نشریه علمی «پدافند الکترونیکی و سایبری»
سال هشتم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹؛ ص ۱۳۳- ۱۲۵

**علمی–پژوهشی**

# موقعیت‌یابی دستگاه‌های بی‌سیم با معیار میانه خطای کمترین مربعات وزن‌دهی شده در حضور سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم

**جعفر خلیل‌پور [1*]، جواد رنجبر[2]، مهدی کاظمی‌نیا[3]**

۱- دانشیار، ۲- مربی دانشکده برق دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص) ۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه سیستان و بلوچستان

(دریافت: ۹۸/۴/۷، پذیرش: ۹۸/۵/۷)

## چکیده

در این مقاله، یک روش موقعیت‌یابی مبتنی بر دستگاه بر اساس روش خطای کمترین مربعات وزن‌دهی شده ارائه می‌شود. مهم‌ترین چالش در تخمین موقعیت، اثر سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم در گره‌های مرجع است که منجر به داده‌های خارج از محدوده و در نهایت کاهش دقت تخمین می‌شود. برای این منظور، یک روش جدید از طریق ترکیب روش شناسایی و حذف سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم و روش وزن‌دهی گره‌های مرجع ارائه خواهد شد. چالش دیگر موقعیت‌یابی، وابستگی شدید سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم به محیط انتشار سیگنال است. به همین دلیل به‌دست آوردن یک تابع توزیع برای تحلیل رفتار این پدیده بسیار پیچیده و زمان‌بر است به خصوص در روش‌های تخمین مبتنی بر دستگاه که فرآیند تخمین موقعیت در دستگاه‌های هدف متحرک با طول عمر باتری محدود صورت می‌پذیرد. بنابراین در این مقاله، یک روش شناسایی سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم و وزن‌دهی گره‌های مرجع با پیچیدگی محاسباتی کم که بی‌نیاز از داشتن دانش اولیه درباره توابع توزیع بایاس سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم است، معرفی خواهد شد. در این روش، از تعداد تکرارهای گره‌های مرجع در گروه‌های تخمین مختلف به عنوان معیاری برای شناسایی سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم و وزن‌دهی گره‌های مرجع استفاده خواهد شد. در نهایت با داشتن وزن‌های گره‌های مرجع، موقعیت دستگاه هدف توسط یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید پیاده‌سازی و به کمک روش لاگرانژ حل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد تخمین موقعیت را نسبت به روش‌های خطی و غیرخطی غیر وزنی بهبود می‌دهد. در روش پیشنهادی ۳۵ درصد از خطاها مقداری کمتر از ۰/۲۵ متر دارند که نسبت به روش‌های دیگر بهبود حدود ۳۰ درصدی را نشان می‌دهد. هم‌چنین ۹۵ درصد از خطاها کمتر از ۲ متر هستند و در مقایسه با روش‌هایی که وزن‌دهی در آن‌ها انجام نمی‌شود، دقت تخمین حداقل ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین در مواردی که تعداد گره‌های مرجع یا تعداد گروه‌های تخمین کمتری در دسترس است، روش پیشنهادی قابلیت اطمینان بالاتری در تخمین موقعیت دارد. زمانی که حداقل ۳۵ درصد از گره‌های مرجع دارای سیگنال‌های مسیر مستقیم هستند، دقت موقعیت‌یابی در روش ارائه شده بهبود قابل ملاحظه‌ای دارد.

**کلیدواژه‌ها:** موقعیت‌یابی، خطای کمترین مربعات وزن‌دهی شده، سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم، بهینه‌سازی غیرخطی مقید

## ۱- مقدمه

با محبوبیت فزآینده سرویس‌های مبتنی بر محل، فناوری‌های مختلفی برای موقعیت‌یابی گیرنده‌های بی‌سیم ارائه شده است که هدف آن‌ها استفاده در کاربردهایی نظیر ردیابی، هوانوردی، نظارت و ایمنی است. سیستم موقیت‌یابی جهانی[1] [۱] یکی از متداول‌ترین فناوری‌های تعیین موقعیت جغرافیایی است که به‌دلیل عدم دسترسی سیگنال‌های ماهواره‌ای در محیط‌های داخلی، میزان توان مصرفی و دقت موقعیت‌یابی، امکان استفاده از آن در خیلی از کاربردها میسر نیست. بنابراین فناوری‌های جایگزین دیگری مانند وای‌فای[2]، فراپهن‌باند[3]، بلوتوث[4] زیگ‌بی[5]، نور مرئی[6]، فراصوت[7]، سیگنال آکوستیک[8]، و سیستم شناسایی بسامد رادیویی[9] برای موقعیت‌یابی و ردیابی اهداف بی‌سیم متحرک، بسته به کاربرد مدنظر پیشنهاد شده‌اند. در این فناوری‌ها، روش‌های مختلفی به‌منظور تعیین موقعیت دستگاه‌های بی‌سیم متحرک ارائه شده‌اند.

* نویسنده پاسخگو: J_khalilpour@yahoo.com

[1] Global positioning system (GPS)

[2] WiFi
[3] Ultra-wideband
[4] Bluetooth
[5] Zigbee
[6] Visible Light
[7] Ultrasound
[8] Acoustic Signal
[9] Radio-frequency identification

روش‌های تعیین موقعیت به‌طور کلی به دو دسته موقعیت‌یابی مبتنی بر دستگاه و مبتنی بر مشاهده تقسیم می‌شوند [۲]. در موقعیت‌یابی مبتنی بر دستگاه، فرآیند تخمین موقعیت توسط دستگاه و با استفاده از سیگنال‌های دریافتی از گره‌های مرجع که موقعیت آن‌ها در دسترس است، ممکن می‌شود. درحالی‌که در موقعیت یابی مبتنی بر مشاهده، گره‌های مرجع موقعیت دستگاه‌های بی‌سیم را ردیابی می‌کنند. در اکثر کاربردهای موقعیت‌یابی از الگوریتم‌های مبتنی بر دستگاه استفاده می‌شود. در این حالت، گره‌های مرجع، سیگنال‌های راهنما[1] را منتشر می‌نمایند و دستگاه‌های گیرنده آن‌ها را به منظور تعیین موقعیت دریافت می‌کنند. مزیت موقعیت‌یابی مبتنی بر دستگاه، وابسته نبودن فرآیند تعیین موقعیت به دیگر دستگاه‌ها و گره‌ها می‌باشد. این ویژگی سبب مقیاس‌پذیری می‌شود و برخلاف روش موقعیت‌یابی مبتنی بر مشاهده فرآیند موقعیت‌یابی بطور غیر متمرکز[2] انجام می‌گیرد.

