

## مکان یابی UHF RFID بر اساس ارزیابی سیگنال هایی از تگ

### Backscattered

#### چکیده

این مقاله یک سیستم سنجش موقعیت دو بعدی را برای تگ‌های شناسایی با استفاده از فرکانس رادیویی<sup>1</sup> (RFID) با فرکانس فوق العاده بالای (UHF) منفعل بر اساس ارزیابی سیگنال‌های ترانسپندر backscatter معرفی می‌کند. کاربرد اصلی سیستم در مکان‌یابی اشیای ثابتی است که با ترانسپندر RFID برچسب می‌خورند. با ترکیب ارزیابی فاز و دامنه، دقت و استواری تخمین موقعیت به طور قابل توجهی در مقایسه با هر دو روش به تنهایی، بهبود بخشیده می‌شود. از یک سیستم چند ورودی و چند خروجی برای تخمین موقعیت استفاده می‌کنیم، در این سیستم برخی از دستگاه‌ها فرستنده هستند و باقی دستگاه گیرنده هستند. برای اثبات مفهوم؛ یک تشریح کننده سیستم سنجش موقعیت محلی شامل تگ‌های EPCglobal Class-1 Gen-2 UHF RFID منفعل معمولی، یک محصول عمومی آماده RFID خوان، هشت فرستنده و گیرنده در بخشی که با کاربر در ارتباط است، سخت افزار باند پایه، و پردازش سیگنال است. سنجش در یک محیط سرپسته اداره با مساحت  $3.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$  و که با دیوارها و سقف و کف بتنی محاط شده است، صورت می‌گیرد. نتایج آزمایشی مکان‌یابی دقیقی را با ریشه میانگین مربع خطا  $0.020\text{ m}$  و یک میانگین خطای  $0.011\text{ m}$  نشان می‌دهد. برای تعیین حد سیستم، شبیه سازی دقیق اجرا می‌شود، که نتایج آزمایشی را تایید می‌کند.

<sup>1</sup> radio frequency identification

کلمات کلیدی: تخمین حداکثر درست نمایی<sup>۲</sup> (MLE)، تخمین پارامتر، سنجش موقعیت، شناسایی با استفاده از فرکانس رادیویی (RFID)، تگ‌های RFID، تکنولوژی فرکانس فوق العاده با (UHF)

## 1. مقدمه

در سال‌های اخیر، شناسایی با استفاده از فرکانس رادیویی (RFID) به یک فناوری کلیدی در زمینه تدارکات و حمل و نقل تبدیل شد، این فناوری شناسایی و پیگیری اشیای که ترانسپندر RFID به آن‌ها پیوست شده است را اجازه می‌دهد. تا زمانی که تگ‌های فعال، انرژی را از میدان الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط RFID خوان‌ها جمع‌آوری می‌کنند، می‌توانند استفاده شوند، ترانسپندر به هیچ منبع برق محلی مانند باتری نیاز ندارد. این فناوری نیاز به نگهداری را کاهش می‌دهد در عین حال انعطاف‌پذیری بالا، طول عمر طولانی، هزینه پایین را به همراه دارد. اگر - علاوه بر شناسایی تگ‌های RFID و تشخیص حضور در منطقه بازجویی دستگاه Reader - بدست آوردن اطلاعات قابل اعتماد در مورد موقعیت دقیق ممکن شود، کاربردهای بالقوه به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابند.

در این مقاله، یک سیستم سنجش دو بعدی را برای ترانسپندر RFID با فرکانس فوق العاده بالا (UHF) فعال براساس ارزیابی سیگنال‌هایی از تگ‌های backscatter را ارائه می‌دهیم. کاربرد اصلی این سیستم، مکان‌یابی اشیای ثابت با تگ‌های RFID است. یک مورد کاربرد بالقوه می‌تواند مکان‌یابی کتاب در کتابخانه باشد. برای اثبات مفهوم، یک سیستم سنجش مختصات از تگ EPCglobal Class-1 Gen-2 UHF RFID معمولی، یک محصول آماده تجاری RFID خوان، هشت فرستنده و گیرنده در بخش‌های مرتبط با کاربر، سخت افزار باند پایه، و پردازش سیگنال برای سنجش یک محیط داخلی محیط اداری استفاده شد. نتایج آزمایشی تایید می‌کنند که، از نظر دقت و استواری، رویکردهای مشهور فعلی براساس یا فاز یا ارزیابی دامنه بهتر از الگوریتم‌های ارائه شده اجرا می‌شوند.

---

<sup>2</sup> Maximum likelihood estimation

## 2. کارهای مربوطه

در مقابل رویکرد ما، سیستم‌های متعددی نشان داده شدند که مکان‌یابی دستگاه موبایل مجهز به RFID خوان را فعال می‌کنند. اگر تگ‌های RFID مرجع بیشماری در محل‌های شناخته شده و ثابت توزیع شوند، موقعیت دستگاه موبایل می‌تواند با موقعیت ترانسپندر در حال برقراری ارتباط با Reader تعیین شود [3]-[1]. با این رویکرد، اندازه منطقه سنجش و دقت سیستم به روشی که تگ‌های RFID توزیع می‌شوند، بستگی دارد.

چندین سیستم که مکان‌یابی تگ‌های RFID را اجازه می‌دهند در سال‌های اخیر معرفی شدند. روشی که احتمالاً اغلب اوقات استفاده می‌شود تخمین موقعیت تگ با توجه به سطح انتقال یا قدرت سیگنال دریافت شده توسط گیرنده ثابت است [6]-[4]. برخی از سیستم‌های مکان‌یابی برای ترانسپندر UHF RFID با اصل k-نزدیکترین همسایه ایجاد شده‌اند، در این سیستم‌ها شاخص قدرت سیگنال دریافتی<sup>3</sup> (RSSI) از RFID در مقایسه با مقادیر RSSI تگ‌های مرجع بیشمار در موقعیت‌های ثابت و شناخته شده سنجیده می‌شود، این سیستم‌ها در [7] و [8] معرفی شدند. رویکرد دیگری وجود دارد که نیاز ندارد هیچ ترانسپندری به روابط بین قدرت سیگنال دریافتی و فاصله تگ از چندین RFID خوان ثابت تکیه کند [10][9]. یک مدل احتمالی برای پیگیری ترانسپندر در یک گیت RFID در [11] تشریح شده است، که در آن مدل مخفی مارکوف<sup>4</sup> (HMM) برای پوشش ماهیت تصادفی رخ داده‌های خواندن و پویایی فرآیند شناسایی در گیت استفاده می‌شود. HMM بر اساس RSSI است، و با مجموعه‌ای از مدل‌های آموزش دیده مناسب، احتمال دارد که تعیین کند که آیا یک تگ ثابت است یا در حال عبور از گیت RFID است.

سیستم‌های مختلف موقعیت‌یابی RFID به ارزیابی فاز سیگنال پاسخ تگ تکیه کردند. استفاده از چندین آرایه آنتن متعدد، به ترانسپندر RFID اجازه می‌دهد که براساس زاویه دریافت سیگنال پاسخ تگ یا توسط فرمان پرتو مکان‌یابی را انجام دهند [15]-[12]. از آنجایی که فاز دریافت<sup>5</sup> (POA) پوشش داده نشده با طول مسیر انتشار متناسب است، مکان‌یابی ترانسپندر با ارزیابی POA فعال می‌شود. به هر حال، از آنجایی که ابهام  $2\pi$  در سنجش فاز وجود دارد،

<sup>3</sup> received signal strength indicator

<sup>4</sup> hidden Markov model

<sup>5</sup> phase-of arrival

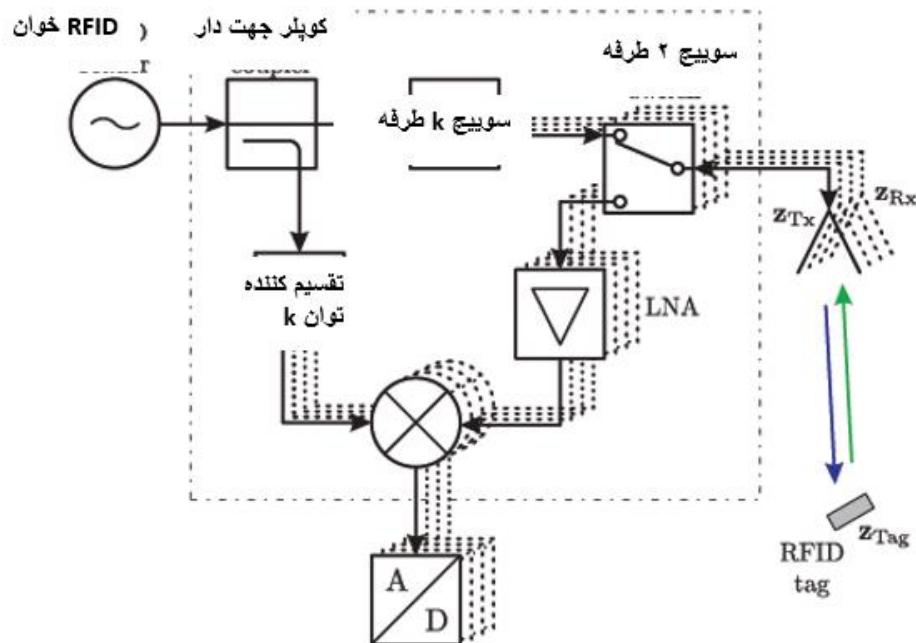
سیستم‌ها با فرکانس حامل ثابت برای بدست آوردن تخمین دقیق موقعیت به تعداد زیادی مسیر سیگنال متفاوت نیاز دارند [17], [16]. ابهام در سنجش فاز می‌تواند با استفاده از چندین فرکانس حامل متفاوت مدیریت شود، چرا که تحلیل تفاوت فازهای نتیجه شده به سنجش فاصله مطلق منجر می‌شود [21]–[18]. به هر حال، عملکرد این سیستم‌ها به پهنای باند موجود بستگی دارد، که به شدت به استانداردهای نظارتی محدود شده است. چندین سیستم مکان‌یابی RFID با دیافراگم مصنوعی [22] یا دیافراگم مصنوعی معکوس [25]–[23] وجود دارند، که به حرکت آنتن Reader یا ترانسپندر RFID نیازمندند.

