

مسیریابی جغرافیایی مبتنی بر خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر رادیوشناختی

سپیده عباسی^۱، قاسم میرجلیلی^۲

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، a.3pd.69@gmail.com

^۲ استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، mirjalily@yazd.ac.ir

چکیده

رشد بیش از حد کاربردهای بی‌سیم پهن باند و استفاده‌ی روزافزون از باندهای فرکانسی، انگیزه مناسبی برای به‌کارگیری فن‌آوری رادیوشناختی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تحت عنوان شبکه‌های حسگر بی‌سیم رادیوشناختی فراهم نموده است. به دلیل اضافه شدن محدودیت‌های جدید به این نوع شبکه، الگوریتم‌های خوشه‌بندی و ارسال داده‌ی موجود قابل پیاده‌سازی در شبکه‌های حسگر رادیوشناختی نمی‌باشند. در این مقاله یک پروتکل مسیریابی جغرافیایی مبتنی بر خوشه‌بندی جهت بکارگیری در شبکه‌های حسگر رادیوشناختی مطرح می‌شود؛ که در آن، خوشه‌ها بر اساس انرژی باقیمانده و اطلاعات حاصل از طیف‌سنجی گره‌ها تشکیل می‌شوند. در این الگوریتم از تکنیک تسهیم زمانی به‌منظور ارسال داده‌های درون خوشه‌ای و تکنیک دسترسی تصادفی به‌منظور ارتباط بین خوشه‌ای استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که میزان مصرف انرژی و تأخیر انتها به انتهای بسته‌های دریافتی در مقایسه با جدیدترین پروتکل مشابه به نام SCEEM، کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است.

واژه‌های کلیدی

شبکه حسگر بی‌سیم، رادیوشناختی، خوشه‌بندی، مسیریابی جغرافیایی.

۱- مقدمه

داده‌های بلادرنگ^۱، از اهمیت بالایی برخوردار است. از سوی دیگر رشد بیش از حد کاربردهای بی‌سیم و استفاده روزافزون از باندهای فرکانسی مشابه و بدون مجوز، سبب به‌اشباع رسیدن این باندهای فرکانسی گردیده و این امر عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. جهت کاهش ازدحام در باندهای بدون مجوز، استفاده از باندهای مجوزدار به‌صورت فرصت‌طلبانه و هوشمند پیشنهاد می‌گردد؛ این هدف با بهره‌گیری از قابلیت رادیوشناختی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تحقق می‌یابد. در حال حاضر، تعدادی باند دارای مجوز^۲ در طیف وجود دارند که به‌طور کامل مورد استفاده قرار نمی‌گیرند؛ به همین دلیل ایده استفاده فرصت‌طلبانه از این باندها در شبکه‌های رادیوشناختی به‌منظور افزایش ظرفیت و گذردهی شبکه مطرح شده است. در فن‌آوری رادیوشناختی، کاربران به دو دسته تقسیم می‌شوند: (۱) کاربران

فن‌آوری شبکه‌های حسگر یکی از فن‌آوری‌های کلیدی برای آینده است، به گونه‌ای که می‌توان آن را یکی از پراهمیت‌ترین فن‌آوری‌ها برای قرن ۲۱ دانست. به بیان ساده می‌توان گفت یک شبکه حسگر بی‌سیم مجموعه‌ای از تعداد بسیار زیادی گره حسگر با ابعاد کوچک و قابلیت‌های مخابراتی و محاسباتی محدود است که به‌منظور جمع‌آوری و انتقال اطلاعات از یک محیط به سمت یک کاربر و یا ایستگاه پایه (چاهک) به کاربرده می‌شود [۱].

از آنجایی‌که بیشترین مصرف انرژی در شبکه، در زمان ارسال اطلاعات رخ می‌دهد، روشی که برای ارسال داده مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای بیشترین اهمیت در شبکه خواهد بود. با توجه به نوع استفاده از شبکه‌های حسگر و داده‌ای که باید به‌عنوان خروجی این شبکه‌ها مورد بررسی قرار گیرد، محدودیت‌های مشخص دیگری نیز مورد توجه قرار می‌گیرند؛ از آن جمله می‌توان به میزان تأخیر در انتقال اطلاعات در شبکه‌های حسگر اشاره کرد که این محدودیت در برخورد با

¹ Real-time

² Licensed Spectrum

فعالیت در محیط‌های ناهمگن و همچنین با توجه به اینکه حسگرها عموماً به صورت تصادفی توزیع شده و با تعداد زیاد به صورت موردی تشکیل یک شبکه داده‌اند، نیازمند یک پروتکل مسیریابی با راندمان انرژی بالا هستیم که در شبکه‌های با مقیاس بزرگ نیز پاسخگو باشد. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های خوشه‌بندی و مسیریابی متداول در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، به دلیل اضافه شدن محدودیت در دسترس بودن طیف، در شبکه‌های حسگر رادیوشناختی قابل پیاده‌سازی نمی‌باشند [۸].

