

# مکان‌یابی بر اساس تفاضل توان سیگنال دریافتی با به کارگیری بهینه‌سازی محدب در شبکه حسگر بی‌سیم

حسن نظری، میثم رئیس دانایی و مرتضی سپهوند

زیاد به  $CRLB^1$  می‌رسد [۱۰]. در مسئله مکان‌یابی با توان سیگنال دریافتی تابع هزینه تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی غیر خطی و غیر محدب است و تعداد زیادی مینیمم محلی دارد. روش‌های مختلفی برای یافتن جواب سراسری تابع هزینه این تخمین‌گر پیشنهاد شده‌اند که از جمله آنها روش گوس-نیوتن [۱۱] است. استفاده از روش‌های مبتنی بر گوس-نیوتن نیازمند حدس اولیه دقیق است و در غیر این صورت الگوریتم در مینیمم محلی گیر می‌افتد و به مینیمم سراسری همگرا نمی‌شود. چالش بزرگ این روش‌ها آن است که انتخاب نقطه شروع تصادفی یا غیر دقیق سبب خطای تخمین بزرگ خواهد شد و از این رو در [۱۱] از یک تخمین‌گر خطی برای حدس اولیه استفاده شده است. همچنین از تکرارهای گوس-نیوتن برای کاهش خطا کمک گرفته شده که پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهد. راه‌حل دیگری که برای یافتن جواب تابع هزینه تخمین‌گر  $ML^2$  چند سالی است بسیار مورد توجه واقع شده است، ایده استفاده از بهینه‌سازی محدب است [۱۲]. از جمله این تلاش‌ها می‌توان به به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی محدب مانند  $SOCP^3$  و  $SDP^4$  در [۱۳] تا [۱۶] اشاره نمود. در [۱۳]، [۱۴] و [۱۶] از اندازه‌گیری‌های توان سیگنال دریافتی  $RSS^5$  استفاده شده و سپس به کمک روش  $SDP$  تابع هزینه غیر محدب با روش آزادسازی نیمه‌معیین به مسئله بهینه‌سازی محدب تبدیل شده و در نتیجه همگرایی آن به مینیمم سراسری تضمین شده است. روش‌های بهینه‌سازی محدب حل عددی ارائه می‌دهند و شناخته‌شده‌ترین نرم‌افزار جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های محدب جعبه‌ابزار  $CVX$  [۱۷] است. یکی از روش‌هایی که از تئوری محدب استفاده می‌کند در [۱۳] مطرح شده است. در این مقاله نویسنده برای حذف لگاریتم از تابع هزینه تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی، تابع هزینه را با توجه به یکنوا بودن تابع لگاریتم ساده‌سازی کرده و سپس این مسئله را با  $SDP$  حل نموده است. در [۱۴] آقای واقفی و دیگران با اعمال سری تیلور به تابع هزینه و بازنویسی آن، آن را ساده‌سازی کرده‌اند و سپس تابع هزینه به دست آمده را با  $SDP$  حل کرده‌اند. تخمین‌گر ارائه شده در [۱۳] فقط در حالت توان ارسالی معلوم کار می‌کند اما تخمین‌گرهای [۱۴] و [۱۶] در حالت توان ارسالی نامعلوم نیز مکان هدف را محاسبه می‌کنند. دو تخمین‌گر اخیر به علت تخمین توان ارسالی پیچیدگی زیادی به سیستم تحمیل می‌کنند و در مورد [۱۶] این پیچیدگی به دو برابر می‌رسد. در [۱۱]، [۱۵] و [۱۸] از اندازه‌گیری‌های تفاضل توان سیگنال دریافتی  $DRSS^6$  استفاده شده است. در [۱۵] ابتدا مدل تفاضل

چکیده: برای انجام مکان‌یابی بر اساس تفاضل توان سیگنال دریافتی در شبکه حسگر بی‌سیم می‌بایست توان دریافتی آلوده به نویز را توسط تعدادی حسگر مرجع جمع‌آوری نمود. به دلیل مشخص بودن تابع چگالی احتمال نویز استفاده از تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی بهترین انتخاب خواهد بود. تابع هزینه این تخمین‌گر غیر خطی و غیر محدب است و تا کنون برای آن جواب تحلیلی ارائه نشده است. یکی از راه‌حل‌ها برای غلبه بر این مشکل استفاده از روش‌های بهینه‌سازی محدب است. در این مقاله برای غلبه بر این مشکل تابع هزینه تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی را به دست می‌آوریم و آن را با روش آزادسازی نیمه‌معیین حل می‌کنیم. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نشان می‌دهد در شرایطی که حسگرهای شبکه به صورت غیر منظم در محیط پخش شوند تخمین‌گر جدید نسبت به سایر تخمین‌گرها جذر متوسط انرژی خطای مکان‌یابی کمتری را نشان می‌دهد، یعنی دقت مکان‌یابی بالاتری دارد. در روش جدید دقت مکان‌یابی نسبت به سایر روش‌ها تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد و پیچیدگی محاسباتی آن نیز نسبت به روش‌های بهینه‌سازی محدب ۳۰٪ کمتر است.

