VALIDAZIONE DI ALGORITMI DI RADIO-LOCALIZZAZIONE MEDIANTE UN SIMULATORE DELLA PROPAGAZIONE ELETTROMAGNETICA IN AREE URBANE

F. Giannetti, P. Grassi, G. Manara, P. Nepa, M. Porretta

Dipartimento di Ing. dell'Informazione, Università di Pisa, Via Diotisalvi 2, I-56126, Pisa
f.giannetti, p.grassi, g.manara, p.nepa, m.porretta@iet.unipi.it

Abstract

Radiolocation techniques open the door to efficient emergency services (E-911/112), as well as to a new world of previously unimaged information services (e.g., electronic yellow pages, "where I am" applications, navigation and personalized traffic). In this paper, it is shown that subscriber radio location techniques may be developed, improved and validated through a deterministic electromagnetic propagation model. Indeed, a numerical code which is able to estimate the main signal parameters (field strength, time delay, direction of arrival) represents an interesting alternative to expensive measurements campaigns. Some numerical results relevant to the location accuracy of a TOA (Time of Arrival) algorithm will be shown. They have been obtained by using a fully 3D electromagnetic propagation model based on an inverse ray tracing algorithm.

Introduzione

L'esigenza di localizzare un utente mobile nasce, storicamente, soprattutto da motivi legati alla sicurezza. Infatti, una direttiva della Federal Communication Commission (FCC) ha imposto che negli Stati Uniti d'America, a partire dal mese di Ottobre del 2001, tutte le chiamate di emergenza (E-911) provenienti da telefoni cellulari debbano essere localizzate con un'accuratezza di 125 metri nel 67% dei casi. Successivamente, le tecniche di radio-localizzazione si sono rivelate molto utili anche per diverse altre applicazioni. In primo luogo, è possibile fornire all'utente tutta una serie di servizi aggiuntivi la cui domanda sta rapidamente crescendo negli ultimi tempi: si pensi, ad esempio, a un servizio di Pagine Gialle elettroniche, oppure alla possibilità di avvertire l'utente sull'eventuale presenza di amici all'interno della stessa cella. In secondo luogo, le informazioni sulle posizioni dei vari utenti possono rivelarsi molto importanti anche per l'operatore, in special modo per tutte quelle funzioni di Radio Resource Management (RRM) che mirano al conseguimento di un'efficiente distribuzione del traffico nella rete. Nella tabella I sono riportati alcuni dei servizi connessi alla radio-localizzazione dell'utente, in funzione dell'accuratezza caratteristica dell'algoritmo di radio-localizzazione implementato:

Accuratezza: 0-75 m	Accuratezza: 75-250 m	Accuratezza: > 250 m
Emergency services	Friend finder	Bus/train schedule
Person/pet tracking	Location based billing	Gaming
Stolen vehicle	Restaurant/Hotel finder	Bulk emergency alert
Navigation	Roadside assistance	Network optimization

Tabella I: Servizi offerti dalla radio-localizzazione in funzione dell'accuratezza dell'algoritmo di stima della posizione dell'utente.

Le tecniche di radio-localizzazione più diffuse sfruttano misure di grandezze associate al segnale inviato da un utente mobile a un insieme di stazioni radio base (SRB): in seguito, la stima della posizione del mobile viene ottenuta attraverso opportuni algoritmi che sfruttano relazioni di tipo geometrico. Più in dettaglio, algoritmi di radio-localizzazione possono essere implementati a partire dalla misura delle seguenti quantità: angolo di arrivo (Angle of Arrival, AOA), potenza, tempo di arrivo (Time of Arrival, TOA), differenza dei tempi di arrivo (Time Difference of Arrival, TDOA); è anche possibile, inoltre, utilizzare una combinazione di queste grandezze. Ovviamente, una maggiore accuratezza dell'algoritmo implica un aumento della complessità del sistema hardware con cui l'algoritmo stesso viene implementato e del tempo di elaborazione richiesto [1]-[3].

