

Método Basado en Multilateración para Geolocalización y Sincronización en Redes UMTS

Juan Antonio García Fernández⁽¹⁾, Antonio Jurado Navas⁽¹⁾, Mariano Fernández Navarro⁽¹⁾, Carlos Úbeda⁽²⁾
jagf@ic.uma.es, navas@ic.uma.es, mariano@ic.uma.es, carlos.ubeda@ericsson.com

⁽¹⁾Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga, Campus Teatinos s/n 29071

⁽²⁾Ericsson, Madrid, 28033

Abstract—In this work, a method in order to jointly estimate the position of the different User Equipments (UEs) and the Relative Time Differences (RTDs) between base stations in UMTS networks is proposed. This method is based on the hyperbolic multilateration technique defined from the Time Differences of Arrival (TDOAs) and the resolution of a nonlinear system of equations. A comparative study between two well-known iterative algorithms, Gauss-Newton and Levenberg-Marquardt, is obtained by employing real data collected from drive tests in urban and sub-urban areas. The accuracy of the obtained results is mainly related to multipath errors associated with the measurements carried out by UEs, and with errors introduced by the numerical method. By considering that, it can be concluded that Levenberg-Marquardt gives better results, providing faster convergence, higher accuracy and more robustness, provided that its parameters are properly optimized.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los servicios basados en localización para dispositivos móviles involucran la habilidad de estimar su localización geográfica y proveer servicios basados en esta información. Lo más atractivo de estos servicios es que los usuarios no necesitan aportar información manualmente ni contribuir en ningún sentido para ser localizados [1], todo se lleva a cabo automáticamente a partir de los datos recabados por la red. Asimismo, la localización tiene otros entornos de aplicabilidad de especial relevancia desde un punto de vista más interno: la gestión, planificación y optimización de la propia red [2]. Estas tareas abarcan acciones de notable interés para las operadoras, tales como la localización de fallas dentro del área de cobertura de una estación base, la detección de la trayectoria para planificar el comportamiento óptimo de los HO (*handovers*) o el uso de sistemas de cobertura adaptativos.

Uno de las técnicas de geolocalización más empleadas en redes UMTS es conocida como OTDOA (*Observed Time Difference of Arrival*) [3], la cual está basada en la información reportada por los MRs (*Measurement Reports*) enviados desde los UEs (*User Equipments*) a la red móvil. El principal problema de esta técnica es que se necesita conocer la sincronización relativa entre las estaciones bases (RTD, del inglés *Relative Time Difference*) de la red, ya que UMTS es una red asíncrona. Entonces, se requieren equipos especiales llamados LMUs (*Location measurement Units*) para llevar a cabo el cálculo de las RTDs que se almacenarán posteriormente en una base de datos. No obstante, estos datos deben ir actualizándose de forma periódica a causa de las derivas temporales [3].

En el estado de la técnica se han propuesto métodos iterativos y no iterativos para la geolocalización mediante OTDOA, pero suponiendo las RTDs conocidas [4] o apoyándose en otros parámetros como el RTT (*Round Trip Time*) [5].

El principal objetivo que se establece en este trabajo es el desarrollo y verificación con datos reales de un método basado en OTDOA que estime conjuntamente la posición de los UEs y las RTDs sin la necesidad de LMUs. El impacto de evitar la utilización de estos equipos es un considerable ahorro económico para las operadoras de telecomunicaciones. El método propuesto hace uso del parámetro T_M incluido en los MRs [6], el cual representa el offset restante entre tramas una vez que se ha restado el offset integral del offset total entre una trama del DPCH (*Dedicated Physical Channel*) de la estación base servidora y las tramas del P-CCPCH (*Primary Physical Common Control Channel*) de las estaciones bases vecinas. Asimismo, el parámetro T_M tiene una resolución de 1 chip y un rango que va desde 0 hasta 38399 chips [7].

Un segundo objetivo consiste en comparar las prestaciones de dos métodos numéricos, Gauss-Newton (GN) y Levenberg-Marquardt (LM), que resuelvan el sistema de ecuaciones no lineales obtenido a partir del corte de hipérbolas.

