

پایان نامه جهت اخذ مدرک کارشناسی

طراحی و پیاده سازی یک پروتکل ارتباطی مطمئن
برای شبکه های حسگر بی سیم



تشکر و قدردانی

چکیده

در این پروژه قرار است یک پروتکل ارتباطی مطمئن با لحاظ کردن مصرف انرژی پایین برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شود که بار انرژی یکنواختی را میان حسگرها توزیع کند. این پروتکل، از نوع پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی (Cluster-Based) است که شبکه را به حلقه‌هایی هم مساحت تقسیم می‌کند و سیاست‌های خوشه‌بندی مختلفی را به هر حلقه اعمال می‌کند. هدف اول این پروژه، کاهش انرژی مصرفی کل شبکه‌ی حسگر بی‌سیم و افزایش طول عمر آن می‌باشد. هدف دوم پروژه، ارائه‌ی یک پروتکل ارتباطی با افزایش قابلیت اطمینان و کاهش تاخیر ارتباطات بین حسگرهای شبکه‌ی حسگر بی‌سیم نسبت به پروتکل‌های پیشین می‌باشد.

کلمات کلیدی

شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ترکیب داده‌ها، خوشه‌بندی، پروتکل‌های کنترل دسترسی به رسانه‌ی انتقال.

فهرست مطالب

۱	مقدمه	۳
۱-۱	معرفی شبکه‌های حسگر بی‌سیم	۳
۲-۱	کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم	۵
۳-۱	عوامل مهم در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم	۹
۲	مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم	۱۷
۱-۲	پروتکل‌های با محوریت داده (Data-Centric Protocols)	۲۱
۱-۱-۲	Flooding و Gossiping	۲۲
۲-۱-۲	SPIN	۲۳
۳-۱-۲	Directed Diffusion	۲۵
۴-۱-۲	EAR	۲۷
۵-۱-۲	GBR	۲۹
۲-۲	پروتکل‌های سلسله‌مراتبی (Hierarchical Protocols)	۳۱
۱-۲-۲	LEACH	۳۲
۲-۲-۲	PEGASIS	۳۳
۳-۲-۲	TEEN	۳۶
۴-۲-۲	APTEEN	۳۸
۳-۲	پروتکل‌های مبتنی بر مکان (Location-Based Protocols)	۳۹
۱-۳-۲	GEAR	۳۹
۴-۲	پروتکل‌های مبتنی بر جریان شبکه و QoS	۴۲
۱-۴-۲	SAR	۴۲
۵-۲	جمع‌بندی پروتکل‌های مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم	۴۷
۳	پروتکل ارتباطی پیشنهادی	۵۱
۱-۳	پروتکل‌های ارتباطی مربوطه و کارایی آن‌ها در مصرف انرژی	۵۱
۲-۳	معماری پروتکل LEACH	۵۴

۵۶.....	۱-۲-۳ الگوریتم انتخاب سرپرست خوشه (CH).....
۵۹.....	۲-۲-۳ الگوریتم تشکیل خوشه.....
۶۳.....	۳-۲-۳ فاز حالت پایدار.....
۶۸.....	۴-۲-۳ پروتکل LEACH-C.....
۶۹.....	۵-۲-۳ آنالیز و شبیه‌سازی LEACH.....
۶۹.....	۱-۵-۲-۳ پروتکل‌های پیشین.....
۷۱.....	۲-۵-۲-۳ مدل مصرف انرژی.....
۷۳.....	۳-۵-۲-۳ تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها.....
۷۵.....	۴-۵-۲-۳ پیکربندی شبکه‌ی مورد آزمایش.....
۷۷.....	۵-۵-۲-۳ نتایج شبیه‌سازی‌ها.....
۸۲.....	۳-۳ مشکلات پروتکل LEACH و پروتکل‌های سلسله‌مراتبی دیگر.....
۸۵.....	۴-۳ معرفی ایده‌های پروتکل پیشنهادی.....
۹۹.....	۵-۳ نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای پروتکل پیشنهادی.....
۱۱۱.....	۴ جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و کارهای آتی.....
۱۱۱.....	۱-۴ جمع‌بندی.....
۱۱۲.....	۲-۴ نتیجه‌گیری و کارهای آتی.....
۱۱۶.....	۵ مراجع.....
۱۲۲.....	۶ پیوست‌ها.....
۱۲۳.....	۱-۶ چگونگی کارکرد DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).....
۱۲۶.....	۲-۶ جزئیات بیشتر در مورد روش‌های CSMA/CA.....
۱۲۸.....	۳-۶ کد مربوط به شبیه‌ساز پیاده‌سازی شده.....
۱۳۵.....	۴-۶ مقاله پذیرفته شده در کنفرانس CCECE'07.....
۱۴۰.....	۵-۶ مقاله پذیرفته شده در کنفرانس CNSR'07.....

فصل ۱

۱ مقدمه

۱-۱ معرفی شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۱

پیشرفتهای اخیر در زمینه سیستمهای MEMS^۲، حسگرهای هوشمند^۳، مخابرات بی‌سیم و همچنین الکترونیک دیجیتال، امکان ساخت گره‌های حسگر کوچک، کم مصرف و کم هزینه را فراهم می‌سازند که توانایی برقراری ارتباط به صورت بی‌سیم را نیز دارا می‌باشند [Akyildiz_02]، [Min_01]، [Rabaey_00] و [Katz_99]. این گره‌های حسگر کوچک شامل سه بخش حسگر، پردازش اطلاعات و انتقال اطلاعات به صورت بی‌سیم می‌باشند. به طور کلی یک شبکه حسگر بی‌سیم شامل تعداد زیادی از این گره‌ها می‌باشد که برای اندازه‌گیری یک پارامتر، داده‌های آنها به صورت دسته‌جمعی مورد توجه قرار می‌گیرد. یعنی همه‌ی اطلاعات جمع‌آوری شده برای یک پارامتر، در یک گره از شبکه که معمولاً ایستگاه پایه (BS)^۴ نامیده می‌شود، پردازش شده و مقدار

^۱ Wireless Sensor Networks

^۲ Micro-Electro-Mechanical-Systems

^۳ Smart Sensors

^۴ Base Station

واقعی آن پارامتر به طور نسبتاً دقیقی تخمین زده می‌شود. در این شبکه‌ها معمولاً از کار افتادن یک گرهی شبکه تقریباً تأثیری در مقدار تخمین زده شده ندارد. در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، گره‌های حسگر با تعداد زیاد در داخل مکان مورد نظر و یا بسیار نزدیک به آن برای اندازه‌گیری پارامتر مورد نظر قرار دارند. مکان این گره‌ها از قبل طراحی نشده است. این مسئله به سادگی کار جایگذاری حسگرها در شبکه کمک می‌کند اما در عوض، پروتکل‌هایی که برای این شبکه‌ها به کار گرفته می‌شود باید خودتنظیم^۵ یا خودسازمانده باشند. با توجه به اینکه این حسگرها در داخل خود پردازنده دارند، برای کم شدن حجم انتقال اطلاعات، این حسگرها فقط داده مورد نیاز را پس از پردازش داده‌های اولیه می‌فرستند.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم از جهات بسیاری شبیه به شبکه‌های ad hoc متحرک (MANET)^۶ می‌باشند، اما پروتکل‌هایی که برای شبکه‌های ad hoc مورد استفاده قرار می‌گیرند برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مناسب نمی‌باشند. در شبکه‌های ad hoc مسئله اصلی برای طراحی پروتکل‌ها، کیفیت سرویس‌دهی (QoS)^۷ می‌باشد، در صورتی که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم محدودیت اصلی برای طراحی پروتکل‌ها، انرژی محدود حسگرها می‌باشد. در واقع پروتکل‌هایی که مصرف توان در حسگرها را به حداقل برسانند، برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم بیشتر مورد توجه هستند.

به طور کلی تفاوت‌های اصلی شبکه‌های حسگر بی‌سیم با شبکه‌های ad hoc به قرار زیر

است:

^۵ Self-Organized

^۶ Mobile-Ad hoc-NETworks

^۷ Quality of Service

۱. تعداد گره‌های شبکه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بسیار بیشتر از شبکه‌های ad hoc است.

