

Método Geométrico para Localização da Estação Móvel em Ambiente Interno Usando uma Estação Base da Rede Celular

Paulo Francisco da Conceição, Flávio Geraldo Coelho Rocha, Rodrigo Pinto Lemos

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Universidade Federal de Goiás (UFG)
Av. Universitária, 1488 – quadra 86 – Setor Leste Universitário, CEP: 74605-010
Goiânia, GO — Brasil

paulofrancisco@discente.ufg.br, flaviogcr@ufg.br, lemos@ufg.br

Resumo. *Este trabalho propõe um método de localização da Estação Móvel (EM) que usa somente uma Estação Base (EB) da rede celular. O método é capaz de analisar os vários caminhos de uma transmissão e identificar se há ou não presença de caminho com LoS, possibilitando assim determinar e aplicar automaticamente um método de localização adequado. O método proposto pode ser dividido em três etapas: (1) verificação da existência de caminho com LoS, (2) aplicação de método geométrico apropriado a cada tipo de condição (LoS ou NLoS) e (3) etapa de refinamento que determina a localização final da EM. Simulações e comparações feitas com trabalhos correlatos mostram que o método aqui proposto é rápido e eficaz, apresentando precisão submétrica.*

Abstract. *This work proposes a Mobile Station (MS) location method that uses a single Base Station (BS) of the cellular network. The method is capable of analyzing the various transmission paths and identifying whether or not there is an LoS path, thus making it possible to automatically determine and apply a suitable location method. The proposed method can be divided into three steps: (1) verification of the existence of an LoS path, (2) application of the appropriate geometric method for each type of condition (LoS or NLoS), and (3) fine-tuning step that determines the the precise location of MS. Simulations and comparisons made with related works show that the method proposed here is fast and effective, presenting submetric precision.*

1. Introdução

A transmissão de dados na faixa das ondas milimétricas (mmWave — *millimeter Wave*) e o uso massivo de antenas, tanto no transmissor quanto no receptor (MIMO — *Multiple-Input Multiple-Output*) são algumas das características presentes nas redes de comunicação de quinta geração (5G) [Fascista *et al.* 2021, Shahmansoori *et al.* 2018]. Essas características possibilitam maior precisão na estimação de parâmetros do canal de comunicação, como Tempo de Chegada (TOA — *Time of Arrival*), Ângulo de Partida (AoD — *Angle of Departure*) e Ângulo de Chegada (AoA — *Angle of Arrival*), o que permite aplicações que requerem localização precisa [Mendoza-Silva *et al.* 2019, Fascista *et al.* 2020].

Observando o cenário e perspectivas das redes 5G, pode-se afirmar que a alta precisão na localização será requerida ainda mais em ambientes internos, como nos

serviços relacionados à Internet das Coisas e à Indústria 4.0 [Kim Geok *et al.* 2021, Fellan *et al.* 2018]. Ainda outra aplicação de possível interesse tem relação com a acessibilidade de pessoas com deficiência visual. Neste caso a localização de forma precisa por meio da rede celular facilita o desenvolvimento de aplicativos para dispositivos móveis. Estes aplicativos conduzem o deficiente até seu destino de forma correta, proporcionando independência e qualidade de vida para essas pessoas [Al-kafaji *et al.* 2020].

Muito se tem pesquisado acerca de abordagens e métodos relacionados à localização da Estação Móvel (EM) em ambiente interno [Mendoza-Silva *et al.* 2019]. Entretanto, nota-se que alguns trabalhos estudam e aplicam recursos indisponíveis na EM e na rede celular, o que dificulta a viabilidade da aplicação [Cao *et al.* 2020, Shi e Ming 2016, Jeon *et al.* 2018]. Além disso, outros trabalhos apontam para exigência de linha de visada entre Estação Base (EB) e EM e ainda requerem o uso de várias EBs para proporcionar uma precisão de dezenas de metros [Shikur e Weber 2014, Zou e Liu 2020].

O método de localização proposto neste trabalho tem o diferencial de usar apenas a infraestrutura da rede celular, além de exigir somente uma EB para estimar a posição da EM, proporcionando uma precisão na ordem dos centímetros, mesmo na presença de propagação por multicaminhos NLoS (*Non Line of Sight*). Para isso, foram explorados aspectos geométricos, usando os parâmetros ToA, AoD e AoA obtidos por meio de relações geométricas a partir das coordenadas cartesianas da EM, EB e espalhadores.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Um método para detectar a existência de caminho LoS (*Line of Sight*) em transmissão multicaminho, possibilitando escolher o algoritmo apropriado para determinar a posição da EM;
- Método geométrico para realizar a localização da EM usando apenas ToA e AoD, para a condição de LoS, ou usando apenas 2 caminhos na condição de NLoS;
- Um método geométrico para descobrir as posições de espalhadores no cenário NLoS;
- Um estimador de mínimos quadrados para uma etapa de refinamento que usa como entrada os valores determinados com o uso dos métodos geométricos para melhorar a precisão da localização da EM.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2, são descritas as formulações e modelo do sistema. Na seção 3, é apresentado o método proposto. Na seção 4, são mostradas as simulações e comparações feitas, discutindo-se os resultados. A seção 5 conclui o artigo.

