

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 – Modelli di mobilità noti in letteratura	14
1.1 Introduzione.....	14
1.2 Modelli Casuali.....	15
1.2.1 Random Waypoint Mobility Model.....	15
1.2.2 Random Walk Mobility Model.....	17
1.2.3 Random Direction Mobility Model.....	19
1.2.4 Una versione probabilistica del Random Walk Mobility Model.....	21
1.2.5 Limitazioni dei modelli casuali.....	22
1.3 Modelli di mobilità con dipendenza temporale.....	23
1.3.1 Gauss-Markov Mobility Model.....	23
1.3.2 Smooth Random Mobility Model.....	25
1.3.3 Boundless Simulation Area Mobility Model.....	26
1.3.4 Exponential Correlated Random Mobility Model.....	28
1.3.5 Una versione probabilistica del Random Waypoint Mobility Model.....	28
1.4 Modelli di mobilità con dipendenza spaziale.....	29
1.4.1 Reference Point Group Mobility Model.....	29
1.4.2 Column Mobility Model.....	33
1.4.3 Pursue Mobility Model.....	35
1.4.4 Nomadic Community Mobility Model.....	36
1.5 Modelli di mobility con restrizioni geografiche.....	37
1.5.1 Pathway Mobility Model.....	37
1.5.2 Freeway Mobility Model.....	38
1.5.3 Manhattan Mobility Model.....	39
1.5.4 Obstacle Mobility Model.....	41

Capitolo 2 – Modelli di Mobilità per reti ad hoc (MANET)	43
2.1 Introduzione.....	43
2.2 Modelli di Mobilità.....	44
2.2.1 Networked Game Mobility Model.....	44
2.2.2 Modello di mobilità ad ostacoli basato su grafi di Voronoi.....	49
2.2.3 Modello di mobilità ad ostacoli basato sulla Social Network Theory.....	54
2.2.4 Generalized Random Mobility Model.....	60
Capitolo 3 – Modelli di Mobilità per rete cellulare	73
3.1 Introduzione.....	73
3.2 Modelli di Mobilità.....	74
3.2.1 Modello di Mobilità degli utenti basato sul Random Direction Model.....	74
3.2.2 Modello di Mobilità veicolare basato sul Random Direction Model.....	79
3.2.3 Modello di Mobilità per terminali cellulari veicolari.....	83
3.2.4 Modello di Mobilità basato su rete di accodamento.....	86
3.2.5 Markovian Waypoint Mobility Model.....	94
Capitolo 4 – Modelli di Mobilità per reti wireless e cenni di Mobility Prediction	104
4.1 Modello di Mobilità per rete integrata cellulare/WLAN.....	104
4.2 Modello di Mobilità per rete multi-hop.....	108
4.3 Modello di Mobilità per reti wireless.....	112
4.4 Hotspots Mobility Model.....	114
4.5 Route Mobility Model.....	115
4.6 Modello di Mobility per reti 2G e 3G.....	117
4.7 Cenni di Mobility Prediction.....	118

Capitolo 5 – Applicazione dei modelli di mobilità	128
5.1 Introduzione.....	128
5.2 Valutazione del protocollo AODV comparando l'uso del Random Waypoint e del Gauss-Markov model.....	131
5.3 Analisi dell'influenza dei modelli di mobilità sui flussi TCP nelle MANET con il protocollo AODV.....	135
5.4 Confronto delle performance di rete utilizzando il Random Waypoint e l'Obstacle Mobility Model.....	142
5.5 Influenza dei modelli di mobilità su vari protocolli di routing nelle reti MANET.....	148
Conclusioni	156
Bibliografia	169