موقعیت‌یابی اهداف بی‌سیم از طریق یکی از روش‌های قدرت سیگنال دریافتی[3]، اطلاعات وضعیت کانال[4]، تحلیل اثر انگشت[5]، زاویه ورود[6]، زمان ورود[7] و اختلاف زمان ورود[8] صورت می‌پذیرد. در بین روش‌های ذکر شده، روش‌های زمان ورود و اختلاف زمان ورود به‌دلیل سادگی در پیاده‌سازی و فراهم نمودن دقت مناسب بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. در این روش‌ها، ابتدا فاصله بین گره‌های مرجع و دستگاه هدف تخمین زده می‌شود، سپس موقعیت دستگاه هدف از طریق روش‌های پردازش سیگنال در دستگاه مختصات محاسبه می‌گردد. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در روش‌های پردازش سیگنال، مقابله با پدیده انتشار سیگنال‌های غیر مستقیم است [۳]. این پدیده باعث می‌شود تا سیگنال‌های منتشر شده از گره‌های مرجع از مسیرها، زوایا و با قدرت‌های مختلفی به دستگاه هدف برسد. در نتیجه عاملی محدود کننده در به‌دست آوردن دقت مطلوب به شمار می‌رود. برای غلبه بر این مسئله، دو روش کلی در تحقیقات پیشنهاد شده است. روش اول شناسایی سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم و حذف آن‌ها و روش دوم کاهش اثر این سیگنال‌ها است. برای شناسایی سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم، از روش‌های تاریخچه زمانی براساس آزمایش فرضیه[9]، مدل‌های احتمال، آزمایش باقی‌مانده[10] و تشخیص بیشترین درستی استفاده می‌شود. در حالی‌که برای کاهش سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم، از روش‌های وزن‌دهی و تناسبی استفاده می‌شود [۴].

در مرجع [۴]، از روش آزمایش باقی‌مانده برای شناسایی سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم و تعیین تعداد سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم استفاده می‌کند. هم‌چنین در [۵]، یک الگوریتم وزن‌دهی باقی‌مانده[11] ارائه شده است که از مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها به‌عنوان یک معیار برای دقت مختصات محاسبه شده دستگاه‌ها استفاده می‌کند. سپس فاصله‌های تخمین زده شده با استفاده از این معیار وزن‌دهی می‌شود. در مرجع [۶]، یک تخمین‌گر چند مدلی برای تعیین موقعیت و ردیابی با هدف کاهش اثر سیگنال‌های غیرمستقیم ارائه شده است. هم‌چنین برای غلبه بر پیچیدگی روش متمرکز ارائه شده، یک روش غیرمتمرکز مبتنی بر تجمیع[12] نیز پیشنهاد شده است. در [۷]، یک روش کاهش اثر سیگنال‌های غیرمستقیم با استفاده از برنامه نویسی شبه قطعی[13] پیشنهاد شده است که در شرایطی که سیگنال‌های غیرمستقیم اثر غالبی دارند عملکرد بهتری نسبت به بقیه روش‌های ارائه شده دارد. مقاله [۸] یک روش موقعیت‌یابی برای محیط‌های پیچیده داخلی توسط فناوری فراپهن‌باند ارائه نموده است. در این مقاله از یک الگوریتم شناسایی سیگنال غیرمستقیم بر اساس گشتاور سوم تخمین پاسخ ضربه کانال استفاده می‌کند و سپس با استفاده از یک فیلتر کالمن بهبود داده شده[14]، اثرات سیگنال‌های غیرمستقیم را کاهش می‌دهد. در [۹]، از روش موقعیت‌یابی اختلاف زمان ورود و الگوریتم وزن‌دهی باقی‌مانده استفاده می‌کند. تخمین موقعیت بهینه با وزن‌دهی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط درجه ترکیب[15] و اطلاعات باقی‌مانده به‌دست می‌آید. مرجع [۱۰]، تخمین یک مرحله‌ای برای موقعیت‌یابی با روش زاویه ورود ارائه می‌نماید. هم‌چنین برای کاهش اثر سیگنال‌های غیرمستقیم از روش حساسیت فشرده[16] با استفاده از ویژگی‌های سیگنال دریافتی بهره می‌برد.

در تحقیقات گذشته، روش‌های کاهش سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم به‌دلیل فراهم نمودن دقت مطلوب و پیچیدگی محاسباتی کم در قیاس با روش‌های شناسایی سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در برخی روش‌ها، با درنظرگرفتن یک تابع توزیع برای سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم از معکوس ماتریس همبستگی متقابل برای وزن‌دهی استفاده می‌شود [۱۱]. اگرچه این روش دقت مطلوبی را فراهم می‌نماید اما به‌دست آوردن یک تابع توزیع برای سیگنال‌های

[1] Beacon
[2] Distributed
[3] Received signal strength
[4] Channel state information
[5] Fingerprinting analysis
[6] Angle of arrival
[7] Time of arrival
[8] Time difference of arrival
[9] Hypothesis test
[10] Residual test
[11] Residual weighting algorithm
[12] Fusion
[13] Semi-definite programming
[14] Extended Kalman filter
[15] Polymerization degree
[16] Compressed sensing

مسیر غیرمستقیم به‌دلیل تفاوت در محیط‌ها و جابجایی احتمالی گره‌های مرجع و دستگاه هدف تقریبا غیر ممکن است مگر این‌که در کاربردهایی خاص با مکانی مشخص به کار گرفته شود. در اکثر روش‌های کاهش سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم، از معیار باقی‌مانده برای وزن‌دهی استفاده می‌شود. اما باید به این نکته توجه نمود که تخمین به‌دست آمده از مجموعه‌ای از گره‌های مرجع که کمترین باقی‌مانده را دارند به معنای عدم وجود سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم نیست [۱۲]. بنابراین، در نظر نگرفتن داده‌های خارج از محدوده[1] و در نتیجه وزن‌دهی اشتباه به آن‌ها باعث کاهش چشمگیر دقت تخمین خواهد شد.

