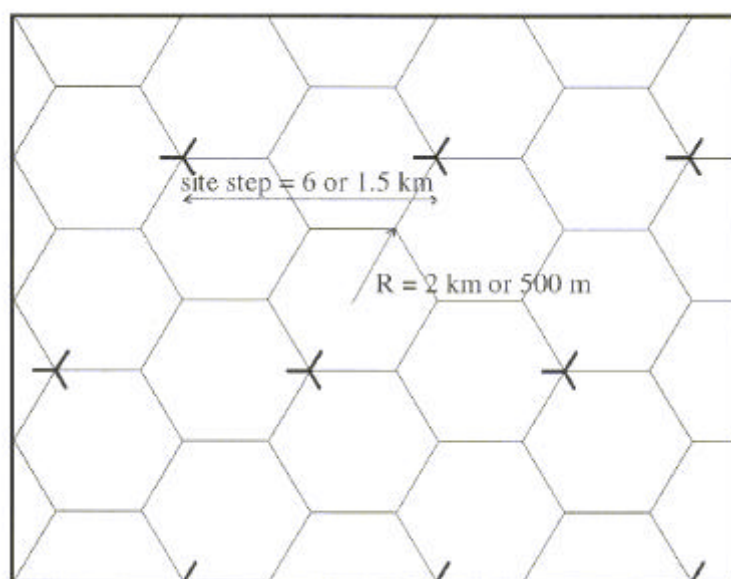


Figura 6.7: Parametri caratteristici dell'ambiente macrocellulare

6.3.1.2 Ambiente urbano

Il secondo, definito anche ambiente microcellulare, è caratteristico dei centri urbani ed il modello che viene suggerito è quello denominato Manhattan (fig. 6.6). Esso è costituito da una serie di edifici e di strade disposti regolarmente a scacchiera ed è caratterizzato da velocità di spostamento limitate, ma da spazi ben più ampi rispetto all'ambiente *indoor*. Gli utenti possono muoversi solamente lungo le strade e ad ogni incrocio hanno la possibilità di continuare a muoversi lungo la loro traiettoria rettilinea oppure di svoltare a destra o a sinistra con determinate densità di probabilità.

6.3.1.3 Ambiente extraurbano

L'ultimo tipo di ambiente, definito anche macrocellulare (fig. 6.7), è quello caratterizzato da ampi spazi di movimento e velocità maggiori rispetto a quelle dei due ambienti appena descritti. Il modello si basa su una struttura a celle esagonali in cui la distanza tra le base station è di 6 km e gli utenti hanno la possibilità di cambiare la loro direzione di movimento di un certo angolo ogni volta in cui viene effettuato un aggiornamento di posizione.

Sono inoltre previsti anche ambienti misti determinati dalla sovrapposizione di diversi livelli di copertura radioelettrica della stessa zona, ovvero microcelle

(ambiente urbano) sovrapposte a macrocelle (ambiente extraurbano), i quali però non sono stati scelti come ambiente di test per lo sviluppo del progetto.

6.3.2 Modello di ambiente scelto per il simulatore

Il modello utilizzato nello sviluppo del simulatore si basa principalmente su quello macrocellulare, ma si è voluto fare in modo che questa scelta non limitasse la possibilità di studiare anche gli altri ambienti, una composizione di essi oppure ambienti completamente diversi. Proprio per questo motivo lo scenario è stato creato in modo tale che si potesse simulare l'uno o l'altro ambiente variando semplicemente i parametri di distanza tra le BTS congiuntamente ai parametri di propagazione, come sarà descritto successivamente.

Gli utenti si muovono all'interno dell'area simulata secondo un modello di tipo probabilistico: la traiettoria di un mobile è rettilinea a tratti, la velocità, che dipende dal tipo di ambiente considerato, non è unica ma esistono diverse classi di velocità e, ad ogni aggiornamento di posizione, la direzione può essere cambiata secondo una data distribuzione aleatoria. All'inizio della simulazione gli utenti vengono uniformemente distribuiti all'interno di tutta l'area e la loro direzione è scelta tramite l'estrazione di una variabile casuale.

Per semplificare l'aggiornamento di posizione dei mobili, si è scelto di effettuarlo ad intervalli di tempo regolari, dipendenti dalla classe di velocità del mobile stesso. Questo tipo di aggiornamento non richiede particolari accorgimenti, mentre sarebbe stato più problematico un aggiornamento di posizione non sincrono tra tutti i mobili, rendendo necessario l'inserimento del relativo aggiornamento nel calendario degli eventi, incrementando la quantità di memoria occupata ed allungando i tempi di simulazione

Per sfruttare il più possibile l'introduzione dei pixel si vorrebbe fare in modo che, ad ogni aggiornamento di posizione, un terminale mobile passasse dal pixel corrente ad uno di quelli adiacenti.

Per ottenere questo risultato è necessario effettuare alcune considerazioni sulla velocità dei mobili. Prendendo in esame un ambiente extraurbano con raggio di cella di 2 km ed un mobile ad una velocità di 120 km/h, in 600ms esso copre una distanza di 20m, pari alla distanza di correlazione per ambienti macrocellulari, come riportato in [4]. Se si utilizzassero pixel con lato di questa dimensione il numero totale di pixel all'interno delle celle sarebbe pari a circa 75000 e quindi eccessivo sia per quanto riguarda l'occupazione di memoria

dell'elaboratore, sia per i tempi di calcolo che dipendono proporzionalmente dal numero di pixel del sistema e quindi in modo quadratico dalla variazione della dimensione del pixel stesso.

Un ulteriore motivo per cui non risulta utile creare un elevato numero di pixel è il fatto che in questo modo il loro uso risulterebbe scarsamente vantaggioso, in quanto pixel di piccola dimensione rispetto al raggio di cella darebbero luogo ad un elevato numero di aggiornamenti di posizione dei mobili.

Se si considera invece uno spazio di 100 m, il tempo necessario a percorrerlo ad una velocità di 120 km/h sarà quindi di 3 s ed utilizzando pixel con lato di questa dimensione, che si considera essere quella minima perché l'introduzione dei pixel abbia l'effetto desiderato, l'intervallo di aggiornamento di posizione dei mobili risulterà essere di 3 s. Per le altre classi di velocità, il tempo di aggiornamento sarà pari a quello necessario per percorrere il lato del pixel a quella data velocità. Il valore di 100 m deriva dall'analisi dei grafici 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 che indicano il valore di attenuazione discretizzato per pixel di 100 e 200 m di lato. Come si può vedere dalle figure, la differenza di attenuazione massima si ha tra pixel adiacenti vicini alla base station, ma allontanandosi gradualmente da essa la differenza si affievolisce. Questo vuol dire che le approssimazioni maggiori si avranno solamente nei pressi dell'antenna della BTS, mentre molto minori risulteranno essere quelle per pixel distanti dalla BTS, anche per pixel di dimensioni molto maggiori rispetto ai 20 m. Tuttavia aumentando la dimensione del lato dei pixel aumenta anche la variazione di attenuazione che si avrebbe all'interno del pixel stesso, introducendo approssimazioni sempre maggiori, in quanto, come è stato detto, nel simulatore l'attenuazione viene mantenuta costante per tutti i punti dello spazio appartenenti ad un determinato pixel. Si è quindi ritenuto opportuno che la scelta di 100 o 200 m come dimensione dei pixel fosse la scelta ottimale nel caso di celle con raggio di 2 km. In generale, se si vuole mantenere fisso il rapporto tra lato del pixel e raggio della cella, si può affermare che esso possa essere ragionevolmente posto pari al 5% - 10%. Il numero di pixel per cella risulterà quindi dipendente da questa scelta e sarà pari rispettivamente a 1200 e 300.

