

## **LOCALIZAREA TERMINALELOR MOBILE ÎN REȚELE CELULARE DE COMUNICAȚII**

Stabilirea cu bună precizie a poziției terminalelor mobile pe aria unei rețele de comunicații celulare reprezintă o cerință esențială pentru rețelele actuale de comunicații mobile. Procesul este diferit ca scop și performanțe de cel uzual de localizare prezentat în capitolele anterioare. Dacă în sensul clasic localizarea utilizatorilor constă în determinarea ariei de localizare (grup de celule) în care se află fiecare utilizator în vederea unui management eficient al mobilității acestuia (paging și transfer intercelular), în noua accepțiune localizarea utilizatorilor constă în determinarea poziției geografice absolute a acestora cu o eroare de sub 150 metri. Acest obiectiv este o urmare a unei directive standard de implementare a acestei facilități în toate rețelele de comunicații celulare până în 2009, dar și dorinței de a oferi utilizatorilor servicii specifice bazate pe locație. Directiva standard (E911) a FCC este motivată de necesitatea descoperirii rapide a terminalelor mobile ce lansează apeluri de urgență (formând 911 în S.U.A. și, respectiv, 112 în Europa). Serviciile bazate pe locația terminalului mobil pot constitui surse de venituri importante pentru operatorii de comunicații mobile sau pentru companii specializate și sunt de o mare diversitate: transmiterea de mesaje publicitare, monitorizarea în timp real a deplasării unei flotile de vehicule rutiere, difuzarea de informații de trafic (străzi aglomerate, drumuri blocate, accidente etc.) pentru fluidizarea acestuia, difuzarea de informații privind gradul de ocupare și tarifele hotelurilor din apropiere etc.

### 3.1 - Tehnici de localizare

Standardele pentru comunicații celulare mobile nu au fost elaborate cu obiectivul de a determina poziția terminalelor cu precizia cerută de directiva E911. Cea mai precisă informație despre poziția unui terminal mobil este cea privind celula în care se află acesta, identitatea celulei curente (BSIC – Base Station Identification Code) fiind transmisă ca informație generală pe canalul de control de difuzare (CBCCH – Cell Broadcast Control Channel). Rețeaua ține evidența locației terminalelor în cele două baze de date principale: în HLR – sub forma adresei registrului VLR pe aria căruia se află terminalul mobil, iar în VLR – sub forma adresei ariei de localizare (LAC – Location Area Code) în care se află terminalul mobil. Este evident că pentru atingerea unei precizii sporite în localizarea terminalelor mobile trebuie realizate modificări software sau/și hardware în structura rețelei celulare sau/și a terminalelor mobile.

În primul rând trebuie introdusă o entitate suplimentară în rețea care să gestioneze localizarea tuturor terminalelor mobile, entitate care, în cel mai simplu caz, este o bază de date periodic actualizată conținând pozițiile cu precizia dorită a terminalelor mobile. Acest *centru de localizare* poate fi dotat însă cu caracteristicile necesare pentru calculul acestor poziții și pentru declanșarea mecanismelor de actualizare periodică a lor. În funcție de tehnica prin care se determină pozițiile terminalelor mobile pot fi introduse în rețea și alte echipamente sau module software.

În funcție de localizarea și funcțiile echipamentului sau algoritmului de calcul al poziției mobilelor cu precizia dorită tehnicile de localizare se împart în două mari categorii:

- *Tehnici implementate la nivelul rețelei de comunicații.* Acestea utilizează echipamente și algoritmi incluse, de regulă, în unitățile BTS sau BSC. Prezintă avantajele unei creșteri modeste a prețului de cost (unitățile BTS, BSC fiind deja suficient de scumpe), al posibilității utilizării unor algoritmi puternici de calcul datorită puterii mari de calcul (procesor și memorie) existente în aceste entități și al aplicabilității la terminalele mobile existente în rețea, deoarece nu sunt necesare modificări la nivelul acestora. Au, însă, dezavantajul că pot realiza calculul poziției numai atunci când terminalul mobil se află în comunicație, deoarece este nevoie de

schimburi de informații între terminal și rețea; localizarea nu se poate realiza în perioada în care terminalul mobil nu este angajat într-o comunicație.