امروزه مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم رادیوشناختی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. پروتکل‌های مسیریابی در این شبکه‌ها باید علاوه بر مصرف انرژی، تخمین پارامترهای کیفیت سرویس مانند تأخیر و قابلیت اطمینان را بسته به نوع محتوا، مد نظر قرار دهند. از این رو به منظور دستیابی به طول عمر بالا در شبکه و کاهش تأخیر، به‌کارگیری مسیریابی جغرافیایی یک راه حل کارا و مؤثر می‌باشد. پروتکل‌های مسیریابی جغرافیایی با تلاش برای کاهش تعداد گام‌هایی که بسته تا مقصد طی می‌کند، سعی در کاهش تأخیر انتها به انتهای بسته‌ها دارند [۹].

در این مقاله روشی کارا به‌منظور مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم رادیوشناختی مطرح می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی فرض می‌شود که تمامی گره‌های موجود در شبکه با استفاده از قدرت سیگنال دریافتی از گره چاهک، قادر به تخمین فاصله خود از چاهک می‌باشند؛ از این رو با بهره‌گیری از تکنیک مسیریابی جغرافیایی بهبود قابل توجهی در عملکرد شبکه حاصل می‌شود.

ادامه مقاله بدین صورت سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲ خلاصه‌ای از کارهای انجام شده ارائه می‌گردد. در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی و در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌گردد. بخش پایانی مقاله نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲- کارهای انجام شده

در این بخش تعدادی از کارهای انجام شده در زمینه خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم رادیوشناختی ارائه می‌گردد.

در مرجع [۱۰] یک الگوریتم خوشه‌بندی احتمالاتی به نام CogLEACH

اولیه^۲ (PUs) که مجوز برای استفاده از بخش خاصی از طیف را دارند، اما در برخی از زمان‌ها از تمام باند فرکانسی خود استفاده نمی‌کنند؛ [۲] کاربران ثانویه^۴ (SUs) که از بخش‌هایی از طیف به صورت فرصت‌طلبانه استفاده می‌کنند، به‌گونه‌ای که تداخلی با کاربران اولیه نداشته باشند و سبب استفاده بهینه از این منبع نادر شوند [۲]. بهره‌گیری از قابلیت رادیوشناختی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم که با توجه به استفاده روزافزون از حسگرهای چندرسانه‌ای^۵، ترافیک‌های غیر قابل پیش‌بینی در شبکه را متحمل می‌شوند، می‌تواند یک ارتباط قابل اطمینان را تضمین کند. بهره‌گیری از فن‌آوری رادیوشناختی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با منابع محدود، سبب افزایش بهره‌وری از طیف فرکانسی، برقراری ارتباط چند کاناله و غلبه بر مشکل ازدحام ترافیکی که از تجمع بیش از اندازه گره‌های حسگر در یک محیط به وجود می‌آید، می‌شود. گره‌های حسگر می‌توانند از مزایای دسترسی پویا به طیف بهره‌مند شوند، به‌طوری‌که آن‌ها می‌توانند به صورت متناوب درباندهای مجوزدار که متعلق به کاربران اولیه است، ارتباط برقرار کنند.

یک شبکه حسگر رادیوشناختی^۶ (CRSN) شامل چندین گره حسگر با قابلیت رادیوشناختی می‌باشد که به‌منظور برقراری ارتباط با یکدیگر، پس از کشف یک رویداد، طیف را به صورت فرصت‌طلبانه مورد سنجش قرار می‌دهند [۳] و [۴]. با توجه به مطالعات گسترده بر روی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و فن‌آوری رادیوشناختی، در سالیان اخیر، شبکه حسگر بی‌سیم رادیوشناختی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. شبکه حسگر رادیوشناختی می‌تواند در کاربردهای مختلفی مانند نظارت صنعتی [۴]، شبکه‌های هوشمند [۵]، سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند [۶]، مراقبت^۷ [۷] و مورد استفاده قرار گیرد.