Nelle tabelle 6.1 e 6.2 vengono riportati alcuni esempi di dimensione dei pixel e gli intervalli temporali con cui è necessario effettuare un

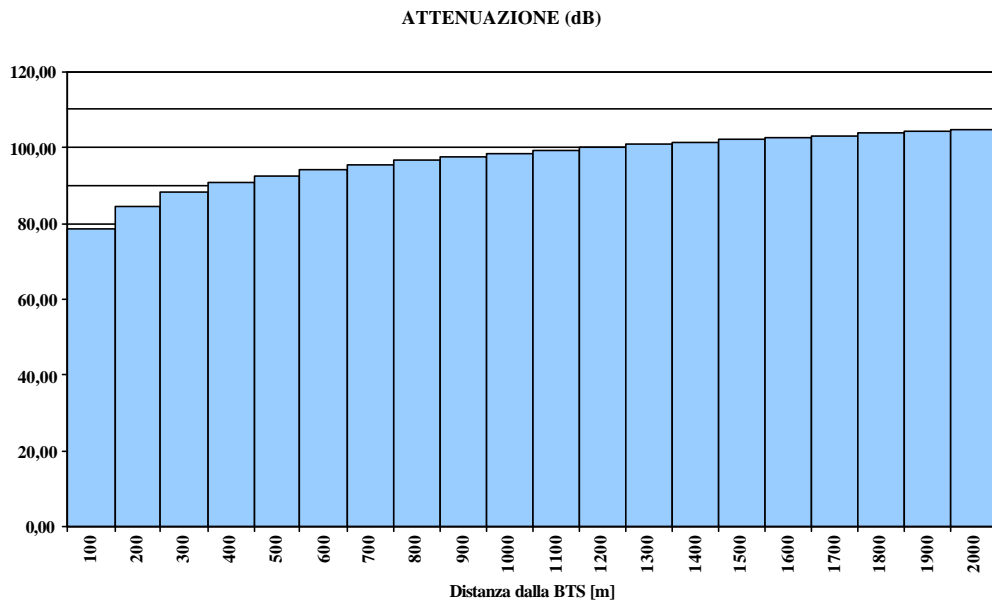


Figura 6.8: Attenuazione in dB per pixel di 100 m

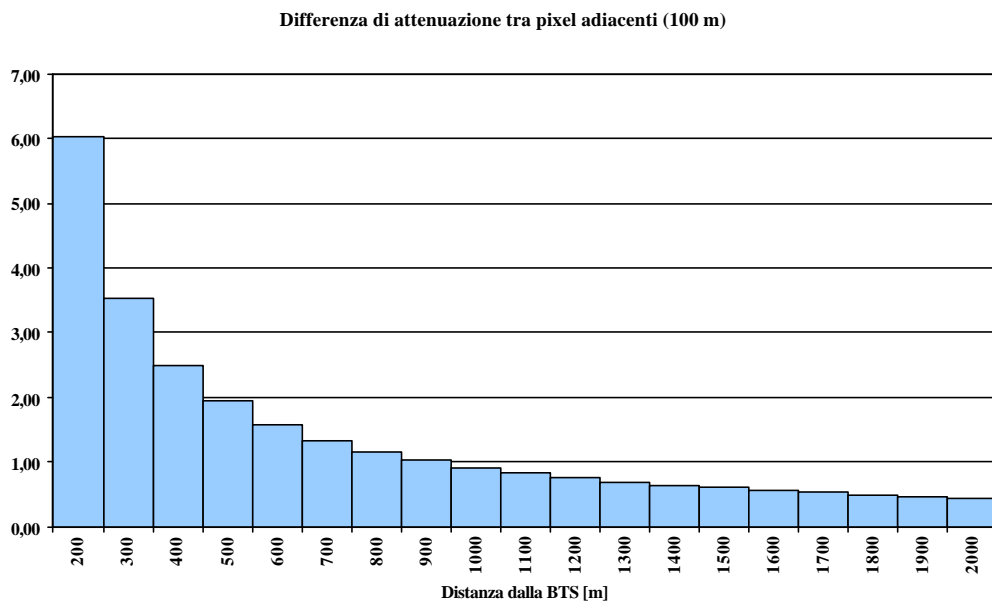


Figura 6.9: Differenza di attenuazione tra pixel adiacenti

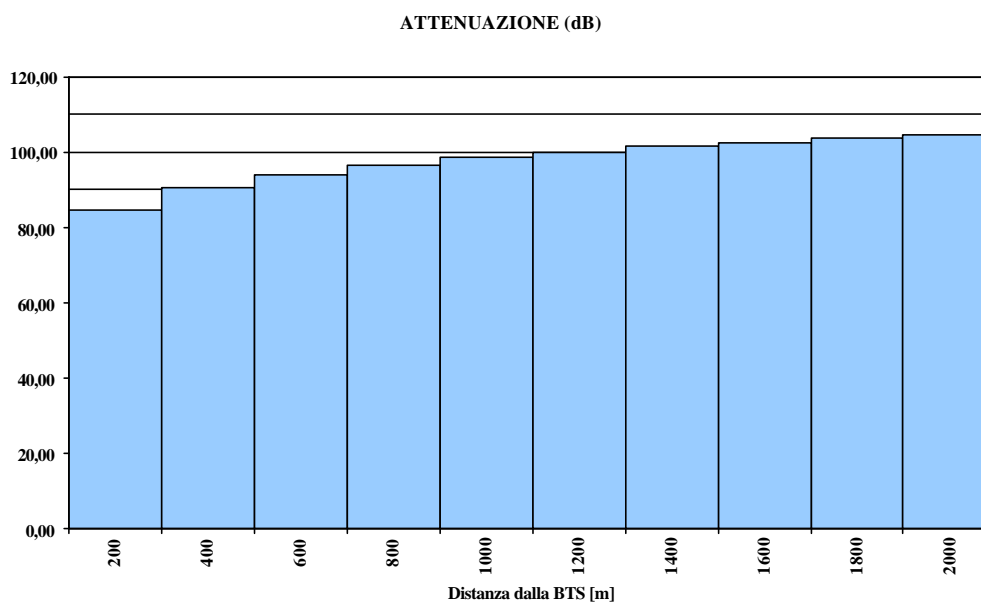


Figura 6.10: Attenuazione per pixel di 200 m

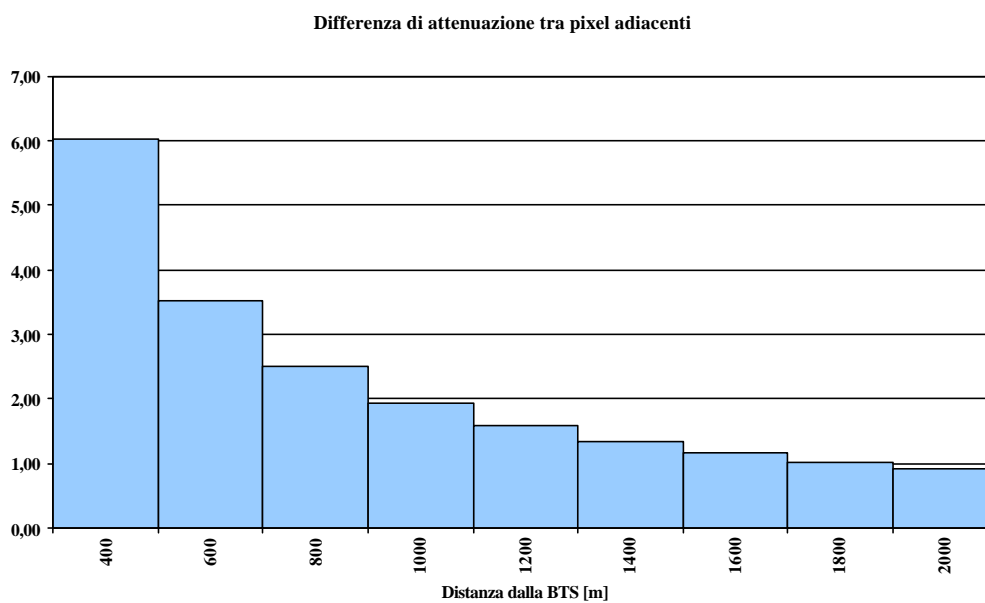


Figura 6.11: Differenza di attenuazione per pixel di 200 m

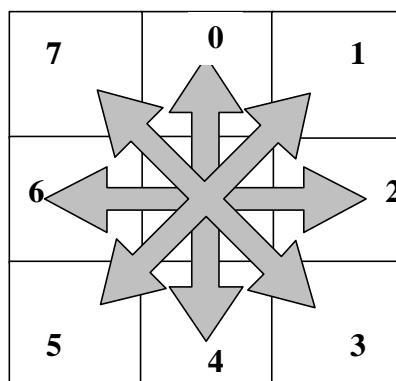


Figura 6.12: Possibili spostamenti di un mobile ad ogni aggiornamento di posizione

aggiornamento di posizione per un mobile che si muove nello spazio di simulazione con una determinata velocità.

Raggio di cella [m]	Dimensione pixel [m]	Rapporto
2000	100	5%
2000	200	10%
500	25	5%
500	50	10%

Tabella 6.1: Relazione tra raggio di cella e dimensione dei pixel

Intervalli di aggiornamento di posizione [s]			
Velocità [km/h]	Pixel di 20 m	Pixel di 100 m	Pixel di 200 m
120	0.6	3	6
60	1.2	6	12
30	2.4	12	24

Tabella 6.2: Intervalli di aggiornamento di posizione al variare della dimensione dei pixel e della velocità dei mobili

In questo modo, ad ogni aggiornamento di posizione, un mobile potrà passare dal pixel attuale ad uno degli otto adiacenti tramite la semplice estrazione di una variabile casuale discreta che indica la direzione dello spostamento.

Modificando le proprietà di tale variabile aleatoria sarà possibile caratterizzare il movimento di ogni utente all'interno dello spazio di simulazione (fig. 6.12).

6.4 Modello di propagazione

Il modello di propagazione che è stato utilizzato nel corso delle simulazioni prevede che l'attenuazione globale del segnale radioelettrico sul cammino di propagazione tra mobile e base station sia costituita dal contributo di tre differenti termini:

