

## سنجش طیف توزیع شده با تهیه نقشه‌های جغرافیایی رادیویی در شبکه‌های رادیوشناختی

نعمت‌اله عزتی<sup>۱</sup>، حسن طاهری‌قزوینی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲	گسترش روزافزون تجهیزات بی‌سیم و به تبع آن شبکه‌های بی‌سیم باعث افزایش ارزش فضای طیفی شده و تلاش‌های زیادی برای افزایش بهره‌وری طیفی در حال انجام است. در این مقاله، یک روش نوین برای افزایش بهره‌وری طیفی در شبکه‌های بی‌سیم توزیع شده ارائه شده است. در این روش با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن توزیع شده که در آن اصلاحاتی به منظور افزایش دقت تخمین آن صورت گرفته است موقعیت، سرعت حرکت و توان فرستنده‌های اولیه تخمین زده می‌شود و با استفاده از این آورده‌ها، انتخاب حفره‌های طیفی به بهترین شیوه انجام پذیرفته و موجب افزایش بهره‌وری طیفی نسبت به روش‌های سنجش طیف مستقیم و غیرمستقیم متمرکز فراهم می‌آید. تمامی نتایج این پژوهش با پیاده‌سازی‌های عملی و شبیه‌سازی‌های دقیق اثبات شده است. نوآوری‌های این پژوهش شامل معرفی و استفاده از یک مدل خطی برای تخمین موقعیت یک فرستنده با استفاده از توان دریافتی آن برای حالت‌های دید مستقیم و دید غیرمستقیم، ایجاد اصلاحاتی در الگوریتم فیلتر کالمن توزیع شده و به خصوص سنجش طیف توزیع شده است که باعث افزایش نرخ تبادلات گره‌های شبکه با یکدیگر و در نتیجه افزایش بهره‌وری طیف فرکانسی می‌گردد.
<b>واژگان کلیدی:</b> شبکه‌های رادیوشناختی، نقشه برداری محیط رادیویی، مسیریابی فیلتر کالمن توزیع شده، سنجش طیف توزیع شده.	

### ۱- مقدمه

رادیوشناختی<sup>۳</sup> (CR) یک تکنولوژی کارآمد برای جبران محدودیت‌های موجود در فضای طیفی به شمار می‌رود. این تکنولوژی علاوه بر افزایش بهره‌وری فضای طیفی در کاربردهای مربوط به رادیوهای هوشمند ضد جمینگ نیز مورد توجه است [۱ و ۲]. یک وسیله رادیوشناختی به منظور پشتیبانی از عملیات دسترسی پویا به طیف، نیاز به فرایندهای مختلفی همچون سنجش طیف، انتخاب طیف و مدیریت طیف دارد. در فرایند سنجش طیف، وسیله رادیوشناختی با استفاده از گیرنده‌های رادیویی اقدام به دریافت سیگنال و ارزیابی طیف‌های فرکانسی تعریف شده در آن وسیله می‌کند و در نهایت خروجی این بخش در ساده‌ترین حالت، یک بله و یا خیر به وجود فرستنده‌ای فعال در آن باند فرکانسی است [۳ و ۴]. برای سنجش طیف فرکانسی، تکنیک‌های مختلفی مانند

روش تشخیص انرژی، روش فیلترهای منطبق و روش تشخیص ویژگی‌های دوره‌ای معرفی شده است که روش تشخیص انرژی به دلایل سادگی پیاده‌سازی سخت‌افزاری، عدم نیاز به همدوسی و قابلیت تشخیص فرستنده‌های ناشناس، مقبولیت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر دارد [۵]. در این روش، کاربر CR با اندازه‌گیری توان متوسط دریافتی در باند فرکانسی مورد نظر و مقایسه آن با یک سطح آستانه، تصمیمی بهینه درباره حفره فرکانسی می‌گیرد.

معمولاً، در صورت امکان، برای به حداقل رساندن اثرات جانبی انتشار امواج الکترومغناطیسی همانند اثر سایه، محوشدگی و مسئله ترمینال‌های مخفی، تصمیم‌گیری وسیله CR بر اساس نمونه‌های جمع‌آوری شده از تعداد زیادی سنسور گیرنده رادیویی و به صورت مشارکتی انجام می‌پذیرد [۶].

<sup>3</sup> Cognitive Radio

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: htaheri@aut.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(برای فرستنده های متحرک) از باند فرکانسی آن فرستنده برای تبادلات محلی استفاده کند. برای ارزیابی این روش سنجش طیف آزمایشاتی ترتیب داده شد و نتایج حاصل از آن برای رسیدن به بهره‌وری طیفی مناسب با روش‌های مرسوم مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده مزیت روش جدید ارائه شده را به اثبات می‌رساند.

در ادامه این مقاله ابتدا توضیحاتی درباره موضوع نقشه‌برداری محیط رادیویی آورده می‌شود. در بخش ۳ مدل سیستم به کار گرفته شده در این پژوهش توضیح داده می‌شود. در این بخش ابتدا مدل انتشار موج استفاده شده را بیان می‌کنیم و در ادامه الگوریتم مکان‌یابی فیلتر کالمن را مرور کرده و سپس روش تخمین توزیع شده یک پارامتر را بیان می‌کنیم. در بخش ۴، به منظور اصلی این پژوهش یعنی سنجش طیف توزیع شده و پیاده‌سازی آن می‌پردازیم. در این بخش، ابتدا الگوریتم مسیریابی کالمن توزیع شده را روی یک شبکه سنسوری پیاده‌سازی کرده و نتایج آن را با الگوریتم کالمن متمرکز و یک الگوریتم دیگر مسیریابی مقایسه می‌کنیم. سپس، مسئله سنجش طیف را با دو روش تشخیص انرژی و روش غیرمستقیم یعنی استفاده از پارامترهای به دست آمده در تخمین مورد آزمایش قرار داده و بهره‌وری طیفی حاصل از هر دو روش را به دست آورده و با هم مقایسه می‌کنیم و مزیت روش مورد ادعا را به اثبات می‌رسانیم.