به‌کارگیری سیستم‌های رادیوشناختی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، محدودیت آگاهی از طیف را به محدودیت‌های شبکه‌های حسگر (محدودیت‌های انرژی و توان محاسباتی) اضافه می‌کند [۳]، [۴] و [۸]. با توجه به محدودیت انرژی در گره‌های حسگر و احتمال

³ Primary Users

⁴ Secondary Users

⁵ Multimedia

⁶ Cognitive Radio Sensor Network

⁷ Surveillance

پروتکل دسترسی به رسانه TDMA⁹ و به‌منظور ارتباط بین خوشه‌ای، پروتکل¹⁰ CSMA/CA مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مرجع [9] یک پروتکل مسیریابی فرصت‌طلبانه مبتنی بر خوشه‌بندی مجازی با قابلیت اطمینان بالا پیشنهاد شده است. این پروتکل که متمرکز و بر حسب تقاضا می‌باشد، از تکنیک مسیریابی جغرافیایی بهره می‌گیرد و گره چاهک بهترین مسیر را به‌منظور حمایت از کیفیت خدمات¹¹ انتخاب می‌کند. در مرجع [13] یک پروتکل خوشه‌بندی سلسله مراتبی وفقی با اندازه‌های نامساوی مطرح می‌شود. در این الگوریتم تعداد کانال‌های خالی هر گره به عنوان وزن گره شناخته می‌شود و گره‌هایی با کانال‌های خالی بیشتر، به عنوان کاندید به‌منظور تبدیل شدن به سرخوشه انتخاب می‌شوند. در این الگوریتم، به‌منظور دستیابی به راندمان بالای انرژی، خوشه‌های نزدیک به گره چاهک عضوهای کمتری نسبت به بقیه خوشه‌ها دارند؛ از این رو انرژی در سرخوشه‌های نزدیک به گره چاهک به میزان بیشتری ذخیره می‌شود؛ این امر افزایش طول عمر شبکه را به دنبال دارد.

در این مقاله، با الهام از روش SCEEM و در نظر گرفتن تکنیک مسیریابی جغرافیایی، روشی موثر جهت خوشه بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر رادیوشناختی ارائه خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی، بهبود عملکرد روش پیشنهادی را در مقایسه با پروتکل SCEEM نشان خواهند داد.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش به بیان جزئیات روش پیشنهادی می‌پردازیم. در این روش، تمامی گره‌های موجود در شبکه ساکن، همگن و با انرژی اولیه یکسان فرض می‌شوند. در روش پیشنهادی، ابتدا به کمک اطلاعات حاصل از طیف سنجی و انرژی باقیمانده گره‌ها؛ سرخوشه‌ها انتخاب شده و پس از تشکیل خوشه‌ها و تنظیم مسیر، فرآیند ارسال داده آغاز می‌شود. در این روش، به‌منظور ارسال درون‌خوشه‌ای از تکنیک TDMA و ارسال بین‌خوشه‌ای از تکنیک CSMA/CA بهره گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که سرخوشه وظیفه کنترل و زمان‌بندی ارسال داده توسط اعضای خوشه را بر عهده دارد. در ادامه، روش خوشه بندی و مسیریابی تشریح خواهد شد.

مطرح شده که از تعداد کانال‌های خالی به عنوان یک معیار برای تبدیل شدن هر گره به سرخوشه استفاده می‌کند. این الگوریتم، خوشه‌بندی را با حداقل تعداد پیام‌های مبادله شده انجام می‌دهد و انواع شبکه و مدل‌های مختلف کاربر اولیه را پشتیبانی می‌کند. در واقع، الگوریتم CogLEACH تعمیم‌یافته پروتکل LEACH می‌باشد که گذردهی و طول عمر شبکه را در مقایسه با این پروتکل، بهبود می‌بخشد. در مرجع [11] یک پروتکل خوشه‌بندی آگاه از طیف رویداد محور معرفی شده است. در این پروتکل پس از تشخیص رویداد، خوشه‌ها تشکیل شده و تا پایان رویداد نگهداری می‌شوند. در این پروتکل خوشه‌ها نه در کل شبکه بلکه در ناحیه‌ی میان محل رویداد و چاهک تشکیل می‌شوند؛ بنابراین از تشکیل خوشه‌های غیرضروری که مصرف انرژی را در منابع محدود شده شبکه حسگر رادیوشناختی افزایش می‌دهد، جلوگیری می‌شود. در مرجع [8] گره‌ها به مجموعه‌ای از خوشه‌ها تقسیم می‌شوند تا محتویات منابع چندرسانه‌ای را به گره چاهک ارسال کنند. در این الگوریتم، رفتار کاربر اولیه با استفاده از سری زمانی ARMA⁸ تخمین زده می‌شود. پس از مرحله طیف‌سنجی، هر گره لیستی از مجموعه کانال‌های خالی در دسترس خود را به همراه تخمینی از میانگین مدت زمان خالی بودن هر یک، به همسایه‌های خود ارسال می‌کند. در این الگوریتم در ابتدا هر گره در نقش یک سرخوشه ظاهر می‌شود و سپس با نزدیکترین سرخوشه‌هایی که کانال خالی مشترک دارد، تجمیع می‌شود؛ این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که هیچ دو خوشه همسایه‌ای قابل ادغام نباشند. در این الگوریتم انرژی لحظه‌ای گره‌ها در فرآیند انتخاب سرخوشه در نظر گرفته نمی‌شود.

