



## Target Localization in Wireless Sensor Network Using Received Signal Strengths (RSS) and Angle of Arrival (AoA) with Unknown Path Loss Exponent and Unknown Location of Some Sensors

M.H. Arab Sorkhi<sup>1</sup>, H. Ziyani<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Associate Professor, Qom University of Technology, Qom, Iran

(Received:2022 /09/16, Revised: 2022/12/08, Accepted: 2023/01/06, Published: 2023/01/21)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.8.9>

### Abstract

*This paper presents an algorithm for localization of targets in a three dimensional space using a Wireless Sensor Network (WSN). The received signal strengths (RSS) and Angle of Arrivals (AoA) are used to estimate the position of targets. The assumed condition in this paper is that the Path Loss Exponent (PLE) is unknown and is different from its actual value. Moreover, we exploit the information from sensors that their positions are not known to enhance the localization accuracy. We use a weighted least squares estimator in an iterative manner to localize the targets and to enhance the algorithm. The estimator is benefitted from the estimation of PLE and the information of sensors with unknown position. Finally, we will see that the use of sensors whose locations are unknown and are considered as redundant information for other algorithms, and also the assumption that the PLE is uncertain, we can use fewer sensors to achieve results similar to the methods using more sensors and with a known path loss exponent.*

**Keywords:** : Localization, Wireless sensor network, Received signal strength, Angle of arrival, Path loss exponent, Weighted least square estimation.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

**Authors**



\*Corresponding Author Email: zayyani2009@gmail.com

## مکان‌یابی اهداف در شبکه حسگر بیسیم با ترکیب مقادیر توان سیگنال دریافتی (RSS) و زاویه ورود (AoA) در حالت نامعلوم بودن ضریب اتلاف کانال (PLE) و نامشخص بودن مکان تعدادی از سنسورها

محمدحسین عرب‌سرخی<sup>۱</sup>، هادی زبانی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶، انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.8.9>



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

### چکیده

این مقاله به ارائه یک روش تخمین مکان‌یابی اهداف در فضای سه‌بعدی با استفاده از شبکه حسگر بیسیم (WSN) می‌پردازد. ما اطلاعات توان دریافتی و زاویه‌های ورود سیگنال را دریافت و مکان اهداف را بر اساس آنها تخمین می‌زنیم. از دیگر شرایط مدنظر قرار گرفته در این مقاله، مشخص نبودن مقدار ضریب اتلاف کانال (PLE) است که به هر دلیل با مقدار واقعی خود دارای اختلاف است. همچنین، به بررسی این موضوع می‌پردازیم که می‌توان از اطلاعات سنسورهایی که مکان آنها نامشخص است استفاده کرده و از این اطلاعات برای افزایش دقت مکان‌یابی بهره ببریم. ما با استفاده از یک تخمین حداقل مربعات وزن‌دهی شده (WLS) در قالب یک الگوریتم تکرارپذیر سعی می‌کنیم تا به مکان‌یابی پرداخته و با استفاده از اطلاعات جدید به ارتقای الگوریتم بپردازیم. این تخمین جدید می‌تواند به بهبود مکان‌یابی اهداف با استفاده از تخمین PLE و استفاده از اطلاعات تعدادی از سنسورها با مکان نامعلوم کمک نماید. در نهایت خواهیم دید که استفاده از سنسورهایی که مکان آنها نامعلوم است و برای سایر الگوریتم‌ها به‌عنوان اطلاعات مازاد در نظر گرفته می‌شوند و همچنین با فرض نامعلوم بودن PLE ما می‌توانیم با استفاده از سنسورهای کمتر به نتایجی در حدود همان روش‌هایی که از سنسورهای بیشتر و با ضریب اتلاف نامعلوم استفاده می‌کنند، دست یابیم.

**کلیدواژه‌ها:** مکان‌یابی، شبکه حسگر بیسیم، توان سیگنال دریافتی، زاویه ورود، ضریب اتلاف کانال، حداقل مربعات وزن‌دهی شده.

### ۱- مقدمه

حسگر بیسیم (WSN) انجام شود. این شبکه‌ها دارای ۴ بخش اصلی هستند: مجموعه از حسگرهای توزیع و یا جای‌گذاری شده، شبکه اتصال‌دهنده شبکه، مرکزی برای پردازش و طبقه‌بندی اطلاعات و مجموعه‌ای از منابع محاسبه‌گر برای مدیریت و کشف در این داده‌ها [1]. مکان‌یابی در شبکه‌های حسگر بیسیم سابقه‌ای طولانی دارد که الگوریتم‌های متفاوتی برای آنها ارائه شده است که می‌توان به الگوریتم مجاورت<sup>۲</sup> [2]، الگوریتم انگشت‌نگاری<sup>۳</sup> [3] [4]، الگوریتم

گسترش روزافزون ارتباطات بیسیم باعث ورود سریع این فناوری به سبک زندگی افراد گردیده است. یکی از کاربردهای ارتباطات بیسیم امکان مکان‌یابی اهداف است. در حال حاضر، مکان‌یابی به یک ضرورت تبدیل گردیده که از مکان‌یابی اهداف نظامی تا سامانه مکان‌یابی جهانی (GPS) و سامانه‌های مکان‌یابی خانگی همگی از انواع آن هستند [1]. مکان‌یابی اهداف مخابراتی می‌تواند توسط شبکه