کلیدواژه: بهینه‌سازی محدب، تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی، تفاضل توان سیگنال دریافتی، شبکه حسگر بی‌سیم، مکان‌یابی متمرکز، مکان‌یابی هدف.

## ۱- مقدمه

امروزه تحقیقات بسیاری در زمینه مکان‌یابی در شبکه حسگر بی‌سیم انجام می‌شود و از جمله کاربردهای این شبکه کنترل، رصد و ره‌گیری در هوا، زمین و آب‌های عمیق است [۱]. سامانه‌های مکان‌یابی از روش‌های زاویه انتشار سیگنال [۲]، زمان انتشار سیگنال [۳]، اختلاف زمان انتشار سیگنال [۴]، توان سیگنال دریافتی [۵] یا ترکیب این روش‌ها [۶] استفاده می‌کنند. استفاده از سه روش اول اگرچه دقت بالایی دارد ولی به دلیل پیچیدگی زیاد در روش‌های وابسته به زمان و گران بودن آنتن در روش وابسته به زاویه با مشکلاتی مواجه است. روش توان سیگنال دریافتی به دلیل استفاده از آنتن‌ها و سخت‌افزارهای ساده‌تر به عنوان یک زمینه جذاب برای پژوهشگران مطرح است.

هنگام استفاده از مشاهدات توان سیگنال دریافتی تخمین‌گرهای متعددی می‌توانند جهت استخراج پارامترهای موقعیت هدف به کار گرفته شوند که از جمله محبوب‌ترین آنها تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی است [۷] تا [۹] و این به دلیل آن است که دقت این تخمین‌گر با تعداد نمونه

این مقاله در تاریخ ۲۷ دی ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۸ مرداد ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

حسن نظری (نویسنده مسئول)، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، (email: hanazari@ihu.ac.ir).  
میثم رئیس دانایی، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، (email: mrdanaee@ihu.ac.ir).  
مرتضی سپهوند، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، (email: msephvnd@ihu.ac.ir).

1. Cramer Rao Lower Bound
2. Maximum Likelihood
3. Second Order Cone Programming
4. Semidefinite Programming
5. Received Signal Strength
6. Differential Received Signal Strength

$$L_i = L_1 + \gamma \log_{10} \frac{\|\theta - s_i\|}{d} + n_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

که  $L_i$  تلف دریافتی در فاصله یک متری از هدف است و  $L_1$  تلف دریافتی در گره مرجع  $i$  ام است و به صورت  $L_i = 10 \log_{10}(P_T/P_i)$  تعریف می‌شود که  $P_T$  توان ارسالی هدف و  $P_i$  توان دریافتی در گره مرجع  $i$  ام است. همچنین  $P$  توان دریافتی در فاصله یک متری از هدف است. ضریب تلف مسیر است و با توجه به نوع محیط بین ۱/۶ تا ۶ است.  $n_i$  یک متغیر تصادفی گوسی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_i^2$  است و به صورت  $n_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$  نمایش داده می‌شود. از وجود همبستگی بین  $n_i$  ها صرف نظر می‌شود و آنها به صورت نویز مستقل و با توزیع مشابه در نظر گرفته می‌شوند. تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی برای مدل ارائه‌شده در (۱) از حل تابع هزینه زیر به دست می‌آید [۱۰]

$$\hat{\theta}_{ML} = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (L_i - L_1 - \gamma \log_{10} \frac{\|\theta - s_i\|}{d})^2 \quad (2)$$

تابع هزینه در (۲) غیر خطی و غیر محدب است و حل تحلیلی برای آن وجود ندارد. تابع هزینه در (۲) به مقدار  $L_1$  وابسته است و در صورتی که توان ارسالی هدف در دسترس نباشد قابل استفاده نیست. در ادامه از اندازه‌گیری‌های تفاضل توان سیگنال دریافتی استفاده می‌کنیم که در این روش نیازی به اطلاع از توان ارسالی نیست [۱۱]، [۱۵] و [۱۸].

برای استفاده از روش تفاضل توان سیگنال دریافتی در شبکه حسگر بی‌سیم، یکی از گره‌های مرجع به عنوان گره مرجع اصلی انتخاب می‌شود. در این مقاله گره با توان دریافتی بیشتر به عنوان گره شماره یک (مرجع اصلی) انتخاب شده است [۱۵]. برای محاسبه تفاضل توان سیگنال دریافتی باید تفاضل دو اندازه‌گیری توان سیگنال دریافتی به صورت زیر در نظر گرفته شود

$$L_{i,j} = L_i - L_j, \quad i = 2, \dots, N \quad (3)$$

که  $L_{i,j}$  تفاضل دو تلف را نشان می‌دهد. همان طور که در (۳) مشاهده می‌شود  $L_i$  از معادلات حذف شده و در نتیجه دقت مکان‌یابی به علت اطلاع غیر دقیق از مقدار  $L_1$ ، متأثر نخواهد شد. محوشدگی لگ- نرمال به صورت  $n_{i,j} = n_i - n_j$  خواهد بود و بنابراین مدل انتشار برای تفاضل تلف مسیر به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]، [۱۵] و [۱۸]

$$L_{i,j} = \gamma \log_{10} \frac{\|\theta - s_i\|}{\|\theta - s_j\|} + n_{i,j} \quad (4)$$