Introduzione

Le reti wireless sono ormai entrate a far parte della vita quotidiana di ognuno di noi. Che si tratti di MANET o di reti cellulari, i servizi mobili di telecomunicazione permettono di comunicare, scambiare dati e informazioni in qualsiasi luogo ed in qualunque momento. La mobilità degli utenti, che da un lato rappresenta una grande conquista per quanto riguarda la libertà degli utenti da device fissi e la flessibilità della rete, dall'altro rappresenta il principale problema di queste reti. Le reti di comunicazione radio sono infatti fortemente influenzate dai diversi tipi di mobilità e la comprensione di ogni schema di mobilità osservato può aiutare a migliorare il comportamento della rete. Per misurare uno schema di mobilità però è necessario tracciare un vasto numero di nodi per un lungo periodo di tempo. In una rete MANET lo spostamento dei nodi provoca la variazione continua della topologia della rete. Questa dinamicità provoca frequentemente la possibilità che i collegamenti tra i nodi si interrompano. In una rete cellulare, lo studio dei movimenti dei nodi è fondamentale per utilizzare strategie efficienti di prenotazione delle risorse. In questa tesi sono stati studiati vari modelli di mobilità, la loro implementazione ed i loro utilizzi. Un modello di mobilità è un modello che serve a descrivere il comportamento della mobilità (o schema della mobilità che dir si voglia) di un singolo individuo o di un gruppo di individui.

Le componenti principali che costituiscono un modello di questo tipo sono:

- *Popolazione*: la popolazione è composta dai nodi mobili che viaggiano all'interno dell'area di simulazione. Essa può essere raggruppata per classi, ad esempio studenti, lavoratori, etc. ognuna delle quali basata su una particolare tipologia di movimento.
- *Area Geografica*: ovvero l'area modellata per la simulazione. Può essere suddivisa in regioni o aree con diverse caratteristiche riguardanti la mobilità. L'area più semplice è composta da un rettangolo bidimensionale completamente vuoto, se si escludono i nodi che viaggiano al suo interno. Al giorno d'oggi si è arrivati ad utilizzare, come area di simulazione da cui estrarre tracce, videogiochi tridimensionali (come Quake II), in cui i nodi

possono muoversi, ostacolati da oggetti vari, e dove hanno anche la possibilità di saltare in verticale come se fossero nel mondo reale.

- *Periodo di tempo*: il periodo di tempo è suddiviso in intervalli temporali che vengono utilizzati per aggiornare la posizione e gli altri parametri degli utenti.

I modelli di mobilità in generale sono stati suddivisi in *Modelli basati su tracce* e *Modelli sintetici*. I primi vengono progettati basandosi su tracce estratte dall'osservazione del mondo reale (o da fonti equivalenti). Gli altri, che sono i modelli più diffusi, sono provvisti di un area di simulazione in cui si cerca di rappresentare in modo realistico lo schema di mobilità scelto.

Riportiamo qui un rapido excursus degli schemi di mobilità più comuni, osservabili nella vita reale:

- **Pedoni**: Il più antico e comune modo di muoversi è camminare. I pedoni sono più lenti rispetto agli altri utenti mobili moderni. Nonostante essi si muovano lentamente, il loro movimento causa molti problemi nelle reti cellulari in quanto spesso essi attraversano luoghi dove ostacoli vari ostruiscono il segnale. Capita spesso che per pochi metri l'utente può raggiungere o meno l'*access point* della rete. In questi casi è necessario che i clienti subiscano rapidamente un processo di *handover* verso il prossimo *access point* disponibile. La mobilità dei pedoni descrive il cammino di persone o animali. Le principali caratteristiche di questo schema di mobilità sono il pieno uso del piano bidimensionale (in cui sono presenti ostacoli occasionali), e la sua natura caotica. Può verificarsi un comportamento di gruppo, ma non è necessario che questo accada. La velocità dei pedoni è limitata perché le loro gambe si muovono secondo la *legge del pendolo inverso*. Esempi tipici di mobilità di pedoni in reti wireless sono persone che effettuano chiamate in strade o dentro edifici, o anche animali in branchi con sensori che vengono osservati da biologi. Per creare modelli di mobilità per reti wireless e per analizzare il comportamento degli utenti possono essere utilizzate apparecchiature mobili attaccate a ogni oggetto che si muove (metodo parassitico), come ad esempio apparecchiature radio per gli animali domestici. Un effetto collaterale aggiuntivo facilmente osservabile, è che i pedoni hanno

risorse energetiche limitate, per cui devono caricare spesso le batterie dei loro apparecchi per poter comunicare. Questo ovviamente causa forti limitazioni nelle reti di comunicazione.