2. Modelo do Sistema

Considera-se aqui um cenário constituído por uma EB, em posição conhecida, e uma EM, em posição desconhecida, sincronizadas e com arranjo de antenas em ambas, permitindo estimar ToA, AoD e AoA. A propagação do sinal pode ocorrer em condição de LoS e/ou NLoS, sendo que na condição de NLoS deve haver pelo menos dois espalhadores (ESs), que estão em posições desconhecidas. A Figura 1 ilustra o cenário geométrico em que é realizada a localização.

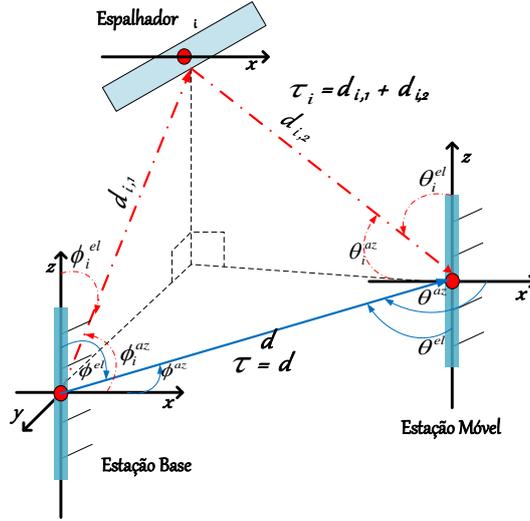


Figura 1. Geometria do cenário de localização.

Ao analisar Figura 1, é possível identificar os parâmetros observáveis usados na localização $[\tau, \theta^{az}, \theta^{el}, \phi^{az}, \phi^{el}]^T$, em que τ representa o ToA, θ o AoA, ϕ o AoD, os índices az e el indicam, respectivamente, o ângulo de azimute e elevação, d representa a distância euclidiana entre dois pontos e o índice i se refere ao i -ésimo caminho NLoS.

Este trabalho parte da premissa que há uma rotina de estimação dos parâmetros observáveis $[\tau, \theta^{az}, \theta^{el}, \phi^{az}, \phi^{el}]^T$. Portanto, dedica-se à etapa de localização a partir dos parâmetros já obtidos. Assim, tem-se como entrada três matrizes com os parâmetros observáveis:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \theta_1^{az} & \theta_1^{el} \\ \vdots & \vdots \\ \theta_L^{az} & \theta_L^{el} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \phi_1^{az} & \phi_1^{el} \\ \vdots & \vdots \\ \phi_L^{az} & \phi_L^{el} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

em que L representa a quantidade de caminhos.

Neste trabalho são usadas coordenadas retangulares para representar a localização dos pontos, em que x representa a latitude, y a longitude e z a altitude. Assim, dado que as coordenadas cartesianas (x, y, z) da EB (B), EM (M) e ESs (S) $\in \mathbb{R}^3$, os parâmetros observáveis podem ser determinados a partir das coordenadas retangulares usando formulações geométricas.

Para a condição de LoS, as relações geométricas entre os parâmetros observáveis e as coordenadas cartesianas (x, y, z) das posições da EM e EB são dadas por:

$$\tau = \|B - M\| + n, \quad (2)$$

$$\theta^{az} = \text{atan} \left(\frac{B_y - M_y}{B_x - M_x} \right) + n, \quad (3)$$

$$\theta^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{B_z - M_z}{\sqrt{(B_x - M_x)^2 + (B_y - M_y)^2}} \right) + n, \quad (4)$$

$$\phi^{az} = \text{atan} \left(\frac{M_y - B_y}{M_x - B_x} \right) + n, \quad (5)$$

$$\phi^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{M_z - B_z}{\sqrt{(M_x - B_x)^2 + (M_y - B_y)^2}} \right) + n. \quad (6)$$

Para a condição de NLoS, as relações geométricas entre os parâmetros observáveis e as coordenadas cartesianas (x, y, z) das posições da EM, EB e ESs são dadas por:

$$\tau_i = \|S_i - B\| + \|S_i - M\| + n_i, \quad (7)$$

$$\theta_i^{az} = \text{atan} \left(\frac{S_{i,y} - M_y}{S_{i,x} - M_x} \right) + n_i, \quad (8)$$

$$\theta_i^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{S_{i,z} - M_z}{\sqrt{(S_{i,x} - M_x)^2 + (S_{i,y} - M_y)^2}} \right) + n_i, \quad (9)$$

$$\phi_i^{az} = \text{atan} \left(\frac{S_{i,y} - B_y}{S_{i,x} - B_x} \right) + n_i, \quad (10)$$

$$\phi_i^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{S_{i,z} - B_z}{\sqrt{(S_{i,x} - B_x)^2 + (S_{i,y} - B_y)^2}} \right) + n_i. \quad (11)$$

Nas formulações para a condição de NLoS, o subscrito i se refere aos parâmetros do i -ésimo caminho NLoS e n é o ruído aditivo *Gaussiano* de média zero e variância σ^2 .