در این مقاله، یک روش ترکیبی جدید براساس شناسایی و کاهش سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم ارائه خواهد شد تا اثر داده‌های خارج از محدوده را حداقل نماییم. برای این منظور، ابتدا یک روش وزن‌دهی مبتنی بر تکرار گره‌های مرجع در گروه‌های تخمین مختلف با استفاده از معیار میانه[2] حداقل خطای مربعات برای کاهش اثر داده‌های خارج از محدوده ارائه می‌شود. سپس، با شناسایی و حذف گره یا گره‌های مرجعی با بیشینه مقدار باقی‌مانده، دقت تخمین افزایش می‌یابد. برای تخمین موقعیت دستگاه هدف از روش خطای کمترین مربعات وزن‌دهی شده[3] غیرخطی استفاده می‌گردد. این روش امکان وزن‌دهی هر یک از گره‌های مرجع را فراهم می‌نماید. در حالی‌که در روش خطای کمترین مربعات خطی به‌دلیل این‌که معادلات تشکیل دهنده کمینه ساز خطای مربعات از تفاضل معادلات فاصله نتیجه می‌شوند، امکان وزن‌دهی به هر یک از گره‌های مرجع و مشخص نمودن تاثیر هر گره در جواب تخمین به سادگی امکان‌پذیر نیست. مزیت این روش عدم نیاز به دانش اولیه درباره توابع توزیع احتمال سیگنال‌ها است. از آن‌جایی که به طور کلی معیار خطای کمترین مربعات به تنهایی تمایزی بین سیگنال‌های مسیر مستقیم و غیر مستقیم ایجاد نمی‌کند، در این مقاله برای متناسب‌سازی این معیار برای سیگنال‌های وابسته به محیط، از یک روش جدید که مبتنی بر تعداد تکرار گره‌های مرجع است، بهره گرفته می‌شود. مهم‌ترین تمایز روش پیشنهادی کاهش قابل توجه اثر سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم و حذف داده‌های خارج از محدوده است. همچنین در روش‌های شناسایی و کاهش سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم به‌طور معمول یک آستانه برای حذف یا وزن‌دهی گره‌های مسیر غیرمستقیم به‌کار گرفته می‌شود [۱۳]. در این روش پیشنهادی، ما با حذف ترتیبی مجموعه‌های دارای داده‌های خارج از محدوده و شمارش تعداد تکرار گره‌های مرجع به‌کار گرفته شده در باقی مجموعه‌ها، بی‌نیاز از تعریف آستانه می‌شویم. بنابراین، پیچیدگی محاسباتی نیز از این طریق کاهش می‌یابد. زیرا تعیین آستانه بسته به محیط انتشار سیگنال، خود نیازمند ارائه یک الگوریتم است. در حالی‌که به‌دلیل محدودیت طول عمر باتری، کاهش پیچیدگی محاسباتی از موارد ضروری در طراحی روش‌های موقعیت‌یابی مبتنی بر دستگاه است.

در ادامه ساختار مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی می‌شود. در بخش ۲، مسئله موقعیت‌یابی مورد بررسی، معرفی می‌شود. در بخش ۳، مسئله کمینه‌سازی خطای مربعات مقید وزن‌دهی شده ارائه و حل می‌شود. سپس نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش ۴ ارائه می‌شوند و در نهایت مقاله در بخش ۵ جمع بندی می‌گردد.

## ۲- بیان مسئله

در این تحقیق، مسئله‌ی موقعیت‌یابی در یک فضای دو بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد، اگرچه روش پیشنهادی به سادگی قابل تعمیم به فضای سه‌بعدی نیز است. در فرآیند موقعیت‌یابی، یک مجموعه $N$ تایی از گره‌های مرجع، پیام‌های راهنما را که حاوی اطلاعات موقعیتشان است را به‌صورت همه‌پخشی در فواصل زمانی یکسان یا به درخواست دستگاه‌های بی‌سیم متحرک با موقعیت نامعلوم $\mathbf{p}=[x,y]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^2$، ارسال می‌کنند. دستگاه هدف با اندازه‌گیرهای فاصله $\tilde{r}_n,\ \forall n\in\{1,...,N\}$ به‌دست‌آمده ازگره‌های مرجع $n$ام با موقعیت معلوم $\mathbf{p}_n=[x_n,y_n]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^2$، موقعیت خودش را تخمین می‌زند. با استفاده از روش زمان ورود، فاصله بین گره مرجع $n$ام و دستگاه هدف در عدم حضور خطای اندازه‌گیری با رابطه $r_n=t_nc$ نتیجه می‌شود که $t_n$ زمان انتشار پیام راهنما از گره مرجع $n$ ام تا دستگاه هدف است و $c$ سرعت انتشار نور است. در حضور خطای اندازه‌گیری $\varepsilon$ و خطای ناشی از سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم $\omega_n$، فاصله اندازه‌گیری شده با رابطه (۱) مدل می‌شود [۴].

$$\begin{aligned}\tilde{r}_n &= r_n+\omega_n+\varepsilon\\ &=\sqrt{(x-x_n)^2+(y-y_n)^2}+\omega_n+\varepsilon\ .\end{aligned}\qquad(1)$$

در رابطه (۱)، خطای اندازه‌گیری $\varepsilon$، یک فرآیند گوسی سفید با میانگین صفر است. در ادامه مسئله کمینه‌سازی خطای مربعات وزن‌دهی شده را برای به‌دست آوردن تخمین موقعیت دستگاه هدف ارائه می‌نماییم.

[1] Outlier
[2] Median
[3] Weighted least square error

## ۳- موقعیت‌یابی دستگاه هدف

در این بخش، ابتدا مسئله کمینه‌سازی خطای مربعات مقید وزن‌دهی شده معرفی می‌شود. سپس وزن‌های مرتبط با هر گره با استفاده از تعداد تکرارهای گره مرجع در کل مجموعه‌های مورد تخمین بر اساس معیار میانه خطای مربعات محاسبه می‌شود. هم‌چنین شناسایی و حذف گره‌هایی با داده‌های خارج از محدوده در انتها انجام می‌پذیرد.

### ۳-۱- خطای کمترین مربعات وزن‌دهی شده

برای مدل کردن مسئله بهینه‌سازی، ابتدا با فرض عدم حضور خطاهای اندازه‌گیری و سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم، طرفین رابطه (۱) را به توان دو می‌رسانیم و بعد از مرتب نمودن رابطه (۲) نتیجه می‌شود.

$$2x_n x + 2y_n y - R^2 = x_n^{\,2} + y_n^{\,2} - r_n^2 \ , \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، $R^2 = x^2 + y^2$ است. معادل ماتریسی رابطه (۲) با رابطه (۳) بازنویسی می‌گردد.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \qquad (۳)$$

که در آن؛

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_N & 2y_N & -1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ R^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 - r_1^2 \\ \vdots \\ x_N^2 + y_N^2 - r_N^2 \end{bmatrix}. \qquad (۴)$$