<sup>2</sup> Proximity

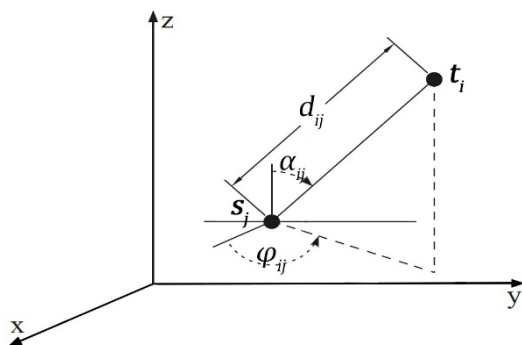
<sup>3</sup> Fingerprinting

استفاده می‌گردد. همچنین با استفاده از اطلاعات تعدادی از سنسورها که مکان آنها از دست‌رفته و یا تغییر کرده باشند، سعی در ارتقای مکان‌یابی داریم. به طور خاص در مقایسه با مرجع [16] و [23] می‌توان گفت که اولاً: در مقالات مطرح شده، نامعلوم بودن ضریب اتلاف کانال طرح و بررسی نگردید. باتوجه به اثر فرض نامعلوم بودن ضریب اتلاف کانال در تولید خطا تلاش شد تا تخمینی برای PLE و استفاده از این تخمین برای مکان‌یابی ارائه گردد. دوماً: در هیچ‌کدام از مقالات مطرح شده و یا سایر مقالات مشابه، روشی برای استفاده از اطلاعات سنسورهایی که بنا بر هر دلیلی مکان آنها نامعلوم است ارائه نشده است. اما ما در این مقاله فرض نمودیم که اگر اطلاعات سنسور موجود بوده؛ و در مورد مکان آن دچار تردید هستیم، آن را مانند سایر مقالات به‌عنوان اطلاعات مازاد و فاقد اطلاعات اضافی در نظر بگیریم، بلکه از آن برای ارتقای دقت مکان‌یابی استفاده نماییم.

در بخش ۲ به فرمول‌بندی مسئله، در بخش ۳ به راه‌حل‌های ارائه شده و در بخش ۴ به تحلیل نتایج و در بخش ۵ به جمع‌بندی پرداخته خواهد شد.

## ۲- تحلیل مسئله

ما  $N$  سنسور و  $M$  هدف داریم در جایی که سنسورهای ما  $s_j, t_i \in R^3, i = 1, 2, \dots, M$  و اهداف ما  $t_1, t_2, \dots, t_N$  می‌باشند. پس می‌توان مختصات اهداف را به صورت  $t_i = [x_i, y_i, z_i]^T (t_i \in R^3)$  و سنسورها را به صورت  $s_j = [a_j, b_j, c_j]^T (s_j \in R^3)$  تعریف کرد. ما از مکان  $K$  سنسور اطلاع داریم و مکان  $U$  سنسور باقیمانده برای ما ناشناخته است. ( $N=K+U$ )



شکل ۱: ترسیم مکان سنسورها و اهداف در فضای سه بعدی

باتوجه به مقاله [16] برای مقدار RSS داریم:

$$p_{ij} = p_0 + 10\beta \log_{10} \left( \frac{d_{ij}}{d_0} \right) + n_{ij} \quad (1)$$

ناوبری کور<sup>۱</sup> [5] و الگوریتم مثلث‌سازی<sup>۲</sup> اشاره نمود. روش‌های الگوریتم مثلث‌سازی در دو دسته زاویه‌بندی<sup>۳</sup> و تاخیر<sup>۴</sup> طبقه بندی می‌شود. از روش مرسوم در زاویه‌بندی، روش زاویه ورود<sup>۵</sup> (AoA) [6] [7] است. اما در روش تاخیر می‌توان به روش‌هایی همچون زمان ورود<sup>۶</sup> (ToA) [8] [9]، تاخیر زاویه ورود<sup>۷</sup> (TDoA) [10] [11] و توان سیگنال دریافتی<sup>۸</sup> (RSS) [6] [12] [13] اشاره کرد. در این مقاله ما قصد ترکیب دو روش توان سیگنال دریافتی و زاویه ورود را داریم. از علل این ترکیب می‌توان به افزایش دقت الگوریتم، کاهش خطرپذیری از دست رفتن دسته‌ای از اطلاعات و کم اثر نمودن انواع تاثیرات مخرب با توجه به استفاده از اطلاعات مختلف اشاره نمود. به عنوان مثال تغییر PLE در مقدار RSS تاثیر بسزایی دارد در صورتیکه مقدار AoA تغییر نمی‌کند.

از کارهای انجام گرفته در روش ترکیبی می‌توان به [14] اشاره کرد که تخمین خود را بر اساس تخمین کمترین مربعات (LS) انجام داده است. در [15] به هر دو تخمین کمترین مربعات LS و بیشینه درست‌نمایی<sup>۹</sup> ML پرداخته شده است. روش دیگر تخمین، ترکیب RSS و AoA به روش حداقل مربعات وزن‌دهی شده WLS است [16] از دیگر مقالات می‌توان به تخمین WLS چند هدف و سه‌بعدی در [16] و تخمین WLS با فرمول بسته تک هدف و دوبعدی در [17] اشاره کرد. در [18] به تخمین با  $P_T$  معلوم و نامعلوم می‌پردازد. [19] به محاسبه فرمول بسته تخمین WLS با استفاده از تخمین بسط اول تیلور می‌پردازد. در [20] به بررسی مساله با شرط توان معلوم و نامعلوم و استفاده از  ${}^1$ RLS-SDP و  ${}^1$ SRLS-SDP می‌پردازد. [21] به بررسی دو حالت همکارانه<sup>۱۲</sup> و غیرهمکارانه<sup>۱۳</sup> با استفاده از SPD<sup>۱۴</sup> و SOCP<sup>۱۵</sup> یا به عبارتی SD/SCOP می‌پردازد. همچنین در [22] به بررسی روش ENWLS<sup>۱۶</sup> و ارتقای آن می‌پردازد.