3. Método de Localização Proposto

Nesta seção, o método proposto será apresentado em detalhes, podendo ser dividido em quatro etapas, sendo elas:

(a) *Verificação de caminho LoS*: Caso haja caminho LoS os parâmetros estarão na primeira linha das matrizes \mathbf{T} , \mathbf{A} e \mathbf{D} [Wymeersch 2018, Shahmansoori *et al.* 2018]. Assim a verificação da existência de caminho LoS se dá com a análise de AoD e AoA do primeiro caminho. Conforme relações geométricas de AoA e AoD, pode-se afirmar que se trata de um caminho LoS quando:

$$\phi^{az} = \theta^{az} - \pi, \quad (12)$$

$$\phi^{el} = \pi - \theta^{el}. \quad (13)$$

(b) *Método Geométrico para Condição de LoS*: Ao se tratar de um caminho LoS, a posição estimada da EM pode ser obtida a partir de:

$$\widehat{M} = B + \tau \begin{bmatrix} \sin(\phi^{el})\cos(\phi^{az}) \\ \sin(\phi^{el})\sin(\phi^{az}) \\ \cos(\phi^{el}) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

(c) *Método Geométrico para Condição de NLoS*: Quando executado (14) em um caminho NLoS, determina-se o ponto s_i na direção do ES, mas que ultrapassa o mesmo, pois não se sabe exatamente a localização do ES. Esta situação pode ser analisada na Figura 2. Assim, s_i é determinado a partir de :

$$s_i = B + \tau \begin{bmatrix} \sin(\phi^{el})\cos(\phi^{az}) \\ \sin(\phi^{el})\sin(\phi^{az}) \\ \cos(\phi^{el}) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Se a partir de s_i for traçada uma reta usando o AoD correspondente de AoA, determina-se o ponto r_i na direção da EM, mas que ultrapassa a mesma. Portanto, conforme a relação apresentada em (12) e (13), r_i pode ser obtido a partir de:

$$r_i = B + \tau_i \begin{bmatrix} \sin(\pi - \theta_i^{el})\cos(\theta_i^{az} - \pi) \\ \sin(\pi - \theta_i^{el})\sin(\theta_i^{az} - \pi) \\ \cos(\pi - \theta_i^{el}) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

A Figura 2 ilustra as retas $\overrightarrow{Bs_i}$ e $\overrightarrow{s_i r_i}$ para dois ESs. Pode ser notado que as retas $\overrightarrow{s_i r_i}$ se cruzam no mesmo ponto (\widehat{M}), que é o local estimado da EM. Para determinar a intersecção de retas no espaço 3D, desenvolveu-se o **Algoritmo 1** baseado na teoria apresentada em [Traa 2013].

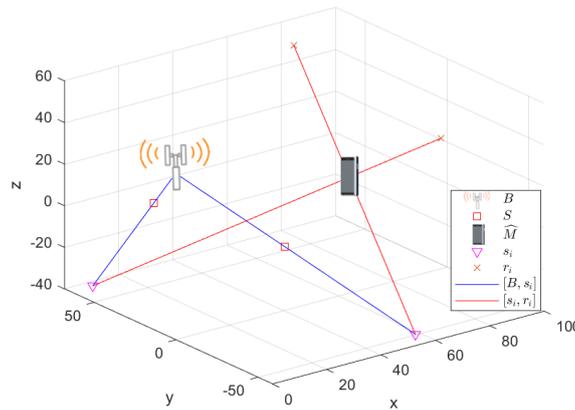


Figura 2. Identificação dos pontos e retas para localização da EM no cenário NLoS.

A partir dos valores de \widehat{M} obtêm-se a estimativa das coordenadas de cada ES. Para isso é necessário acrescentar o ponto k_i no cenário geométrico. Este ponto é localizado na direção do ES a partir da EM usando a seguinte formulação:

$$k_i = \widehat{M} - \tau_i \begin{bmatrix} \sin(\pi - \theta_i^{el})\cos(\theta_i^{az} - \pi) \\ \sin(\pi - \theta_i^{el})\sin(\theta_i^{az} - \pi) \\ \cos(\pi - \theta_i^{el}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Algoritmo 1: INTERSECÇÃO DE RETAS NO ESPAÇO