با در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری و سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم، بردار $\mathbf{x}$ توسط روش کمترین خطای مربعات با رابطه (۵) بیان می‌گردد.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= \arg \min_{\mathbf{x}'} \ (\mathbf{Ax}' - \mathbf{b}')^{\mathrm{T}} (\mathbf{Ax}' - \mathbf{b}') \\ &= (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{b}', \end{aligned} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، $\mathbf{x}' = [x', y', R'^2]^{\mathrm{T}}$ متغیرهای بهینه‌سازی و

$$\mathbf{b}' = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 - \tilde{r}_1^2 \\ \vdots \\ x_N^2 + y_N^2 - \tilde{r}_N^2 \end{bmatrix}. \qquad (۶)$$

برای بهبود عملکرد تخمین موقعیت، بردار وزن را نیز به مسئله بهینه‌سازی ارائه شده در رابطه (۵) اضافه می‌نماییم. هم‌چنین باید رابطه $R'^2 = x'^2 + y'^2$ را نیز به عنوان قید در مسئله بهینه‌سازی درنظر گرفت. در نتیجه، مسئله بهینه‌سازی خطای کمترین مربعات وزن‌دهی شده به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}'} \ & (\mathbf{Ax}' - \mathbf{b}')^{\mathrm{T}} \mathbf{W} (\mathbf{Ax}' - \mathbf{b}') \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{sx}' + \mathbf{x}'^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \mathbf{x}' = 0. \end{aligned} \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، $\mathbf{W}$ ماتریس قطری وزن‌های مربوط به گره‌های مرجع است و قید رابطه (۷) شکل ماتریسی عبارت $R'^2 = x'^2 + y'^2$ می‌باشد که در آن،

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (۸)$$

مسئله بهینه‌سازی (۷)، یک مسئله غیرمحدب است و برای حل آن از روش لاگرانژ[1] برای رسیدن به جواب استفاده می‌شود. لاگرانژ با اضافه کردن قید به بدنه مسئله فرآیند حل را تسهیل می‌نماید. در واقع، روش لاگرانژ با اضافه کردن قید به تابع هدف مسئله به صورت یک عبارت جریمه، مسئله بهینه‌سازی مقید پیش روی را به یک مسئله بهینه‌سازی غیر مقید تبدیل می‌کند. برای این منظور ابتدا تابع لاگرانژ در مسئله (۷) را به شکل زیر می‌نویسیم:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}', \lambda) = & (\mathbf{Ax}' - \mathbf{b}')^{\mathrm{T}} \mathbf{W} (\mathbf{Ax}' - \mathbf{b}') \\ & + \lambda (\mathbf{sx}' + \mathbf{x}'^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \mathbf{x}') \end{aligned} \qquad (۹)$$

در رابطه (۹)، $\lambda$ ضرب کننده لاگرانژ است. اگر $\lambda$ صفر باشد یا به عبارتی قید رابطه (۹) در نظر گرفته نشود، فضای شدنی[2] جواب‌های مسئله بزرگتر می‌گردد اما کیفیت تخمین کاهش پیدا می‌کند. بنابراین در نظر گرفتن قید مسئله (۷) و تعریف $\lambda$ برای آن منجر به افزایش دقت تخمین موقعیت می‌گردد. برای به‌دست آوردن تخمین موقعیت نسبت به بردار متغیرهای بهینه‌سازی $\mathbf{x}'$ مشتق می‌گیریم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\mathbf{x}', \lambda)}{\partial \mathbf{x}'} = & \ 2(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{WA} + \lambda \mathbf{Q})\mathbf{x}' \\ & - 2\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Wb}' + \lambda \mathbf{s} = 0 \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

با ساده‌سازی رابطه (۱۰)، بردار تخمین موقعیت با رابطه (۱۱) حاصل می‌شود.

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{WA} + \lambda \mathbf{Q})^{-1} (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Wb}' - \frac{\lambda}{2}\mathbf{s}). \qquad (۱۱)$$

برای درک بهتر روش حل مسئله، تابع دوگان مسئله بهینه‌سازی (۷) را با رابطه (۱۲) تعریف می‌نماییم.

$$D(\lambda) = \min_{\mathbf{x}'} \ L(\mathbf{x}', \lambda). \qquad (۱۲)$$

در نتیجه دوگان مسئله (۷) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

[1] Lagrange method
[2] Feasible solution

$$\max_{\lambda} \; D(\lambda)\,. \qquad (۱۳)$$

به عبارت دیگر، اگر ضرب کننده لاگرانژ بهینه را با بیشینه کردن رابطه (۱۳) به‌دست بیاوریم، آن‌گاه جوابی که از رابطه (۱۲) با جایگزاری $\lambda$ بهینه در آن حاصل می‌شود، تخمین موقعیت را نتیجه خواهد داد. برای به‌دست آوردن $\lambda$ بهینه مشتق تابع لاگرانژ از رابطه (۹) را محاسبه نموده و برابر با صفر قرار می‌دهیم.

$$\mathbf{s}\mathbf{x}' + \mathbf{x}'^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{x}' = 0\,. \qquad (۱۴)$$

بنابراین، با حل معادلات (۱۰) و (۱۴) برای به‌دست آوردن ضرب‌کننده لاگرانژ ( $\lambda$ ) بهینه و قرار دادن آن در رابطه (۱۱) تخمین موقعیت دستگاه مورد نظر حاصل می‌شود. با توجه به غیرخطی بودن معادلات ممکن است چندین جواب برای ضرب‌کننده لاگرانژ به‌دست بیاید. بنابراین، از بین آن‌ها، مقداری را انتخاب می‌نماییم که رابطه (۹) را کمینه نماید.

## ۳-۲- روش وزن‌دهی

در این بخش، با فرض نداشتن دانش اولیه توابع توزیع خطا، ماتریس وزن مرتبط با گره‌های مرجع را به‌دست می‌آوریم. برای این منظور فرض می‌نماییم تعداد گره‌های مرجع بیشتر از سه باشد. چون حداقل گره‌های مرجع برای تخمین موقعیت دستگاه هدف از طریق روش زمان ورود سه است. بنابراین، می‌توانیم ترکیب‌های مختلفی از گره‌های مرجع را برای تخمین موقعیت استفاده نماییم. فرض کنید اندازه‌گیری‌های فاصله از پنج گره مرجع در دستگاه هدف وجود داشته باشد. به‌عنوان مثال، اگر در هر گروه تخمین سه گره مرجع درنظر بگیریم، آن‌گاه به تعداد ترکیب سه از پنج یعنی ده گروه تخمین مختلف از دستگاه هدف خواهیم داشت. برای تعیین میزان دقت گروه‌ها، از معیار میانه حداقل خطای مربعات مربوط به فاصله گره‌های مرجع و دستگاه هدف استفاده می‌کنیم. برای این منظور مراحل زیر را قدم به قدم انجام می‌دهیم:

۱) فرض کنید در هر گروه، $M$ گره مرجع وجود داشته باشد. در نتیجه $K$ (ترکیب $M$ از $N$) تخمین موقعیت وجود دارد که توسط رابطه (۵) به‌دست می‌آیند.