- *Tehnici implementate la nivelul terminalului mobil.* Aceste tehnici necesită modificări hardware și software ale terminalelor mobile care să le permită calculul poziției cu precizia dorită și transmiterea acestei informații către rețea. Implementarea lor conduce la creșterea costului terminalului mobil și nu pot utiliza algoritmi de calcul foarte performanți datorită puterii limitate de calcul disponibile la nivelul terminalului mobil. În plus, terminalele mobile existente în rețea nu pot beneficia de noua tehnică de localizare. Prezintă însă avantajul major că localizarea se poate efectua indiferent dacă terminalul mobil este angajat sau nu într-o comunicație. Informația de poziție poate fi obținută cu ajutorul unui receptor GPS (Global Positioning System) înglobat în terminalul mobil sau se poate calcula cu un algoritm dedicat prin schimburi de mesaje specifice cu entitățile fixe ale rețelei. În acest ultim caz, rolul terminalului mobil se poate reduce numai la culegerea informației primare despre localizare, efortul de calcul transferându-se către entitățile fixe ale rețelei (se spune că terminalul mobil asistă rețeaua în determinarea poziției lui). Oricare ar fi situația, informația privind poziția terminalului mobil trebuie transmisă prin mesaje specifice către centrul de localizare al rețelei celulare. În situația în care terminalul mobil asistă rețeaua celulară în determinarea poziției apar dezavantajele unui trafic de control sporit și al unei întârzieri mai mari, mai ales dacă informația de poziție este necesară și la nivelul mobilului.

Deși localizarea unui terminal mobil cu ajutorul unui receptor GPS se face cu o precizie foarte bună sunt încă rețineri în implementarea pe scară largă a acestei soluții. Motivele ar fi prețul de cost sporit al terminalului mobil și dependența totală de un sistem cu aplicații militare, în special, ce este deschis aplicațiilor publice fără garantarea disponibilității sistemului în orice moment. Alte dezavantaje precum indisponibilitatea sistemului în medii dens construite și în interiorul clădirilor sau eroarea mare de localizare în absența unor echipamente suplimentare s-au diminuat ca importanță în ultimul timp. Având în vedere că actualmente se depun eforturi pentru

integrarea într-un sistem unic a celor trei sisteme globale de poziționare prin satelit: GPS (S.U.A.), Galileo (Europa) și Glonass (Rusia) se estimează că pe termen lung localizarea terminalelor mobile folosind acest sistem integrat poate fi o soluție eficientă ca precizie, costuri și disponibilitate.

## **3.2 - Parametri utilizați pentru calculul poziției**

### **3.2.1 - Identitatea celulei**

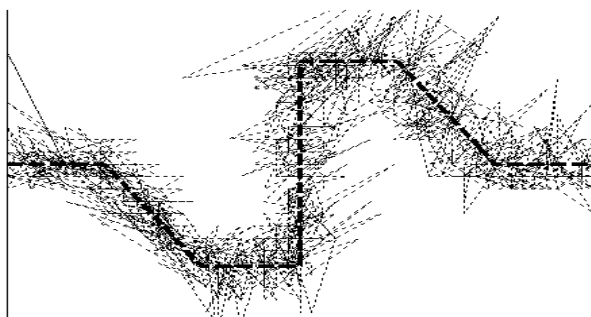
Informația privind identitatea celulei (BSIC) pe care terminalul mobil o obține de pe canalul de control CBCCCH (Cell Broadcast Common Control Channel), dacă este transmisă rețelei, permite acestuia localizarea la nivel de celulă a terminalului mobil. Din păcate această localizare este cu precizie scăzută mai ales în zonele rurale unde celulele sunt de arie foarte mare. Eroarea de poziționare poate fi micșorată prin tehnici speciale, de exemplu, prin utilizarea informației suplimentare privind sectorul celulei în care se află mobilul (dacă celula este sectorizată). În general, însă, eroarea de poziționare nu este satisfăcătoare de mică pentru marea majoritate a aplicațiilor.