در [26]، سیستم سنجشی را ارائه دادیم، که تگ‌های RFID متعدد باید در یک آرایه خطی یکنواخت (ULA) مرتب شوند. با تحلیل فاز سیگنال ترانسپندر backscatter الگوریتم ارائه شده موقعیت ULA را همزمان با جهت‌گیری زوایه آن تخمین می‌زند. با استفاده از این رویکرد، ابهام در سنجش فاز می‌تواند با ارزیابی تفاوت فاز ایجاد شده با مجاورت ترانسپندرهای ULA RFID مدیریت شود. به هر حال، در بسیاری از موارد، تگ‌ها باید در فضای فشرده‌ای جایگذاری شوند، که در این صورت نمی‌توانند به دستگاه‌های موبایل اعمال شوند. علاوه بر این، تلاش محاسباتی روش پیشنهادی قابل توجه است.

در این مقاله، یک سیستم مکان‌یابی دو بعدی را برای ترانسپندر UHF RFID فعال بر اساس ارزیابی سیگنال‌هایی از تگ‌های backscatter ارائه می‌دهیم. در مقایسه با سیستم ULA با تگ‌های RFID، دقت مشابهی دارد، در عین حال تنها یک ترانسپندر واحد باید مکان‌یابی شود، که برای دستگاه‌های موبایل بسیار بیشتر قابل اجرا است. به این دلیل که الگوریتم ارائه شده برای مکان‌یابی ترانسپندر RFID می‌تواند به ضرب ماتریس‌ها کاهش یابد، بار محاسباتی به طور قابل توجهی پایین‌تر است. در مقابل سیستم‌های رایج، که فاز یا دامنه سیگنال‌های دریافتی را ارزیابی می‌کنند، ترکیب هر دو پارامترها مزایایی از هر دو رویکرد را ارائه می‌دهد، و به مکان‌یابی مقاوم و دقیق منجر می‌شود. علاوه بر این، الگوریتم ارائه شده به ترانسپندر مرجع که در موقعیت‌های ثابت و شناخته شده توزیع شده‌اند، تکیه نمی‌کند، و نیازمند حرکت آنتن Reader یا تگ RFID برای تخمین موقعیت نیست.

### 3. شرح سیستم

مفهوم پایه سیستم سنجش موقعیت برای ترانسپندر UHF RFID فعال به ترکیب ارزیابی فاز و دامنه سیگنال‌های دریافت شده از تگ تکیه می‌کند. اگر یک دور بررسی انبار یا موجودی با یک RFID خوان با استفاده از  $K$  فرستنده و گیرنده از نشان‌دهنده سیستم‌های چند ورودی چند خروجی (MIMO) آغاز شود، ترانسپندر اطلاعات خود را با استفاده از مدولاسیون backscatter منتقل می‌کند، که در این مورد ضریب انعکاس آنتن تگ بین دو مرحله هماهنگ با داده ارسال شده سوئیچ می‌شود. سیگنال تگ backscatter توسط  $K - 1$  دستگاه باقی مانده دریافت می‌شود، با تقویت کننده کم نویز<sup>6</sup> (LNA) تقویت می‌شود، به باند پایه تبدیل می‌شود، و با مبدل آنالوگ به دیجیتال ثبت می‌شود. این مسئله در  $M$  سیگنال فرکانس واسط پیچیده، برای هر ترکیب دریافت شده و آنتن انتقال دهنده، یک نتیجه را می‌دهد. هر دو POA و دامنه این سیگنال‌ها به موقعیت ترانسپندر RFID متکی است، مکان‌یابی می‌تواند بر اساس هر پارامتر به صورت مجزا بدست آید. به هر حال، دقت و مقاومت تخمین موقعیت به طور قابل توجهی بهبود بخشیده می‌شود.



شکل 1: شماتیک سیستم سنجش موقعیت محلی سازگار با  $K$  فرستنده و گیرنده مرتبط با کاربر

<sup>6</sup> Low Noise Amplifier

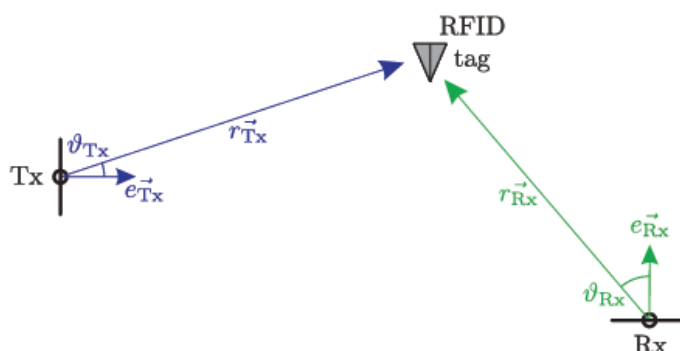
#### 4. دستگاه سنجش

یک نشان‌دهنده سیستم چند کاناله را طراحی کردیم، که معماری آن در شکل 1 نشان داده شده است. سیگنال انتقال با یک محصول تجاری آماده RFID خوان پیکربندی شده و با استفاده از یک پروتکل استاندارد شده برای شناسایی تگ های UHF RFID فعال تولید شده است. سیگنال به بخش مشترک سوئیچ  $k$ -طرفه خوراند می‌شود، که - همراه با سوئیچ 2-طرفه- برای برقراری ارتباط بین Reader و تگ انتخاب می‌شود. سیگنال‌های تگ backscatter در  $K - 1$  دستگاه باقی مانده دریافت می‌شوند (گیرنده) که توسط LNA ها تقویت می‌شود و برای هر کانال یک ورودی فرکانس رادیویی دمدمولاتور قائم<sup>7</sup>، فراهم می‌شود. ورودی اسیلاتور محلی این دمدمولاتور با تقسیم کننده توان  $k$  طرفه در ترکیب با کوپلر جهت‌دار پشتیبانی می‌شود، که در خط انتقال قرار گرفته است. سیگنال‌های فرکانس میانی پیچیده به صورت همزمان توسط یک کارت اکتساب داده چند کاناله دریافت می‌شوند.

#### 5. مدل سیگنال

همانطور که در [17] نشان داده شد، پارامترهای سیگنال فرکانس میانی در  $m$  امین کانال سیستم سنجش رخ داده‌اند. دامنه  $A[m; \theta]$  و  $\phi[m; \theta]$  PoA می‌توانند برای تشکیل یک بردار مختلط  $\tilde{s}[m; \theta]$  در نظر گرفته شود:

$$\tilde{s}[m; \theta] = A[m; \theta] e^{j\phi[m; \theta]} \quad (1)$$



شکل 2. شماتیک شروع سنجش

<sup>7</sup> quadrature demodulator

در این معادله  $1 \leq m \leq M$  برقرار است، و  $M$  تعداد کانال‌هایی است که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$M = K(K - 1) \quad (2)$$

در این رابطه نیز  $k$  تعداد گیرنده‌های سیستم MIMO است. برای اجتناب از سر در گمی، از یک مد برای اشاره به مقدار مختلط استفاده کردیم. با توجه به چندین فاکتور شامل انتشار چند مسیره، خوشه بندی، شرایط محیطی، فرض می‌شود که سیگنال به نویز مختلط  $\tilde{w}[m]$  با واریانس ناشناخته  $\overline{\sigma^2}$  مزین شده است، که به مجموعه داده زیر منجر می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{s}}(\boldsymbol{\theta}) + \tilde{\mathbf{w}}. \quad (3)$$

بردار پارامتر  $\boldsymbol{\theta}$ ، باید تعیین شود، و مختصات دکارتی موقعیت  $\mathbf{z}_{\text{Tag}}$  ترانسپندر RFID موبایل ارائه می‌دهد:

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{z}_{\text{Tag}} = [x \ y]^T. \quad (4)$$

A. فاز دریافت سیگنال ترانسپندر دریافت شده

PoA  $\phi[m; \boldsymbol{\theta}]$  سیگنال ترانسپندر دریافت شده، به طول  $m$  امین مسیر انتشار از آنتن انتقال دهنده با تگ RFID به آنتن دریافت کننده بستگی دارد، و بنابراین شامل اطلاعاتی در مورد موقعیت  $\boldsymbol{\theta}$  ترانسپندر موبایل است:

$$\varphi[m; \boldsymbol{\theta}] = \frac{2\pi}{\lambda} (|r_{\text{Tx}}^{\rightarrow}[m; \boldsymbol{\theta}]| + |r_{\text{Rx}}^{\rightarrow}[m; \boldsymbol{\theta}]|) \quad (5)$$

در این معادله  $\lambda$  طول موج سیگنال فرکانس رادیویی انتقال داده شده است، و  $r_{\text{Tx}}^{\rightarrow}[m; \boldsymbol{\theta}]$ ،  $r_{\text{Rx}}^{\rightarrow}[m; \boldsymbol{\theta}]$  بردار اشاره از موقعیت آنتن دستگاه تا موقعیت تگ RFID است:

$$r_{\text{Tx}}^{\rightarrow}[m; \boldsymbol{\theta}] = \boldsymbol{\theta} - \mathbf{z}_{\text{Tx}}[m] \quad (6)$$

$$r_{\text{Rx}}^{\rightarrow}[m; \boldsymbol{\theta}] = \boldsymbol{\theta} - \mathbf{z}_{\text{Rx}}[m]. \quad (7)$$