- **Veicoli terrestri:** La mobilità dei veicoli è ovviamente basata sulla ruota. Con questo vengono indicati gli schemi di mobilità di auto, treni, biciclette, moto, etc. La ruota in movimento ha un attrito ridotto e questo permette alte velocità, ma incrementa di conseguenza il pericolo di collisione. Per questo motivo, tutti i veicoli sono limitati ad un movimento unidirezionale su strade, vie, circuiti, etc. Questo riduce la probabilità di collisioni in luoghi particolari come gli incroci. Per il traffico ferroviario, l'organizzazione dei treni è fissata e prevedibile. Le uniche alterazioni possono essere causate dai ritardi. Una ulteriore caratteristica del traffico veicolare è una frequente mobilità di gruppo. Per quanto riguarda i problemi di comunicazione dovuti alla mobilità, in un treno per esempio i passeggeri hanno una velocità relativa che tende a 0, mentre il treno può arrivare a viaggiare anche a 300 Km/h. Questa velocità già di per se rende la comunicazione diretta difficile a causa dell'effetto Doppler. A complicare le cose c'è il fatto che i treni viaggiano spesso dentro gallerie. Altri problemi insorgono dalle varie riflessioni o rifrazioni dei segnali radio su vari oggetti, come ad esempio i segnali stradali.
- **Mobilità marina e sottomarina:** Navi e vascelli hanno una velocità influenzata dall'attrito dell'acqua e dalla potenza del motore. Per i mezzi subacquei la mobilità non è relegata al solo piano bidimensionale, ma è completamente tridimensionale (basti pensare ad un sommergibile). Per tutti questi mezzi, salvo in rare occasioni come regate o flotte navali, non sono previsti schemi di mobilità di gruppo. La comunicazione sull'acqua è molto buona, tranne che per i segnali ad alte frequenze che vengono assorbiti. I sottomarini quindi sono costretti ad utilizzare solo il range di basse frequenze (compreso fra 15 kHz e 33 kHz), e un antenna lunga tra i 10 e i 20 metri. Una soluzione alternativa potrebbe essere la comunicazione acustica, poiché il suono si propaga molto bene in acqua.
- **Mobilità aerea:** A questo gruppo appartengono i modelli che rappresentano il volo degli uccelli migratori. Questi vengono seguiti dai

biologi con l'ausilio di apparecchiature radio, e in alcuni casi possono essere monitorati anche via internet. Questi uccelli viaggiano ad alte velocità e compiono lunghe distanze. Il volo degli aeroplani è comparabile a quello degli uccelli: anche qui il moto è tridimensionale ma solitamente la salita e la discesa vengono fatte solo in fase di decollo e atterraggio, mentre la maggior parte del viaggio, essendo ad altitudine pressoché costante, può essere modellata con un'area bidimensionale. Eccezioni a questo fatto possono essere un rapace che va a caccia, i combattimenti aerei durante le guerre o ancora le migrazioni di gruppo degli uccelli. Le principali applicazioni di questi modelli sono: sistemi anticollisione, di inseguimento di posizione, e controllo di volo.

- **Mobilità nello spazio aperto:** Il vuoto dello spazio è l'ambiente ideale per le comunicazioni radio. Inoltre l'energia non risulta più essere un problema in quanto i veicoli spaziali vengono equipaggiati con pannelli solari. Gli stessi satelliti che circondano la Terra, costituiscono un modello di mobilità molto grande e complesso, e le esplorazioni spaziali possono produrre modelli ancora più complicati. Ad esempio un gruppo di navicelle spaziali può essere usato per un'operazione di esplorazione dello spazio profondo. Questo sarà inserito in un'orbita non circolare fra Terra e Sole.
- **Movimento dei Robot:** Uno qualsiasi degli scenari di mobilità precedenti può essere riscontrato nel movimento dei Robot. La differenza principale rispetto a questi è lo schema di mobilità dato dal progettista dei Robot. Per alcune applicazioni questo schema è facile da ricavare. D'altro canto alcuni Robot sembrano muoversi in modo completamente erratico e imprevedibile. Chiaramente il movimento dei Robot è dipendente dal loro compito, e solitamente è data poca attenzione all'impatto del comportamento dei Robot nelle reti di comunicazione. Attualmente però, il progetto "*smart team*" sta coordinando i lavori dei Robot, proprio tramite una rete di comunicazione radio.