### **3.2.2 - Nivelul măsurat al puterii recepționate de mobil**

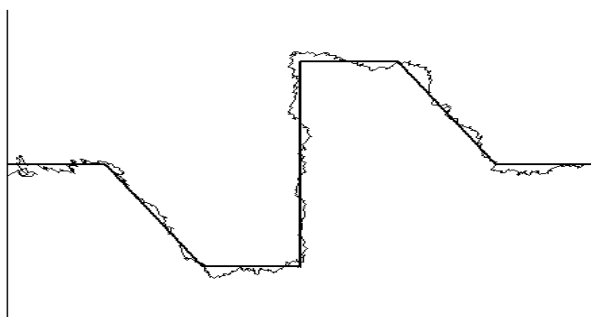
Potrivit standardului un mobil angajat într-o comunicație realizează periodic măsurători ale nivelului semnalului recepționat pe canalul pilot al celulei în care se află și pe canalele pilot ale celulelor învecinate. Rezultatele acestor măsurători sunt transmise către rețea. Dacă admitem că antenele stațiilor de bază sunt omnidirecționale, că aria celulei este plană și că propagarea undelor radio se face identic în toate direcțiile din spațiu, atunci curbele de nivel constant în jurul unei stații de bază sunt cercuri și intersecția cercurilor corespunzătoare la trei stații de bază pentru nivele de putere raportate de mobil furnizează poziția mobilului. Din păcate, propagarea undelor radio într-un mediu real este departe de a respecta ipotezele de mai sus, astfel încât curbele de nivel constant al puterii recepționate au forme extrem de complicate și dificil de estimat. Mai mult, nivelul puterii la recepție este variabil în timp (fading) și se modifică în limite largi (20 – 40 dB) pe distanțe de ordinul unei zecimi de lungimi de undă. Mediarea pe un interval de timp mare a măsurătorilor raportate de mobil pot elimina erorile introduse de fading-ul rapid, însă cele introduse de fading-ul lent (datorat

efectului de umbrire, de exemplu) sunt greu de estimat și de eliminat. Localizarea cu precizia dorită terminalelor mobile folosind rezultatele măsurărilor puterii recepționate de acestea nu se poate realiza decât dacă se utilizează metode mai sofisticate de prelucrare a datelor de măsură, precum filtrarea Kalman, de exemplu.

Eroarea de localizare se poate reduce semnificativ introducând o filtrare Kalman asupra pozițiilor mobilului calculate direct pe baza nivelului măsurat al puterii recepționate de acesta. În figura 3.1 se prezintă traiectoria estimată a unui mobil pe baza puterii recepționate raportate de mobil. Se observă că prin filtrarea rezultatelor inițiale ale localizării traiectoria estimată a mobilului se apropie foarte mult de cea reală (reprezentată cu linie îngroșată în figură).