یک شماتیک شروع سنجش در شکل 2 نشان داده شده است. استفاده از سری تیلور مرتبه اول برای خطی سازی مجموعه داده  $x$ ، تخمین  $\hat{\phi}$  PoA می‌تواند به شکل زیر تشریح شود:

$$\hat{\varphi} = \mathcal{L}\tilde{\mathbf{x}} = \varphi(\theta) + \mathbf{w}_\varphi \quad (8)$$

در این معادله  $\mathbf{w}_\varphi$  افزودنی نویز گاوسی است:

$$\mathbf{w}_\varphi \sim \mathcal{N}(\varphi_{\text{off}}, \mathbf{C}_\varphi) \quad (9)$$

و  $\varphi_{\text{off}}$  آفست فاز اضافی را نشان می‌دهد که به فاکتورهای مختلفی از جمله طول کابل، مشخصه‌های توصیفگر سیستم، و مشخصه‌های backscatter ترانسپندر RFID بستگی دارد. ماتریس کواریانس  $\mathbf{C}_\varphi$  با تابعی از دامنه سیگنال  $\hat{\mathbf{A}}$  مجموعه داده مانند زیر تقریب زده می‌شود:

$$\mathbf{C}_\varphi = \frac{2\sigma^2}{3} \text{diag}^{-1}(\hat{\mathbf{A}}) \mathbf{V}_\varphi \text{diag}^{-1}(\hat{\mathbf{A}}) \quad (10)$$

در این معادله  $\mathbf{V}_\varphi$  ماتریس شامل ضریب همبستگی بین هر متغیر در بردار تصادفی  $\mathbf{w}_\varphi$  است.

### B. دامنه سیگنال ترانسپندر دریافت شده

اگر انرژی بازجویی از امواج رادیویی از سطح آستانه اصلی بیشتر شود، ترانسپندر RFID با RFID خوان با استفاده از مدولاسیون backscatter در ارتباط است. به هر حال، همانطور که در [7] شد، همگرایی قدرت سیگنال یک سطح پایدار را منعکس می‌کند، اگر انرژی بازجویی از امواج رادیویی بیشتر افزایش یابد. بنابراین، اگر ترانسپندر RFID توسط Reader فعال شود، دامنه  $A[m; \theta]$  که به گیرنده برخورد می‌کند به طول  $m$  امین مسیر انتشار از تگ RFID تا آنتن گیرنده و زاویه وقوع  $\vartheta_{\text{Rx}}[m]$  در آنتن گیرنده بستگی دارد، و شامل اطلاعاتی در مورد موقعیت  $\theta$  ترانسپندر موبایل است:

$$\begin{aligned} A[m; \theta] &= k_A \frac{\cos(\vartheta_{\text{Rx}}[m; \theta])}{|r_{\text{Rx}}[m; \theta]|} \\ &= k_A \frac{e_{\text{Rx}}[m]^T r_{\text{Rx}}[m; \theta]}{|r_{\text{Rx}}[m; \theta]|^2} \end{aligned} \quad (11)$$



در این معادله  $e_{\text{Rx}}[m]$  بردار واحدی است که جهت قطعه اصلی آنتن گیرنده را شرح می‌دهد، و  $k_A$  فاکتور ثابت و اما ناشناخته است که از کانال مستقل است. در جزییات، این مقدار شامل انواع فاکتورها مانند سطح انتقال RFID خوان، تلفات درج کابل و نشان‌دهنده سیستم، آنتن، و ویژگی‌های backscatter ترانسپندر RFID است. تخمین‌ها برای دامنه سیگنال ترانسپندر دریافت شده  $\hat{\mathbf{A}}$  می‌تواند با رابطه زیر تشریح شود:

$$\hat{\mathbf{A}} = |\tilde{\mathbf{x}}| = \mathbf{A}(\theta) + \mathbf{w}_A. \quad (12)$$

برای RFID معمول، دامنه یک سیگنال پاسخ تگ به شدت از مولفه نویز بالاتر است. بنابراین، اگر چه دامنه نمی‌تواند منفی باشد، یک تقریب از نویز  $\mathbf{w}_A$  یا افزودنی نویز سفید گاوس (AWGN) می‌تواند اعمال شود:

$$\mathbf{w}_A \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{C}_A). \quad (13)$$

همانطور که در مدل سیگنال می‌بینید، دامنه سیگنال ترانسپندر backscattered تنها به مسیر دریافت کننده بستگی دارد از این رو در مقایسه با POA، که به مسیر انتقال وابسته است، تنها نیمی از منابع دخیل را بررسی می‌کند. بنابراین، واریانس مولفه نویز که بر روی دامنه تاثیر می‌گذارد در مقایسه با مولفه نویز که بر روی POA تاثیر می‌گذارد از نصف به بالا مدل شده است. ماتریس کواریانس  $\mathbf{C}_A$  با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{C}_A = \frac{\sigma^2}{3} \mathbf{V}_A \quad (14)$$

و  $\mathbf{V}_A$  یک ماتریس شامل ضریب همبستگی بین هر متغیر در بردار تصادفی  $\mathbf{w}_A$  است.

## 6. روش مکان‌یابی

همانطور که از قبل گفته شد،  $\varphi(\theta)$  PoA و دامنه  $\mathbf{A}(\theta)$  سیگنال‌های ترانسپندر backscattered شامل اطلاعاتی در مورد موقعیت  $\theta$  تگ RFID موبایل است، که مکان‌یابی را بر اساس هر پارامتر به صورت مجزا انجام می‌دهد.

## A. مکان‌یابی مبتنی بر زاویه دریافت

بر مبنای POA از تخمین  $\hat{\varphi}$  سیگنال‌های ترانسپندر backscattered، موقعیت ترانسپندر RFID می‌تواند تخمین زده شود. از آنجایی که اگر سیستم سنجش کالبیره شده باشد، می‌توان از آفست فاز اضافی  $\varphi_{\text{off}}$  چشم‌پوشی کرد، مدل سیگنال برای  $\varphi(\theta)$  PoAs می‌تواند تحت تاثیر AWGN فرض شود. در این مورد، تابع احتمال توسط معادله زیر مشخص می‌شوند:

$$p_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}} \det^{\frac{1}{2}}(\mathbf{C}_{\varphi})} e^{-\frac{1}{2}(\hat{\varphi} - \varphi(\theta))^T \mathbf{C}_{\varphi}^{-1}(\hat{\varphi} - \varphi(\theta))}. \quad (15)$$

تخمین حداکثر احتمال (MLE) با ارزش  $\theta$  مشخص می‌شود که تابع احتمال  $p_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  را حداکثر می‌کند، که با پارامتر یافته شده برای حداقل سازی تابع هزینه متناظر است:

$$J_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{1}{2}(\hat{\varphi} - \varphi(\theta))^T \mathbf{C}_{\varphi}^{-1}(\hat{\varphi} - \varphi(\theta)). \quad (16)$$

از آنجایی که در زمان یافتن MLE، نویزها ناهمبسته ( $\mathbf{V}_{\varphi} = \mathbf{I}$ ) فرض می‌شوند، تابع هزینه می‌تواند با رابطه زیر بیان شود:

$$J_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{3}{4\sigma^2}(\hat{\varphi} - \varphi(\theta))^T \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}})(\hat{\varphi} - \varphi(\theta)). \quad (17)$$

از این رو، پارامترهای  $\theta$  می‌توانند با مقداری که تابع زیر را حداقل می‌سازد تخمین زده شوند:

$$(\hat{\varphi} - \varphi(\theta))^T \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}})(\hat{\varphi} - \varphi(\theta)) \quad (18)$$

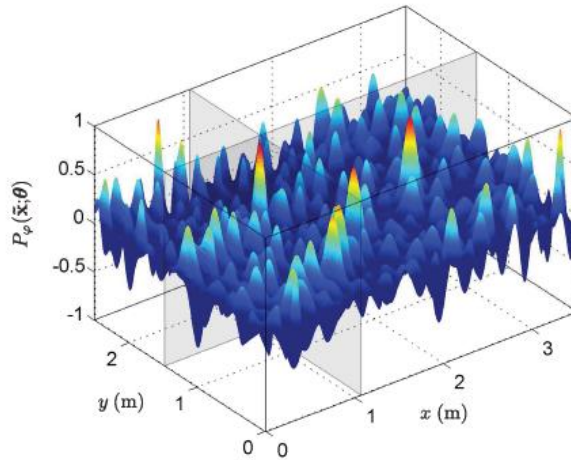
در اینجا POAها باید مانند تفاوت فاز در بازه  $[-\pi, \pi]$  پوشش داده شوند. یافتن MLE بنابراین یک مسئله غیرخطی است. از آنجایی که الگوریتم‌های تحلیلی برای یافتن مورد بهینه شناخته شده نیستند و همگرایی الگوریتم‌های تکراری نمی‌تواند با توجه به ابهام فاز تضمین شوند، کاربردهایی با رویکرد جستجوی عددی را پیشنهاد می‌کنیم. یک کاهش قابل توجه در تلاش محاسباتی می‌تواند بدست آید اگر تقریب (18) را اجازه دهیم. برای این هدف، تابع سودمندی زیر را تعریف می‌کنیم:

$$\begin{aligned}
 P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) &= \text{Re} \left( (e^{j\hat{\varphi}})^H \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) e^{j\varphi(\theta)} \right) \\
 &= \sum_{m=1}^M \hat{A}[m]^2 \cos(\hat{\varphi}[m] - \varphi[m; \theta]) \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) &= \text{Re} \left( (e^{j\hat{\varphi}})^H \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) e^{j\varphi(\theta)} \right) \\
 &= \sum_{m=1}^M \hat{A}[m]^2 \cos(\hat{\varphi}[m] - \varphi[m; \theta]) \quad (19)
 \end{aligned}$$

که اساساً می‌تواند با ضرب ماتریس‌ها محاسبه شود. علاوه بر این، پوشش تفاوت فاز به منظور اینکه در بازه  $[-\pi, \pi]$  قرار گیرند دیگر لازم نیست. با استفاده از سری تیلور مرتبه دوم برای تابع کسینوس، تابع سودمندی می‌تواند با رابطه زیر تقریب زده شود:

$$P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) \approx \hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}} - \frac{1}{2} (\hat{\varphi} - \varphi(\theta))^T \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) (\hat{\varphi} - \varphi(\theta)) \quad (20)$$



شکل 3. تابع سودمندی  $P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  که برای مکان‌یابی ترانسپندر UHF RFID بر اساس ارزیابی فاز استفاده می‌شود. سنجش‌ها در داخل یک محیط سربسته اداری با استفاده از  $K=8$  فرستنده و گیرنده در ارتباط با کاربر انجام شده است.