## ۲- نقشه‌برداری محیط رادیویی

سنجش و مدیریت طیف مغناطیسی قابل استفاده در تجهیزات CR، یک کار پیچیده و زمان‌بر است که راه‌اندازی آن در تجهیزات بی‌سیم که به دلیل مقتضیات بازار باید ارزان قیمت باشند، معمولاً مقرون به صرفه نیست. لذا راه‌کار متفاوتی برای این وسایل پیشنهاد و عملیاتی شده است. این راه‌کار، استفاده تجهیزات CR از نتایج سنجش طیف سایرین و یا سرویس دهنده‌هایی که به این منظور راه‌اندازی شده‌اند، می‌باشد. در این روش، مراکز سرویس دهنده این خدمات، نقشه‌های به‌روز و دقیقی از تابع چگالی طیف توان برای موقعیت‌های مختلف جغرافیائی و طیف‌های متنوع آماده کرده و اطلاعات آن را برای هر موقعیت و زمانی که نیاز باشد به کاربران خود ارائه می‌دهند. به این پایگاه داده‌ها علاوه بر اطلاعات تابع چگالی طیفی، گستره‌ای از سایر

این تجمیع توان‌های دریافتی سنسورها و گیرنده‌های CR در یک مرکز ادغام و تصمیم جمعی برای حضور و یا عدم حضور فرستنده رادیویی در باندهای مورد نظر هر چند موجب افزایش قابلیت اطمینان، حذف اثرات پدیده‌های محوشدگی و سایه و کاهش زمان تصمیم‌گیری می‌شود ولی در مقابل موجب عدم استفاده از تفاوت‌های مکانی در سنجش طیف می‌گردد. یعنی اگر فاصله سنسورها از یکدیگر نسبتاً زیاد باشد ممکن است در برخی از نواحی توان سیگنال دریافتی از فرستنده اولیه به قدری کم باشد که بتوان از آن باند فرکانسی برای تبادل‌های محلی تجهیزات CR استفاده کرد، ولی تصمیم جمعی مرکز ادغام موجب نادیده گرفتن این فرصت می‌گردد [۷]. برای مقابله با این وضعیت و افزایش بهره‌وری طیفی راه‌کار استفاده از مدل تصمیم‌گیری و سنجش طیف توزیع شده را می‌توان در نظر گرفت که در آن تصمیم وجود حفره‌های طیفی به صورت کاملاً توزیع شده و با استفاده از ارتباطات محلی انجام پذیرد [۸].

در مقاله [۸] برای پیاده‌سازی سنجش طیف توزیع شده، با ارائه الگوریتم‌های مناسب سعی شده است که توان طیفی دریافتی در گیرنده‌های CR به صورت توزیع شده تخمین زده شود. با این تخمین، گیرنده‌های CR به صورت محلی در باره وجود حفره‌های طیفی تصمیم می‌گیرند. این روش یک روند نقشه‌برداری جغرافیائی توان رادیویی<sup>۱</sup> (REM) توزیع شده و بدون استفاده از مدل‌های انتشار امواج است. ضعف عمده این روش به ادعان نویسندگان آن عدم دقت کافی نقشه‌های به دست آمده، به‌خصوص در نواحی با توان سیگنال دریافتی ضعیف است، در حالی که این نواحی بیشترین استفاده و حساسیت را در بحث سنجش طیف و تعیین حفره‌های فرکانسی دارند.

در این مقاله، سعی شده است یک روش نوین کاملاً توزیع شده برای تهیه نقشه‌های محیط رادیویی بر پایه مدل‌های انتشار امواج معتبر ارائه گردد. در این روش ابتدا به صورت توزیع شده محل فرستنده‌های رادیویی و توان آنها تخمین زده می‌شود و با استفاده از این اطلاعات هر وسیله CR می‌تواند توان متوسط دریافتی از آن فرستنده را در اطراف خود به دست آورد و در صورت کافی بودن فاصله و مدت زمان لازم برای رسیدن فرستنده به محدوده این گیرنده

<sup>۱</sup> Radio Environment Mapping

### ۳- مدل سیستم

#### ۳-۱- مدل انتشار امواج

یک مدل معتبر و ساده برای انتشار امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد و برای فرستنده گیرنده‌هایی که نسبت به یکدیگر دید مستقیم دارند، مدل log-normal است. بنا به این مدل افت توان دریافتی یک گیرنده در مقیاس لگاریتمی و در فواصل دور از فرستنده یک تابع تصادفی به صورت زیر است:

$$10\log_{p_r} = 10\log_{p_o} - 10\alpha\log\frac{d}{d_0} + \psi \quad (1)$$

در این رابطه  $p_o$  توان دریافتی از فرستنده در یک نقطه مانند  $d_0$  است (فاصله مرجع).  $d$  فاصله گیرنده با فرستنده بوده و  $\alpha$  نشان‌دهنده مرتبه افت مسیر است و  $\psi$  نیز در این رابطه یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال به صورت  $N(0, \delta^2)$  می‌باشد. این رابطه هر چند در سیستم‌هایی که دید مستقیمی بین فرستنده و گیرنده<sup>۲</sup> وجود دارد (LoS) هم‌خوانی خوبی با مشاهدات تجربی دارد ولی در سیستم‌های بدون دید مستقیم<sup>۳</sup> (NLS) که امروزه داری بیشترین کاربرد به خصوص در مناطق شهری هستند ضعیف عمل می‌کند. برای اصلاح این رابطه به نحوی که بتواند حداکثر انطباق را با سیستم‌های NLS داشته باشد فعالیت‌های زیادی در جریان است که در این بین، روش اضافه نمودن یک مقدار بایاس (به صورت یک مقدار تصادفی و یا ثابت) تا حد زیادی کارساز بوده و مورد نظر ما می‌باشد. در این مدل، گیرنده‌هایی که دید مستقیمی با فرستنده ندارند، توان دریافت شده از رابطه (۱) پیروی می‌کند با این تفاوت که متغیر تصادفی  $\psi$  در این حالت به صورت  $\psi \sim N(b, \delta^2)$  می‌باشد [۱۸].

در این رابطه  $b$  ثابتی است که مقدار افت توان دریافتی را به دلیل در دید نبودن فرستنده تعیین می‌کند. روابط حاکم بر توان یک سیگنال در یک باند فرکانسی و تابع چگالی طیف توان به صورت زیر است:

$$P_x = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(f) df = R_x(0) = E\{|x(t)|^2\} \quad (2)$$

در این رابطه دیده می‌شود توان سیگنال از روی امید ریاضی مربع سیگنال یا مقدار متوسط توان دریافتی به دست

اطلاعات مورد نیاز کاربران سیستم‌های بی‌سیم از قبیل موقعیت و مشخصات فنی فرستنده‌های اولیه موجود در منطقه، زمان‌بندی ساعات پخش و کار این فرستنده‌ها، مشخصات جغرافیائی منطقه در آن ذخیره می‌گردد، نقشه محیط رادیویی REM گفته می‌شود [۹ و ۱۰].

با توجه به تحقیقات انجام یافته، تاکنون دو روش برای آماده‌سازی این نقشه‌ها معرفی شده است. در روش اول که به روش مستقیم معروف است سرویس دهنده‌ها توسط گیرنده‌های رادیویی پخش شده در مناطق جغرافیائی مورد نظر اقدام به اندازه‌گیری چگالی طیف توان باندهای فرکانسی مختلف می‌کنند و سپس با روش‌های مختلف درون‌یابی مانند<sup>۱</sup> IDW و Kriging و یا D-LASSO اقدام به رسم و بدست آوردن تابع چگالی طیف توان در نقاط و زمان‌های مختلف می‌کنند [۱۱-۱۳]. از این روش‌ها در شاخه‌های دیگر علوم مهندسی نیز به منظور مدل‌سازی سیستم‌ها استفاده می‌گردد [۱۴-۱۶].