In questo lavoro viene mostrato come un simulatore deterministico per la propagazione elettromagnetica in ambiente urbano possa essere di notevole aiuto per l'analisi, lo sviluppo, l'ottimizzazione e la validazione di algoritmi di radio-localizzazione. Il simulatore utilizzato è completamente tridimensionale, di tipo vettoriale, ed è basato su metodi asintotici ad alta frequenza (tecniche a raggi). Qualunque sia la posizione del mobile, il segnale ricevuto da una SRB viene calcolato come somma vettoriale dei contributi di campo associati ai raggi che riescono a raggiungere, direttamente o tramite riflessioni o diffrazioni, la SRB stessa (*ray tracing* inverso). Questo approccio permette di tener conto di tutte quelle situazioni, piuttosto frequenti in aree urbane, nelle quali il trasmettitore e il ricevitore non sono in visibilità (NLOS, Non Line of Sight). Più precisamente, il simulatore considera contributi fino al terzo ordine per le riflessioni dalle pareti degli edifici e dal terreno, mentre i fenomeni di diffrazione dagli spigoli degli edifici vengono valutati mediante coefficienti di diffrazione approssimati, validi per discontinuità in superfici di impedenza. La procedura di tracciamento dei raggi è stata resa più efficiente e veloce grazie all'implementazione di algoritmi di *computer* grafica. Un simulatore deterministico con le suddette caratteristiche si rivela uno strumento prezioso per l'analisi e l'ottimizzazione di algoritmi di radio-localizzazione. Infatti, esso permette di stimare le grandezze fisiche utilizzate dall'algoritmo, in alternativa a costose campagne di misura.

Un algoritmo di radio-localizzazione di tipo TOA

Uno dei primi algoritmi ad essere implementato, nell'ambito della suddetta attività rivolta all'utilizzo di un simulatore deterministico della propagazione elettromagnetica, è stato un algoritmo di tipo TOA. Si fanno le seguenti ipotesi: innanzitutto deve essere noto il ritardo di propagazione, rispetto ad almeno tre SRB, di un *burst* di localizzazione emesso dal mobile; è poi necessario che le SRB e il mobile siano tra di loro sincronizzati, secondo un riferimento temporale comune. Si consideri, allora, un utente mobile che, ad un determinato istante, invia il *burst* di localizzazione alle tre SRB coinvolte nel processo di stima: ciascuna SRB misura un diverso ritardo di propagazione τ_i (i=1,2,3) e, per ognuna di esse, l'insieme dei possibili punti in cui può trovarsi il mobile è descritto da una sfera, centrata nella SRB, di raggio $c\tau_i$ (c è la velocità della luce nel vuoto). Si fa notare che, a causa del *multi-path*, la quantità misurata $c\tau_i$ coincide con d_i, effettiva distanza tra il mobile e la SRB, solo nella condizione LOS (Line of Sight); in caso contrario, invece, è evidente che può essere solo $d_i < c\tau_i$. La sfera di raggio $c\tau_i$ si riduce a un cerchio

nell'ipotesi che il mobile si trovi sempre ad una fissata altezza da terra (che si è posta pari a 1.5 m). Ripetendo questo ragionamento per ciascuna delle 3 SRB che ricevono il *burst*, si individuano 3 cerchi, la cui intersezione fornisce un "dominio consentito" entro il quale deve necessariamente trovarsi l'utente mobile. Una prima stima della posizione del mobile ("stima al passo zero") può, quindi, essere ricavata individuando il baricentro dei punti di intersezione delle circonferenze che definiscono il dominio consentito, o, in alternativa, il centro dell'eventuale circonferenza di raggio più piccolo interamente contenuta in tutte le altre. La stima al passo zero così ottenuta è sempre all'interno del dominio consentito. Nella figura 1 sono illustrate le due possibili situazioni che possono presentarsi.

La stima al passo zero viene poi così migliorata: si stabilisce, per ciascuna SRB, una "affidabilità" α_i, ovvero una misura di quanto sia attendibile stimare con $c\tau_i$ la distanza vera d_i del mobile dalla SRB: risulteranno, quindi, più affidabili le SRB per le quali è più probabile che il mobile sia in visibilità con la SRB stessa. Volendo assegnare lo stesso grado di affidabilità alle tre SRB, si sceglie α_i=1. Si definisce poi la seguente "funzione costo":

$$F(x,y)=\sum_{i=1}^{3}\left\{\alpha_i^2 f_i^2(x,y)+\frac{P}{f_i(x,y)}\right\}$$

dove $f_i(x,y)=c\tau_i-\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}$, e $P/f_i(x,y)$ è un "termine di penalità" (P è un numero reale e positivo). Utilizzando l'algoritmo del gradiente, con punto iniziale la stima al passo zero prima ottenuta, si cerca la coppia (x,y) che minimizza $F(x,y)$. Grazie al termine di penalità, il valore della funzione costo cresce molto rapidamente se ci si avvicina ai bordi del dominio consentito: si limita così la ricerca del minimo solo all'interno del dominio stesso (problema di minimo vincolato). Il punto di minimo ottenuto fornisce la stima finale della posizione del mobile.

