

## روش اثرانگشت مبتنی بر تأخیر انتشار در موقعیت‌یابی داخلی

لیلا لاریجانی<sup>۱</sup>، اسفندیار مهرشاهی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۹۸/۰۳/۱۱، پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۷)

### چکیده

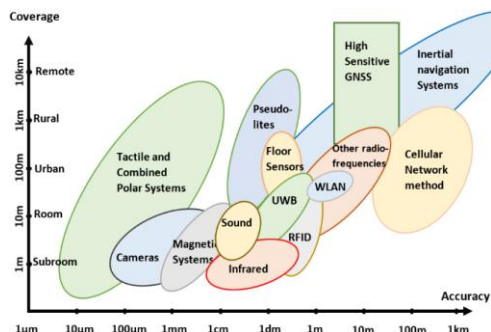
در این مقاله روشی برای موقعیت‌یابی در فضای محدود، در شرایط وجود چندمسیرگی در امواج رادیویی ارائه شده است. در این روش از مزیت عدم تغییر تأخیر مسیر در برخورد با موانع استفاده شده و نقشه اثرانگشتی محیط با استفاده از یک تحلیل ساده استخراج می‌شود که قابلیت به‌روزرسانی دارد. استفاده از تأخیر انتشار موج رادیویی امکان تهیه اثرانگشت دقیق را به‌صورت محاسباتی در اختیار قرار می‌دهد. مزیتی که در روش‌های معمول اثرانگشتی مبتنی بر سطح سیگنال دریافتی وجود ندارد و تهیه نقشه اثرانگشت مستلزم اندازه‌گیری است. علاوه بر این، استفاده از تأخیر انتشار امکان تفکیک دریافتی‌ها را در مقایسه با سطح سیگنال دریافتی ایجاد کرده و به اطلاعات بُعد اضافه‌ای داده است که علاوه بر حذف ابهام، دقت تخمین موقعیت را افزایش می‌دهد. روال پیشنهادی در یک سناریو ارائه شده و نتایج حاصل میانگین خطای بهتر از ۶/۵ cm و واریانس بهتر از ۳/۷ cm را به‌دست آورده است.

**کلیدواژه‌ها:** سرویس‌های مبتنی بر مکان، موقعیت‌یابی داخلی، روش اثرانگشتی، فرایهن باند، الگوریتم تطابق الگو

### ۱. مقدمه

دقت مکانی بیشتر، مبین این تفاوت است. این تفاوت‌ها از دو دیدگاه، تنوع تجهیزات مورد استفاده و الگوریتم‌های آن‌ها مورد توجه است. تجهیزات بی‌سیم بلوتوث کم‌توان<sup>۴</sup>، Wi-Fi، ارتباطات نور مرئی<sup>۵</sup> و فرایهن باند<sup>۶</sup>، RFID و Zigbee با توجه به برد محدود آن‌ها تناسب خوبی با موقعیت‌یابی داخلی دارند [۲].

شکل (۱) محدوده عملکرد تقریبی انواع فن‌آوری‌های بی‌سیم را برای موقعیت‌یابی داخلی و بیرونی برحسب فاصله عملکرد و دقت نشان می‌دهد، فواصل چند ده متر و دقت‌های بهتر از یک متر در محدوده موقعیت‌یابی داخلی هستند و فناوری‌های مورد استفاده آن‌ها نیز مشاهده می‌شود [۳].



شکل (۱): فناوری‌های موقعیت‌یابی داخلی در وابستگی دقت و پوشش [۳].

موقعیت‌یابی فرایندی است که طی آن موقعیت افراد، تجهیزات و اشیاء دارای حسگر مشخص می‌شود و می‌توان آن را برحسب محیط عملکرد به دو دسته موقعیت‌یابی بیرونی و موقعیت‌یابی داخلی تقسیم نمود. موقعیت‌یابی بیرونی در فضای باز و موقعیت‌یابی داخلی در داخل ساختمان‌ها (خانه‌ها، بیمارستان‌ها و...) صورت می‌پذیرد. کاربردهای مختلف به انواع متفاوتی از فناوری‌ها که با الزامات و قيود آن‌ها سازگار است، نیاز دارد [۱].

توسعه اینترنت اشیا و خدمات مبتنی بر مکان<sup>۲</sup> اسباب تحقیق و توسعه روزافزون در حوزه موقعیت‌یابی داخلی شده است. باوجود سهم انکارناپذیر سیستم موقعیت‌یابی جهانی<sup>۳</sup> در کاربردهای مکان‌یابی، لکن این روش در موقعیت‌یابی داخلی مؤثر نیست، از این رو روش‌های موقعیت‌یابی داخلی مورد توجه قرار می‌گیرد. برخی تفاوت‌های موقعیت‌یابی داخلی و بیرونی باعث می‌شوند که این دو فرایند از نظر شیوه اجرا و تجهیزات مورد استفاده متفاوت باشند. در موقعیت‌یابی داخلی فضاها محدود و معمولاً دارای معماری مشخص است، شرایط محیطی (تغییرات دما و رطوبت) و تحرک‌پذیری نسبت به موقعیت‌یابی بیرونی دارای گستره کوچک‌تری است. در مقابل وجود موانع و لزوم

<sup>۴</sup> Bluetooth Low Energy

<sup>۵</sup> Visible Light Communication

<sup>۶</sup> Ultra Wide Band

\* نویسنده پاسخگو: mehr@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> Location Base Services

<sup>۳</sup> Global Navigation Satellite System

چندمسیرگی همراه است و غالباً شرایط دید غیرمستقیم<sup>۷</sup> بر آن حاکم است و نیز سطح موانع و دیوارها سخت و ناهموار است مانند معادن یا محیطهایی که دیوارهای آن مستعد پراکندگی سیگنال بر روی آنهاست، روشهای هندسی کارایی لازم را ندارند [۷]. روشهای اثرانگشت نتایج بهتری در چنین محیطیهایی دارند، این روشها با استخراج اثرانگشت نقاط مرجع و استفاده از الگوریتمهای تطابق الگو عمل می‌نمایند [۸]. در قیاس با مکان‌یابی هندسی، روش اثرانگشتی برای محیطهای داخلی با ابعاد محدود و معماری نامتقارن بسیار مناسب است [۹].