- Attenuazione di propagazione.
- Attenuazione dovuta al fading veloce.
- Attenuazione dovuta al fading lento (*shadowing*).

Si può quindi scrivere:

$$A_{tot}|_{dB} = A_{pr}|_{dB} + A_{fv}|_{dB} + A_{sh}|_{dB} \quad (6.1)$$

Se P_r e P_t rappresentano la potenza del segnale ricevuto e trasmesso, G_{ms} e G_{bts} il guadagno dell'antenna del terminale mobile e della BTS, allora è la relazione che lega questi parametri è la seguente:

$$P_r = P_t \frac{G_{ms}G_{bs}}{A_{tot}} \quad (6.2)$$

6.4.1 Attenuazione di propagazione

Il primo termine che compare a secondo membro nella formula (6.1) rappresenta l'attenuazione dovuta alla propagazione. Esso viene determinato in base ad un particolare modello caratteristico dell'ambiente che si vuole prendere in considerazione. Questo, infatti, è il termine che permette di distinguere da un punto di vista propagativo i diversi ambienti che di volta in volta si vogliono simulare. E' così necessario introdurre modelli diversi a seconda che si effettui una simulazione in un ambiente urbano, in cui un mobile riceve principalmente una serie di raggi riflessi e difficilmente si trova in presenza di un raggio di propagazione diretto, oppure di uno extraurbano in cui è molto più probabile che la BTS sia in vista per il terminale mobile.

Il modello più semplice da utilizzare è quello che tiene conto solamente della propagazione nello spazio libero, senza ostacoli tra il trasmettitore ed il ricevitore o riflessioni indesiderate. In questo caso l'attenuazione in dB sarà determinata dalla formula:

$$A_{pr}|_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

dove d rappresenta la distanza e λ la lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza della portante che per entrambi i sistemi può essere approssimata a circa 2 GHz, senza effetti negativi sull'attendibilità dei risultati.