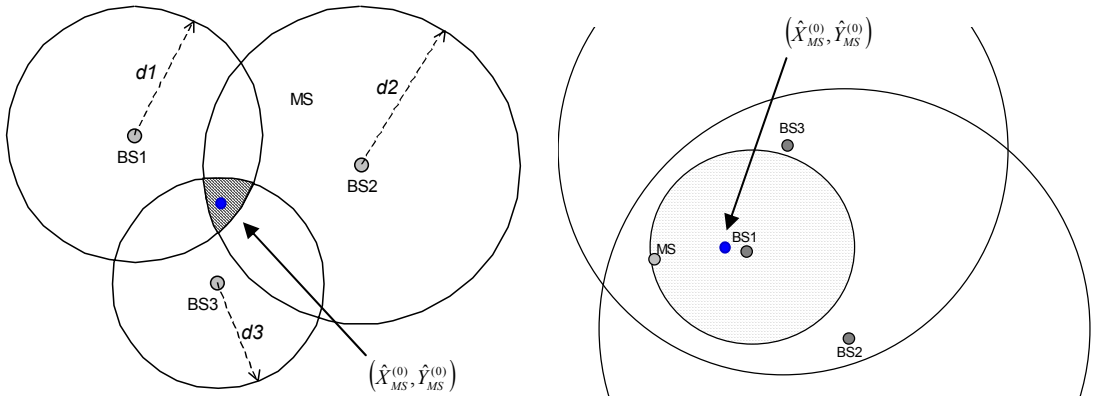

Figura 1: Individuazione della regione di esistenza dell'utente (domino consentito): per ciascuna delle due possibili situazioni è riportata la scelta della stima iniziale.

Analisi delle prestazioni di un algoritmo di radio-localizzazione

Le prestazioni dell'algoritmo appena descritto sono state valutate in termini di errore assoluto nella stima della posizione. Lo scenario di riferimento utilizzato per il test è conforme alle raccomandazioni dello *European Telecommunication Standards Institute* (ETSI) per la validazione dei servizi UMTS in ambiente microcellulare. Su una superficie quadrata di lato 440 metri sono stati posti 16 blocchi di edifici a sezione quadrata di lato 80 metri e altezza pari a 50 metri. Le SRB in grado di ricevere il segnale trasmesso dal mobile sono tre: esse sono posizionate ad un'altezza di 10 metri, ovvero al di sotto del tetto degli edifici, allo scopo di garantire un'adeguata copertura di campo. Infine, assumendo che la misura dei tempi di arrivo venga effettuata nelle SRB attraverso un correlatore, di risoluzione pari a metà del tempo di *chip*, si è anche tenuto conto del peggioramento delle prestazioni dovuto all'errore di quantizzazione temporale. Un'ampia serie di simulazioni ha dimostrato che l'errore di stima della posizione dell'utente mobile è caratterizzato da un valor medio di circa 33 metri, e da una deviazione standard di circa 20 metri (vedi Tabella II). Tali prestazioni possono essere migliorate mediante l'utilizzo di algoritmi di *tracking*, come ad esempio l'algoritmo di Kalman [2].

Errore assoluto nella stima della posizione	Con quantizz.		Senza quantizz.		Var. perc.	
	$\bar{\varepsilon}$ (m)	σ_ε (m)	$\bar{\varepsilon}$ (m)	σ_ε (m)	$\bar{\varepsilon}$ (m)	σ_ε (m)
Stima iniziale	65	41	63	42	+0.03 %	+0.02 %
Dopo minimizzazione	32	18	25	14	+29 %	+ 34 %

Tabella II: Accuratezza dell'algoritmo TOA stimata mediante l'utilizzo di un simulatore deterministico.

Conclusioni

Un modello di propagazione di tipo deterministico è senz'altro da preferire rispetto a un modello di tipo statistico per la validazione, l'ottimizzazione e lo sviluppo di algoritmi di radio-localizzazione. Solo un modello deterministico, infatti, permette di stimare con precisione adeguata le grandezze fisiche, associate al segnale, utilizzate da un certo algoritmo. In questo lavoro, un modello di propagazione UTD, deterministico, vettoriale, completamente tridimensionale e basato su una tecnica a raggi, è stato usato per validare un algoritmo di tipo TOA. Sono attualmente in fase di studio nuove tecniche di localizzazione che sfruttano, oltre al tempo di arrivo, anche altre grandezze fisiche associate al segnale: l'obiettivo è quello di aumentare l'accuratezza della stima, e di ridurre il numero di SRB coinvolte nel processo di localizzazione.

Riferimenti bibliografici

[1] James Caffery, Gordon Stuber, "Subscriber location in CDMA cellular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* , vol. 47, no 2, May 98.

[2] M. Hellebrandt, R. Mathar, M. Scheibenbogen, "Estimating position and velocity of mobiles in a cellular radio network," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* vol. 46, no. 1, Feb. 1997.

[3] M. Pent, E. Turco, M. A. Spirito, "Method for positioning GSM mobile stations using absolute time delay measurements," *Electronics Letters* vol. 33, no. 24, 20 Nov. 1997