در ادامه مقاله به اصول عملکرد، محاسبات، ارائه نمونه و نتایج مربوط به روش اثرانگشت مبتنی بر تأخیر انتشار با فن‌آوری فرایهن باند پرداخته می‌شود.

## ۲. اصول عملکرد

موقعیت‌یابی اثرانگشتی شامل فازهای متصل و منفصل است. در فاز منفصل، نقشه محیط بدین‌صورت ایجاد و به‌روز می‌شود که با وجود یا ورود هر شیء، اثرانگشت آن اندازه‌گیری شده و تأثیر آن در تغییر نقشه لحاظ می‌شود. در این فاز نقشه‌ای خواهیم داشت که تعدادی موقعیت با اثرانگشت متناظر معین در آن مشخص شده است. در فاز متصل با ورود هدف با مکان نامشخص، اندازه‌گیری و تطابق با الگوی اثرانگشت ایجادشده در مرحله قبل طی فرآیندی که به آن خواهیم پرداخت، موقعیت مکانی هدف را تخمین می‌زند.

بدین‌صورت که در فاز منفصل، برای  $K$  موقعیت  $\{r_i\}_{i=1}^K$ ، اثرانگشت‌ها استخراج و الگوی آنها به‌صورت  $\{q_i\}_{i=1}^K$  در نقشه ذخیره می‌شود.

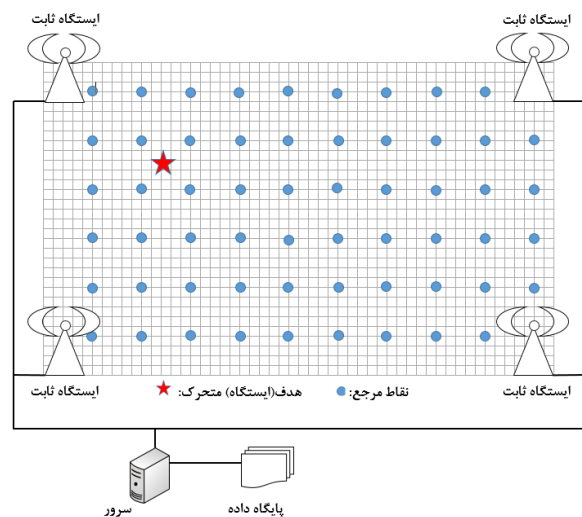
$$t = \arg \min_{i \in \{1, \dots, K\}} \|q - q_i\| \quad (1)$$

$r_t$ : Estimated target position

که در آن،  $q$  مقدار اندازه‌گیری شده پارامتر استفاده‌شده در اثرانگشت در نقطه هدف و  $t$  آرگومان نزدیک‌ترین نقطه مرجع مشابه و طبعاً  $r_t$  تخمینی از موقعیت هدف است [۹].

ساده‌ترین روند استخراج موقعیت هدف  $t$  در فاز منفصل استفاده از تخمین بر اساس نزدیک‌ترین همسایه مطابق رابطه (۱) است. شیوه‌های دیگری مانند نزدیک‌ترین همسایه وزنی [۹]، ماشین بردار خدمت [۱۰]، شبکه عصبی [۶] نیز در جهت تکمیل و افزایش صحت و دقت تخمین مکان معرفی شده‌اند.

در محیطهای بسته و محدود استفاده از روشهای فرایهن باند در جهت کسب دقت و صحت مناسب، مفید و معمول است [۴]. روشهای موقعیت‌یابی داخلی مبتنی بر UWB با معیارهای متفاوتی دسته‌بندی شده‌اند، در یکی از این دسته‌بندی‌ها دوشاخه کلی در نظر گرفته شده است، یکی روشهای هندسی شامل  $TOA^1$ ،  $TDOA^2$ ،  $AOA^3$ ،  $RSS^4$  و دیگری روش اثرانگشتی است. روش اثرانگشتی موقعیت هدف را از طریق بهترین تطابق با الگوی از پیش اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند. نمایی کلی از نمادهای مصطلح در روش اثرانگشتی در شکل (۲) نشان داده شده است. ایستگاه‌های ثابت تبادل داده با ایستگاه متحرک<sup>۵</sup> را از یکسو و از سوی دیگر با سرور شبکه عهده‌دار هستند. دایره‌ها نقاط مرجع را نشان داده و ستاره نمایان‌گر هدف (ایستگاه) متحرک است.



شکل (۲): نمایی کلی از عناصر روش اثرانگشتی.

کاربردهای اولیه موقعیت‌یابی، عموماً بر پردازش اطلاعات اخذشده از ایستگاه متحرک استوار شده است. این اطلاعات، پارامترهای روش هندسی شامل  $RSS$ ،  $AOA$ ،  $TOA$ ،  $TDOA$  هستند [۵]. برای همه این روشها مسیر استفاده‌شده باید دید مستقیم<sup>۶</sup> باشد تا دقت قابل‌تائیدی را نتیجه بدهد، این شرط عموماً در موقعیت‌یابی داخلی برآورده نمی‌شود و روشهای هندسی و ترکیب آنها نیز دقت مکان‌یابی مناسبی را ایجاد نمی‌نمایند [۶]. در محیطهای داخلی که انتشار سیگنال با

<sup>1</sup> Time of arrival

<sup>2</sup> Time difference of arrival

<sup>3</sup> Angel of arrival

<sup>4</sup> Received signal strength

<sup>5</sup> Mobile Station

<sup>6</sup> Line of sight

<sup>7</sup> Non line of sight

اشباع شدن گیرنده به واسطه جمع هم‌فاز سیگنال‌ها و عدم امکان تفکیک دریافتی‌ها از مسیرهای مختلف وجود دارد. از آنجائی که ساختار و جنس موانع روی پارامترهای کانال بی‌سیم تأثیرگذار است [۱۲]، تهیه نقشه اثرانگشت در روش RSS مستلزم استفاده از مدل‌های پیچیده انتشار و انعکاس است که معمولاً با توجه به پیچیدگی و عدم دقت آن، فرآیند وقت‌گیر اندازه‌گیری ترجیح داده می‌شود. در روش مبتنی بر اندازه‌گیری تأخیر دریافت سیگنال احتمال اشباع شدن کاهش و قابلیت تفکیک دریافتی‌ها از مسیرهای مختلف مقدور است. به عبارت دیگر دریافتی از هر ایستگاه ثابت بسته به زمان دریافت، متفاوت و عملاً به صورت یک بردار خواهد بود که به معنی اضافه شدن یک بُعد به اطلاعات است. در روش اخیر احتمال ابهام در موقعیت‌یابی کاهش و دقت تخمین موقعیت هدف افزایش می‌یابد و برخلاف روش اثرانگشت مبتنی بر RSS و به واسطه این‌که ساختار موانع در هر انعکاس تأخیر اضافی را به مسیر تحمیل نمی‌کند می‌توان برای تهیه نقشه اثرانگشت مبتنی بر تأخیر از روش‌های ساده تحلیل در محیط‌هایی با معماری مشخص بهره جست.