روش دوم در تهیه نقشه REM روش غیرمستقیم و مدل - پایه است. در این روش، سرویس‌دهنده‌های REM با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از طریق گیرنده‌ها و سنسورهای نصب شده در محیط و همچنین اطلاعات از پیش تعیین شده‌ای که از طریق مدارک مربوط به شرکت‌های پخش رادیو تلویزیونی و مراکز مخابراتی درباره موقعیت و توان رادیویی و مشخصات فرستنده‌ها و آنتن‌های آنها به دست می‌آوردند و با استفاده از مدل‌های معتبر انتشار امواج، توان رادیویی موجود در باندهای فرکانسی مختلف را تخمین می‌زنند و با توجه به برنامه کاری این فرستنده‌ها، باندهای فرکانسی خالی را در هر لحظه به اطلاع مشتریان خود می‌رسانند. این روش دقت بیشتری را از نظر تخمین توان نسبت به روش مستقیم دارد ولی ایراد این روش در نادیده گرفته شدن مشخصه‌های محیطی از قبیل ناهمواری‌ها و پستی و بلندی‌های طبیعی و یا ساخت بشر است که این کار باعث می‌گردد تابع توان محاسبه شده بیشتر از مقدار واقعی آن در پشت بلندی‌ها نشان داده شود و حفره‌های طیفی در آن مناطق کشف نگردند [۱۴]. در REM های پیاده‌سازی شده استفاده از هر دو روش گزارش شده است.

<sup>3</sup> Non Line of Sight

<sup>1</sup> Inverse Distance Weighted

<sup>2</sup> Line of Sight

بیشتر خواهد بود. الگوریتم بازگشتی است و با استفاده از ورودی های جدید و حالات محاسبه شده قبلی به صورت بلادرنگ اجرا می شود [۲۰].

فیلترهای کالمن بر اساس سیستم های خطی پویای گسسته، با متغیر مستقل زمانی هستند. آن ها بر اساس زنجیره مارکوف به کمک عملگرهای خطی ساخته شده اند و توسط نویز گوسی تحریک می شوند. حالت سیستم، توسط برداری از اعداد حقیقی بیان می شود. در هر افزایش زمانی که در بازه های گسسته صورت می گیرد، یک عملگر خطی روی حالت فعلی اعمال می شود تا حالت بعدی را با کمی نویز ایجاد کند و اختیاریاً در صورت شناخت روی کنترل کننده های سیستم برخی اطلاعات مرتبط را استخراج می کند. سپس عملگر خطی دیگر به همراه مقدار دیگری نویز، خروجی قابل مشاهده ای از این حالت نامشخص تولید می کند. برای تخمین حالت درونی یک فرایند که توسط مجموعه ای مشاهدات دارای نویز ارائه شده است باید آن را بر چارچوب فیلتر کالمن منطبق کنیم. به این منظور روابط ماتریسی زیر را ارائه می کنیم:

$$\begin{aligned} x_i &= F_i x_{i-1} + B_i u_i + \omega_i \\ z_i &= H_i x_i + v_i \end{aligned} \quad (۶)$$

در این روابط:

$P_i$ : بردار حالت با ماتریس کواریانس

$Z_i$ : بردار مشاهده

$u_i$ : بردار ورودی

$\omega_i$ : بردار نویز فرایند با ماتریس کواریانس  $Q_i$

$v_i$ : بردار نویز مشاهده با ماتریس کواریانس  $R_i$

$F_i$ : مدل انتقال حالت

$H_i$ : مدل مشاهده

$B_i$ : مدل ورودی - کنترل

می باشد.

فیلتر کالمن توسط یک معادله بیان می شود اما معمولاً آن را به دو بخش پیش بینی و به روزرسانی تفکیک می کنند. در گام پیش بینی با استفاده از تخمین حالت در بازه های زمانی پیشین، تخمینی برای حالت فعلی به دست می آید. این تخمین پیش بینی شده همان دانش پیشین است زیرا تنها به تخمین های قبلی وابسته است و هیچ مشاهده ای در حالت فعلی سیستم را در بر نمی گیرد. در گام به روزرسانی تخمین پیشین با مشاهده فعلی ترکیب می شود تا تخمینی

می آید. لذا، اگر توان را در واحد لگاریتمی دسیبل در نظر بگیریم بنا به رابطه (۱) در حالت های LoS و NLS توان متوسط سیگنال در یک باند فرکانسی به صورت زیر خواهد بود.

$$P_r = \begin{cases} P_0 - 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) & \text{LoS} \\ P_0 + b - 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) & \text{NLS} \end{cases} \quad (۳)$$

با در نظر گرفتن یک سیستم موقعیت یابی دو بعدی که در آن فاصله بین فرستنده موقعیت  $(x_t, y_t)$  و گیرنده موقعیت  $(x_r, y_r)$  به صورت  $d = \sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2}$  به دست می آید، می توان به روابطی برداری رسید. در این زمینه، اگر از توان دریافت شده در دو گیرنده با موقعیت های مشخص برای محاسبه موقعیت فرستنده استفاده کنیم، رابطه به دست آمده برای گیرنده های LoS به صورت زیر می گردد.

$$\begin{bmatrix} 2(x_{r2} - x_{r1}) & 2(y_{r2} - y_{r1}) & 10^{\frac{P_{r2}-P_{r1}}{5\alpha}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \frac{P_0}{10^{5\alpha}} \end{bmatrix} = x_{r1}^2 + x_{r2}^2 + y_{r1}^2 + y_{r2}^2 \quad (۴)$$

و برای گیرنده های NLS:

$$\begin{bmatrix} 2(x_{r2} - x_{r1}) & 2(y_{r2} - y_{r1}) & 10^{\frac{P_{r2}-P_{r1}}{5\alpha}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \frac{P_0+b}{10^{5\alpha}} \end{bmatrix} = x_{r1}^2 + x_{r2}^2 + y_{r1}^2 + y_{r2}^2 \quad (۵)$$

### ۳-۲- الگوریتم مسیریابی فیلتر کالمن

فیلتر کالمن که از آن به عنوان فیلتر خطی مرتبه دوم نیز یاد می شود الگوریتمی است که حالت یک سیستم پویا را با استفاده از مجموعه ای از مشاهدات و اندازه گیری های خطادار در طول زمان تخمین می زند. این فیلتر در صورتی که نویز آغشته به اندازه گیری ها گوسی باشد، معمولاً تخمین دقیق تری را نسبت به تخمین بر مبنای یک مشاهده انفرادی با استنباط بیزی ارائه می کند. این الگوریتم در دو گام اجرا می شود. در گام پیش بینی، فیلتر کالمن تخمینی از وضعیت فعلی متغیرها را در شرایط عدم قطعیت ارائه می کند. زمانی که نتیجه اندازه گیری بعدی به دست آید، تخمین قبلی با میانگین وزن دار به روز می شود. به این ترتیب که وزن اطلاعاتی که دارای قطعیت بیشتری هستند،

همسایگان بلافصل خود تخمینی جدید از پارامتر مورد نظر به دست می‌آورد.