هر جا که دومین عبارت منفی و یک نسخه کوچک شده از تابع هزینه است، داریم:

$$J_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) \approx \frac{3}{2\sigma^2} \left( \hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}} - \underbrace{\text{Re} \left( (e^{j\hat{\varphi}})^H \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) e^{j\varphi(\theta)} \right)}_{P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)} \right). \quad (21)$$

از آنجای که عبارت  $\hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}}$  تحت تاثیر  $\theta$  است و به برآورد پارامترها بی ربط است، حداقل سازی تابع هزینه  $J_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  معادل است با حداکثر سازی تابع سودمندی  $P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$ . از این رو، تقریب MLE را می توان با رابطه زیر بدست آورد.

$$\hat{\theta}_{\varphi} = \arg \max_{\theta} \left( \text{Re} \left( (e^{j\hat{\varphi}})^H \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) e^{j\varphi(\theta)} \right) \right). \quad (22)$$

در عمده موارد، مکان یابی ترانسپندر UHF RFID با استفاده از ارزیابی POA به تخمین دقیق موقعیت منجر می شود. به هر حال، موارد دور افتاده می توانند با ابهام فاز  $2\pi$  رخ دهند. تابع سودمندی  $P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  تخمین زننده بر اساس ارزیابی POA در شکل 3 نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود، چندین قله بالا وجود دارند، که موارد مشخص شده بالاترین مقدار برای  $P_{\varphi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  را نشان می دهند اما به یک تخمین موقعیت نادرست تعلق دارد.

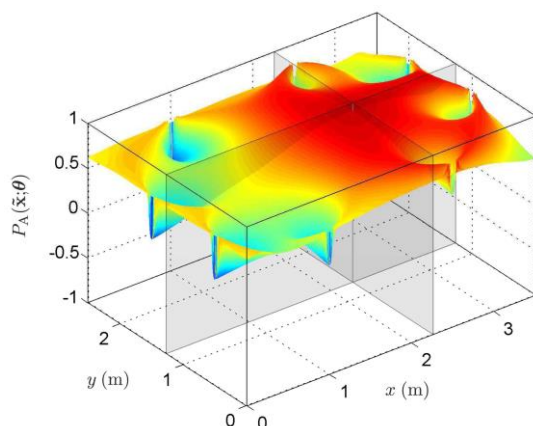
### B. مکان یابی مبتنی بر دامنه

مکان یابی تگ های UHF RFID فعال می توانند با ارزیابی تخمین های دامنه  $\hat{\mathbf{A}}$  از سیگنال های ترانسپندر backscattered بدست آیند. از آنجایی که فرض می کند که مقادیر دامنه توسط AWGN پوشش داده شده است، تابع احتمال می تواند با رابطه زیر پوشش داده شود:

$$p_{\mathbf{A}}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}} \det^{\frac{1}{2}}(\mathbf{C}_{\mathbf{A}})} e^{-\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}(\theta))^T \mathbf{C}_{\mathbf{A}}^{-1}(\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}(\theta))}. \quad (23)$$

MLE  $\theta$  مقادیری هستند که تابع احتمال  $p_{\mathbf{A}}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  را حداکثر سازی می کنند، و معادل آن تابع هزینه را حداقل می کنند:

$$J_{\mathbf{A}}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}(\theta))^T \mathbf{C}_{\mathbf{A}}^{-1}(\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}(\theta)). \quad (24)$$



شکل 4. تابع سودمندی  $P_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  استفاده شده برای مکان‌یابی ترانسپندر UHF RFID فعال بر اساس ارزیابی دامنه. سنجش‌ها در محیط سربسته اداری با استفاده از  $K=8$  فرستنده و گیرنده مرتبط با کاربر انجام می‌شود. به دلیل اینکه در زمان یافتن MLE، نویزهای ناهمبسته  $(V_A = I)$  فرض می‌شوند، تابع هزینه می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$J_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{3}{2\sigma^2} (\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}(\theta))^T (\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}(\theta)). \quad (25)$$

از آنجایی مدل سیگنال برای دامنه  $\mathbf{A}(\theta)$  سیگنال‌های ترانسپندر backscattered شامل فاکتور ناشناخته اما ثابت KA است، یک حداقل سازی بلافصل از این تابع می‌تواند به سختی بدست آید. به هر حال، تابع هزینه می‌تواند مانند معادله زیر بدست آید:

$$J_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{3}{2\sigma^2} (\hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}} - 2\hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}(\theta) + \mathbf{A}(\theta)^T \mathbf{A}(\theta)). \quad (26)$$

اگر سیگنال‌ها به شکل زیر نرمال شوند:

$$\hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}} = 1 \quad (27)$$

$$\mathbf{A}(\theta)^T \mathbf{A}(\theta) = 1 \quad (28)$$

از فاکتور ناشناخته KA می‌تواند صرف نظر شود و تابع هزینه به شکل زیر در می‌آید:

$$J_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{3}{\sigma^2} (1 - \hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}(\theta)). \quad (29)$$

هر چقدر تابع هزینه  $J_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  حداقل شود با حداکثرسازی تابع سودمندی معادل می‌شود:

$$P_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}(\theta) \quad (30)$$

MLE پارامتر  $\theta$  را با رابطه زیر یافتیم

$$\hat{\theta}_A = \arg \max_{\theta} (\hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}(\theta)). \quad (31)$$

محتمل‌ترین مقدار برای  $\theta$  را می‌توان با یک رویکرد جستجوی عددی شبکه یافت، در این شبکه‌ها نرمال سازی مقادیر نظری دامنه  $\mathbf{A}(\theta)$  باید برای هر موقعیت مجزا منطبق با معادله (28) اجرا شود. مکان‌یابی ترانسپندر UHF RFID فعال با استفاده از ارزیابی دامنه به تخمین موقعیت مقاوم منجر می‌شود. به هر حال، دقت الگوریتم در عمده موارد کافی نیست. تابع سودمندی  $P_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  تخمین زنده‌ای بر اساس ارزیابی دامنه نشان داده شده در شکل 4 است. همانطور که می‌توانیم ببینیم، فرآیند یافتن حداکثر مقدار برای  $P_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  می‌تواند با توجه به پیشرفت منحنی مسطح نادرست باشد.

### C. مکان‌یابی براساس سیگنال‌های ترانسپندر دریافتی

همانطور که از قبل گفته شد، مکان‌یابی ترانسپندرهای UHF RFID فعال بر اساس ارزیابی POA دقت فوق العاده‌ای را در عمده موارد ارائه می‌دهد، اما با توجه به ابهام فاز چندین نقطه دور افتاده وجود دارند. در مقابل، مکان‌یابی با استفاده از ارزیابی دامنه مقاومت خوب اما دقت کمی را نشان می‌دهد. مزایای هر دو الگوریتم می‌تواند ترکیب شود اگر هر دو پارامتر  $\hat{\phi}$  و  $\hat{\mathbf{A}}$  سیگنال‌های ترانسپندر دریافتی ارزیابی شوند. برای این هدف، تابع احتمال مشترک با رابطه زیر معرفی می‌شود:

$$p(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = p_{\phi}(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) p_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta). \quad (32)$$

MLE با مقادیر  $\theta$  در تابع احتمال مشترک  $P(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  تعریف می‌شود. از آنجایی که ضرب توابع نمایی  $P_\varphi(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  و  $p_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  به یک افزایش در نما منجر می‌شود که به عنوان نسخه منفی تابع هزینه  $J_\varphi(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  و  $J_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  تعریف می‌شود، MLE می‌تواند به صورت معادلی به عنوان پارامترهای که تابع هزینه مشترک را حداقل می‌کنند تعریف شود:

$$J(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = J_\varphi(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) + J_A(\tilde{\mathbf{x}}; \theta). \quad (33)$$

با استفاده از تعریف (21)، (27)، و (29) تابع هزینه مشترک می‌تواند به شکل زیر تعریف شود:

$$J(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \frac{3}{2\sigma^2} (1 - \text{Re}((e^{j\hat{\varphi}})^H \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) e^{j\varphi(\theta)})) + \frac{3}{\sigma^2} (1 - \hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}(\theta)). \quad (34)$$

حداقل سازی تابع هزینه  $J(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  معادل است با حداکثرسازی تابع سودمندی زیر

$$P(\tilde{\mathbf{x}}; \theta) = \text{Re}((e^{j\hat{\varphi}})^H \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) e^{j\varphi(\theta)}) + 2\hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}(\theta) \quad (35)$$

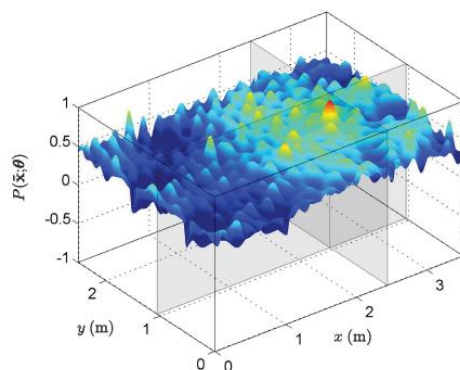
MLE پارامترهای  $\theta$  با معادله زیر پیدا می‌شود

