

# Sistemi di radiolocalizzazione

## 1. Introduzione

- Le possibili applicazioni di *servizi di radiolocalizzazione* sono molteplici
  - facilitare interventi in situazioni di emergenza (direttiva americana E911), servizi tipo “pagine gialle” ;
  - commerciali – es. tariffazioni diverse a seconda della posizione - ;
  - ingegneristici: conoscendo la posizione dei mobili che richiedono accesso al sistema e’ possibile ottimizzare la pianificazione cellulare.
  - ecc. ecc.
- Detto  $e_p$  l’errore di localizzazione (cioe’ distanza posizione predetta-posizione reale), sistemi di positioning devono soddisfare la seg. specifica, imposta dalla direttiva Emergency 911 della Federal Communication Commission (FCC):

$$\text{PROB}\{e_p \leq 125\text{m}\} = 0.67$$

$$\text{(per futuro } \text{PROB}\{e_p \leq 13\text{m}\} = 0.90 \text{)}$$

- Qualunque sistema di localizzazione deve considerare i seguenti problemi:

### 1. Effetto della propagazione NLoS:

I piu’ usuali sistemi di localizzazione determinano la posizione del mobile dalla misurazione di grandezze (*location parameters*) quali *tempo di ritardo*, *potenza ricevuta*, *angolo di arrivo del segnale ricevuto*, **supponendo condizioni di linea di vista**. E’ chiaro allora che situazioni NLoS peggiorano la precisione di localizzazione, tipicamente introducendo un errore sistematico che porta a sovrastimare la distanza BS-MS (si parla di “**NLoS bias**”, che determina un errore medio di circa 500-700 metri).

Si osservi che in ambito microcellulare se e’ spesso lecito supporre LoS condition verso la cosiddetta “serving BS” (ossia quella che garantisce/gestisce il servizio voce/dati/web), e’ assai meno probabile che siano in visibilita’ la altre BSs che intervengono nel procedimento di localizzazione (si vedra’ infatti che le classiche tecniche di localizzazione coinvolgono piu’ di una BS). Resta in ogni caso, quindi, il problema della NLoS bias.

### 2. Effetto dei Cammini Multipli:

La presenza di multipath determina evidentemente fading rapido (e quindi forti e repentini affievolimenti della potenza ricevuta), angoli di arrivo e tempi di ritardo differenti per i diversi cammini; tutto cio’ complica ovviamente in ricezione la stima dei location parameters e quindi la precisione della localizzazione.

Si noti che gli errori sulla precisione dovuti alla presenza di cammini multipli si vanno ad aggiungere a quelli eventualmente dovuti a condizioni di propagazione NLoS (si tratta cioe’ di fenomeni diversi; basti pensare che si puo’ avere multipath anche in situazione LoS, ovvero situazioni NLoS caratterizzate da un solo cammino).

In particolare per sistemi CDMA occorre considerare anche:

### 3. Effetto dell’interferenza da accesso multiplo (MAI effect)

E' possibile che le misure fatte da una BS su un certo utente mobile (nel caso in cui siano le BSs ad effettuare le misure dei location parameters) siano eccessivamente disturbate da altre MSs interferenti (nonostante il *power control*), determinando cosi' una cattiva stima del parametro misurato e quindi un errore sulla valutazione di posizione.

Sia  $MS_0$  un utente mobile servito dalla base station  $BS_0$ ; la potenza trasmessa da tale utente viene quindi controllata dai comandi di PC che gli vengono periodicamente inviati dalla serving BS. I piu' usuali procedimenti di localizzazione richiedono che anche BSs diverse dalla  $BS_0$  "ascoltino" il mobile  $MS_0$  al fine di misurare il prefissato location parameter e ottenere quindi la stima di posizione. Puo' succedere allora che la potenza trasmessa da  $MS_0$  sia troppo bassa per poter essere "sentita" da BSs diverse da  $BS_0$ , ovvero che la potenza interferente che esse ricevono dagli utenti che stanno servendo (e di cui quindi controllano la potenza in trasmissione) sia troppo elevata rispetto a quella ricevuta da  $MS_0$ .

Questo problema, particolarmente sentito quando  $MS_0$  si trova molto vicino a  $BS_0$  (perche' allora trasmettera' con una potenza particolarmente bassa) prende il nome di "*hearability*".

Dualmente, nel caso in cui sia il mobile ad effettuare le misure dei location parameters, possono esserci problemi di hearability verso BSs remote che trasmettono una potenza non sufficientemente elevata.

## 2. Aspetti generali e positioning methods

- Sostanzialmente tutti gli algoritmi di localizzazione richiedono la misura di una (o piu') grandezze (*location parameters*), il cui valore sia in qualche modo legato alla posizione del mobile, in modo che dal valore misurato sia possibile stimare la posizione del terminale in movimento. E' possibile allora una prima classificazione: se le misure dei location parameters e la stima di posizione vengono effettuate dal mobile si parla di **sistemi self-positioning** (o **handset based**); se invece misura dei parametri e stima di posizione vengono effettuate da una o piu' stazioni fisse (FSs) si parla di **sistemi remote-positioning** (o **network based**).