El resto del documento se divide en cuatro apartados: la sección II presenta el método de multilateración hiperbólica, la sección III se centra en el sistema de ecuaciones no lineales, la sección IV muestra los resultados alcanzados y, por último, la sección V recoge las conclusiones extraídas del trabajo.

II. MULTILATERACIÓN EN REDES ASÍNCRONAS

El método OTDOA utiliza la diferencia entre las señales procedentes de un UE a distintos pares de estaciones base. Entonces, la posición del UE queda recogida a lo largo de una hipérbola. No obstante, se requiere la intersección de, al menos, dos hipérbolas para obtener la estimación de la posición del terminal móvil, lo cual se traduce en que el móvil debe reportar un mínimo de tres estaciones bases. Este método basado en utilizar la intersección de múltiples hipérbolas (o hiperboloides) es conocido como multilateración.

En la siguiente descripción se considera el término *site* como sinónimo de estación base, y se define un *evento* como un suceso de interés en la red UMTS, de hecho un MR es un tipo de evento. De esta forma, el método de geolocalización propuesto determina las posiciones de estos eventos.

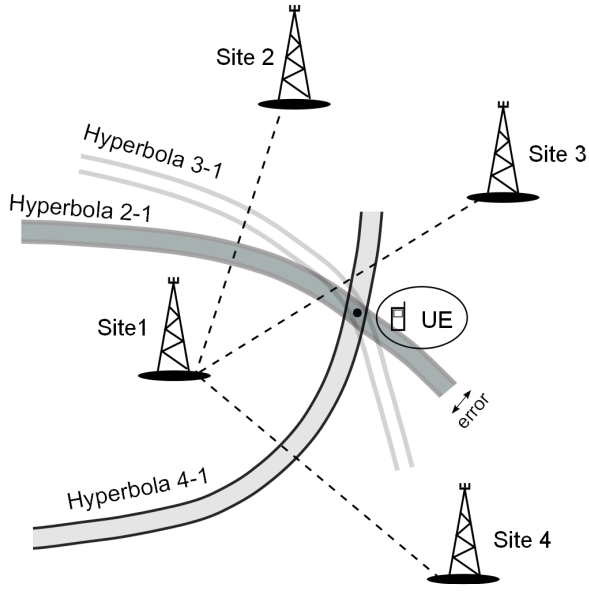


Fig. 1. Técnica de multilateración.

En este contexto, la característica de asincronicidad en UMTS obliga a que la RTD tiene que ser considerada como una incógnita más del problema. Por tanto, la situación para un evento se resume en que se necesita calcular su posición dada por las coordenadas cartesianas x e y , además de las RTDs de las estaciones base que esté reportando. De este modo, un evento genera una ecuación nueva a partir del segundo site reportado, ya que el primero sirve como referencia para hacer la diferencia de tiempos. Esto conduce a la conclusión de que por cada nueva ecuación que introduzca un evento se introduce una nueva incógnita dada por la nueva RTD añadida del nuevo site. No obstante, juntando las ecuaciones de varios eventos se puede llegar a obtener un sistema resoluble de ecuaciones. La única condición que deben cumplir los eventos es que el número de sites que reporten sea, al menos, 4 ($N_S \geq 4$, siendo N_S el número de sites reportados). Este hecho difiere con el método OTDOA clásico, en el cual solo se necesitaban 3 sites. En definitiva, se requieren eventos que estén “viendo” 4 sites y que, por ende, generen tres hipérbolas cada uno, tal y como se muestra en la Figura 1, donde también se destaca que las medidas de tiempos están afectadas por diversas fuentes de error (multicamino, redondeo...) generando un área de incertidumbre.

Por lo tanto, si se define que el i -ésimo evento está localizado en $\mathbf{x} = [x_i, y_i]$ y los sites en $\mathbf{x}_{S_j} = [x_{S_j}, y_{S_j}]$, $j \in 1, 2, \dots, N_S$, entonces la distancia entre el evento y los sites viene dada, según [6], por

$$d_i[j] = \sqrt{(x_{S_j} - x_i)^2 + (y_{S_j} - y_i)^2}. \quad (1)$$

Ahora, para generar una hipérbola se necesita una diferencia de distancias constante, así que tomando dos sites como focos y el evento como un punto de la hipérbola, se puede definir dicha curva hiperbólica como

$$d_i[1, j] = d_i[1] - d_i[j] = \sqrt{(x_{S_1} - x_i)^2 + (y_{S_1} - y_i)^2} - \sqrt{(x_{S_j} - x_i)^2 + (y_{S_j} - y_i)^2}. \quad (2)$$

A continuación, se introduce el parámetro T_M y la RTD. La ecuación resultante viene dada, según [6], por

$$d_i[1, j] = \frac{T_{M_i}[j, 1] + RTD[1, j]}{\rho}, \quad (3)$$

siendo ρ un parámetro para la conversión de chips a metros (1 metro corresponde a 0.0128 chips en UMTS), ya que T_M y RTD están expresados en chips.

