

Introduzione

Scopo principale della tesi

Lo scopo principale di questa tesi è quello di descrivere alcune tecniche di previsione della mobilità utente in reti senza fili, proposte nella letteratura delle telecomunicazioni e di offrirne un'esposizione chiara così da permettere dei futuri lavori di sviluppo o eventuali estensioni nel campo della ricerca; in particolare si è cercato di dare molta attenzione a tecniche che possano permettere al sistema di telecomunicazione di garantire sempre un'opportuna allocazione tale da mantenere un efficiente utilizzo delle risorse totali a disposizione e di preservare alcune specifiche caratteristiche legate a dei parametri di qualità del servizio offerto.

Struttura della tesi

Nella stesura della tesi si è cercato di organizzare i vari argomenti in maniera strutturata, in modo da dare la possibilità di seguire tutto il lavoro dall'inizio o saltare direttamente ai capitoli di maggiore interesse sperimentale, per il lettore già in possesso di conoscenze tecniche di base.

Nel capitolo 1 si descrivono alcuni tipi di reti senza fili in largo uso al giorno d'oggi e si effettuano dei richiami a dei sistemi usati fino a qualche decennio fa. Pertanto in tale capitolo si fa cenno alle caratteristiche delle reti wireless ricordando che nascono all'inizio degli anni novanta, ma solamente verso la fine del decennio vengono standardizzate dalle specifiche di comunicazione IEEE come la 802.11, ricordando che questa tecnologia ancora non permetteva l'intercompatibilità infatti arrivando fino alla seconda metà del 1999 per avere uno standard comune a tutti i produttori.

La tecnologia wireless, cioè "senza fili", è nata con lo scopo di rispondere a esigenze quali:

- Eliminazione del cablaggio, ovvero delle restrizioni sul movimento utente dovuto al collegamento dei terminali di rete tramite cavi;
- Realizzazione di reti temporanee e con topologia dinamica nel tempo;
- Facilità di aggiungere nuovi utenti;
- Riduzione dei costi delle infrastrutture.

Tali punti sono stati ampiamente soddisfatti dalla tecnologia wireless che nel contempo ha risposto alle sempre maggiori richieste di trasmissioni veloci per arrivare ad eguagliare la velocità di trasferimento offerta dalle reti cablate. Un altro dei principali vantaggi di una rete senza fili è offerto dalla mobilità utente, pertanto i protocolli di allocazione delle risorse di comunicazione devono tenere conto di questa importante peculiarità; i primi standard IEEE 802.11 ad esempio non prevedevano nei protocolli definiti funzioni di *roaming* (passaggio della gestione dei flussi dati utente da un'infrastruttura di rete ad un'altra in base alla posizione di questo), tra gli Access Point; un altro fattore molto importante di cui non si è ancora parlato è la velocità degli spostamenti degli utenti, infatti maggiore sarà tale velocità più tempestiva dovrà essere la risposta della rete per continuare a gestire uno specifico servizio di telecomunicazione richiesto.

Inoltre non va dimenticata la sicurezza della rete: proprio per la sua natura questo tipo di trasmissione è poco sicura e deve essere supportata da opportune strutture di codifiche dei dati e riconoscimento degli utenti.

Il capitolo 2 parla dei principali protocolli di gestione della comunicazione senza fili partendo dal presupposto che con l'avanzamento tecnologico e l'introduzione di applicazioni multimediali nelle comunicazioni, si ha una maggiore necessità di preservare i cosiddetti flussi di dati real-time ed i relativi vincoli su essi (ad esempio sui tempi di trasmissione dei pacchetti), che appunto necessitano di un adeguato controllo di ammissione di tali flussi in rete ed una opportuna gestione preventiva delle risorse che sfocia in vere e proprie "prenotazioni". Si introduce il concetto di QoS (*Quality of Service*) delineando una panoramica, che parte dalla descrizione di alcune caratteristiche necessarie alle trasmissioni nelle vecchie reti a circuito ed arriva alla definizione dei moderni e principali parametri QoS da preservare nelle trasmissioni delle reti a pacchetto cablate e wireless presentando un esempio relativo alla gestione della QoS per una rete ad interfaccia IEEE 802.11, dunque si parla dei vari vincoli sulle trasmissioni e si introducono le odierne reti che ne garantiscono il rispetto, ovvero le reti a servizi integrati IS, classificando gli stessi servizi che queste offrono; si discute dell'aspetto della mobilità nelle reti senza fili e si discutono le classi di servizio a questa legate. Molto importanza è data in tale capitolo al protocollo RSVP illustrando il suo funzionamento e descrivendolo come protocollo di segnalazione che può essere usato appunto per richiedere una prenotazione di risorse in una rete, quindi come meccanismo