۲. حسگرها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به صورت فشرده جایگذاری شده‌اند.

۳. حسگرها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بیشتر در معرض خرابی هستند.

۴. توپولوژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم دائماً در حال تغییر است.

۵. در اکثر شبکه‌های حسگر بی‌سیم برقراری ارتباط به صورت پخش^۸ است در صورتی

که برای شبکه‌های ad hoc ارتباط به صورت نقطه به نقطه است.

۶. حسگرها در اندازه، توان، قدرت محاسبه و حافظه محدودیت دارند.

۲-۱ کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ([Akyildiz_02] و [Tilak_02])

شبکه‌های حسگر شامل تعداد و انواع مختلفی از حسگرها مانند لرزه‌نگاری^۹، حرکت،

حرارتی، گازی، تغییر شکل^{۱۰}، نوری، مادون قرمز، فشار، صوتی و ... می‌باشند که توانایی نظارت بر

شرایط طبیعی گسترده با کاربردهای زیر را دارند:

- دما
- رطوبت
- تحرک وسایل نقلیه
- فشار
- سطح نویز موجود در محیط

⁸ Broadcast

⁹ Seismic

¹⁰ Strain

- وجود یا عدم حضور شیء خاص در محیط
 - سطح فشار مکانیکی وارد بر یک شیء
 - مشخصات رایج مانند سرعت، جهت و اندازه‌ی یک شیء
- گره‌های حسگر می‌توانند به منظور حس کردن پیوسته محیط، آشکارسازی رویداد، حس کردن محلی و کنترل محلی محرک‌ها¹¹، مورد استفاده واقع شوند. در ادامه به چهار دسته از کاربرد های این شبکه‌ها اشاره می‌کنیم.
۱. کاربردهای نظامی:

شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توانند به عنوان بخش مهمی از سیستم‌های ارتباطی، نظارتی، ناوبری هوشمند و پردازش نظامی مورد استفاده قرار گیرند. آرایش سریع، خودسازمانده و تحمل پذیری اشکال در این شبکه‌ها باعث شده است که یکی از تکنیک‌های رضایت بخش در سیستم‌های نظامی باشند. از آنجائیکه شبکه‌های حسگر بر اساس آرایش چگال، در دسترس بودن و کم هزینه بودن بنا شده‌اند، تخریب و از بین رفتن یک گره در این شبکه‌ها دارای تأثیری برای کل شبکه در مقایسه با شبکه‌های سستی بی‌سیم نمی‌باشد و این امر موجب گردیده است که از این شبکه‌ها، در میدان‌های جنگ و منطقه‌ی دشمن استفاده‌ی زیادی گردد. گاهی اوقات در این شبکه‌ها گره‌ها با فرستنده و گیرنده‌های GPS¹² همراه میشوند و در موقعیت‌یابی دقیق مناطق جنگی، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به طور کلی از کاربردهای نظامی این شبکه‌ها می‌توان نظارت بر تجهیزات، مهمات و نیروهای خودی، نظارت بر مناطق جنگی، زیر نظر گرفتن نیروها و منطقه‌ی دشمن، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به خرابی مناطق جنگی، تشخیص حملات شیمیایی و هسته‌ای و ... را نام برد و

¹¹ Actuators

¹² Global Positioning System

با توجه به اینکه از قبل هیچ طراحی برای جایگذاری حسگرها وجود ندارد، می‌توان به راحتی حسگرها را در منطقه‌ی مورد نیاز قرار داد.

۲. کاربردهای محیطی

یکی دیگر از کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم نظارت بر طبیعت و محیط می‌باشد. تشخیص آتش در جنگل، تعیین پارامترهای محیطی مثل دما و فشار، اندازه‌گیری رطوبت در مزارع کشاورزی، اندازه‌گیری سطح نفوذ آب در خاک، تشخیص گردباد و تشخیص مناطق آلوده در محیط چند نمونه از این نوع کاربرد می‌باشند.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای ردیابی حرکات پرندگان و حیوانات کوچک، زمین شناسی، هواشناسی و مطالعه‌ی آلودگی نیز دارای کاربرد می‌باشند. در جنگل‌ها برای آشکارسازی آتش از آن‌ها استفاده می‌شود که توسط این گره‌ها می‌توان به محل دقیق آتش‌سوزی قبل از گسترش آن دست یافت.

۳. کاربردهای سلامتی و پزشکی

شبکه‌های حسگر بی‌سیم جهت نظارت کردن بر وضعیت بیماران ناتوان، مدیریت دارو در بیمارستان‌ها، و ردیابی و نظارت بر حرکت بیماران بکار می‌روند. در کارخانجات تولید مواد شیمیایی و پزشکی یکی از مهمترین کاربردهای شبکه‌های حسگر نظارت در میزان ترکیبات در داروها می‌باشد که کوچکترین خطا در آن موجب به خطر افتادن جان هزاران انسان می‌شود. حسگرهای بی‌سیم می‌توانند بر عملکرد اپراتورهای مشغول به کار نیز نظارت می‌نمایند.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم در مورد مسائل بهداشتی و درمانی نیز کاربرد دارند. در مواردی مثل جمع‌آوری اطلاعات فیزیولوژیکی بدن انسان از راه دور، پیدا کردن بیماران و پزشکان در یک محیط درمانی و همچنین مدیریت داروها در یک بیمارستان از این شبکه‌ها استفاده می‌شود. در

[Sarrafzadeh_06] و [Jafari_05] نمونه‌هایی از استفاده‌ی این شبکه‌ها در کاربردهای پزشکی به چشم می‌خورد که از آن جمله می‌توان بررسی روند تأثیر داروها در بدن یک بیمار و نظارت بر وضعیت بیمار بدون مراجعه‌ی بیمار به پزشک را نام برد.

۴. سایر کاربردها

از دیگر کاربردهای این شبکه‌ها، کاربردهای آن‌ها در صنعت می‌باشد، برای مثال در فرآیندهای اتوماسیون صنعتی [Amini_07a] در قسمت‌هایی که حضور انسان مشکل و یا غیرممکن است، می‌توان با راه‌اندازی این شبکه‌ها بر مواردی چون کنترل کیفیت محصولات و از آن مهم‌تر کنترل امنیت و ایمنی این نوع محیط‌ها نظارت کرد.

در [Chehri_07] سه نوع از کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم در معدن‌های زیر زمین (محیطی خطرناک برای کارکنان چه از نظر نشت گاز و چه از نظر خطر ریزش و انسداد) مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد نوع اول مربوط به جمع‌آوری داده‌های مربوط به پدیده‌ی فیزیکی مورد نظر (دما، رطوبت و نورانی بودن) می‌باشد. کاربرد نوع دوم برای موقعیت‌یابی و تعقیب یک جسم در منطقه‌ی تحت نظارت است و بالاخره کاربرد نوع سوم مربوط به نظارت بر ایمنی محیط می‌باشد که برای این نوع کاربرد، گره‌های حسگر برای کنترل عوامل غیرعادی ممکن چون آتش و نشت گازهای سمی در معدن زیرزمینی استقرار می‌یابند.

همچنین با استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توان منازل هوشمند طراحی کرد و مثلاً از طریق اینترنت وسایل خانه را کنترل کرد و شاید بتوان گفت که شبکه‌های حسگر بی‌سیم یک جزء جدانشدنی از زندگی انسانها در آینده‌ی نزدیک خواهند بود.