Esistono anche *soluzioni ibride*, di tipo **handset based/network assisted**, in cui la rete aiuta il mobile nel processo di localizzazione, inviandogli segnali ausiliari, coordinate dei punti di riferimento, offset temporali nei tempi di trasmissione delle stazioni base coinvolte, o di tipo **network based/handset assisted**, in cui il mobile effettua le misure e le invia alla rete che provvede al calcolo della posizione.

E' chiaro che tutte le soluzioni handset based richiedono in generale modifiche hardware/software dei terminali mobili, il che puo' rappresentare uno svantaggio, soprattutto iniziale, obbligando tutti gli utenti ad un aggiornamento.

- Usualmente gli algoritmi di localizzazione sono classificati in 3 categorie:

### 1. Dead-reckoning Systems

A partire da una posizione iniziale nota, il mobile per mezzo di opportuni dispositivi (sensori, ecc.) calcola periodicamente velocita' e direzione di spostamento, potendo cosi' calcolare la posizione via via occupata. Sono quindi sistemi intrinsecamente self-positioning.

### 2. Proximity Systems (o signpost systems o beacon systems)

Determinano periodicamente qual e' la FSs piu' vicina al mobile, e tale informazione e' sufficiente per stimarne la posizione (si considera ad esempio la posizione stessa della FS oppure un'area circoscritta attorno ad essa); in tal modo e' pero' necessario che le FSs siano opportunamente "fittre" per contenere l'errore di localizzazione entro limiti accettabili.

I sistemi cellulari possono essere facilmente considerati, dal punto di vista della localizzazione, Proximity Systems, nel senso che la posizione del mobile può essere valutata considerando la posizione della BS servente, ovvero l'area della cella/settore coperta da tale BS. Tuttavia, in generale il numero di BSs non è sufficientemente elevato per avere celle sufficientemente piccole per avere un errore accettabile.

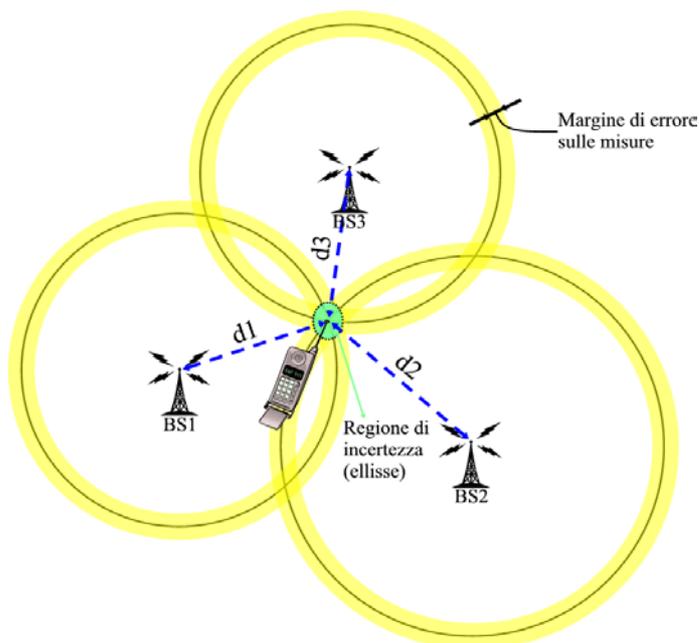
### 3. Radiolocation Systems

Si basano sulla misura di segnali radio fra la MS e un certo numero di prefissate FSs. In particolare, per ogni link MS-FS si misura il location parameter prescelto; il valore misurato consente di individuare una curva nel piano (*line of position*) sulla quale può trovarsi il mobile rispetto alla FS considerata. L'intersezione delle varie lines of position relative alle diverse coppie MS-FS consente di individuare la posizione del mobile (entro i limiti dovuti agli errori sulle misure, ovviamente).

I sistemi cellulari possono essere considerati Radiolocation Systems, in cui le stazioni base vengono ovviamente utilizzate come stazioni fisse di riferimento

A seconda di qual è il location parameter misurato, si distinguono 3 metodi principali di radiolocalizzazione:

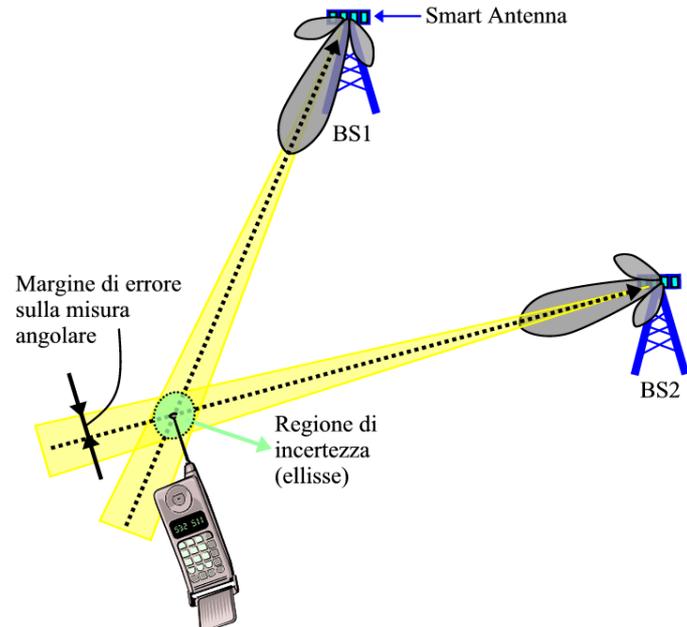
#### 3.1 Signal strength methods



- Nota la potenza trasmessa e misurata quella ricevuta, si calcola l'attenuazione. Considerata una opportuna legge di attenuazione  $L(d)$  funzione della distanza, si calcola quindi la distanza MS-BS (lines of position sono perciò cfr).
- In presenza di shadowing e/o fading rapido (multipath) il valore di attenuazione misurato NON dipende in realtà solo dalla distanza, che viene quindi in tal caso sovrastimata; ciò determina ovviamente un errore nella localizzazione.
- Nei sistemi CDMA a causa del power control è più difficile conoscere con precisione il valore della potenza trasmessa.

#### 3.2 Angle of Arrival (AoA) methods (Direction Finding)

- A patto di utilizzare antenne direttive (*smart antennas*) la BS puo' valutare la direzione in cui si trova il mobile (lines of position sono percio' rette). Per la localizzazione sono sufficienti 2 BSs. E' metodo esclusivamente network based, perche' difficilmente si possono installare arrays di antenne sui terminali mobili.
- In assenza di cammino LoS la direzione di ricezione non e' in generale quella in cui si trova effettivamente il mobile. Inoltre la presenza di multipath puo' disturbare la corretta



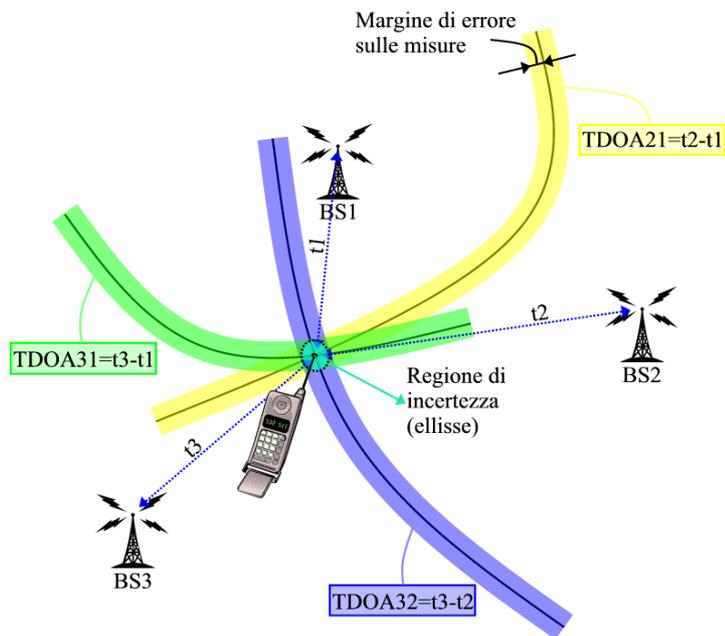
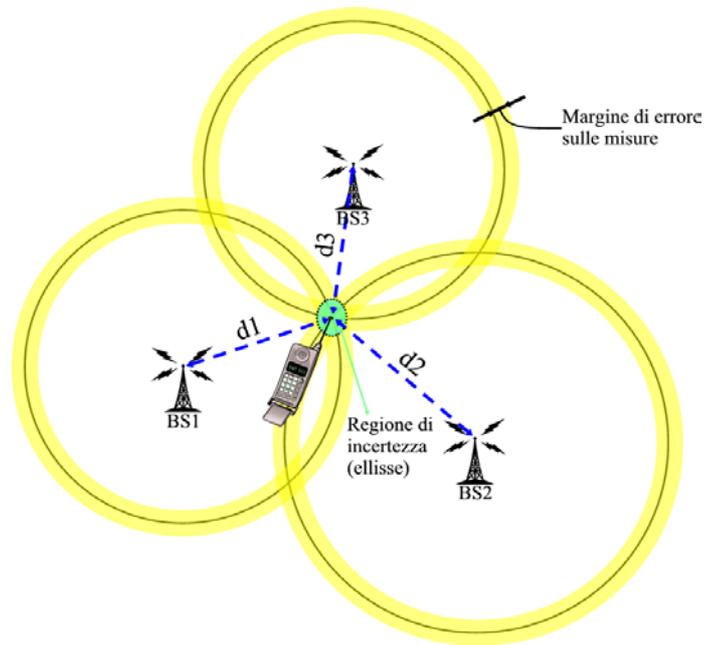
misurazione angolare (anche in condizioni LoS). In linea di principio, comunque, si puo' affermare che se gli scattering point si trovano SOLO nelle vicinanze del mobile, i diversi raggi ricevuti provengono piu' o meno dalla stessa direzione e ci si puo' attendere quindi che la localizzazione sia sensata, ancorche' imprecisa. Non cosi', invece, se ci sono punti di diffusione nelle vicinanze della BS. Tecniche AoA sono percio' poco affidabili in ambiente  $\mu$ -cellulare, con antenne sotto il livello dei tetti.