per configurare i dispositivi di indirizzamento del traffico nei nodi della rete; nel descrivere l'RSVP viene introdotto il concetto di "sessione" e si classificano le prenotazioni in passive ed attive. Si specifica quindi che RSVP non si occupa di trasportare dati tra le applicazioni, ma solo i parametri necessari alla prenotazione delle risorse, che saranno analizzati in ogni nodo del percorso di istradamento da un opportuno processo e un altro aspetto molto importante analizzato del protocollo è che il processo di prenotazione delle risorse è gestito dal ricevente che effettua le richieste a livello rete, per ottenere la qualità desiderata (si parla di processo *receiver-driven*); inoltre si elencano e specificano i messaggi tipici che il protocollo utilizza. Si passa successivamente alla descrizione del protocollo MRSVP partendo dal presupposto che per effettuare la prenotazione delle risorse, al fine di fornire servizi real-time ad un utente mobile, sono necessarie alcune caratteristiche aggiuntive che non fornisce RSVP, pensato originariamente per gestire le prenotazioni in reti cablate; quindi MRSVP è presentato come estensione del protocollo precedente, che tiene conto della mobilità dei terminali grazie all'introduzione dei cosiddetti "proxy agents", componenti che gestiranno le prenotazioni in base al particolare contesto di mobilità, ed all'utilizzo di alcuni messaggi aggiuntivi (rispetto a quelli offerti in RSVP); così si analizzano nel dettaglio i meccanismi del protocollo, e si espongono le procedure di "proxy-discovery" per stabilire quali siano gli agenti che gestiscono le prenotazioni di specifici hosts e quelle di settaggio delle informazioni per le prenotazioni effettuando una distinzione tra flussi di prenotazione unicast e multicast, quindi si dettaglia la descrizione delle tecniche di gestione delle prenotazioni e si parla del metodo di incapsulamento dei pacchetti RSVP.

Nel capitolo 3 si affronta la tematica legata al movimento degli utenti, sottolineandone l'importanza nell'ambito delle telecomunicazioni odierne offerte dai sistemi wireless, dunque si parla della necessità di avere dei veri e propri modelli di mobilità, che caratterizzino il comportamento degli utenti in termini di moto, atti a simulare l'evoluzione delle situazioni reali di traffico presente in rete; si parla quindi di modelli di mobilità generici per arrivare poi a descriverne degli specifici adatti agli ambienti delle reti radio-mobili, considerando vari parametri caratteristici del tipo di trasmissione via etere e la strutturazione dell'area su cui il sistema di telecomunicazione offre il proprio servizio. Si espone una classificazione dei modelli come quelli che caratterizzano il moto di un singolo utente, definendo i modelli di mobilità individuale, e quelli che caratterizzano un movimento coordinato di più terminali, definendo i

modelli di mobilità di gruppo e si suddividono ulteriormente i modelli in base al grado di prevedibilità degli spostamenti utente.

Si descrivono quindi alcuni modelli di mobilità individuale e di gruppo ampiamente utilizzati nello studio e realizzazione dei sistemi di telecomunicazione senza fili; per tutti questi ci saranno delle specifiche caratteristiche sui particolari parametri (posizione, direzione di movimento, velocità di spostamento).