۳-۱ عوامل مهم در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم [Akyildiz_02]

طراحی یک شبکه‌ی حسگر از چندین پارامتر تأثیرپذیر می‌باشد که شامل: تحمل‌پذیری اشکال، مقیاس‌پذیری، هزینه‌ی تولید، محیط کاری، توپولوژی شبکه‌ی حسگر، محدودیت‌های سخت‌افزاری، محیط انتقال و مصرف انرژی می‌باشد. این فاکتورها توسط محققان زیادی بررسی شده‌اند. اگرچه هیچکدام از این مطالعات نگاه جامع به همگی فاکتورهای فوق در طراحی شبکه نداشته‌اند. این فاکتورها دارای اهمیت زیادی هستند به دلیل اینکه به عنوان خط مشی طراحی الگوریتم‌ها و پروتکل‌های شبکه‌های حسگر می‌باشند و نیز این پارامترها می‌توانند جهت مقایسه دیدگاه‌های متفاوت به کار روند. برای طراحی پروتکل‌های کارآمد برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم پارامترهای زیر حایز اهمیت می‌باشند:

تحمل پذیری اشکال^{۱۳}: پروتکل‌ها باید طوری طراحی شوند که با از کار افتادن یک یا چند حسگر در شبکه، کل عملکرد شبکه متوقف نشود. برای مثال پروتکل‌های کنترل دسترسی به رسانه‌ی انتقال (MAC^{۱۴}) و پروتکل‌های مسیریابی باید در هنگام از کار افتادن یک یا چند گره مسیره‌های جدید برای انتقال اطلاعات به ایستگاه پایه را جایگزین مسیره‌های از کار افتاده کنند. برای این منظور نیاز به چندین سطح از افزونگی نیاز خواهیم داشت.

بعضی از گره‌های حسگر ممکن است به علت فقدان انرژی، آسیب فیزیکی یا هر علت دیگر از کار بیفتند. خرابی یک گره نباید بر روی کارکرد کل شبکه‌های حسگر تأثیر گذارد تا سیستم باید بتواند به کار خود ادامه بدهد. تحمل پذیری اشکال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به این

13 Fault Tolerance

14 Medium Access Control

معناست که سیستم به کار اصلی خود بدون هیچ وقفه‌ای در هنگام بروز خطا ادامه دهد. قابلیت اطمینان^{۱۵} $R_k(t)$ یک گره‌ی حسگر با توزیع پواسون مدل سازی شده است:

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t},$$

(۱-۱)

λ_k : نرخ خرابی گره حسگر
فاصله زمانی بین $t:(0, t)$

به طور کلی قابلیت اطمینان یک سیستم، احتمال این است که یک سیستم در یک بازه‌ی زمانی کاملاً یک سرویس را به درستی انجام دهد، مشروط بر اینکه در ابتدای کار بدانیم در زمان شروع کار، سیستم درست کار می‌کرده است.

مقیاس‌پذیری^{۱۶} (قابلیت پوشش دادن تعداد زیاد حسگر): پروتکل‌ها باید طوری باشند که بتوانند امکان فعالیت یک شبکه با تعداد حسگرهای بسیار زیاد را ممکن سازند. همان‌طور که خواهیم دید، بسیاری از پروتکل‌ها با وجود مزایای ویژه‌ای که دارند، به دلیل تحمیل کردن حجم زیادی از محاسبات به گره‌های خاصی در شبکه، در شبکه‌های با تعداد گره‌های زیاد کار نمی‌کنند.

هزینه ساخت^{۱۷}: با توجه به اینکه تعداد حسگرها در شبکه بسیار زیاد است پس برای عملی شدن پیاده‌سازی این شبکه‌ها، باید قیمت هر حسگر بسیار کم باشد.

محدودیت سخت افزاری^{۱۸}: برای عملی بودن پیاده‌سازی این شبکه‌ها، هر حسگر نباید حجم زیادی را اشغال کند. پس از قطعاتی باید استفاده کرد که تا حد امکان کوچک و سبک باشند. همچنین این قطعات باید دارای مصرف توان بسیار پایین باشند. یک گره حسگر از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است: یک واحد حسگر، یک واحد

¹⁵ Reliability

¹⁶ Scalability

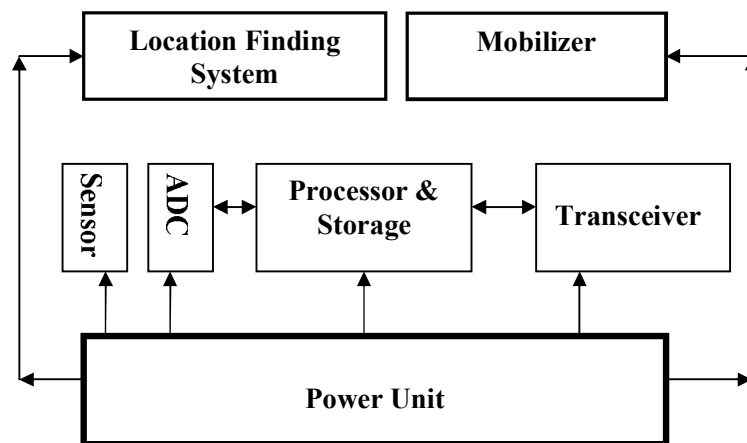
¹⁷ Production Cost

¹⁸ Hardware Constraint

پردازشگر، واحد ارتباطی و واحد تغذیه. ممکن است که وابسته به کاربرد آن‌ها شامل قطعاتی چون سیستم موقعیت‌یاب، و موبایلایزر نیز باشد.

واحد حسگر معمولاً از دو قسمت فرعی تشکیل شده است: حسگرها و ADC. سیگنال آنالوگ تولید شده از حسگرها توسط ADC به سیگنال دیجیتال تبدیل شده و به واحد پردازش تغذیه می‌شود، واحد پردازش که با یک واحد حافظه همراه می‌باشد روالی را مدیریت می‌کند که با همکاری سایر گره‌ها هدف اصلی را دنبال نماید. واحد ارتباطی جهت اتصال گره‌ها در شبکه به کار می‌رود. یکی از مهمترین بخش‌ها در گره‌های حسگر واحد برق تغذیه می‌باشد که ممکن است توسط باتری‌های خورشیدی تغذیه گردد.

واحد مبدل Transceiver ممکن است متشکل از عناصر فعال یا غیر فعال نوری بوده یا اینکه از سیگنال‌های رادیویی (RF) استفاده نماید که این روش مرسوم‌تر است. ارتباطات رادیویی نیاز به مدولاسیون، فیلترینگ، دیمودولاسیون و مدارات مالتی‌پلکس دارد و به علت نزدیکی آنتن‌های این گره‌های حسگر احتمال تداخل سیگنال‌های گره‌های مختلف وجود دارد.



شکل ۱-۱ اجزای گره‌های حسگر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

برای صرفه‌جویی در انرژی مصرفی در گره‌های حسگر، در این شبکه‌ها باید از الگوریتم‌های کارایی جهت کاهش طول مسیریابی استفاده شود. تکنولوژی Bluetooth کارایی خوبی برای این شبکه‌ها ندارد، چون با روشن و خاموش کردن گره‌ها باعث مصرف بیشتر انرژی می‌گردد.

بخش پردازنده و حافظه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم از جمله بخش‌های مهم می‌باشند. به عنوان مثال، یک گرهی حسگر بنام Smart Dust Mote از پردازنده‌ی نوع Atmel AVR با حافظه‌ی با ظرفیت ۸ کیلوبایت و ۵۱۲ بایت حافظه EEPROM تشکیل شده است و سیستم عامل TinyOS برای کنترل این پردازنده مورد استفاده قرار گرفته است.

در خیلی از کاربردها، حسگرها نیاز به دانستن موقعیت جغرافیایی خود دارند. زیرا به صورت تصادفی در یک منطقه واقع می‌شوند و در نتیجه نیاز به اطلاعات راجع به موقعیت خود جهت همکاری و ارتباط با بقیه‌ی گره‌ها دارند.

یکی از بهترین راه‌ها برای دستیابی هر گره به اطلاعات مربوط به موقعیت جغرافیایی اش، استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی GPS است. گره‌های بی‌سیم مجهز به سیستم موقعیت یاب جهانی GPS با حداقل ۵ متر دقت می‌شوند که البته همه‌ی گره‌ها در یک شبکه نیاز به سیستم GPS ندارند فقط تعدادی از آنها باید موقعیت و اطلاعات مختصاتی را در اختیار داشته باشند و در صورت نیاز این اطلاعات را در اختیار سایر گره‌ها قرار دهند. لازم به ذکر است که استفاده از GPS مانع بزرگی برای مقیاس‌پذیری شبکه و کم هزینه شدن آن می‌باشد.

توپولوژی شبکه‌های حسگر^{۱۹}: با توجه به اینکه هر لحظه احتمال این وجود دارد که یک

یا چند حسگر از فعالیت باز ایستند، پس همواره توپولوژی این شبکه‌ها در حال تغییر است.