در مرجع [12] یک پروتکل خوشه‌بندی آگاه از طیف و انرژی در شبکه‌های حسگر رادیوشناختی به نام SCEEM مطرح شده است. این پروتکل به‌منظور پردازش و ارسال داده‌های بلادرنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ابتدا گره‌ها بر اساس اطلاعات دریافتی از طیف فرکانسی و انرژی باقیمانده، مرتبه خود را محاسبه کرده و بر این اساس خوشه‌ها تشکیل می‌شوند. این پروتکل، یک پروتکل کاملاً توزیع‌شده می‌باشد و فرآیند کشف مسیر به‌صورت تصادفی صورت می‌پذیرد. در این پروتکل به‌منظور ارسال داده‌های درون خوشه‌ای،

⁹ Time-Division Multiple Access

¹⁰ Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

¹¹ Quality of Service (QoS)

⁸ Auto Regressive Moving Average

۱-۳ خوشه بندی

باشد، به عنوان یک سرخوشه مستعد شناخته می‌شود و سپس گره‌های مستعد سرخوشه با در نظر گرفتن یک زمان‌سنج تصادفی بر حسب مرتبه خود، به منظور تعیین نهایی سرخوشه با یکدیگر رقابت می‌کنند. در نهایت سرخوشه‌ها انتخاب و خوشه‌بندی براساس نزدیک بودن گره‌های عضو به سرخوشه تشکیل می‌شوند.

۲-۳ مسیریابی

پس از تشکیل خوشه‌ها، فرآیند تنظیم مسیر آغاز می‌شود. در روش پیشنهادی، الگوریتم مسیریابی بدین صورت است که در ابتدا هر سرخوشه پیغام درخواست کشف مسیر (CH-RREQ^{۱۳}) را بر روی کانال کنترلی پخش می‌کند. هر عضو s_i ، پس از دریافت پیام در صورت تکراری نبودن آن، سه شرط زیر را بررسی می‌نماید:

۱. $d(s_{req}, sink) > d(s_i, sink)$. این شرط بیان می‌کند که فاصله گره s_i تا گره چاهک باید کمتر از فاصله گره ارسال‌کننده پیام req تا گره چاهک باشد. برقراری این شرط که یک تکنیک مسیریابی جغرافیایی است، سبب یافتن مسیرهایی با تعداد پرش کمتر می‌گردد.

۲. $e_{s_i} > e_{th}$. این شرط بیان‌گر آن است که گره‌هایی که انرژی آن‌ها از یک سطح آستانه بالاتر است، می‌توانند در نقش گره رله ظاهر شوند. این امر سبب می‌شود که گره‌های با انرژی پایین در روند مسیریابی وارد نشده و طول عمر شبکه افزایش یابد.

۳. شرط سوم بیان می‌کند که گره s_i بایستی به منظور برقراری ارتباط، با گره ارسال‌کننده پیام، کانال خالی مشترک داشته باشند. در صورت تکراری نبودن پیام و برقراری هر سه شرط فوق، گره s_i این پیام را برای همسایگانش ارسال می‌کند. گره‌های عضو واقع در خوشه‌های دیگر پس از دریافت پیام، در صورت تکراری نبودن و برقراری هر سه شرط، این پیام را به سرخوشه مربوطه ارسال می‌کنند؛ این روند تا زمان رسیدن پیام به گره چاهک ادامه می‌یابد.

پس از رسیدن پیام به گره چاهک، یک پیام RREP^{۱۴} که حاوی شماره گره‌های

در ابتدا هر کاربر ثانویه به صورت مجزا و مستقل، به منظور تشخیص حضور کاربر اولیه از طریق الگوریتم آشکارساز انرژی، طیف را مورد سنجش قرار می‌دهد. به منظور نشان دادن در دسترس بودن کانال c از مجموعه C تا کانال موجود، از