Dunque si parla del modello di Brown descrivendolo come modello casuale secondo cui la posizione successiva di un terminale è derivata da quella precedente più una posizione casuale; successivamente si descrivono alcuni modelli che estendono quello Browniano ed in particolare si presentano il modello Random Walk che descrive movimenti individuali di un terminale in una rete cellulare considerando secondo che un terminale mobile si muove dalla sua posizione attuale a quella successiva continuamente (cioè senza soste) in modo casuale, variando la sua velocità e direzione; si introduce inoltre una variante del Random Walk che effettua considerazioni probabilistiche sulla traiettoria di spostamento e si illustrano i modelli Random Waypoint e Random Direction che considerano soste e non più movimento continuo e cambiamenti casuali della direzione dello spostamento, quindi si presenta un modello di mobilità incrementale, detto di Gauss-Markov, nel quale la velocità e la direzione casuale attuale dei nodi differiscono dalle precedenti dopo ogni incremento di tempo. Si parla di modelli che considerano informazioni geografiche associabili a città o strade, come i modelli Freeway, City Section ed in particolare si descrive in dettaglio quello Manhattan e si effettuano dei cenni ai modelli Trace Based e Fluid Flow. Si passa poi ad analizzare alcuni caratteristici modelli di mobilità di gruppo ed in particolare si parla di quello Exponential Correlated Random, che introduce l'utilizzo di una funzione di moto per creare i movimenti dei terminali, si descrive il modello Pursue che rappresenta gli utenti mobili che si muovono per raggiungere un determinato posto, uniformandosi al movimento di un nodo eletto "leader", si parla del modello Column che rappresenta un insieme di nodi che si muovono intorno ad una certa linea, detta colonna, che si muove in avanti, si descrive quello Nomadic Community secondo cui in ogni gruppo, ciascun terminale mantiene degli spazi in cui muoversi in modo casuale, quindi si presenta il modello Reference Point Group secondo cui i movimenti del gruppo sono basati sul percorso di un nodo leader del gruppo, similmente a quanto avviene per il modello Pursue, qui inoltre il leader è usato per calcolare il movimento del gruppo attraverso un

vettore che descrive il movimento globale; si accenna infine ai modelli In-Place ed Overlap.

Il capitolo 4 si può dire sia quello più importante della tesi poiché si occupa proprio delle tecniche di predizione degli spostamenti utente, in maniera tale da poter realizzare nelle locazioni previste delle prenotazioni di risorse così da offrire un efficiente utilizzo delle risorse trasmissive totali del sistema e di preservare degli specifici livelli di QoS. Si introduce dunque l'importanza di avere tecniche simili in sistemi come quelli cellulari o nelle reti ad-hoc, riportando alcuni esempi di prestazioni ottenibili con e senza previsione mobilità per effettuare la prenotazione delle risorse e confrontandoli, quindi si discute su quanto possano incidere, sulla gestione dei servizi per gli utenti le tecniche di previsione in termini di performance e si illustrano alcuni grafici che caratterizzano l'andamento di alcune grandezze caratteristiche (come l'utilizzo medio della banda a disposizione ed il numero di chiamate terminate forzatamente) in funzione della velocità di spostamento degli utenti, che indica il grado di mobilità, e si pone un confronto di questi risultati tra classi di servizio MIP ed MDP.

Dunque prima di passare a descrivere le tecniche di previsione proposte in letteratura si parla di localizzazione delle posizioni utente in una rete senza fili, infatti lo scopo della previsione è quello di stabilire la locazione futura dell'utente all'interno dell'area di copertura; quindi una volta introdotto il concetto di localizzazione si descrive una tecnica che per riconoscere la posizione degli utenti fa uso dell'algoritmo matematico conosciuto come "filtraggio di Kalman", pertanto si effettua una descrizione approfondita di tale algoritmo che consiste in una tecnica capace di effettuare delle stime precise quando si hanno delle componenti di errore dovute a variabili esogene (come errori di misura dovuti alla strumentazione o a dei disturbi presenti nell'ambiente considerato), quindi se ne descrive l'impiego nella tecnica di localizzazione suddetta che sfrutterà i valori misurati di potenza del segnale ricevuto da un nodo utente combinandoli ad un algoritmo di triangolazione per risalire alle coordinate del terminale considerato.

Si passa quindi a descrivere vari meccanismi di previsione della mobilità proposti recentemente suddividendoli in base al tipo di informazioni trattate ed agli approcci usati per realizzare le previsioni.