پروتکل‌های طراحی شده باید قابلیت مواجه شدن با چنین شرایطی را داشته باشند.

شرایط محیطی^{۲۰}: این شبکه‌ها ممکن است در مناطق مختلف به کار گرفته شوند. برای هر

شرایط محیطی ممکن است پروتکل‌های خاصی بهتر عمل کنند.

محیط انتقال^{۲۱}: محیط انتقال می‌تواند یکی از حالت‌های RF، مادون قرمز یا نوری باشد. در

هر کدام از این محیط‌ها فرکانس مورد نظر برای ارتباط باید تعیین شود.

مصرف انرژی^{۲۲}: این فاکتور مهمترین پارامتری است که برای طراحی پروتکل‌های

شبکه‌های حسگر بی‌سیم در نظر گرفته می‌شود. هر حسگر برای اندازه‌گیری پارامتر مورد نظر،

انتقال اطلاعات و پردازش اطلاعات انرژی مصرف می‌کند. با توجه به اینکه پر مصرف‌ترین بخش

مربوط به انتقال اطلاعات است، در طراحی پروتکل‌ها سعی می‌شود که تا آنجایی که امکان دارد

ابتدا، با استفاده از پردازش اطلاعات، حجم اطلاعات مورد نظر برای انتقال کاهش داده شود. در این

رساله، با وجود آگاهی از تفاوت بین مفاهیمی چون توان و انرژی، با توجه به اینکه شبکه‌های

حسگر بی‌سیم اصولاً مبتنی بر باتری هستند، این دو مفهوم را به صورت مترادف به کار برده‌ایم.

شکل ۱-۲ پشته‌ی پروتکلی در این شبکه‌ها را که شامل لایه‌های کاربرد، انتقال، شبکه، پیوند داده و

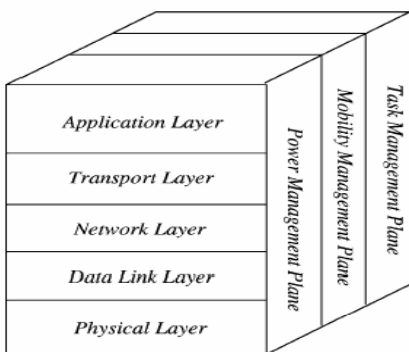
لایه فیزیکی می‌باشد، نشان می‌دهد.

¹⁹ Sensor Network Topology

²⁰ Operating Environment

²¹ Transmission Media

²² Energy Consumption



شکل ۲-۱ پشته پروتکل در شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

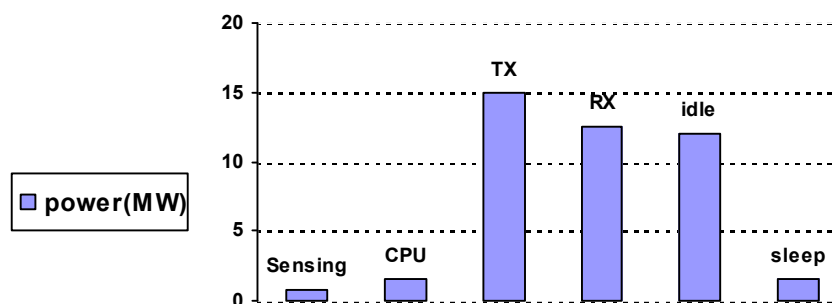
پشته‌ی پروتکلی برای ایستگاه پایه و گره‌های معمولی یکسان و به صورت شکل ۲-۱ می‌باشد و دارای سه رویه مدیریتی می‌باشد که شامل مدیریت انرژی مصرفی، مدیریت حرکت‌پذیری و مدیریت وظیفه می‌باشد.

در لایه‌ی فیزیکی طراحی سخت افزار کم هزینه و کارا و روش‌های مدولاسیون کم توان از موضوعات باز هستند. در لایه‌ی پیوند داده طراحی MAC و یافتن حد پایین انرژی لازم برای خود سازماندهی گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیز از موضوع‌هایی هستند که نیاز به تحقیقات بیشتری دارند. برای مثال در [Ye_02] یک پروتکل MAC به نام S-MAC معرفی شده است که نسبت به سایر پروتکل‌های مشابه کارایی بیشتری را در مصرف انرژی از خود نشان می‌دهد. این پروتکل در سال‌های اخیر (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) سرلوحه‌ی کار بسیاری از محققان قرار گرفته است.

یکی از معروفترین شبیه‌سازها برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، NCTUns^{۲۳} می‌باشد که قادر به شبیه‌سازی الگوریتم‌ها و بسیاری از مشخصات این شبکه‌ها می‌باشد. شکل ۳-۱ یک شبیه‌سازی انجام شده توسط این نرم‌افزار را بر روی توان مصرفی گره‌های حسگر نشان می‌دهد که این

²³ <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>

گره‌ها در حالت‌های فرستنده، گیرنده، بدون کار، حس‌کنندگی و پردازش، انرژی مصرف می‌کنند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ارتباطات نیاز به انرژی مصرفی بیشتری نسبت به پردازش دارند که این موضوع، اهمیت پروتکل‌های ارتباطی (مسیریابی) را به خوبی روشن می‌کند.



شکل ۱-۳- انرژی مصرفی در شبکه‌های حسگر بی سیم در شبیه‌سازی انجام شده توسط NCTUns

با توجه به اینکه مکان حسگرها از قبل در شبکه مشخص نمی‌باشد، وجود یک پروتکل مناسب مسیریابی برای انتقال اطلاعات بسیار مورد نیاز است. این پروتکل باید توانایی این را داشته باشد که بصورت تطبیقی بتواند عملیات مسیریابی را انجام دهد. از نکات بسیار مهمی که در طراحی پروتکل‌های مسیریابی باید در نظر گرفت مسأله مصرف توان است. مصرف توان در حسگرها باید به گونه ای باشد که عمر شبکه حداکثر شود. همچنین باید این مسأله را در نظر گرفت که پروتکل طوری نباشد که حسگرهایی که در قسمتهای خاصی از شبکه قرار دارند زودتر عمر خود را از دست بدهند. زیرا در این صورت، دیگر قادر نخواهیم بود آن قسمت از شبکه را نظارت کنیم و همچنین ممکن است این مسأله طوری رخ دهد که عملکرد کل شبکه را متوقف کند. در فصل ۲ راجع به مسیریابی و انواع پروتکل‌های آن توضیحات بیشتری داده شده است.

هدف از این رساله، معرفی پروتکل‌های ارتباطی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و سپس ارائه‌ی یک پروتکل ارتباطی مطمئن با لحاظ کردن مصرف انرژی پایین برای این شبکه‌هاست. اهداف این پروتکل، مسیریابی کارا در مصرف انرژی^{۲۴} در لایه شبکه و دسترسی مطمئن و با تاخیر کم گره‌ها به رسانه‌ی انتقال در زیرلایه‌ی MAC می‌باشد.

²⁴ Energy-Efficient

فصل ۲

۲ مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

با توجه به تفاوت‌های عمده بین شبکه‌های حسگر بی‌سیم با شبکه‌های امروزی و همچنین شبکه‌های MANET، مسیریابی در این شبکه‌ها توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. این تفاوت‌ها به قرار زیر است.

۱. امکان ایجاد یک مبنای آدرس‌دهی کلی در این شبکه‌ها وجود ندارد. بنابراین پروتکل-

هایی مثل پروتکل اینترنت (IP) در این شبکه‌ها کاربرد ندارد.

۲. تقریباً در تمامی کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیاز به این امر می‌باشد که داده‌ها

از نواحی مختلف به سمت یک ایستگاه پایه مشخص جریان پیدا کنند (برخلاف

شبکه‌های دیگر مخابراتی).

۳. با توجه به اینکه حسگرهایی که در نزدیکی پدیده مورد نظر برای اندازه‌گیری قرار

دارند با احتمال زیاد یک نوع داده تولید می‌کنند، بنابراین تعداد داده‌های تکراری در

این شبکه‌ها زیاد است.

۴. این حسگرها از نظر قدرت در ارسال داده، انرژی، قدرت پردازش اطلاعات و حافظه

محدودیت دارند، پس پروتکل‌های مسیریابی باید یک مدیریت بسیار دقیق روی این

منابع داشته باشند.