6.4.2 Fading veloce

Il secondo termine rappresenta l'attenuazione dovuta al *fading* veloce, conseguenza della presenza di cammini multipli tra il mobile e la stazione radio base e causa di rapide variazioni del livello del segnale che compromettono la qualità della ricezione. Questo termine potrebbe anche non essere considerato se si volessero studiare le prestazioni di sistemi a commutazione di circuito, in cui una comunicazione si estende significativamente nel tempo, in quanto l'eventuale presenza del termine di fading sarebbe comunque mediata su un intervallo temporale tale da rendere pressoché nullo il suo effetto. Per il trasferimento di dati a pacchetto che avviene, invece, in tempi molto più ristretti, l'utilizzo del termine di fading veloce non è più trascurabile. Sarebbe quindi necessario prendere in esame per ogni link un insieme di cammini sui quali calcolare singolarmente tutti i parametri di propagazione e, in un secondo tempo, effettuare la ricombinazione. Tuttavia, in questo modo, il modello di propagazione diventerebbe troppo accurato e complesso per gli scopi del simulatore quindi il termine di fading veloce è stato ottenuto come estrazione di una variabile casuale. Per calcolare il tempo di aggiornamento del fading veloce è necessario tenere in considerazione lo spettro Doppler del sistema e la velocità con cui si muovono i mobili. La banda di dispersione Doppler si calcola con la seguente formula:

$$f_d = f_0 \frac{v}{c}$$

dove:

- f_0 è la frequenza portante (2 GHz)
- v è la velocità del mobile
- c è la velocità della luce

Le condizioni più restrittive si hanno per velocità maggiori, quindi, se si considerano mobili con velocità massima di 120 Km/h, la banda di dispersione che si ottiene risulta essere pari a circa 220 Hz. Definendo il tempo di coerenza pari all'inverso della banda di coerenza si può calcolare il massimo intervallo di tempo all'interno del quale le caratteristiche propagative del canale rimangono immutate. Nel nostro caso si ha che:

$$T_c = \frac{1}{f_d} = 4.55 \text{ ms}$$

Avendo scelto come periodo temporale minimo per il simulatore la trama radio, che nel caso di GPRS è di 4.616 ms mentre nel caso UMTS è di 10 ms, è necessario estrarre un valore di fading veloce ogni trama. Dato che è stata prevista la coesistenza all'interno della stessa simulazione di mobili con diverse velocità (classi di velocità), è necessario effettuare estrazioni di fading veloce con tempistiche diverse a seconda della classe di velocità di ogni mobile.

6.4.3 Shadowing

L'ultimo termine riguarda il fading lento o *shadowing*, dovuto al transito del mobile in una zona "d'ombra" radioelettrica creata, per esempio, da un alto edificio o da una particolare conformazione orografica che si interpone tra il trasmettitore ed il ricevitore. L'attenuazione per *shadowing* viene considerata come una variabile casuale log-normale con media nulla e varianza data.

$$A_{SH} = 10^{\frac{A_{SH,dB}}{10}}$$

Dato che due valori di *shadowing*, rilevati in punti consecutivi, risultano correlati fra loro, i parametri statistici della variabile casuale vengono

Problemi per lo shadowing sincronizzato

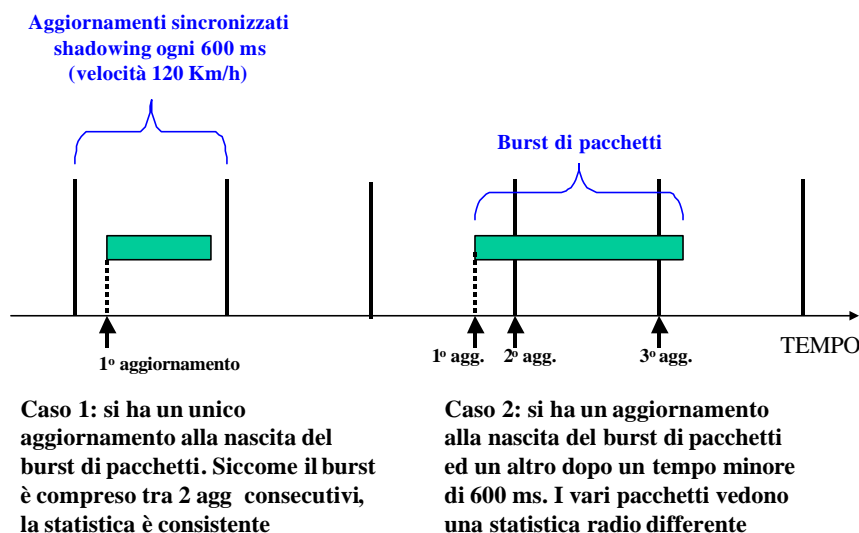


Figura 6.13: Problematiche per la gestione dello shadowing

aggiornati in base alla funzione di autocorrelazione $R(\Delta x)$ ed alla distanza di decorrelazione d_{corr} che a seconda degli ambienti microcellulare o macrocellulare può valere 5 m o 20 m. La funzione di autocorrelazione definita in [4] è la seguente:

$$R(\Delta x) = e^{-\frac{|\Delta x|}{d_{cor}} \ln 2}$$

Anche in questo caso, considerando velocità differenti, è necessario un aggiornamento dello shadowing dipendente dalla classe di velocità. A titolo di esempio un mobile alla velocità di 120 Km/h percorre 20 m in 600 ms e quindi questo sarà l'intervallo temporale con cui verrà effettuato l'aggiornamento dello shadowing per questa classe di velocità.

Tuttavia, all'interno della stessa classe di velocità dei mobili, l'aggiornamento di shadowing non potrà essere effettuato in modo sincrono per tutti gli utenti in quanto la statistica di propagazione a cui sono sottoposte le varie trasmissioni potrebbe essere profondamente diversa per *burst* di pacchetti che nascono e muoiono fra due aggiornamenti consecutivi e per quelli che,

invece, sono sottoposti a più aggiornamenti. La situazione appena descritta è presentata nella figura 6.13. Le linee verticali distanziate in modo regolare rappresentano la cadenza temporale con cui verrebbe effettuata l'estrazione di shadowing sincrona per tutti gli utenti, mentre le linee tratteggiate indicano l'estrazione di shadowing che deve essere fatta all'inizio di un burst di pacchetti. Nel primo caso, essendo la durata del burst inferiore all'intervallo di aggiornamento dello shadowing, si è in presenza di una sola estrazione, mentre nel secondo caso ve ne sono tre di cui due molto ravvicinate: questo comporta una variazione più veloce delle proprietà del canale e quindi una diversa visione della statistica radio rispetto al primo caso. Risulta quindi necessario effettuare gli aggiornamenti di shadowing secondo intervalli regolari, ma in modo asincrono tra i vari utenti a partire dall'istante in cui il burst inizia ad essere trasmesso sul canale, se si vogliono mettere i mobili nelle condizioni di operare secondo le stesse modalità.

6.5 Scelte effettuate

In seguito a tutte le considerazioni effettuate sul tipo di topologia da utilizzare per la simulazione, sulla disposizione delle BTS, sulla dimensione dei pixel, sul modello di propagazione si è pervenuti alle scelte qui riportate.

- Topologia ripiegata.
- Suddivisione dello spazio di simulazione in pixel di dimensione opportuna per contenere i tempi necessari all'elaborazione dei risultati.
- Ambiente di simulazione basato sul modello macrocellulare ma facilmente adattabile ad ambienti diversi.
- Disposizione delle BTS coerente con la rappresentazione di celle esagonali
- Numero di base station determinato dal numero di quelle posizionate sui due assi di riferimento (meglio se minore di 64).
- Possibilità di utilizzare base station con antenne omnidirezionali e trisetoriali.
- Attenuazione del segnale dovuta alla propagazione dipendente dal modello che si intende utilizzare per studiare un determinato ambiente.
- Aggiornamento di posizione dei mobili dipendente dalla velocità, ma sincrono all'interno di una data classe di velocità; viene effettuato ogni volta che un mobile percorre una distanza pari alla dimensione dei pixel.