Si analizzano le tecniche che effettuano le previsioni di mobilità, in una rete cellulare, basandosi su informazioni caratteristiche dell'ambiente (come la conformazione geografica) e sul comportamento abitudinario degli utenti; quindi si parla di una tecnica

RTB che utilizza delle mappe di topologia stradale per la gestione degli hand-off e considera che il moto dei terminali utente sia lungo queste strade (che attraversano le varie celle nell'area coperta), che verranno suddivise in segmenti tenendo conto di varie caratteristiche reali (strade a doppio senso o a senso unico, limiti di velocità, ecc.) ed assumendo che ad esempio gli utenti si muovano su delle autovetture; si introduce una tecnica di previsione innovativa che effettua le previsioni degli spostamenti fra le celle di una sistema di telefonia cellulare basandosi sullo studio delle abitudini degli utenti per definire delle relazioni fra le attività a questi legate e le locazioni geografiche in cui possono occorrere, quindi si classificano tali attività in attività di locazione legate ad una posizione specifica dell'area di rete, ed attività di movimento che riportano i percorsi fra due luoghi associati ad attività di locazione; con questa tecnica dunque si utilizzano delle informazioni sul sistema, come ad esempio le mappe di copertura radio RCM e si osservano i dati associati agli utenti durante le loro sessioni di comunicazione, in combinazione a delle specifiche ipotesi, costruendo dei veri e propri profili di attività in base ai quali effettuare il riconoscimento di una specifica posizione e dunque la previsione di uno spostamento futuro. Successivamente si passa alla trattazione di tecniche di previsione studiate adatte per ambienti in cui le condizioni della topologia sono fortemente condizionate dal dinamismo causato da particolari fattori (variazioni meteorologiche, esigenze specifiche, ecc.) o a cambiamenti improvvisi del modo di muoversi dei nodi e si necessita quindi di una previsione adattiva che tenga conto di simili variazioni; si esamina tra queste una tecnica utilizzata in reti ad-hoc in cui i nodi utilizzano antenne direzionali, utilizzata tipicamente per applicazioni di emergenza o di tipo militare, quindi oltre ad un'alta variabilità delle condizioni di trasmissione del sistema è molto importante che trasmettitore e ricevitore per comunicare puntino con precisione la propria antenna l'uno in direzione dell'altro, pertanto tale metodo effettua il calcolo della futura posizione in base a delle specifiche condizioni andando a considerare diversi modelli di mobilità e quindi specifici parametri che caratterizzano il tipo di moto. Fra queste tecniche che danno un certo rilievo all'aspetto adattativo se ne descrive una utilizzata sempre in ambito di reti ad-hoc in combinazione ad un protocollo MADTCP, che partendo da uno schema matematico di predittore introduce un automa di learning che permette di calcolare un parametro che migliora la bontà di tale predittore, l'automa dunque ha il compito di decidere il valore di questo parametro e le sue decisioni si evolvono in base ai dettagli istantanei sul modello di movimento, sui range di velocità e sulla frequenza di campionamento dei dati; in relazione a tale

algoritmo si effettuano dunque degli opportuni richiami sulla teoria degli automi di apprendimento.