۲) برای هر گروه، باقی‌مانده از طریق میانه خطای مربعات با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$\mathrm{Res}_k = \mathrm{median}\{(\tilde{r}_{k,1} - \hat{r}_{k,1})^2, \ldots, (\tilde{r}_{k,M} - \hat{r}_{k,M})^2\} \qquad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)، $\hat{r}_{k,m}$ فاصله‌ای است که از تخمین موقعیت توسط گروه $k$ ام و گره مرجع $m \in \{1, \ldots, M\}$ به‌دست می‌آید. همچنین $\tilde{r}_{k,m}$ فاصله اندازه‌گیری شده (مشاهدات) توسط دستگاه هدف از گره مرجع $m$ در گروه $k$ ام است.

۳) مقدار باقی‌مانده‌های گروه‌ها را به‌طور افزایشی مرتب می‌نماییم. آخرین گروه یا گروه‌هایی که بیشترین باقی‌مانده را دارند، حذف می‌نماییم. سپس تعداد تکرارهای گره‌های مرجع در مابقی گروه‌ها را مشخص نموده و در سطر اول ماتریس تکرارهای گره مرجع $\mathbf{F}$ با رابطه زیر قرار می‌دهیم:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{\tilde{K}1} & \cdots & f_{\tilde{K}N} \end{bmatrix}, \qquad (۱۶)$$

که $f_{\tilde{K}N}$ تعداد تکرارهای گره مرجع $N$ام با حذف گروه $\tilde{K}$ است. سپس گروه بعدی با بیشترین باقی‌مانده را حذف می‌کنیم و تعداد تکرارهای گره مرجع در مابقی گروه‌ها را در سطر دوم ماتریس $\mathbf{F}$ قرار می‌دهیم. این فرآیند را تا حذف شدن تمام گروه‌های تخمین ادامه می‌دهیم.

۴) اکنون با جمع بر روی ستون‌های ماتریس $\mathbf{F}$، تعداد مجموع تکرارهای گره‌های مرجع را از رابطه (۱۷) به‌دست می‌آوریم.

$$\mathbf{s} = \left[ \sum_{j=1}^{\tilde{K}} f_{j1}, \quad \cdots \quad , \sum_{j=1}^{\tilde{K}} f_{jN} \right], \qquad (۱۷)$$

در رابطه (۱۷) هر چه تعداد تکرار گره‌ای بیشتر باشد بدین معنا است که حضور آن گره در گروه‌های تخمین با مقدار باقی مانده کمتر بیشتر بوده است. به‌عبارتی تعداد تکرار بیشتر گره نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بیشتر آن گره برای تخمین نهایی است.

۵) با داشتن مجموع تعداد تکرار گره‌های مرجع، از رابطه (۱۸) وزن گره‌های مرجع محاسبه می‌شود.

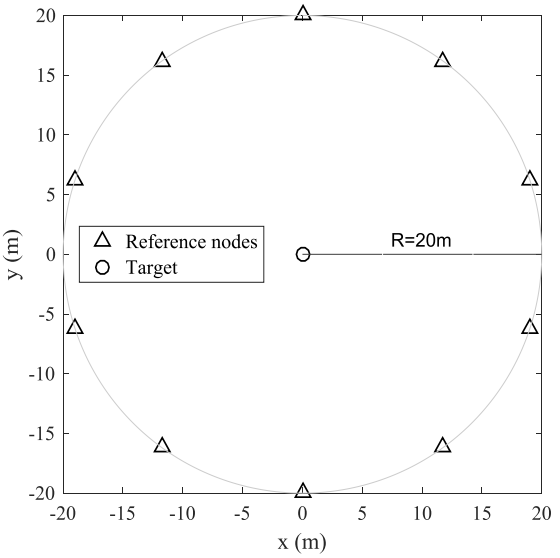
$$\mathbf{W} = \mathrm{diag}\left\{ \left( \mathbf{s} / s_{\max} \right)^{\alpha} \right\}. \qquad (۱۸)$$

در رابطه (۱۸)، پارامتر $\alpha \geq 1$ ثابتی است که برای تمایز بیشتر وزن‌ها استفاده می‌شود. از آنجایی که مقادیر وزن اعدادی بین صفر تا یک هستند، مقادیر بزرگتر $\alpha$ اثر گره‌های مرجعی با بهترین مسیر مستقیم را تشدید می‌نماید و وزن دیگر گره‌های مرجع در قیاس با آن‌ها را کاهش می‌دهد. هم‌چنین $s_{\max}$ بیشینه مقدار تکرار گره‌های مرجع در بردار $\mathbf{s}$ است.

۶) در نهایت با حذف گره یا گره‌های مرجعی با کمترین وزن، موقعیت دستگاه هدف توسط بهینه‌سازی خطای کمترین مربعات وزن‌دهی شده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