متغیر باینری v_c استفاده می‌شود. معیار اصلی در خوشه‌بندی روش پیشنهادی مشابه روش SCEEM، آگاهی از طیف به همراه اطلاع از انرژی گره‌ها می‌باشد. بردار حاصل از طیف‌سنجی گره i در لحظه t به صورت زیر نمایش داده می‌شود [۱۱]:

$$\mathbf{v}_i(t) = [v_1^i(t), v_2^i(t), \dots, v_c^i(t)]^T \quad (۱-۳)$$

پیش‌بینی میانگین حضور کاربر اولیه در یک کانال مشخص، تصمیم‌گیری صحیح‌تری در مورد آینده کانال را به دنبال دارد؛ از این رو بردار میانگین مدت زمان مورد انتظار در دسترس بودن هر کانال برای گره i در لحظه t به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{m}_i(t) = [m_1^i(t), m_2^i(t), \dots, m_c^i(t)]^T \quad (۲-۳)$$

پس از آن هر گره i مرتبه خود را در لحظه t به صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$\mathbf{Y}_i(t) = \sum_{j \in N_j} \mathbf{Y}^{ij}(t) \frac{e_i}{\max_{\forall k \in N_j} \{e_k\}} \quad (۳-۳)$$

که در آن N_i و e_i به ترتیب مجموعه همسایگان و میزان انرژی باقیمانده گره i می‌باشند. همچنین $\mathbf{Y}^{ij}(t)$ مرتبه نسبی در دسترس بودن طیف^{۱۲} برای گره i می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{Y}^{ij}(t) = \frac{1}{C} (1 \cdot \mathbf{A}^{ij}(t)) \quad (۴-۳)$$

در این رابطه $\mathbf{1} = \{1_1, 1_2, \dots, 1_C\}^T$ یک ماتریس باینری می‌باشد که در آن $1_i = 1$ می‌باشد. همچنین $\mathbf{A}^{ij}(t)$ ماتریس در دسترس بودن کانال بین دو گره i و j می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

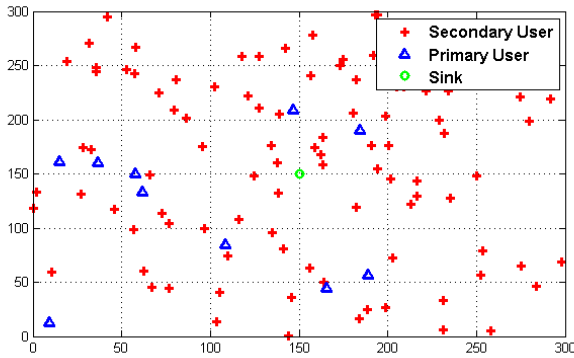
$$\mathbf{A}^{ij}(t) = (\mathbf{v}_i \mathbf{v}_j) \times \min(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) \quad (۵-۳)$$

در صورتی که مرتبه‌ی گره جزء سه تا از بالاترین مرتبه‌ها نسبت به همسایه‌هایش

¹³ Cluster Head Route Request (CH-RREQ)

¹⁴ Route REPLY (RREP)

¹² Relative Spectrum Availability Rank



شکل ۴-۱ شمایی از ساختار شبکه

این حسگرها به صورت دوره‌ای طیف فرکانسی را رصد کرده و با تشخیص حفره‌های طیف، به ارسال اطلاعات دریافتی در مسیر منتهی به گره چاهک می‌پردازند. در سناریوی مورد نظر، ترافیک کاربران اولیه، به صورت نمایی با میانگین دوره فعالیت $\tau_{on} = 0.5$ ثانیه و دوره خاموشی $\tau_{off} = 0.5$ ثانیه، در نظر گرفته شده است. همچنین ۱۰ کانال ترافیکی به منظور ارسال داده مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربران اولیه به صورت تصادفی در این کانال‌ها فعالیت می‌کنند. در شبیه‌سازی، تعدادی کاربر ثانویه بطور تصادفی انتخاب و با بهره‌گیری از روش کدینگ ویدیوی H.264/MPEG-4 [۱۵]، ویدیوی *foreman* را ارسال می‌کنند.

در این بخش، انرژی لازم به منظور ارسال l بیت در فرستنده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۶]:

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\xi_{fs}d^2 & \text{if } d < d_0 \\ lE_{elec} + l\xi_{mp}d^4 & \text{if } d \geq d_0 \end{cases} \quad (۱-۴)$$

در رابطه بالا، d فاصله بین فرستنده و گیرنده، E_{elec} انرژی مصرف شده در قطعات الکترونیکی، ξ_{fs} ضریب تقویت‌کننده رادیویی برای انتشار در مدل فضای باز^{۱۶} و ξ_{mp} ضریب تقویت‌کننده رادیویی برای انتشار در مدل چند مسیری^{۱۷} می‌باشد. همچنین d_0 فاصله آستانه ورود به مدل چند مسیری می‌باشد و از رابطه $d_0 = \sqrt{\frac{\xi_{fs}}{\xi_{mp}}}$ محاسبه می‌گردد. از سوی دیگر