Entrada: s, r, L
Saída: \widehat{M}

- 1 **início**
- 2 $P \leftarrow r - s$
- 3 **para** i **de** 1 **até** L **faça**
- 4 $W \leftarrow \sqrt{\sum_{k=1}^3 (P_{i,k}^2)}$
- 5 **para** j **de** 1 **até** 3 **faça**
- 6 $P_{i,j} \leftarrow \frac{P_{i,j}}{W}$
- 7 **fim**
- 8 **fim**
- 9 **para** i **de** 1 **até** 3 **faça**
- 10 $V \leftarrow 0$
- 11 **para** j **de** 1 **até** 3 **faça**
- 12 **se** $i=j$ **então**
- 13 $H_{i,j} \leftarrow \sum_{k=1}^L (P_{k,j}^2 - 1)$
- 14 **senão**
- 15 $H_{i,j} \leftarrow \sum_{k=1}^L (P_{k,i}P_{k,j})$
- 16 **fim**
- 17 **fim**
- 18 **fim**
- 19 $C_{1,1} \leftarrow \sum_{i \leftarrow 1}^L s_{i,1}P_{i,1}^2 - 1 + s_{i,2}P_{i,1}P_{i,2} + s_{i,3}P_{i,1}P_{i,3}$
- 20 $C_{2,1} \leftarrow \sum_{i \leftarrow 1}^L s_{i,1}P_{i,1}P_{i,2} + s_{i,2}P_{i,2}^2 - 1 + s_{i,3}P_{i,1}P_{i,3}$
- 21 $C_{3,1} \leftarrow \sum_{i \leftarrow 1}^L s_{i,1}P_{i,1}P_{i,3} + s_{i,2}P_{i,1}P_{i,2} + s_{i,3}P_{i,3}^2 - 1$
- 22 $\widehat{M} \leftarrow (H^T H)^{-1} H^T C$
- 23 **retorna** \widehat{M}
- 24 **fim**

Como ilustrado na Figura 3, o ponto de intersecção entre as retas $\overrightarrow{Bs_i}$ e $\overrightarrow{\widehat{M}k_i}$ é a posição estimada de \widehat{S}_i , que é determinado a partir do **Algoritmo 1**.

(d) *Estimador de mínimos quadrados:* Foi implementado um algoritmo iterativo de mínimos quadrados, baseando-se em expansões da série de *Taylor* apresentadas em [FOY 1976]. Nesse algoritmo é preciso usar um valor inicial que é ajustado a cada iteração até que se atinja um determinado limite para convergência ou até que um número pré estabelecido de interações seja alcançado.

Desta forma, para o estimador LoS, foi definido como valor inicial $\widehat{X}_1 =$

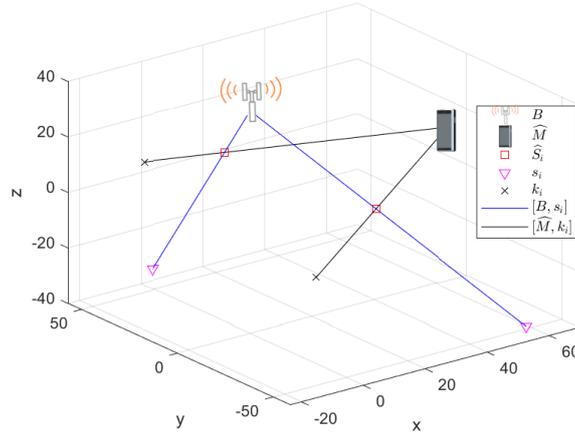


Figura 3. Identificação dos pontos e retas para localização dos ESs no cenário NLoS.

$[\widehat{M}_x, \widehat{M}_y, \widehat{M}_z]^T$. Na condição de LoS é preciso determinar somente a EM, assim define-se $X = [M_x, M_y, M_z]^T$ e $F(X) = [\tau, \phi^{az}, \phi^{el}]$.

Para o estimador NLoS, foi definido como valor inicial $\widehat{X}_1 = [\widehat{M}_x, \widehat{M}_y, \widehat{M}_z, \widehat{S}_{x,i}, \widehat{S}_{y,i}, \widehat{S}_{z,i}]^T$. Na condição de NLoS o algoritmo de mínimos quadrados é executado para cada ES, assim tem-se que $X = [M_x, M_y, M_z, S_{x,i}, S_{y,i}, S_{z,i}]^T$ e $F(X) = [\tau_i, \theta_i^{az}, \theta_i^{el}, \phi_i^{az}, \phi_i^{el}]$.

Portanto, o algoritmo iterativo de mínimos quadrados pode ser definido por meio de:

$$\widehat{X}_k = \widehat{X}_{k-1} + (\mathbf{J}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q}^{-1} [F(X) - F(\widehat{X}_{k-1})], \quad k = 2, 3, \dots \quad (18)$$

em que \mathbf{J} é a matriz Jacobiana $\mathbf{J} = \frac{\partial F(\widehat{X}_{k-1})}{\partial \widehat{X}_{k-1}}$ e \mathbf{Q} é a matriz de covariância dos parâmetros do canal de comunicação, de tal forma que $\mathbf{Q} = \text{diag}[\sigma_{ToA}^2, \sigma_{AoA}^2, \sigma_{AoD}^2]$. $F(\widehat{X}_{k-1})$ é calculado a cada iteração e contém novos valores dos parâmetros do canal, determinados por meio das relações geométricas a partir de \widehat{X}_{k-1} .

No estimador para a condição de LoS tem-se que $\widehat{M} = \widehat{X}$. Já para a condição de NLoS, (18) é aplicada para cada caminho, o que resulta em L valores de \widehat{X} , sendo que nas três primeiras linhas de \widehat{X} estarão as coordenadas da EM. Portanto, os valores finais de \widehat{M} são obtidos a partir de:

$$\widehat{M} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \widehat{X}_{1:3,i} \quad (19)$$

O **Algoritmo 2** sintetiza as etapas do método de localização proposto neste trabalho.

