مروری بر تجمیع داده مبتنی بر سنجش فشرده در شبکه های حسگر بی‌سیم

غلامرضا ایمانیان[۱] ، محمدعلی پورمینا[۲*]، احمد صلاحی[۳]

۱: دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد تربت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران
rez.iman@gmail.com
۲*: دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، pourmina@srbiau.ac.ir
۳: دانشیار، پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات، تهران، ایران، salahi@itrc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۳

چکیده

در این مقاله مروری، هدف ما توصیف پیشرفت‌های اخیر شیوه جمع آوری داده مبتنی بر سنجش فشرده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم شامل تلاش‌های صورت گرفته در تحقیقات جاری، چالش‌ها و روندهای تحقیقاتی است. سیگنال‌های تنک و تراکم پذیر در بسیاری از زمینه‌های کاربردی شبکه‌های حسگر مانند نظارت محیطی و مراقبت از وسایل نقلیه حضور دارند. سنجش فشرده واجد ویژگی‌های فراوانی از قبیل سادگی عملیات سنجش و فشرده سازی، عمومیت در سیگنال‌های جمع آوری شده و افت قابل قبول در کیفیت بازسازی سیگنال می‌باشد که آن را برای استفاده در شبکه‌های حسگر جذاب می‌سازد. ازدست رفتن بسته‌ها نیز تقریباً به اندازه پروتکل‌های دیگر به شبکه آسیب نمی‌رساند و فقط برای هر اندازه گیری که به چاهک نرسیده است باعث کمی افت در کیفیت بازسازی سیگنال خواهد شد. بحث را با مقدمه ای مختصر بر نظریه سنجش فشرده آغاز می‌کنیم و سپس استفاده از این شیوه را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم شرح می‌دهیم. در نهایت، مسائل و چالش‌های تحقیقاتی پیش رو مورد بحث قرار می‌گیرد تا چشم اندازی جهت تحقیقات آینده فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تجمیع داده، سنجش فشرده، فشرده سازی داده‌ها.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی، تولید انبوه حسگرهای کوچک با قابلیت‌های سنجش، محاسبه و مخابراتی را میسر ساخته است. هنگامی‌که بسیاری از این حسگرها به صورت مشترک بر محیط‌های بزرگ فیزیکی نظارت می‌کنند ، یک شبکه حسگر بی‌سیم[۱] (WSN) تشکیل می‌شود. برای استقرار آسان حسگرها این تجهیزات باید ارزان و کوچک بوده و دارای طول عمر زیادی باشند که به نوبه خود باعث میشود ارائه سخت افزار و نرم افزار بسیار کارآمد در توسعه آنها اهمیت پیدا کند. به این ترتیب پروتکل‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم باید بگونه ای دقیق طراحی شوند که استفاده بسیار کارآمد از منابع محدود در زمینه انرژی، محاسبات و ذخیره سازی را ممکن سازند[۱-۳]. در یک شبکه حسگر، داده‌ها در سراسر یک ناحیه توسط گره‌های حسگر جمع آوری شده و در اختیار یک گره مرکزی بنام چاهک[۲] قرار می‌گیرند تا پس از پردازش و تحلیل برای کاربردی خاص مورد استفاده قرار گیرند. در بسیاری از موارد داده‌های تولید شده در حسگرهای مختلف همچنانکه به سمت چاهک هدایت می‌شوند می‌توانند مشترکاً مورد پردازش قرارگیرند. تجمیع داده درون شبکه ای به موضوع پردازش توزیع شده داده‌ها می‌پردازد. شیوه‌های تجمیع داده همچنانکه به چگونگی هدایت بسته‌های داده درون شبکه مربوط می‌شوند بصورت تنگاتنگی به چگونگی جمع آوری داده‌ها در گره‌های حسگر نیز مرتبط می‌باشند. این شیوه‌ها ، بعنوان مثال از طریق کاهش تعداد ارسال و دریافت‌ها یا کاهش طول بسته‌های ارسالی، اثر مهمی روی مصرف انرژی و کارآمدی کلی شبکه نیز می‌گذارند. در ابتدا شیوه‌های تجمیع شامل روش‌های متفاوت مسیریابی بسته‌هایی بود که از ترکیب داده‌های

رسیده از منابع مختلف فراهم آمده بودند و بایستی به سمت مقصد یکسانی هدایت می‌شدند. به عبارت دیگر این شیوه‌ها الگوریتم‌های مسیریابی ساده ای بودند که با الگوریتم‌های متداول شبکه‌های تک منظوره[۳] در معیاری که برای انتخاب مسیر مورد استفاده قرار می‌گرفت متفاوت بودند. شیوه‌های اخیر نه تنها مساله مسیریابی را در نظر دارد بلکه به مکانیزم‌های بازنمایی و ترکیب کارآمدتر داده‌ها نیز می‌پردازد. از جمله این شیوه‌ها، فشرده سازی غیر متمرکز[۴] و توزیع شده[۵] داده‌های شبکه ای به کمک نظریه سنجش فشرده می‌باشد. سنجش فشرده به عنوان یک مدل نوید بخش برای جمع آوری سیگنال‌های تنک دارای ابعاد بالا[۶] ظاهر شده است. بر اساس چارچوب سنجش فشرده می‌توان یک سیگنال دارای ابعاد بالا را به شرط آنکه به اندازه کافی تنک باشد از روی تعداد کمی از تصاویرش که بصورت تصادفی اندازه گیری شده با دقت زیاد بازیابی کرد [۴-۷]. به عبارت دقیق تر، این نوع فشرده سازی یک تبدیل خطی ساده است که با استفاده از ماتریس‌های تصادفی و مستقل از پارامترهای سیگنال انجام می‌شود. به منظور بازسازی سیگنال اصلی از روی نسخه فشرده آن ، چندین شیوه بازسازی پیشنهاد شده است که هر یک از نظر کارایی فرایند بازیابی و پیچیدگی محاسباتی آن با دیگری متفاوت است[۸-۱۱]. موضوع سنجش فشرده در سال‌های اخیر با دو کاربرد مختلف در شبکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. کاربرد اول سنجش فشرده در تشخیص عیوب شبکه[۷] است که موضوع آن تعیین و تشخیص وضعیت سلامت گره‌ها و لینک‌های داخلی غیرقابل دسترس شبکه با استفاده از داده‌های جمع آوری شده در نقاط انتهایی قابل دسترس شبکه می‌باشد [۱۲]. کاربرد دیگر آن تجمیع داده انرژی-کارآمد است که موضوع این مقاله می‌باشد. در ادامه ابتدا در بخش دوم اصول سنجش فشرده و کاربرد آن در پردازش توزیع شده داده‌های شبکه ای توضیح داده خواهد شد. در بخش سوم شیوه‌های جمع آوری داده مبتنی بر سنجش فشرده در شبکه‌های WSN مرور خواهد شد. این فصل ابتدا با نظریه بازسازی سیگنال مبتنی بر سنجش فشرده آشنا خواهیم شد. سپس پیشینه تجمیع داده مبتنی بر سنجش فشرده مرور خواهد شد.

۲- اصول سنجش فشرده و کاربرد آن در پردازش توزیع شده داده‌های شبکه ای

شبکه‌ای متشکل از تعداد N گره حسگر که هر یک حاوی جزئی از اطلاعات یا داده r_j , $j=1,\ldots,N$ می‌باشد را در نظر بگیرید. این داده‌ها کمیت‌هایی مرتبط با خصوصیات یا اندازه گیری‌های انجام شده در حسگر هستند. این داده‌ها تماما در یک بردار بصورت $\mathbf{r}=[r_1\ r_2 \ldots r_N]^T \in R^N$ منظم شده اند که برای تاکید بر طبیعت توزیع شده داده‌ها و این حقیقت که داده‌ها می‌توانند از طریق زیرساخت ارتباطی موجود در شبکه به اشتراک گذاشته شوند ، داده شبکه ای[۸] نام گرفته است. طول این بردار می‌تواند خیلی بزرگ باشد، بنابراین حتی فرایند جمع آوری بردار $\mathbf{r}$ در یک نقطه نیز که حداقل نیازمند N ارسال داده می‌باشد کار مشکلی است. با این حال به کمک نظریه سنجش فشرده می‌توان بصورت کارآمد و در فرآیندی غیر متمرکز ، نسخه بسیار فشرده ای از $\mathbf{r}$ را ساخت بطوریکه از روی این نسخه فشرده با دقتی مناسب بتوان بردار $\mathbf{r}$ را بازسازی کرد.