Successivamente si espongono delle tecniche che effettuano delle considerazioni sulla struttura geografica dell'area di copertura o sulla topologia dei terminali connessi, andando a realizzare delle suddivisioni logiche su tali dati. Allora si analizza nel dettaglio una tecnica che suddivide gerarchicamente il territorio su cui è offerto un servizio di comunicazione tipico di un sistema cellulare di tipo GPRS, in maniera da considerare Aree di Locazione (LA) contenenti molte celle, quindi suddividere queste in Zone che ne considerano un numero ristretto; le previsioni quindi si effettuano in base alle celle specifiche associate ad una Zona e la previsione può essere fatta anche per più di una cella, aumentando il livello di dettaglio; per avere in uscita la previsione si effettua dunque una serie di assunzioni sui tempi di residenza in una cella, sulla funzione che descrive la variazione della direzione di un terminale utente nel tempo e sulle velocità di spostamento, si costruisce una matrice che dice quali celle sono state visitate dal terminale in uno specifico intervallo di tempo, si analizzano tutti movimenti passati (come percorsi, ovvero insiemi ordinati cronologicamente delle celle visitate) di quel terminale conservati in un database e si considera nella previsione anche i percorsi associati a specifiche celle (anche questi salvati in un opportuno database), infine in base alle varie considerazioni, ai parametri istantanei di moto ed al livello di dettaglio desiderato si calcolano per ogni cella dei valori di probabilità su cui poggiare le previsioni. Un'altra tecnica di questo genere che viene analizzata è solitamente utilizzata in reti ad-hoc che necessitano di un uso efficiente del protocollo DSR, in questo caso si tenta di prevedere la "rottura" di specifici collegamenti fra i terminali, cioè la futura struttura della topologia, e qui si effettuano delle suddivisioni sui nodi appartenenti a dei cluster distinti, tali suddivisioni sono fatte in base alla probabilità di cambiamento cluster dei nodi (dovuti proprio alla continua mobilità), realizzando in base a queste degli strati, quindi si crea per ogni nodo uno schema di riferimento ai cluster considerando le regioni divise in settori.

Si passa poi ad illustrare alcune tecniche innovative che effettuano le previsioni costruendo dei sistemi di calcolo definiti "reti neurali"; si presenta pertanto la teoria di calcolo associata proprio alle reti neurali presentandole come sistemi di calcolo che simulano l'intelligenza umana, o meglio una facoltà di apprendimento in base alle osservazioni così da inferire delle vere e proprie conoscenze, dunque si presenta la struttura tipica di una rete neurale, vista come un insieme di nodi collegati, associabili

proprio ai neuroni del sistema nervoso umano; si descrive dunque l'approccio tipicamente usato che consiste nella raccolta di un insieme di dati (raccolti ad esempio da osservazioni), nel settaggio dei nodi in ingresso, di quelli intermedi detti "nascosti" e di quelli che forniscono i valori di uscita, dunque per i nodi-neuroni si definiscono delle funzioni di attivazioni, che diano il via alle funzioni di valutazione; quindi una volta stabilita la struttura della rete neurale si addestra questa con i dati precedentemente rilevati, e dopo questa fase si passano dei dati in base a cui si vuole stabilire un set di dati di output, dunque dopo la fase di addestramento la rete saprà settare in base ai dati in input i collegamenti ed i relativi pesi tra i nodi e quindi produrre i valori in output; si citano poi i principali tipi di rete neurale, ovvero di feed-back (con utilizzo di memoria) e di feed-forward e si parla degli algoritmi di addestramento, esplicando in particolare il funzionamento del più usato, che è quello di Backpropagation.

Dopo l'introduzione alle reti neurali, come già detto, si presentano alcune tecniche che ne fanno uso per realizzare le previsioni degli spostamenti utente; si descrive una prima tecnica utilizzata nell'ambito di sistemi cellulari, con struttura esagonale delle celle, che non predice una specifica cella futura, ma da in uscita delle probabilità di trasferimento relative a ciascuna delle 6 celle adiacenti quella attuale in cui risiede l'utente, per fare ciò dunque si considera un modello di movimento incrementale per i terminali utente, considerando variazioni infinitesime della velocità e direzione di moto, in maniera da simulare la casualità tipica delle situazioni reali di questi ambiti, si descrive quindi la struttura della rete neurale e si illustra come calcolare in base alle probabilità calcolate la quantità di risorse nelle celle adiacenti. Viene presentata un'altra tecnica che effettua le previsioni con reti neurali, adatta per essere impiegata in reti cellulari di tipo 3G cercando di preservare le trasmissioni in tempo reale e quindi degli specifici parametri di QoS, in particolare la frequenza di caduta di chiamate di hand-off, e considerando delle celle di dimensioni molto piccole; la peculiarità di tale tecnica sta nel effettuare una stratificazione dell'area delle celle in maniera tale da effettuare la previsione al momento giusto, evitando eventuali previsioni "affrettate" e conseguenti sprechi di risorse, si descrive anche qui un ipotetica struttura della rete, specificando la composizione dei vettori di ingresso e di uscita. Si parla poi di una tecnica basata sempre su reti neurali, ma che effettua delle considerazioni probabilistiche secondo un modello Baesiano sui dati di training sempre in ambito di reti cellulari, con lo scopo di predire opportunamente e con precisione quando e dove prenotare le risorse, realizzando un efficace sistema di allocazione e nel contempo riducendo il numero di