Localizarea mobilului pe baza puterii recepționate



Traiectoria rezultată după filtrare Kalman

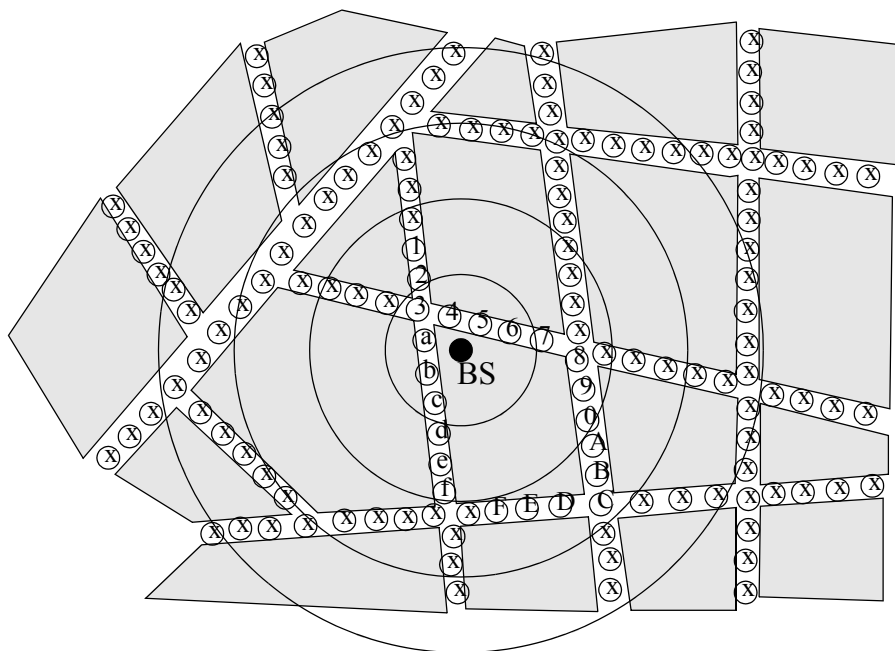
**Figura nr. 3.1** - Reducerea erorii de localizare prin filtrare Kalman

Există și propuneri de a memora într-o bază de date foarte mare rezultatele măsurărilor de putere raportate de mobile pe perioade mari de timp în funcție de locația calculată a acestora și de a construi, astfel, curbele de nivel constant al puterii recepționate, care vor apare într-o formă mult mai apropiată de cea reală. Pe lângă costul ridicat al soluției, apar și alte dezavantaje legate de volumul mare de informații de control ce trebuie vehiculate în sistem și întârzierea mare în determinarea poziției terminalului mobil datorată timpului mare de căutare într-o bază de date de asemenea dimensiuni. În plus, folosirea valorilor medii pe perioade mari de timp pentru a elimina fading-ul poate să conducă la erori mari de localizare atunci când mediul de propagare se modifică substanțial (precipitații intense, apariția/dispariția unei construcții, modificarea vegetației etc.).

O aplicație interesantă a principiului expus anterior constă în descrierea distribuției puterii recepționate de mobil pe aria celulei nu prin curbe de nivel constant, ci prin segmente de traiectorii de lungime convenabil aleasă. La descrierea prin valori în puncte discrete a variației puterii recepționate de-a lungul segmentului se pot adăuga și alți parametri (avansul de sincronizare, identitatea celulei, codul ariei de localizare etc.) care să individualizeze segmentul în raport cu alte segmente. Ansamblul acestor parametri formează *amprenta* segmentului respectiv. Centrul de localizare al rețelei compară șirul de date conținând parametrii mășurați de mobilul monitorizat cu amprentele tuturor segmentelor de traiectorie pe care le are memorate în baza de date. Se consideră că poziția mobilului este pe acel segment pentru care diferența datelor măsurate față de amprenta lui este minimă. Având în vedere că deplasarea mobilului se face pe o traiectorie continuă procesul de localizare poate fi optimizat prin minimizarea diferenței față de amprentele unei succesiuni de segmente. Procesul de stabilire a traiectoriei mobilului este similar celui utilizat de detectorul Viterbi (asemănare maximă) pentru a stabili succesiunea optimă de stări ale unui semnal.