I *modelli sintetici* possono quindi essere basati su determinati schemi di movimento al fine di rappresentare quella particolare categoria di utenti. Questi modelli possono

essere a loro volta suddivisi in varie sottocategorie: entity model e group model (per distinguere i modelli che rappresentano il movimento di un singolo individuo da quelli che rappresentano la mobilità di un gruppo); modelli casuali, modelli a dipendenza temporale, modelli a dipendenza spaziale, modelli con restrizioni geografiche, e molti altri ancora.

In questo lavoro di tesi è stato inizialmente esposto un excursus dei modelli di mobilità più famosi presenti in letteratura. Si è ricorsi alla suddivisione in: *Modelli casuali*, *Modelli con dipendenza temporale*, *Modelli con dipendenza spaziale* e *Modelli con restrizioni geografiche*. I *modelli casuali* sono essenzialmente quei modelli in cui i nodi si muovono casualmente e liberamente per l'area di simulazione. A questa categoria appartengono il *Random Waypoint Mobility Model*, il *Random Walk Mobility Model* ed il *Random Direction Mobility Model*. Il *Random Waypoint* è il modello più utilizzato nelle simulazioni effettuate per testare le performance dei protocolli di routing per le reti ad hoc. Ogni nodo sceglie una velocità ed una direzione in modo casuale e si muove o per un determinato periodo di tempo t o per una determinata distanza d . Una volta trascorso il tempo (o percorsa la distanza), il nodo effettua una pausa per un periodo di tempo scelto anch'esso casualmente. Terminata la pausa il processo ricomincia da capo. Il *Random Walk model* è identico al *Random Waypoint* salvo il fatto che non sono presenti le pause che precedono i cambi di direzione e velocità. Il *Random Direction model* si discosta dai precedenti per il fatto che i nodi, una volta scelte velocità e direzione, proseguono in linea retta finché non raggiungono il bordo dell'area di simulazione, dove si fermano in pausa. Trascorsa questa ultima, ogni nodo sceglie una nuova direzione casuale e ripete il processo.

In alcuni modelli la velocità corrente di un MN può dipendere dalla sua velocità precedente. Questo vuol dire che le velocità di un singolo nodo in diversi intervalli di tempo sono correlate tra loro. Questa caratteristica è conosciuta come *dipendenza temporale della velocità*. I modelli di mobilità più famosi riconducibili a questa categoria sono: il *Gauss-Markov Mobility Model*, lo *Smooth Random Mobility Model*, il *Boundless Simulation Area Mobility Model* e l'*Exponential Correlated Random Mobility Model*. Il *Gauss-Markov model* sfrutta un processo di Gauss-Markov per mettere in correlazione le velocità passate da quelle future. Il modello è caratterizzato dal parametro α che è

chiamato *livello di memoria*. Variando questo parametro è possibile utilizzare il modello di Gauss-Markov per rappresentare svariati scenari di mobilità. Lo *Smooth Random Mobility Model* permette di variare la velocità e la direzione di un nodo in modo incrementale ed uniforme. Una volta scelta la nuova velocità, al nodo sarà applicata una accelerazione o una decelerazione graduale, in modo tale che il cambio di velocità avvenga in modo continuo e graduale. Allo stesso modo, una volta scelta la nuova direzione, il cambio avviene in modo graduale e continuo. La principale innovazione apportata dal *Boundless Simulation Area model* è l'area di simulazione di forma *toroidale* che elimina il problema della gestione dei bordi dell'area di simulazione. L'*Exponential Correlated Random Mobility Model* sfrutta invece una funzione di moto per definire i movimenti dei nodi.