روش‌های متعددی برای مشارکت بین گره‌ها به منظور تخمین یک پارامتر معرفی شده است. یک روش، روش افزایشی<sup>۱</sup> است که در آن ارتباطات گره‌ها در شبکه به صورت یک رینگ عمل می‌کند و هر گره پردازشگر محلی با استفاده از مشاهدات و تخمین گره ماقبل خود و مشاهده و تخمین قبلی خود یک تخمین جدید از پارامتر مجهول را به دست می‌آورد و آن را در اختیار گره بعد از خود قرار می‌دهد [۲۱]. روش دوم روش انتشاری یا دیفیوژن می‌باشد. در این روش هر گره با استفاده از مشاهدات خود و همه همسایگان بلافصل خود یک تخمین جدید از پارامتر مجهول مورد نظر به دست آورده و سپس یک متوسط وزن-دار از این تخمین و تخمین همسایگان را به عنوان تخمین نهائی خود در این گام را حفظ و به سایرین معرفی می‌کند [۲۲]. روش سوم، روش مشارکت اجماعی است که در آن، تخمین هر گره به صورت مجموعی از ترکیب یک تخمین جدید (با مشارکت مشاهدات خود گره و همسایگانش) و تفاضل این تخمین جدید با مقدار متوسط تخمین‌های قبلی خودش و همسایگانش به دست می‌آید. اثبات می‌شود که این تخمین در حالت حدی خود و بعد از تعداد زیادی گام به پاسخ یکسانی برای همه گره‌ها منجر می‌گردد [۲۳].

با مراجعه به مرجع ذکر شده دیده می‌شود که روش دیفیوژن نتایج مناسب‌تری را از نقطه نظر همگرایی الگوریتم مشارکت و سرعت همگرایی نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان داده است و در این پژوهش از این روش استفاده شده است.

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم فیلتر کالمن توزیع شده، فرض بر این است که هر سنسور گیرنده محلی توانایی برقراری ارتباط و تبادل اطلاعات با سنسورهای همسایه خود را دارد. بعد از هر بار تبادل اطلاعات، هر سنسور اقدام به اجرا نمودن الگوریتم فیلتر کالمن می‌کند که به آن فیلتر کالمن محلی گفته می‌شود. این تخمین می‌تواند با اجرای چند گام الگوریتم پیش‌بینی به روزرسانی در گره  $k$  با مجموعه همسایگان  $N_k$  به صورت زیر به دست آید.

$$\Psi_{k,i} \leftarrow \hat{x}_{k,i|i-1}$$

$$\text{for } l \in N_k$$

از حالت فعلی سیستم ارائه کند.

معمولاً این دو گام متناوباً تکرار می‌شوند، به این معنی که پیش‌بینی تا مشاهده بعدی انجام می‌شود و سپس با استفاده از مشاهده فعلی به روزرسانی انجام می‌شود. اگر در بازه زمانی مشاهده‌ای انجام نشود، پیش‌بینی‌ها تا مشاهده بعدی انجام می‌شوند و به روزرسانی بر مبنای چند مرحله پیش‌بینی انجام می‌شود. به طور مشابه اگر در بازه زمانی چندین مشاهده مستقل انجام شود، بر مبنای هر یک از آنها چند به روزرسانی با ماتریس‌های  $H_i$  متفاوت به دست می‌آید.

### مرحله پیش‌بینی:

تخمین حالت پیشین:

$$\hat{x}_{i|i-1} = F_i \hat{x}_{i-1|i-1} + B_i u_i \quad (7)$$

تخمین کواریانس پیشین:

$$P_{i|i-1} = F_i P_{i-1|i-1} F_i^T + Q_i \quad (8)$$

### مرحله به روزرسانی:

مانده مشاهده جدید:

$$\tilde{y}_i = z_i - H_i \hat{x}_{i|i-1} \quad (9)$$

کواریانس مانده مشاهده جدید:

$$S_i = H_i P_{i|i-1} H_i^T + R_i \quad (10)$$

بهره کالمن بهینه:

$$K_i = P_{i|i-1} H_i^T S_i^{-1} \quad (11)$$

حالت پسین تخمینی:

$$\hat{x}_{i|i} = \hat{x}_{i|i-1} + K_i \tilde{y}_i \quad (12)$$

کواریانس پسین تخمینی:

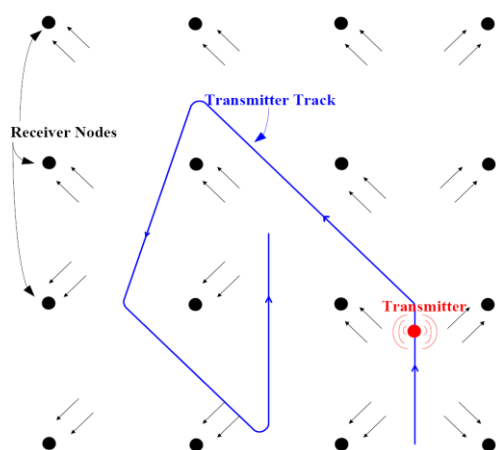
$$P_{i|i} = (I - K_i H_i) P_{i|i-1} \quad (13)$$

### ۳-۳- تخمین توزیع شده

منظور از شبکه‌های توزیع شده، گروهی از گره‌های پردازشگر است که تشکیل یک شبکه کاملاً متصل را می‌دهند و در این گره‌ها هیچ گره مرکزی و به اصطلاح مرکز ادغامی وجود ندارد. در این شبکه‌ها، همچنین هر گره پردازشگر تنها با گره‌های همسایه خود در ارتباط است و اگر در این شبکه‌ها قرار بر تخمین یک پارامتر باشد هر گره با استفاده از مشاهدات و تخمین‌های قبلی خود و

<sup>1</sup> Incremental

$$c_{l,k} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{N_k} \frac{1}{\delta_{li,k}^2}} \quad (16)$$