- Tecniche AoA sono via via piu' imprecise al crescere della distanza MS-BS. Infatti, a parita' di errore sulla misura angolare (es.  $3^\circ$ ), il possibile errore sulla posizione ad esso associato cresce man mano che la distanza fra le antenne aumenta.

### 3.3 Time Based Methods (ToA / TdoA)

- Viene misurato il ritardo di propagazione fra il mobile e la BS, calcolando quindi la distanza MS-BS (ToA, lines of position sono cfr), oppure la differenza dei ritardi di propagazione fra il mobile e due diverse BSs (TDoA), calcolando quindi la possibile posizione del mobile rispetto alla coppia di BSs come luogo geometrico dei punti del piano per i quali e' costante (pari appunto al valore misurato) la differenza dei ritardi di propagazione (si tratta ovviamente di un ramo di iperbole avente le BSs come fuochi).
- In assenza di cammino LoS il ritardo misurato non corrisponde ovviamente alla distanza MS-BS, e cio' comporta ovviamente un errore nella stima di posizione. Se l'allungamento del cammino effettivo rispetto alla linea di vista e' piu' o meno lo stesso rispetto le 2 BSs, l'approccio TDoA e' in grado di limitare, compensare l'errore dovuto alla propagazione NL.oS.

La presenza di cammini multipli puo' creare inoltre ulteriore disturbo, poiche' l'interferenza dei diversi echi in ricezione puo' rendere piu' imprecisa la misura del ritardo



### 3. Positioning methods: maggiori dettagli

- Qualunque metodo di localizzazione puo' essere articolato in 2 fasi:
  - a) *Stima dei parametri di localizzazione*;
  - b) *Algoritmo di localizzazione*, che stima la posizione della MS a partire dai valori misurati dei location parameters.

- **Stima dei Location Parameters**

Signal Strength estimation

In generale la potenza ricevuta dalla BS o dalla MS quando il mobile si trova nel punto  $\mathbf{r}$  puo' essere espressa come

$$P_{RX}(\mathbf{r}) = X_{fast}(\mathbf{r}) + X_{slow}(\mathbf{r}) + P(\mathbf{r});$$

dove  $P(\mathbf{r})$  e' la potenza ricevuta tenendo conto solo dell'attenuazione con la distanza,  $X_{fast}(\mathbf{r})$  e' una v.a. di tipo Rayleigh o Rice descrittiva del fading rapido e  $X_{slow}(\mathbf{r})$  e' una v.a. log-normale descrittiva dello shadowing;

Poiche' per calcolare correttamente la distanza BS-MS dalla formula di attenuazione con la distanza e' necessario considerare solo il termine di potenza ricevuta  $P(\mathbf{r})$ , e' opportuno mediare la potenza ricevuta in modo da limitare l'effetto dello shadowing. Si considera cioe'

$$\bar{P}_{RX} = \int_{r_0-L}^{r_0+L} P_{RX}(r) dr$$

Il percorso  $L$  non puo' essere troppo lungo perche' altrimenti la media calcolata non puo' essere considerata rappresentativa di un singolo punto; in tal modo pero' viene mediato, filtrato solo il fading rapido, e il valore calcolato e' quindi rappresentativo del termine di attenuazione con la distanza e dello shadowing. Cio' comporta un errore nella valutazione della distanza, soprattutto se la legge di attenuazione con la distanza non considera termini correttivi che tengano conto seppur approssimativamente dell'effetto schermante di eventuali ostacoli.

AoA estimators

L'angolo di arrivo del segnale ricevuto viene valutato tipicamente per mezzo di arrays di antenne montati sulla BS. Un array di antenne e' costituito da un opportuno numero di antenne elementari geometricamente disposte in maniera opportuna, cosi' da determinare un diagramma di radiazione molto direttivo, con un lobo principale molto stretto e diretto secondo una assegnata direzione.

ToA estimators

Tempi di ritardo vengono tipicamente valutati calcolando in ricezione funzioni di autocorrelazione. Facendo esplicito riferimento a sistemi CDMA, la stima di ritardi si articola in 2 parti:

1) *Code Acquisition*: consiste in sostanza nella risoluzione del seguente problema di massimizzazione:

$$\max_{\tau} \int_0^{LT_C} c(t+\tau) \cdot c(t) dt$$

Dove  $c(t)$  rappresenta ovviamente il codice trasmesso; tipicamente si utilizzano allo scopo filtri adattati o sliding correlators.

2) *Code tracking*: una volta ottenuta, la sincronizzazione, l'allineamento fra i codici (e quindi l'aggiornamento del ritardo) viene mantenuta, inseguita per mezzo di circuiti di tracking, caratterizzati da loop in retroazione.

NOTA: a mio avviso anche per sistemi di tipo NON CDMA il tempo di ritardo puo' essere comunque valutato mediante la massimizzazione dell'autocorrelazione; e' chiaro che,

dovendosi generare una copia locale, la funzione di cui si calcola l'autocorrelazione deve essere nota, come noto e' il codice in sistemi CDMA.

### TDoA estimators

La maniera piu' semplice per calcolare la differenza fra due tempi di ritardo e' di calcolare separatamente i 2 ritardi, e poi farne la differenza.