در (۴) خطا برابر  $n_{i,j}$  تعریف می‌شود و همچنین بردار خطا به صورت  $n'$  نامیده می‌شود و دارای توزیع زیر خواهد بود

$$n' \sim \mathcal{N}(0, Q) \quad (5)$$

که ماتریس کوواریانس بردار خطا برابر است با

$$[Q]_{ij} = \begin{cases} 2\sigma^2 & \text{for } i=j \\ \sigma^2 & \text{for } i \neq j \end{cases}, \quad i, j = 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

بردار  $z$  به شکل زیر تعریف می‌شود

$$z = [z_1, z_2, \dots, z_N]^T \quad (7)$$

و درایه‌های آن برابر است با

$$z_i = \gamma \log_{10} \frac{\|\theta - s_i\|}{\|\theta - s_1\|}, \quad i = 2, \dots, N \quad (8)$$

توان سیگنال دریافتی، سفید شده و پس از آن با تبدیل لگاریتم به نمایی و اعمال سری تیلور به آن، مدل خطی ارائه شده و تابع هزینه متناظر با آن به دست آمده و با روش SDP حل شده است. اما در روش جدید تابع هزینه در حالت کلی مسئله، به صورت برداری حل می‌شود و به جز اعمال سری تیلور، هیچ گونه تغییر اضافی در تابع هزینه اصلی ایجاد نشده است. روش دیگری که برای تقریب تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی استفاده می‌شود بهره‌گیری از تخمین‌گر خطی است [۷]، [۱۵] و [۱۹] تا [۲۱]. در [۷]، [۱۵] و [۱۹] تا [۲۱] مدل توان سیگنال دریافتی یا تفاضل توان سیگنال دریافتی با روش کمترین مربعات خطی یا BLUE حل شده است. به دلیل این که مدل مسئله مکان‌یابی در (۲) یا (۱۱) دارای ترم درجه دو است، برای ارائه مدل خطی می‌بایست ترم درجه دو با متغیر خطی جایگزین شود و این ساده‌سازی، خطا را افزایش می‌دهد. تخمین‌گرهای خطی فرم بسته ارائه می‌دهند و از نظر محاسباتی سبک هستند اما دقت این تخمین‌گرها معمولاً از تخمین‌گرهای محدب پایین‌تر است. به عنوان نمونه در [۱۵] دو تخمین‌گر خطی و دو تخمین‌گر محدب ارائه شده است ولی به دلیل ساده‌سازی ذکر شده خطای تخمین‌گرهای خطی بیشتر از سایر تخمین‌گرها است.

در این مقاله، مسئله مکان‌یابی در حالت عدم اطلاع از توان ارسالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی برای مسئله مکان‌یابی مطرح می‌شود. سپس تابع هزینه متناظر با تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی به دست می‌آید و این تابع با روش آزادسازی نیمه‌معین جدید به صورت برداری حل می‌شود. دقت بالا و زمان اجرای کم این روش در مقایسه با سایر روش‌های محدب با نتایج تجربی اثبات شده است. البته در عمل ضریب تلف مسیر در محیط‌های مختلف ثابت نیست و از این رو باید تخمین زده شود [۷]، [۱۴]، [۱۵] و [۲۲] تا [۲۴]. این مقاله به تخمین ضریب تلف مسیر و روش‌های تخمین آن نمی‌پردازد و در قسمت شبیه‌سازی فرض شده که اطلاع دقیقی از ضریب تلف مسیر وجود دارد.

ادامه این مقاله به صورت زیر است: در بخش ۲ بیان مسئله مکان‌یابی بر اساس اندازه‌گیری‌های تفاضل توان سیگنال دریافتی ارائه شده است. در بخش ۳ تخمین‌گر محدب جدید در حالت توان ارسالی نامعلوم به دست آمده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی‌ها تحلیل شده‌اند و پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌ها مقایسه شده است. در بخش پایانی نتیجه مقاله مطرح شده و همچنین در این مقاله از شیوه نوشتن زیر استفاده شده است:

- ماتریس‌ها و بردارها به ترتیب با حروف بزرگ درشت و حروف کوچک درشت نشان داده شده‌اند و بردارها به صورت بردار ستونی در نظر گرفته شده‌اند.
- عملگر  $(.)^T$  برای ترانزپوز یک بردار یا ماتریس به کار می‌رود.
- عملگر  $\|.\|$  به معنای نرم اقلیدسی یک بردار است.
- عملگر  $\|.\|_1$  به معنای نرم یکم یک بردار است.
- عملگر  $tr(.)$  به معنای trace یک بردار است.