با توجه به اختلافات ذکر شده، تعداد زیادی الگوریتم جدید برای حل مشکل مسیریابی

برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، پیشنهاد شده است. در طراحی این مکانیزم‌های مسیریابی، علاوه بر

مشخصات خاص حسگرها برای آن شبکه، کاربرد شبکه و همچنین نیازمندی‌های ساختار آن نیز در

نظر گرفته شده است. تقریباً تمامی پروتکل‌های مسیریابی برای این شبکه‌ها را می‌توان در گروه‌های

زیر تقسیم‌بندی کرد.

۱. پروتکل‌های با محوریت داده (Data-Centric Protocols): مبنای این پروتکل‌ها بر

اساس درخواست از طرف ایستگاه پایه می‌باشد^{۲۵} و مبنای عملکرد آن به طریقی است

که باعث می‌شود تعداد زیادی از داده‌های تکراری دوباره ارسال نشوند.

۲. پروتکل‌های سلسله‌مراتبی (Hierarchical Protocols): در این پروتکل‌ها شبکه به

زیربخش‌هایی مختلف به نام خوشه^{۲۶} تقسیم می‌شود که در هریک از خوشه‌ها،

سرپرست آن خوشه ($CH^{۲۷}$) وظایفی را از جمله ترکیب داده‌ها^{۲۸} و حذف داده‌های

تکراری به عهده می‌گیرد.

۳. پروتکل‌های مبتنی بر مکان (Location-Based Protocols): در این پروتکل‌ها،

اطلاعات مربوط به مکان حسگرها به کار گرفته می‌شوند تا بواسطه آن مسیرهای بهینه

برای انتقال اطلاعات بدست آیند.

²⁵ Query-Based

²⁶ Cluster

²⁷ Cluster Head

²⁸ Data Aggregation

۴. عده‌ی کمی از پروتکل‌های دیگر نیز وجود دارند که بر مبنای مدل جریان داده‌ها در

شبکه^{۲۹} و یا بر مبنای کیفیت خدمات (QoS^{۳۰}) عمل می‌کنند که در آینده توضیحات

بیشتری مربوط به این پروتکل‌ها داده می‌شود.

در زیر چند پارامتر که برای پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد نظر

قرار می‌گیرند، مطرح شده‌اند:

۱. دینامیک شبکه

اکثراً حسگرها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ثابت هستند. فقط بعضی از شبکه‌ها وجود دارد

که در آن برخی از حسگرها متحرک هستند. در حضور حسگرهای متحرک، مساله‌ی پایداری

مسیرها امر بسیار مهمی است. از طرفی خود پارامتر در حال اندازه‌گیری می‌تواند حالت استاتیک و

یا دینامیک داشته باشد. مثلاً در یک کاربرد تعقیب و تشخیص هدف، شبکه حالت دینامیک به خود

می‌گیرد، در صورتی مثلاً برای تشخیص آتش در یک جنگل دیگر اینطور نیست و شبکه حالت

ثابت دارد. در حالت دینامیک، داده‌ها از حسگرها به صورت متناوب به ایستگاه پایه فرستاده

می‌شوند در صورتی که در حالت ثابت هر وقت پدیده‌ای رخ می‌دهد به ایستگاه پایه گزارش

می‌شود.

۲. جایگذاری حسگرها در شبکه

با توجه به کاربردهای مختلف، جایگذاری حسگرها در شبکه‌های مختلف با یکدیگر

متفاوت می‌باشند که این امر می‌تواند در کارایی کل شبکه تاثیر مستقیم بگذارد. در برخی از

کاربردها، مکان حسگرها از قبل تعیین شده است اما در اکثر شبکه‌های حسگر بی‌سیم به این

صورت نیست. در شبکه‌هایی که مکان حسگرها از قبل معین شده، اطلاعات نیز از طریق مسیرهای

²⁹ Network-flow Model

³⁰ Quality of Service

از قبل تعیین شده ارسال می‌شوند. اما در شبکه‌هایی که مکان از قبل مشخص نشده باید حسگرها به صورت خودکار مسیریابی را انجام دهند. معمولا شبکه‌ها به این صورت هستند و برای این شبکه‌ها ایجاد زیرساخت مناسب در کارایی سیستم تاثیر بسزایی دارد.

۳. محدودیت انرژی

در طی مراحل طراحی زیرساخت شبکه، ایجاد مسیرها شدیداً تحت تاثیر محدودیت انرژی حسگرها قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه توان ارسال به صورت بی‌سیم با توان دوم (و بالاتر) مسافت رابطه مستقیم دارد، استفاده از روشهای ارسال چندگامی باعث می‌شود تا توان کمتری تلف شود. اما استفاده از این روش باعث ایجاد مشکلاتی در مدیریت توپولوژی و کنترل دسترسی به محیط انتقال می‌شود. بنابراین با توجه به این که در اکثر شبکه‌ها، حسگرها به صورت اتفاقی در شبکه قرار گرفته‌اند، استفاده از روشهای چند مسیره امکان ناپذیر است.

۴. مدل انتقال اطلاعات

بنابر کاربرد یک شبکه حسگر بی‌سیم، مدل انتقال اطلاعات در آن می‌تواند پیوسته (Time-Driven)، بسته به اتفاق (Event-Driven)، بسته به درخواست (Query-Driven) و یا ترکیبی از این‌ها باشد. در حالت پیوسته، هر حسگر اطلاعات خود را به صورت متناوب ارسال می‌دارد. در حالت بسته به اتفاق، هر وقت اتفاقی از قبل تعیین شده در یک بخش از شبکه بوقوع بپیوندد، این اتفاق گزارش می‌شود. در حالت بسته به درخواست، از طرف ایستگاه پایه یک درخواست در شبکه منتشر شده و به حسگرهای دلخواه می‌رسد. حسگرهای مورد نظر نیز پاسخ مناسب را می‌دهند. برخی از شبکه‌ها از ترکیب این مدلها استفاده می‌کنند. از نقطه نظر کم کردن مصرف انرژی و پایداری مسیرهای ایجاد شده، مدل انتقال اطلاعات بسیار مورد اهمیت است. مثلاً

در یک کاربرد تشخیص آتش در جنگل، استفاده از یک پروتکل با مدل انتقال اطلاعات بسته به اتفاق بسیار کارا و مناسب است.

۵. ترکیب داده‌ها (Data Aggregation)

بسیاری از حسگرها ممکن است داده‌های تکراری تولید کنند. با استفاده از تکنیک ترکیب داده‌ها می‌توان از حجم اطلاعات ارسالی تا حد زیادی کم کرد. انواع مختلف این تکنیک در [Krishana_02b] توضیح داده شده است. با توجه به اینکه پردازش اطلاعات کمتر از ارسال اطلاعات توان تلف می‌کند، ترکیب اطلاعات بسیار مهم جلوه می‌کند و به همین دلیل در بسیاری از پروتکل‌ها از این تکنیک استفاده شده است. می‌توان با استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال اطلاعات دقیق‌تری بدست آورد که به این روش Data Fusion می‌گویند که یکی از روش‌های آن روش شکل‌دهی پرتو^{۳۱} می‌باشد. در ادامه چند پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم که از تکنیک ترکیب داده‌ها استفاده می‌کنند، توضیح داده شده است.

۱-۲ پروتکل‌های با محوریت داده (Data-Centric Protocols)

در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تخصیص یک شناسه کلی برای هر حسگر در شبکه امکان‌پذیر نیست. عدم وجود این شناسه همراه با جایگذاری تصادفی حسگرها در شبکه باعث می‌شود تا درخواست اطلاعات از یک گروه مشخص از حسگرها کمی مشکل شود. بنابراین داده‌ها با تکرار زیاد به سمت ناحیه‌ی مورد نظر جاری می‌شوند. برای جلوگیری از مصرف بیهوده‌ی توان از روش‌هایی مانند ترکیب داده‌ها استفاده می‌شود. این مساله باعث می‌شود که

³¹ Beam Forming

مسیریابی در این شبکه‌ها، به جای بر مبنای آدرس (Address-Based)، بر مبنای داده (Data-Centric) باشد.