Algoritmo 2: LOCALIZAÇÃO DA EM

Entrada: T, A, D, L, S, tol **Saída:** \widehat{M} **1 início**2 $\phi^{az} \leftarrow D_{[1,1]}$ 3 $\phi^{el} \leftarrow D_{[1,2]}$ 4 $\theta^{az} \leftarrow A_{[1,1]}$ 5 $\theta^{el} \leftarrow A_{[1,2]}$ 6 $\tau \leftarrow T_{[i]}$ 7 $los \leftarrow falso$ 8 **se** $|\phi^{az} - (\theta^{az} - \pi)| < tol$ e $|\phi^{el} - (\pi - \theta^{el})| < tol$ **então**9 | $los \leftarrow verdadeiro$ 10 | $L \leftarrow L - 1$ 11 **fim**12 **se** $(L - 1 < 5)$ e $(los = verdadeiro)$ **então**| Determine \widehat{M} a partir da equação (14)| $X \leftarrow [\widehat{M}_1, \widehat{M}_2, \widehat{M}_3]$ 13 | $F(X) \leftarrow [\tau, \phi^{az}, \phi^{el}]$ | Determine \widehat{X} a partir da equação (18)| $\widehat{M} \leftarrow \widehat{X}$ 14 **senão**15 **para** i de 1 até L **faça**16 | $k = i$ 17 | **se** $los = verdadeiro$ **então**18 | | $k = k + 1$ 19 | **fim**20 | $\phi^{az} \leftarrow D_{[k,1]}$ 21 | $\phi^{el} \leftarrow D_{[k,2]}$ 22 | $\theta^{az} \leftarrow A_{[k,1]}$ 23 | $\theta^{el} \leftarrow A_{[k,2]}$ 24 | $\tau \leftarrow T_{[k]}$ | Determine s_i a partir da equação (15)25 | Determine r_i a partir da equação (16)| $F_i(X) \leftarrow [\tau, \phi^{az}, \phi^{el}, \theta^{az}, \theta^{el}]$ 26 **fim**27 | Determine \widehat{M} a partir do **Algoritmo 1**28 | Determine k a partir da equação (17)29 | Determine \widehat{S} a partir do **Algoritmo 1**30 **para** i de 1 até L **faça**31 | | $X \leftarrow [\widehat{M}_1, \widehat{M}_2, \widehat{M}_3, \widehat{S}_{i,1}, \widehat{S}_{i,2}, \widehat{S}_{i,3}]$ 32 | | Determine \widehat{X}_i a partir da equação (18)33 | **fim**34 | Determine \widehat{M} a partir da equação (19)35 **fim**36 **retorna** \widehat{M} 37 **fim**

4. Simulações e Resultados

Na primeira simulação demonstra-se a execução do método proposto na presença de caminhos com LoS. A EB foi definida nas coordenadas [0, 0, 40] e a EM nas coordenadas [70, 2, 5]. Foram usados três ESs, $S_1=[24, -27, 6]$, $S_2=[1, 15, 20]$ e $S_3=[5, -13, 10]$, portanto, $L = 3$.

A Figura 4 mostra o cenário desta simulação, em que se percebe a existência do caminho LoS. Foi definido um cenário de baixo ruído, com 0, 1 m de desvio padrão para o ToA e 0, 01 rad para os ângulos. A tolerância para classificar o caminho como LoS foi de 10^{-2} , a tolerância para convergência dos estimadores foi de 10^{-4} e o número máximo de iterações para classificação de não convergência foi definido como 10^2 .

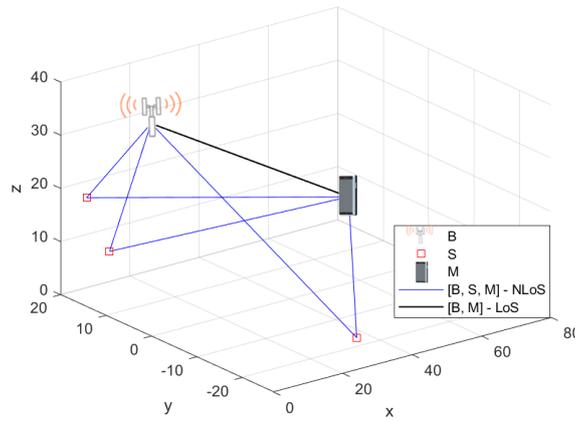


Figura 4. Cenário da primeira e segunda simulação.

O primeiro passo consiste em determinar os parâmetros do canal usando as formulações geométricas, obtendo-se as matrizes:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 76,7296 \\ 108,7921 \\ 94,7561 \\ 98,0689 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3,2882 & 1,1837 \\ 3,8230 & 1,6440 \\ 3,0781 & 1,4341 \\ 3,0973 & 1,5825 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0,1505 & 1,9732 \\ -0,8390 & 2,3258 \\ 1,5041 & 2,4901 \\ 1,1921 & 2,7003 \end{bmatrix}.$$

Ao executar o **Algoritmo 2** é detectada a existência do caminho LoS e, sendo $L < 5$, \widehat{M} será determinado a partir das equações (14) e (18), obtendo-se $\widehat{M}=[69,80 \ 10,58 \ 9,95]$.