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} (\text{Re}((e^{j\hat{\varphi}})^H \text{diag}^2(\hat{\mathbf{A}}) e^{j\varphi(\theta)}) + 2\hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}(\theta)). \quad (36)$$

بار دیگر، محتمل‌ترین مقادیر برای  $\theta$  را می‌توان با یک رویکرد جستجوی عددی شبکه یافت. تابع سودمندی  $P(\tilde{\mathbf{x}}; \theta)$  تخمین زنده براساس ارزیابی هر دو پارامتر سیگنال‌های دریافتی از ترانسپندر می‌تواند در شکل 5 مشاهده شود. همانطور که دیده می‌شود، مشابه با نتایج الگوریتم مبتنی بر ارزیابی POA، با توجه به ابهام فاز چندین اوج بروز می‌کنند. به هر حال، با ترکیب ارزیابی دامنه، قله‌ها در موقعیت‌های نادرست در دامنه خود کاهش می‌یابند. بنابراین، نقاط دور افتاده با توجه به ابهام فاز اجتناب می‌شوند در حالی که دقت تخمین موقعیت در مقایسه با الگوریتم مبتنی بر ارزیابی POA تغییر نمی‌کند. این به تضاد با شکل 3 برای یک تخمین موقعیت دقیق با استفاده از همان مجموعه داده منجر می‌شود.

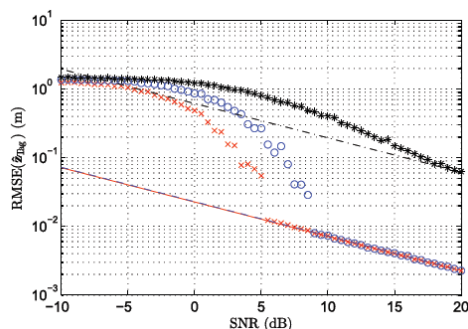
## 7. نتایج شبیه سازی

شبیه سازی با استفاده از روش مونت کارلو برای ارزیابی عملکرد تخمین زنده موقعیت توسط معادله (22)، (31) و (36) مشخص می‌شود. برای این هدف، یک سیستم مکان‌یابی دو بعدی با استفاده از  $K=8$  فرستنده و گیرنده و یک منطقه سنجش  $3.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  تعریف شده شبیه سازی شده است، و مجموعه داده با نویزهای مختلط تشریح شده توسط معادله (3) مزین شده است. از آنجایی که اختلال اصلی رخ داده در کانال داده شده با توجه به انتشار چند مسیری صورت گرفته است، که در طول چرخه سنجش ثابت فرض می‌شود، نویز می‌تواند با اندازه گیری‌های تکی مرتبط در نظر گرفته شود.



شکل 5. تابع سودمندی  $P(\bar{x}; \theta)$  برای مکان‌یابی تگ UHF RFID فعال بر اساس سیگنال‌های ترانسپندر

دریافتی استفاده می‌شود. سنجش در محیط بسته اداری با  $K=8$  فرستنده و گیرنده مرتبط با کاربر صورت می‌گیرد.



شکل 6. شبیه سازی دقت تخمین زنده موقعیت با استفاده از روش مونت کارلو. ارزیابی فاز:  $\text{CRLB}$  — — ،  $\text{RMSE}$  — —

شبیه سازی شده. ارزیابی دامنه:  $\text{CRLB}$  — — ،  $\text{RMSE}$  \* شبیه سازی شده. ارزیابی ترکیبی  $\text{CRLB}$  — — ،  $\text{RMSE}$  \* — —

$\text{RMSE}$  شبیه سازی شده



شبه سازی هزار بار انجام شد، و سپس نسبت سیگنال به نویز<sup>8</sup> (SNR) متفاوتی انتخاب شد. از نظر تحلیلی کران پایین کرامر – رانو<sup>9</sup> (CRLB) محاسبه می‌شود، که حداقل واریانسی را بیان می‌کند که می‌تواند با یک تخمین‌زننده بی طرف بدست آید، که به عنوان معیاری برای مقایسه عملکرد تخمین‌زننده استفاده می‌شود. همانطور که در شکل 6 نشان داده شد، میانگین مربع خطا (RMSE) تخمین موقعیت به SNR بستگی دارد. در نتیجه در اندازه محدوده منطقه سنجش، RMSE نمی‌تواند حتی از SNR پایین‌تر از سطح آستانه اصلی تجاوز کند. همانطور که دیده می‌شود، تخمین‌زننده بر اساس ارزیابی دامنه کمترین دقت را نسبت به همه رویکردهای ارائه می‌دهد و بنابراین تنها به عنوان یک مولفه از یک تخمین‌زننده براساس ترکیب ارزیابی فاز و ارزیابی دامنه استفاده می‌شود. در سطح آستانه SNR تقریباً 5.5dB، تخمین‌زننده بر اساس ترکیب هر دو پارامتر سیگنال‌های ترانسپندر آغازین را برای رویکرد مجانبی متناظر با CRLB دریافت می‌کند. این یک بهبود قابل توجه در مقایسه با تخمین‌زننده بر اساس ارزیابی فاز است، که به CRLB‌های یکسان تا زمانی که از آستانه تقریباً 9 dB بیشتر نشود، نزدیک نمی‌شود.

## 8. نتایج سنجش

برای ارزیابی عملکرد سیستم مکان‌یابی، سنجش‌هایی در یک محیط سر بسته اداری صورت گرفت که توسط تیغه‌ها و سقف و کف بتنی احاطه شده بود. در راستای این هدف، یک توصیفگر سیستم سنجش موقعیت محلی شامل  $K=8$  فرستنده و گیرنده ایجاد شد، که در  $M=56$  کانال سیستم اندازه گیری نتیجه می‌دهد. نشان‌دهنده سیستم در شکل 7 نشان داده شده‌اند.

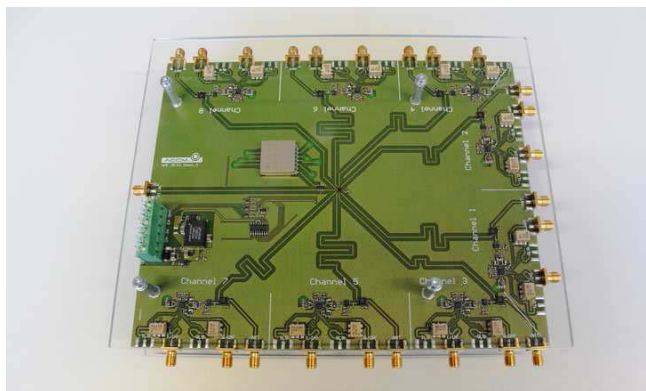
آنتن قطبی متناظر در ارتفاع 1.6 m بالاتر از سطح زمین در مرزهای ناحیه سنجش دو بعدی نصب شده است، که در مساحت  $3.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  تعریف شده است. یک EPCglobal Class-1 Gen-2/ISO 18000-6C سازگار با RFID خون UHF برای برقراری ارتباط با ترانسپندر UHF RFID فعال قطبی خطی استفاده شده است، که به

<sup>8</sup> signal-to noise ratio

<sup>9</sup> Cramér–Rao lower bound

ریل تراورس دو بعدی با استفاده از یک تیوپ پلاستیکی وصل شده است. ترانسپندر به موقعیت تعریف شده 645 در صفحه آنتن فرستنده و گیرنده منتقل شد، موقعیت فعلی تنها برای اعتبارسنجی دقت سیستم استفاده شده و بر روی الگوریتم مکان‌یابی تاثیر نداشت.

RFID خوان برای انتقال واحد با استفاده از یک فرکانس 866.9 MHz و سطح واحد 2 W معادل با توان تابشی پیکربندی شد. همانطور که در شکل 8 می‌بینید، یک انتشار خط مستقیم قوی در سناریو نشان داده شده است. به هر حال، چندین انعکاس استاتیک و انتشار چند مسیری توسط دیوارها، کف بتنی، و سقف انتظار می‌رود. همانطور که از قبل گفته شد، کالبیره کردن برای فعال سازی مکان‌یابی با استفاده از ارزیابی فاز ضروری است. در راستای این هدف، سنجش مرجع از 10 موقعیت ترانسپندر شناخته شده انجام شده است، که یک مقایسه بین مقادیر POA محاسبه شده و اندازه گرفته شده به تخمینی از آفست فاز  $\phi^{off}$  برطبق معادله (9) منجر می‌شود.