I *modelli di mobilità con dipendenza spaziale* sono essenzialmente modelli di mobilità di gruppo in quanto lo spostamento di un nodo è influenzato dai nodi vicini. A questa categoria appartengono: il *Reference Point Group Mobility Model* (RPGMM), il *Column Mobility Model*, il *Pursue Mobility Model* ed il *Nomadic Community Mobility Model*. Nel RPGMM i nodi si muovono riuniti in vari gruppi. Ogni gruppo segue un punto di riferimento che può essere o il centro logico del gruppo o un nodo particolare eletto *leader* del gruppo. Gli altri nodi si muovono principalmente seguendo il punto di riferimento, discostandosi leggermente da esso tramite l'impiego di un modello di mobilità individuale. Nel *Column model* i nodi si muovono in linea retta come se fossero un plotone di soldati. Nel *Pursue model* un gruppo di nodi insegue un nodo che fugge muovendosi in maniera casuale. Nel *Nomadic Community Model* un gruppo di nodi si muove collettivamente da un punto ad un altro. Ogni singolo nodo ha poi un proprio modello di mobilità che gli permette di discostarsi leggermente dal gruppo.

In molti ambienti reali i nodi sono soggetti a *restrizioni geografiche* come ostacoli, strade, autostrade, etc. a questa categoria appartengono: il *Pathway mobility model*, il *Freeway mobility model*, il *Manhattan mobility model* e l'*Obstacle mobility model*. Il *Pathway model* utilizza dei grafi per modellare un'area di simulazione che comprende ostacoli e i percorsi fra questi. Il *Freeway model* è molto utile allorché si voglia modellare il traffico veicolare di una autostrada. Il *Manhattan model* permette di modellare un'area di simulazione in cui i percorsi possibili si incrociano a formare una griglia. L'*Obstacle*

model infine sfrutta oggetti rettangolari allo scopo di simulare eventuali ostacoli per i movimenti dei nodi.

Successivamente sono stati riportati i più recenti e significativi modelli di mobilità per reti ad hoc. Il primo modello preso in considerazione è il *Networked Game Mobility Model* (NGMM). La peculiarità di questo modello risiede nell'essere stato basato sulle tracce estratte da un videogame tridimensionale (*Quake II*). Il modello raggruppa le locazioni della mappa in due tipi: stati di movimento e stati stazionari. Uno stato stazionario è un punto (o un gruppo di punti) in cui la permanenza del nodo supera una soglia data. Uno stato di movimento è definito come un qualsiasi punto che non è uno stato stazionario. Per gestire il moto degli utenti viene impiegata la tecnica del *Least Squares Fitting*. Sono inoltre state definite delle locazioni “popolari” (ovvero *hotspot*), che i nodi visitano di frequente, al fine di simulare luoghi dell'area di simulazione di particolare interesse per i nodi. Il secondo modello preso in considerazione è un modello di mobilità ad ostacoli basato su grafi di *Voronoi*. Questo modello cerca di dare una rappresentazione di un area reale introducendo ostacoli che fungono da barriere sia per il movimento degli utenti, sia per le comunicazioni wireless da questi effettuate. Un ostacolo è rappresentato con un oggetto definito da una posizione, una forma ed una dimensione. Ogni lato di un ostacolo ha una o più porte tramite cui i nodi possono entrare o uscire. La forma e la posizione degli ostacoli quindi influenzano sia la mobilità che la connettività degli utenti. È possibile scegliere lo spessore dei muri degli ostacoli, definendo quindi se questi attenuino o meno i segnali radio. I percorsi tra gli ostacoli sono stati poi modellati utilizzando un *diagramma di Voronoi*. Dalla geometria computazionale, un *diagramma di Voronoi* è un grafo planare con archi rettilinei. Definito un insieme di punti p , il *grafo di Voronoi* genera i percorsi tra questi punti. I nodi presenti nell'area di simulazione possono muoversi solo lungo questi percorsi predefiniti. Il modello successivo è un modello di mobilità ad ostacoli basato sulla *Social Network Theory*. Questa teoria schematizza le relazioni interpersonali con un grafo. I nodi rappresentano le persone e gli archi rappresentano le interazioni personali. I pesi sugli archi indicano il grado di conoscenza delle persone. L'idea che sta alla base di questo modello è che un nodo di una MANET comunica più frequentemente con il gruppo di nodi con cui ha maggior conoscenza. Per questo motivo, tra i vari gruppi