Altra possibilita' e' massimizzare la cross-correlazione dei segnali ricevuti, ossia calcolare

$$\max_{\tau} C_{1,2}(\tau) = \max_{\tau} \frac{1}{T} \int_0^T r_1(t) \cdot r_2(t + \tau) dt$$

dove  $r_i(t)$  rappresenta il segnale ricevuto dalla BS  $i$ .

$$r_1(t) = s(t) + n_1(t)$$

$$r_2(t) = As(t - \tau) + n_2(t)$$

- **Localizzazione**

Limitandosi al *caso bidimensionale* per semplicita', indicheremo nel seguito con  $(x_i, y_i)$  le coordinate della generica base station  $BS_i$ , con  $(x_M, y_M)$  le coordinate del mobile.

Nota il valore dei parametri di localizzazione, si tratta di calcolare il valore di  $x_M$  e  $y_M$ . Due approcci possono essere considerati.

#### Approccio Geometrico/Deterministico (caso ideale)

Se la non ci sono errori nella misura dei parametri di localizzazione, la posizione del mobile puo' essere determinata con precisione in maniera analitica per mezzo di semplici considerazioni geometriche:

##### 1) ToA approach (Signal Strength approach del tutto analogo)

Detto  $t_i$  il ritardo misurato fra il mobile e la  $i$ -ma BS, si puo' scrivere

$$t_i \cdot c = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2}$$

Risolvendo il sistema delle tre equazioni ottenute per  $i=1,2,3$  si ottiene

$$x_M = \frac{(y_2 - y_1) \cdot C_3 - (y_2 - y_3) \cdot C_1}{2 \cdot [(x_2 - x_3) \cdot (y_2 - y_1) - (x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_3)]}$$

$$y_M = \frac{(x_2 - x_1) \cdot C_3 - (x_2 - x_3) \cdot C_1}{2 \cdot [(y_2 - y_3) \cdot (x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) \cdot (x_2 - y_3)]}$$

con  $C_1$  e  $C_3$  funzione dei parametri noti  $x_i, y_i, t_i$ .

##### 2) TdoA approach

Detto  $t_i$  il ritardo misurato fra il mobile e la  $i$ -ma BS, si puo' scrivere

$$\rho_{i,j} = c \cdot (t_i - t_j) = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2} - \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2}$$

Risolvendo il sistema delle due equazioni ottenute per  $(i,j) = (1,2), (1,3)$  si ottiene

$$A \cdot x_M^2 + B \cdot x_M + C = 0$$

$$y_M = m \cdot x_M + b$$

con A,B,C,m,b funzioni dei parametri di sistema noti.

### 3) AoA approach

Detto  $\phi_i$  l'angolo di arrivo alla BS i-ma del segnale trasmesso dal mobile (ad es. rispetto all'asse x,  $0 \leq \phi_i < \pi$ ), e' facile osservare che

$$\phi_i = \tan^{-1} \left( \frac{y_i - y_M}{x_i - x_M} \right)$$

e che la retta su cui giace il mobile ha equazione

$$y_M = x_M \cdot \tan \phi_i + (y_i - x_i \cdot \tan \phi_i)$$

Risolvendo il sistema di equazioni per  $i = 1,2$  si ottiene

$$x_M = \frac{y_2 - y_1 - x_2 \cdot \tan \phi_2 + x_1 \cdot \tan \phi_1}{\tan \phi_1 - \tan \phi_2}$$

### Approccio statistico

Poiche' in generale le misure dei parametri di localizzazione sono affette da errori, l'approccio deterministico puo' apparire poco sensato. Il vettore di valori misurati,  $\mathbf{r}_m$ , puo' essere scritto come

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{c}(x_M, y_M) + \mathbf{n}_m$$

dove  $\mathbf{c}(x_M, y_M)$  rappresenta il vettore dei valori *veri* dei parametri di localizzazione, funzioni NOTE NON lineari delle coordinate del mobile), cioe'

$$\mathbf{c}(x_M, y_M) = \begin{cases} [t_1(x_M, y_M), t_2(x_M, y_M), \dots, t_n(x_M, y_M)] & \text{nel caso ToA} \\ [\rho_{2,1}(x_M, y_M), \rho_{3,1}(x_M, y_M), \dots, \rho_{n,1}(x_M, y_M)] & \text{nel caso TDoA} \\ [\phi_1(x_M, y_M), \phi_2(x_M, y_M), \dots, \phi_n(x_M, y_M)] & \text{nel caso AoA} \end{cases}$$

mentre  $\mathbf{n}_m$  rappresental'errore sulla misura. Si tratta allora di stimare  $(x_M, y_M)$  noto  $\mathbf{r}_m$ ; di solito si considerano quei valori  $(\hat{x}_M, \hat{y}_M)$  che minimizzano una funzione costo opportunamente scelta,

$$E(\hat{x}_M, \hat{y}_M) = [\mathbf{r}_m - \mathbf{c}(\hat{x}_M, \hat{y}_M)] \cdot \mathbf{W} \cdot [\mathbf{r}_m - \mathbf{c}(\hat{x}_M, \hat{y}_M)]$$

con W matrice opportuna (ad es.  $\mathbf{W}=\mathbf{I}$ ). Si tratta di un problema non lineare che quindi deve essere risolto con opportuni procedimenti.