به منظور اینکه توالی زمانی داده‌های جمع آوری شده از N گره شبکه حسگر بی‌سیم در نظر گرفته شود، سیگنال جمع آوری شده در لحظه t را با $\mathbf{r_t}$ نمایش می‌دهیم. بشرط آنکه این بردار در یک لغت نامه[۹] مانند $\mathbf{D_t}\in R^{N\times \tilde{N}}$ $(N\le \tilde{N})$ توسط بردار $\mathbf{s_t}\in R^{\tilde{N}}$ بصورت تنک قابل نمایش باشد یعنی $\mathbf{r_t=D_t s_t}$ ، در هر لحظه t، تنها با جمع آوری تعدادی اندازه گیری فشرده مطابق رابطه خطی زیر در بردار کوچکتر $\mathbf{y_t}$ به طول L $(L<N)$، می‌توانیم بردار داده $\mathbf{r_t}$ را بصورت تقریبی بازسازی کنیم:

$$\mathbf{y_t} = \boldsymbol{M_t}\, \boldsymbol{r_t} + \boldsymbol{z} = \boldsymbol{A_t}\, \boldsymbol{s_t} + \boldsymbol{z} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا $\mathbf{z}\in R^L$ نویز اندازه گیری، $\mathbf{M_t}\in R^{L\times N}$ ماتریس سنجش و $\mathbf{A_t=M_tD_t}$ ماتریس سنجش معادل[۱۰] می‌باشند. به بیان روشن تر، با فرض مشخص بودن دو ماتریس $\mathbf{M_t}$ و $\mathbf{D_t}$ برای چاهک، این گره با در اختیار داشتن بردار اندازه گیری فشرده $\mathbf{y_t}$ که گاهی بردار سنجش یا بردار تصاویر نیز نامیده می‌شود، می‌تواند جواب‌های معادله نامعین رابطه (۱) را از حل مساله بهینه سازی زیر بدست آورد:

$$\hat{\boldsymbol{s}}=\arg\min\|\boldsymbol{s}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}\|_2 \le \eta \qquad (۲)$$

بطوریکه η تخمینی از سطح نویز می‌باشد. این مساله بهینه سازی به مساله حذف نویز با جستجوی فضای پایه[۱۱] (BPDN) نیز شهرت دارد. اگر میزان تنکی سیگنال واقعی شبکه را با رابطه $k=\|\mathbf{s}\|_0$ تعریف کنیم اثبات می‌شود که برای بازسازی سیگنال در حضور نویز با استفاده از ماتریس‌هایی که بصورت تصادفی تولید شده اند تنها نیاز به تعداد کمی اندازه گیری فشرده از مرتبه $\mathbf{O}(k\,log(\tilde{N}/k))$ می‌باشد [۱۳]. چاهک با استفاده از جواب‌های بدست آمده از مساله بهینه سازی فوق تقریبی از بردار $\mathbf{r_t}$ را بصورت $\tilde{\mathbf{r}}_t=\mathbf{D_t}\tilde{\mathbf{s}}_t$ بدست خواهد آورد.

۳- مروری بر شیوه‌های جمع آوری داده مبتنی بر سنجش فشرده

۳-۱- تشکیل بردار سنجش در فضا

از اولین کارهایی که از شیوه سنجش فشرده برای تجمیع داده استفاده می‌کرد کاری بود که برای شبکه ای تک پرش و بدون پردازش درون شبکه ای ارائه شده بود ولی از روشی هوشمندانه برای محاسبه غیر متمرکز بردار تصاویر داده‌های شبکه استفاده می‌کرد [۱۴]. عضوهای ماتریس سنجش $\mathbf{M}=\{M_{i,j}\}$ با روشی توزیع شده در بین n گره حسگر شبکه تولید می‌شدند . به این ترتیب که به هر گره حسگر اجازه داده می‌شد با عددی نظیر آدرس منحصر بفرد خود، (در حالت ساده مثلا j که $j=1,\ldots,N$ است)، به عنوان خوراک[۱۲] ، یک مولد اعداد شبه تصادفی را راه اندازی کرده و تعداد L عدد تصادفی $\{M_{i,j}\}_{i=1}^{L}$ را برای ستون j ام ماتریس سنجش تولید کند. با آگاهی چاهک از آدرس تمام حسگرها این گره نیز قادر بود که ماتریس سنجش را بدون ارتباط با گره‌ها بدست آورد و برای بازسازی داده‌های شبکه استفاده کند. پس از تولید ستون‌های ماتریس سنجش در گره‌های مربوطه، گره j ام داده r_j خود را در اعداد $\{M_{i,j}\}_{i=1}^{L}$ ضرب کرده و بردار L عضوی زیر را بدست می‌آورد:

$$\boldsymbol{v}_j = (M_{1,j}\, r_j\ ,\ \ldots\ ,\ M_{\boldsymbol{L},j}\, r_j)^{\boldsymbol{T}} \quad , \qquad j = 1, \cdots, N \tag{۳}$$

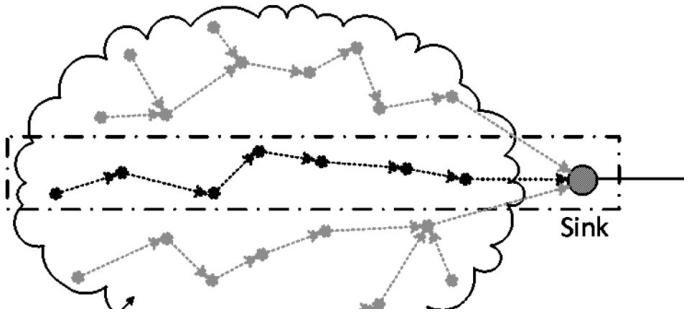
تمام گره‌ها بصورت همدوس[۱۳] ولی در L شکاف زمانی مختلف v_j ها را بصورت آنالوگ برای چاهک ارسال می‌کنند، به این ترتیب که اعضاء اولین سطر v_j ها بصورت همزمان در اولین شکاف زمانی، اعضاء دومین سطر v_j ها در دومین شکاف زمانی، ... و اعضاء Lامین سطر v_j ها در شکاف زمانی Lام بصورت همزمان ارسال می‌شوند. بخاطر طبیعت جمع آثار امواج رادیویی در انتهای L شکاف زمانی سیگنالی که در چاهک حاصل می‌شود عبارت است از:

$$\boldsymbol{y} = \sum_{j=1}^{N} \boldsymbol{v}_j + \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{M}\,\boldsymbol{r} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{۴}$$

در این رابطه ε نویز تولید شده در ارسال رادیویی به چاهک می‌باشد. اگر چه تشکیل بردار سنجش در فضا ازجمله مزایای این روش است ولی مشکل این روش نیاز به همزمان سازی در بین گره‌های حسگر شبکه است.