شرکت‌کننده در مسیر و فاصله‌ی آن‌ها از گره رله قبلی می‌باشد، باز می‌گردد. لازم به ذکر است که هر گره با توجه به قدرت سیگنال دریافتی، فاصله خود را تا گره ارسال‌کننده پیام محاسبه می‌کند. گره فرستنده یک زمان‌سنج بر حسب فاصله خود تا گره چاهک در نظر گرفته و تا قبل از به اتمام رسیدن آن تمامی پیام‌های رسیده را دریافت کرده و با توجه به تابع ارزیابی زیر بهترین مسیر را انتخاب می‌کند [۱۴]:

$$D = \frac{1}{\text{Cost.Balance}} \quad (۵-۳)$$

در رابطه‌ی بالا، تابع Cost هزینه برقراری ارتباط در طول مسیر را نشان می‌دهد. از آنجایی که انرژی مصرفی به فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده بستگی دارد، از این رو تابع Cost از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\text{Cost} = \sum_{j=1}^L j W_j = \sum_{j=1}^L j d_{s_{j-1}, s_j}^2 \quad (۶-۳)$$

در این رابطه، W_j متناسب با انرژی مصرفی بین دو گره s_{j-1} و s_j می‌باشد که با توان دوم فاصله بین دو گره رابطه‌ی مستقیم دارد، همچنین L تعداد کل گره‌های شرکت‌کننده در مسیر می‌باشد. Balance نیز درجه توازن مصرف انرژی در بین گره‌های شرکت‌کننده در مسیر است و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{Balance} = \frac{1}{L} \left(W_j - \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L W_j \right)^2 \quad (۷-۳)$$

گره فرستنده مسیری با بیشترین تابع ارزیابی را به عنوان مسیر بهینه انتخاب می‌کند.

۴- ارزیابی عملکرد

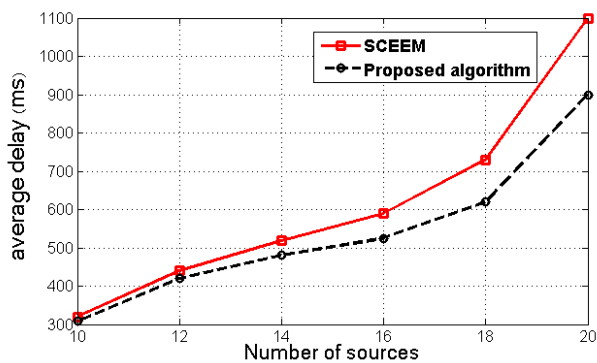
در این بخش، با استفاده از شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در محیط نرم‌افزار MATLAB، به ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی و مقایسه‌ی آن با روش SCEEM می‌پردازیم. فرض می‌شود همانند شکل ۴-۱، ۱۰۰ گره حسگر به همراه ۱۰ کاربر اولیه به صورت تصادفی در یک ناحیه دو بعدی به مساحت 300×300 مترمربع گسترش یافته‌اند.

¹⁵ Adaptive Video Coding

¹⁶ Free space

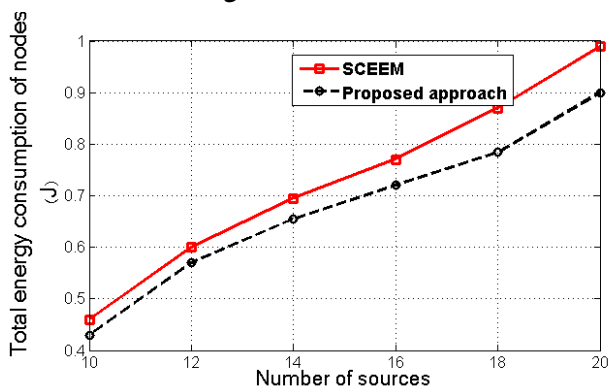
¹⁷ Multi path

در گام دوم، تأثیر افزایش تعداد منابع ویدئویی بر روی میانگین تأخیر بسته‌های دریافتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش تعداد منابع ویدئویی، تقاضا برای در اختیار داشتن پهنای باند بیشتر افزایش یافته و این امر افزایش ترافیک شبکه را به دنبال خواهد داشت. همان‌گونه که در شکل ۳-۴ نیز دیده می‌شود، با افزایش تعداد منابع، الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش SCEEM عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴ میانگین تأخیر بسته‌های دریافتی با افزایش تعداد منابع ویدئویی

شکل ۴-۴ مجموع انرژی مصرفی گره‌ها با افزایش تعداد منابع ویدئویی را نشان می‌دهد. مطابق شکل پروتکل پیشنهادی به دلیل انتخاب مسیرهای بهتر به‌منظور ارسال بسته‌ها، انرژی مصرفی کمتری دارد.