تصویر کلی از روش‌های اثرانگشتی، ایجاد یک مجموعه اطلاعات به‌عنوان نقشه و استخراج بیشترین همبستگی آن با پارامتر مرتبط باهدف مجهول است که منجر به تخمین موقعیت هدف می‌شود. روش‌های متنوعی در این دسته‌بندی با پایگاه داده همبسته<sup>۱</sup> DCM وجود دارد.

یک نمای ساده از فرآیند مکان‌یابی اثرانگشتی در شکل (۳) نشان داده شده است. این شکل در فاز متصل با درخواست موقعیت توسط یک ایستگاه متحرک مجهول‌المکان شروع می‌شود [۱۳]. در قدم نخست، ایستگاه مذکور درخواست تعیین موقعیت خود را از طریق ایستگاه‌های ثابت شبکه موقعیت‌یابی به سرور ارسال می‌نماید. سرور درخواست موقعیت را همراه با اطلاعات اثرانگشت و با استفاده از اطلاعات پایگاه داده و نقشه مستخرج که در فاز منفصل فراهم شده و به صورت پویا نیز به روزرسانی می‌شود، الگوریتم تطابق‌یابی را برای تخمین موقعیت اجرا می‌کند. حضور ایستگاه جدید در صورتی که ابعاد آن به‌گونه‌ای باشد که نقشه محیط و اطلاعات پایگاه داده نیاز به به‌روزرسانی داشته باشند، توسط بخش اصلاح اثرانگشت دریافت و تغییرات اعمال می‌گردد.

در ادامه با تشریح الگوریتم تطابق‌یابی و تخمین موقعیت به ذکر نمونه‌ای در یک فضای بسته شامل سه سالن متصل به هم با حضور ایستگاه‌های ثابت جانمایی شده می‌پردازیم.

از پارامترهای متفاوتی به صورت مجزا یا ترکیبی برای تولید اثرانگشت می‌توان استفاده کرد. متعارف‌ترین پارامتر استفاده شده در مکان‌یابی اثرانگشتی باند باریک، سطح قدرت دریافتی RSS است. از آنجائی که سیگنال‌های UWB به دلیل ساختارشان وضعیت کانال را خیلی بهتر از سیگنال‌های باند باریک مورد بررسی قرار می‌دهند لذا اثرانگشت‌های UWB می‌توانند تنوع بیشتری از اطلاعات وابسته به موقعیت را ایجاد نمایند و بدین خاطر دقت مکان‌یابی را افزایش دهند. استفاده از سیگنال‌های UWB علاوه بر قدرت دریافتی، تأخیر دریافتی به تفکیک مسیر و تعداد مسیرها و طبعاً پارامترهای آماری آن‌ها را در دسترس قرار می‌دهد [۶].

$$q = [\tau_m \cdot \tau_{rms} \cdot \tau_{max} \cdot P \cdot N \cdot P_1 \cdot \tau_1] \quad (2)$$

در رابطه (۲) پارامترهای کانال، شامل تأخیرهای دریافتی، پارامترهای آماری مستخرج از آن و توان دریافتی در مسیرهای مختلف است. که به ترتیب میانگین تأخیر اضافه، rms گستره تأخیر، بیشترین تأخیر اضافه، توان کل دریافتی، تعداد اجزای چندمسیرگی، توان اولین مسیر، تأخیر اولین مسیر هستند. نتایج اثرانگشت UWB دقت مکان‌یابی بسیار خوبی را در وضعیتی که LOS/NLOS هم‌زمان در محیطی که دارای ساختار نامشخص و یک گره یا ایستگاه ثابت است نشان داده است. همچنین نشان می‌دهد که تهیه نقشه اثرانگشت در فاز منفصل یک فرآیند بسیار زمان‌بر بوده و حجم حافظه زیادی برای ذخیره‌سازی پارامترهای کانال نیاز دارد [۹]. از چندمسیرگی زیاد که منتج به تغییرپذیری بالای سیگنال‌های چندمسیرگی می‌شود، می‌توان برای ارتباط هر موقعیت  $z_j = [x_j, y_j]^T$  به نماد منحصربه‌فرد سیگنال  $F_j$  که اثرانگشت آن نامیده می‌شود بهره‌برداری نمود [۱۱]. هرچه پارامترهای اندازه‌گیری سیگنال در مکان‌های مختلف تغییر نماید، اثرانگشت‌های انتخابی بیشتری می‌توان جمع‌آوری نمود، و این موضوع موجب دقت مکان‌یابی بیشتری می‌شود. ساده‌ترین شکل نماد سیگنال  $F_j$  بردار RSS است که از موقعیت هر مرجع خوانده می‌شود، بدین خاطر نیازی به سخت‌افزار پیچیده‌ای نیست. وقتی که هر گیرنده بتواند تأخیر چندمسیرگی را ایجاد نماید، تفکیک پذیری اثرانگشت می‌تواند افزایش یابد. به‌هرحال اکتساب نمایه چندمسیرگی معمولاً نیاز به سیگنال پهن باند و سخت‌افزار پیشرفته دارد، که ممکن است بسیار هزینه‌بر باشد مگر آنکه زیرساخت موجود، این ظرفیت را میسر نماید.