Fez-se outra simulação com a mesma configuração anterior levando-se em conta apenas os três caminhos NLoS, conforme Figura 4, obtendo-se as matrizes:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 108,7425 \\ 94,9024 \\ 98,0968 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3,8081 & 1,6399 \\ 3,0715 & 1,4502 \\ 3,1065 & 1,5983 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -0,8188 & 2,3115 \\ 1,4910 & 2,5101 \\ 1,2049 & 2,7210 \end{bmatrix}.$$

Ao ser constatada a inexistência de caminho LoS os pontos s e r são determinados, para cada ES, usando as formulações (15) e (16) para obter:

$$s = \left\{ \begin{bmatrix} 54,82 & -58,60 & -33,37 \\ 04,46 & 55,85 & -36,59 \\ 14,32 & 37,39 & -49,54 \end{bmatrix} \right\},$$

$$r = \left\{ \begin{bmatrix} 85,26 & 67,07 & 47,51 \\ 93,98 & -06,59 & 28,58 \\ 97,99 & -3,44 & 42,69 \end{bmatrix} \right\}.$$

Ao usar as coordenadas dos pontos s e r , tem-se as retas do cenário geométrico e o ponto de intersecção entre as retas $\overrightarrow{s_i r_i}$ é determinado a partir do **Algoritmo 1**, obtendo $\widehat{M} = [70,73 \ 10,04 \ 11,48]$. Este cenário é ilustrado na Figura 5.

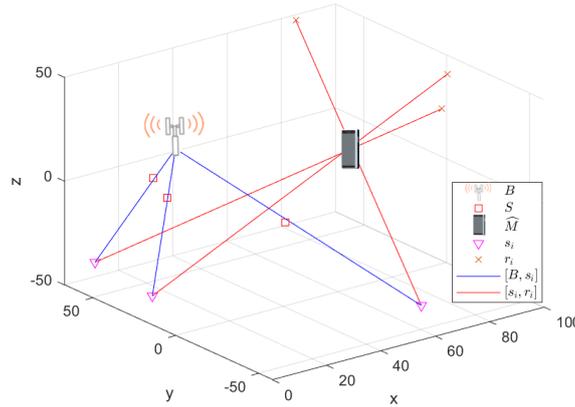


Figura 5. Localização geométrica da EM para 3 caminhos NLoS.

Para encontrar os valores estimados de \widehat{S} , primeiro são determinados os pontos $k_{1...L}$ usando a equação (17) para obter:

$$k = \left\{ \begin{bmatrix} -14,51 & -58,15 & 03,67 \\ -22,85 & 16,36 & 24,07 \\ -27,27 & 14,43 & 11,02 \end{bmatrix} \right\}.$$

Ao executar o **Algoritmo 1** para cada caminho usando as retas $\overrightarrow{B s_i}$ e $\overrightarrow{M k_i}$ obtêm-se $\widehat{S}_1 = [24,45 \ -27,37 \ 6,59]$, $\widehat{S}_2 = [0,75 \ 14,52 \ 20,53]$ e $\widehat{S}_3 = [5,24 \ 12,73 \ 10,73]$. O valor final de \widehat{M} é determinado ao executar as equações (18) e (19), obtendo-se $\widehat{M} = [70,54 \ 10,06 \ 11,25]$. Ao analisar a Figura 6, que ilustra o estado final do cenário de localização para esta segunda simulação, percebe-se que o método proposto neste trabalho consegue estimar valores para EM e ESs (marcadores em vermelho) próximos dos valores verdadeiros (marcadores em azul).

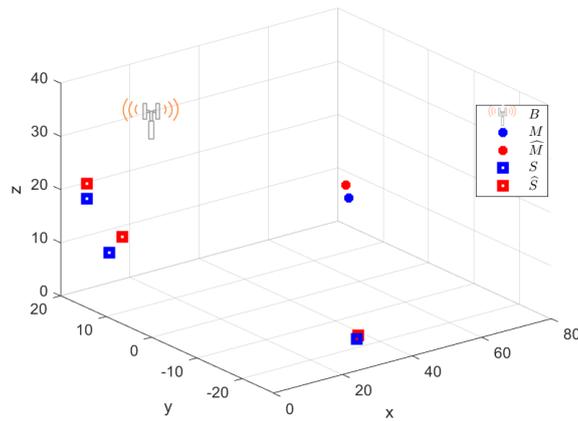


Figura 6. Cenário final de localização mostrando posições reais e estimadas para EM e ESs.

Em outra simulação, foi analisado se na presença de caminho com LoS, pode-se ignorar os caminhos NLoS. Para esta simulação, os ESs foram posicionados de forma aleatória entre -50 e 50 , para os eixos x , y e entre 0 e 40 , para o eixo z . Os demais parâmetros da simulação foram mantidos. Ainda nesta simulação, foi verificado o impacto da quantidade de caminhos NLoS na precisão de posicionamento. A medida de desempenho adotada foi o Erro Quadrático Médio (EQM), calculado por meio de $\varepsilon = ||M - \widehat{M}||$.