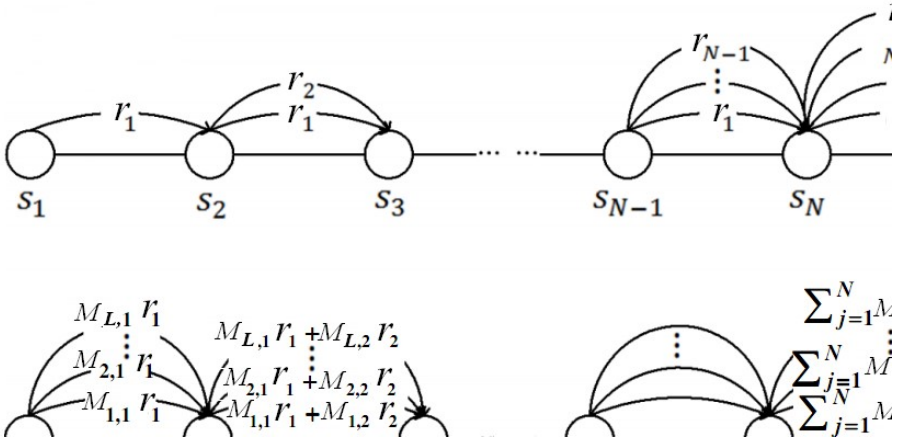
۳-۲- تشکیل بردار تصاویر روی درخت

پیاده سازی شیوه سنجش فشرده در شبکه‌های چند پرشی با استفاده از تجمیع داده با مسیریابی درختی[۱۴] توسط مقالات [۱۵, ۱۶] ارائه شد. در شکل ۱ چنین ساختاری در یک شبکه حسگر نمایش داده شده است. همچنین روی ساختار درختی این شکل یک مسیر ساده و البته نمونه برای دسترسی به چاهک بصورت پررنگ تر مشخص شده است. فرض می‌کنیم که این مسیر متشکل از N حسگر s_1 ، s_2 و ... و s_N باشد که به چاهک ختم می‌شود. همچنین داده خام قرائت شده در گره s_j را با r_j نمایش می‌دهیم.



شکل۱: تجمیع داده در یک شبکه حسگر چند پرش با ساختار درختی [۱۵]

راه متداول و بدون استفاده از شیوه سنجش فشرده برای ارسال داده r_j به چاهک در شکل۲ به تصویر کشیده شده است. گره s_1 داده قرائت شده خود r_1 را برای s_2 ، گره s_2 داده قرائت شده خود یعنی r_2 و داده دریافتی از s_1 یعنی r_1 را با هم برای s_3 ارسال می‌کند و الی آخر. در انتهای مسیر نیز گره s_N تمام N داده قرائت شده توسط گره‌ها را به چاهک ارسال می‌کند.



شکل۲: مقایسه جمع آوری داده در دو حالت a) بدون استفاده از شیوه سنجش فشرده و b) با استفاده از این شیوه در یک مسیر چند پرشی [۱۵]

مطابق آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده است ایده پایه شیوه سنجش فشرده در ساختار درختی اینگونه است که گره s_1 داده خام خود r_1 را در عضو $M_{i,1}$ ماتریس سنجش ضرب کرده و نتیجه را برای s_2 ارسال می‌کند. به محض دریافت این پیام ، s_2 داده خام خود r_2 را در $M_{i,2}$ ضرب کرده و مجموع $M_{i,1}+M_{i,2}$ را به s_3 ارسال می‌کند. بطور مشابه هر گره s_j با اضافه کردن حاصلضرب خود $M_{i,j}\,r_j$ به مجموع دریافت شده از گره قبلی، مجموع جدید را به گره بعدی رله می‌کند. درنهایت چاهک مجموع وزن داری از تمام مقادیر قرائت شده در گره‌های این مسیر و دیگر مسیرها را بصورت $\Sigma_j M_{i,j}\,r_j$ دریافت می‌کند. این فرآیند L بار تکرار می‌شود، $i=1,\ldots,L$، تا تمام اعضاء بردار تصاویر $\boldsymbol{y}$ در چاهک تکمیل شوند. در جمع آوری داده حسگرها بدون استفاده از شیوه سنجش فشرده مشاهده می‌شود هرچه که گره حسگر به برگ‌های درخت[۱۵] نزدیکتر باشد تعداد بسته‌های کمتری را باید ارسال کند و بالعکس هرچه گره به چاهک نزدیکتر باشد تعداد ارسال‌ها بیشتر بوده و انرژی بیشتری توسط گره مصرف می‌شود. به این ترتیب گره حسگری که به چاهک نزدیکتر است زودتر انرژی خود را از دست داده و طول عمر شبکه حسگر بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با استفاده از شیوه سنجش فشرده در فرآیند جمع آوری داده، هر گره بازای یک مجموعه N تایی از گره‌های حسگر لازم است که تعداد ثابتی بسته (L بسته) ارسال کند. به این ترتیب تعداد ارسال‌ها برای جمع آوری داده N حسگر با استفاده از این شیوه L×N ارسال خواهد بود. وقتیکه N عدد بزرگی بوده و L خیلی کوچکتر از N باشد این شیوه با کاهش قابل توجه تعداد ارسال‌ها باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه خواهد شد.

با توجه به شکل ۲ کاملا مشهود است که در حالت استفاده از شیوه سنجش فشرده اولین L گره حسگر تعداد بسته‌های بیشتری را ارسال می‌کنند. این موضوع در شرایطی که L در مقایسه با N خیلی کوچک نباشد باعث افت عملکرد شیوه می‌شود. با وجود این نقص، روش فوق از این مزیت برخوردار است که چون جمع آوری داده همواره بر روی یک درخت با حد اقل مسافت[۱۶] (SPT) تا گره چاهک انجام می‌گیرد، دو مساله سنجش و مسیریابی کاملا از یکدیگر جدا می‌شوند. به این ترتیب این روش تجمیع داده به کمک شیوه سنجش فشرده نیازی به طراحی یک مسیریابی پیچیده منطبق با تشکیل عناصر بردار سنجش ندارد. زیانگ و دیگران [۱۷] نشان داده اند در شرایطی که درخت شبکه برگ‌های زیادی داشته باشد کاربرد شیوه سنجش فشرده با استفاده از ماتریس‌های تصادفی کامل[۱۷] که اصطلاحا سنجش تصادفی چگال[۱۸](DRP) نامیده می‌شود ممکن است نتواند تعداد ارسال‌ها و نتیجتا انرژی مصرفی کل را در مقایسه با تجمیع داده بدون شیوه سنجش فشرده کاهش دهد. بر اساس این واقعیت، برخی پژوهش‌ها افزایش انرژی-کارآمدی با استفاده از کاربرد ماتریس‌های سنجش تنک[۱۹] (SRP) در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چند پرشی را مورد بررسی قرار داده اند. استفاده از

ماتریس‌های سنجش تنک در تجمیع داده مبتنی بر سنجش فشرده به معنی کاهش تعداد حسگرهای شرکت کننده در تشکیل اعضا بردار سنجش است که به نوبه خود کاهش قابل توجه هزینه حمل داده‌ها در مقایسه با سنجش چگال را نتیجه می‌دهد. در ادامه با مهمترین روش‌های سنجش تنک آشنا خواهیم شد.

۳-۳- تشکیل فرصت طلبانه بردار تصاویر[۲۰] با حرکت در کوتاه ترین مسیر

این روش و روش دیگری که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد توسط لی و دیگران [۱۸] به منظور افزایش انرژی-کارآمدی با استفاده از کاربرد ماتریس‌های تنک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چند پرشی ارائه شده است. پیش از آن وانگ و دیگران [۱۹] نشان داده بودند که استفاده از ماتریس‌های تصادفی تنک بعنوان ماتریس سنجش در شیوه سنجش فشرده بطوریکه اعضاء آن از رابطه زیر انتخاب شوند ، می‌تواند تعداد داده‌هایی را که باید برای تشکیل بردار سنجش در شبکه حسگر حمل شود کاهش داده و باعث افزایش انرژی-کارآمدی در شبکه شود ولی راه کاری برای مساله توام مسیریابی و فشرده سازی داده در یک سناریوی چند پرشی ارائه نکرده بودند:

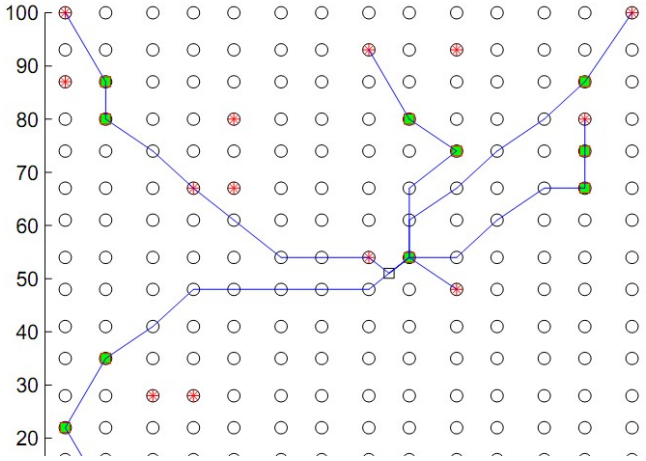
$$M_{i,j} = \sqrt{s} \times \begin{cases} +1 & with\ prob.\ \frac{1}{2s} \\ 0 & with\ prob.\ 1-\frac{1}{s} \\ -1 & with\ prob.\ \frac{1}{2s} \end{cases} \quad (۵)$$