Tras estas explicaciones, se tiene todo lo necesario para construir el sistema de ecuaciones no lineal. Cada evento que se incluye aporta 3 ecuaciones (una por cada hipérbola generada) y 5 incógnitas. Ahora bien, las incógnitas RTDs son las mismas para todos los eventos, por lo que teniendo como mínimo 3 eventos en el escenario se puede construir un sistema resoluble. Este sistema tiene 9 ecuaciones y 9 incógnitas (las coordenadas de los 3 eventos y las 3 RTDs) y viene dado por

$$\begin{cases} T_{M_1}[2, 1] = (\rho \cdot d_1[1, 2] + RTD[2, 1]) \\ T_{M_1}[3, 1] = (\rho \cdot d_1[1, 3] + RTD[3, 1]) \\ T_{M_1}[4, 1] = (\rho \cdot d_1[1, 4] + RTD[4, 1]) \\ T_{M_2}[2, 1] = (\rho \cdot d_2[1, 2] + RTD[2, 1]) \\ T_{M_2}[3, 1] = (\rho \cdot d_2[1, 3] + RTD[3, 1]) \\ T_{M_2}[4, 1] = (\rho \cdot d_2[1, 4] + RTD[4, 1]) \\ T_{M_3}[2, 1] = (\rho \cdot d_3[1, 2] + RTD[2, 1]) \\ T_{M_3}[3, 1] = (\rho \cdot d_3[1, 3] + RTD[3, 1]) \\ T_{M_3}[4, 1] = (\rho \cdot d_3[1, 4] + RTD[4, 1]). \end{cases} \quad (4)$$

En el caso de tener más de tres eventos, el sistema de ecuaciones estaría sobredeterminado. Esta característica proveería de más redundancia al sistema permitiendo conseguir una mayor precisión, pero también incrementaría la complejidad del problema.

III. RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES

El objetivo es encontrar las posiciones de los eventos y las RTDs que minimicen una función de coste dada por la diferencia de las medidas reales y los valores estimados por el modelo presentado en la sección anterior. Concretamente, se emplea un criterio de mínimos cuadrados [4], ya que en un proceso estocástico, donde las medidas están sujetas a errores estocásticos desconocidos, la optimización mediante la norma euclídea es la mejor aproximación si estos errores son independientes [8]. Por lo tanto, la función de coste (llamada residuo) queda definida como

$$\varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{RTD}) = \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{T}_{M_i} - \widetilde{\mathbf{T}}_{M_i}(x_i, y_i, \mathbf{RTD}) \right)^T \cdot \left(\mathbf{T}_{M_i} - \widetilde{\mathbf{T}}_{M_i}(x_i, y_i, \mathbf{RTD}) \right), \quad (5)$$

donde N es el número de eventos, \mathbf{x} e \mathbf{y} son vectores con las coordenadas cartesianas de los eventos, y \mathbf{RTD} contiene las

diferencias relativas de tiempo con respecto al site de referencia. Por otra parte, \mathbf{T}_{M_i} es un vector que almacena las medidas reales, de la forma $\mathbf{T}_{M_i} = [T_M[2, 1], T_M[3, 1], T_M[4, 1]]$. Finalmente, $\widetilde{\mathbf{T}}_{M_i}$ representa un vector que incluye los valores estimados para cada evento.