## ۲- بیان مسئله

یک شبکه حسگر بی‌سیم با  $N$  گره مرجع و یک گره هدف فرض می‌شود. موقعیت گره‌های مرجع از قبل معلوم هستند، در حالی که موقعیت گره هدف، نامعلوم و هدف محاسبه مکان آن است. موقعیت گره‌های مرجع و هدف به ترتیب به فرم  $s_i = [x_i, y_i]^T$  و  $\theta = [x, y]^T$  به ازای  $i = 1, \dots, N$  نمایش داده می‌شوند.  $L_i$  تلف مسیر دریافتی (در dB) در گره  $i$  ام است و بر اساس مدل انتشار بی‌سیم [۲۵]، در محوشدگی سایه با توزیع لگ نرمال به صورت زیر بیان می‌شود

$$\left\| \frac{\theta - (\beta_i s_i - s_i)}{\beta_i - 1} \right\|^r - \left( \frac{\beta_i}{\beta_i - 1} \right)^r \|s_i - s_i\|^r = -\frac{\ln 10}{\delta \gamma} \|\theta - s_i\|^r n_{i,\gamma} \quad (17)$$

حال متغیرهای جدید به شکل زیر تعریف می‌شود

$$\beta_i = 10^{-\frac{L_{i,\gamma}}{\delta \gamma}}, \quad \beta_i \neq 1 \quad (18)$$

$$u_i = \frac{\beta_i s_i - s_i}{\beta_i - 1} \quad (19)$$

$$k_i = \frac{\beta_i}{(\beta_i - 1)^r} \|s_i - s_i\|^r \quad (20)$$

$$k = [k_1 \dots k_N]^T \quad (21)$$

$$d_i = \|\theta - u_i\|^r \quad (22)$$

$$d = [d_1 \dots d_N]^T \quad (23)$$

در نتیجه با توجه به فصل هشتم از [۱۰]، تابع هزینه به شکل کمترین مربعات غیر خطی به صورت زیر به دست می‌آید

$$\hat{\theta}_{ML} = \arg \min_{\theta} (d - k)^T Q^{-1} (d - k) \quad (24)$$

تابع هزینه در (۲۴) غیر محدب و غیر خطی است. این تابع هزینه می‌تواند با استفاده از روش آزادسازی به مسئله بهینه‌سازی SDP [۲۷] و [۲۸] تبدیل شود. تابع هزینه روش جدید برابر است با

$$\text{tr}\{Q^{-1}(d - k)(d - k)^T\} \quad (25)$$

پس از ضرب بردارها، حاصل به صورت زیر به دست می‌آید

$$\text{tr}\{Q^{-1}(D - 2dk^T + kk^T)\} \quad (26)$$

که در (۲۶)  $D = dd^T$  است. جمله سوم مثبت و ثابت است و در بهینه‌سازی تأثیری ندارد، بنابراین از تابع هزینه حذف می‌شود و تابع هزینه نهایی به شکل زیر خواهد بود

$$\text{tr}\{Q^{-1}(D - 2dk^T)\} \quad (27)$$

حال برای مینیمم کردن تابع هزینه (۲۷)، تخمین‌گر محدب SDP با یک قید تساوی و دو قید نامساوی شامل (۲۸) تا (۳۱) پیشنهاد می‌شود

$$\arg \min_{\theta, v, d, D} \text{tr}\{Q^{-1}(D - 2dk^T)\} \quad (28)$$

s.t. با توجه به

$$[D]_{ii} = \begin{bmatrix} u_i \\ -1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_r & \theta \\ \theta^T & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ -1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} I_r & \theta \\ \theta^T & v \end{bmatrix} \geq \star_r \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} D & d \\ d^T & v \end{bmatrix} \geq \star_N \quad (31)$$

این تخمین‌گر با روش SDP به دست آمده و بدون اطلاع از توان ارسال کار می‌کند، از این رو در ادامه، این روش با نام SDP-UT اشاره خواهد شد. در روش SDP تابع هزینه می‌بایست به صورت خطی بیان شود اما دو متغیر  $D$  و  $d$  در تابع هزینه (۲۸)، غیر خطی هستند و از این رو در مسئله فوق دو متغیر کمکی به صورت زیر تعریف شده است

در (۴) بردار تفاضل تلف‌های اندازه‌گیری شده،  $L'$  نامیده می‌شود و تابع احتمال برای آن به صورت زیر است

$$p(L'; \theta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\det Q}} \exp\left[-\frac{1}{2}(L' - z(\theta))^T Q^{-1}(L' - z(\theta))\right] \quad (9)$$

و بنابراین لگاریتم تابع احتمال برابر است با

$$f(L'; \theta) = \ln \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\det Q}} - \frac{1}{2}(L' - z(\theta))^T Q^{-1}(L' - z(\theta)) \quad (10)$$

باید توجه داشت که جمله اول در (۱۰) تابعی از  $\theta$  نیست و در نتیجه برای حداکثر کردن احتمال در (۱۰) کافی است تابع هزینه کمترین مربعات غیر خطی زیر محاسبه شود [۱۴]

$$\hat{\theta}_{ML} = \arg \min_{\theta} (L' - z(\theta))^T Q^{-1}(L' - z(\theta)) \quad (11)$$

این تابع هزینه، غیر خطی و غیر محدب است. تا کنون برای حل این تابع هزینه، راه‌حل تحلیلی ارائه نشده است. در ادامه روش محدب جدید برای اندازه‌گیری تفاضل توان سیگنال دریافتی در حالت عدم اطلاع از توان ارسالی بیان می‌شود.