شکل 7: نشان‌دهنده سیستم طراحی شده برای پشتیبانی از  $K=8$  فرستنده و گیرنده مرتبط با کاربر. RF# درگاه آنتن است، و  $I\#$  و  $Q\#$  خروجی‌های دمودلاتور برای به ترتیب in-phase و quadrature است

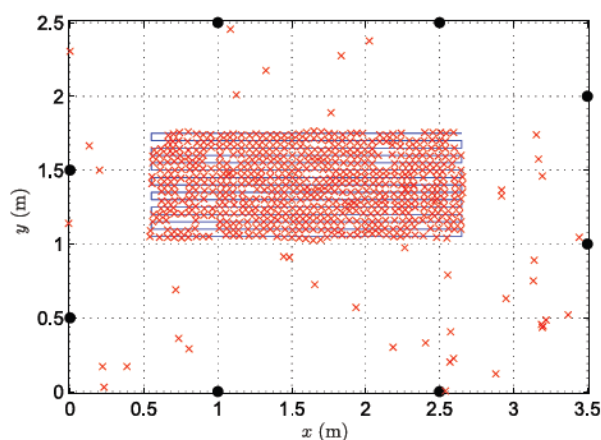
### A. مکان‌یابی مبتنی بر فاز دریافت

مکان‌یابی تگ‌های UHF RFID فعال می‌تواند با بکاربردن الگوریتم مشخص شده توسط معادله (22) بدست آید، در این الگوریتم  $\hat{\phi}$  PoAs سیگنال‌های ترانسپندر دریافت کننده ارزیابی می‌شود. خطای میانه و RMSE تخمین موقعیت به ترتیب 0.011 و 0.47 m محاسبه می‌شوند. از آنجایی که سنجش یک SNR تقریباً 5.75 dB را نشان

می‌دهد، به طور قابل توجهی پایین‌تر از آستانه 9 dB تعیین شده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از این الگوریتم است، تخمین موقعیت نقاط دور افتاده با توجه به مسئله unwrapping رخ می‌دهد که تفاوت عظیمی را بین خطای میانه و RMSE توضیح می‌دهد. همانطور که در شکل 9 و 10 دیده می‌شود، مکان‌یابی ترانسپندر UHF RFID براساس ارزیابی فاز در عمده موارد دقیق است. به ویژه، 92.6% از موقعیت‌های تگ با خطای زیر 0.04 m تخمین زده شده‌اند. به هر حال، با توجه به نقاط دور افتاده، حداکثر خطای مطلق تخمین موقعیت 2.97 m ارزیابی شده است.



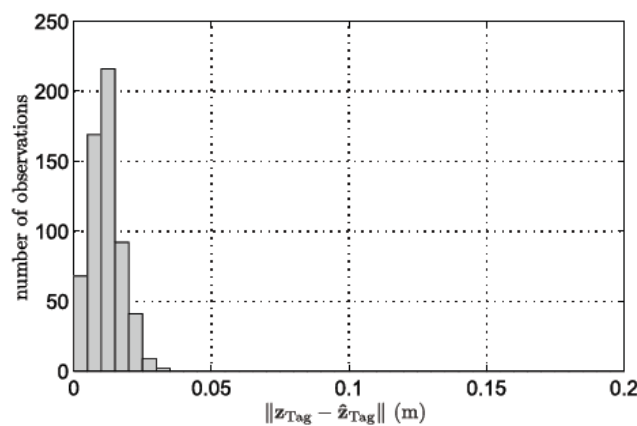
شکل 8. راه‌اندازی سنجش سیستم مکان‌یابی برای ترانسپندر UHF RFID شامل  $k=8$  فرستنده و گیرنده مرتبط با کاربر



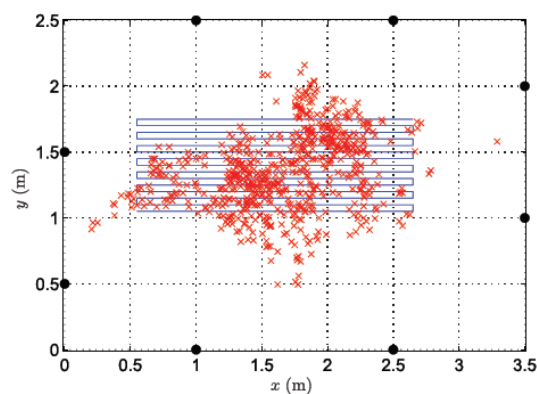
شکل 9. مکان‌یابی ترانسپندر UHF RFID فعال بر اساس ارزیابی فاز ● موقعیت آنتن، — رد واقعی تگ RFID، و × موقعیت تخمین زده شده ترانسپندر

## B. مکان‌یابی مبتنی بر دامنه

موقعیت ترانسپندر UHF RFID فعال می‌تواند بر اساس الگوریتم مشخص شده (31)، با ارزیابی قدرت سیگنال دریافت شده از ترانسپندر، تخمین زده شود. با این الگوریتم خطای میانه تا  $0.26\text{ m}$  افزایش می‌یابد، اما RMSE به  $0.35\text{ m}$  کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل 11 و 12 نشان داده شده است، این الگوریتم نسبتاً نادرست است. هر حال، از آنجایی که این الگوریتم تحت تاثیر مسائل unwrapping نیست، حداکثر خطای مطلق تخمین موقعیت  $1.29\text{ m}$  ارزیابی شد، که بهبود قابل توجهی در مقایسه با الگوریتم مبتنی بر ارزیابی فاز بود.



شکل 10. توزیع خطای مطلق تخمین موقعیت بر اساس سنجش 645 انجام شده در یک محیط بسته اداری، ارزیابی PoAs سیگنال‌های ترانسپندر دریافتی. 48 سنجش خطای بیشتر از  $0.2\text{ m}$  را نشان می‌دهند.

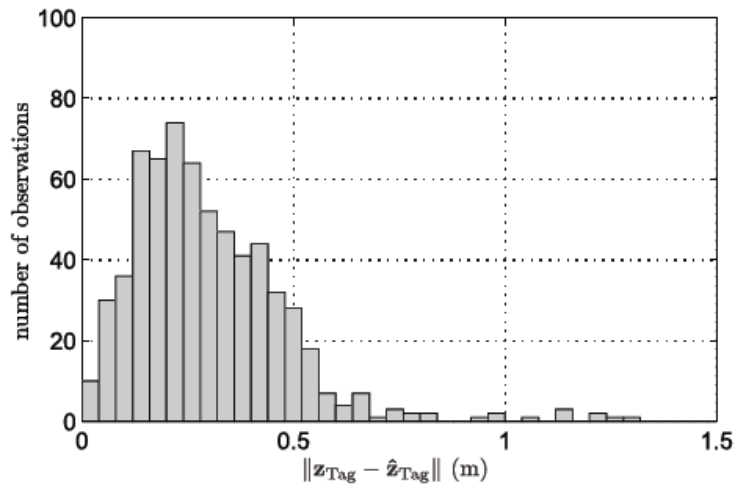


شکل 11. مکان‌یابی ترانسپندر UHF RFID فعال بر اساس ارزیابی دامنه: ● موقعیت آنتن، — رد واقعی تگ RFID، و × موقعیت تخمین زده شده ترانسپندر

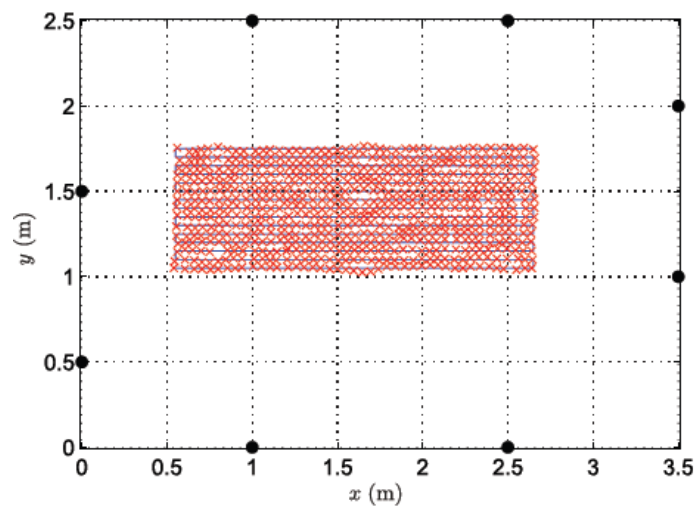
## C. مکان‌یابی بر اساس سیگنال ترانسپندر دریافتی

همانطور که از قبل تشریح شد، با توجه به ترکیب ارزیابی فاز و دامنه، بهبودی در دقت و مقاومت تخمین موقعیت انتظار می‌رود. اگر الگوریتم مشخص شده (36) برای مکان‌یابی تگ‌های UHF RFID استفاده می‌شود، RMSE به  $0.020\text{ m}$  کاهش می‌یابد، در حالی که خطای میانه در  $0.011\text{ m}$  در مقایسه با ارزیابی فاز بدون تغییر باقی می‌ماند. همانطور که در شکل 13 و 14 مشاهده می‌کنید، تخمین موقعیت در عمده موارد دقیق است. به صورت دقیق، تنها یک نقطه دور افتاده با یک خطای مطلق  $0.40\text{ m}$  رخ می‌دهد، در حالی که تخمین موقعیت باقی مانده خطای زیر  $0.04\text{ m}$  را نشان می‌دهد. به طور کلی، نقاط دور افتاده با این حقیقت که سنجش یک SNR تقریباً  $5.75\text{ dB}$  را نشان می‌دهد، که به سطح آستانه  $5.5\text{ dB}$  تعیین شده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو نزدیک است توضیح داده شود. علاوه بر این، عملکرد مکان‌یابی تضعیف می‌شود اگر برخی از ترکیبات tag/front-end یک پاسخ تگ را تولید نکنند. برای یک  $5.75\text{ dB}$ , SNR, CRLB انحراف استاندارد تخمین‌زننده بدون بایاس  $0.012\text{ m}$  را حاصل می‌کند، که به  $0.020\text{ m}$  RMSE بدست آمده توسط سنجش‌ها نزدیک است. برای اثبات عملکرد روش پیشنهادی، سنجش‌های بیشتری با استفاده از یک SNR در زیر سطح آستانه  $5.5\text{ dB}$  انجام شده است. در راستای این هدف، چندین منعکس کننده ثابت به سناریوی سنجش اضافه می‌شوند. آزمایشات نشان می‌دهند که یک  $4.10\text{ dB}$  SNR, RMSE تخمین موقعیت به  $0.084\text{ m}$  افزایش می‌یابد. این مقدار به مقایسه با نتایج تعیین شده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو بسیار شبیه است که به یک  $0.079\text{ m}$  RMSE منجر می‌شود.