aggiornamenti che potrebbero generare sovraccarichi del traffico dati, ed ottenendo livelli desiderabili di QoS; si costruisce dunque una conoscenza modellata tramite “distribuzioni probabilistiche a priori” sui pesi dei collegamenti della rete neurale tramite leggi bayesiane che sostanzialmente usano le probabilità per misurare il livello d’incertezza nell’apprendimento delle relazioni, quindi il risultato di questo tipo di apprendimento produce una distribuzione di probabilità che quantifica la bontà delle previsioni in termini di precisione, tali distribuzioni “a priori” aiutano ad inferire le relazioni corrette; quindi, dopo il training della rete neurale, le relazioni inferite sono revisionate e “catturate” in una distribuzione “a posteriori” sui pesi dei di rete, così da migliorare la precisione delle previsioni. Successivamente si analizza un lavoro che pone a confronto l’utilizzo di vari algoritmi predittivi basati su reti neurali con alcune metodologie standard, in particolare fra queste una dipende dal tempo, unico criterio per in base a cui effettuare le previsioni, mentre l’altra è strettamente dipendente dalla sola posizione; pertanto si introducono le reti neurali in maniera da combinare entrambe le informazioni per realizzare una previsione più precisa.

Infine dopo aver illustrato l’impiego delle reti neurali per la previsione di mobilità si presentano due tecniche basate su approcci probabilistici; si parla di una tecnica utilizzabile ancora in reti cellulari basata sul modello matematico dei processi di rinnovo di Markov, che tenga conto delle durate delle transizioni da una cella ad un’altra per effettuare le previsioni; si illustra quindi brevemente la teoria matematica relativa a tali processi matematici; si calcola così la probabilità che subito dopo la transizione in una cella i se ne abbia una verso quella j in un lasso di tempo minore o uguale ad un certo intervallo t , pertanto con il modello markoviano lo stato (cioè la cella verso cui l’utente si sposterà) successivo dipende da quello precedente ed il tempo di permanenza in uno stato dipende sia dalla transizione nello stato corrente che da quella nel successivo. L’ultima tecnica discussa infine può essere adottata sia in reti cellulari che in reti ad-hoc ed una peculiarità molto importante di essa è che sono gli stessi terminali utente ad effettuare le previsioni, piuttosto che delle infrastrutture, si descrive dunque come è strutturata l’area di copertura e si effettua una suddivisione delle locazioni così da considerare le locazioni in cui generalmente un utente staziona per più tempo delle locazioni “residenti” si presentano dunque le strutture dati su cui effettuano le previsioni e si presenta prima un algoritmo detto Baseline e successivamente una sua variante Greedy; secondo l’approccio Baseline si effettua prima il riconoscimento del pattern attuale, o meglio si confronta quest’ultimo con i vari pattern salvati precedentemente e

si costruisce un insieme di riferimento con tutti i pattern somiglianti (in termini di sequenza di locazioni residenti attraversate) assegnando a ciascuno di essi un punteggio quindi si passa dopo alcune assunzioni a calcolare secondo la legge di Bayes la probabilità condizionata, da tali informazioni raccolte, di visitare una specifica cella futura; l'algoritmo Greedy in maniera "golosa" quando si hanno delle informazioni limitate per il Baseline, ovvero quando non si può stabilire quale dei pattern salvati in precedenza sia associabile al pattern attuale (perché della stessa lunghezza e non con almeno una locazione in più) così da prevedere le celle successive, considera dei pattern verosimili più lunghi (di almeno una locazione, da valutare proprio come plausibile successiva) che sebbene non si assoceranno esattamente con il corrente (in quanto più lunghi) avranno lo stesso punteggio poiché lo contengono, così da ottenere previsioni più precise.