در روش RSS که بر اساس اندازه‌گیری سطح سیگنال دریافتی از ایستگاه‌های ثابت در نقطه هدف عمل می‌کند، امکان

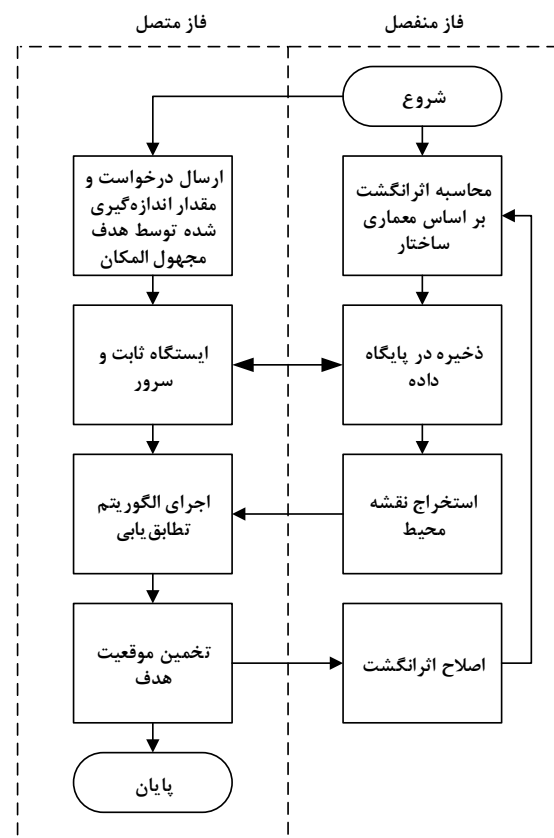
<sup>1</sup> Database Correlation Methods

تفکیک داده‌ها از دو منظر ایستگاه ارسال‌کننده و تأخیر مسیر خواهد بود که این تفکیک به صورت ستون و سطر ماتریس معادله (۳) نمایش داده شده است. ماتریس  $\tau$  مبین این مسئله است که هر ستون ماتریس، اطلاعات دریافتی توسط هدف از یک ایستگاه مشخص در مسیرهای متفاوت است که مقادیر تأخیر مختلف از کم به زیاد مرتب شده است. به ازای هر نقطه مرجع ماتریس  $\tau^{(i)}$  که در آن،  $i$  شماره نقطه مرجع است و مجموعه این ماتریس که هر کدام اثرانگشت نقاط مرجع را دارند، نقشه محیط را ایجاد می‌کنند.  $W$  تعداد ستون‌های ماتریس  $\tau^{(i)}$ ، برابر تعداد ایستگاه‌های ثابت است.

$$\tau^{(i)} = \begin{bmatrix} \tau_{1,1}^{(i)} & \tau_{1,2}^{(i)} & \dots & \tau_{1,W}^{(i)} \\ \tau_{2,1}^{(i)} & \tau_{2,2}^{(i)} & \vdots & \tau_{2,W}^{(i)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{M,1}^{(i)} & \tau_{M,2}^{(i)} & \dots & \tau_{M,W}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

به منظور کاهش حجم پردازش و افزایش سرعت تخمین و نیز دقت آن، موقعیت‌یابی پیشنهادی در سه مرحله انجام می‌شود که دو گام ابتدایی به شیوه ایستا و گام سوم به صورت پویا است. در گام نخست تخمین اولیه موقعیت نقطه هدف با بررسی ماتریس داده اثرانگشت تعیین شده و در گام بعد موقعیت هدف بر اساس الگوریتم پیشنهادی و بزرگ‌نمایی اولیه نقاط مرجع تخمین زده می‌شود و در گام سوم حول نقطه تخمینی با بزرگ‌نمایی نقشه محیط (بزرگ‌نمایی بالاتر از بزرگ‌نمایی اولیه) موقعیت نهایی هدف تخمین زده می‌شود.

همان‌طوری که پیش از این ذکر شد، عناصر هر ستون ماتریس، به ترتیب، زمان دریافت سیگنال از هر ایستگاه به نقطه هدف است، بدین صورت که سطر اول شامل زمان دریافت اولین سیگنال از ایستگاه‌های موجود در محیط بسته و به همین منوال سطر  $k$ ام شامل زمان دریافت  $k$ امین سیگنال دریافتی از آن ایستگاه‌ها است. بدین ترتیب دو پارامتر تأخیر و شماره ایستگاه به عنوان فاکتورهای ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این الگوریتم کمترین انحراف معیار مجموع قدرمطلق اختلاف آرایه دریافتی توسط هدف مجهول‌المکان با پارامترهای ثبت شده در نقاط مرجع مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در آن،  $\tau_{m,n}^{(M)}$  پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط هدف و  $\tau_{m,n}^{(i)}$  مقادیر مربوط به اثرانگشت نقاط مرجع است. بدین ترتیب که ابتدا قدرمطلق اختلاف هر یک از آرایه‌های ماتریس هدف با مرجع  $i$ ام سنجیده شده سپس انحراف معیار مجموع هر سطر محاسبه می‌شود. بدین ترتیب به تعداد نقاط مرجع انحراف معیار اختلاف زمانی آرایه‌ها بدست آمده و این فرآیند برای هر  $k$  نقطه مرجع تکرار می‌شود، و کوچک‌ترین آن‌ها نشانگر موقعیت نقطه هدف است. بزرگ‌نمایی نقاط مرجع بیشترین دقت ممکن را معین می‌نماید.



شکل (۳): گردش داده در اثرانگشت مکانی.

در نمونه ارائه شده نخست نقاطی که اثرانگشت آن‌ها در شکل‌گیری نقشه، مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به عنوان نقاط مجهول‌المکان آزموده می‌شوند. همان‌طور که انتظار می‌رود در صورت صحیح بودن الگوریتم موقعیت‌یابی این آزمون بایستی بدون خطا باشد که مرحله‌ای از آزمون و تأیید الگوریتم است. در مرحله بعد در دو حالت، اول ۳۰ و در حالت دوم ۸۰ نقطه غیر مرجع مورد موقعیت‌یابی قرار گرفته‌اند که نتایج آماری خطای حاصله ارائه شده است.