A Figura 7 mostra o resultado de 1000 simulações independentes para cada quantidade de ESs. O EQM médio obtido, ao usar unicamente o caminho LoS, foi de $0,93$ m. Ao usar os caminhos NLoS, há uma melhora do EQM a partir de 5 caminhos.

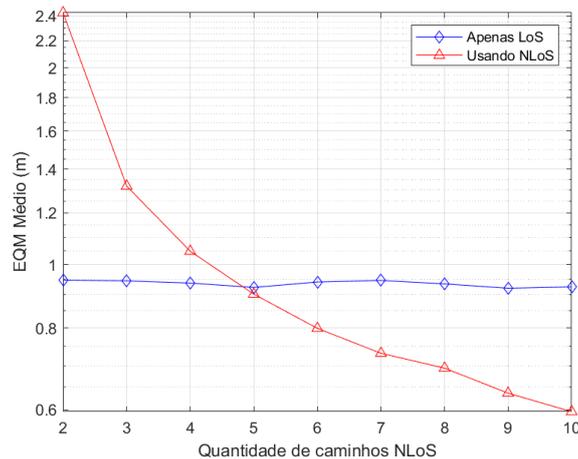


Figura 7. Estimação usando apenas LoS x NLoS x Quantidade de ESs.

Outra simulação buscou comparar alguns resultados do método proposto neste trabalho com dois outros métodos disponíveis na literatura que também usam abordagens geométricas em cenário NLoS com uma EB para estimar a localização da EM e também dos ESs [Wymeersch 2018, Wei *et al.* 2011].

O método proposto em [Wymeersch 2018] também cria retas em um cenário geométrico e busca o ponto de intersecção entre as retas criadas. Além disso, o método

prevê a estimação da orientação do equipamento do usuário e do atraso do relógio, para o caso da EB e EM não estarem sincronizadas. O método de [Wymeersch 2018] se limita a realizar a intersecção das retas, e não considera um cenário que exista caminho LoS.

O método proposto em [Wei *et al.* 2011] não usa a intersecção de retas, mas sim um conjunto de formulações geométricas que visam determinar a posição da EM usando um algoritmo dos mínimos quadrados, o que requer o uso de pelo menos dois caminhos NLoS, em que os ESs sejam usados como barreiras. O método de [Wei *et al.* 2011] também não considera a existência de um cenário LoS.

Primeiro comparou-se o EQM em relação à quantidade de ESs e o resultado pode ser analisado na Figura 8. A simulação foi feita usando a mesma configuração da simulação anterior.

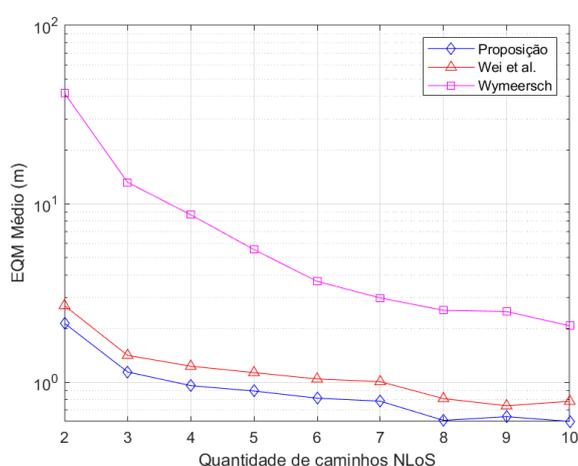


Figura 8. EQM em relação à quantidade de ESs.

Pode ser observado como a proposta deste trabalho tem um desempenho superior em relação aos demais. Esta melhora ocorre em virtude da precisão do algoritmo que detecta a intersecção de retas no espaço 3D e do estimador baseado em expansões da série de *Taylor*, contido na etapa final do método apresentado aqui, o que não existe nos outros trabalhos.

Em outra simulação buscou-se analisar a probabilidade de localização com uso de uma CDF (*Cumulative Distribution Function*) em relação ao EQM de localização. Neste caso a CDF representa a probabilidade (eixo *y*) que o EQM tem de assumir um valor menor ou igual a *x* metros (eixo *x*). A CDF foi gerada com valores ordenados de forma crescente para 1000 simulações independentes e a quantidade de caminhos fixados em seis. O resultado pode ser visto na Figura 9, em que se percebe o melhor desempenho do método proposto em relação aos demais, pois apresenta EQM menor durante todo o tempo.

Conforme outros dados, apresentados na Tabela 1, o método proposto se mostrou mais rápido e mais preciso em relação aos outros métodos.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou um método geométrico para localização da EM e dos ESs usando apenas uma EB da Rede Celular. A proposta tem como diferencial ser aplicável

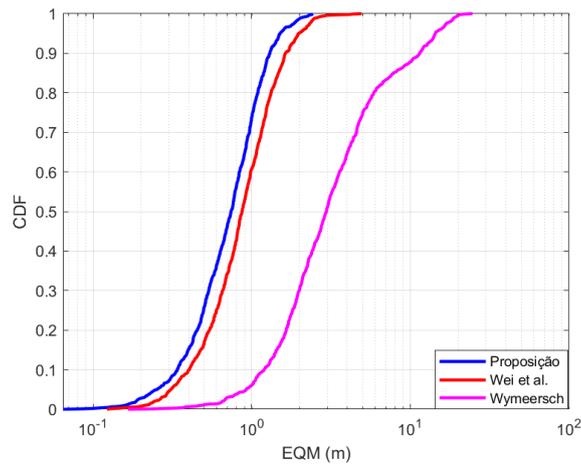


Figura 9. CDF — Probabilidade de localização.