În figura 3.2 se prezintă o posibilă segmentare a traiectoriilor mobilelor pe aria unei celule urbane. Aria celulei este divizată în zone circulare de avans de sincronizare constant în jurul stației de bază. Un mobil ce se deplasează succesiv pe segmentele 1-2-3-4-5-6-7-8-9-0-A-B-C-D-E-F poate fi localizat cu bună precizie urmărind asemănarea (maximă) a șirului de date de măsurate cu amprentele segmentelor de traiectorie memorate în

baza de date. Volumul de date explorat pe parcursul căutării este mult micșorat de includerea în amprenta unui segment a identității celulei și a avansului de sincronizare. Algoritmul de localizare poate corecta ușor eventualele erori prin observarea unor succesiuni imposibile de segmente. În exemplul din figură, dacă succesiunea rezultată din calcul este 1-2-3-4-5-b-7-8-9-0-e-B-C-D-E-F se poate detecta ușor că succesiunile 5-b-7 și 0-e-B sunt fizic imposibile și, deci, se pot corecta.

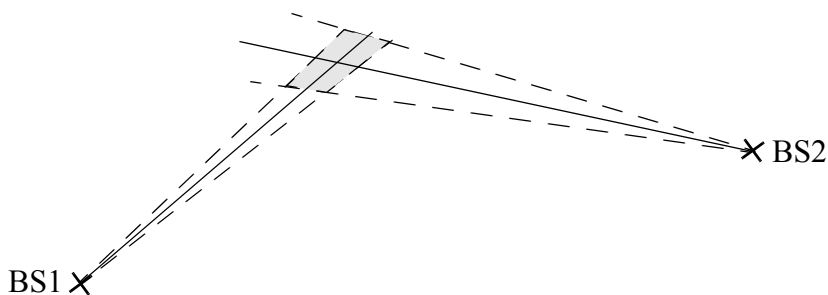


**Figura nr. 3.2** - Localizarea terminalului mobil cu ajutorul amprentelor segmentelor de traiectorie

Utilizarea valorilor măsurate ale puterii recepționate pentru localizarea mobilelor se poate introduce cu costuri mici în rețelele GSM deoarece aceste date sunt oricum vehiculate în rețea (potrivit standardului) și trebuie numai dezvoltată o unealtă software de prelucrare adecvată a lor la nivelul rețelei fără a face modificări în structura terminalului mobil. Precizia de localizare rămâne însă scăzută și metoda poate fi recomandată doar pentru

aplicații nepretențioase (eventual în combinație cu cea precedentă care utilizează identitatea celulei).

Și în rețelele UMTS există posibilitatea utilizării puterii măsurate la recepție pentru localizarea terminalelor mobile deoarece fiecare celulă transmite cu o putere constantă de 33 dBm pe un canal propriu (CPICH – Common Pilot Channel). Din cauza benzii de frecvență mai largi a canalului eliminarea fading-ului rapid prin medierea măsurărilor este mai eficientă, însă pot exista zone în care terminalele mobile să nu recepționeze un număr suficient de stații de bază pentru efectuarea calculelor de localizare (din cauza atenuării de propagare mult mai mari).



**Figura nr. 3.3 - Localizarea terminalelor mobile pe baza direcției de sosire a unei radio**

### 3.2.3 - Direcția de sosire a unei radio (AoA – Angle of Arrival)

Dacă stațiile de bază sunt echipate cu șiruri de antene acestea au posibilitatea să determine direcția din care sosește unda emisă de terminalul mobil. Într-un mediu plan sunt suficiente doar două stații de bază pentru a localiza un terminal mobil și acesta este principalul avantaj al metodei. Eroarea de localizare depinde de eroarea de măsurare a direcției de sosire a unei radio și crește pe măsură ce crește distanța față de stația de bază (figura 3.3). În plus, metoda presupune că se recepționează numai unda directă și, deci, este de neutilizat în medii urbane dens construite unde unda directă nu se recepționează pe o fracțiune importantă din aria celulei și este însoțită și de un număr mare de unde multiplu reflectate. În mediul rural unda directă se recepționează pe o fracțiune importantă din aria celulei, iar numărul mic de stații de bază necesar efectuării calculelor de localizare poate constitui un

avantaj esențial pentru astfel de medii. În sfârșit, metoda este mai utilă în rețele UMTS, decât în cele GSM din două considerente: i) unda directă este mult mai prezentă pe aria unei celule UMTS decât pe cea a unei celule GSM și ii) sunt puține implementări de stații de bază GSM cu șiruri de antene, pe când prezența unui șir de antene la nivelul stațiilor de bază este o regulă în rețelele UMTS.