NOTA: Si sono qui esplicitamente considerati solo errori nella misura dei parametri di localizzazione; se la misura e' precisissima, ma non esiste il cammino LoS, allora e' evidente che anche il procedimento cosiddetto deterministico produce un valore di posizione totalmente errato, poiche' non sono rispettate le ipotesi di validita' alla base del

procedimento. Si sono qui cioè voluti considerare *solo errori di misura, e non quelli introdotti eventualmente dall'ambiente di propagazione.*

#### 4. Positioning Technologies

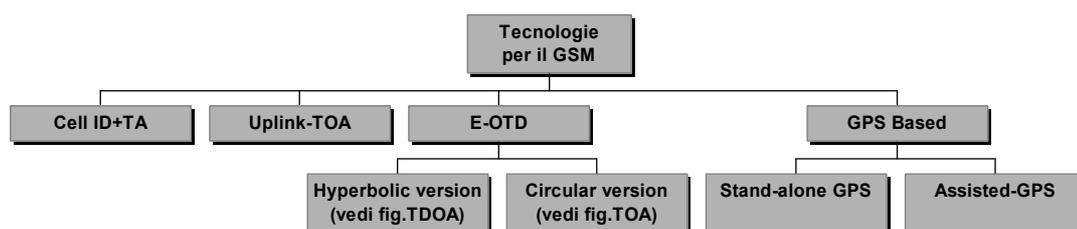
- I metodi di localizzazione considerati (essenzialmente 3: Signal Strength, AoA, Time based) definiscono esclusivamente un *principio di localizzazione*, senza entrare cioè nel merito di come implementare, realizzare concretamente tale algoritmo all'interno di una particolare rete esistente. I positioning methods sono pertanto *system independent*.

Quando si considerano anche le problematiche relative alla realizzazione di un particolare positioning method su un particolare sistema di telecomunicazione, si preferisce parlare di *positioning technology*. Una positioning technology, è definita pertanto dalla scelta di un metodo di localizzazione e dall'indicazione (più o meno dettagliata) di come implementare tale metodo sul sistema considerato (quali modifiche occorre apportare alla rete e/o agli apparati, quali strutture HW/SW già esistenti possono essere sfruttate, ecc.).

Le tecnologie di localizzazione sono oggi in fase di standardizzazione da parte di organismi internazionali preposti. In buona sostanza, le soluzioni proposte dall'ETSI (European Standards Telecommunications Institute) e dall'ANSI (American National Standards Institute) sfruttano misure temporali su segnali radio (provenienti da trasmettitori della rete radiomobile, terminali mobili o satelliti) e richiedono tutte una rete opportunamente distribuita di ricevitori di riferimento (**Location Measurements Units – LMUs**) ed un elaboratore centrale (Mobile Location Centre – **MLC**).

Gli LMU effettuano misure temporali su specifici segnali radio per supportare uno o più metodi di positioning. Nell'ottica di massimizzare il riuso delle strutture cellulari, gli LMU sono usualmente co-locati o addirittura integrati con le BSs, condividendo con esse le strutture di sostegno e a volte anche le antenne. Il numero e la posizione degli LMUs, tuttavia, dipendono sensibilmente dal metodo di localizzazione e dal sistema considerati.

- ETSI location technologies for GSM



- 1) Cell ID+TA: limitandoci ad una breve descrizione (poiché sistema di scarsa precisione), la posizione del mobile viene in sostanza ricavata dalla conoscenza dell'identificativo della BS/settore servente e dalla misura del tempo di propagazione fra mobile e BS/settore.
- 2) E-OTD (Enhanced-Observed Time Difference): il parametro di localizzazione è il ritardo di propagazione MS-BS, misurato dal mobile. A causa del fatto che la rete GSM è asincrona (ovvero le trame trasmesse dalle BSs non sono allineate, cioè i tempi di trasmissione NON sono noti), occorre considerare e sfruttare le misure dei tempi di arrivo dei segnali trasmessi dalle BSs al mobile e ad un LMU in posizione nota. Ogni LMU pertanto conosce una lista di BSs da "ascoltare" al fine di valutare gli offset di trasmissione. Più in dettaglio, si distinguono 2 versioni:

## 2.1) Hyperbolic version :

E' tecnologia basata sul metodo *TDoA*. La posizione del mobile viene determinata confrontando le differenze temporali fra 2 insiemi di misure: gli *Observed Time Differences (OTDs)* e stimati dal mobile e i *Real Time Differences (RTDs)* calcolati dall'LMU. Con riferimento alla coppia di BSs {BS1, BS2}, si definiscono:

- 1) MOT (Observed Time at the MS): istante di arrivo al mobile (rispetto al clock interno – NON noto) del segnale trasmesso dalla BS (burst SCH trasmessi sul canale BCCH) → {MOT1, MOT2}.
- 2) LOT (Observed Time at the LMU): istante di arrivo all'LMU (rispetto al clock interno – NON noto) del segnale trasmesso dalla BS (burst SCH trasmessi sul canale BCCH) → {LOT1, LOT2}.
- 3) OTD (Observed Time Difference): differenza fra gli istanti di arrivo misurati:

$$\begin{aligned} \text{OTD}_{12\text{MS}} &= \text{MOT1} - \text{MOT2}; \\ \text{OTD}_{12\text{LMU}} &= \text{LOT1} - \text{LOT2}. \end{aligned}$$

NOTA: La OTD non e' la differenza fra i tempi di propagazione, poiche' i tempi di trasmissione  $tx_1$  e  $tx_2$  delle due BSs sono in generale diversi.