## ۱-۲. الگوریتم موقعیت‌یابی

در محیط بسته وجود موانع باعث می‌شود که سیگنال‌های ارسالی از هر ایستگاه از چند مسیر به نقطه هدف برسند. پارامتر تفکیک‌کننده این مسیرها، تأخیر زمانی دریافت است. پارامتر مورد ارزیابی برای تخمین موقعیت، داده‌های زمانی مذکور هستند و این پارامترها مورد تحلیل قرار می‌گیرند. داده‌های ارسالی مشابه ماتریس عبارت ۳ توسط نقطه هدف دریافت شده و برای تحلیل و تخمین موقعیت به سرور ارسال می‌شوند. این ارسال به معنی درخواست تعیین موقعیت نیز است. کلیه اطلاعات ارسالی توسط هدف یا ایستگاه‌ها حاوی کد شناسایی فرستنده است. نقطه هدف با توجه به وجود کد شناسایی ارسالی از هر ایستگاه قادر به

اثرانگشت تعیین شده و در گام دوم مختصات هدف با الگوریتم پیشنهادی و دقت تفکیک‌پذیری یک متر که فاصله نقاط مرجع به مختصات  $(0.5 + i, 0.5 + j)$  در نقشه محیط است تخمین زده می‌شود و در گام سوم حول نقطه تخمینی گام قبل با الگوریتم پیشنهادی و بر اساس اطلاعات ثبت شده به‌عنوان نقشه اثرانگشت در فاز منفصل و دقت ۲۵cm که معادل بزرگ‌نمایی ۴ در نقشه حول نقطه تخمینی مرحله قبل است، موقعیت نهائی هدف تخمین زده می‌شود. پس از تخمین نهائی موقعیت هدف با فرض آنکه جسم وارد شده ماتریس اثرانگشت نقاط مرجع را تغییر خواهد داد و به استناد ابعاد هدف، در فاز منفصل مجدداً پارامترهای محیط محاسبه شده و ماتریس‌های نقشه محیط به‌روزرسانی می‌شود. در فاز ایستا ۵۰ نقطه مرجع در نظر گرفته می‌شود و در فاز پویا با توجه به بزرگ‌نمایی ۴ برابری در هر بعد ۸۰۰ نقطه مرجع برای این محیط پیش‌بینی می‌شود که با توجه به بزرگ‌نمایی حول نقطه مرجع کاندید بیشینه ۱۴۴ نقطه مرجع (بلوک  $3 \times 3 \text{ m}^2$ ) لحاظ می‌شود. برای ارزیابی الگوریتم در مثال مذکور در گام نخست اثرانگشت ۵۰ نقطه مرجع استخراج شده است. جهت صحت‌گذاری الگوریتم تمامی نقاط مرجع به‌عنوان ورودی الگوریتم (نقاط فرضی هدف) در نظر گرفته شده و نتایج بررسی گردید، مشاهدات بیانگر دقت صددرصدی تشخیص موقعیت نقاط مرجع در هر دو فاز ایستا و پویا است. در ادامه جهت تکمیل ارزیابی روش، نقطه‌ای نمونه به‌غیر از مختصات نقاط مرجع را وارد محیط نموده و آن را در موقعیت  $(2/25, 0/27)$  قرار داد و نتیجه تخمین را مشاهده نمودیم. در این حالت الگوریتم پیشنهادی موقعیت آن را  $(2/25, 0/25)$  تشخیص داد. خطای ۲ cm در محاسبات حالت پویا مشاهده می‌شود. حد نهایی خطا در این شرایط ۱۲/۵ cm است. قسمتی از داده‌های اثرانگشت برای هدف نمونه به‌صورت جدول (۱) استخراج شده است.

مراحل انجام کار برای حصول نتیجه؛ نخست از روی ابعاد داده دریافتی و سپس استفاده از الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نقاط مرجعی با دقت تفکیک‌پذیری یک متر، تخمین اولیه مختصات نقطه استخراج می‌شود. در این حالت با توجه به موقعیت نقطه هدف، یک، دو و یا چهار نقطه مرجع در نزدیک‌ترین فاصله باهدف مجهول‌المکان قرار می‌گیرند. شکل (۵) نشان‌دهنده حالت‌های مذکور است. فرض این است که نقاط مرجع در رئوس مربع قرار دارند که با علامت  $\star$  مشخص شده است. می‌دانیم که فاصله نقاط مرجع که همان اضلاع مربع است دقت تفکیک‌پذیری آن‌هاست، در صورتی که نقطه هدف در گام دوم در موقعیت  $\bullet$  قرار بگیرد در تقاطع دو خط تقارن قرار داشته و فاصله‌ای برابر با چهار نقطه مرجع دارد و هر چهار نقطه مرجع

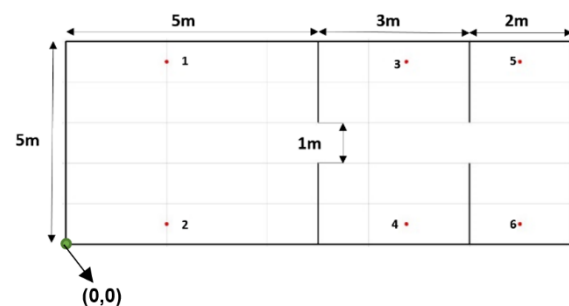
$$\begin{cases} \Delta\tau_{m,n}^{(i)} = |\tau_{m,n}^{(i)} - \tau_{m,n}^{(M)}| \\ S_m^{(i)} = \sum_{n=1}^W \Delta\tau_{m,n}^{(i)} \\ \min_{i=1 \dots K} \sigma^{(i)} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (S_m^{(i)} - \frac{\sum S_m^{(i)}}{M})^2} \end{cases} \quad (4)$$

تخمین مختصات نقطه با مکان نامعلوم، مساوی مختصات نقطه مرجع با حداقل  $\sigma^{(i)}$  است. K تعداد نقاط مرجع، M تعداد سطر ماتریس داده‌های تأخیر زمانی، m عناصر ستون ماتریس، n شماره ایستگاه و عناصر سطر ماتریس رابطه (۳) هستند. بدیهی است که میزان این حداقل اختلاف بیانگر دقت تخمین نقطه هدف است. در صورتی که این حداقل به صفر برسد به معنی این است که نقطه هدف بر روی یکی از نقاط مرجع منطبق شده است. از این‌رو، با بزرگ‌نمایی نقشه و به‌عبارت‌دیگر افزایش تعداد نقاط مرجع حول نقطه تخمینی می‌توان دقت را افزایش داد.

### ۳. ارائه مثال و ارزیابی الگوریتم

در این تحقیق، برای اجرای الگوریتم، محاسبات، ذخیره ماتریس داده و ایجاد نقشه اثرانگشت محیط از شبیه‌ساز متلب استفاده شده است. محیطی که در شبیه‌سازی بررسی و تخمین موقعیت هدف مجهول‌المکان در آن انجام شده، محیطی بسته با سطحی در ابعاد  $50 \text{ m}^2$  است که جزئیات آن مطابق شکل (۴) است.