در این رابطه s پارامتری است که میزان تنکی سطرهای ماتریس سنجش را کنترل می‌کند. انتخاب این پارامتر بصورت $s=N/log(N)$ باعث می‌شود که گره حسگر با احتمال $1/s$ داده خود را ارسال کند. اثبات می‌شود انتخاب فوق تعداد ارسال‌های لازم برای تشکیل هر عضو بردار سنجش را از عددی با مرتبه N در روش DRP به عددی با مرتبه $log(N)$ در روش SRP کاهش خواهد داد. در این روش مشابه آنچه که در مورد DRP قبلا گفته شد، فرض می‌شود ماتریس سنجش هم برای چاهک و هم برای گره‌های حسگر شبکه مشخص است. البته هر گره حسگر فقط نیاز دارد که از اعضاء ستون نظیر خود در این ماتریس مطلع باشد. به این ترتیب بر اساس وجود یک عضو غیر صفر(± 1) در این ستون که با احتمال$1/s$ رخ می‌دهد هر گره تصمیم می‌گیرد که اندازه گیری خود را از طریق مسیری با حداقل فاصله به چاهک ارسال کند. در گره چاهک این اندازه گیری‌های جزئی با یکدیگر جمع شده و به این ترتیب یک عضو ازبردار تصاویر تشکیل خواهد شد. هرچه تعداد گره‌های فعال در اندازه گیری که به یک مسیر با حداقل فاصله از چاهک تعلق می‌گیرند بیشتر باشد هزینه ارسال کل کاهش بیشتری خواهد یافت. باید توجه داشت که مسیر بهینه برای مسیریابی در هر سطر ماتریس سنجش، درخت حداقلی اشتینر[۲۱] (MST) است که گره‌های فعال نظیر آن سطر را با کمک گره‌های دیگری که فقط ارسال کننده هستند و سنجش انجام نمی‌دهند به چاهک متصل می‌کند. در مرجع [۱۸] ادعا شده است از لحاظ انرژی کارآمدی تفاوت مسیر یابی روی این درخت بهینه نسبت به مسیریابی کوتاه ترین مسیر برای ابعادی از شبکه حسگر که در مرجع مذکور درنظرگرفته شده قابل توجه نیست.

۳-۴- تشکیل بردار تصاویر با استفاده الگوریتم LCPR[22]

ابتدا نظیر هر عضو بردار سنجش یک گره شروع کننده مسیر بصورت تصادفی از کل گره‌های شبکه حسگر بی‌سیم انتخاب می‌شوند. گره‌های بعدی هر مسیر که در سنجش مشارکت دارند با روشی تکراری به شرط آنکه از چهار شرط ذیل برخوردار باشند از میان گره‌های باقیمانده شبکه انتخاب می‌شوند: الف) در محدوده مخابراتی گره فعلی باشند. ب)از گره فعلی به گره چاهک نزدیکتر باشد. ج) مسیر بصورت متقاطع از گره چاهک عبور نکند. د) در اثر اضافه شدن این گره به مسیر پارامتر تجانس[۲۳] که تا میانه مسیر بین لغت نامه سیگنال شبکه و ماتریس سنجش ناقص فعلی بدست آمده، حداقل شود. چنانچه گره حسگری با این شرایط در ادامه مسیر تا چاهک وجود نداشته باشد، سنجش مربوط به این مسیر خاتمه یافته و اندازه گیری بدست آمده در گره فعلی از طریق باقیمانده گره‌ها بر اساس کوتاهترین مسیر به چاهک ارسال می‌شود. باید توجه داشت که در بین گره‌های ادامه هر مسیر نمی‌توان از گره‌های شروع کننده مسیرهای دیگر برای مشارکت در سنجش مسیر جاری استفاده کرد ولی استفاده از این گره‌ها برای مسیریابی در آن مانعی

ندارد. پس از تکمیل سطر نظیر اولین مسیر در ماتریس سنجش مسیرهای نظیر سطرهای بعدی نیز با انتخاب گره‌های شروع کننده باقیمانده که تاکنون در هیچ اندازه گیری شرکت نکرده اند تکمیل می‌شود.در شکل ۳ مسیریابی بدست آمده توسط الگوریتم بالا در شبکه ای متشکل از ۲۵۶ گره حسگر که پس از انتخاب ۱۶ مسیر سنجش خاتمه یافته نمایش داده شده است. محدوده مخابراتی ۱۶ متر فرض شده و لغت نامه ای که سیگنال در آن بازنمایی تنک دارد نیز DCT است. در این شبکه تنها تعداد ۲۶ گره حسگر در شیوه سنجش فشرده مشارکت داشته اند.



شکل۳: نمایش نتیجه اجرای الگوریتم *LCPR* در شبکه ای متشکل از ۲۵۶ گره حسگر با تعداد ۱۶ سنجش در شرایط استفاده از لغت نامه *DCT* برای بازنمایی سیگنال [۱۸]

گره‌هایی که به شکل ستاره قرمز مشخص شده اند گره‌های فعال شروع مسیرها می‌باشند. گره‌های سبز رنگ گره‌های فعالی هستند که در میانه مسیرها با یک اندازه گیری غیر صفر در سنجش شرکت داشته اند. گره‌های سفید رنگی که توسط مسیرها به یکدیگر متصل می‌باشند عضو نظیر شان در ماتریس سنجش صفر می‌باشد و در سنجش آن مسیر مشارکتی ندارند. در شکل مسیرهایی که تنها یک گره مشارکت کننده در سنجش داشته اند نشان داده نشده اند. در بین دو روش ارائه شده اخیر، نتایج شبیه سازی‌های انجام شده در مرجع [۱۸] حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم LCPR از نظر انرژی-کارآمدی و میزان خطای بازسازی داده‌ها می‌باشد. البته باید توجه داشت که این الگوریتم ماتریس سنجش یا همان ماتریس مسیریابی را بصورت متمرکز(در گره چاهک) محاسبه می‌کند.

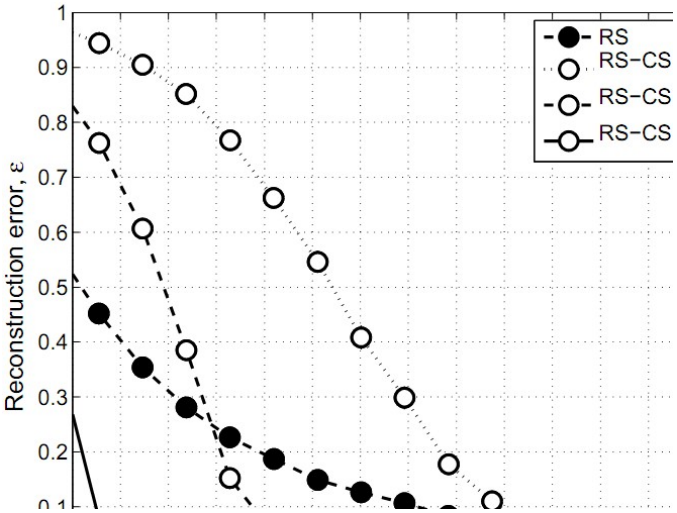
کوور و دیگران [۲۰] روش دیگری را برای حل مساله توام مسیریابی و سنجش فشرده با شیوه SRP در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چند پرشی ارائه کرده اند که می‌توان آنرا بصورت غیر متمرکز اجرا کرد. مزیت دیگر کار ارائه کنندگان این روش آنست که استفاده از شیوه سنجش فشرده به همراه یک الگوریتم واقعی مسیریابی مانند مسیریابی جغرافیایی[۲۴] را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ممکن ساخته است.