### **3.2.4 - Timpul de sosire a undei radio (ToA – Time of Arrival)**

Dacă terminalele mobile și stațiile de bază din rețea sunt sincronizate (au aceeași referință de timp) și dacă emițătorul introduce în semnalul emis un marker de timp care să indice receptorului momentul emisiei, atunci acesta poate calcula timpul necesar undei radio pentru a parcurge distanța emițător-receptor și, de aici, valoarea acestei distanțe. Calculul se poate efectua la nivelul terminalului mobil (calea directă) sau la cel al stației de bază (calea inversă); dezavantajul în primul caz este că sunt necesare modificări în structura terminalului mobil, iar în al doilea caz – că localizarea este posibilă numai pe timpul unei comunicații a terminalului mobil. Se contează de fiecare dată pe recepția undei directe. Curbele de distanță dată în jurul receptorului sunt cercuri, astfel că este nevoie, în plan, de trei stații de bază pentru localizarea fără ambiguitate a terminalului mobil.

Dacă terminalele mobile nu sunt sincronizate se pot măsura doar diferențele timpilor de sosire (TDoA – Time Difference of Arrival) a undelor radio la (sau de la) două stații de bază (acestea trebuie să aibă aceeași referință de timp, furnizată, de regulă, de un receptor GPS încorporat). Curbele de distanță constantă sunt hiperbole, astfel că este nevoie de măsurători în raport cu patru stații de bază pentru localizarea fără ambiguitate a terminalului mobil.

Această metodă este recomandată, în forma diferențială, de standardul GSM. Calculele sunt efectuate la nivelul stațiilor de bază și, pentru măsurarea diferențelor necesare de timpi de sosire, terminalul mobil este forțat să solicite transferul comunicației către un număr de stații de bază. Pentru aceasta el este nevoit să transmită salve de acces către aceste stații de bază, marcate corespunzător cu momentul emisiei.

Se poate renunța la funcționarea sincronizată a stațiilor de bază (cerință nestandard pentru rețelele GSM) dacă se introduce în rețea, într-o locație cunoscută, un receptor de referință care măsoară timpii de sosire a

semnalelor de la diverse stații de bază și calculează diferențele de timp dintre semnalele lor de tact. Rezultatele acestor măsurători sunt transmise entității care efectuează calculele de localizare (mobil, stație de bază sau centru de localizare) care corectează rezultatele măsurătorilor directe cu diferențele comunicate de receptorul de referință. Metoda se numește a *diferențelor observate a timpilor de sosire* (OTDoA – Observed Time Difference of Arrival) – atunci când calculul poziției mobilului se realizează de către acesta și, respectiv, metodă *îmbunătățită bazată pe diferența observată a timpilor de sosire* (E-OTD – Enhanced Observed Time Differences), atunci când calculul poziției mobilului se realizează de către centrul de localizare al rețelei. Eroarea de localizare depinde, evident, de eroarea de măsură a timpilor de sosire, însă este influențată puternic și de alți factori precum absența unde directe, prezența unui număr prea mare de unde reflectate sau distribuția geografică a stațiilor de bază în jurul terminalului mobil.

La durata de cca 3,69  $\mu$ s a bitului de informație în rețelele GSM, dacă se efectuează câte o măsurătoare pe durata unui bit, rezultă o eroare de estimare a distanței emițător-receptor de cca 554 metri. În rețelele UMTS, durata unui *chip* este de cca 0,26  $\mu$ s, ceea ce conduce la o eroare de estimare a distanței de cca 78 metri. În condițiile în care se fac patru măsurători pe fiecare durată de bit (supraeșantionare), respectiv *chip*, eroarea de măsură scade la cca 277 metri în GSM și, respectiv, 19,5 metri în UMTS.