شکل ۱: نقشه‌ای از شبکه ایجاد شده



شکل ۲: نمایی از شبکه و تجهیزات استفاده شده

به منظور آزمایش الگوریتم موقعیت‌یابی پیشنهادی آزمایشاتی ترتیب داده شد. در این آزمایش‌ها یک شبکه متشکل از ۱۶ سنسور گیرنده که به فاصله ۱۰ متر از هم‌دیگر به صورت یک شبکه توری شکل قرار گرفته‌اند ایجاد گردید. در این شبکه از تجهیزات رادیو نرم‌افزار عمومی<sup>۱</sup> (USRP) در باند ۸۰۰ مگاهرتز به عنوان

$$\begin{aligned} S &\leftarrow R_{l,i} + H_{l,i} P_{k,i} H_{l,i}^T \\ \Psi_{k,i} &\leftarrow \Psi_{k,i} + P_{k,i} H_{l,i}^T S^{-1} [y_{l,i} - H_{l,i} \Psi_{k,i}] \\ P_{k,i} &\leftarrow P_{k,i} - P_{k,i} H_{l,i}^T S^{-1} H_{l,i} P_{k,i} \\ \text{end} \\ \hat{x}_{k,i|i} &\leftarrow \Psi_{k,i} \\ P_{k,i|i} &\leftarrow P_{k,i} \\ \hat{x}_{k,i+1|i} &= F_1 \hat{x}_{k,i|i} \\ P_{k,i+1|i} &= F_1 P_{k,i|i} F_1^T + Q_i \end{aligned} \quad (14)$$

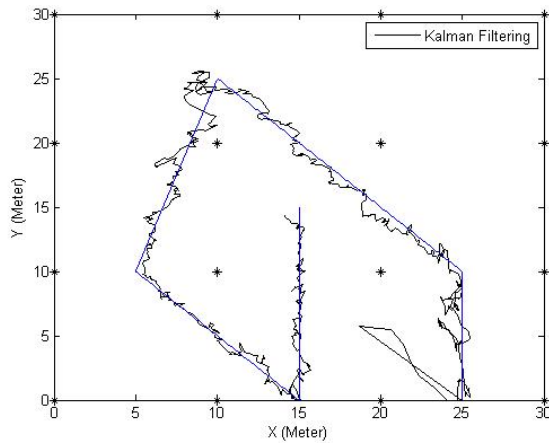
در این الگوریتم  $P_{k,i|i-1}$  و  $\hat{x}_{k,i|i-1}$  تخمین‌های پیشین بردار حالت و ماتریس کواریانس گره  $k$  در گام  $i$  ( لحظه ) بوده و  $\Psi_{k,i}$  تخمین محلی گره  $k$  از بردار حالت در گام  $i$  می‌باشد. ماتریس‌های کواریانس مشاهده و فرایند  $R_i$  و  $Q_k$  با تنظیم و یادگیری قبلی به دست می‌آیند، در این پژوهش این مقادیر با سعی و خطا به نحوی انتخاب شده‌اند که بهترین پاسخ گرفته شود.

گام‌های ذکر شده در رابطه (۱۴) برای جمع‌آوری مشاهدات گره  $k$  از همسایگانش و تولید یک تخمین جدید از متغیر حالت (موقعیت و توان فرستنده) می‌باشد. در این روابط هنوز هیچ اشاره‌ای به نحوه انتشار تخمین‌های محلی در شبکه و تأثیرگذاری تخمین گره‌ها روی گره‌های همسایه نشده است. در پیاده‌سازی روش انتشاری، گره‌ها به منظور تولید تخمین دقیق‌تر نسبت به حالت بدون مشارکتی، یک ارتباط ایزوتروپیک با همسایگان خود برقرار می‌کنند. این مشارکت انتشاری برای تامین شرایط پایداری باید یک فرمت محدب به صورت زیر داشته باشد [۲۲].

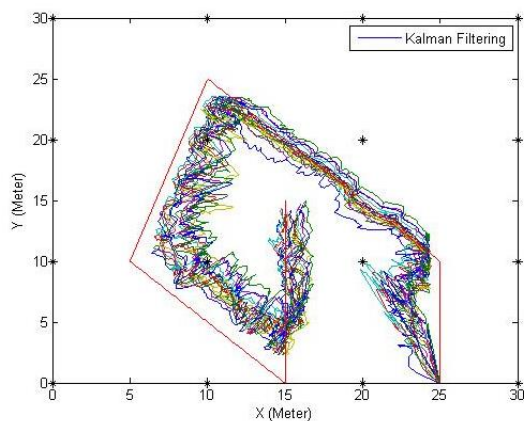
$$\begin{aligned} \hat{x}_{k,i|i} &= \sum_{l \in N_k} c_{l,k} \Psi_{l,i} \\ \text{with } \sum_{l=0}^n c_{l,k} &= 1 \end{aligned} \quad (15)$$

انتخاب ضرایب مشارکت گره‌های همسایه در تخمین، یعنی  $c_{l,k}$  روش‌های مختلفی دارد که با توجه به در دسترس بودن واریانس تخمین گره‌ها، یک روش مناسب می‌تواند وزن دادن به تخمین گره‌ها بر اساس کیفیت تخمین آنها می‌باشد. به این نحو که گره‌های با تخمین دقیق‌تر (واریانس کمتر) تأثیر بیشتری در تخمین نهایی داشته باشند. در این روش ضرایب مشارکت انتشاری به صورت زیر انتخاب می‌گردند:

<sup>1</sup> Universal Software Radio Peripheral



شکل ۳: نتیجه حاصل از الگوریتم موقعیت‌یابی فیلتر کالمن متمرکز



شکل ۴: نتیجه حاصل از الگوریتم موقعیت‌یابی فیلتر کالمن توزیع شده برای همه گره‌های شبکه

با مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مسیریابی فیلتر کالمن متمرکز و توزیع شده می‌توان گفت که در کل دقت تخمین متمرکز بهتر از تخمین توزیع شده است ولی به جای آن روش توزیع شده نیازی به یک واحد مرکزی که کلیه اطلاعات شبکه به آن ارسال شود ندارد که این مزیت علاوه بر کاهش تعداد تبادلات شبکه موجب افزایش قابلیت اعتماد تخمین در مقابل قطع برخی از لینک‌ها می‌شود. لازم به ذکر است که در تخمین توزیع شده دقت تخمین‌های گره‌های واقع شده در مرکز شبکه بیشتر از گره‌های واقع شده در حاشیه‌های شبکه است. به منظور مقایسه دقت الگوریتم موقعیت‌یابی فیلتر کالمن با سایر روش‌ها، یک شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم وفقی<sup>۱</sup> LMS نیز انجام یافت که در شکل (۵) نتایج به دست آمده از این روش به همراه نتیجه به دست آمده از الگوریتم فیلتر کالمن نشان