۵-۳- اهمیت انتخاب لغت نامه مناسب برای بازنمایی تنک داده‌های شبکه‌ای

هر دو پژوهش لی و کوور نشان می‌دهد تا زمانیکه لغت نامه مناسبی برای بازنمایی به اندازه کافی تنک داده‌های شبکه ای وجود نداشته باشد عملکرد شیوه سنجش فشرده در برخی اوقات در حد روش‌های استاندارد تجمیع داده است که از فرو نمونه برداری[۲۵] داده‌های شبکه ای و سپس درونیابی برای بازسازی داده‌ها بهره می‌برند. به عنوان مثال در شکل ۴ نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند تجمیع داده با استفاده از شیوه سنجش فشرده پیشنهادی توسط کوور ، همچنین تجمیع داده مبتنی بر سنجش فشرده با نمونه برداری تصادفی[۲۶](RS) و درونیابی در شبکه حسگر بی‌سیمی که متشکل از ۴۰۰ گره می‌باشد نمایش داده شده است.

سیگنال جمع آوری شده از نوع مصنوعی و سنتز شده بوده که تنکی آن در لغت نامه DCT توسط پارامتر p_d کنترل می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد تنها زمانیکه بازنمایی سیگنال به اندازه کافی تنک باشد($p_d \geq 0.5$)، شیوه سنجش فشرده (در نمودار با RS-CS مشخص

شده است) نتایج بهتری را نسبت به درونیابی(در نمودار با RS مشخص شده است) بدست خواهد آورد بطوریکه با استفاده از شیوه سنجش فشرده می‌توان تنها با ارسال نصف تعداد بسته‌هایی که در روش درونیابی مورد نیاز است(حدود ۹۰۰ بسته) به خطای بازسازی مشابهی در چاهک دست یافت.

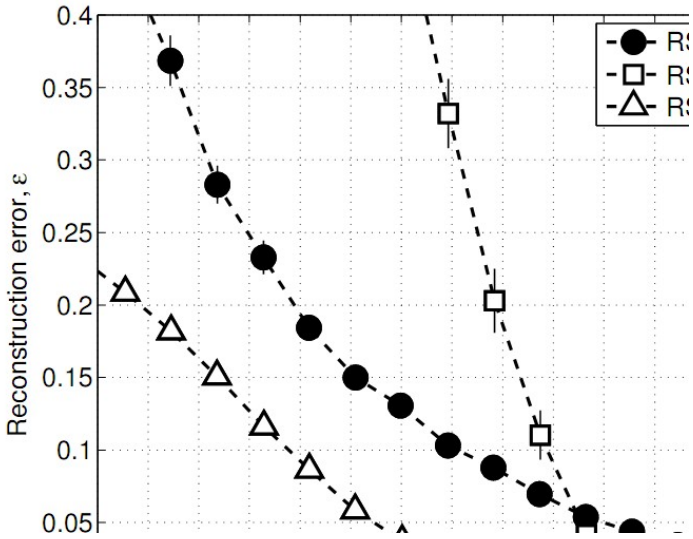


شکل۴: مقایسه کیفیت بازسازی سیگنال تجمیع شده بر اساس شیوه سنجش فشرده با روش درونیابی [۲۰]

کوور همچنین نشان داده تبدیل DCT ، موجک و تبدیل‌های متعارفی از این قبیل، معمولا در بازنمایی تنک سیگنال‌های واقعی قرائت شده در شبکه‌های حسگر موفق عمل نمی‌کنند و نتیجتا شیوه تجمیع داده به کمک سنجش فشرده عملکرد بدی خواهد داشت. به همین دلیل جهت گیری تحقیقات بعدی طوری بوده که علاوه بر انتخاب ماتریس مسیریابی تنک که متناظر سنجشی انرژی–کارآمد است، لغت نامه انتخابی نیز در بازنمایی تنک سیگنال موفق عمل کند.

۶-۳- کاربرد تبدیل PCA [۲۷]بعنوان فرآیند یادگیری لغت نامه و مزایای آن

به منظور یافتن لغت نامه ای که بتواند سیگنال‌های واقعی اندازه گیری شده توسط حسگرها را به خوبی تنک سازد، کوور و دیگران تبدیل PCA را پیشنهاد کردند[۲۱, ۲۲]. PCA با استخراج همبستگی سیگنال‌های شبکه حسگر این قابلیت را ایجاد می‌کند که بتوان شیوه سنجش فشرده را در مورد سیگنال‌های واقعی غیرایستان نیز بکار برد. اساس نظریه PCA بر مبنای بسط K-L[۲۸] بنا شده است. این بسط روشی است برای بازنمایی یک سیگنال عمومی N بعدی بصورت تقریبی از بهترین p مؤلفه ممکن در شرایطی که $p<N$ بوده و همچنین اطلاعات کاملی از ساختار همبستگی سیگنال در دست باشد. در موارد عملی که این ساختار ابتدائا مشخص نیست از تبدیل PCA که بر تخمین ماتریس کوواریانس سیگنال تکیه دارد بجای K-L استفاده می‌شود. در شکل ۵ مقایسه عملکرد سه روش تجمیع داده مختلف: الف) شیوه بازیابی توام سنجش فشرده و PCA ، ب) تجمیع داده با استفاده از شیوه نمونه برداری تصادفی(RS) و درونیابی ، ج) شیوه سنجش فشرده با تبدیل DCT نمایش داده شده است. مشخصات شبکه WSN شبیه سازی شده مشابه مواردی است که در رابطه با شکل ۴ توضیح داده شد.

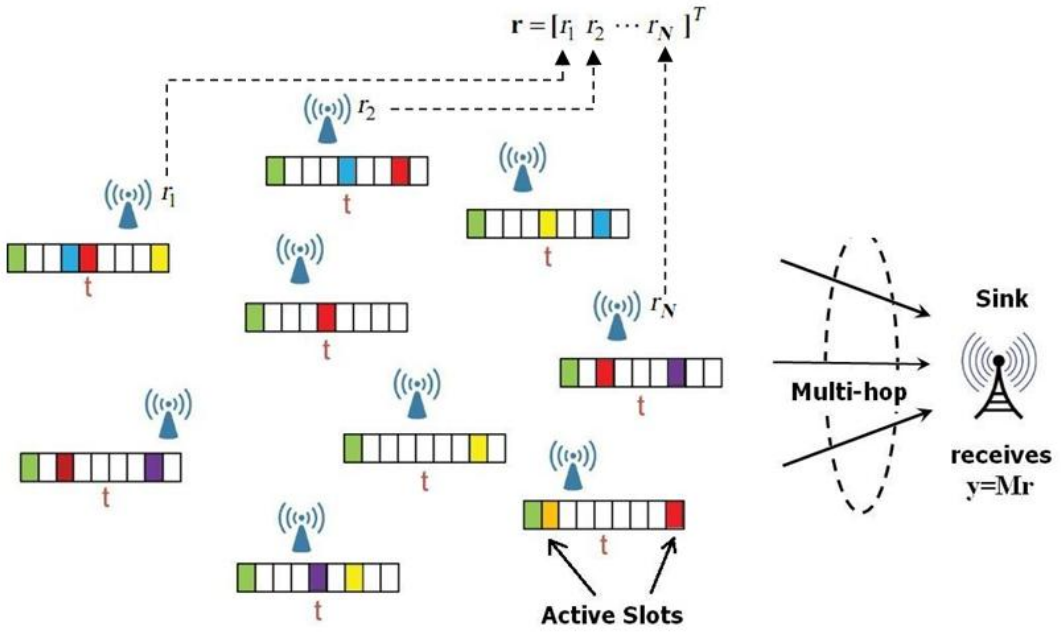


شکل۵: مقایسه عملکرد سه شیوه بازیابی مختلف برای سیگنال جمع آوری شده در یک شبکه *WSN* [۲۱]