En general, no hay solución cerrada para (3). Por este motivo, se propone el uso de un método iterativo que vaya generando soluciones aproximadas a partir de semillas iniciales, que se representan $(\mathbf{x}^{(0)}, \mathbf{y}^{(0)}, \mathbf{RTD}^{(0)})$. Previamente, es necesario linealizar las ecuaciones para los i -ésimos eventos mediante series de Taylor, obteniendo

$$\widetilde{\mathbf{T}}_{M_i} \approx \widetilde{\mathbf{T}}_{M_i} \left(x_i^{(0)}, y_i^{(0)}, \mathbf{RTD}^{(0)} \right) + \mathbf{A}_i(x_i, y_i) \Big|_{\substack{x_i=x_i^{(0)} \\ y_i=y_i^{(0)}}} \cdot (\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_i^{(0)})^T, \quad (6)$$

en la que \mathbf{z}_i , y la matriz Jacobiana, $\mathbf{A}_i(x_i, y_i)$, son dadas por

$$\mathbf{z}_i = ([x_i][y_i][\mathbf{RTD}])^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_i = [\mathbf{A}_{ix} \ \mathbf{A}_{iy} \ \mathbf{B}], \quad (8)$$

con \mathbf{B} siendo una matriz identidad de tamaño $(N_S - 1) \times (N_S - 1)$ que sirve para representar las derivadas parciales de (4) con respecto a las RTDs, mientras que \mathbf{A}_{ix} y \mathbf{A}_{iy} indican las derivadas parciales con respecto a las coordenadas cartesianas de la forma

$$\mathbf{A}_{ix} = \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{x_i - x_{S_2}}{d_2} - \frac{x_i - x_{S_1}}{d_1} \\ \frac{x_i - x_{S_3}}{d_3} - \frac{x_i - x_{S_1}}{d_1} \\ \vdots \\ \frac{x_i - x_{N_S}}{d_{N_S}} - \frac{x_i - x_{S_1}}{d_1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde $\mathbf{d}_i = [d_i[1, 2], d_i[1, 3], \dots, d_i[1, N_S]]$, y $d_i[1, j]$ fue definido en (2). La expresión de \mathbf{A}_{ix} es equivalente a (9) y se ha omitido por simplicidad.

A. Gauss-Newton

El método de Gauss-Newton (GN) es una mejora del método de Newton para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales, ya que evita hacer uso de la inversa de la matriz Hessiana. Esto permite reducir considerablemente el coste computacional y conseguir que el método tenga una rápida convergencia. En concreto, GN busca el mínimo de una función no lineal siguiendo direcciones descendentes establecidas por su primera y segunda derivada. Además, GN requiere buenos valores iniciales para proveer estimaciones precisas y convergencia rápida; en caso contrario, existe riesgo de alcanzar un mínimo local en la función de coste o diverger.

El procedimiento GN se resume en

$$\left(\mathbf{z}_i^{(k+1)} \right) = \left(\mathbf{z}_i^{(k)} \right) + (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \left(\mathbf{T}_M - \widetilde{\mathbf{T}}_M(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{RTD}) \right), \quad (10)$$

donde, en la primera iteración representada por $k = 1$, el sistema es inicializado empleando $\mathbf{x}^{(0)}, \mathbf{y}^{(0)}, \mathbf{RTD}^{(0)}$.

B. Levenberg-Marquardt

Levenberg-Marquardt (LM) es un método de gradiente descendente híbrido entre GN y el método de descenso de la máxima pendiente (SD, del inglés *Steepest Descent*). La idea es minimizar los defectos de ambos algoritmos. Por eso, LM es una permanente elección entre la dirección de GN y la de SD, o alguna entre ambas. Para ello, se introduce el parámetro de amortiguación $\lambda > 0$, el cual se añade a los elementos de la diagonal principal de la matriz pseudo-Hessiana con el propósito de hacerla bien condicionada e invertible. Cuando λ se acerca a cero, el método se acerca a GN, que funciona bien en las cercanías de la solución. Para valores grandes de λ , el método produce pequeños pasos en la dirección negativa del gradiente, como SD.

Por tanto, la estrategia seguida por LM es

$$\left(\mathbf{z}_i^{(k+1)} \right) = \left(\mathbf{z}_i^{(k)} \right) + \left(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^{(k)} \mathbf{I} \right)^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \left(\mathbf{T}_M - \widetilde{\mathbf{T}}_M(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{RTD}) \right), \quad (11)$$

siendo \mathbf{I} la matriz identidad.