سنسورهای گیرنده استفاده شد. یک عدد میکروفون بی‌سیم نیز در آن باند به صورت دستی در مسیری مشخص حرکت داده شد. نمایی از تجهیزات مورد استفاده و شبکه ایجاد شده در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ارتباط سنسورها از طریق پورت گیگاترنت دستگاه‌های USRP با لپ‌تاپ برقرار گردید. با گسترش روابط (۴) و (۵) برای اعمال اندازه‌گیری‌های گره  $k$  و همسایگانش به رابطه ماتریسی زیر می‌رسیم که در الگوریتم موقعیت‌یابی کالمن از آن می‌توان به عنوان رابطه مشاهده استفاده کرد:

$$\begin{bmatrix} x_{r1}^2 + y_{r1}^2 + x_{rk}^2 + y_{rk}^2 \\ \vdots \\ x_{rNk}^2 + y_{rNk}^2 + x_{rk}^2 + y_{rk}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_{r1} - x_{rk}) & 2(y_{r1} - y_{rk}) & 10^{\frac{P_{r1} - P_{rk}}{5\alpha}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_{rNk} - x_{rk}) & 2(y_{rNk} - y_{rk}) & 10^{\frac{P_{rNk} - P_{rk}}{5\alpha}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 10^{\frac{P_{o1}}{5\alpha}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

همچنین، با توجه به حرکت دستی فرستنده، معادله حالت الگوریتم کالمن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\begin{bmatrix} x_t(i+1) \\ y_t(i+1) \\ 10^{\frac{P_{o(i+1)}}{5\alpha}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t(i) \\ y_t(i) \\ 10^{\frac{P_{o(i)}}{5\alpha}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

این الگوریتم در دو حالت متمرکز و توزیع شده مورد آزمایش قرار گرفت. در حالت متمرکز، همه مشاهدات سنسورها در یک مرکز ادغام جمع شده و یک تخمین درباره موقعیت فرستنده به دست می‌آید. نتیجه حاصل از این الگوریتم در شکل (۳) نشان داده شده است.

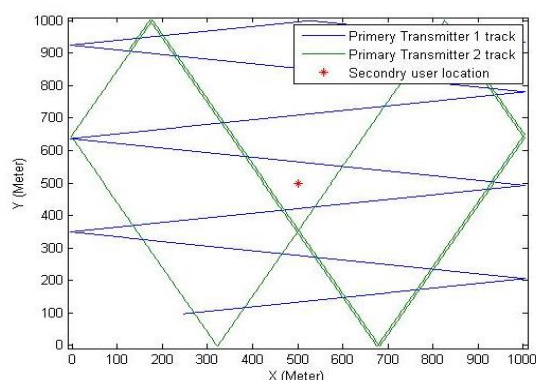
در حالت توزیع شده، هر گره با استفاده از مشاهدات خود و همسایگانش و با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) یک تخمین محلی از موقعیت فرستنده به دست می‌آورد و سپس با استفاده از واریانس تخمین خود و همسایگانش، یک متوسط وزنی از تخمین‌های خود و همسایگانش را به عنوان تخمین موقعیت فرستنده از نگاه گره مورد نظر در آن گام معرفی می‌کند. نتایج به دست آمده از این روش توزیع شده در شکل (۴) برای همه گره‌های این شبکه، نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Least Mean Square

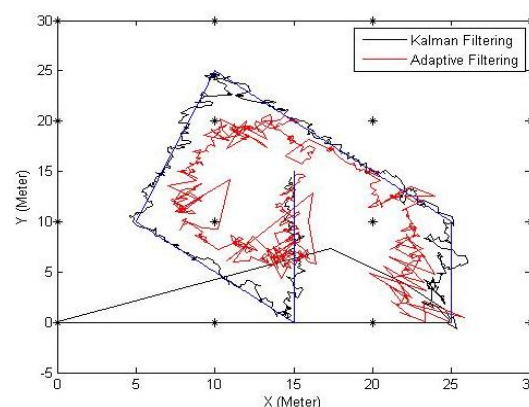
داده شده است.

نسبتاً طولانی‌تری را نیاز خواهند داشت. افزایش زمان سنجش طیف در هر پریود از ارسال بسته‌های اطلاعات باعث کاهش بهره‌وری طیف فرکانسی می‌گردد.

از سوی دیگر، در روش سنجش طیف غیرمستقیم، گیرنده‌های رادیوشناختی به صورت توزیع شده یا متمرکز با استفاده از یک الگوریتم بازگشتی با استفاده از تعداد محدودی نمونه، اقدام به تخمین موقعیت و توان فرستنده های اولیه می‌کنند. در دسترس بودن موقعیت لحظه‌ای و توان ارسال این فرستنده‌ها منجر به محاسبه فاکتورهای دیگری از قبیل سرعت و جهت حرکت احتمالی این فرستنده‌ها می‌شود و با این اطلاعات کاربران ثانویه می‌توانند زمان باقی‌مانده برای اشغال شدن باند فرکانسی مورد نظر را تخمین زده و باندهای فرکانسی مورد نظر مناسب را با اطلاعات بیشتری انتخاب کنند. در دسترس بودن مدت زمان خالی بودن طیف فرکانسی منجر به حذف زمان‌های متناوب سنجش طیف شده و امکان افزایش بهره‌وری طیفی مهیا می‌گردد. به منظور اثبات این ادعا، آزمایشی را به صورت شبیه‌سازی انجام می‌دهیم. در این آزمایش، دو فرستنده اولیه با توان و موقعیت معلوم (برای کاربر رادیوشناختی) در یک محیط  $1000 \times 1000$  متری با سرعتی ثابت در حرکت می‌باشند. این فرستنده‌ها در دو باند فرکانسی متفاوت مشغول به پخش اطلاعات هستند. یک فرستنده رادیوشناختی هم در مرکز این زمین (موقعیت  $(500m, 500m)$ ) می‌خواهد از یکی از این باندها برای ارسال اطلاعات به همسایه خود استفاده کند.



شکل ۶: مسیر حرکت فرستنده‌های اولیه و موقعیت کاربر ثانویه برای سنجش طیف و ارسال اطلاعات توسط کاربر ثانویه از دو روش ذکر شده به ترتیب زیر استفاده می‌کنیم. در روش مستقیم، کاربر ثانویه در هر گام زمانی، به صورت تصادفی اقدام به محاسبه توان دریافتی از یکی از فرستنده‌های اولیه



شکل ۵: نتیجه حاصل از الگوریتم موقعیت یابی LMS وقتی و فیلتر کالمن

این شکل بر برتری الگوریتم کالمن دلالت دارد. کاربرد الگوریتم LMS در مکان‌یابی فرستنده‌های اولیه در پژوهش‌های قبلی نویسندگان این مقاله به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است و شرایط اعمال و نتایج آن در [۲۳] آورده شده است و از ذکر مجدد آن پرهیز می‌شود.