di nodi che si vengono a formare nella rete, un nodo sarà orientato ad aggregarsi al gruppo che presenta la maggiore attrazione sociale verso di lui. L'ultimo modello riportato è il *Generalized Random Mobility Model*. Lo schema di movimento di un nodo che si muove in accordo a questo modello è caratterizzato da epoche di movimento consecutive all'interno di un regione chiusa, ed è indipendente dal comportamento degli altri nodi. Durante ogni epoca di movimento, il nodo mobile si muove sul segmento che unisce i punti di partenza e di destinazione dell'epoca ad una velocità casuale. Una volta giunto a destinazione, il nodo effettua una pausa per un periodo casuale di tempo. La generalità di questo modello è derivata dall'approccio utilizzato per determinare i punti di destinazione, la velocità di movimento ed i tempi di pausa alle destinazioni.

Sono stati poi trattati alcuni tra i recenti modelli di mobilità per reti cellulari. Il primo modello è basato sul *Random Direction model*. È molto utile per rappresentare il movimento di terminali cellulari che seguono il traffico veicolare. Le strade vengono classificate in gruppi in base al criterio di parallelismo. La mobilità di un utente è considerata in base al gruppo di appartenenza della strada che sta percorrendo. I cambi di direzione agli incroci vengono modellati tramite un *Gauss Hidden Markov Model* (GHMM). La velocità media degli utenti in un gruppo è inversamente proporzionale alla densità di macchine e direttamente proporzionale al flusso di traffico. Il secondo modello ricalca le orme del primo, basandosi però sul '*Safe-distance car-following model*'. Il terzo modello riportato descrive la mobilità di terminali cellulari veicolari sotto condizioni di reale traffico urbano. Il modello successivo equipara la rete cellulare ad una rete di accodamento del tipo *Multi-class open Jackson network*. Ogni cella viene considerata come un nodo servente della rete di accodamento. L'ultimo modello riportato è il *Markovian Waypoint Mobility Model*. Questo modello di mobilità si basa sul *Random Waypoint Mobility Model* (RWP). I nodi mobili si muovono in linea retta da un waypoint ad un altro ad una certa velocità. I waypoint sono ottenuti da un processo di Markov. Il modello comprende tempi di pausa casuali durante le transizioni, in aggiunta ai tempi di pausa casuali già presenti ai waypoint. Vengono inoltre modellati "hotspot", ovvero punti dell'area di simulazione che i nodi visitano più spesso, ed in cui spendono più tempo, rispetto agli altri.

Infine sono stati ripresi alcuni modelli di mobilità per reti wireless particolari. Il primo modello è un modello per rete wireless integrata cellulare/WLAN. Viene qui presa in considerazione una Location Area (LA) cellulare al cui interno è presente una cella WLAN. Il secondo modello riportato è per una rete wireless multi-hop. Anche questo modello è stato basato sulle tracce estratte dal videogame Quake II. Il modello successivo utilizza la dipendenza spaziale per i movimenti degli utenti appartenenti allo stesso gruppo, mantenendo però la loro indipendenza temporale. Il quarto modello considera un'area di simulazione in cui sono presenti hotspot. Il modello successivo è utile per costruire ambienti di simulazione complessi come l'area di una città con strade per il traffico urbano.

L'ultima parte della tesi è stata dedicata alle applicazioni pratiche dei modelli di mobilità ovvero Mobility Prediction e simulazioni di laboratorio. Le tecniche di Mobility Prediction cercano di prevedere le future posizioni dei nodi basandosi sul loro schema di mobilità. Questo è molto importante nelle reti wireless. Per quanto riguarda le reti MANET questo permette di prevedere la futura topologia della rete, in modo da prendere misure preventive in caso di prevista interruzione della comunicazione fra nodi a causa della mobilità. Per quanto riguarda le reti cellulari invece, la Mobility Prediction è impiegata allo scopo di risparmiare risorse cercando di prevedere quale percorso verrà seguito da un nodo, e prenotando risorse solo in quelle determinate celle. Sono state riportate tre diverse tecniche di previsione: una per prevedere il Link Expiration Time in una rete ad hoc, una basata sul clustering delle reti ad hoc, e l'ultima che cerca di prevedere i percorsi di un nodo in una rete cellulare fino al futuro k-esimo handoff.