IV. RESULTADOS

En esta sección se procede a la evaluación del algoritmo propuesto comparando el rendimiento ofrecido por los métodos GN y LM. El estudio se ha realizado sobre dos áreas reales con datos reales, una sub-urbana en Europa y otra urbana en Norteamérica. Es importante tener en cuenta que las diferentes características de ambas áreas (probabilidad de multitrayecto, número de sites reportados por evento, geometría de los escenarios, distancias, ...) tendrán impacto sobre la precisión y calidad de los resultados.

La precisión se mide comparando las localizaciones reales de los eventos obtenidas en un Drive Test con las estimaciones devueltas por el algoritmo. La visualización de estos resultados se representa con una función de distribución acumulada (CDF) del error de distancia. La Figura 2 muestra la comparación entre GN y LM para las zonas urbana y sub-urbana.

A partir de los resultados se extrae que LM ofrece mejores estimaciones de la posición en la zona suburbana de Europa que GN. Sin embargo, en la zona urbana este comportamiento parece invertirse a partir del 50% de los eventos. Una de las razones del comportamiento tan dispar de LM es que el parámetro λ se ha optimizado según las pruebas realizadas en la parte suburbana. Por tanto, esto también justifica la divergencia de LM en EE.UU., ya que si los pasos adaptativos por los que se caracteriza LM han sido definidos para entorno suburbanos, entonces en entornos urbanos puede ocurrir que sean demasiado grandes y haga diverger las posiciones. Otro factor relevante es el número de eventos que se han considerado para generar cada curva. En Europa, se han utilizado 137 eventos, mientras en EE.UU. hubo 41 eventos de Drive Test para comparar. Asimismo, la zona suburbana debería ofrecer resultados más estables y fiables. La razón es que normalmente los MRs de estas zonas tienen menos errores que en las urbanas, donde el efecto multitrayecto es más crítico.

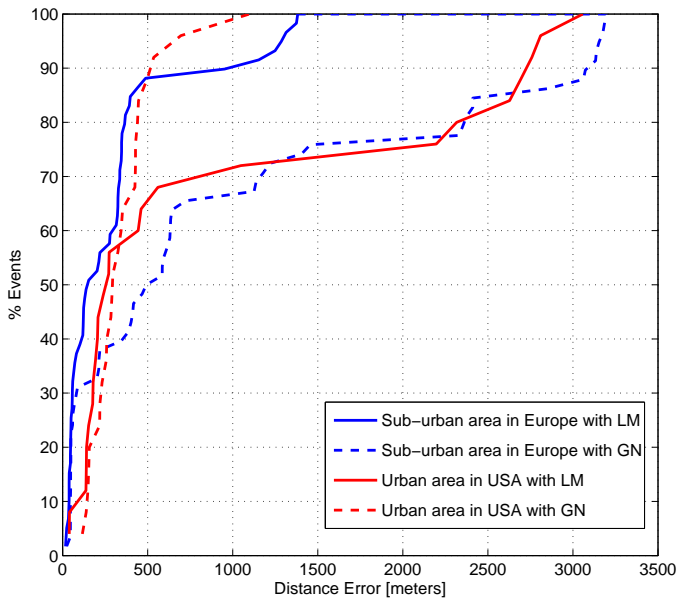


Fig. 2. CDF que representa la comparativa de geolocalización de eventos entre LM y GN, y entre zona urbana y suburbana. La zona suburbana (color azul) pertenece a Europa y la urbana (color rojo) a USA. Los eventos utilizados son aquellos que reportan al menos 4 sites, es decir, que forman parte de un escenario básico para aplicar el algoritmo.

Una vez ejecutado todo el algoritmo por completo, se logra conocer la sincronización entre sites. Esto quiere decir que ahora es posible quitar las RTDs como incógnitas del sistema de ecuaciones (4) y, por tanto, resolver la posición de eventos que tan solo vean 3 sites. Este procedimiento sirve para dar una idea de lo precisas que resultan ser las estimaciones de las RTDs, si el nivel de precisión resultó ser pobre, este efecto repercutirá en la posición por simple arrastre del error. Si la estimación de la posición del evento que reporta 3 sites resulta ser buena, entonces significa que las RTDs que se han fijado también tenían que ser bastante precisas. La Figura 3 muestra los resultados de estos eventos con el algoritmo propuesto.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un algoritmo para geolocalizar UEs y calcular la sincronización entre Nodos B en una red UMTS de forma simultánea. El procedimiento deriva en un sistema de ecuaciones no lineal que debe ser resuelto mediante un método numérico iterativo. De hecho, se han analizado y comparado dos métodos, GN y LM.