در این مقاله به مسئله مکان‌یابی باتوجه به مقدار PLE نامعلوم می‌پردازیم و از تخمین مقدار PLE برای ارتقای مکان‌یابی

<sup>1</sup> Dead reckoning

<sup>2</sup> Triangulation

<sup>3</sup> Angulation

<sup>4</sup> Lateration

<sup>5</sup> Angle of Arrival

<sup>6</sup> Time of Arrival

<sup>7</sup> Time Difference of Arrival

<sup>8</sup> Received Signal Strength

<sup>9</sup> Maximum Likelihood

<sup>10</sup> Squared Range-base Least Square Semidefinite Programming

<sup>11</sup> Squared Range-base Least Square Semidefinite Programming

<sup>12</sup> Cooperative

<sup>13</sup> Non-Cooperative

<sup>14</sup> Semidefinite Programming

<sup>15</sup> Second-Order Cone Programming

<sup>16</sup> Error variance and Noise value Weighted Least Squares

$$\tilde{t}_k = (A^T W^T W A)^{-1} (A W^T b) \quad (۶)$$

جایی که  $W = I_3 \otimes \text{diag}(\omega)$  و  $\otimes$  نشان‌دهنده کرونگر<sup>۶</sup> است و داریم:

$$A = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ -2\lambda_{ij}^2 s_j^T & \lambda_{ij}^2 \\ \vdots & \vdots \\ c_{ij}^2 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ k^T & 0 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \vdots \\ d_0^2 - \lambda_{ij}^2 \|s_j\|^2 \\ \vdots \\ c_{ij}^2 s_j \\ \vdots \\ k^T s_j + \tilde{d}_{ij} \cos(\alpha_{ij}) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

که در آن  $\tilde{d}_{ij} = d_0 10^{\frac{p_{ij}-p_0}{10\beta}}$ ،  $\omega_{ij} = 1 - \frac{\tilde{d}_{ij}}{\sum_{i=1}^K \tilde{d}_{ij}}$ ،  $\omega = [\sqrt{\omega_{ij}}]^T$ ،  $\lambda_{ij} =$  و  $k = [0, 0, 1]^T$ ،  $c_{ij} = [-\sin(\varphi_{ij}), \cos(\varphi_{ij}), 0]^T$  می‌باشد. ( $j = 1, 2, \dots, K$  و  $i = 1, 2, \dots, M$ ) پس داریم که  $\tilde{t}_k = [\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i]^T$

باتوجه به نتایج به دست آمده، به تخمین PLE در حالت کلی می‌پردازیم، باتوجه به (۱) داریم:

$$p_{ij} - p_0 = 10\beta \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) + n_{ij} \quad (۷)$$

$$\frac{p_{ij} - p_0}{\beta} = 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) + \frac{n_{ij}}{\beta} \quad (۸)$$

که در آن  $\hat{d}_{ij} = \|\tilde{t}_k - s_j\|$  است. با فرض  $\Omega = \frac{1}{\beta}$  داریم:

$$\Omega(p_{ij} - p_0) = 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) + \Omega n_{ij} \quad (۹)$$

برای تخمین MLE<sup>۵</sup> پارامتر  $\Omega$  داریم:

$$\min_{\Omega, \hat{d}_{ij}} \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} \frac{1}{\Omega^2} \left( \Omega(p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right) \quad (۱۰)$$

$$Q^{-1} \left( \Omega(p_{ik} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ik}}{d_0} \right) \right)$$

که در آن  $Q = \text{diag}(\delta_1^2, \delta_2^2, \dots, \delta_N^2)$ . حال برای تخمین  $\Omega$  ابتدا به تخمین  $\Omega_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) با توجه به اطلاعات دریافتی در سنسور  $j$ ام می‌پردازیم [24]:

$$\min_{\Omega, \hat{d}_{ij}} \frac{1}{\Omega_j^2} \left( \Omega_j(p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right)^T \quad (۱۱)$$

که در آن  $p_{ij}$  توان دریافتی سنسور  $j$ ام از هدف  $i$ ام،  $p_0$  توان دریافتی در فاصله مشخص  $d_0$ ،  $\beta$  تخمین ضریب اتلاف کانال<sup>۱</sup> است به صورتی که  $\beta = \gamma + l_j$  که در آن  $\gamma$  ضریب اتلاف حقیقی کانال و  $l_j$  نویز گوسی جمع‌شونده<sup>۲</sup> (AWGN) است  $(l_j \sim N(0, \delta_{l_j}^2))$ ،  $d_{ij}$  فاصله سنسور  $j$ ام از هدف  $i$ ام ( $d_{ij} = \|s_j - t_i\|$ ) و  $n_{ij}$  نویز گوسی جمع‌شونده  $(n_{ij} \sim N(0, \delta_{n_{ij}}^2))$  است.

مقدار AoA شامل دو زاویه ارتفاع<sup>۳</sup> و سمت<sup>۴</sup> است که باتوجه به مقاله [16] بدین صورت مدل می‌شود که:

$$\varphi_{ij} = \arctg \left( \frac{y_i - b_j}{x_i - a_j} \right) + m_{ij} \quad (۲)$$

$$\alpha_{ij} = \arccos \left( \frac{z_i - c_j}{\|t_i - s_j\|} \right) + v_{ij} \quad (۳)$$

که در آن  $v_{ij} \sim N(0, \delta_{v_{ij}}^2)$  و  $m_{ij} \sim N(0, \delta_{m_{ij}}^2)$  است.

اگر  $\theta = [P^T, \Phi^T, \alpha^T]^T$  به طوریکه  $P = [\alpha_{ij}]$ ،  $\Phi = [\varphi_{ij}]$ ،

$p_{ij}$  در نتیجه تابع احتمال برابر است با:

$$p(\theta|t) = \prod_{i=1}^{3N} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_i^2}} \exp \left\{ -\frac{(\theta_i - f_i(t))^2}{2\delta_i^2} \right\} \quad (۴)$$

جایی که:  $\delta_i = [\delta_{n_{ij}}^2, \delta_{m_{ij}}^2, \delta_{v_{ij}}^2]$ ،  $f(x) = [p_{ij}, \varphi_{ij}, \alpha_{ij}]$

حال  $K$  سنسور با مکان معلوم را مجموعه  $\mathcal{A}$  و  $U$  سنسور با مکان نامعلوم را مجموعه  $\mathcal{B}$  می‌نامیم به طوری که:

$$s_j = [s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jK}] \in \mathcal{A}, j = 1, 2, \dots, K \quad (۵)$$

$$s_j = [s_{jK+1}, s_{jK+2}, \dots, s_{jN}] \in \mathcal{B}, j = K + 1, K + 2, \dots, N$$

ما قصد داریم با اطلاعات حاصل از توان دریافتی و زاویه ورود و باتوجه به نامعلوم بودن مقدار PLE به تخمین مکان اهداف در فضای سه‌بعدی بپردازیم. همچنین، از اطلاعات سنسورهای  $\mathcal{B}$  که مکان آنها برای ما نامعلوم است، الگوریتم مکان‌یابی را ارتقا دهیم.