چون سیگنال در فضای DCT تنک نمی‌باشد عملکرد نامطلوب شیوه CS در حالتیکه از DCT برای بازنمایی سیگنال استفاده شده است در شکل کاملا مشخص است. برخلاف DCT وقتی که از تبدیل PCA برای بازنمایی سیگنال استفاده شده شیوه CS بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. در مورد سیگنال‌های واقعی چون ساختار همبستگی سیگنال که توسط مشخصات آماری سیگنال یعنی میانگین نمونه و ماتریس کوواریانس نمونه استخراج می‌شود، در طول دوره‌های طولانی تجمیع داده احتمالا ثابت نمی‌ماند کوور پیشنهاد کرده است که در حین دوره جمع آوری داده، در بازه‌های زمانی معین مشخصات آماری فوق با داده‌های تمام حسگرها آموزش داده شود(مرحله آموزش[۲۹])، سپس مشخصات بدست آمده برای بازه زمانی دیگری که داده‌های بخشی از حسگرها (و نه تمام آنها) بر اساس شیوه توام سنجش فشرده و PCA جمع آوری می‌شود مورد استفاده قرار گیرد(مرحله دیده بانی[۳۰]). بر اساس این پیشنهاد، به تناوب، این دو مرحله در طول زمان جمع آوری داده تکرار شوند. علاوه بر این مزیت که با انتخاب تبدیل PCA به لغت نامه مناسب برای بازنمایی تنک داده‌های شبکه ای بر اساس یک فرآیند یادگیری و کاملا منطبق با مشخصات واقعی سیگنال‌ها دست می‌یابیم، مزیت دیگر این روش بر تبدیل‌های مرسوم دیگر مانند DCT و ویولت آنست که این تبدیل برای توپولوژی‌هایی که پراکندگی حسگرها بصورت نامنظم و غیر مشبک[۳۱] می‌باشد نیز قابل استفاده است.

۷-۳- نمونه برداری معین[۳۲] بجای نمونه برداری تصادفی از داده‌های شبکه حسگر بی‌سیم

استراتژی جمع آوری داده که در شیوه توام سنجش فشرده و PCA توسط کوور استفاده می‌شود بسیار ساده است بطوریکه در هر شکاف زمانی t از مرحله دیده بانی، هر گره حسگر بصورت تصادفی و بر اساس احتمال معین L/N فعال شده و داده خود را قرائت می‌کند. بنابراین از بین N حسگر موجود در کل شبکه بطور متوسط تعداد L گره حسگر هر یک بسته ای را که حاوی داده قرائت شده خود است ارسال می‌کند. در شکل ۶ بصورت ساده جمع آوری داده از گره‌های شبکه حسگر بی‌سیم بر اساس این روش نمایش داده شده است. گره‌ها طبق زمانبندی تعیین شده توسط چاهک برای دوره دیده بانی، فعال شده عمل سنجش را انجام می‌دهند (شکاف‌های زمانی که بصورت رنگی نشان داده شده اند) و سپس بر اساس ارسال چند پرشه داده خود را تحویل چاهک می‌دهند.



شکل۶: جمع آوری داده از گره‌های شبکه حسگر بی‌سیم بر اساس سنجش فشرده

هوشمند [۲۳] در پژوهشی جدیدتر استراتژی دیگری ارائه کرد که در آن در هر شکاف زمانی دقیقا L حسگر بر اساس یک زمانبندی از پیش تعریف شده و معین که توسط چاهک محاسبه و در کل شبکه توزیع می‌شود، داده‌های خود را در مرحله دیده بانی فقط ذخیره می‌کنند و نه ارسال. سپس در انتهای دوره جمع آوری داده تمام حسگرها داده‌های ذخیره شده خود را به چاهک ارسال می‌کنند. روش اخیر بهبود قابل ملاحظه ای را در کیفیت بازسازی داده‌ها در چاهک و هزینه ارسال داده‌ها در کل شبکه نشان داده و مشخص شده که این بهبود نتیجه مستقیم نوع نمونه برداری در حسگرهای شبکه است که از نوع معین است و نه تصادفی. به عبارت دیگر طراحی زمانبندی معین که نمونه برداری از سیگنال‌های شبکه را بصورت یکنواخت در فضا و زمان انجام می‌دهد به نوبه خود می‌تواند به تخمین بهتری از خواص آماری مورد نیاز الگوریتم PCA برای بازسازی داده‌ها بر اساس شیوه سنجش فشرده منجر شود. گره چاهک با توجه به همبستگی متقابل بین داده‌های جمع آوری شده از کل شبکه در مرحله آموزش، تصمیم می‌گیرد که در مرحله دیده بانی کدام گره در کدام شکاف زمانی باید نمونه برداری را انجام دهد. این روش معین انتخاب گره‌ها، روش مبتنی بر همبستگی متقابل توسعه یافته[۳۳] (ECB-DNS) نام گرفته است. زمانبندی استخراج شده که حاوی اطلاعات دوگانه نمونه برداری یا عدم نمونه برداری در شکاف‌های زمانی مرحله دیده بانی است به تمام گره‌ها ارسال می‌شود و به این ترتیب هر گره تنها با یک عمل مقایسه می‌تواند تصمیم بگیرد که در یک شکاف زمانی مشخص عمل سنجش را انجام دهد یا نه. طبق زمانبندی استخراج شده ماتریس نمونه برداری $\mathbf{M_t}$ نظیر هر شکاف زمانی t تشکیل و برای فرآیند بازسازی مبتنی بر سنجش فشرده در آن شکاف زمانی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در روش ECB-DNS از واریانس شرطی بعنوان کمیتی استفاده می‌شود که بیانگر اطلاعات یک گره درباره گره دیگر است. هر بار که دریک شکاف زمانی گره ای از بین گره‌هایی که تاکنون انتخاب نشده گزینش می‌شود، باید مجموع واریانس مقادیر گره‌های دیگر که تاکنون انتخاب نشده اند مشروط به مقدار این گره کمترین مقدار باشد. بر اساس این معیار برای شکاف‌های زمانی اولویت با انتخاب گره‌هایی است که با انتخاب آنها کمترین ابهام نسبت به مقدار گره‌های انتخاب نشده وجود داشته باشد. با این فرض که T تعداد شکاف‌های زمانی دوره دیده بانی باشد براساس معیار فوق ابتدا بهترین T گره از بین کل گره‌های شبکه حسگر برای شکاف‌های زمانی {1,2,…,T} انتخاب می‌شوند سپس همین تعداد گره را از بین بهترین گره‌های باقیمانده بر اساس معیار ذکر شده انتخاب کرده و مجددا به شکاف‌های زمانی {1,2,…,T} نسبت می‌دهیم و این فرایند را تکرار می‌کنیم تا کل گره‌ها به شکاف‌های زمانی منتسب شوند. سنجه[۳۴] واریانس مشروط کل[۳۵] (OCV) که توسط هوشمند استفاده شده است دو اشکال دارد. اول اینکه این سنجه علاوه بر

همبستگی بین داده گره‌ها به مقیاس داده‌ها نیز وابسته است بطوریکه گره‌های با داده‌های بزرگتر به خطا سهم بزرگتری را در این سنجه ایجاد کرده و نتیجتا انتخاب گره مناسب در یک شکاف زمانی را با اشکال مواجه می‌کند. ثانیا در فرآیند استخراج جدول زمانی، چاهک اطلاعات پیشین گره‌های انتخابی در یک شکاف زمانی را برای انتخاب گره‌های دیگر در آن شکاف در نظر نمی‌گیرد. اخیرا نویسندگان مقاله حاضر الگوریتم زمانبندی جدیدی برای انتخاب حسگرهای فعال در سنجش داده‌های شبکه ارائه کرده اند که از نوع معین بوده و مبتنی بر اطلاعات متقابل[۳۶] مقادیر خوانده شده از حسگرهای شبکه در دوره آموزش می‌باشد[۲۴]. روش پیشنهادی که روش IB-DNS[37] نام گرفته توانسته است در مقایسه با روش هوشمند مصالحه بین خطای بازسازی سیگنال و هزینه سنجش داده‌ها در شبکه WSN را بهبود بخشد . علاوه بر این در تحقیقی دیگر[۲۵] همین نویسندگان با کاربرد تخمین گر انقباضی به جای تخمین گر استاندارد ماتریس کوواریانس نمونه توانسته اند به دقت بالاتری در تخمین ماتریس کوواریانس داده‌ها دست یابند که استخراج لغت نامه PCA مناسب تر در مرحله آموزش را ممکن ساخته است. به این ترتیب استفاده از تخمین گر دقیقتر منجر به کاهش طول مرحله آموزش و در نتیجه کاهش مصرف انرژی در کل شبکه شده است. اخیرا روش‌های پیشرفته تر بازنمایی سیگنال که مبتنی بر لغت نامه های فوق کامل می‌باشند و در برابر نویز موجود در داده های جمع آوری شده مقاوم هستند برای تکنیک سنجش فشرده توزیع شده[۳۸](DCS) [۲۶] و همچنین تجمیع داده شبکه های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده اند[۲۷]، اما تاکنون کارآیی آن خصوصا چگونگی مصالحه بین هزینه سنجش های انجام شده در مقایسه با کیفیت سیگنال بازسازی شده درچاهک برای سناریوی چند پرشی در یک شبکه حسگر بی‌سیم مورد مطالعه قرار نگرفته است.