در پروتکل‌های Data-Centric، ایستگاه پایه درخواست‌های خود را به مناطق مورد نظر خود می‌فرستد و منتظر می‌شود تا داده‌ها از حسگرهایی که در آن ناحیه قرار دارند، بازگردند. بنابراین در این روش مشخصات یک حسگر مهمتر از آدرس آن می‌باشد. این مشخصات شامل مکان، پارامترهایی که می‌تواند اندازه بگیرد و ... می‌باشند. در ادامه چندین پروتکل مهم Data-Centric مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

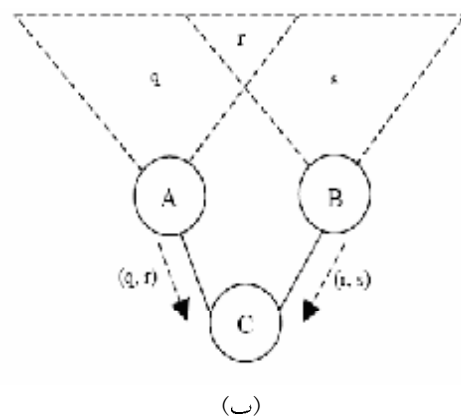
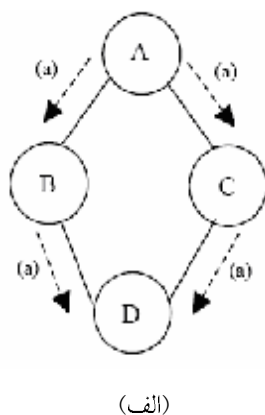
۱-۲ Gossiping و Flooding [Hedetniemi_88] و [Akyildiz_02]

این دو روش از مکانیزمهای کلاسیک برای انتقال داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشند. در این پروتکل‌ها طراحی خاصی برای الگوریتم مسیریابی و حفظ توپولوژی شبکه وجود ندارد. در روش Flooding، هر حسگر که داده‌ای را دریافت می‌کند آن را به تمام همسایه‌های خود بجز فرستنده می‌فرستد و این کار آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا داده به مقصد برسد و یا اینکه تعداد گامهای^{۳۲} در نظر گرفته شده برای آن داده طی شود. از طرفی در روش Gossiping که حالت پیشرفته‌تری از Flooding است، هر حسگری که یک داده را دریافت می‌کند آن را فقط به یکی از همسایه‌های خود می‌فرستد که البته این همسایه را کاملاً تصادفی انتخاب می‌کند. این کار آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا داده به مقصد برسد.

پروتکل‌های ذکر شده بسیار ساده پیاده‌سازی می‌شوند اما این روشها دارای مشکلاتی زیادی هستند. یکی از مشکلات Flooding، Implosion است که یک داده از دو یا چند مسیر به یک حسگر می‌رسد. این موضوع در شکل ۱-۲ (الف) نشان داده شده است. از مشکلات دیگر

³² Hop

همپوشانی^{۳۳} است که دو یا چند حسگر که نزدیک به منطقه مورد نظر می‌باشند، یک نوع اطلاعات را به یک حسگر می‌فرستند (شکل ۱-۲ الف)). سومین مشکل کور بودن پروتکل نسبت به منابع انرژی و پهنای باند در شبکه است. در Gossiping دیگر مشکل Implosion وجود ندارد زیرا همواره فقط یک همسایه برای ارسال داده انتخاب می‌شود. اما مشکل عمده‌ی روش Gossiping، تاخیر بسیار زیاد آن می‌باشد.



شکل ۱-۲ مشکلات Flooding و Gossiping (الف) مشکل Implosion (ب) مشکل همپوشانی

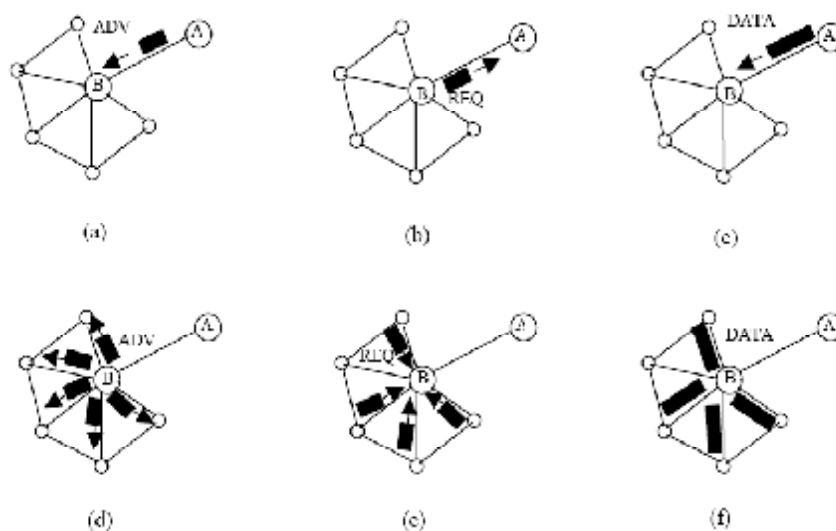
۲-۱-۲ SPIN^{۳۴} [Intanagonwiwat_00]

این روش، روش نسبتاً خوب و جدیدی برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در این پروتکل علاوه بر پیغامهای داده، پیغامهای دیگری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد و بدین صورت از حجم نقل و انتقال کلی اطلاعات می‌کاهد. نحوه‌ی کار SPIN بدین صورت است که حسگر پس از دریافت یک داده‌ی جدید، به همه‌ی همسایه‌های خود یک پیغام تبلیغ (Advertisement یا ADV) می‌فرستد. هر کدام از همسایه‌ها که به این داده نیاز داشته باشند یک

³³ Overlap

³⁴ Sensor Protocols for Information via Negotiation

پیغام درخواست (Request یا REQ) به حسگر برمی گردانند. وقتی حسگر پیغام REQ را دریافت کرد، داده را فقط به آن همسایه‌هایی که REQ فرستاده بودند، می‌فرستند. با این روش دیگر مشکل داده‌های تکراری که در Flooding وجود داشت، پیش نمی‌آید و بدین صورت کارایی بسیار بالاتر می‌رود. در شکل ۲-۲ نحوه عملکرد SPIN نشان داده است.



شکل ۲-۲ نحوه عملکرد پروتکل SPIN.

یکی از خوبی‌های پروتکل SPIN این است که در این پروتکل تغییرات در توپولوژی شبکه فقط به صورت محلی مورد توجه است. در واقع هر حسگر نیاز دارد تا همسایه‌های نزدیک خود را بشناسد. مصرف انرژی در SPIN تقریباً $\frac{3}{5}$ برابر کمتر از Flooding است و همچنین استفاده از ADV و REQ حجم داده‌های تکراری را به نصف کاهش می‌دهد. مشکلی که در SPIN وجود دارد این است که هیچ تضمینی برای انتقال داده از یک حسگر به حسگر دیگر وجود ندارد. مثلاً اگر حسگر مقصد بسیار دور نسبت به حسگر مبدا قرار گرفته باشد و حسگرهای میانی

علاقه‌ای به دریافت اطلاعات نداشته باشند، ممکن است این داده به مقصد نرسد. پس SPIN در جاهایی که تشخیص مزاحم و جاسوس^{۳۵} مهم می‌باشد، انتخاب خوبی نیست. زیرا در این کاربردها انتقال مطمئن داده‌ها بصورت منظم بسیار پراهمیت است.