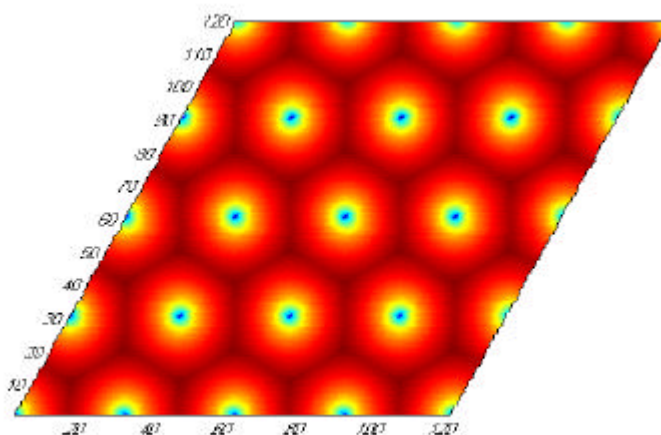


Figura 6.14: Andamento dell'attenuazione dalla BTS ricevuta meglio

- Aggiornamento dello shadowing indipendente da quello di posizione ed effettuato ogni volta che un mobile percorre la distanza di correlazione propria dell'ambiente di simulazione.
- Aggiornamento del fading veloce effettuato ad ogni trama sia per GPRS che per UMTS.

Le maggiori differenze, rispetto a quanto descritto in [4], riguardano essenzialmente il rapporto tra l'aggiornamento di posizione e quello dello *shadowing*. Per il simulatore sviluppato è stato scelto di mantenerli, e quindi di gestirli, in modo separato invece di eseguirli contemporaneamente. Tale scelta è stata dettata dalla necessità di effettuare simulazioni con terminali che potessero muoversi contemporaneamente con velocità diverse e dalla volontà di limitare il più possibile i tempi di calcolo. Il risultato è quindi l'indipendenza dell'aggiornamento di posizione, effettuato in modo sincrono per ogni classe di velocità ogni volta che il mobile ha percorso una distanza pari alla dimensione del pixel, da quello di shadowing, effettuato in modo asincrono per tutti i mobili ogni volta che il mobile copre la distanza di correlazione caratteristica dell'ambiente in cui si sta muovendo, che per l'ambiente macrocellulare corrisponde a 20 m. In figura 6.14 viene mostrato graficamente il risultato del calcolo della semplice attenuazione di propagazione dalla BTS ricevuta meglio da ogni pixel, in uno spazio di simulazione costituito da 4x4 BTS equipaggiate con antenne omnidirezionali. E' possibile notare come, in condizioni ideali, si riproduce la struttura cellulare esagonale. I punti accomunati dallo stesso

colore rappresentano i punti dello spazio in cui il segnale della BTS viene ricevuto con uguale intensità.

6.6 Modelli di traffico

Come è già stato detto in precedenza, uno degli scopi principali del simulatore è quello di analizzare il comportamento di GPRS e UMTS in presenza di vari tipi di traffico, per comprendere qual è la qualità di servizio che può essere offerta. Per questo motivo sarà utile utilizzare un modello di traffico che descriva una tipica sessione di navigazione WWW, uno per il traffico generato dallo scambio di messaggi di posta elettronica, ecc. In generale quindi sarebbe necessario utilizzare un modello specifico per ogni tipo di servizio che interessa studiare. Vengono qui descritti i principali modelli di traffico che sono consigliati in [1] e [4] come base comune per il confronto dei risultati di diverse simulazioni.

6.6.1 Servizi real time

Per i servizi real time si considera, per l'arrivo delle chiamate, un processo di Poisson con una durata media 120 s.

Per il traffico voce si assume un modello di tipo on-off con periodi alternati di attività e di silenzio generati da una distribuzione esponenziale con valor medio pari 3 s sia in uplink che in downlink.

Per i servizi dati a commutazione di circuito, il modello di traffico deve essere a bit rate costante, con il 100% di attività.

6.6.2 Servizi non real time

Per i servizi non real time sono disponibili i seguenti modelli:

- WWW
- FUNET
- Mobitex
- Railway

6.6.2.1 Modello WWW

Si suppone di simulare una sessione di navigazione WWW che consiste di una sequenza di chiamate a pacchetto, ognuna delle quali rappresenta il *downloading* di un documento WWW. Durante una chiamata a pacchetto

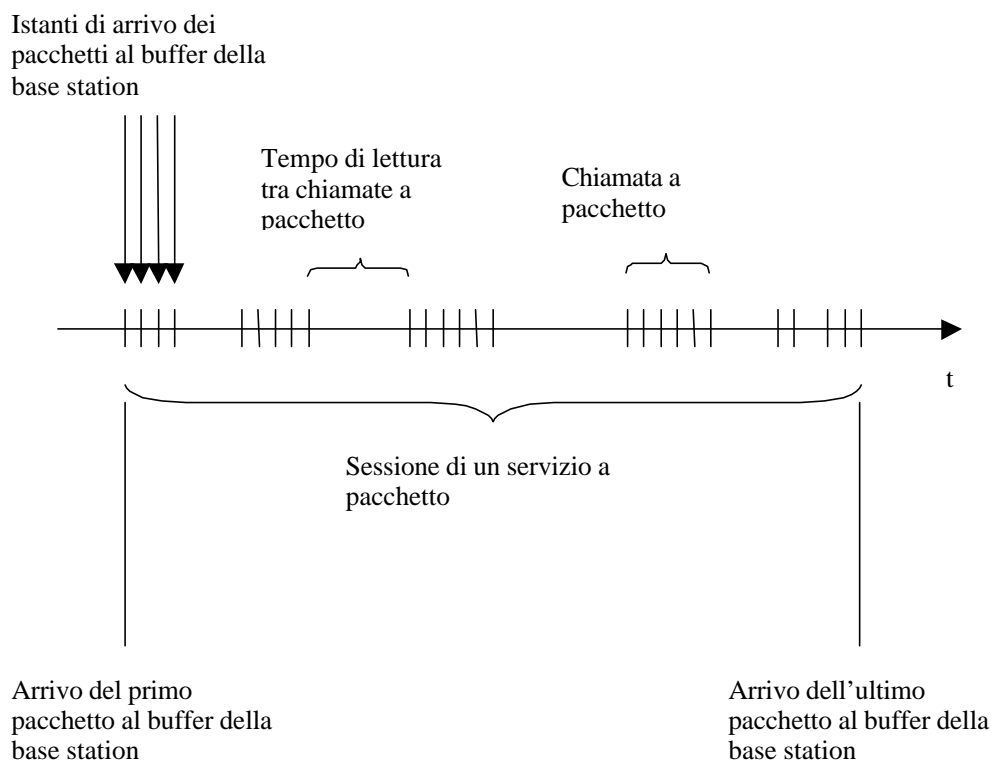


Figura 6.15: Tipico esempio di una sessione per servizi a pacchetto

possono essere generati diversi pacchetti, dando origine ad una sequenza di *burst*. Il tempo che intercorre tra una chiamata a pacchetto e quella successiva rappresenta il tempo di lettura necessario all'utente per l'analisi delle informazioni ricevute. Nella figura 6.15 sono riassunte graficamente le caratteristiche appena esposte.