Il capitolo 5 infine illustra i risultati ottenuti in letteratura delle simulazioni delle varie tecniche di previsione presentate in base a vari parametri caratteristici delle prestazioni di rete, ed inoltre si illustrano le simulazioni di alcune delle tecniche basate su reti neurali, realizzate con un tool scritto in C++ atto proprio a rappresentare reti neurali, descrivendo alcuni dettagli dell'implementazione software necessaria per le simulazioni stesse.

Si analizzano pertanto le prestazioni ottenute simulando la tecnica di localizzazione SPKF che utilizza l'algoritmo di Kalman, in un'area ristretta e considerando un numero predefinito di sensori, quindi il movimento di uno specifico nodo sensore è monitorato e si presenta su un grafico l'errore quadratico medio MSE, della stima della locazione rispetto ad una traiettoria reale, in funzione del numero di valori di potenza misurati in input, dunque si presenta un confronto dell'accuratezza offerta fra le stime effettuate con la tecnica SPKF, una tecnica WGP e la traiettoria effettiva.

Si descrivono gli esiti delle simulazioni della tecnica che effettua le previsioni in base ai profili di attività tipici degli utenti, quindi si descrive brevemente l'ambiente di simulazione e le informazioni passate all'algoritmo, implementato in C++, quindi si analizzano gli esiti di tale simulazione su un grafico e si confronta su un grafico tridimensionale la differenza fra la traiettoria prevista e la traiettoria effettiva degli spostamenti di un terminale, quindi su un altro grafico si analizza l'errore di previsione (in Km) in funzione del tempo. Si simula anche la tecnica RTB definendo la struttura dell'area di copertura, e si effettuano delle assunzioni sulla geometria delle celle, sulle caratteristiche della topologia, sulle funzioni di arrivo nuove chiamate, e sulle richieste

in termini di banda, dunque si confrontano le prestazioni della tecnica RTB, in termini di un grafico P_{NC} - P_{FT} con quelle di altre tecniche ed in particolare una tecnica reale, che cioè offre previsioni precise al 100% (errore nullo).

Si espongono poi gli esiti delle simulazioni effettuate per le tecniche altamente adattative, ed in particolare in merito al lavoro proposto per reti ad-hoc che fanno uso di antenne direzionali si è utilizzato il simulatore OPNET considerando che ogni nodo in rete abbia installato il modulo di previsione ed un'antenna direzionale, quindi si discutono gli esiti della simulazione; si illustra poi la simulazione dell'algoritmo di predizione che utilizza l'automa di learning per settare il parametro adattativo al tipo di movimento ed alle condizioni specifiche della rete, questa volta gli autori hanno utilizzato Matlab sia per l'implementazione del predittore che per quella dell'automa, una volta settati i parametri (quali velocità minima e massima, tempo di durata simulazione, ecc.) si danno in ingresso all'algoritmo di previsione le tracce di mobilità generate con il tool Mobisim, dunque si confrontano le traiettorie del caso reale, quelle previste con il predittore semplice e quelle previste con quello che adattativo, per vari modelli di mobilità e si evince infine che lo scostamento delle traiettorie previste, con la tecnica che utilizza l'automa di learning, rispetto alle traiettorie effettive è molto minore (errore di predizione più basso) rispetto a quello con le traiettorie previste dal predittore semplice.

Sono illustrate poi le simulazioni fatte per le tecniche basate sulle suddivisioni logiche: la tecnica che suddivide l'area di rete in Zone è stata simulata dagli autori facendo alcune assunzioni sulle grandezze caratteristiche trattate dal relativo algoritmo, quindi si è utilizzata una mappa geografica reale che considera la confluenza di vari flussi di traffico (quindi un alta mobilità degli utenti) per estrapolare il PD, e si sono fatte delle assunzioni anche sui costi e sui ritardi dovuti al paging dei terminali utente, per cui si illustrano gli andamenti delle probabilità di blocco nuove chiamate e blocco chiamate esistenti in hand-off in funzione del tasso di arrivi delle nuove chiamate considerando previsioni per una o più celle (fino ad 8); la tecnica che prevede la rottura dei link in reti ad-hoc che implementano il protocollo DSR è stata simulata dagli autori con il tool Glomosim effettuando alcune considerazioni sui parametri fisici caratterizzanti il movimento dei nodi e scegliendo per questi il modello di mobilità random waypoint, quindi si illustrano i risultati ottenuti in termini di misura del parametro PDR e nel caso di utilizzo di DSR con tale tecnica di previsione tali prestazioni aumentano anche in

maniera notevole rispetto al caso di utilizzo del DSR semplice (ovvero senza alcuna previsione).