## ۴- شبیه‌سازی

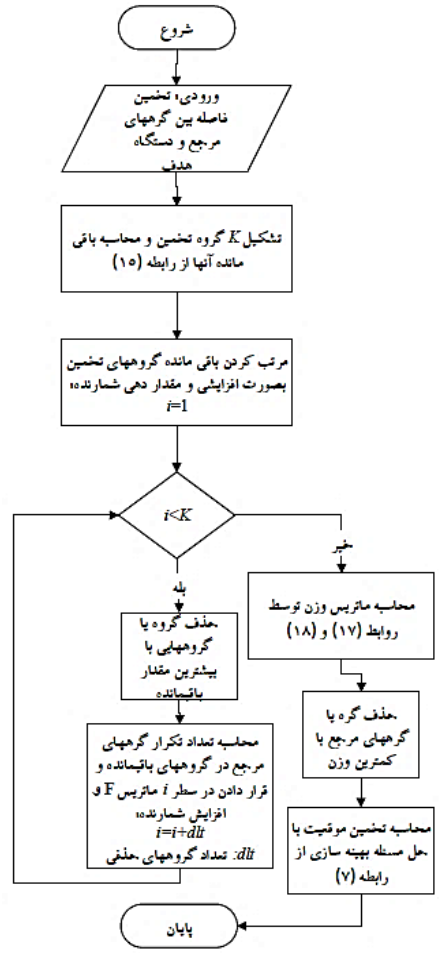
برای شبیه‌سازی، فرض می‌کنیم $N$ گره مرجع بر روی یک دایره با شعاع $R$=۲۰ متر در فواصل مساوی از یک‌دیگر قرار گرفته‌اند و دستگاه هدف در مرکز دایره بر روی مرکز مختصات است. شکل (۱) سناریوی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی، تعداد چهار گره مرجع در هر گروه تخمین در نظر گرفته می‌شود و واریانس نویز گوسی سفید جمع شونده را یک درصد فاصله گره‌های مرجع تا دستگاه هدف فرض می‌کنیم. از طرفی میزان خطای سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم را با توزیع یکنواخت در بازه $[0, \sigma \times R]$ در نظر می‌گیریم که $\sigma$ درصد خطای سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم است [۱۴]. در شبیه‌سازی‌ها از معیار مجذور میانگین مربعات خطا[1] برای ارزیابی دقت تخمین استفاده شده است و نتایج با متوسط‌گیری از ۶۰۰۰ تکرار به‌دست آمده‌اند. هم‌چنین مقدار پارامتر $\alpha$ در رابطه (۱۸) برابر با یک در نظر گرفته شده است. روش پیشنهادی در قالب دو روش WNLS و IWNLS ارائه می‌شود. در روش WNLS تمام گره‌های مرجع وزن‌دهی می‌شوند در حالی‌که در روش IWNLS ابتدا گره یا گره‌هایی با کمترین مقدار وزن حذف می‌شوند، سپس تخمین موقعیت وزن‌دهی شده انجام می‌پذیرد. به منظور ارزیابی عملکرد، روش‌های پیشنهادی با دو روش خطای کمترین مربعات خطی (LLS) و خطای کمترین مربعات غیرخطی (NLS) مقایسه می‌شوند.




**شکل (۱):** سناریوی شبیه‌سازی.

الگوریتم (۱) مراحل تخمین موقعیت مبتنی بر تکرار گره‌های مرجع توسط روش خطای مربعات وزن‌دهی شده را نشان می‌دهد.

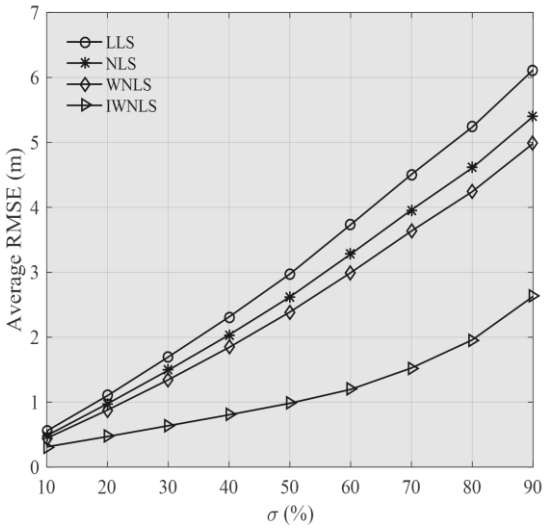
**الگوریتم (۱):** تخمین موقعیت مبتنی بر تکرار گره‌های مرجع توسط روش خطای مربعات وزن‌دهی شده.



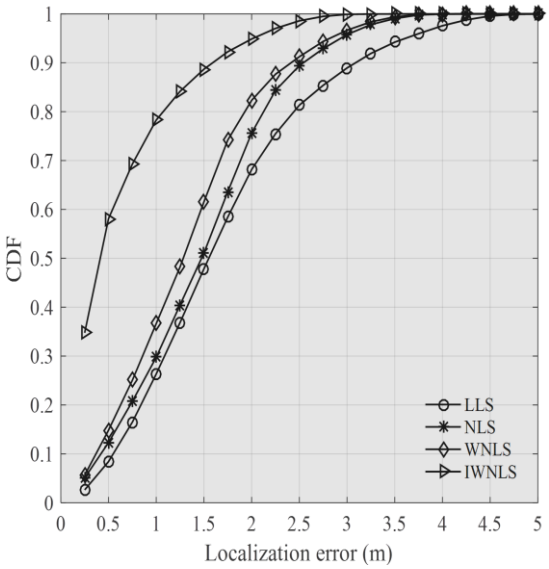

در شکل‌های (۲ و ۳)، نتایج با در نظر گرفتن $N$=۶، $M$=۴ و فرض این‌که ۴ گره مرجع به‌صورت مسیر مستقیم هستند و فقط ۲ عدد از گره‌های مرجع شامل خطای مسیر غیرمستقیم هستند، به‌دست آمده‌اند. شکل (۲) عملکرد روش‌های پیشنهادی را با افزایش درصد خطای سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم نشان می‌دهد. هر دو روش پیشنهادی نسبت به روش‌های LLS و NLS خطای مجذور میانگین مربعات کمتری دارند. از طرفی در روش IWNLS با شناسایی و حذف گره یا گره‌های مرجعی با بزرگترین خطای مسیر غیرمستقیم، دقت تخمین بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. در شکل (۳) تابع توزیع تجمعی خطای موقعیت‌یابی با $\sigma$ =۳۰ درصد ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که در روش IWNLS، ۳۵ درصد از خطاها مقداری کمتر از ۰/۲۵ متر دارند که نسبت به روش‌های دیگر بهبود حدود ۳۰ درصدی را نشان می‌دهد. هم‌چنین در روش IWNLS، ۹۵ درصد از خطاها کمتر از ۲ متر هستند و نسبت به روش‌هایی که وزن‌دهی در آن‌ها انجام نمی‌شود بهبود ۲۰ درصدی و نسبت به روش WNLS بهبودی در حدود ۱۵ درصد دارد.