I parametri di questo modello sono qui di seguito riassunti brevemente:

- **Arrivo delle sessioni:** processo di Poisson: il tempo di interarrivo delle sessioni è un parametro in input che determina il traffico offerto (può essere posto uguale alla durata media di una sessione).
- **Numero di chiamate a pacchetto per sessione:** è una variabile casuale con distribuzione geometrica con media 5.
- **Tempo di lettura:** variabile casuale geometrica con media 4 s.
- **Numero di pacchetti in una chiamata a pacchetto:** variabile casuale geometrica con media 25.
- **Tempo tra due pacchetti consecutivi:** variabile casuale geometrica con media definita dal particolare tipo di servizio.

- **Dimensione dei pacchetti:** variabile casuale di tipo Pareto con dimensione media dei pacchetti di 480 Byte.

La distribuzione di Pareto è definita dalla seguente densità di probabilità

$$f_x(x) = \frac{ak^a}{x^{a+1}} ; \quad x \geq k$$

e dalla distribuzione cumulativa

$$F_x(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^a ; \quad x \geq k$$

con valor medio

$$m = \frac{ka}{a-1} ; \quad a > 1$$

e varianza

$$s^2 = \frac{k^2 a}{(a-2)(a-1)^2} ; \quad a > 2$$

6.6.2.2 Modello FUNET

Questo modello è basato sulle statistiche raccolte dalla Finnish University and Research Network (FUNET) riguardo all'utilizzo della posta elettronica.

La funzione di distribuzione di probabilità per questo modello può essere approssimata utilizzando la distribuzione di Cauchy(0.8,1):

$$Cauchy(0.8,1) = f(x) = \frac{1}{p(1 + (x - 0.8)^2)} ; \quad 0 < x < M$$

dove M è la dimensione massima dei pacchetti, pari a 10 kbyte. La figura 6.16 mostra la rappresentazione grafica di tale distribuzione.

6.6.2.3 Modello Mobitex

Questo modello prevede sorgenti di traffico che generano pacchetti di dimensione variabile a seconda che si consideri la tratta in uplink o quella in downlink, secondo quanto qui riportato:

- Uplink: $30 + \text{rand}(-15,15)$ byte
- Downlink: $115 + \text{rand}(-57, 57)$ byte

6.6.3 Sorgenti utilizzate nelle simulazioni

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati ricavati utilizzando un tipo di sorgente più semplice rispetto a quelli precedentemente descritti, basato su un modello ON-OFF. Questa sorgente genera traffico soltanto nei periodi di tempo in cui lo stato è ON. La durata dei tempi di ON e di OFF è di tipo esponenziale negativa con media pari al valore letto in input da file. Il numero di pacchetti generati nello stato ON, anche questo letto da file, dipende dal loro tempo di interarrivo che è stato considerato costante. La lunghezza dei pacchetti, a seconda delle prove effettuate, è stata mantenuta fissa oppure scelta tra due valori con una certa probabilità. Per pacchetto si intende una PDU di livello 3, che in seguito ad un'opportuna segmentazione in blocchi, viene passata al livello MAC GPRS o UMTS per la trasmissione. Alcuni esempi sono riportati in tabella 6.3.

OFF [s]	ON [s]	Interarrivo [ms]	Dimensione
40	20	500	1-5 blocchi MAC
40	20	500	15-20 blocchi MAC
3	0.7	27	10 blocchi MAC

Tabella 6.3: Alcuni esempi di sorgenti ON-OFF utilizzate nelle simulazioni

Nel caso di GPRS, sono inoltre stati usati anche altri tipi di sorgenti per simulare l'arrivo di chiamate voce GSM. Sono stati considerati tempi di interarrivo e durate delle chiamate di tipo esponenziale negativo con media rispettivamente pari a $1/\lambda$ e $1/\mu$. I valori sono riportati nella seguente tabella.