### ۳- تخمین‌گر محدب جدید

در این بخش تخمین‌گر محدب جدید در حالت عدم اطلاع از توان ارسالی ارائه می‌شود. در ابتدا تابع هزینه را به دست می‌آوریم و یک تخمین‌گر محدب برای حل آن معرفی می‌کنیم. عبارت  $L' - z(\theta)$  در (۱۱) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد

$$\log_{10} \frac{\|\theta - s_i\|^r}{\|\theta - s_i\|^r} = \frac{L_{i,\gamma} - n_{i,\gamma}}{\delta \gamma} \quad (12)$$

برای حذف لگاریتم، از طرفین توان ۱۰ گرفته می‌شود و سپس دو طرف معادله بر  $10^{L_{i,\gamma}/\delta \gamma}$  تقسیم می‌شود

$$10^{-\frac{L_{i,\gamma}}{\delta \gamma}} \frac{\|\theta - s_i\|^r}{\|\theta - s_i\|^r} = 10^{-\frac{n_{i,\gamma}}{\delta \gamma}} \quad (13)$$

با اعمال سری تیلور مرتبه اول در سمت راست (۱۳) خواهیم داشت

$$10^{-\frac{L_{i,\gamma}}{\delta \gamma}} \frac{\|\theta - s_i\|^r}{\|\theta - s_i\|^r} = 1 - \frac{\ln 10}{\delta \gamma} n_{i,\gamma} \quad (14)$$

از سایر جملات سری تیلور صرف‌نظر می‌شود. دو طرف (۱۴) را در  $\|\theta - s_i\|^r$  ضرب می‌کنیم

$$10^{-\frac{L_{i,\gamma}}{\delta \gamma}} \|\theta - s_i\|^r = \|\theta - s_i\|^r \left(1 - \frac{\ln 10}{\delta \gamma} n_{i,\gamma}\right) \quad (15)$$

با انتقال  $\|\theta - s_i\|^r$  به سمت چپ (۱۵)، رابطه زیر به دست می‌آید

$$10^{-\frac{L_{i,\gamma}}{\delta \gamma}} \|\theta - s_i\|^r - \|\theta - s_i\|^r = -\frac{\ln 10}{\delta \gamma} \|\theta - s_i\|^r n_{i,\gamma} \quad (16)$$

با بسط  $\|\theta - s_i\|^r$  و  $\|\theta - s_i\|^r$  و بازنویسی مشابه آنچه در [۲۶] انجام شده است می‌توان نوشت

جدول ۱: متوسط زمان اجرای تخمین‌گر در حالت توان ارسال نامعلوم: متوسط زمان اجرای تخمین‌گرهای مقایسه شده با استفاده از MATLAB ۲۰۱۴a به روی سیستم WIN۱۰ با پردازنده ۲٫۳ GHZ INTEL CORE i۵ و حافظه ۶ GB با پارامترهای  $N = ۱۰$ ،  $d. = ۱m$ ،  $PLE = ۳$  و  $۱۰۰$  بار تکرار مونت کارلو مبتنی بر توپولوژی غیر منظم.

تخمین‌گر	ارجاع	زمان (s)
SDP-URSS	تخمین‌گر SDP ارائه شده در [۱۴]	۰٫۴۵۱۷
SDP-UT	تخمین‌گر SDP پیشنهاد شده در (۲۸) تا (۳۱)	۰٫۳۰۹۶
A-BLUE	تخمین‌گر خطی ارائه شده در [۱۵]	۰٫۰۰۱۷

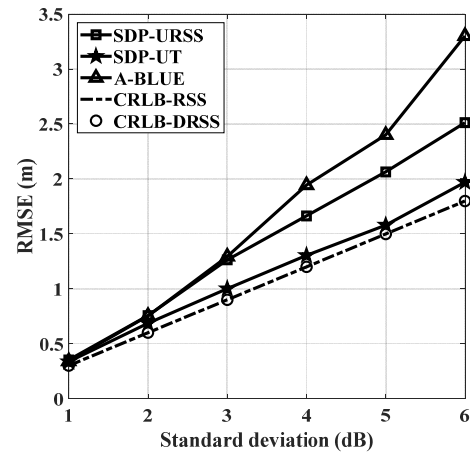
محاسباتی تخمین‌گر بیشتر باشد زمان پیدا کردن تخمین نقطه هدف بیشتر است. این موضوع سبب می‌شود فضای بیشتری از پردازنده اشغال شود و در نتیجه مصرف انرژی افزایش می‌یابد.