۳-۱-۲ [Intanagonwiwat_00] Directed Diffusion

این پروتکل، یکی از پروتکل‌های بسیار اساسی و مهم از نوع Data-Centric است که پروتکل‌های زیادی بر مبنای آن پایه‌ریزی شده‌اند. در این پروتکل برای داده‌ها و درخواست‌ها^{۳۶} مشخصاتی تعریف می‌شود که به آن Attribute-Based Naming می‌گویند و به جای فرستادن داده‌های خام، این مشخصات فرستاده می‌شوند. پروتکل طوری طراحی شده است که هر وقت تقاضای جدیدی ایجاد شد، بر مبنای آن مسیریابی شروع می‌شود.^{۳۷} مشخصات مورد نظر برای یک درخواست مثلاً می‌تواند نام پارامترهای مورد نظر برای اندازه‌گیری، پریود ارسال داده‌ها، مدت زمان ارسال، منطقه جغرافیایی و ... باشد. هر حسگری که درخواست را دریافت می‌کند آنرا در حافظه خود برای استفاده‌ی بعدی نگه می‌دارد. حسگرها به طور محلی کار ترکیب داده‌ها را انجام می‌دهند و بدین صورت از حجم اطلاعات ارسالی می‌کاهند. هر حسگر که یک درخواست را دریافت می‌کند آن را به همسایه‌های خود می‌فرستد و بدین صورت بین آنها گرادیان تشکیل می‌شود. گرادیان‌ها در واقع مسیرهای برگشتی هستند که حسگرهای همسایه بواسطه آن درخواست را دریافت کرده‌اند. با ایجاد گرادیان‌ها، بین فرستنده و گیرنده مسیرهای مختلفی ایجاد می‌شوند. بین این مسیرها، تنها یک مسیر به عنوان مسیر مناسب^{۳۸} انتخاب می‌شود. این انتخاب بر مبنای نرخ

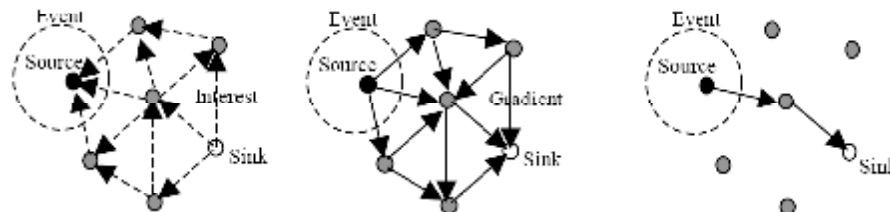
³⁵ Intrusion Detection

³⁶ Query

³⁷ On Demand Routing

³⁸ Reinforced Path

دریافت اطلاعات از مسیرهای مختلف است. در واقع مسیری انتخاب میشود که نرخ اطلاعات برگشتی بالاتری داشته باشد. در شکل ۳-۲ پروتکل Directed Diffusion نشان داده شده است.



شکل ۳-۲ نحوه‌ی عملکرد پروتکل Directed Diffusion

اگر مسیر انتخاب شده به هر دلیلی قادر به ادامه فعالیت خود نباشد، باید مسیر جدیدی انتخاب شود. در واقع عملیات جستجو برای یافتن بهترین مسیر دوباره انجام می‌شود و بین مسیرهای باقیمانده، مسیری که اطلاعات از آن با بالاترین نرخ دریافت می‌شوند، برگزیده شده و به عنوان مسیر جایگزین در نظر گرفته می‌شود.

Ganesan و همراهانش در [Ganesan_02] پیشنهاد کرده‌اند که بجای یک مسیر، چند مسیر را انتخاب کنیم تا به محض اینکه مسیر اصلی از کار افتاد یکی دیگر را جایگزین کنیم. برای حفظ این مسیرها باید داده‌ها با نرخ کم از این مسیرها نیز فرستاده شوند. اگرچه خود این امر باعث تلف شدن انرژی می‌شود، اما می‌تواند در هنگام از کار افتادن یک مسیر به صرفه‌جویی در انرژی کمک کند، زیرا دیگر نیاز به جستجو برای مسیر جدید نداریم.

SPIN و Directed Diffusion در مدل انتقال اطلاعات با یکدیگر متفاوت هستند. در Directed Diffusion هرگاه ایستگاه پایه به اطلاعاتی نیاز داشت، آنرا به صورت یک درخواست به شبکه می‌فرستد، در صورتی که در SPIN هرگاه حسگری داده‌ی مورد نظر را استخراج کند آنرا

به ایستگاه پایه می‌فرستد. Directed Diffusion برتری‌های زیادی دارد؛ با توجه به اینکه Data-Centric است همه ارتباطات با همسایه‌های کناری صورت می‌گیرد و نیاز به مکانیزم آدرس‌دهی خاصی ندارد. هر حسگر می‌تواند کار ترکیب و نگهداری اطلاعات را انجام دهد. نگهداری اطلاعات برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کم کردن تاخیر امری بسیار ضروری و مهم است. با توجه به اینکه شبکه فقط در موقع درخواست ایستگاه پایه، شروع به فعالیت می‌کند و همچنین نیازی به حفظ توپولوژی کلی شبکه وجود ندارد، این پروتکل در مصرف انرژی بسیار کارآمد می‌باشد.

با وجود این مزایا این پروتکل برای همه‌ی کاربردها مناسب نیست. مثلاً در کاربردهایی که نیاز باشد تا حسگرها اطلاعات خود را پیوسته^{۳۹} به ایستگاه پایه بفرستند، استفاده از Directed Diffusion به صرفه نیست. بنابراین این پروتکل برای کاربردی مثل کنترل محیط‌های طبیعی مناسب نیست. همچنین نامگذاری برای داده‌ها و مشخصات آنها وابسته به نوع کاربرد است و از قبل باید تعیین شود. از طرفی پردازش اطلاعات برای فهمیدن تطابق آن با درخواست، خود باعث مصرف انرژی و تاخیر در شبکه می‌شود.

۲-۱-۴ EAR^{۴۰} [Shah_02]

در این روش از یک سری مسیرهای زیربینه جهت افزایش طول عمر شبکه استفاده می‌شود. این مسیرها به واسطه‌ی یک تابع احتمال، که به مصرف انرژی در آن مسیرها بستگی دارد، انتخاب می‌شوند. مهمترین پارامتری که در طراحی این پروتکل مدنظر گرفته شده است بقای شبکه می‌باشد. نظر به اینکه استفاده‌ی دائمی از مسیری که کمترین انرژی در آن تلف می‌شود، باعث

³⁹ Time Driven

⁴⁰ Energy-Aware Routing

تخلیه‌ی انرژی حسگرهای موجود در آن مسیر می‌شود، در این روش به جای استفاده از مسیر بهینه، چند مسیر زیر بهینه در نظر گرفته می‌شوند که با استفاده از یک تابع احتمال فقط یکی از آنها انتخاب شده و برای مدتی از آن مسیر استفاده می‌شود. این پروتکل از سه فاز تشکیل شده است.

۱. فاز راه‌اندازی^{۴۱}: در این فاز با استفاده از پروتکل Flooding محلی^{۴۲}، مسیرها تا مقصد شناسایی شده و جدول‌های مسیریابی ایجاد می‌شوند. در طی این عملیات، تابع هزینه‌ی انرژی برای هر حسگر حساب می‌شود. برای مثال، اگر درخواست از حسگر N_i به حسگر N_j فرستاده شود، حسگر N_j تابع هزینه مسیر را به صورت زیر حساب می‌کند.

$$C_{N_j, N_i} = Cost(N_i) + Metric(N_j, N_i) \quad (۱-۲)$$

در این رابطه متریک انرژی، $Metric(N_j, N_i)$ خود تابعی از هزینه‌ی ارسال و دریافت و همچنین مقدار انرژی باقیمانده‌ی حسگرها در طول مسیر است. مسیرهایی که هزینه بسیار بالایی داشته باشند در نظر گرفته نمی‌شوند. در این روش انتخاب حسگرها بر مبنای نزدیکی آن‌ها به مقصد می‌باشد. هر حسگر به هر یک از همسایه‌های خود که در جدول ارسال^{۴۳} آن وجود دارد، یک احتمال نسبت می‌دهد. این احتمال که با معکوس هزینه رابطه مستقیم دارد، به صورت زیر بدست می‌آید.

$$P_{N_j, N_i} = \frac{1/C_{N_j, N_i}}{\sum_{k \in FT_j} 1/C_{N_j, N_k}} \quad (۲-۲)$$

^{۴۱} Setup Phase

^{۴۲} Local Flooding

^{۴۳} Forwarding Table (FT)

N_j نیز هزینه متوسط تا مقصد را با توجه به همسایه‌هایی که در جدول ارسال وجود دارند مطابق زیر حساب می‌کند. این مقدار بدست آمده برای N_j به همسایه‌ها فرستاده می‌شود.

$$Cost(N_j) = \sum_{i \in FT_j} P_{N_j, N_i} C_{N_j, N_i} \quad (۳-۲)$$

۲. فاز انتقال داده‌ها^{۴۴}: هر حسگر داده‌ی خود را به یکی از همسایه‌های خود که در جدول ارسال وجود دارد با توجه به احتمال اختصاص داده شده به آن همسایه می‌فرستد.