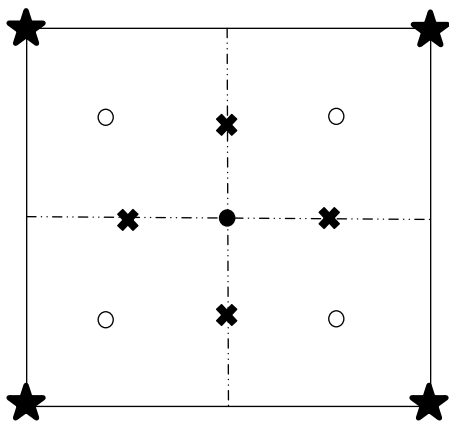
نقاط مشخص شده با شماره ۱ تا ۶ مختصات ایستگاه‌های ثابت را به ترتیب به مختصات  $(2, 0/5)$ ،  $(2, 4/5)$ ،  $(6/5, 0/5)$ ،  $(6/5, 4/5)$ ،  $(9, 0/5)$ ،  $(9, 4/5)$  نشان می‌دهند. هر یک از ایستگاه‌ها سیگنالی را ارسال نموده که کد شناسایی هر ایستگاه را نیز شامل می‌شود، به‌عبارت‌دیگر دیگر سیگنال هر ایستگاه حامل مشخصه‌ای است که آن را از سیگنال دیگر ایستگاه‌ها متمایز می‌سازد.



شکل (۴): مختصات اتاق‌ها و ایستگاه‌ها.

داده دریافتی به سیستم پردازش منتقل و مطابق الگوریتم پیشنهادی موقعیت نقطه هدف تخمین زده می‌شود. داده‌ها برای هر نقطه هدف با توجه به وجود مشخصه ایستگاه روی سیگنال‌ها به‌صورت ماتریسی به فرم ۳ است.

در گام نخست موقعیت نقطه هدف با بررسی ماتریس داده



شکل (۵): نشانگر نقاط مرجع است. ● دارای چهار نقطه مرجع کاندید، × دارای دو نقطه مرجع کاندید و ○ دارای یک نقطه مرجع کاندید است.

اندازه خطای تخمین موقعیت برای نقطه (۲/۲۵، ۰/۷۵) در نقاط مرجع در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۶): اندازه خطای (محور عمودی) تخمین موقعیت هدف در (۲/۲۵، ۰/۷۵) نسبت به شماره نقاط مرجع (محور افقی).

کمترین میزان خطا روی نقطه مرجع ۱۱ که در مختصات (۲/۲۵، ۰/۲۵) قرار دارد اتفاق افتاده است. این حالت مطابق با وضعیت ○ است.

در مثال فوق همان‌طور که در شکل‌های (۶-۵) نیز مشاهده می‌شود تنها نقطه مرجع (۲/۲۵، ۰/۲۵) در نزدیک‌ترین فاصله با هدف مجهول‌المان قرار دارد. سپس دقت تفکیک‌پذیری نقشه محیط را در اطراف نقطه یا نقاط مرجع کاندید افزایش داده و با بزرگ‌نمایی ۴ برابر به قدرت تفکیک‌پذیری ۲۵ cm می‌رسد. این مرحله پویای الگوریتم پیشنهادی است چراکه بزرگ‌نمایی حول نقطه (نقاط) مرجع انتخاب‌شده در مرحله قبل به صورت محلی انجام می‌شود. با اجرای مجدد الگوریتم پیشنهادی در این شرایط موقعیت نقطه هدف با دقت بهتر و با توجه به بزرگ‌نمایی محلی با حجم کمتری از محاسبات استخراج می‌شود.

شکل (۶) اندازه خطای تخمین نقطه هدف را در نقاط مرجع

مستعد تخمین در گام آخر هستند در این حالت عملاً موقعیت نقطه مشخص و نیازی به بزرگ‌نمایی نیست. با این توضیح در صورتی که نقطه هدف در موقعیت × باشد که روی یکی از خطوط تقارن است، با دو نقطه مرجع فاصله برابر داشته و لذا دو نقطه مرجع کاندید بزرگ‌نمایی هستند. در حالتی که نقطه هدف در موقعیت ○ باشد که به معنی قرار نداشتن در خطوط تقارن است دارای یک نقطه مرجع کاندید است.

جدول (۱): تاخیر سیگنال‌های دریافتی در نقطه هدف نمونه در موقعیت (۲/۲۵، ۰/۲۷) از هر ایستگاه و از مسیرهای مختلف.