٤- خلاءهای پژوهشی و ایده‌های آتی نیازمند پژوهش

با ظهور فن آوری‌های جدید مانند اینترنت اشیا انتظار می‌رود WSN های آینده با انواع دیگر شبکه‌ها مانند شبکه‌های مش بی‌سیم ، وای-فای و شبکه‌های وسایل نقلیه ادغام شوند تا بسترهای هوشمندی برای کاربردهای متنوع اینترنت اشیا فراهم آید. درک نقش تجمیع داده مبتنی بر سنجش فشرده به عنوان ابزاری برای مقابله با مشکل طغیان داده‌ها، در ایجاد چنین کاربردهایی از اهمیت بالایی برخوردار است. در حالی که طی چند سال گذشته کارهای قابل توجهی شده است تا شیوه‌های مبتنی بر سنجش فشرده عملاً در WSN ها با تمرکز بر مشکلات مختلف محدودیت منابع شبکه قابل اجرا باشد ، هنوز چالش‌هایی وجود دارد که باید مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. در ادامه ، ما در مورد چنین چالش‌ها و جهت تحقیقات آینده بحث می‌کنیم .

پیدا کردن تبدیل PCA برای تنک سازی داده‌ها ، نظیر پیدا کردن تبدیل خطی است که واریانس داده‌ها را ماکزیمم کند(مولفه اصلی) ، بنابراین بجای ماتریس کوواریانس می‌توان از روش‌های جایگزین مانند الگوریتم‌های افزایش گرادیان[۳۹] برای حل این مساله ماکزیمم سازی بهره برد. این الگوریتم‌ها در نهایت به جواب مساله که همان بردارهای ویژه می‌باشند همگرا خواهند شد. مزیت این الگوریتم‌ها آنست که بصورت برخط[۴۰] کار می‌کنند به این معنی که به محض اینکه بردار داده شبکه ای جدیدی در چاهک استخراج شد بدون اینکه نیاز مجدد به محاسبه ماتریس کوواریانس باشد تخمین‌های قبلی از بردارهای ویژه تجدید و تصحیح می‌شوند[۲۸]. این الگوریتم‌ها این قابلیت را دارند که تغییرات آرام آمارگان سیگنال‌های شبکه را دنبال کنند بنابراین به نظر می‌رسد برای جمع آوری سیگنال‌های واقعی که اساسا ایستان نیستند نسبت به روش استفاده از ماتریس کوواریانس در محاسبه تبدیل PCA موفق تر عمل خواهند کرد. به این جهت استفاده از روش‌های برخط محاسبه تبدیل PCA می‌تواند به عنوان یک محور پژوهشی مورد توجه قرار گیرد. پژوهشی دیگر که می‌توان پیشنهاد کرد استفاده از یک لغت نامه فوق کامل است که مستقیما از خود داده ها بدست آید و نه از ماتریس کوواریانس تخمین زده شده آن. جایگزین کردن این لغت نامه بجای تبدیل PCA در تکنیک سنجش فشرده احتمالا باعث بهبود کارآیی خواهد شد.

در کارهایی که تاکنون ارائه شده روند تنک سازی داده‌ها تنها بصورت یک بعدی و با استخراج یکی از همبستگی‌های زمانی یا مکانی سیگنال نمونه برداری شده در شبکه حسگر انجام می‌شود. به عنوان مثال تبدیل DCT یا فقط برای تنک سازی داده‌ها با در نظر گرفتن همبستگی زمانی[۲۳] و یا فقط با در نظر گرفتن همبستگی مکانی [۲۰] استفاده شده است. همچنین تبدیل PCA فقط استخراج همبستگی‌های مکانی سیگنال‌های جمع آوری شده در حسگرها و تنک سازی آنها را ممکن می‌سازد[۲۲]. با بکارگیری روش‌های سنجش فشرده مرتبه بالاتر[۴۱](HO-CS) که در آنها از نمایش و تجزیه تانسوری داده‌ها استفاده می‌شود[۲۹] می‌توان همزمان با استخراج همبستگی‌های زمانی و مکانی سیگنال‌های شبکه به نمایش تنکی از این سیگنال دست یافت و در عین حال از مزایای CS

نیز بهره برد[۳۱,۳۰]. آگاهی از میزان مقاومت شیوه سنجش فشرده در مقابل حضور مشکلات عملی سیستم‌ها مانند فیدینگ کانال‌ها، تداخل، نویزهای غیر گوسی، خطای همزمان سازی، خطای کوانتیزاسیون، خطای لینک ارتباطی و ازدست دادن داده‌ها مسایلی است که برای سود رساندن تجمیع داده مبتنی بر سنجش فشرده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. بسیاری از شرایط مورد نیاز برای ایجاد ضمانت عملکرد در چارچوب شیوه سنجش فشرده ممکن است در صورت وجود چنین مسائل عملی برآورده نشوند. با وجود اینکه در این زمینه کارهایی انجام شده است ولی تحقیقات بیشتری نیاز است تا بتوان به شیوه‌هایی دست یافت تا اثرات مخرب مسایل فوق را بر عملکرد کلی سیستم جبران و اصلاح کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری ، هدف ما توصیف روندهای تحقیق و کارهای اخیر در مورد استفاده از سنجش فشرده در جمع آوری داده‌های WSNها بود. ما چالش‌هایی را بررسی کردیم که باید مورد توجه قرار گیرند تا امکان اجرای عملی شیوه‌های مبتنی بر سنجش فشرده در WSN ها فراهم شود. به این منظور، آثار اخیر که بر توسعه راه حل‌های متمرکز، توزیع شده و غیر متمرکز برای جمع آوری و بازسازی داده‌ها تمرکز دارد مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، جهت گیری تحقیقات بالقوه آینده در سنجش فشرده برای استفاده در WSN های دارای منابع محدود مورد بحث قرار گرفته است. با این مقاله مروری ، انتظار می‌رود که خوانندگان دید مفیدی در مورد کاربرد شیوه‌های مختلف سنجش فشرده برای حل مسایل تجمیع داده WSN ها که شامل داده‌های با ابعاد بالا است بدست آورند.

مراجع

[1] H. M. Haghighi, F. Bavi, and M. Etesami, "Trust-based routing in wireless sensor networks using fuzzy logic," *Journal of Communication Engineering,* vol. 10, no.37, pp. 43-54, 2020 (in Persian).

[2] H. Aminzadeh and A. Rezaee, "Energy Coverage Control in Wireless Sensor Networks Using Gravity Search Algorithm," *Journal of Communication Engineering,* vol. 9,no.36, pp. 1-16, 2020 (in Persian).

[3] M. Negahdari and M. Dadvar, "Energy-Efficient Wireless Sensor Networks Using Flat Cluster-based Routing Protocol and Evolutionary Algorithms," *Journal of Communication Engineering,* vol. 9,no.33, pp. 55-68, 2019 (in Persian).