Si analizzano anche alcune simulazioni effettuate per le tecniche basate su reti neurali descritte; per la tecnica che calcola le probabilità di trasferimento per ciascuna delle 6 celle adiacenti la corrente si effettuano delle considerazioni sull'area di copertura, sulla velocità e sulla direzione dei terminali, sulla geometria delle celle, sulla frequenza di arrivo di nuovi utenti, sulla quantità di risorse trasmissive e sul tempo medio di durata di una chiamata, e quindi si presentano le performance in termini di frequenza blocco nuove chiamate, frequenza blocco chiamate di hand-off e di efficienza di riservazione risorse, notando ottimi risultati. Per la tecnica che suddivide le celle in 2 strati per effettuare l'eventuale previsioni solo quando si è nello strato più distante dal centro della cella stessa si illustra il confronto fra traiettorie reali e traiettorie previste, notando scostamenti (errori di previsione) poco significativi, ed inoltre si confronta il livello di accuratezza di previsione, migliore, offerto rispetto ad altre tecniche. Per simulare la tecnica basata sull'addestramento bayesiano invece si è utilizzato Matlab, quindi una volta settati vari parametri, definite le varie strutture di memorizzazione e date in ingresso anche le tracce di mobilità, costruite osservando l'utilizzo di alcuni telefoni cellulari, si sono definiti i tipi di distribuzioni probabilistiche sui parametri e settata la struttura della rete neurale (in particolare gli strati nascosti) ed infine si è lanciata la simulazione notando un aumento delle performance, talvolta anche abbastanza significativo, rispetto all'esito ottenuto impiegando altri tipi di reti neurali che utilizzano gli addestramenti convenzionali. Testando invece la tecnica che confronta l'impiego delle reti neurali, rispetto a metodologie convenzionali, per le previsioni si è evinto che nell'arco di più tentativi, ovvero di più previsioni il livello di precisione aumenta.

Si sono poi simulate le metodologie di previsione basate su approcci probabilistici; la tecnica basata sui processi di rinnovo di Markov è stata testata considerando una porzione di rete di 7 celle, quindi definiti alcuni parametri e la distribuzione del tempo di soggiorno associato ad una transizione si è scelta una specifica cella di riferimento, da vedere come cella attuale e si sono osservati gli andamenti temporali delle probabilità di transizione verso le celle adiacenti, infine si sono effettuate delle considerazioni, sulle distribuzioni dei tempi di attesa in ogni cella prima di una transizione, in base alle quali il sistema dovrebbe scegliere il momento opportuno in cui prenotare le risorse in una cella adiacente. Le tecniche host-centriche, utilizzabili sia per reti ad-hoc che per reti cellulari, secondo cui le previsioni sono effettuate dagli stessi

terminali sono testate facendo le opportune assunzioni e settaggi sulle grandezze caratteristiche, quindi si effettuano alcune considerazioni sul grado di casualità o di regolarità dei percorsi degli utenti che incidono sul calcolo della probabilità di avere una specifica locazione come prossima nel percorso attuale e si analizzano gli andamenti temporali di tali probabilità proprio al variare del grado di casualità e di quello di regolarità del movimento.

Infine per dare un taglio sperimentale al lavoro di tesi, originariamente pensato per sviluppare argomenti di ricerca, si è studiato e brevemente descritta la struttura di un simulatore di reti neurali e lo si è impiegato per simulare proprio due delle tecniche a reti neurali illustrate, cioè quella del calcolo delle probabilità di trasferimento verso le 6 celle adiacenti e quella della suddivisione delle celle in 2 strati, utilizzando delle ipotesi semplificative ed infine si sono tracciati e confrontati tali tecniche con dei grafici rappresentanti l'andamento dell'errore medio di previsione in funzione del variare del numero di strati nascosti e del variare del relativo numero di neuroni per ciascuno di questi ultimi.