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

#### A- PLE نامعلوم و استفاده از سنسورهای $\mathcal{A}$

با توجه به مقاله [16] و [23] تخمین WLS<sup>۵</sup> را بدین صورت داریم:

<sup>۵</sup> Weighted Least Squares

<sup>۶</sup> Kronecker

<sup>۷</sup> Maximum Likelihood Estimator

<sup>۱</sup> Path Loss Exponent

<sup>۲</sup> Additive Withe Gaussian Noise

<sup>۳</sup> Elevation Angle

<sup>۴</sup> Azimuth Angle

عدم صحت شرط  $\|\tilde{t}_k - \hat{t}_k\| < \varepsilon_0$  ادامه می‌دهیم.  
( $\varepsilon_0 = 10^{-1}M$ )

۳- باتوجه به اهداف  $\tilde{t}_k$  و (۱۶) مجدداً به تخمین PLE می‌پردازیم و با PLE جدید محاسبه شده مراحل را تکرار می‌کنیم.

### B- PLE نامعلوم و استفاده از سنسورهای $\mathcal{A} \cup \mathcal{B}$

ابتدا با استفاده از (۶) اهداف را با سنسورهای  $\mathcal{A}$  مکان‌یابی می‌کنیم. حال با توجه به روابط زیر به تخمین مکان سنسورهای  $\mathcal{B}$  می‌پردازیم:

$$\hat{a}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{a}_{ij} \quad (18)$$

$$\hat{b}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{b}_{ij} \quad (19)$$

$$\hat{c}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{c}_{ij} \quad (20)$$

که در آن:

$$\hat{c}_{ij} = \tilde{z}_i - \tilde{d}_{ij} \cos(\alpha_{ij}) \quad (21)$$

$$\hat{a}_{ij} = \tilde{x}_i - \sqrt{\frac{\tilde{d}_{ij}^2 - (\tilde{z}_i - \hat{c}_{ij})^2}{\tan^2(\varphi_{ij}) + 1}} \quad (22)$$

$$\hat{b}_{ij} = \tilde{y}_i - \tan(\varphi_{ij}) * (\tilde{x}_i - \hat{a}_{ij}) \quad (23)$$

که  $(j = 1, 2, \dots, N$  و  $i = 1, 2, \dots, M)$ . در نتیجه سنسورهای  $\mathcal{A} \cup \mathcal{B}$  را بدین صورت داریم:

$$\hat{s}_j = \begin{bmatrix} a_j & b_j & c_j \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{a}_j & \hat{b}_j & \hat{c}_j \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

حال با توجه به  $\hat{s}_j$  و [16] و [23] داریم:

$$\hat{t}_U = (\hat{A}^T \hat{W}^T \hat{W} \hat{A})^{-1} (\hat{A}^T \hat{W}^T \hat{b}) \quad (24)$$

جایی که  $\hat{W} = I_3 \otimes \text{diag}(\hat{\omega})$  و  $\otimes$  نشان‌دهنده کرونکر است و داریم:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ -2\lambda_{ij}^2 \hat{s}_j^T & \lambda_{ij}^2 \\ \vdots & \vdots \\ c_{ij}^2 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ k^T & 0 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad \hat{b} = \begin{bmatrix} \vdots \\ d_0^2 - \lambda_{ij}^2 \|\hat{s}_j\|^2 \\ \vdots \\ c_{ij}^2 \hat{s}_j \\ \vdots \\ k^T \hat{s}_j + \hat{d}_{ij} \cos(\alpha_{ij}) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$Q^{-1} \left( \Omega_j (p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right), j = 1, 2, \dots, M$$

باتوجه به [25] برای تقریب (۱۰) در صورتی که مقدار تخمین زده شده  $\Omega_j$  را برابر  $\Omega_{j_0}$  در نظر بگیریم داریم:

$$\min_{\Omega, \hat{d}_{ij}} \frac{1}{\Omega_{j_0}^2} \left( \Omega_j (p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right)^T \quad (12)$$

$$Q^{-1} \left( \Omega_j (p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right), j = 1, 2, \dots, M$$

پس برای تخمین (۱۰) می‌توانیم بنویسیم:

$$\min_{\Omega, \hat{d}_{ij}} \left( \Omega_j (p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right)^T \quad (13)$$

$$Q^{-1} \left( \Omega_j (p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right), j = 1, 2, \dots, M$$

گرادیان (۱۲) را نسبت به  $\Omega_j$  برابر صفر در نظر می‌گیریم:

$$2(p_{ij} - p_0)^T Q^{-1} \left( \Omega_j (p_{ij} - p_0) - 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right) = 0, j = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

پس داریم:

$$\Omega_j = \frac{(p_{ij} - p_0)^T Q^{-1} \left( 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right)}{(p_{ij} - p_0)^T Q^{-1} (p_{ij} - p_0)}, j = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

$$\beta_j = \frac{(p_{ij} - p_0)^T Q^{-1} (p_{ij} - p_0)}{(p_{ij} - p_0)^T Q^{-1} \left( 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{ij}}{d_0} \right) \right)}, j = 1, 2, \dots, M \quad (16)$$

حال برای تقریب  $\beta$  کلی داریم:

$$\beta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \beta_i \quad (17)$$

حال برای مکان‌یابی با الگوریتم بازگشتی زیر ادامه می‌دهیم:

۱- با PLE تخمین زده شده از (۱۶) با فرض سنسورهای  $\mathcal{A}$  مکان اهداف را تخمین می‌زنیم.