ایستگاه ۱	ایستگاه ۲	ایستگاه ۳	ایستگاه ۴	ایستگاه ۵	ایستگاه ۶
۱/۴۲	۰/۱۲	۴/۳	۲/۰۶	۷/۴۳	۵/۳۲
۱/۵۹	۰/۲۶	۴/۴۲	۲/۱۸	۷/۵۸	۵/۹۲
۱/۷۵	۱/۴۲	۴/۸	۲/۹۲	۹/۰۸	۷/۱۹
۱/۹۲	۱/۴۴	۵/۰۱	۳/۰۲	۹/۳۱	۷/۳
۲	۱/۹۲	۵/۳۲	۴/۰۹	۹/۴۳	۸/۳۷
۲/۱۲	۱/۹۳	۵/۶۲	۴/۱۵	۹/۵۹	۸/۳۹
۲/۲۵	۳/۰۸	۶/۴۵	۵/۲	۹/۶۵	۸/۴
۲/۳۸	۳/۲۵	۶/۵۳	۵/۲۴	۹/۶۶	۹/۰۳
۳/۵۵	۳/۲۶	۶/۵۹	۵/۳	۹/۷۸	۹/۰۶
۳/۶۲	۳/۳۹	۶/۶۲	۵/۳۵	۱۰/۲۳	۹/۱۳
۳/۶۹	۳/۴۲	۶/۷	۵/۹	۱۰/۲۸	۹/۵۲
۳/۷	۳/۴۳	۶/۸۳	۶/۰۵	۱۰/۳۹	۹/۶
۳/۷۷	۳/۵۵	۶/۹۱	۶/۰۹	۱۰/۷	۹/۶۹
۳/۸۴	۳/۵۸	۶/۹۸	۶/۱۴	۱۰/۹۶	۹/۷۷
۳/۹۲	۳/۶۳	۷/۰۸	۶/۵۵	۱۰/۹۹	۹/۸۳
۴/۷۵	۳/۷	۷/۳	۶/۹۸	۱۱/۰۲	۱۰/۲۶
۴/۹۲	۳/۷۷	۷/۸	۷/۰۱	۱۱/۲۴	۱۰/۴
۴/۹۵	۳/۸۵	۷/۸۷	۷/۱۳	۱۱/۳۲	۱۰/۴۳
۵/۰۸	۳/۹۲	۷/۹۱	۷/۲۵	۱۱/۳۸	۱۰/۵۴
۵/۱۲	۴/۰۶	۸/۰۳	۷/۴۹	۱۱/۴۶	۱۱/۰۶
۵/۲۵	۴/۶	۸/۱۷	۷/۶	۱۱/۶	۱۱/۱۷
۵/۲۸	۴/۷۲	۸/۴۴	۷/۸	۱۱/۷۲	۱۱/۲
۵/۴۴	۴/۷۵	۸/۸	۷/۹	۱۲/۱۸	۱۱/۲۱
۵/۴۸	۴/۷۶	۹/۰۱	۷/۹۲	۱۲/۲۷	۱۱/۳۲
۵/۵۳	۴/۹۸	۹/۱۴	۸/۲۳	۱۳/۲۴	۱۱/۵۲
۵/۵۹	۵/۰۹	۹/۷۲	۸/۷۹	۱۳/۳۲	۱۱/۵۵
۵/۷۶	۵/۲	۱۰/۰۳	۸/۸۸	۱۳/۴۵	۱۱/۶۷
۵/۸۵	۵/۲۵	۱۰/۰۹	۹/۰۱	۱۳/۵۹	۱۱/۷۱
۵/۸۹	۵/۲۶	۱۰/۳۵	۹/۰۴	۱۳/۷۹	۱۱/۸۴
۵/۹۹	۵/۳۱	۱۰/۳۶	۹/۱۱	۱۳/۹۱	۱۱/۸۶
۶/۰۳	۵/۶۶	۱۰/۵۲	۹/۲۸	۱۳/۹۹	۱۱/۹
۶/۱۲	۵/۷۶	۱۰/۶۲	۹/۳	۱۴/۰۳	۱۲/۰۲
۶/۱۷	۵/۸۵	۱۰/۷۳	۹/۷۱	۱۴/۱۵	۱۲/۱۲
۶/۲۶	۵/۹۵	۱۰/۷۸	۹/۸۲	۱۴/۲۶	۱۲/۲۶
۶/۸۱	۶/۳۶	۱۰/۸۳	۹/۸۵	۱۴/۲۹	۱۲/۳۳
۶/۸۶	۶/۴۲	۱۱/۱۹	۱۰/۰۳	۱۴/۴۵	۱۲/۳۷
۶/۹	۶/۵۷	۱۱/۲۹	۱۰/۱۸	۱۴/۵	۱۲/۳۸
۶/۹۳	۶/۵۸	۱۱/۳۵	۱۰/۲۵	۱۴/۵۸	۱۲/۴۹
۶/۹۶	۶/۵۹	۱۱/۵۲	۱۰/۲۷	۱۴/۸۸	۱۲/۵
۷/۰۲	۶/۷	۱۱/۵۷	۱۰/۴	۱۵/۰۲	۱۲/۵۶
۷/۱۹	۶/۷۳	۱۱/۷۱	۱۰/۴۳	۱۵/۱۲	۱۲/۶۵
۷/۴۳	۶/۷۵	۱۱/۹۱	۱۰/۵۱	۱۵/۱۷	۱۳/۰۱
۸/۰۸	۶/۸۶	۱۲	۱۱/۳	۱۵/۲۳	۱۳/۲



شکل (۹): اندازه خطای تخمین موقعیت هدف در مختصات (۱ و ۱) نسبت به نقاط مرجع.

با اعمال ۱۰۰۰ نقطه هدف با مختصات تصادفی به صورت توزیع یکنواخت به الگوریتم، مقدار متوسط و واریانس خطای تخمین طول نقطه  $x$  و عرض نقطه  $y$  بدین ترتیب برآورد شده است. با توجه به کمترین فاصله نقاط مرجع در آخرین مرحله که ۲۵ cm است، نتایج بیانگر کارایی مناسبی برای روش پیشنهادی است.

$$\mu_y = 6.4268 \text{ cm} \text{ و } \mu_x = 6.1165 \text{ cm}$$

$$\sigma_y = 3.6496 \text{ cm} \text{ و } \sigma_x = 3.6097 \text{ cm}$$

#### ۴. نتیجه‌گیری

موقعیت‌یابی در محیط‌های محدود همواره با چالش دید غیرمستقیم و چندمسیرگی مواجه است. در روش ارائه شده از ویژگی این چالش برای افزایش بُد اطلاعات استفاده شده است. بر این مبنا الگوریتمی معرفی شده است که ضریب اطمینان در تطابق دریافتی‌ها در نقطه مجهول مکان با نقشه اثرانگشتی از قبل استخراج شده را نسبت به روش‌های معمول اثرانگشتی بر اساس RSS افزایش می‌دهد.

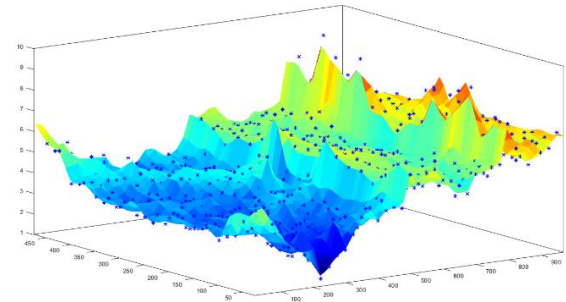
علاوه بر این، با توجه به این‌که انعکاس از مانع باعث تغییر تأخیر در مجموعه مسیر طی شده موج نمی‌شود، استخراج نقشه اثرانگشتی با روش‌های تحلیلی برای محیطی که ساختار آن و موانع موجود در آن مشخص است، قابل حصول است. که این امر یکی از برتری‌های عمده استفاده از پارامترهای تأخیر نسبت به سطح سیگنال دریافتی است.

نتایج حاصل از نمونه ارائه شده در مقاله کارآمدی روش و قابلیت افزایش دقت آن را به صورت پویا نشان می‌دهد.