شکل ۴-۴ مجموع انرژی مصرفی با افزایش منابع ویدئویی

در گام سوم تأثیر افزایش نرخ تولید داده از ۱۰۰ کیلوبیت بر ثانیه تا ۶۰۰ کیلوبیت بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور ۲۰ خوشه به همراه ۱۵ منبع ارسال داده در شبکه در نظر گرفته شده است. با افزایش نرخ تولید داده تقاضا برای در اختیار داشتن شکاف زمانی بیشتر از سوی هر یک از منابع افزایش می‌یابد و در صورتی که شکاف‌های زمانی درخواست شده از محدوده قاب TDMA

انرژی مصرفی در گیرنده نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{Rx} = IE_{elec} \quad (2-4)$$

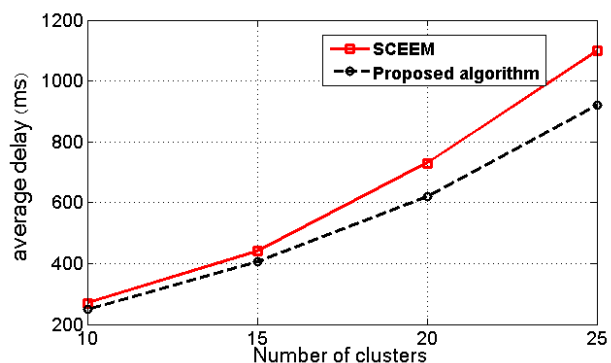
جدول ۱-۴ پارامترهای شبیه‌سازی مورد استفاده در این بخش را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۴ پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
تعداد گره حسگر	۱۰۰
طول شکاف زمانی	۱۲۰۰ bytes
ظرفیت کانال	۲ Mbps
نرخ تولید داده	۱۰۰ Kbps
ξ_{fs}	10^{-11}
ξ_{mp}	$1.3 \times (10^{-15})$
E_{elec}	$5 \times (10^{-8})$

نتایج شبیه‌سازی، حاصل از متوسط‌گیری یکصد بار اجرای برنامه می‌باشد. در نهایت عملکرد روش‌های SCEEM و روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در گام اول، تأثیر تعداد خوشه‌های تشکیل‌شده بر روی میانگین تأخیر بسته‌های دریافتی توسط گره چاهک مورد ارزیابی قرار گرفته است. افزایش تعداد خوشه‌ها سبب افزایش تعداد پرش‌ها در شبکه می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، با افزایش تعداد خوشه‌ها میانگین تأخیر بسته‌های دریافتی افزایش می‌یابد. در الگوریتم پیشنهادی از آنجا که موقعیت گره‌ها در روند مسیریابی در نظر گرفته می‌شود، در نتیجه مسیرهای کوتاه‌تری حاصل شده و به تبع آن تعداد پرش‌ها کاهش می‌یابد که این امر کاهش تأخیر بسته‌های دریافتی را به دنبال خواهد داشت.



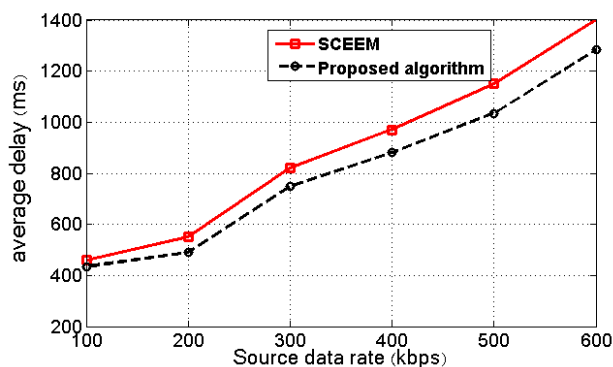
شکل ۲-۴ میانگین تأخیر بسته‌های دریافتی با افزایش تعداد خوشه‌ها

با این حال لازم به ذکر است که امکان استفاده از الگوریتمی که پاسخگوی تمامی نیازهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم رادیو شناختی باشد، وجود ندارد و الگوریتم مناسب، مطابق با نیازهای شبکه انتخاب می‌شود.