یک استراتژی برای اجتناب از نقاط دور افتاده افزایش تعداد فرستنده و گیرنده‌ها است، چرا که SNR مورد نیاز را برای بدست آوردن یک تخمین موقعیت مقاوم کاهش می‌دهند. در عوض، با افزایش توان انتقال یا با کاهش افت درج نشان‌دهنده سیستم، تعداد پاسخ‌های تگ می‌توانند افزایش یابند، که دقت و مقاومت مکان‌یابی را بهبود می‌بخشد.

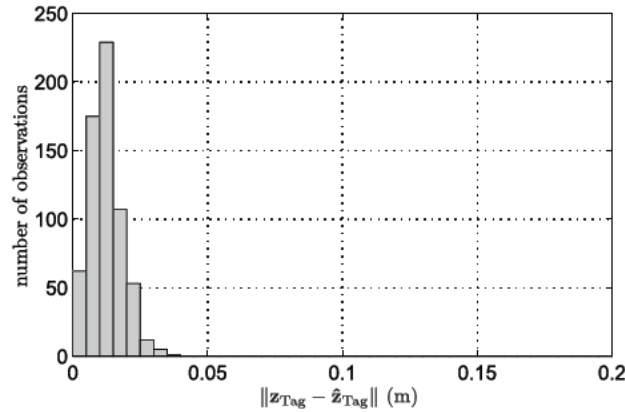


شکل 12. توزیع خطای مطلق تخمین موقعیت بر اساس 645 سنجش صورت گرفته در یک محیط بسته، با ارزیابی دامنه سیگنال‌های ترانسپندر دریافت شده



شکل 13. مکان‌یابی ترانسپندر UHF RFID فعال بر اساس ارزیابی پارامترهای سیگنال ترانسپندر دریافت شده

$\hat{\phi}$  و  $\hat{A}$ : موقعیت آنتن، — پیگیری واقعی تگ RFID، و  $\times$  موقعیت تخمین زده شده ترانسپندر



شکل 14: توزیع خطای مطلق تخمین موقعیت بر اساس 645 سنجش انجام شده در محیط سر بسته اداری که پارامترهای سیگنال ترانسپندر دریافت شده  $\hat{\phi}$  و  $\hat{A}$  ارزیابی می شوند. سنجش ما خطای بیشتر از 0.2 m را نشان می دهد.

به طور کلی، تلاش های محاسباتی روش ها با استفاده از یک رویکرد جستجوی عددی شبکه می تواند قابل توجه باشد. آشکار است که، تراکم شبکه باید با یک معاوضه بین بار محاسباتی و دقت انتخاب شود. الگوریتم بر اساس ارزیابی POA نیازمند شبکه ای با یک فضای به طور قابل توجه کوچکتر از طول موج است، که به تعداد زیادی موقعیت مجزا منجر می شود و بنابراین به بار محاسباتی بالا منجر می شود. به هر حال، مقادیر نظری پارامترهای  $\varphi(\theta)$  PoA و دامنه  $A(\theta)$  می تواند از پیش برای هر موقعیت مجزای شبکه محاسبه شوند و از آنجایی که الگوریتم ها برای مکان یابی ترانسپندر RFID می توانند به ضرب ماتریس کاهش یابند، حتی با استفاده از یک فضای شبکه شبکه 1 cm، زمان مورد نیاز برای محاسبه تخمین موقعیت می تواند در مقایسه با زمانی که سیستم برای پیکربندی پی در پی هر دستگاه مانند فرستنده و گیرنده می گیرد صرف نظر شود و یک دوره بررسی موجودی را با استفاده از RFID اجرا کند.

#### D. مقایسه روش های مکان یابی

مقایسه الگوهای مکان یابی مختلفی که نتایج آزمایشی را ارائه می دهند در جدول 1 آورده شده است. در مقابل رویکرد ما، روش های تحلیل شده مکان یابی RFID خوان موبایل به ترانسپندرهای مرجع ثابت بی شماری در موقعیت های

شناخته شده و ثابت تکیه می کند، دقت مکان یابی به تراکم تگ ها بستگی دارد [2], [1]. یک مزیت قابل توجه این رویکردها این است که این منطقه سنجش تنها به آرایشی از ترانسپندرها محدود می شود.

از آنجایی که سیستم های تحلیل شده مکان یابی تگ های UHF RFID فعال را بر اساس ارزیابی سیگنال های ترانسپندر backscattered اجازه می دهند، منطقه سنجش آنها همیشه به محدوده خواندن محدود می شود. اگر ترانسپندرهای مرجع در موقعیت های شناخته شده و ثابت برای فعال سازی تخمین موقعیت استفاده شوند. مکان یابی می تواند با ارزیابی RSSI در یک RFID خوان ثابت بدست آید. این سیستم های دقت مکان یابی متوسطی را نشان می دهند، که به تعداد ترانسپندرهای مرجع توزیع شده در منطقه سنجش بستگی دارند.

اگر سیگنال های ترانسپندر دریافت شده در آنتن های Reader متعددی ارزیابی شوند، مکان یابی می تواند بدون استفاده از تگ های مرجع بدست آید. مشابه با الگوریتم مکان یابی مبتنی بر دامنه نشان داده شده در این مثال، روش معرفی شده در [10] مکان یابی تگ های UHF RFID فعال را با ارزیابی مقادیر RSSI ارائه شده توسط چند RFID خوان تجاری اجازه می دهد.

جدول 1. مقایسه روش های مکان یابی

Reference	Target	Approach	Average Accuracy	Measurement Zone	Note
Errington <i>et al.</i> [1]	Reader	RSSI	20.5 cm	N/A	Reference transponders at known positions required; localization accuracy depends on density of RFID tags
Shirehjini <i>et al.</i> [2]	Reader	RSSI	6.5 cm	N/A	Reference transponders at known positions required; localization accuracy depends on density of RFID tags
Chen <i>et al.</i> [7]	Tag	RSSI	31 cm	3.1 m x 1.2 m	Reference transponders at known positions required; localization of the RFID tags based on the <i>k</i> -nearest neighbor principle
Zhang <i>et al.</i> [8]	Tag	RSSI	18 cm	4.2 m x 2.8 m	Reference transponders at known positions required; localization of the RFID tags based on the <i>k</i> -nearest neighbor principle
Shao <i>et al.</i> [10]	Tag	RSSI	35.4 cm	3 m x 2 m	Evaluation of the received signal strength of 4 reader antennas
Azzouzi <i>et al.</i> [14]	Tag	PoA	10.7 cm	3 m x 3 m	Evaluation of the angle-of-arrival of the received signal at 5 antenna arrays
Scherhäuff <i>et al.</i> [17]	Tag	PoA	56 cm	3.5 m x 2.5 m	MIMO system consisting of 8 frontends; system calibration is required
Povalac <i>et al.</i> [20]	Tag	PoA	14 cm	≤ 2.5 m (1-D)	Phase evaluation using different carrier frequencies; system calibration is required
Miesen <i>et al.</i> [22]	Tag	PoA	2 cm (lateral); 90 cm (distance)	N/A	Synthetic aperture created by moving reader antenna at known trajectory
Scherhäuff <i>et al.</i> [23]	Tag	PoA	6.4 cm	3.5 m x 2.5 m	Inverse synthetic aperture created by moving tag; system calibration is required
Parr <i>et al.</i> [24]	Tag	PoA	1 cm (lateral); 5 cm (distance)	N/A	Inverse synthetic aperture created by moving tag at known trajectory
Scherhäuff <i>et al.</i> [26]	ULA	PoA	1.1 cm	3.5 m x 2.5 m	Localization of a ULA of 6 RFID transponders; MIMO system consisting of 8 frontends; system calibration is required
This work	Tag	PoA + RSSI	2.0 cm	3.5 m x 2.5 m	MIMO system consisting of 8 frontends; evaluation of backscattered transponder signals; system calibration is required



ترانسپنדרهای مرجع در موقعیت های شناخته شده لازم هستند، مکان یابی دقیق به تراکم تگ های RFID بستگی دارد

ترانسپنדרهای مرجع در موقعیت های شناخته شده لازم هستند، مکان یابی دقیق به تراکم تگ های RFID بستگی دارد

ترانسپنדרهای مرجع در موقعیت های شناخته شده لازم هستند، مکان یابی تگ های RFID براساس k نزدیک ترین همسایه

ترانسپنדרهای مرجع در موقعیت های شناخته شده لازم هستند، مکان یابی تگ های RFID براساس k نزدیک ترین همسایه

ارزیابی قدرت سیگنال دریافتی در آرایه 5 آنتنی

ارزیابی زاویه ورود سیگنال دریافتی در آرایه 5 آنتنی

سیستم MIMO شامل 8 دستگاه، کالبراسیون سیستم نیاز است.

ارزیابی فاز با استفاده از فرکانس حامل متفاوت، کالبراسیون سیستم نیاز است

دیافراگم مصنوعی ایجاد شده با حرکت آنتن رادار در مجاورت شناخته شده

دستگاه دیافراگم معکوس ایجاد شده با تگ در حال حرکت، کالبراسیون سیستم نیاز است

دستگاه دیافراگم معکوس ایجاد شده با تگ در حال حرکت در مجاورت شناخته شده

مکان یابی ترانسپندر ULA 6 RFID ، سیستم MIMO شامل 8 دستگاه، کالبراسیون سیستم نیاز است

سیستم MIMO شامل 8 دستگاه، ارزیابی سیگنال ترانسپندر ، backscattered ، کالبراسیون سیستم نیاز است

به طور کلی، سیستم‌ها با استفاده از ارزیابی فاز دقت بهتری را نسبت به سیستم‌ها با استفاده از ارزیابی RSSI نشان می‌دهند. برای ارزیابی زاویه دریافت سیگنال ترانسپندر در چندین آرایه آنتن در مرزهای منطقه سنجش دو بعدی قرار می‌گیرد، یک روش برای مکان‌یابی تگ RFID در [14] بیان شده است. این سیستم مکان‌یابی دقیقی را به بهای استفاده از آرایه‌ای از آنتن‌های تعریف شده توسط کاربر ارائه می‌دهد. در [17] یک رویکرد فعال کننده مکان‌یابی ترانسپندر بر اساس تحلیل PoA را با استفاده از دستگاه‌های فرستنده و گیرنده بی شمار معرفی کردیم. از آنجایی که الگوریتم به روش مکان‌یابی تگ‌های RFID به استفاده از ارزیابی فاز نشان داده شده در این مقاله مربوط است، نتایج مشابهی بدست می‌آید. تحلیل تفاوت‌های فازها با استفاده از انواع فرکانس حامل تخمین موقعیت را با روش نشان داده شده در [20] انجام می‌دهیم، که عملکرد مکان‌یابی آن به پهنای باند در دسترس بستگی دارد، که با استانداردهای نظارتی محدود می‌شود.