۲- هدف مکان‌یابی شده با PLE جدید را با  $\tilde{t}_k$  و هدف مکان‌یابی شده با PLE قدیمی را  $\hat{t}_k$  فرض می‌کنیم. در صورت

#### ۴- نتایج عملکرد

در این بخش به شبیه‌سازی و مقایسه روش‌ها می‌پردازیم. در تمامی روش‌ها، مکان اهداف و سنسورها مشابه است. مکان ۷ سنسور در رئوس مکعبی به ضلع ۱۰ متر و مکان ۳ هدف در خارج این مکعب هستند. فرض مکان ۷ سنسور در رئوس مکعبی به ضلع ۱۰ متر بوده است به صورت  $[0,0,0]$  ،  $[0,10,0]$  ،  $[10,0,0]$  ،  $[10,0,10]$  ،  $[0,0,10]$  ،  $[10,10,0]$  ،  $[10,10,10]$  که به این دلیل انتخاب گردید تا حجم محاسبات کاهش یابد. همچنین اهداف در  $[-20,30,-10]$  ،  $[10,25,35]$  ،  $[30,-10,40]$  در شبیه‌سازی می‌باشند تا در تمامی فاصله‌ها الگوریتم مورد ارزیابی قرار گیرد. شکل مکان قرارگیری سنسورها و اهداف و هندسه مسئله در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در ادامه خواهیم دید، علت زیاد شدن خطا در تمامی روش‌ها در همین نوع انتخاب مختصات ارزیابی می‌گردد که البته به شرایط عملیاتی نزدیک‌تر است، زیرا در صورتی که اهداف در فضای ما بین سنسورها در نظر گرفته شوند خطا کاهش می‌یابد؛ اما در شرایط فعلی فرض شده خطا افزایش خواهد یافت. این نوع شبیه‌سازی منجر به خطایی حدود ۳ متر در مقیاس ده‌متری گردید که البته قابل‌مشاهده است که سایر روش‌های مقالات نیز دچار این خطا گردیدند.

در فاصله ثابت  $d_0 = 1m$  توان دریافتی ثابت  $p_0 = -10dBm$  در نظر گرفته می‌شود. میزان خطا نمایش داده شده از فرمول  $RMSE^1$

به شرح  $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \|t_i - \hat{t}_i\|^2}{M}}$  که در آن  $t_i$  مکان اصلی هدف،  $\hat{t}_i$

مکان تخمین زده شده هدف و  $M$  تعداد اهداف می‌باشد.

شکل نمایش دهنده مقایسه  $RMSE$  روش قسمت A و B برحسب تعداد تکرار الگوریتم مکان‌یابی است. این آزمایش در حالی انجام گرفته است که تعداد سنسورهای  $\mathcal{A}$  برابر ۴ و تعداد سنسورهای  $\mathcal{B}$  برابر ۳ است. همچنین  $\delta_{n_{ij}} = 10 dBm$  ،  $\delta_{v_{ij}} = 10 deg$  و  $\delta_{m_{ij}} = 10 dBm$  باشد نتایج قسمت A با برچسب  $WLS_A$  و قسمت B با برچسب  $WLS_{AUB}$  نمایش داده شده‌اند.

که در آن  $\hat{\omega} = [\sqrt{\hat{\omega}_{ij}}]^T$  ،  $\hat{\omega}_{ij} = 1 - \frac{\hat{d}_{ij}}{\sum_{i=1}^K \hat{d}_{ij}}$  و  $\hat{d}_{ij} =$

$d_0 10^{\frac{p_{ij}-p_0}{10\beta}}$  می‌باشد. ( $j = 1,2, \dots, N$  و  $i = 1,2, \dots, M$ ) پس داریم

$$\hat{t}_U = [\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i]^T$$

حال به تخمین PLE می‌پردازیم که به رابطه مشابه (۱۵) می‌رسیم:

$$\beta_j = \frac{(p_{ij} - p_0)Q^{-1}(p_{ij} - p_0)^T}{(p_{ij} - p_0)Q^{-1}\left(10 \log_{10}\left(\frac{\hat{d}_{ij}}{d_0}\right)\right)^T} \quad (25)$$

که  $\hat{d}_{ij}$  است پس داریم:

$$\beta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \beta_i \quad (25)$$

حال برای مکان‌یابی با الگوریتم بازگشتی زیر ادامه می‌دهیم:

۱- با PLE تخمین زده شده از (۲۵) با فرض سنسورهای  $\mathcal{A} \cup \mathcal{B}$  مکان اهداف را تخمین می‌زنیم.

۲- مکان سنسورهای  $\mathcal{B}$  را تخمین می‌زنیم.

۳- با استفاده از PLE تخمین زده شده و سنسورهای  $\mathcal{A} \cup \mathcal{B}$  اهداف را مکان‌یابی می‌نماییم.

۴- هدف مکان‌یابی شده با PLE جدید را با  $\hat{t}_U$  و هدف مکان‌یابی شده با PLE قدیمی را  $\hat{t}'_U$  فرض می‌کنیم. در صورت عدم صحت شرط  $\|\hat{t}'_U - \hat{t}_U\| < \varepsilon_0$  ادامه می‌دهیم. ( $\varepsilon_0 = 10^{-1}M$ )

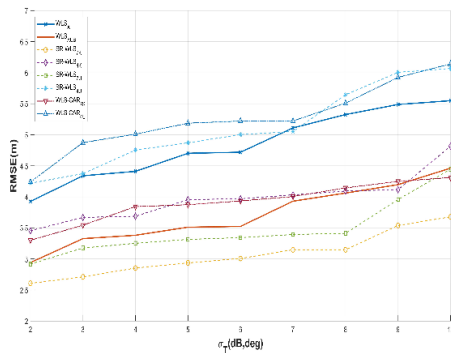
۵- باتوجه به اهداف  $\hat{t}_U$  و (۱۶) مجدداً به تخمین PLE می‌پردازیم و با PLE جدید محاسبه شده مراحل را تکرار می‌کنیم.