#### ۴-۱ مقایسه جذر متوسط انرژی خطای تخمین‌گرها

در شکل ۱ جذر متوسط انرژی خطای مکان‌یابی در برابر انحراف محوشدگی سایه برای تخمین‌گرهای مختلف در حالت توان ارسال نامعلوم با هم مقایسه شده است. تخمین‌گر SDP-URSS [۱۴] بر اساس اندازه‌گیری‌های RSS است ولی روش A-BLUE [۱۵] بر پایه اندازه‌گیری‌های DRSS کار می‌کند، بنابراین تخمین‌گر مبتنی بر اندازه‌گیری‌های RSS باید توان ارسال و مکان هدف را هم‌زمان تخمین بزند در حالی که تخمین‌گرهای مبتنی بر اندازه‌گیری DRSS فقط مکان هدف را تخمین می‌زنند. البته طبق تعریف برای اجرای مناسب روش‌های مبتنی بر DRSS مانند A-BLUE و SDP-UT باید نزدیک‌ترین گره به هدف به عنوان گره مرجع اصلی در نظر گرفته شود، در غیر این صورت خطای مکان‌یابی افزایش می‌یابد. برای این منظور حسگر متناظر با بیشترین توان دریافتی به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود چون معمولاً حسگر متناظر با بیشترین توان دریافتی به هدف نزدیک‌تر است. همچنین در شکل ۱ دو CRLB رسم شده‌اند که مربوط به اندازه‌گیری‌های RSS و DRSS هستند و همان‌طور که مشخص است معیار CRLB-RSS [۱۴] و CRLB-DRSS [۱۵] عملکرد مشابهی را نشان می‌دهند. در واقع معیار CRLB یک باند پایین ارائه می‌کند و جذر متوسط انرژی خطای تخمین‌گرهای بدون بایاس همواره از این معیار بیشتر است. در شکل ۱ همه تخمین‌گرها همواره خطایی بیشتر از CRLB-RSS دارند. بیشترین خطا برای روش A-BLUE است (البته به جز در انحراف معیار ۱ دسی‌بل) که این نکته قابل انتظار بود چون خطای تخمین‌گرهای خطی معمولاً بالا است. در انحراف معیارهای بزرگ‌تر از ۲ دسی‌بل خطای تخمین‌گر SDP-URSS کمتر از تخمین‌گر A-BLUE است. کمترین خطا مربوط به تخمین‌گر پیشنهاد شده SDP-UT است و تفاوت بین عملکرد تخمین‌گر جدید با سایر تخمین‌گرها با افزایش انحراف معیار محوشدگی سایه افزایش می‌یابد.

#### ۴-۲ مقایسه زمان اجرای تخمین‌گرها

مقایسه زمان مصرف شده برای اجرای هر کدام از روش‌های SDP-URSS، A-BLUE و SDP-UT متناظر با شکل ۱، در جدول ۱ آمده است. تخمین‌گر A-BLUE مبتنی بر اندازه‌گیری‌های DRSS است و بنابراین به توان ارسال هدف وابسته نیست و فقط مکان هدف را تخمین می‌زند. این تخمین‌گر به دلیل استفاده از روش خطی سرعت اجرای بالایی دارد. با بررسی زمان الگوریتم‌ها مشخص می‌شود تخمین‌گر محدب جدید بیشتر از ۳۰٪ سریع‌تر از تخمین‌گر مبتنی بر تئوری محدب یعنی SDP-URSS است.



شکل ۱: RMSE تخمین مکان در حالت توان ارسال نامعلوم: نتایج شبیه‌سازی مقایسه RMSE تخمین مکان در برابر انحراف استاندارد محوشدگی سایه تخمین‌گر SDP-UT با سایر روش‌ها با پارامترهای  $N = ۱۰$ ،  $d. = ۱m$ ،  $PLE = ۳$  و  $۱۰۰$  بار تکرار مونت کارلو مبتنی بر توپولوژی غیر منظم.

$$v = \theta^T \theta \quad (32)$$

$$D = dd^T \quad (33)$$

توجه به این نکته حایز اهمیت است که (۳۲) و (۳۳) به ترتیب به جای (۳۰) و (۳۱) قرار داده شده‌اند تا تابع هزینه غیر محدب (۲۷) را به صورت تخمین‌گر محدب (۲۸) تا (۳۱) آزادسازی نمایند. برای اجرای این تخمین‌گر از برنامه MATLAB ۲۰۱۴a، جعبه‌ابزار CVX [۱۷] و حل‌کننده SDPT3 استفاده شده است.