مراجع

- [1] L. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, Nov 2002, pp. 102-114.
- [2] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no.4, Aug 1999, pp. 13-18.
- [3] Akan, Ozgur, O. B. Karli, and O. Ergul, "Cognitive radio sensor networks," *Network*, IEEE, vol. 23, no.4, 2009.
- [4] Wilzeck, Andreas, E. Dimitroy, and A. Tissen, "Applications of cognitive radio systems for industrial wireless automation," *Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management*. ACM, 2011.
- [5] Shah, A. Ghalib, V. C. Gungor, and O.B. Akan, "A cross-layer design for QoS support in cognitive radio sensor networks for smart grid applications," *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on*. IEEE, 2012.
- [6] D. Felice, Marco, et al, "Smart radios for smart vehicles: cognitive vehicular networks," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 7, no.2, 2012.
- [7] Bixio, Luca, et al, "Distributed cognitive sensor network approach for surveillance applications," *Advanced Video and Signal Based Surveillance, AVSS'09. Sixth IEEE International Conference on*. IEEE, 2009.
- [8] Bradai, Abbas, et al, "Clustering in cognitive radio for multimedia streaming over wireless Sensor networks," *IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2015.
- [9] Zubair, Suleiman, and N. Fisal, "Reliable geographical forwarding in cognitive radio sensor networks using virtual clusters," *Sensors*, vol. 14, no.5, 2014.
- [10] R. M. Eletreby, H. M. Elsayed, and M. M. Khairy, "CogLEACH: A Spectrum Aware Clustering Protocol for Cognitive Radio Sensor Networks," *IEEE International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Jun 2014.
- [11] M. Ozger and O.B. Akan, "Event-driven spectrum-aware clustering in cognitive radio sensor networks," *IEEE Proceedings INFOCOM*, no. 14-19, Apr 2013, pp. 1483,1491.
- [12] G. A. Shah, F. Alagoz, E. A. Fadel and O. B. Akan, "A Spectrum-Aware Clustering for Efficient Multimedia Routing in Cognitive Radio Sensor Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 7, Sept 2014, pp. 3369-3380.
- [13] Zubair, Suleiman, and N. Fisal, "Reliable geographical forwarding in cognitive radio sensor networks using virtual clusters," *Sensors*, vol. 14, no.5, 2014.
- [14] E. Peil, H. Han, "LEAUCH: low-energy adaptive uneven clustering hierarchy for cognitive radio sensor network," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2015.
- [15] S. Moa, C. Zhso, Z. Zhou, "An improved fuzzy unequal clustering algorithm for wireless sensor network," *Communications and Networking in China (CHINACOM), 6th International ICST Conference on* IEEE, 2011.
- [16] Schwarz, Heiko, D. Marpe, and T. Wiegand, "Overview of the scalable video coding extension of the H. 264/AVC standard," *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 17, no. 9, 2007, pp. 1103-1120.
- [17] Heinzelman, B.Wendi, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture

تجاوز کند، بسته‌های اضافی باید در دوره‌های بعد ارسال شوند که این امر افزایش تأخیر را به دنبال خواهد داشت. شکل ۴-۵ میانگین تأخیر بسته‌های دریافتی با افزایش نرخ تولید داده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری دارد.



شکل ۴-۵ میانگین تأخیر بسته‌های دریافتی با افزایش نرخ تولید داده

لازم به ذکر است در ارسال داده‌های بلادرنگ در صورتی که تأخیر بسته‌های دریافتی از حداکثر تأخیر قابل تحمل بسته‌ها فراتر رود، بسته‌ها از بین رفته تلقی می‌گردند. از آنجا که در پروتکل پیشنهادی میانگین تأخیر انتها به انتهای بسته‌ها در مقایسه با پروتکل SCEEM به میزان قابل توجهی کمتر است، از این رو نرخ تحویل بسته در آن بیشتر است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در الگوریتم پیشنهادی به منظور دستیابی به راندمان بالای انرژی، مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است. پس از انتخاب سرخوشه بر اساس انرژی باقیمانده گره‌ها و اطلاعات حاصل از طیف‌سنجی گره‌ها، خوشه‌ها تشکیل می‌گردند. فرض بر این است که گره‌ها بر اساس قدرت سیگنال دریافتی از گره چاهک قادر به تخمین فاصله خود می‌باشند. در مرحله تنظیم مسیر، گره‌هایی که فاصله کمتری نسبت به گره چاهک داشته باشند، هم‌چنین انرژی آن‌ها از یک سطح آستانه بالاتر باشد و با گره ارسال‌کننده پیام کانال خالی مشترک داشته باشند، می‌توانند در نقش گره رله ظاهر شوند. در نهایت مسیری به عنوان مسیر بهینه انتخاب می‌گردد که هم تعداد پرش کمتری داشته باشد و هم تعادل مصرف انرژی بین گره‌های شرکت‌کننده در مسیر برقرار باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی در مقایسه با پروتکل SCEEM، انرژی مصرفی و تأخیر انتها به انتهای کمتری دارد.

wireless communications, vol. 1, no. 4,2002,pp.660-670.

for wireless microsensor networks, ” IEEE Transactions on