در پایان بخش الگوریتم پیشنهادی، آنالیز پیچیدگی روش پیشنهادی در مقایسه با روش مقاله [16] که به نام SR-WLS معروف است، در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۱ طبق مقاله [16] مقدار  $K_{Max}$  برابر ماکزیمم تعداد مراحل الگوریتم Bisection به کار رفته در الگوریتم مقاله [16] است. در روش پیشنهادی، محاسبات غالب برای ضرب ماتریسها در رابطه (۲۴) است که در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در این مقاله پیچیده تر از روش SR-WLS است.

جدول ۱- تحلیل پیچیدگی روش پیشنهادی در مقایسه با روش SR-WLS

الگوریتم مکان‌یابی	مرتب پیچیدگی
SR-WLS [16]	$2O(N \cdot K_{Max})$
روش پیشنهادی	$O(N^2M)$

<sup>1</sup> Root Mean Square Error



شکل ۵: RMSE برحسب  $\delta_T$  (dBm, deg) جاییکه  $N_A = 4$ .

$\delta_{l_i} = 0, 10$  (dBm) و  $N_B = 3$

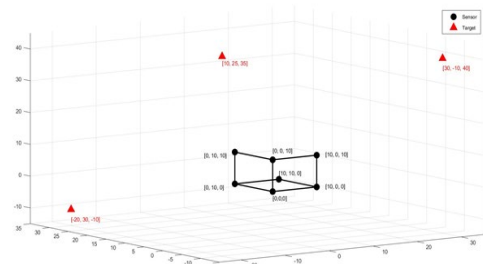
شکل نمایش دهنده مقایسه RMSE اهداف برحسب  $\delta_T = \delta_{n_{ij}}$  در این قسمت نتایج مقاله در قسمت A با برچسب WLS<sub>A</sub> و قسمت B با برچسب WLS<sub>AUB</sub> هر دو بعد از ۵ بار تکرار الگوریتمها نمایش داده شدهاند. همچنین مقاله [16] در حالات زیر شبیه سازی گشتهاند:

- با فرض  $N=7$  و  $\delta_{l_i} = 0$  dBm با برچسب SR-WLS<sub>7K</sub> نمایش داده شده تا نماینده حالت از دست رفتن اطلاعات مکانی هیچ یک از سنسورها و معلوم بودن مقدار ضریب اتلاف کانال باشد.
- با فرض  $N=4$  و  $\delta_{l_i} = 0$  dBm با برچسب SR-WLS<sub>4K</sub> نمایش داده شده تا نماینده حالت از دست رفتن اطلاعات مکانی ۳ سنسور و معلوم بودن مقدار ضریب اتلاف کانال باشد.
- با فرض  $N=7$  و  $\delta_{l_i} = 10$  dBm با برچسب SR-WLS<sub>7U</sub> نمایش داده شده تا نماینده حالت از دست رفتن اطلاعات مکانی هیچ یک از سنسورها و نامعلوم بودن مقدار ضریب اتلاف کانال باشد.
- و در نهایت با فرض  $N=4$  و  $\delta_{l_i} = 10$  dBm با برچسب SR-WLS<sub>4U</sub> نمایش داده شده تا نماینده حالت از دست رفتن اطلاعات مکانی ۳ سنسور و نامعلوم بودن مقدار ضریب اتلاف کانال باشد.

همچنین نتایج مقاله [23] در حالت های زیر شبیه سازی شدهاند:

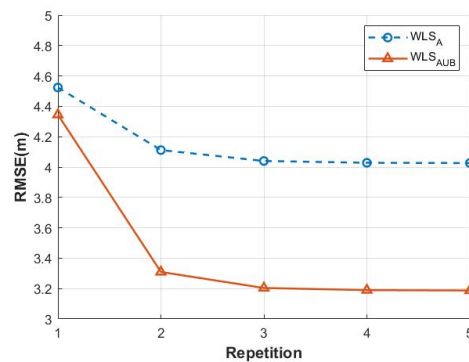
- با فرض  $N=7$  و  $\delta_{l_i} = 0$  dBm با برچسب WLS-CAR<sub>7K</sub> و  $N=4$  نمایش داده شده تا نمایش حالت از دست رفتن اطلاعات مکانی هیچ یک از سنسورها و معلوم بودن مقدار ضریب اتلاف کانال باشد.
- در حالت  $\delta_{l_i} = 10$  dBm با برچسب WLS-CAR<sub>4U</sub> تا نماینده حالت از دست رفتن اطلاعات مکانی ۳ سنسور و نامعلوم بودن مقدار ضریب اتلاف کانال باشد.

در شکل ۳ و شکل ۴ قابل مشاهده است که با تکرار الگوریتم روند بهبود دقت مکان یابی اهداف و دقت PLE افزایش می یابد. این افزایش

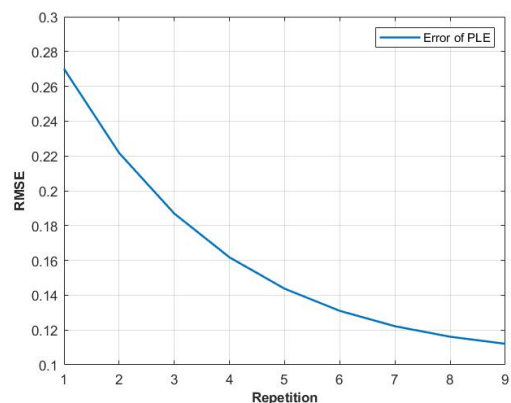


شکل ۲: نمایش مکان سنسورها و اهداف

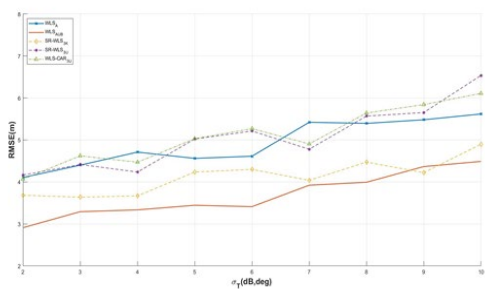
شکل نمایش دهنده RMSE بهبود دقت PLE برحسب تعداد تکرار الگوریتم در قسمت B می باشد. این آزمایش در حالی انجام گرفته است که تعداد سنسورهای  $\mathcal{A}$  برابر ۴ و تعداد سنسورهای  $\mathcal{B}$  برابر ۳ است. همچنین  $\delta_{n_{ij}} = \delta_{v_{ij}} = 10$  deg ،  $\delta_{n_{ij}} = 10$  dBm و  $\delta_{l_i} = 10$  dBm باشد.