#### ۴-۳ شبیه‌سازی تخمین‌گرها

برای شبیه‌سازی تعداد ۱۰ عدد گره مرجع با توپولوژی غیر منظم در یک محیط با ابعاد ۲۰×۲۰ (متر) توزیع شده‌اند و یک هدف با مکان نامعلوم وجود دارد. هدف در نقطه (۸٫۴، ۱۱٫۸) است و گره‌های مرجع به صورت غیر منظم در نقاط (۹٫۷، ۹٫۸)، (۴، ۸)، (۱۲٫۶، ۴٫۴)، (۱٫۷، ۱٫۴)، (۱٫۱، ۶٫۲)، (۱٫۲، ۱۶٫۴)، (۱۹٫۱، ۱۳٫۲)، (۱۳٫۷، ۱۸)، (۸٫۳، ۱۵٫۳) و (۷٫۷، ۱۸٫۲) قرار دارند. تخمین‌گرها با استفاده از MATLAB ۲۰۱۴a به روی سیستم WIN۱۰ با پردازنده ۲٫۳ GHz Intel Core i۵ و حافظه ۶ GB اجرا شده‌اند. برای اجرای روش‌های SDP-URSS [۱۴] و SDP-UT از جعبه ابزار CVX [۱۷] و حل‌کننده SDPT3 استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های توان سیگنال دریافتی بر اساس (۱) و اندازه‌گیری‌های تفاضل توان سیگنال دریافتی بر اساس (۴) تولید می‌شوند. مقدار تلف اولیه  $L = ۴۰$  dB در نظر گرفته شده است [۱۴] و [۱۳]. از آنجا که عملکرد الگوریتم‌های مکان‌یابی به نوبت وابسته است، از تکرارهای مستقل مونت کارلو برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی استفاده شده است. معیار ارزیابی عملکرد تخمین‌گرها، جذر متوسط انرژی خطا است [۲۳] و برابر است با

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{M_c} \frac{\|\theta - \hat{\theta}_i\|^2}{M_c}} \quad (34)$$

که در آن  $\theta$  مختصات درست نقطه هدف و  $\hat{\theta}_i$  تخمین مکان هدف است که در تکرار مونت کارلوی  $i$ ام به دست آمده است. همچنین  $M_c = ۱۰۰$  تعداد تکرار مونت کارلو را نشان می‌دهد. معیار دیگری که برای ارزیابی یک تخمین‌گر به کار می‌رود هزینه پیاده‌سازی تخمین‌گر است. معمولاً هزینه پیاده‌سازی با دقت مکان‌یابی نسبت معکوس دارد، هرچه پیچیدگی

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مکان‌یابی بر پایه تفاضل توان سیگنال دریافتی در شبکه حسگر بی‌سیم در حالت عدم اطلاع از توان ارسالی مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی که تابعی غیر خطی و غیر محدب است تشکیل شده است. حل این تابع هزینه بسیار دشوار است و تا کنون برای آن جواب تحلیلی ارائه نشده است. نوآوری این مقاله استفاده از روش بهینه‌سازی محدب جدید برای حل تابع هزینه است و برای این کار روش آزادسازی نیمه‌معین به کار گرفته شده است. این روش بر اساس تفاضل توان سیگنال دریافتی کار می‌کند و عدم اطمینان از مقدار توان ارسالی روی دقت مکان‌یابی تأثیری ندارد. همچنین در روش جدید تابع هزینه به صورت برداری نوشته شده و برخلاف روش‌های موجود، ماتریس کوواریانس داده‌ها در رابطه آن وجود دارد که این کار سبب می‌شود در صورت وجود داده‌های همبسته، خطای مکان‌یابی کاهش یابد. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نشان می‌دهد که تخمین‌گر جدید نسبت به سایر تخمین‌گرها جذر متوسط انرژی خطای مکان‌یابی کمتری دارد، یعنی از دقت مکان‌یابی بالاتری برخوردار است. با توجه به شکل ۱ در روش جدید دقت مکان‌یابی نسبت به روش محدب و خطی موجود به ترتیب تا ۲۰٪ و ۴۲٪ افزایش می‌یابد و پیچیدگی محاسباتی آن نیز نسبت به دیگر روش بهینه‌سازی محدب ۳۰٪ کمتر است.