L'applicazione più frequente dei modelli di mobilità per reti ad hoc è quella orientata ai test delle performance dei protocolli di routing. In questo capitolo sono stati riportate varie simulazioni (e relativi risultati) sull'influenza della mobilità nelle reti ad hoc: il confronto delle performance del protocollo *Ad-hoc On-demand Distance Vector* (AODV) utilizzando il Random Waypoint ed il Gauss-Markov model, l'analisi dell'influenza della mobilità sui flussi TCP, un'analisi sugli effetti degli ostacoli sulle performance della rete, ed un confronto generale sugli effetti della mobilità su vari protocolli di routing.

Evoluzione dei Modelli di Mobilità:

Dal lavoro qui riportato, la cosa che principalmente salta agli occhi è l'evoluzione che i modelli di mobilità hanno avuto nel corso degli anni diventando sempre più dettagliati e complessi. I primi modelli, come il Random Walk ed il Random Waypoint, sono di una semplicità assoluta. Il nodo sceglie casualmente la velocità e la direzione da un range predefinito. Non ha neanche la necessità di scegliere una destinazione in quanto il periodo (o la distanza) di movimento è fissato a priori. Ovviamente lo schema di movimento risultante non è per niente realistico, in quanto i nodi vagano senza alcuna logica e senza una meta in un'area completamente vuota. Con il passare del tempo sono state aggiunte svariate caratteristiche per rendere la simulazione sempre più realistica tra cui sono da ricordare:

- ***Ostacoli:*** Gli ostacoli sono stati introdotti per simulare edifici o strutture varie che risultano essere un impedimento sia per il movimento dei nodi, sia per la propagazione dei segnali wireless da essi inviati. Anche gli stessi ostacoli hanno subito un'evoluzione nel tempo. I primi prototipi erano rappresentati da blocchi rettangolari che impedivano esclusivamente la mobilità dei nodi (che spesso vi rimbalzavano contro come fossero palline di gomma). Allo stato attuale gli ostacoli possono essere rappresentati da oggetti poligonali complessi di qualsiasi forma (anche circolari), sui quali è possibile inserire delle porte per permettere l'ingresso e l'uscita dei nodi. Lo spessore dei muri degli ostacoli è quindi divenuto un parametro fondamentale in quanto permette di stabilire se i segnali trasmessi dai nodi saranno o no attenuati, e quindi se due nodi, posti uno all'interno dell'ostacolo ed uno all'esterno, possono comunicare.
- ***Percorsi Prestabiliti:*** Nei primi modelli i nodi girovagavano senza meta in scenari di simulazione completamente vuoti. Con il passare del tempo sono stati introdotti percorsi che limitano le possibilità di movimento dei nodi. Che si voglia modellare un'autostrada, il traffico veicolare di una città o i percorsi esistenti tra gli edifici di un campus universitario, i percorsi prestabiliti permettono di rendere più realistica la simulazione. Le tecniche maggiormente utilizzate per creare i percorsi tra un insieme di punti dato

sono: 1) diagramma di Voronoi. 2) Triangolazione di Delaunay. Una volta creata l'area di simulazione con i percorsi voluti, è possibile applicare al movimento dei nodi algoritmi efficienti per ad es. trovare il percorso più breve tra due punti (come quello di Dijkstra).

- ***Velocità dipendente dalla storia passata:*** Sono stati introdotti metodi per far dipendere le velocità successive di un nodo da quelle passate. L'esempio più famoso è dato dal *Gauss-Markov mobility model*, che per questo scopo impiega appunto un processo di Gauss-Markov.
- ***Hotspot:*** L'introduzione degli hotspot, o "*punti di interesse*", è stata molto importante in quanto si possono simulare delle zone particolari, che attraggono i nodi, in cui questi ultimi permangono per più tempo rispetto ad altrove. Ad esempio possono rappresentare un nuovo negozio aperto in un centro commerciale che attira la maggior parte dei clienti, o cose più semplici come la mensa dell'università all'ora di pranzo. Gli hotspot hanno poi portato ad implementare nuovi comportamenti per i nodi. Un nodo che giunge ad un hotspot e non ha la possibilità di entrare perché i posti sono esauriti ha tre possibilità: 1) rallentare in prossimità del punto di interesse nella speranza di trovare posto quando arriva. 2) dirigersi altrove per un certo periodo di tempo e ritentare successivamente. 3) andare direttamente al prossimo punto di interesse disponibile.
- ***Mobilità di gruppo:*** I primi modelli di mobilità rappresentavano il movimento di un singolo nodo completamente indipendente dagli altri. Con il passare del tempo sono stati implementati molti modelli di mobilità in cui i movimenti dei nodi sono influenzati dai gruppi. Questo è stato necessario sia per modellare scenari reali (squadre di soccorsi, soldati, scolaresche, etc.), sia per modellare il fenomeno di raggruppamento che spesso si verifica nelle reti ad hoc.