$1/\lambda$ [s]	$1/\mu$ [Erl]
120	2, 3,, 8

Tabella 6.4: Esempio di sorgente GSM

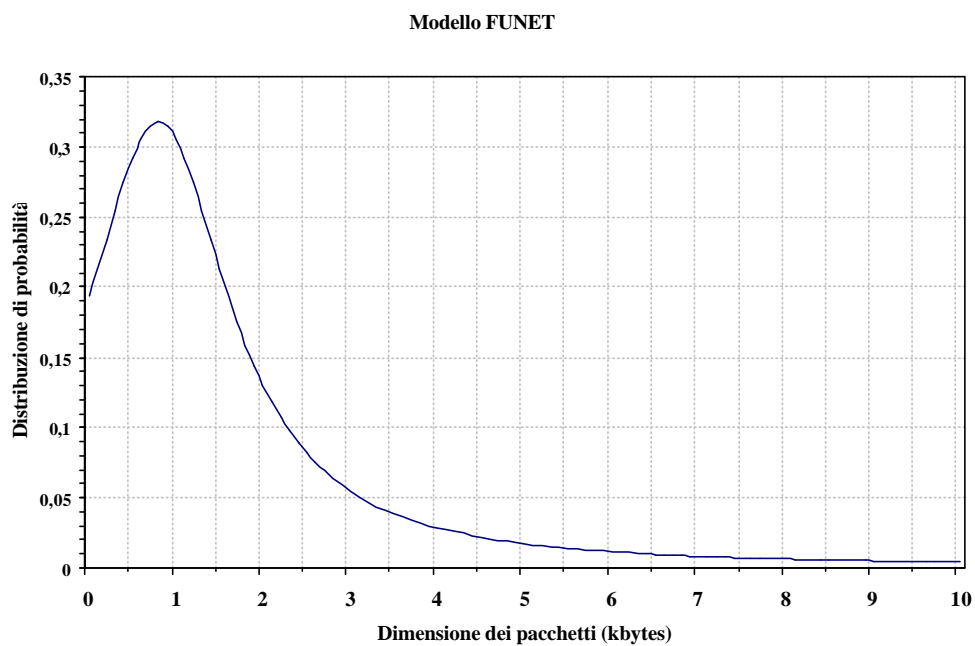


Figura 6.16: Densità di probabilità del modello FUNET

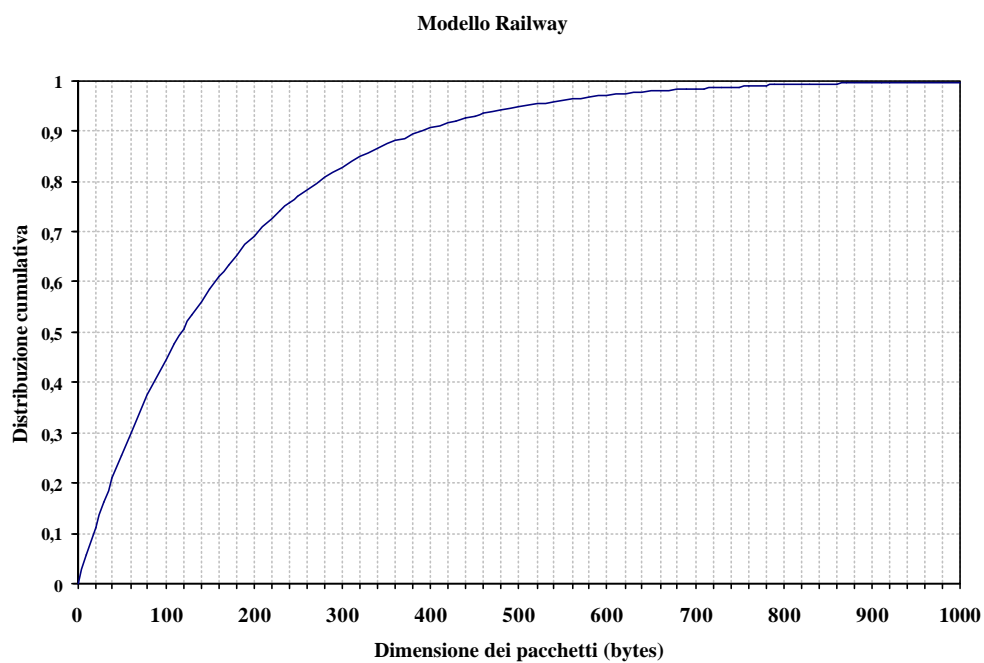


Figura 6.17: Distribuzione cumulativa per il modello Railway

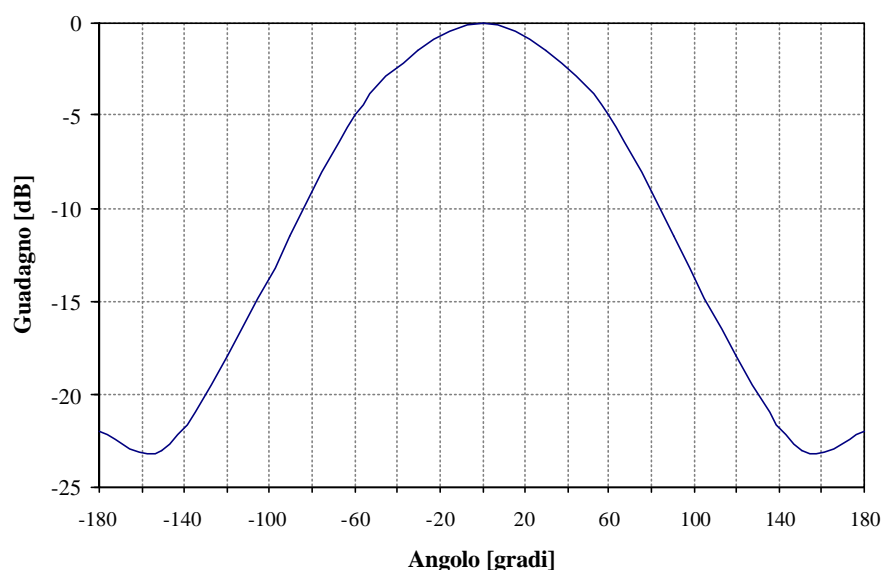


Figura 6.18: Tipico diagramma di irradiazione di un'antenna settoriale a 120°

6.6.3.1 Modello Railway

Questo modello è determinato da una funzione di distribuzione cumulativa che prevede pacchetti con lunghezza media di 170 byte ed una lunghezza massima M di 1000 byte; tale funzione è la seguente:

$$F(x) = P(x \leq M) = 1 - e^{-\frac{x}{170}}$$

La figura 6.17 mostra la rappresentazione grafica di tale distribuzione.

6.7 Caratteristiche di antenna

Le antenne utilizzate per i terminali mobili sono di tipo omnidirezionale con guadagno posto pari a 0 dB, ma facilmente modificabile in quanto esso rappresenta uno dei parametri d'ingresso della simulazione. Le antenne delle BTS possono essere di due tipi: omnidirezionali oppure direttive trisetoriali a 120°. Come per i terminali mobili il guadagno è un parametro di ingresso. In [4] per UMTS è consigliato l'utilizzo di antenne con guadagno di 13 dB e diagramma d'irradiazione indicato in figura 6.18.

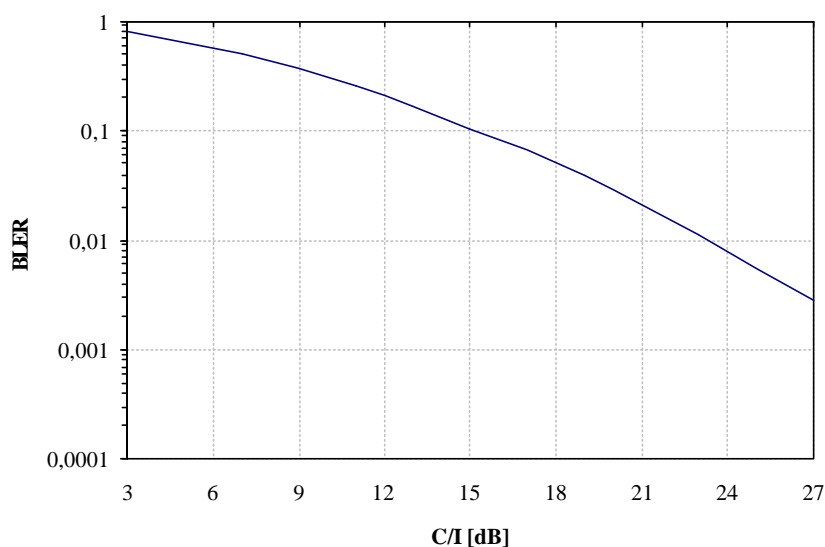


Figura 6.19: Esempio di curva di BLER in funzione del rapporto C/I per GPRS

E' possibile utilizzare qualunque tipo di diagramma di irradiazione, purché venga opportunamente descritto nel file utilizzato dal simulatore.

In questo modo, una volta stabilito il numero e posizionate le *base station*, è ancora possibile scegliere quale tipo di antenna utilizzare: ciò che si verifica sostituendo ad un'antenna omnidirezionale una di tipo trisetoriale, è che la capacità del sistema viene triplicata, senza la necessità di triplicare il numero di base station.