#### ۵. مراجع

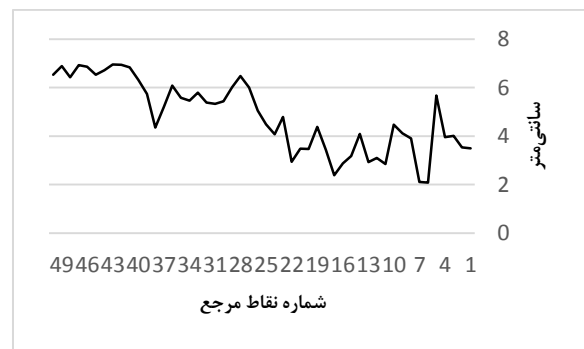
- [1] J. Hightower and G. borriello, "Location systems for ubiquitous computing," August, 2001

که تنها شماره آن‌ها مشخص است نشان داده است. در شکل (۷) اندازه خطای تخمین روی سطح (که نقاط مرجع روی آن جانمایی شده) ارائه شده است. به این ترتیب که بتوان برآوردی از خطای تخمین در نقاط مرجع با تشخیص مختصات آن‌ها به دست آورد.



شکل (۷): نمای سه‌بعدی خطای تخمین موقعیت هدف صفحه زمین ابعاد اتاق‌ها به متر و محور عمودی خطا با واحد سانتی‌متر.

برای مشاهده نتیجه الگوریتم در نقاطی که در شکل (۵) با علامت \* نمایش داده شده‌اند، هدف را نقطه (۱/۵، ۱) قرار داد و اندازه خطای تخمین با اجرای الگوریتم پیشنهادی در گام دوم مطابق شکل (۸) به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو نقطه مرجع ۶ و ۷ که در مختصات (۱/۵، ۰/۵) و (۱/۵، ۱/۵) قرار دارند کمترین اندازه خطای تخمین را نشان می‌دهند. برای تخمین قطعی نقطه حول نقاط مذکور از اجرای حالت پویا در گام سوم استفاده می‌شود.



شکل (۸): اندازه خطای (محور عمودی) تخمین موقعیت هدف در مختصات (۱، ۱) نسبت به شماره نقاط مرجع (محور افقی).

با قرار دادن نقطه هدف در (۱، ۱) حالت سوم یعنی وضعیت ● حادث می‌شود. با اجرای الگوریتم پیشنهادی در گام دوم اندازه خطای تخمین بیانگر چهار نقطه مرجع ۱ و ۲ و ۶ و ۷ که در مختصات (۱/۵، ۰/۵)، (۰/۵، ۱/۵)، (۱/۵، ۰/۵)، (۰/۵، ۱/۵) قرار دارند، به عنوان کاندید موقعیت‌یابی است که در شکل (۹) مقادیر خطای نمایش داده شده است.

- [8] C. Nerguizian, C. Despins, and S. Affes,, "A framework for indoor geolocation using an intelligent system," in 3rd IEEE Workshop on WLANs, Sep 2001.
- [9] S.A. Zekavat and R. M. Buehrer, HANDBOOK OF POSITION LOCATION Theory, Practice, and Advances, Hoboken, New Jersey.: John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [10] S. Gezici , H. Kobayashi , and H. Poor, "A new approach to mobile position tracking," Proc. of IEEE Sarnoff Symp. Advances in Wired and Wireless Communications, pp. 204 – 207, 2003.
- [11] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: an in - building RF - based user location and tracking system," in Proc. IEEE Conf. Comp. Commun, 2000.
- [12] A. Ebrahimzadeh, M.R. Enayati, "Investigation of the effects of wall structure on indoor wireless channel parameters using FDTD method" Journal of Applied Electromagnetic, vol. 2, pp. 27-36, 2017, (In Persia)
- [13] G. Caso, L. Nardis and M. Benedetto, Geographical and Fingerprinting Data to Create Systems for Indoor Positioning and Indoor\_Outdoor Navigation: Chapter 7, Barcelona Spain: Elsevier, 2019.
- [2] S. Subedi , J.Y. Pyun, "Practical Fingerprinting Localization for Indoor Positioning," Hindawi Journal of Sensors, p. 17, December, 2017.
- [3] R. Mautz, "Indoor Positioning Technologies," Ph.D. Thesis, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, February, 2012.
- [4] W. Sakperea , M. Adeyeye-Oshinb and N. B.W. Mlitwac, "A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies," South African Computer Journal, vol. 29, p. 145–197, December 2017.
- [5] K. Pahlavan, X. Li, et al, "An overview of wireless indoor geolocation techniques and systems," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, vol. 1818, pp. 1-13, May 2000.
- [6] C. Nerguizian and C. Despins , "Geolocation in mines with an impulse response fingerprinting technique and neural networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 5, No. 3, pp. 603-611, March 2006.
- [7] C. Nerguizian, M. Djadel, C. Despins, and S. Affes, "Narrowband and wideband radio channel measurements in an underground mine with narrow veins at 2.4 GHz," IEEE Trans. Wireless Commun, vol. 4, no. 5, pp. 2441-2453, Sep 2005.



---

## Indoor Positioning Fingerprint Method Based on Propagation Delay

L. Iarjani, E. Mehrshahi \*

Shahid Beheshti University

(Received: 01/06/2019, Accepted: 19/10/2019)

### Abstract

*This paper introduces a method of indoor positioning where multipath propagation exists due to reflective obstacles. In this method the fingerprint pattern is yielded by analyzing propagation delay data. Unlike received signal strength (RSS) level data needed for conventional RSS fingerprint method, propagation delay data needed in this method is not altered by reflection from obstacles, meaning: while conventional RSS method requires actual measurements, using the proposed method, one can construct finger print pattern by mere analysis. Furthermore, the results from this method are more accurate and less ambiguous than those of RSS. This is due to the fact that whereas the signal strength level data is received at one instance, the propagation delay data as its nature suggests is received at a number of separate instances meaning it contains more information. The paper also provides an example to demonstrate the simplicity of the method and the accuracy of its results, which for the mentioned problem are of an average error of less than 3.7cm and a variance of less than 6.5cm.*

**Keywords:** Location Base Services, Indoor Positioning System, UWB, Fingerprinting, Data base Correlation Methods, Correlation Databases, Pattern Matching Algorithm

---

\* Corresponding author E-mail: mehr@sbu.ac.ir