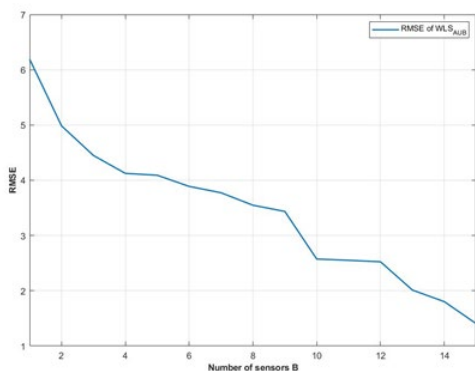
شکل ۳: نمایش RMSE اهداف بر حسب تعداد تکرار جاییکه  $N_A = 4$  و  $\delta_{n_{ij}} = \delta_{m_{ij}} = \delta_{v_{ij}} = 10$  (dBm, deg) ،  $N_B = 3$  ،  $\delta_{l_i} = 10$  (dBm)



شکل ۴: نمایش RMSE PLE برحسب تعداد تکرار جاییکه  $N_A = 4$  و  $\delta_{n_{ij}} = \delta_{m_{ij}} = \delta_{v_{ij}} = 10$  (dBm, deg) ،  $N_B = 3$  ،  $\delta_{l_i} = 10$  (dBm)



شکل ۷: RMSE برحسب  $\delta_T$  (dBm, deg) جایبکه  $N_A = 3$  ،  $N_B = 4$  و  $\delta_{I_i} = 0,10$  (dBm) در مقایسه با سایر روشهایی که فقط سه سنسور با مکان معلوم دارند.



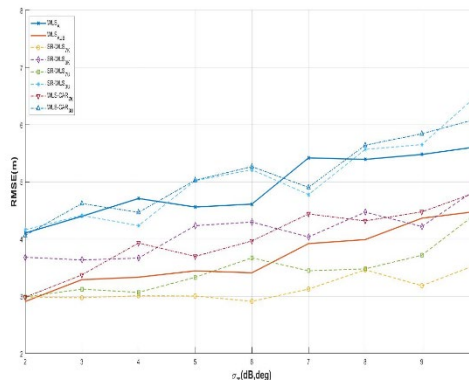
شکل ۸: RMSE برحسب  $N_B$  وقتی که  $N_A = 3$  ،

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی روش مکان‌یابی اهداف با استفاده از ترکیب مقادیر RSS و AoA در حالتی که مقدار دقیق PLE و همچنین مکان تعدادی از سنسورها در دسترس نیست پرداخته شد. ما توانستیم با استفاده از اطلاعاتی که در حالت عادی به علت مشخص نبودن مکان آنها بلااستفاده هستند به ارتقای الگوریتم کمک کنیم. همچنین با یک الگوریتم بازگشتی دقت PLE تخمینی را افزایش داده و با کمک PLE جدید دقت تخمین اهداف را افزایش دهیم. این الگوریتم با تعداد دفعات تکرار کم نیز می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در نتیجه به وجود آورد. به‌عنوان مثالی از کاربرد روش ارائه شده، می‌توان به مسئله مکان‌یابی در اینترنت اشیا اشاره کرد. بدین منظور از دودسته سنسور با مکان ثابت و متحرک استفاده می‌گردد. این دسته متحرک می‌تواند تلفن‌های همراه، خودروهای شخصی و... باشند. در صورتی که بنا بر هر دلیلی سامانه مرکزی مکان‌یاب امکان دریافت اطلاعات مکانی این سنسورهای متحرک را نداشته باشد و یا این سنسورها نتوانند اطلاعات خود را ارسال

حتی بعد از دوبار تکرار الگوریتم نیز قابل توجه است. از شکل ۵ می‌توان دریافت، مشخص نبودن PLE به صورت دقیق تأثیر چشم‌گیری در دقت مکان‌یابی دارد و با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان این تأثیر را به میزان قابل قبولی کاهش داد. همچنین استفاده از سنسورهایی که اطلاعات آنها وجود دارد اما مکانشان نامعلوم است باعث افزایش دقت مکان‌یابی می‌گردد.

در شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی برای حالتی که تعداد سنسورهای با مکان معلوم برابر ۳ و تعداد سنسورهای با مکان نامعلوم برابر ۴ باشد، نشان داده شده است. سایر پارامترهای شبیه‌سازی مانند حالت قبل در شکل ۵ است. شکل ۶ نشان می‌دهد که در حالت تعداد سنسورهای با مکان معلوم کمتر، بهبود روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روشها قابل توجه تر است. برای درک بهتر مزیت روش ارائه شده، در شکل ۷ نتایج روش پیشنهادی را تنها با روشهایی مقایسه کردیم که مانند روش پیشنهاد شده فقط سه سنسور با مکان معلوم دارند. همانطور که از شکل ۷ واضح است روش پیشنهادی دارای نتایج بهتر با خطای مکان یابی کمتری نسبت به سایر روشها است. همچنین، برای بررسی اثر تعداد سنسورهای با مکان نامعلوم و تأیید این نکته که یکی از مزیت‌های روش پیشنهادی این است که از اطلاعات سنسورهای با مکان نامعلوم هم بهره می‌گیرد و با افزایش آنها می‌توان به خطای کمتری در تخمین مکان اهداف دست پیدا کرد، شکل ۸ نمایش داده شده است. در این شکل تعداد سنسورهای با مکان معلوم ۳ در نظر گرفته شده است و سپس تعداد سنسورهای با مکان نامعلوم برابر ۱ تا ۱۵ در نظر گرفته شده است و خطای RMSE بر حسب تعداد سنسورهای با مکان نامعلوم رسم شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، خطا با افزایش تعداد سنسورها کاهش می‌یابد، در صورتی که در سایر روشها فقط از اطلاعات همان سه سنسور با مکان معلوم استفاده می‌شود و نتایج خطای تخمین بهبود پیدا نمی‌کند.