#### ۴- سنجش طیفی توزیع شده

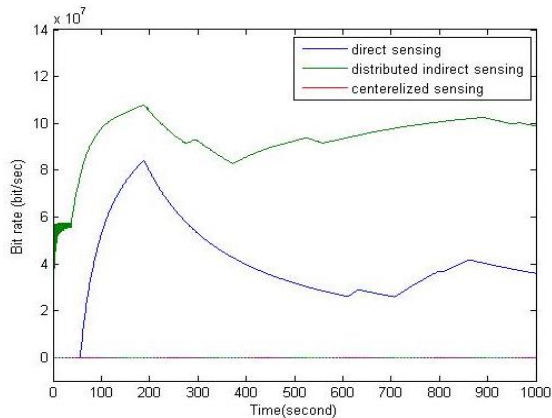
هدف اصلی از سنجش و مدیریت طیف فرکانسی افزایش بهره‌وری طیفی است. منظور از بهره‌وری طیفی، نرخ متوسط اطلاعات عبور داده شده از باندهای فرکانسی قابل استفاده می‌باشد. دو روش سنجش طیف مستقیم و غیرمستقیم برای سنجش طیف و تهیه نقشه‌های محیط رادیویی وجود دارد. در این بخش، به بررسی این دو روش از نظر بهره‌وری طیفی می‌پردازیم و مزیت روش غیرمستقیم را در سناریوهای مختلف به اثبات می‌رسانیم.

در روش سنجش طیف مستقیم، کاربران شبکه رادیوشناختی به صورت پریودیک قبل از ارسال هر بسته از اطلاعات اقدام به اندازه‌گیری توان در باندهای فرکانسی تعریف شده می‌کنند. تعداد نمونه‌های گرفته شده در این اندازه‌گیری متناسب با معکوس مربع نسبت سیگنال به نویز تعریف شده  $O\left(\frac{1}{\text{SNR}^2}\right)$  می‌باشد [۲۴]. در این رابطه

تابع  $O(\cdot)$  نشان دهنده کران نمونه‌های مورد نیاز بر اساس آرگومان ذکر شده است. بدیهی است که در اکثر کاربردها، سیگنال کاربران اولیه نسبت سیگنال به نویز پائینی دارند و لذا بنا به رابطه ذکر شده، تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای تشخیص این سیگنال‌ها زیاد بوده و زمان سنجش طیف



آن صورت آن باند فرکانسی (باند فرکانسی استفاده شده توسط فرستنده‌ای) را انتخاب می‌کند که زمان بیشتری طول بکشد تا به محدوده پر شدن حفره طیفی برسد. شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل (۸) نمایش‌گر نرخ داده لحظه‌ای و متوسط کاربر رادیوشناختی است که از این روش سنجش طیف استفاده می‌کند.



شکل ۹: مقایسه بهره‌وری طیفی (نرخ متوسط داده) برای کاربران رادیوشناختی با روش‌های سنجش طیف مختلف

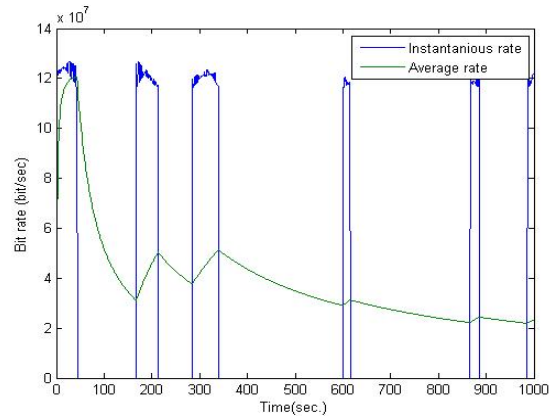
چنانچه این شبکه از روش سنجش طیف متمرکز استفاده کند به دلیل وجود و تشخیص فرستنده‌های اولیه در داخل منطقه جغرافیائی شبکه هیچ‌گونه تبادل اطلاعاتی انجام نمی‌پذیرد. شکل (۹) نتایج حاصل از سنجش طیف و بهره‌وری طیف فرکانسی در حالت‌های مختلف را به منظور مقایسه نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نتایج نمایش داده شده معلوم است روش سنجش طیف غیرمستقیم نرخ داده متوسط بالاتری را نسبت به روش مستقیم و متمرکز به دست می‌دهد.

همان‌طور که از نتایج نمایش داده شده در شکل‌های (۷) و (۸) معلوم است روش سنجش طیف غیرمستقیم نرخ داده متوسط بالاتری را نسبت به روش مستقیم به دست می‌دهد.

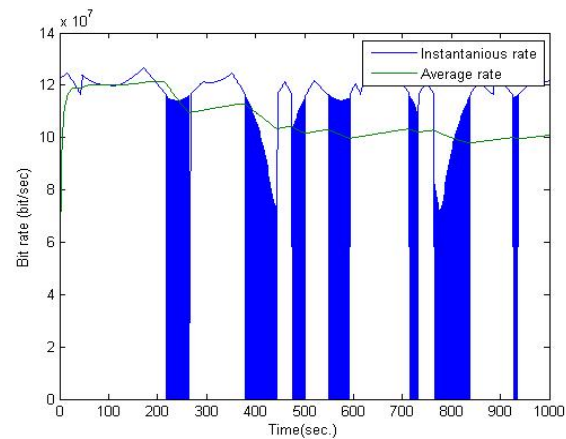
### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مراحل تهیه نقشه‌های محیط رادیویی به صورت توزیع شده و بدون وجود یک مرکز کنترل ارائه شده است. این روش در مجموعه روش‌های غیرمستقیم تهیه نقشه‌های محیط رادیویی قرار می‌گیرد که در آن به جای استفاده از اطلاعات از پیش تعریف شده درباره فرستنده‌های اولیه، شبکه تجهیزات سنسوری با استفاده از توان سیگنال دریافتی به تخمین موقعیت، توان، سرعت و جهت حرکت فرستنده‌های اولیه موجود در منطقه به صورت کاملاً توزیع

می‌کند و در صورت خالی بودن آن کانال از آن استفاده نموده و در غیر این‌صورت فرستنده دوم را می‌آزماید و در صورت امکان از آن استفاده می‌کند. در شکل (۶)، نمائی از محیط شبیه‌سازی و مسیر حرکت فرستنده‌های اولیه و موقعیت کاربر ثانویه نشان داده شده است.



شکل ۷: نرخ متوسط داده برای کاربر رادیوشناختی با سنجش طیف مستقیم



شکل ۸: نرخ متوسط داده برای کاربر رادیوشناختی با سنجش طیف غیرمستقیم

اگر در این شبیه‌سازی، توان فرستنده‌های اولیه را ۵ وات و توان کاربر ثانویه را ۱ وات در نظر بگیریم و آستانه توان را برای وجود حفره طیفی  $-35\text{dB}$  در نظر بگیریم و پهنای باند ایده‌آل کانال ۱۰ مگاهرتز باشد، نرخ متوسط داده برای کاربر ثانویه به صورت شکل (۷) خواهد شد.