Tabela 1. Resultados da Simulação

Método	EQM médio (m)	Prob. erro - 95% (m)	Tempo médio (s)
Proposta	0,79	1,51	0,0038
Wei et al.	0,99	2,11	0,0049
Wymeersch	4,10	14,15	0,5269

na condição de propagação com LoS ou NLoS de forma automática, pois realiza uma verificação da existência de caminho LoS e, quando este está disponível, é preferível em relação ao método da condição de NLoS, desde que a quantidade de caminhos NLoS seja inferior a 5. Foi proposta ainda uma etapa de refinamento que usa série de *Taylor* para aprimorar o resultado geométrico, fazendo com que a precisão na localização apresentasse melhor desempenho quando comparado a outros dois métodos geométricos.

Os resultados são promissores, pois a precisão alcançada obteve uma média de EQM submétrica, mesmo na condição de NLoS multicaminho com uma EB. Além disso o tempo de execução do método proposto foi inferior àqueles de outros métodos. O cenário simulado buscou replicar o que é esperado nas redes 5G, evidenciando que em um cenário de baixo ruído e medição precisa dos parâmetros de localização, usar um método geométrico de rápida execução proporciona precisão de localização na ordem dos centímetros. Como trabalho futuro pretende-se realizar simulações em um cenário real, com aplicação diretamente na EM, tornando possível o desenvolvimento de aplicativos específicos de localização que independem de infraestrutura alheia à rede celular.

Referências

- Al-kafaji, R. D., Gharghan, S. K., e Mahdi, S. Q. (2020). “Localization Techniques for Blind People in Outdoor/Indoor Environments: Review”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Cao, H., Wang, Y., Bi, J., Xu, S., Si, M., e Qi, H. (2020). “Indoor Positioning Method Using WiFi RTT Based on LOS Identification and Range Calibration”. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11).

- Fascista, A., Coluccia, A., Wymeersch, H., e Seco-Granados, G. (2020). “Low-Complexity Accurate Mmwave Positioning for Single-Antenna Users Based on Angle-of-Departure and Adaptive Beamforming”. Em *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, páginas 4866–4870.
- Fascista, A., Coluccia, A., Wymeersch, H., e Seco-Granados, G. (2021). “Downlink Single-Snapshot Localization and Mapping With a Single-Antenna Receiver”. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(7):4672–4684.
- Fellan, A., Schellenberger, C., Zimmermann, M., e Schotten, H. D. (2018). “Enabling Communication Technologies for Automated Unmanned Vehicles in Industry 4.0”. Em *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, páginas 171–176.
- FOY, W. H. (1976). “Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation”. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-12(2):187–194.
- Jeon, K. E., She, J., Soonsawad, P., e Ng, P. C. (2018). “BLE Beacons for Internet of Things Applications: Survey, Challenges, and Opportunities”. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2):811–828.
- Kim Geok, T., Zar Aung, K., Sandar Aung, M., Thu Soe, M., Abdaziz, A., Pao Liew, C., Hossain, F., Tso, C. P., e Yong, W. H. (2021). “Review of Indoor Positioning Radio Wave Technology”. *Applied Sciences*, 11(1).
- Mendoza-Silva, G. M., Torres-Sospedra, J., e Huerta, J. (2019). “A Meta-Review of Indoor Positioning Systems”. *Sensors*, 19(20).
- Shahmansoori, A., Garcia, G. E., Destino, G., Seco-Granados, G., e Wymeersch, H. (2018). “Position and Orientation Estimation Through Millimeter-Wave MIMO in 5G Systems”. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(3):1822–1835.
- Shi, G. e Ming, Y. (2016). “Survey of Indoor Positioning Systems Based on Ultra-wideband (UWB) Technology”. Em Zeng, Q.-A., editor, *Wireless Communications, Networking and Applications*, páginas 1269–1278, New Delhi. Springer India.
- Shikur, B. Y. e Weber, T. (2014). “TDOA/AOD/AOA Localization in NLOS Environments”. Em *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, páginas 6518–6522.
- Traa, J. (2013). *Least-Squares Intersection of Lines*. UIUC. Disponível em <https://silo.tips/download/least-squares-intersection-of-lines>.
- Wei, X., Palleit, N., e Weber, T. (2011). “AOD/AOA/TOA-based 3D positioning in NLOS multipath environments”. Em *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, páginas 1289–1293.
- Wymeersch, H. (2018). “A Simple Method for 5G Positioning and Synchronization without Line-of-Sight”. *arXiv preprint arXiv:1812.05417*.
- Zou, Y. e Liu, H. (2020). “A Simple and Efficient Iterative Method for Toa Localization”. Em *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, páginas 4881–4884.