[1] Root mean square error

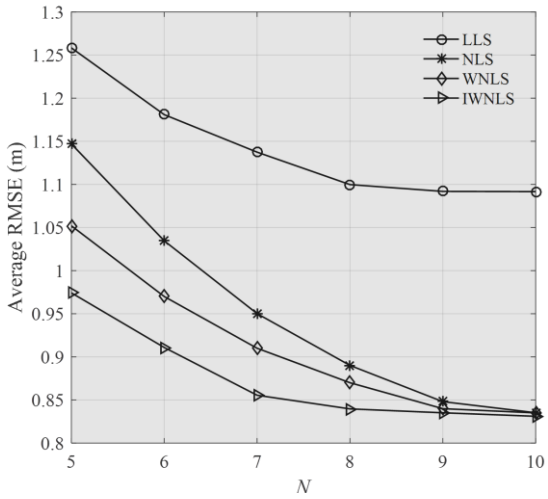
برای نشان دادن تاثیر تعداد گره‌های مرجع در تخمین موقعیت روش‌های پیشنهادی، عملکرد آن‌ها با فرض $M$=۴ و درنظر گرفتن این‌که ۵۰ درصد از گره‌های مرجع خطای مسیر غیر مستقیم با ۳۰= $\sigma$ درصد دارند، در شکل (۴) با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت افزایش تعداد گره‌های مرجع منجر به افزایش دقت تخمین می‌شود و دقت تخمین روش‌های غیر خطی با افزایش تعداد گره‌های مرجع در یک نقطه همگرا می‌شود. اما روش IWNLS، با تعداد کمتری از گره‌های مرجع عملکرد بهتری از روش‌های دیگر دارد. به عبارت دیگر در حالتی که تخمین تعداد کمی از گره‌های مرجع در دسترس است، روش IWNLS گزینه مناسبی برای تخمین موقعیت است.




**شکل (۲):** مجذور میانگین مربعات خطای موقعیت‌یابی نسبت به درصد خطای مسیرهای غیر مستقیم.

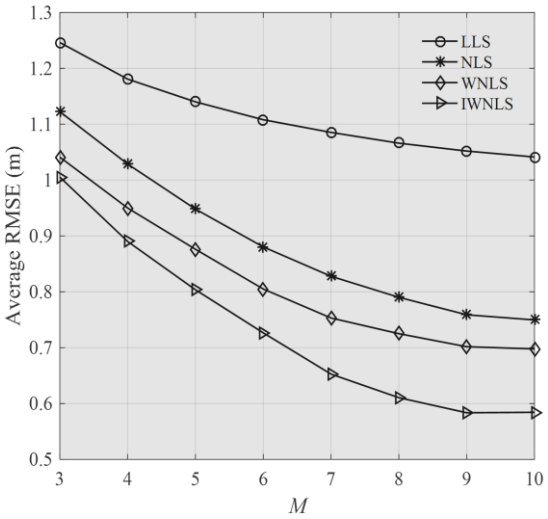



**شکل (۳):** تابع توزیع تجمعی خطای موقعیت‌یابی.




**شکل (۴):** مجذور میانگین مربعات خطای موقعیت‌یابی نسبت به تعداد مختلف گره‌های مرجع.

در شکل (۵)، اثر تعداد گره‌های مرجع در هر گروه تخمین نشان داده شده است. در این حالت، تعداد کل گره‌های مرجع در هر $M$ دو عدد بیشتر از مقدار آن فرض شده است. یعنی اگر $M$ برابر با ۴ باشد تعداد کل گره‌های مرجع در شبیه‌سازی ۶ درنظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که ۵۰ درصد از گره‌های مرجع خطای مسیر غیر مستقیم با ۲۰= $\sigma$ درصد دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد گره‌های مرجع در هر گروه تخمین عملکرد روش IWNLS نسبت به روش‌های دیگر بهبود بیشتری میابد. زیرا با افزایش تعداد کل گره‌های مرجع و هم‌چنین افزایش تعداد گره‌های مرجع در هر گروه تخمین، عملکرد معیار باقی‌مانده خطای مربعات در تشخیص داده‌های خارج از محدوده یا همان سیگنال‌های مسیر غیرمستقیم بهبود می‌یابد.

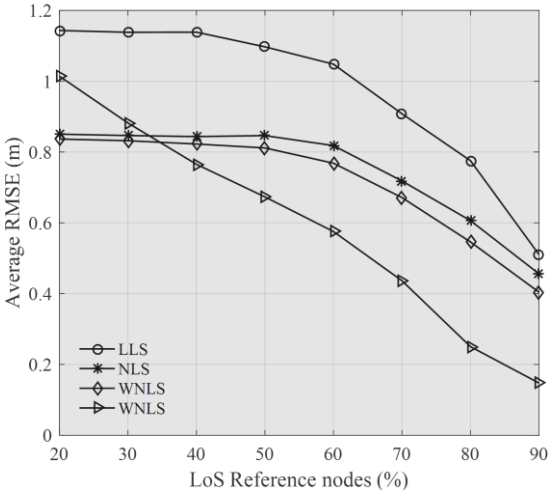



**شکل (۵):** مجذور میانگین مربعات خطای موقعیت‌یابی در مقایسه با تعداد گره‌های مرجع مختلف در گروه‌های تخمین.

در نهایت عملکرد روش‌های پیشنهادی برای درصدهای مختلفی از مسیرهای مستقیم با فرض $N$=۱۰، $M$=۸ و $\sigma$ =۳۰ درصد در شکل (۶) ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که روش IWNLS برای حالتی که حداقل ۳۵ درصد از گره‌های مرجع بصورت مسیر مستقیم هستند، عملکردش بهتر از دیگر روش‌ها است. اما برای زمانی که درصد گره‌های مرجع مسیر مستقیم کمتر از ۳۵ باشد، روش‌های NLS و WNLS خطای مجذور میانگین مربعات کمتری دارند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش موقعیت‌یابی جدید مبتنی بر دستگاه با پیچیدگی محاسباتی کم برای شناسایی سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم و وزن‌دهی گره‌های مرجع براساس تعداد تکرارهای گره مرجع به‌دست آمده از معیار میانه حداقل خطای مربعات ارائه شد.