شکل ۶: RMSE برحسب  $\delta_T$  (dBm, deg) جایبکه  $N_A = 3$  ،  $N_B = 4$  و  $\delta_{I_i} = 0,10$  (dBm)



- [15] S. Wang, B. R. Jackson, and R. Inkol, "Hybrid RSS/AOA emitter location estimation based on least squares and maximum likelihood criteria," Biennial Symposium on Communications, May 2012, doi: 10.1109/qbsc.2012.6221344.
- [16] S.Tomic, R. Dinis, J. Gomes, and M. Beko, "3-D Target Localization in Wireless Sensor Networks Using RSS and AoA Measurements," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Apr. 2017, doi: 10.1109/tvt.2016.2589923.
- [17] S.Tomic, J. Gomes, M. Beko, R. Dinis, and P. Montezuma, "A Closed-Form Solution for RSS/AoA Target Localization by Spherical Coordinates Conversion," IEEE Wireless Communications Letters, Oct. 2016, doi: 10.1109/lwc.2016.2615614.
- [18] S. Chang, Y. Zheng, P. An, J. Bao, and J. Li, "3-D RSS-AOA Based Target Localization Method in Wireless Sensor Networks Using Convex Relaxation," IEEE Access, Jun. 2020, doi: 10.1109/access.2020.3000793.
- [19] W. C. Li, L. Wang, M. Xiao, Y. Li, and H. Zhang, "Closed Form Solution for 3D Localization Based on Joint RSS and AOA Measurements for Mobile Communications," IEEE Access, Jan. 2020, doi: 10.1109/access.2019.2962811.
- [20] Q. Qi, Y. Li, Y. Wu, Y. Wang, Y. Yue, and X. Wang, "RSS-AOA-Based Localization via Mixed Semi-Definite and Second-Order Cone Relaxation in 3-D Wireless Sensor Networks," IEEE Access, Aug. 2019, doi: 10.1109/access.2019.2936600.
- [21] H. Qi, L. Mo, and X. Wu, "SDP Relaxation Methods for RSS/AOA-Based Localization in Sensor Networks," IEEE Access, Mar. 2020, doi: 10.1109/access.2020.2981639.
- [22] W. Ding, S. Chang, and J. Li, "A Novel Weighted Localization Method in Wireless Sensor Networks Based on Hybrid RSS/AoA Measurements," IEEE Access, Nov. 2021, doi: 10.1109/access.2021.3126148.
- [23] S.Tomic, J. Gomes, M. Beko, and M. Tuba, "A Linear Estimator for Network Localization Using Integrated RSS and AOA Measurements," IEEE Signal Processing Letters, Jan. 2019, doi: 10.1109/lsp.2019.2892225.

کنند ما با استفاده از الگوریتم‌های سابق نمی‌توانیم از اطلاعات دریافتی آنها استفاده نماییم. اما با استفاده از الگوریتم پیشنهادی این فرصت به وجود می‌آید تا نتایج مکان‌یابی را ارتقا دهیم.

## ۶- مراجع

- [1] R. Sari, "Localization in Wireless Sensor Network by Hybrid Measurement of Received Signal Strengths (RSS) and Angle of Arrival (AoA) with Unknown Path Loss Exponent", M.Sc. Thesis, Qom University of Technology, 2018, In Persian.
- [2] A. Montaser and O. Moselhi, "RFID indoor location identification for construction projects," Automation in Construction, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2013.06.012.
- [3] T. Dag and T. Arsan, "Received signal strength based least squares lateration algorithm for indoor localization," Computers & Electrical Engineering, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.compeleceng.2017.08.014.
- [4] M. Youssef, A. K. Agrawala, and A. U. Shankar, "WLAN location determination via clustering and probability distributions," IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Mar. 2003, doi: 10.1109/percom.2003.1192736.
- [5] D. Pai, I. Sasi, P. S. Mantripragada, M. Malpani, and N. Aggarwal, "Padati: A Robust Pedestrian Dead Reckoning System on Smartphones," Trust, Security And Privacy In Computing And Communications, Jun. 2012, doi: 10.1109/trustcom.2012.218.
- [6] R. Zekavat and R. Michael. Buehrer, "Handbook of position location: Theory, practice and advances," John Wiley & Sons, vol. 27, Jan. 2011.
- [7] J. He and Y. J. Chun, "Performance Analysis for AOA-Based Localization Under Millimeter-Wave Wireless Networks," IEEE Access, Jan. 2022, doi: 10.1109/access.2022.3149915.
- [8] I. Guvenc and C.-C. Chong, "A Survey on TOA Based Wireless Localization and NLOS Mitigation Techniques," IEEE Communications Surveys and Tutorials, Jul. 2009, doi: 10.1109/surv.2009.090308.
- [9] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, Jan. 2009, doi: 10.1109/surv.2009.090103.
- [10] J. M. Fresno, G. Robles, J. M. Martinez-Tarifa, and B. G. Stewart, "Survey on the Performance of Source Localization Algorithms," Sensors, Nov. 2017, doi: 10.3390/s17112666.
- [11] L. Lin, H. C. So, F. K. W. Chan, Y.-T. Chan, and K. C. Ho, "A new constrained weighted least squares algorithm for TDOA-based localization," Signal Processing, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.sigpro.2013.04.004.
- [12] H. C. So and L. Lin, "Linear Least Squares Approach for Accurate Received Signal Strength Based Source Localization," IEEE Transactions on Signal Processing, Aug. 2011, doi: 10.1109/tsp.2011.2152400.
- [13] H. Nazari and M. R. Danaee, "Linear Least-Squares Based Source Localization for New DRSS Model," Journal of "Radar", vol. 23, pp. 39-44, Jan. 2021, magiran.com/p2233359.
- [14] K. Yu, "3-d localization error analysis in wireless networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Oct. 2007, doi: 10.1109/twc.2007.05596.