چندین سیستم تحلیل شده‌اند که بر اساس انطباق منسجم مقادیر فاز نمونه‌گیری شده توسط دیافراگم مصنوعی [22] یا دیافراگم مصنوعی معکوس [24], [23] است. این سیستم‌ها دقت بالاتری را ارائه می‌دهند، اما در مقابل کار ما با یک مکان‌یابی ترانسپندر RFID ثابت نمی‌تواند بدست آید چرا که این سیستم‌ها به حرکت آنتن رادار یا تگ‌های RFID نیاز دارند.

در [26]، یک روش مکان‌یابی ترانسپندر ULA of RFID را براساس ارزیابی فاز مطرح کردیم. آزمایشات، که با استفاده از یک نشان‌دهنده سیستم اجرا شده‌اند و یک سنجش با آنچه در این مقاله تشریح شده است دقت و مقاومت عالی را نشان دادند. به هر حال، در بسیاری از موارد آرایش تگ‌های در محیط فشرده نمی‌تواند برای دستگاه‌های موبایل به کار رود. علاوه بر این، تلاش محاسباتی در مقایسه با رویکرد نشان داده شده در این مقاله به طور قابل توجهی بالاتر است.

به طور خلاصه، از آنجایی که هر روش دارای کاستی‌های خود است، هیچ سیستمی را نمی‌توان یافت که از هر نظر، مشخصه‌های بهینه را ارائه دهد. سیستم معرفی شده در این مقاله بالاترین دقت از همه روش‌های بررسی شده را برای متداول ترین مورد بررسی می‌شود، در این مورد تنها یک ترانسپندر RFID باید مکان‌یابی شود و حرکت آنتن رادار یا

تگ RFID در طول یک مسیر شناخته شده نمی‌تواند تضمین شود. علاوه بر این، در مقابل انواع روش‌های دیگر، هیچ ترانسپندر مرجعی برای تخمین موقعیت نیاز نیست. به هر حال، مانند بیشتر رویکردهایی که PoA سیگنال ترانسپندر دریافت شده را ارزیابی می‌کند، کالبراسیون سیستم برای مکان‌یابی نیاز است.

## 7. نتیجه‌گیری

ما یک سیستم مکان‌یابی دو بعدی را برای تگ‌های UHF RFID فعال بر اساس ارزیابی سیگنال‌های ترانسپندر backscatter معرفی کردیم. بر خلاف انواع سیستم‌های رایج، که فاز یا دامنه سیگنال ترانسپندر دریافت شده را ارزیابی می‌کنند، رویکرد ما مزایای هر دو رویکرد را در پارامتر ترکیب می‌کند. علاوه بر این، الگوریتم نشان داده شده به ترانسپندر مرجع متکی نیست، و هیچ حرکتی از آنتن رادار یا تگ RFID برای تخمین موقعیت نیاز نیست. سیستم، که هشت فرستنده و گیرنده را ترکیب می‌کند، از یک محصول آماده RFID خوان و ترانسپندر -EPCglobal Class-1 Gen-2 UHF RFID فعال معمولی استفاده می‌کند. سنسورها با استفاده از یک نشان‌دهنده سیستم در یک محیط سربسته اداری بسته با دیوارها و کف و سقف بتونی انجام شدند که مکان‌یابی دقیق و مقاوم و در عین حال برآورده سازی استانداردهای نظارتی را نشان دادند.

## REFERENCES

- [1] A. F. C. Errington, B. L. F. Daku, and A. F. Prugger, "Initial position estimation using RFID tags: A least-squares approach," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 11, pp. 2863–2869, Nov. 2010.
- [2] A. A. N. Shirehjini, A. Yassine, and S. Shirmohammadi, "An RFID-based position and orientation measurement system for mobile objects in intelligent environments," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 6, pp. 1664–1675, Jun. 2012.
- [3] J. H. Cho and M.-W. Cho, "Effective position tracking using B-spline surface equation based on wireless sensor networks and passive UHF-RFID," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 9, pp. 2456–2464, Sep. 2013.
- [4] A. Athalye, V. Savic, M. Bolic, and P. M. Djuric, "Novel semi-passive RFID system for indoor localization," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 2, pp. 528–537, Feb. 2013.
- [5] A. Dionisi, E. Sardini, and M. Serpelloni, "Wearable object detection system for the blind," in *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC)*, May 2012, pp. 1255–1258.
- [6] B. Jachimczyk, D. Dziak, and W. J. Kulesza, "RFID—Hybrid scene analysis-neural network system for 3D indoor positioning optimal system arrangement approach," in *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC)*, May 2014, pp. 191–196.
- [7] X. Chen, L. Xie, C. Wang, and S. Lu, "Adaptive accurate indoor-localization using passive RFID," in *Proc. IEEE Int. Conf. Parallel Distrib. Syst. (ICPADS)*, Dec. 2013, pp. 249–256.
- [8] Z. Zhang, Z. Lu, V. Saakian, X. Qin, Q. Chen, and L.-R. Zheng, "Item-level indoor localization with passive UHF RFID based on tag interaction analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 2122–2135, Apr. 2014.
- [9] A. R. J. Ruiz, F. S. Granja, J. C. P. Honorato, and J. I. G. Rosas, "Accurate pedestrian indoor navigation by tightly coupling foot-mounted IMU and RFID measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 1, pp. 178–189, Jan. 2012.
- [10] S. Shao and R. J. Burkholder, "Item-level RFID tag location sensing utilizing reader antenna spatial diversity," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 10, pp. 3767–3774, Oct. 2013.
- [11] M. Goller and M. Brandner, "Improving classification performance of RFID gates using hidden Markov models," in *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC)*, May 2011, pp. 1–5.
- [12] C. Hekimian-Williams, B. Grant, X. Liu, Z. Zhang, and P. Kumar, "Accurate localization of RFID tags using phase difference," in *Proc. IEEE Int. Conf. RFID*, Apr. 2010, pp. 89–96.
- [13] J. Zhou, H. Zhang, and L. Mo, "Two-dimension localization of passive RFID tags using AOA estimation," in *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC)*, May 2011, pp. 1–5.
- [14] S. Azzouzi, M. Cremer, U. Dettmar, T. Knie, and R. Kronberger, "Improved AoA based localization of UHF RFID tags using spatial diversity," in *Proc. IEEE Int. Conf. RFID-Technol. Appl. (RFID-TA)*, Sep. 2011, pp. 174–180.
- [15] N. Guzey, H. Xu, and S. Jagannathan, "Localization of near-field radio controlled unintended emitting sources in the presence of multipath fading," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 11, pp. 2696–2703, Nov. 2014.
- [16] M. Scherhäufl, M. Pichler, D. Müller, A. Ziroff, and A. Stelzer, "Phase-of-arrival-based localization of passive UHF RFID tags," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. (IMS)*, Jun. 2013, pp. 1–3.
- [17] M. Scherhäufl, M. Pichler, E. Schimbäck, D. J. Müller, A. Ziroff, and A. Stelzer, "Indoor localization of passive UHF RFID tags based on phase-of-arrival evaluation," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 12, pp. 4724–4729, Dec. 2013.
- [18] X. Li, Y. Zhang, and M. G. Amin, "Multifrequency-based range estimation of RFID tags," in *Proc. IEEE Int. Conf. RFID*, Apr. 2009, pp. 147–154.
- [19] D. Arnitz, K. Witrisal, and U. Muehlmann, "Multifrequency continuous-wave radar approach to ranging in passive UHF RFID," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 57, no. 5, pp. 1398–1405, May 2009.
- [20] A. Povalac and J. Sebesta, "Phase difference of arrival distance estimation for RFID tags in frequency domain," in *Proc. IEEE Int. Conf. RFID-Technol. Appl. (RFID-TA)*, Sep. 2011, pp. 188–193.
- [21] Y. Ma and E. C. Kan, "Accurate indoor ranging by broadband harmonic generation in passive NLTL backscatter tags," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 62, no. 5, pp. 1249–1261, May 2014.
- [22] R. Miesen, F. Kirsch, and M. Vossiek, "UHF RFID localization based on synthetic apertures," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 807–815, Jul. 2013.
- [23] M. Scherhäufl, M. Pichler, and A. Stelzer, "Localization of passive UHF RFID tags based on inverse synthetic apertures," in *Proc. IEEE Int. Conf. RFID*, Apr. 2014, pp. 82–88.
- [24] A. Parr, R. Miesen, and M. Vossiek, "Inverse SAR approach for localization of moving RFID tags," in *Proc. IEEE Int. Conf. RFID*, Apr./May 2013, pp. 104–109.
- [25] A. Buffi, P. Nepa, and F. Lombardini, "A phase-based technique for localization of UHF-RFID tags moving on a conveyor belt: Performance analysis and test-case measurements," *IEEE Sensors J.*, vol. 15, no. 1, pp. 387–396, Jan. 2015.