**شکل (۶):** مجذور میانگین مربعات خطای موقعیت‌یابی به ازای درصدهای مختلف مسیرهای مستقیم.

در این روش نیازی به دانستن تعداد سیگنال‌های مسیرهای مستقیم و یا داشتن توابع توزیع بایاس سیگنال‌های مسیر غیر مستقیم نیست. در نتیجه روش پیشنهادی با کاهش پیچیدگی و فراهم نمودن دقت مطلوب یکی از گزینه‌های مناسب برای پیاده‌سازی‌های عملی است. با داشتن وزن‌های تاثیر گره‌های مرجع، مسئله بهینه‌سازی حداقل خطای مربعات وزن‌دهی شده غیر خطی ارائه شد و سپس با استفاده از روش لاگرانژ آن را به یک مسئله بهینه‌سازی غیر مقید تبدیل و حل نمودیم. در شبیه‌سازی‌ها نشان دادیم عملکرد روش پیشنهادی از منظر مجذور میانگین مربعات خطا، نسبت به روش‌های خطی و غیرخطی غیر وزنی در حالت‌های مختلف بهتر است. با فرض این‌که فاصله بین گره‌های مرجع و دستگاه هدف ۲۰ متر باشد و ۳۰ درصد از گره‌ها مسیر غیر مستقیم باشند، در روش پیشنهادی ۳۵ درصد از خطاها مقداری کمتر از ۰/۲۵ متر دارند که نسبت به روش‌های دیگر بهبود حدود ۳۰ درصدی را نشان می‌دهد. هم‌چنین ۹۵ درصد از خطاها کمتر از ۲ متر هستند و در مقایسه با روش‌هایی که وزن‌دهی در آن‌ها انجام نمی‌شود، دقت تخمین حداقل ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. در هنگامی که تعداد گره‌های مرجع یا گروه‌های تخمین کم است، روش ارائه شده دقت تخمین را به نسبت سایر روش‌ها افزایش می‌دهد. هم‌چنین نشان داده شد که روش پیشنهادی در زمانی که حداقل ۳۵ درصد گره‌های مرجع مسیر مستقیم هستند، عملکرد موقعیت‌یابی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهد. به منظور بهبود کارایی عملکرد روش پیشنهادی در تحقیقات بعدی می‌توان از روش‌های موقعیت‌یابی مستقیم به جای استفاده از روش‌های کلاسیک تخمین، نظیر زاویه ورود استفاده نمود. در موقعیت‌یابی مستقیم از تمامی ویژگی‌های سیگنال دریافتی برای تخمین فاصله بین گره مرجع و دستگاه هدف استفاده می‌شود. در نتیجه دقت مقادیر ورودی به سیستم افزایش و ماتریس وزن‌ها با دقت بالاتری محاسبه می‌شوند.

## ۶- مراجع

[1] M. Anarfarhad, M. R. Mosavi, and A. A. Abedi, "Enhancing Vector Tracking Accuracy of GPS in Weak Signal Condition Based on Adaptive Strong Tracking Kalman Filter," Journal of Electronical & Cyber Defence, vol. 6, no. 3, pp. 1-12, 2016.

[2] F. Zafari, A. Gkelias, and K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," 2017.

[3] H. Chen, G. Wang, and X. Wu, "Cooperative Multiple Target Nodes Localization Using TOA in Mixed LOS/NLOS Environments," IEEE Sensors Journal, 2019.

[4] Y.-T. Chan, W.-Y. Tsui, H.-C. So, and P.-c. Ching, "Time-of-Arrival Based Localization Under NLOS Conditions," vol. 55, no. 1, pp. 17-24, 2006.

[5] P.-C. Chen, "A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation," In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 316-320, 1999.

[6] W. Li, Y. Jia, J. Du, and J. Zhang, "Distributed multiple-model estimation for simultaneous localization and tracking with NLOS mitigation," vol. 62, no. 6, pp. 2824-2830, 2013.

[7] R. M. Vaghefi, J. Schloemann, and R. M. Buehrer, "NLOS mitigation in TOA-based localization using semidefinite programming," In Wireless Positioning Navigation and Communication (WPNC), pp. 1-6, 2013.

[8] E. García, P. Poudereux, Á. Hernández, J. Ureña, and D. Guald, "A Robust UWB Indoor Positioning System for Highly Complex Environments," In

Industrial Technology (ICIT), IEEE, pp . 3386-3391, 2015.

[9] P. Ling, C. Shen, K. Zhang, H. Jiao, L. Zheng, and X. Deng, "An Improved NLOS Error Elimination Algorithm for Indoor Ultra-Wideband Localization," In SENSORS, 2017 IEEE, pp. 1-3, 2017.

[10] N. Garcia, H. Wymeersch, E. G. Larsson, A. M. Haimovich, and M. Coulon, "Direct Localization for Massive MIMO," vol. 65, no. 10, pp. 2475-2487, 2017.

[11] C. Geng, X. Yuan, and H. Huang, "Exploiting Channel Correlations for NLOS ToA Localization with Multivariate Gaussian Mixture Models," IEEE Wireless Communications Letters, 2019.

[12] J. Hua, Z. Zheng, B. Jiang, K. Zhou, and G. Zhong, "A Study on Residual Weighting Algorithm for Mobile Localization," vol. 12, no. 5, 2013.

[13] C.-H. Park and J.-H. Chang, "Robust LMedS-Based WLS and Tukey-Based EKF Algorithms Under LOS/NLOS Mixture Conditions," IEEE Access, vol. 7, pp. 148198-148207, 2019.

[14] R. Casas, A. Marco, J. Guerrero, and J. Falco, "Robust Estimator for Non-Line-of-Sight Error Mitigation in Indoor Localization," vol. 2006, pp. 156-156, 2006.

**Journal of Electronical & Cyber Defence**
**Vol. 8, No. 2, 2020, Serial No. 30**

# Wireless Target Localization Using Median Weighted Least Square Error Metric in the Presence of Non-Line of Sight Signals

J. Khalilpour*, J. Ranjbar, M. Kazeminia

*University of Khatam al-Anbia Air Defense

(Received: 23/04/2019, Accepted: 02/10/2019)

**ABSTRACT**

*In this paper, a device-based localization method is proposed based on the weighted least square error. The most important challenge in localization is the effect of non-line of sight signals (NLoS) at reference nodes which cause outliers and degrade the estimation accuracy of localization. To meet this challenge and avoid such consequences, a new method is introduced based on the combination of weighted reference nodes method and identification and elimination of the NLoS signals method. Another challenge is the dependency of NLoS signals on the transmission environment. Based on this reason, obtaining a probability density function (PDF) to analyze the behavior of NLoS signals is complex and time-consuming, specifically in device-based localization methods that run on mobile wireless targets with limited battery. Therefore, in this paper, a low-complexity method of identification and weighting of NLoS signals is proposed without requiring priority knowledge regarding NLoS bias PDFs. In this method, the frequency of reference nodes in different estimation groups is used to identify and weight the NLoS signals. Finally, the target location is modeled via a constraint non-linear optimization problem and is solved through the Lagrange method. Simulation results illustrate that the proposed method improves the performance of localization in comparison to linear and nonlinear unweighted-localization methods. In the proposed method, 35% of localization errors are lower than 0.25 m showing approximately 30% improvement in the localization performance. Moreover, 95% of localization errors are lower than 2 m, and the performance increase by 20% in comparison to the unweighted-localization methods. In the case that the number of reference nodes is small, the proposed method provides higher reliability in the location estimation and specifically, when 35% of reference nodes are the line of sight, the estimation accuracy is increased significantly.*

**Keywords:** Localization, Weighted Least Square Eerror, Non-line of Sight Signals, Constraint Non-linear Optimization.

* Corresponding Author Email: J_khalilpour@yahoo.com