- ***Nuovi metodi per recuperare tracce:*** Originariamente le tracce su cui basarsi per sviluppare un modello di mobilità non sintetico richiedevano lunghi periodi di osservazione della realtà di luoghi con il maggior quantitativo di gente possibile. Per fortuna non è più così. Si è visto che con i moderni videogames tridimensionali (e nello specifico Quake II), sempre più realistici e dettagliati, e con la possibilità di radunare via internet (grazie alle funzionalità multiplayer) una gran quantità di giocatori, è possibile ottenere tracce praticamente reali in modo molto semplice.
- ***Social Network Theory:*** vari modelli di mobilità sono stati sviluppati basandosi sulla *Social Network Theory*. Questa teoria permette di rappresentare le relazioni interpersonali tramite un grafo, in cui i nodi sono le persone e gli archi sono le interazioni personali. I modelli basati su questa teoria spiegano il raggruppamento delle reti ad hoc tramite l'attrattiva sociale. Un nodo si unirà al gruppo che presenta verso di lui la maggiore attrattiva sociale, e cambierà gruppo nel momento in cui ne incontrerà uno con una maggiore attrattiva rispetto al suo gruppo corrente.
- ***Modelli matematici sempre più complessi:*** anche i modelli matematici utilizzati per la gestione delle decisioni dei nodi (velocità, direzione, destinazione, etc.) hanno subito un'evoluzione, diventando sempre più precisi e dettagliati a scapito della semplicità. Il numero di parametri è cresciuto di pari passo con la complessità dei modelli impiegati, al fine di modellare scenari sempre più realistici.
- ***Flessibilità:*** i modelli di mobilità più avanzati hanno la possibilità di rappresentare svariate tipologie di scenari di mobilità, scegliendo il set adatto di parametri.

Utilizzi dei Modelli di Mobilità:

Gli impieghi primari a cui sono adibiti i modelli sono:

- **Studi di simulazione:** nelle reti MANET i modelli di mobilità sono stati impiegati principalmente nelle simulazioni per le valutazioni dei protocolli di routing. La mobilità infatti è un fattore fondamentale in questo campo. I risultati riportati nel Capitolo 5, sono un esempio dell'importanza della scelta del modello di mobilità adatto a quello che si vuole rappresentare. L'impiego del modello sbagliato durante la simulazione può portare a grossi errori di valutazione, e risultare quindi in un drastico calo delle performance della rete. Un buon modello di mobilità deve riuscire ad ottenere le migliori performance di rete, minimizzando l'overhead associato.
- **Mobility Prediction:** L'impiego dei modelli di mobilità è fondamentale negli studi alla base della Mobility Prediction. Questa tecnica cerca di prevedere le future posizioni dei nodi, basandosi sulla storia dei loro movimenti. Questo risultato è molto importante nelle reti wireless. Prevedere le future posizioni dei nodi in una rete ad hoc equivale a prevedere la futura topologia della rete stessa. Questo risulta in un enorme vantaggio in quanto è possibile prevedere eventuali interruzioni dei collegamenti e prevenirli, risparmiando alla rete vari processi di *route discovery*. Prevedere in quali celle si muoverà un utente che sta telefonando, permette alla rete cellulare di prenotare le risorse necessarie a questo ultimo solo dove serve. Questo si traduce ad un grande risparmio di risorse (basti pensare quanti utenti si collegano ad una cella posizionata all'interno di una città), ed ad un conseguente miglioramento delle performance della rete.