Rețelele UMTS standard au implementată facilitatea de calcul al poziției mobilelor la nivelul nodurilor RNC de servire, calcul ce se realizează pe baza diferențelor de timpi de sosire în cazul UTRAN TDD (nodurile RNC fiind sincronizate) și pe baza diferențelor observate a timpilor de sosire în cazul UTRAN FDD (nodurile RNC nefiind sincronizate). Operatorul poate permite și realizarea calculelor de localizare la nivelul mobilelor dacă acestea au această facilitate încorporată. Eventuala sincronizare a nodurilor RNC în UTRAN FDD trebuie făcută cu mare acuratețe deoarece o eroare de sincronizare de 10 nanosecunde conduce la erori de localizare de cca 3 metri.

Din cauza controlului puterii de emisie (obligatoriu pentru eliminarea efectului de apropiere) în rețelele UMTS, terminalele mobile care se află foarte aproape de o stație de bază nu mai au posibilitatea să recepționeze și semnalele pilot de la alte stații de bază, poziționarea devenind imposibilă din cauza numărului prea mic de stații de bază în raport cu care se pot face măsurători. Pentru evitarea acestor situații standardul UMTS definește un

mod de special de funcționare al stațiilor de bază în care în una din ferestrele timp dintr-un cadru de 10 milisecunde stația de bază proprie nu emite (IPDL – Idle Period DownLink) și, ca urmare, unitățile mobile din acea celulă au posibilitatea să recepționeze semnalele pilot de la stațiile de bază vecine și să măsoare diferențele de timpi de sosire. Ferestrele IPDL se pot organiza și grupat, dar nu în fiecare cadru. De asemenea, ferestrele IPDL se pot defini pentru a apare simultan în toate celulele (TA-IPDL – Time-Aligned IPDL).

### **3.2.5 - Metode hibride**

Utilizarea simultană a doi parametri pentru localizarea terminalelor mobile poate constitui o soluție pentru creșterea preciziei de localizare sau pentru evitarea situațiilor în care localizarea nu este posibilă. De exemplu, în celulele UMTS din zonele rurale este foarte posibil ca pe o mare parte din aria unei celule să nu poată fi recepționată mai mult de una din stațiile de bază vecine din cauza distanțelor mari care le separă și nici una din tehnicile de localizare nu poate furniza o soluție. Dar dacă pe lângă algoritmul OTDoA implementat în mod standard se utilizează și algoritmul AoA localizarea mobilelor devine posibilă. De remarcat că utilizarea acestei metode hibride nu presupune modificări ale echipamentului stației de bază, aceasta fiind dotată în mod standard cu șir de antene care permite măsurarea AoA pe baza unui pachet software specializat.

De asemenea, în aceleași zone rurale localizarea terminalelor mobile devine posibilă chiar și în situația în care se recepționează numai stația de bază proprie, dacă la informația privind AoA se adaugă timpul total de propagare stație de bază – mobil – stație de bază (RTT – Round Trip propagation Time) având în vedere că unda directă este recepționată pe toată aria celulei.

În sfârșit, pentru celulele desfășurate de-a lungul unei autostrăzi poziția mobilului furnizată de algoritmul AoA este afectată de erori foarte mari din cauza așezării în linie a stațiilor de bază. Utilizarea simultană a algoritmului OTDoA poate micșora semnificativ eroarea de localizare.

Aceeași combinație de algoritmi permite micșorarea erorii de localizare și în zonele în care unda directă este mai puțin sau de loc prezentă.

Implementarea metodelor hibride implică costuri mai mari de localizare, dar și eroarea de localizare devine mai mică.