Las pruebas del algoritmo se han realizado con medidas reales de redes 3G reales, en concreto en un área suburbana y una urbana. Los resultados han mostrado que la precisión obtenida es buena para el objetivo principal fijado para este método de geolocalización, situándose por debajo de los 500 m de error en el 50% de los eventos para todos los casos. Se recuerda que el propósito principal del algoritmo es proporcionar una estimación de zonas dentro de una celda en las que se produzcan fallos en la red (cobertura, interferencias,...). Además, se ha llegado a la conclusión de que LM consigue

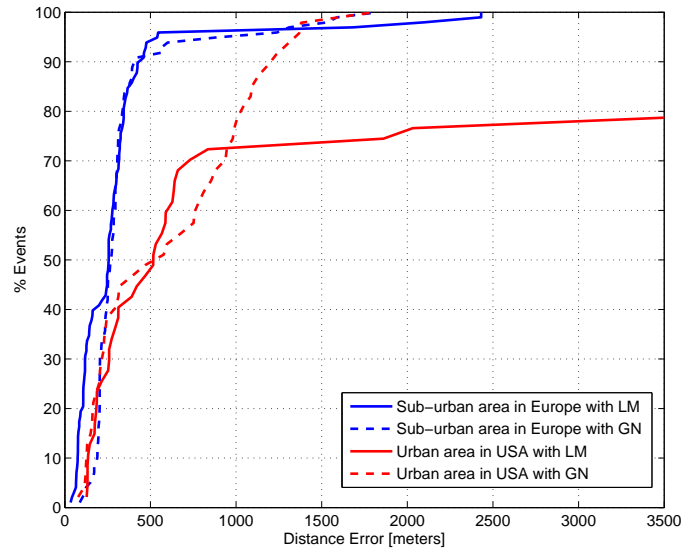


Fig. 3. CDF de eventos que reportan 3 sites y que han sido resueltos uno a uno previo conocimiento de las RTDs. Se representa la comparativa de geolocalización entre LM y GN, y entre zona urbana y suburbana. La zona suburbana (color azul) pertenece a Europa y la urbana (color rojo) a EE.UU.

una mejor aproximación de las posiciones gracias a los pasos adaptativos, lo cuales lo hacen oscilar entre GN y SD.

Por otro lado, se puede aprovechar el procedimiento anterior para fijar las RTDs estimadas y localizar los eventos que solo reportan 3 sites. Estos eventos se resuelven uno a uno, y la precisión de los resultados también estará directamente relacionada con la exactitud que se haya conseguido en las RTDs. La CDF obtenida muestra también un error de distancia por debajo de los 500 m en el 50% de los eventos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración y apoyo de Ericsson.

REFERENCIAS

- [1] P. Bellavista, A. Küpper, and S. Helal, "Location-based services: Back to the future," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, pp. 85–89, 2008.
- [2] S. Horsmanheimo, H. Jormakka, and J. Lähteenmäki, "Location-aided planning in mobile network," *Wireless Personal Communications*, vol. 30, pp. 207–216, 2004.
- [3] 3GPP, "Stage 2 functional specification of user equipment (UE) positioning in UTRAN," Tech Spec 25.305 - V6.1.0, 2003, (Release 1999).
- [4] C. Mensing and S. Plass, "Positioning algorithms for cellular networks using TDOA," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 4, 2006, pp. 513–516.
- [5] J. Stefanski, "Low cost method for location service in the WCDMA system," *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, vol. 14, pp. 626–634, 2012.
- [6] C. Úbeda, J. Romero, and J. Ramiro, "Evaluation of a time-delay based geolocation algorithm in real UMTS networks," in *Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications (IB2Com)*, 2010, pp. 1–4.
- [7] 3GPP, "Synchronization in UTRAN stage 2," Technical Specification 25.402 - V11.0.0, 2012, (Release 11).
- [8] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements," *IEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, pp. 41–53, 2005.