در روش سنجش طیف غیرمستقیم توزیع شده، کاربر ثانویه با در دست داشتن موقعیت، سرعت و توان فرستنده‌های اولیه به این صورت عمل می‌کند که اگر امکان انتخاب بین بیش از یک حفره طیفی برای آن مقدور باشد یعنی اگر بیش از یک فرستنده اولیه در مکان‌هایی باشند که توان دریافتی از آنها پائین‌تر از مقدار آستانه تعیین شده باشد در

شده می‌پردازد و با استفاده از این اطلاعات، شبکه، حفره‌های طیفی را به صورت محلی انتخاب می‌نماید. شبیه‌سازی‌های انجام یافته بهبود بهره‌وری طیفی را نسبت به روش‌های متمرکز نشان می‌دهد که این نتایج دستاورد خوبی برای این پژوهش به شمار می‌رود.

#### ۶- تقدیر و تشکر

جا دارد از جناب آقای پرفسور تونا توجو و مرکز تحقیقات مخابرات دانشگاه بغازایچی استانبول که در انجام آزمایشات مورد نیاز این پروژه همکاری نموده اند صمیمانه تشکر بنمائیم.

#### ۷- مراجع

- [1] M.T. Masonta, M. Mzyece, and N. Ntlatlapa, "Spectrum decision in cognitive radio networks: A survey", IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 15, No. 3, 2013, pp. 1088 – 1107.
- [2] M. Pesko, T. Javornik, A. Kosir, M. Štular, and M. Mohorcic, "Radio environment maps: The survey of construction methods", KSII TRANSACTIONS ON INTERNET AND INFORMATION SYSTEMS, Vol. 8, No. 11, 2014, pp. 3789 – 3809.
- [3] D. Denkovski, V. Atanasovski, L. Gavrilovska, J. Riihijärvi, and P. Mähönen, "Reliability of a radio environment map: Case of spatial interpolation techniques", in 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Stockholm, Sweden, 2012.
- [4] S. Ulaganathan, D. Deschrijver, M. Pakparvar, I. Couckuyt, W. Liu, D. Plets, W. Joseph, T. Dhaene, L. Martens, I. Moerman, "Building accurate radio environment maps from multi-fidelity spectrum sensing data", Wireless Networks, Vol. 22, No. 8, 2016, pp. 2551 – 2562.
- [5] J.A. Bazerque and G.B. Giannakis, "Distributed spectrum sensing for cognitive radio networks by exploiting sparsity", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, Vol. 58, No. 3, 2015, pp. 1847 – 1863.
- [6] M. Pesko, T. Javornik, L. Vidmar, A. Košir, M. Štular & M. Mohorčič, "The indirect self-tuning method for constructing radio environment map using omnidirectional or directional transmitter antenna", Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2015, No. 1, 2015, pp. 1 – 12.
- [7] Z.Y. Xiufang Shi, Guoqiang Mao and J. Chen, "Localization algorithm design and performance analysis in probabilistic los/nlos environment", in IEEE Wireless Communications Symposium (ICC 2016), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016.
- [8] H.M. Paul Zarchan, Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach, American Institute of Aeronautics and Astronautics Incorporated, 2000.
- [9] L. Li, J.A. Chambers, C.G. Lopes and A.H. Sayed, "Distributed estimation over an adaptive incremental network based on the affine projection algorithm", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, Vol. 58, No. 1, 2010, pp. 151 – 164.
- [10] F.S. Cattivelli and A.H. Sayed, "Diffusion lms strategies for distributed estimation", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, Vol. 58, No. 3, 2010, pp. 1035– 1048.
- [11] L. Xiao, T. Chen, J. Liu, and H. Dai, "Anti-jamming transmission stackelberg game with observation errors", IEEE Communications Letters, Vol. 19, No. 6, 2015, pp. 949– 952.
- [12] S.-Y. Tu and A.H. Sayed, "Diffusion strategies outperform consensus strategies for distributed estimation over adaptive networks", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, Vol. 60, No. 12, 2012, pp. 6217– 6234.
- [13] S.-Y. Tu and A.H. Sayed, "Diffusion strategies outperform consensus strategies for distributed estimation over adaptive networks unknown primary signal arrival time", IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, Vol. 59, No. 7, 2011, pp. 1779– 1785.

- [14] L. Lu, X. Zhou, U. Onunkwo and G.Y. Li, "Ten years of research in spectrum sensing and sharing in cognitive radio", *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2012, No. 28, 2012, pp. 1–16.
- [۱۴] ه. مختاری، م. بهادری، ج. غلام نژاد، "برآورد ارزش اقتصادی بلوک استخراجی برای طراحی پیشرویهها در معادن روباز، با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار، نمونه مطالعاتی: معدن سنگ آهن چادرملو"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۷، ۱۳۹۵، صفحه ۲۲۹–۲۴۱.
- [۱۵] ا. حسین بیگ، ج. سلیمان میگونی، "استفاده از حل معادلات انتگرالی در تحلیل یک آنتن پهن باند مایکرواستریپی"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۶، ۱۳۹۵، صفحه ۱۶۰–۱۵۱.
- [۱۶] ب. حسنی و ا. گنجعلی، "مکان یابی نقاط بهینه تنش در تحلیل ایزوژئومتریک"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۳، شماره ۴۰، ۱۳۹۴، صفحه ۱۶۷–۱۵۱.
- [17] Y.-Ch. Liang, K.-Ch. Chen, G.Y. Li, and P. Mahonen, "Cognitive radio networking and communications: An overview", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 7, 2011, pp. 3386–3407.
- [18] H. Sun, A. Nallanathan, Ch.-X. Wang and Y. Chen, "Wideband spectrum sensing for cognitive radio networks: A survey", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 2, 2013, pp. 74–81.
- [19] R. Bouraoui and H. Besbes, "Cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks: Fusion rules performance analysis", in *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2016.
- [20] J.A. Bazerque and G.B. Giannakis, "Distributed spectrum sensing for cognitive radio networks by exploiting sparsity", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 58, No. 3, 2010, pp. 1847–1862.
- [21] S. Gronroos, K. Nybom, J. Björkqvist, J. Hallio, J. Auranen, and R. Ekman, "Distributed spectrum sensing using low cost hardware", *Journal of Signal Processing Systems*, Vol. 83, No. 1, 2016, pp. 5–17.
- [22] H.B. Yilmaz and T. Tugcu, "Location estimation-based radio environment map construction in fading channels", *WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING*, Vol. 15, No. 3, 2015, pp. 561–570.
- [23] N. Ezzati, H. Taheri and T. Tugcu, "Optimised sensor network for transmitter localization and radio environment mapping", *IET COMMUNICATIONS*, Vol. 10, No. 16, 2016, pp. 2170–2178.