- 4) RTD (Real Time Difference): differenza fra gli istanti di trasmissione delle 2 BSs (offset di trasmissione):  
 $\text{RTD} = tx_1 - tx_2$ .

- 5) GTD (Geometric Time Difference): differenza fra i tempi effettivi di propagazione (e' il parametro in funzione del quale viene poi calcolata la stima di posizione). In generale risulta

$$\mathbf{GTD = OTD - RTD}$$

ovvero

$$\begin{aligned} \text{GTD}_{\text{MS}} &= \text{OTD}_{\text{MS}} - \text{RTD} \\ \text{GTD}_{\text{LMU}} &= \text{OTD}_{\text{LMU}} - \text{RTD} \end{aligned}$$

Essendo la posizione di BSs e LMUs nota, la seconda di tali relazioni consente di calcolare RTD ( $\text{GTD}_{\text{LMU}}$  noto,  $\text{OTD}_{\text{LMU}}$  misurato); dalla prima relazione e' allora possibile ricavare  $\text{GTD}_{\text{MS}}$ , che individua nel piano un'iperbole avente per fuochi le due BSs. Conoscendo le  $\text{GTD}_{\text{MS}}$  relative a due coppie di BSs si individuano quindi 2 iperboli ed e' percio' possibile procedere alla stima di posizione.. Esistono 2 possibilita':

- Handset based: La rete invia i RTDs e le coordinate delle Bss al mobile, che procede al calcolo della posizione.
- Handset assisted: Il mobile invia gli OTDs alla rete, che calcola i GTDs e quindi la posizione, sfruttando i RTDs calcolati dalle LMUs.

## 2.2) Circular version :

E' tecnologia basata sul *metodo ToA*, versione di downlink. In sostanza MS e LMU misurano gli istanti di arrivo dei segnali trasmessi dalle BSs, senza effettuarne la differenza. Se definiamo:

- MOT (vedi def. precedente);
- LOT (vedi def. precedente);
- DMB (geometrical Distance from MS to BS): distanza incognita;

- DLB (geometrical Distance from LMU to BS): distanza nota;
- $\epsilon = t_{MS} - t_{LMU}$ , offset temporale fra il clock interno alla MS e quello interno all'LMU.

Tali grandezze sono fra loro legate dalla relazione:

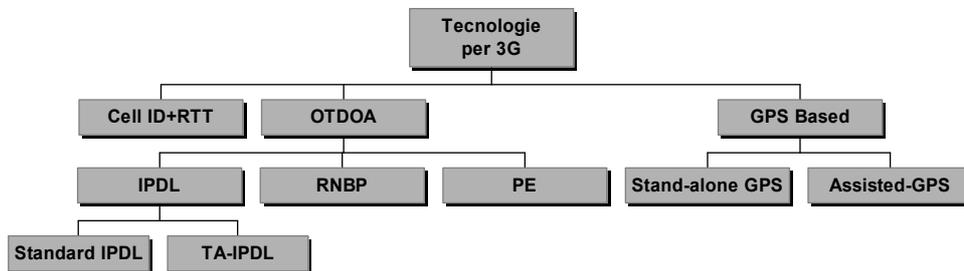
$$DMB - DLB = c * (MOT - LOT + \epsilon)$$

Poiche' ci sono 3 quantita' incognite ( $x_{MS}$ ,  $y_{MS}$ ,  $\epsilon$ ) sono necessarie misure da almeno 3 BSs.

In pratica l'unica differenza fra le due versioni e' il legame che sussiste fra gli errori di misura e la regione di incertezza, a causa della diversa tecnica impiegata.