6.8 Determinazione dei blocchi errati

Per determinare la correttezza delle informazioni ricevute, un ricevitore deve effettuare il controllo d'errore sui blocchi tramite l'analisi dell'opportuno campo CRC all'interno del blocco. Se quest'ultimo risulta essere corretto, allora viene accettato come valido, altrimenti viene scartato e deve essere richiesta una nuova trasmissione. Il motivo per cui le informazioni trasmesse possono giungere corrotte al ricevitore dipende dal fatto che il canale non è ideale e quindi la probabilità di errore risulta essere diversa da zero. I rimedi a questo problema risiedono in un'adeguata scelta dei codici di canale che devono proteggere le informazioni ed in un opportuno livello di potenza del segnale trasmesso in modo da renderlo intellegibile in ricezione.

La qualità di una trasmissione viene solitamente misurata tramite la probabilità di errore sul bit (BER, *bit error rate*), ma risulta comodo utilizzare anche la probabilità di errore sul blocco (BLER, *block erasure rate*). Per determinare l'esattezza di blocco occorrerebbe quindi calcolare all'interno della simulazione il legame tra il rapporto C/I ed il BLER; tuttavia questo procedimento rallenterebbe alquanto i tempi di calcolo. Per questo motivo si è preferito utilizzare direttamente delle curve di BLER (fig. 6.19) in funzione del rapporto C/I o E_b/N_0 ricavate da precedenti simulazioni di link. E' quindi necessario calcolare semplicemente il valore di C/I risalendo istantaneamente, tramite le curve, alla probabilità di errore sul blocco; tramite l'estrazione di un'opportuna variabile casuale si stabilisce la correttezza del blocco in esame. Il vantaggio che deriva dall'utilizzo delle curve di BLER è che sostituendo semplicemente una curva con un'altra si è in grado di modificare molto velocemente numerosi parametri di sistema come il tipo di codifica utilizzato, la presenza o meno del *frequency hopping*, le velocità dei mobili, ecc.

6.9 La pila protocollare

La pila protocollare simulata consiste in un insieme di livelli (*layer*) che hanno come caratteristica comune il fatto di essere concatenati tra di loro tramite due puntatori e di possedere un certo numero di procedure che permettono la comunicazione tra i livelli adiacenti. Per ogni livello vi è un puntatore a quello superiore ed uno a quello inferiore. Tali puntatori risultano utili nel passaggio dei pacchetti da un livello della pila ad un altro, in modo tale che per ogni livello si conosca immediatamente qual è il destinatario del pacchetto che deve essere trasferito. Inoltre, per semplificare le procedure di comunicazione tra le due entità di pari livello, all'interno della pila del mobile e di quella della BTS, è stato aggiunto un puntatore al corrispondente peer layer. La rappresentazione grafica della pila è presente nella figura 6.20.

In questo modo lo *stack* è facilmente espandibile, permettendo eventuali aggiunte e rimozioni dei livelli che di volta in volta si riterrà opportuno inserire. All'interno di ogni livello verranno in seguito inserite tutte le strutture dati e le procedure caratteristiche di quel layer, le quali si differenzieranno a seconda che si tratti di una pila protocollare GPRS o UMTS, che si consideri il MAC o RLC, o una pila in uplink, downlink o dual.

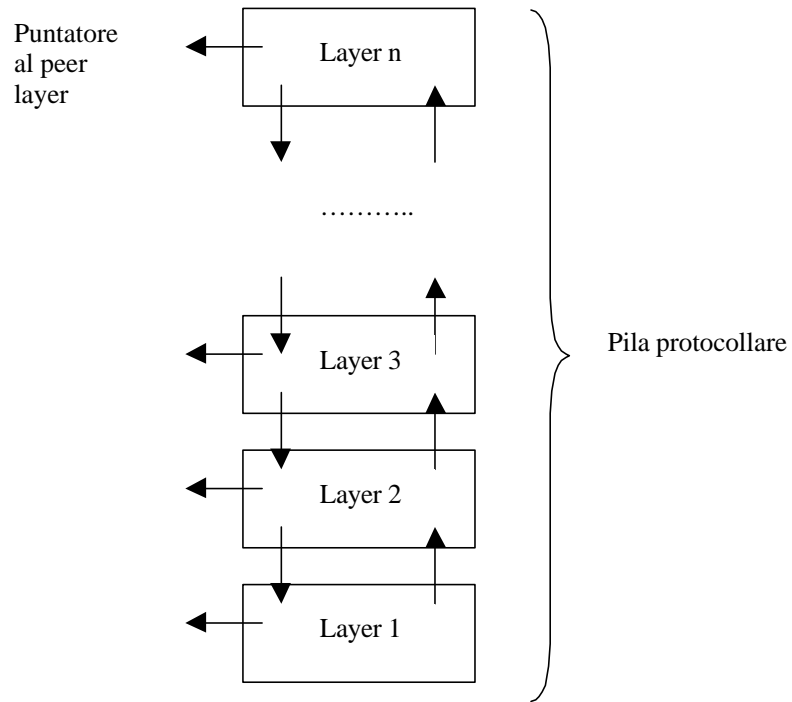


Figura 6.20: Modello di pila protocollare utilizzata nel simulatore

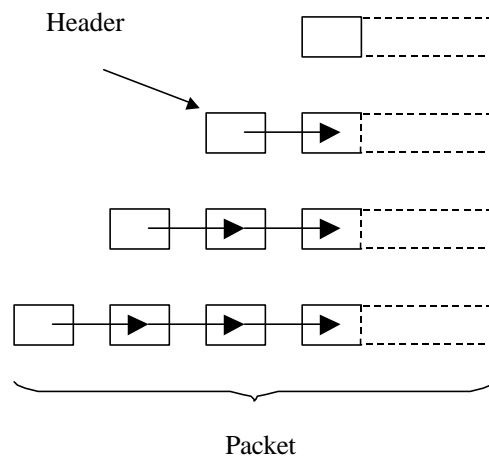


Figura 6.21: Struttura del pacchetto (lista di header)

6.10 Il pacchetto

Il pacchetto generico di un dato livello è definito all'interno del simulatore come una lista di intestazioni (header) in cui vengono memorizzate le informazioni peculiari di quel particolare livello come il tipo, la priorità, il numero di sequenza, il tempo in cui è stato creato, la lunghezza del campo dati, ecc.

Ogni volta che un determinato pacchetto passa da un livello ad un altro, dovrà essere manipolato da una particolare procedura caratteristica del layer. Le operazioni principali di tale procedura saranno quelle di aggiunta o rimozione dell'intestazione, segmentazione o riassettaggio, inserimento o estrazione dai buffer, lettura dei vari campi dell'header e di aggiornamento delle varie statistiche che si vogliono prendere in considerazione.

Il pacchetto non contiene uno spazio riservato per il campo dati, ma della sua presenza si tiene conto soltanto tramite una variabile nell'intestazione in cui viene memorizzata la sua lunghezza.