[4] E. J. Candes and T. Tao, "Near-Optimal Signal Recovery From Random Projections: Universal Encoding Strategies?," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 12, pp. 5406-5425, 2006.

[5] E. J. Candes and M. B. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 21-30, 2008.

[6] D. L. Donoho, "Compressed sensing," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, 2006.

[7] E. J. Candès, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. 52, pp. 489-509, 2006.

[8] A. Beck and M. Teboulle, "A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems," *SIAM Journal on Imaging Sciences,* vol. 2, pp. 183-202, 2009.

[9] J. A. Tropp and A. C. Gilbert, "Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655-4666, 2007.

[10] T. Blumensath and M. E. Davies, "Iterative hard thresholding for compressed sensing," *Applied and Computational Harmonic Analysis,* vol. 27, pp. 265-274, 2009.

[11] Eldar, Yonina C., and Gitta Kutyniok, eds. *Compressed sensing: theory and applications*. Cambridge university press, 2012.

[12] Y. Vardi, "Network tomography: Estimating source-destination traffic intensities from link data," *Journal of the American statistical association*, vol. 91, pp. 365-377, 1996.

[13] R. Baraniuk, M. Davenport, R. DeVore, and M. Wakin, "A simple proof of the restricted isometry property for random matrices," *Constructive Approximation,* vol. 28, pp. 253-263, 2008.

[14] W. U. Bajwa, J. D. Haupt, A. M. Sayeed, and R. D. Nowak, "Joint Source-Channel Communication for Distributed Estimation in Sensor Networks," *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. 53, pp. 3629-3653, 2007.

[15] C. Luo, F. Wu, J. Sun, and C. W. Chen, "Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks," in *Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2009, pp. 145-156.

[16] G. Shen, S. Y. Lee, S. Lee, S. Pattem, A. Tu, B. Krishnamachari, A. Ortega, M. Cheng, S. Dolinar, and A. Kiely, "Novel distributed wavelet transforms and routing algorithms for efficient data gathering in sensor webs," in *NASA Earth Science Technology Conference (ESTC2008)*, 2008.
[17] L. Xiang, J. Luo, and A. Vasilakos, "Compressed data aggregation for energy efficient wireless sensor networks," in *Sensor, mesh and ad hoc communications and networks (SECON), 8th annual IEEE communications society conference on*, 2011, pp. 46-54.
[18] S. Lee, S. Pattem, M. Sathiamoorthy, B. Krishnamachari, and A. Ortega, "Compressed sensing and routing in multi-hop networks," Technical Report, University of Southern California, 2009.
[19] W. Wang, M. Garofalakis, and K. Ramchandran, "Distributed sparse random projections for refinable approximation," in *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, 2007, pp. 331-339.
[20] G. Quer, R. Masiero, D. Munaretto, M. Rossi, J. Widmer, and M. Zorzi, "On the interplay between routing and signal representation for compressive sensing in wireless sensor networks," in *information Theory and Applications Workshop*, 2009, pp. 206-215.
[21] R. Masiero, G. Quer, D. Munaretto, M. Rossi, J. Widmer and M. Zorzi, "Data Acquisition through Joint Compressive Sensing and Principal Component Analysis," *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, 2009, pp. 1-6.
[22] G. Quer, R. Masiero, G. Pillonetto, M. Rossi, and M. Zorzi, "Sensing, compression, and recovery for WSNs: Sparse signal modeling and monitoring framework," *IEEE Transactions on Wireless Communications,* vol. 11, pp. 3447-3461, 2012.
[23] M. Hooshmand, M. Rossi, D. Zordan, and M. Zorzi, "Covariogram-Based Compressive Sensing for Environmental Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal,* vol. 16, pp. 1716-1729, 2016.
[24] G. Imanian, M. A. Pourmina, and A. Salahi, "Improved Sensor Sampling Method for the Joint Dictionary Learning and Compressive Data Gathering in WSNs with the Aid of Information Theory," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology,* vol. 13, pp. 41-57, 2022 (in Persian).
[25] G. Imanian, M.A. Pourmina, and A. Salahi, "Information-Based Node Selection for Joint PCA and Compressive Sensing-Based Data Aggregation," *Wireless Personal Communication*, vol. 118, No. 2, pp. 1635-1654, 2021.
[26] W. Chen, I. J. Wassell and M. R. D. Rodrigues, "Dictionary Design for Distributed Compressive Sensing," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 1, pp. 95-99, Jan. 2015.
[27] P. Zhang, J. Wang, and W. Li, "A learning based joint compressive sensing for wireless sensing networks," *Computer Networks*, vol. 168, p. 107030, 2020.
[28] A. Hyvarinen, J. Karhunen, E. Oja, *Independent Component Analysis*, John Wiley & Sons, 2001.
[29] A. Cichocki, D. Mandic, A-H. Phan, C. Caiafa, G. Zhou, Q. Zhao, and L. De Lathauwer, "Tensor Decompositions for Signal Processing Applications: From Two-way to Multi-way Component Analysis," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 32, No. 2, pp. 145-163, 2015.
[30] C. Caiafa and A. Cichocki, "Computing sparse representations of multidimensional signals using Kronecker bases," in *Neural Computation*. , vol. 25, no. 1, pp. 186–220, 2013.
[31] C. F. Caiafa and A. Cichocki, "Multidimensional compressed sensing and their applications," *Wiley Int. Rev. Data Min. and Knowl. Disc.,* vol. 3, pp. 355–380, 2013.

1- Wireless sensor network
2- Sink
3- Ad hoc
4- Decentralized
5- Distributed
6- High dimensional
7- Network tomography
8- Networked data
9- Dictionary
10- Equivalent sensing matrix
11- Basis pursuit de-noise
12- Seed
13- Coherent
14- Routing tree
15- Tree leaves
16- Shortest path tree

۱۷- **سطرهای این ماتریس‌ها بطور متداول از عناصری با توزیع** *i.i.d.* **از نوع گوسی یا باینری**(± 1) **انتخاب می‌شوند.**

18- Dense random projection
19- Sparse random projection
20- Opportunistic projection
21- Minimum steiner tree
22- Low Coherence Projections for efficient Routing

۲۳- **تجانس کمیتی است که ماکزیمم همبستگی بین سطرهای ماتریس سنجش و ستونهای لغت نامه سیگنال را مشخص می‌کند.**

24- Geographical forwarding
25- Downsampling
26- Random sampling
27- Principal component analysis
28- Karhunen-Loeve expansion
29- Training phase
30- Monitoring phase
31- Non-lattice
32- Deterministic
33- Extended correlation-based deterministic node selection
34- Metric
35- Overall conditional variance
36- Mutual information
37- Information-based deterministic node selection
38- Distributed compressive sensing
39- Gradient ascent algorithms
40- On-line
41- Higher Order Compressive Sensing

Compressive Sensing-based Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: A Review

Gholamreza Imanian[1], Mohammad Ali Pourmina[2*], Ahmad Salahi [3]

1: Ph.D. Candidate, Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
Department of Electrical and Computer Engineering, Torbat Heydarieh Branch, Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran, rez.iman@gmail.com
2*: Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, pourmina@srbiau.ac.ir
3: Associate Professor, Iran Telecommunication Research Center, Tehran, Iran, salahi@itrc.ac.ir

ABSTRACT:

In this review article, we aim to describe recent advances in compressive sensing-based data aggregation techniques in wireless sensor networks, including current research efforts, challenges, and research trends. Sparse and compressible signals are present in many applications of sensor networks, such as environmental monitoring and vehicle surveillance. Compressive sensing has many properties such as simplicity of sensing and compression operations, universality, and an acceptable decrease in the quality of signal reconstruction, which makes it attractive for use in sensor networks. Packet drops do not damage the network as much as other protocols, and only for each measurement that does not reach the sink will cause a slight decrease in the quality of signal reconstruction. We begin the discussion with a brief introduction to compressive sensing theory and then describe the use of this technique in wireless sensor networks. Finally, the research issues and challenges ahead are discussed to provide a perspective for future research.

KEYWORDS: wireless sensor networks, data aggregation, compressive sensing, data compression