## مراجع

- noncooperative and cooperative schemes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 3, pp. 1307-1318, Mar. 2010.
- [14] R. M. Vaghefi, M. R. Gholami, R. M. Buehrer, and E. G. Strom, "Cooperative received signal strength-based sensor localization with unknown transmit powers," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 6, pp. 1389-1403, Mar. 2013.
- [15] Y. Hu and G. Leus, "Robust differential received signal strength-based localization," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 12, pp. 3261-3276, Jun. 2017.
- [16] S. Tomic, M. Beko, R. Dinis, and V. Lipovac, "RSS-based localization in wireless sensor networks using SOCP relaxation," *IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC'13*, pp. 749-753, Darmstadt, Germany, 16-19 Jun. 2013.
- [17] CVX Research, Inc., *CVX: MATLAB® Software for Disciplined Convex Programming* [Online]. Available: <http://cvxr.com/cvx/>. [Accessed: 17-Dec-2010].
- [18] J. H. Lee and R. M. Buehrer, "Location estimation using differential RSS with spatially correlated shadowing," in *Proc. IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, pp. 4613-4618, Honolulu, HI, USA, 30 Nov.-4 Dec. 2009.
- [19] N. Salman, Y. J. Guo, A. H. Kemp, and M. Ghogho, "Analysis of linear least square solution for RSS based localization," in *Proc. Int. Symp. on Communications and Information Technologies, ISCIT'12*, pp. 1051-1054, Gold Coast, QLD, Australia, 2-5 Oct. 2012.
- [20] M. R. Gholami, R. M. Vaghefi, and E. G. Strom, "RSS-based sensor localization in the presence of unknown channel parameters," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 15, pp. 3752-3759, Aug. 2013.
- [21] S. Tomic, M. Beko, R. Dinis, M. Tuba, and N. Bacanin, "Bayesian methodology for target tracking using combined RSS and AoA measurements," *Phys. Commun.*, vol. 25, no. 1, pp. 158-166, Dec. 2017.
- [22] N. Patwari, et al., "Locating the nodes," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 54-69, Jul. 2005.
- [23] S. Tomic, M. Beko, and R. Dinis, "RSS-based localization in wireless sensor networks using convex relaxation: noncooperative and cooperative schemes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 5, pp. 2037-2050, May 2015.
- [24] G. Rahimi, M. R. Danaee, and S. Bayat, "A generalized total least squares algorithm for RSS-based localization with unknown path-loss model parameters," in *Proc. 24th Iran. Conf. Elec. Eng. ICEE'16*, pp. 521-524, Shiraz, Iran, 10-12 May 2016.
- [25] T. S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, vol. 2, Prentice Hall PTR New Jersey, 1996.
- [26] Z. Li, X. Zhong, and J. Wei, "A novel geometry-based model for localization based on received signal strength," in *Proc. IEEE 87th Vehicular Technology Conf., VTC Spring'18*, 5 pp., Porto, Portugal, 3-6 Jun. 2018.
- [27] R. M. Vaghefi and R. M. Buehrer, "Received signal strength-based sensor localization in spatially correlated shadowing," in *Proc. IEEE ICASSP'13*, pp. 4076-4080, Vancouver, BC, Canada, 26-31 May 2013.
- [28] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.
- [1] N. Patwari, *Location Estimation in Sensor Networks*, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 2005.
- [2] X. Fang and J. Li, "Frame theory for optimal sensor augmentation problem of AOA localization," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 25, no. 9, pp. 1310-1314, Sept. 2018.
- [3] Y. Kang, Q. Wang, J. Wang, and R. Chen, "A high-accuracy TOA-based localization method without time synchronization in 3D space," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 15, no. 1, pp. 173-182, Jan. 2019.
- [4] S. Salari, F. Chan, Y. T. Chan, and W. Read, "TDOA estimation with compressive sensing measurements and hadamard matrix," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 54, no. 6, pp. 3137-3142, Dec. 2018.
- [5] X. Tian, et al., "Improve accuracy of fingerprinting localization with temporal correlation of the RSS," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 1, pp. 113-126, Jan. 2018.
- [6] Y. Y. Li, G. Q. Qi, and A. D. Sheng, "Performance metric on the best achievable accuracy for hybrid TOA/AOA target localization," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 1474-1477, Jul. 2018.
- [7] R. Sari and H. Zayyani, "RSS localization using unknown statistical path loss exponent model," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 1830-1833, Sep. 2018.
- [8] C. Li, Y. Li, Z. Tian, S. L. Weekes, and K. Pahlavan, "Design and performance evaluation of a localization system to locate unwanted drones by using wireless signals," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics, ICCE'16*, 6 pp., Las Vegas, NV, USA, 12-14 Jan. 2018.
- [9] S. Tomic, M. Beko, M. Tuba, and V. M. F. Correia, "Target localization in NLOS environments using RSS and TOA measurements," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 1062-1065, Dec. 2018.
- [10] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing, volume i: Estimation Theory*, PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [11] H. Lohrasbipeydeh, T. A. Gulliver, and H. Amindavar, "Unknown transmit power RSSD based source localization with sensor position uncertainty," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 63, no. 5, pp. 1784-1797, May 2015.
- [12] A. Beck, P. Stoica, and J. Li, "Exact and approximate solutions of source localization problems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 5, pp. 1770-1778, May 2008.
- [13] R. W. Ouyang, A. K. S. Wong, and C. T. Lea, "Received signal strength-based wireless localization via semidefinite programming:

**حسن نظری** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش مخابرات به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۷ در دانشگاه جامع امام حسین (ع) به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، نظریه تخمین، بهینه‌سازی محدب، پردازش آماری سیگنال، مکان‌یابی و سیستم‌های غیرخطی.

**میشم رئیس دانایی** مدرک کارشناسی ارشد و دکترای خود را در مهندسی مخابرات به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود. ایشان هم اکنون استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع) می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل مخابرات بی‌سیم، فرآیندهای تصادفی و نظریه تخمین است.

**مرتضی سپهوند** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق با گرایش الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۱ و ۱۳۹۷ در دانشگاه‌های جامع امام حسین (ع) و صنعتی امیر کبیر به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدارات فرکانس رادیویی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم و تئوری تخمین.