- 3) Uplink ToA: e' tecnologia basata sul metodo TdoA, versione di Uplink; la stima di posizione viene realizzata in rete (Network based) sfruttando le misure delle differenze degli istanti di arrivo del segnale noto trasmesso dalla MS e ricevuto da almeno 3 LMUs. I ToA stimati dagli LMUs vengono inviati all'SMC, che ne calcola le differenze a coppie allo scopo di eliminare la dipendenza dal clock incognito della MS. E' altresì chiaro che, *perche' le misure siano significative, e' necessario che la rete di LMUs sia sincronizzata* (si utilizzano allo scopo costosi orologi atomici o GPS, da inserire quasi in ogni sito cellulare). Il segnale noto di positioning e' rappresentato dagli access bursts (fino a 70) generati in corrispondenza di un handover asincrono che viene inizialmente forzato e abortito nella fase finale.
- 4) GPS Based: si basa sul *sistema satellitare GPS (Global Positioning System)*; esso utilizza una costellazione di 24 satelliti in orbita ad un'altitudine di circa 2000 Km sulla superficie terrestre, che trasmettono verso la terra segnali di tipo DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum) alla chip rate di 1.023 Mchip/s con periodo di codice di 1 ms. La frequenza portante e' di 1575.42 MHz. Il segnale satellitare trasmesso contiene un "messaggio di navigazione" che include l'accurata temporizzazione e la descrizione della posizione del satellite emittente.  
Quando 4 o piu' satelliti sono in linea di vista, il ricevitore puo' calcolare la propria posizione applicando la tecnica ToA (necessarie almeno 4 misure perche' le incognite sono  $x_{MS}$ ,  $y_{MS}$ ,  $z_{MS}$  e l'offset del clock interno del mobile rispetto al riferimento temporale assoluto della rete GPS). Sono poi possibili 2 versioni:
  - a) Stand Alone GPS: nella MS viene integrato un ricevitore GPS completo. Il calcolo della posizione viene effettuato completamente dal terminale mobile (soluzione Handset based).
  - b) Assisted GPS: la stima di posizione effettuata dalla MS viene aiutata, velocizzata da un'opportuna rete di riferimento GPS che trasmette al mobile dei dati di assistenza che consentono di migliorare le prestazioni del ricevitore GPS (non completo) integrato.
 Il sistema GPS ha l'indubbio vantaggio lavorare solitamente in condizioni LOS e presentare raramente situazioni di multipath. Occorre peraltro considerare che l'integrazione di un ricevitore GPS sulle MSs comporta non indifferenti problemi di costo, dimensioni e power consumption, e che la precisione di tali sistemi e' drasticamente ridotta nelle seppur rare situazioni NLOS.

- ETSI location technologies for 3G



1) Cell ID + RTT (Round Trip Time): tecnologia analoga al Cell ID + TA proposto per il GSM.

2) OTDOA (Observed TdoA): e' l'estensione al sistema UMTS della tecnologia E-OTD-Hyperbolic version; come quest'ultima, si basa infatti sul *metodo TdoA in versione di downlink*. Le misure sono fatte dal mobile sui canali pilota broadcast CpiCH (Common Pilot Channel) trasmessi dalle stazioni base e comunque presenti nel normale funzionamento di rete. Diversamente, considerando tecniche di uplink il mobile dovrebbe trasmettere opportuni segnali per permettere alle LMUs di effettuare le misure; queste trasmissioni implicherebbero un aumento dell'interferenza globale nella rete, e quindi una indesiderata diminuzione della capacita'.

Se, come sembra, verra' implementata la versione FDD del sistema UMTS, in cui le BSs non sono sincronizzate, come nel caso GSM e' necessaria la realizzazione di una rete di LMUs sul territorio al fine di valutare i RTDs. (A dire il vero versione FDD proposta dalla Qualcomm e' sincrona – BSs sincronizzate via segnali satellitari – e in tal caso non c'e' offset di trasmissione).

Sono state studiate, o sono in fase di definizione, 4 diverse versioni:

2.1) IPDL (Idle Period Down Link)

Deriva dalla necessita' di aumentare la hearability in situazioni critiche (Il sistema UMTS e' infatti un sistema CDMA e pertanto risente del problema della MAI); i segnali trasmessi dalle BSs (a parte i segnali pilota, ovviamente) vengono interrotti per brevi intervalli di tempo, riducendo cosi' il livello di interferenza e permettendo cosi' ai mobili di effettuare misure piu' accurate sui livelli di potenza dei CpiCHs.

2.2) TA-IPDL (Time Aligned IPDL), in cui gli idle periods introdotti nell BSs vengono allineati (tutte le BSs trasmettono per un certo intervallo di tempo solo i segnali pilota), con conseguente ed evidente ulteriore aumento di hearability e quindi di precisione.

2.3) RNBP: in fase di definizione;

2.4) PE: in fase di definizione.

3) GPS Based: analogo al GPS Based per GSM.

- La seg. tabella riassume e confronta le caratteristiche delle principali tecnologie di localizzazione considerate (in particolare per il GSM).

	Precisione del sistema	Disponibilità commerciale	Controllo della Privacy	Velocità di risposta	Costo dell'upgrade di rete	Costo dell'upgrade del terminale
<b>E-OTD</b>	15 - 75m	2000	Possibile	2-5 s	Medio (LMU per RTD [1:3/5siti] e nuovi elementi di rete)	Basso (modifiche SW)
<b>Cell ID</b>	150 m – 30km (Raggio cellid)	1999	Non possibile	3 s	Minimo (Interfaccia MSC)	Nulla
<b>Cell ID + TA</b>	150 m– 1km	1999	Non possibile	5 s	Minimo	Nulla
<b>Assisted-GPS</b>	<50m in zona non urbana densa	Fine 2001	Possibile	5 s - 1min	Medio (nuovi elementi di rete)	Elevato (anche +40%; impatto su dimensioni)
<b>TOA based (Uplink ToA)</b>	Difficilmente <125m	Non definite	Non possibile	<10 s	Alto (LMU per TOA e RTD [~1:1siti])	Nulla
<b>AOA based</b>	Difficilmente <125m	Non definite	Non possibile	<10 s	Alto (Smart antennas)	Nulla