۳. فاز نگه‌داری مسیرها^{۴۵}: هر چند وقت یک بار، یک داده به صورت Flooding محلی فرستاده می‌شود تا از سالم بودن مسیرها اطمینان حاصل شود.

این پروتکل با Directed Diffusion در نحوه‌ی پیدا کردن مسیرها از ایستگاه پایه تا حسگرها مشترک است. در Directed Diffusion از بین چند مسیر، تنها مسیری انتخاب می‌شود که نرخ داده بیشتری بواسطه آن دریافت می‌شود. اما در EAR مسیر انتخابی بواسطه تابع احتمال برگزیده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که EAR، ۲۱/۵٪ در مصرف انرژی و ۴۴٪ در افزایش طول عمر شبکه نسبت به Directed Diffusion بهتر عمل می‌کند. از طرفی EAR مثل Directed Diffusion وقتی مسیر انتخاب شده به هر دلیلی از کار می‌افتد، دچار مشکل نمی‌شود، زیرا علاوه بر مسیر اصلی، مسیرهای دیگری را نیز در اختیار دارد.

۲-۱-۵ GBR^{۴۶} [Schurgers_01]

این پروتکل یک روش تغییر یافته از Directed Diffusion است. وقتی که درخواست ایستگاه پایه در کل شبکه پخش می‌شود، هر حسگر تعداد گام‌های مورد نیاز برای رسیدن به

⁴⁴ Data Communication Phase

⁴⁵ Route Maintenance Phase

⁴⁶ Gradient-Based Routing

ایستگاه پایه را اندازه‌گیری می‌کند و بدین وسیله می‌تواند کمترین تعداد گام برای رسیدن به ایستگاه پایه را که ارتفاع^{۴۷} آن حسگر نامیده می‌شود را بدست آورد. اختلاف بین ارتفاع حسگرهای همسایه به عنوان گرادیان مسیر بین آنها در نظر گرفته می‌شود. داده‌های هر حسگر توسط مسیرهایی که بالاترین گرادیان را دارند به ایستگاه پایه فرستاده می‌شوند. در واقع این روش تلاش می‌کند تا با تعداد گام‌های کمتر داده را به ایستگاه پایه برساند.

برای توزیع یکنواخت ترافیک روی شبکه در این پروتکل دو تکنیک ترکیب داده‌ها و پخش ترافیک^{۴۸} به کار گرفته شده است. حسگرهایی که از چندین مسیر داده دریافت می‌کنند می‌توانند کار ترکیب داده‌ها را انجام دهند. تکنیک‌های پخش ترافیک نیز به قرار زیر می‌باشند.

روش اتفاقی^{۴۹}: اگر دو یا چند مسیر با گرادیان یکسان وجود داشته باشند، انتخاب مسیر به صورت تصادفی خواهد بود.

روش انرژی^{۵۰}: وقتی که انرژی یک حسگر از یک آستانه معین پایین‌تر می‌آید، ارتفاع خود را افزایش می‌دهد و بدین وسیله به حسگرهای دیگر می‌فهماند که تا حد امکان از این حسگر برای انتقال داده‌ها کمتر استفاده شود.

روش جریان داده^{۵۱}: این روش تلاش می‌کند تا مسیرهایی که در حال حاضر برای انتقال داده‌ها استفاده می‌شوند، برای ایجاد مسیرهایی جدید به کار گرفته نشوند.

با بکارگیری روشهای بالا ترافیک در کل شبکه پخش می‌شود و در نتیجه طول عمر شبکه افزایش پیدا می‌کند. همچنین این روش‌ها را می‌توان در پروتکل‌های دیگر نیز به کار برد. نتایج

⁴⁷ Height

⁴⁸ Traffic Spreading

⁴⁹ Stochastic Scheme

⁵⁰ Energy-Based Scheme

⁵¹ Stream-Based Scheme

شبیه‌سازی‌ها نشانگر آن است که GBR از نظر مصرف انرژی موثرتر از Directed Diffusion کار می‌کند.

۲-۲ پروتکل‌های دارای سلسله‌مراتب (Hierarchical Protocols)

همان‌طور که در فصل ۱ گفته شد، مانند شبکه‌های مخابراتی دیگر، مقیاس‌پذیری یا قابلیت گسترش شبکه یکی از مهمترین پارامترهای طراحی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. اگر قرار باشد که همه‌ی بار شبکه روی یک یا چند مسیر خاص باشد، با گسترش شبکه حجم ترافیک در شبکه بشدت افزایش یافته و بدین ترتیب با بالا رفتن تاخیر، کارایی شبکه افت خواهد کرد. بنابراین با توجه به اینکه حسگرها معمولاً قابلیت ایجاد ارتباط راه دور را ندارند، استفاده از این روش قابلیت گسترش شبکه را محدود می‌سازد. برای بالا بردن قابلیت شبکه در پوشش^{۵۲} مناطق بزرگتر بدون اینکه مشکلی در کیفیت خدمات شبکه پیش بیاید، تقسیم‌بندی شبکه به چند خوشه پیشنهاد شده است. هدف اصلی پروتکل‌های سلسله‌مراتبی (مبتنی بر خوشه‌بندی) در واقع بکارگیری یک روش مناسب جهت استفاده‌ی بهینه از منابع انرژی می‌باشد. این کار با استفاده از ارسال بصورت چندگامی^{۵۳} در شبکه و همچنین ترکیب اطلاعات یک خوشه به جهت کم کردن داده‌های ارسالی صورت می‌گیرد. پروتکل LEACH یکی از اولین پروتکل‌های سلسله‌مراتبی بود که برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی شد و بسیاری دیگر از پروتکل‌ها بر مبنای آن طراحی شده‌اند. در ادامه پروتکل LEACH و چند پروتکل سلسله‌مراتبی پرکاربرد دیگر معرفی شده‌اند.

⁵² Coverage

⁵³ Multi-Hop

این پروتکل یکی از معروف‌ترین پروتکل‌های سلسله‌مراتبی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در اینجا این پروتکل را به صورت کلی معرفی می‌کنیم و در فصل ۳ آن را به صورت کامل و جزء به جزء بررسی می‌کنیم. در این پروتکل زمان به قسمت‌هایی به نام دور^{۵۵} تقسیم می‌شود. هر دور نیز به دو فاز تقسیم می‌شود. فاز اول، فاز راه‌اندازی نام دارد که در واقع فاز تشکیل خوشه‌ها است و فاز دوم مربوط به عملکرد عادی شبکه است که فاز حالت پایدار نام دارد. در فاز اول بنابر یک تابع احتمال تطبیقی، CHها انتخاب می‌شوند. انتخاب CHها بدین صورت است که هر گرهی حسگر یک عدد به صورت تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌کند. اگر این عدد کوچکتر از یک آستانه‌ی تعیین شده باشد، در طول آن دور آن گره به عنوان CH انتخاب می‌شود.

این تابع احتمال طوری طراحی شده است که در ظرف تعداد مشخصی از دورها هر حسگر فقط یک بار CH شود و بدین صورت مصرف انرژی روی کل شبکه پخش شود. پس از آنکه در فاز راه‌اندازی هر دور، CHها انتخاب شدند، هر CH انتخاب خود را به عنوان CH به سایر گره‌ها اعلام می‌کند و هر گره نیز CH مناسب برای خود را انتخاب می‌کند و این امر را به CH مربوطه اعلام می‌کند و بدین صورت خوشه‌ها شکل می‌گیرند. سپس هر CH برای حسگرهای خوشه‌ی خود برنامه‌ریزی زمانی انجام می‌دهد و برای هر حسگر یک برش زمانی^{۵۶} تخصیص می‌دهد تا بواسطه آن از رخداد تصادم^{۵۷} بین داده‌های حسگرهای هر خوشه جلوگیری شود.

⁵⁴ Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

⁵⁵ Round

⁵⁶ Time Slot

⁵⁷ Collision

همچنین برای جلوگیری از رخداد تصادم بین داده‌های خوشه‌های مختلف، از روش طیف گسترده با توالی مستقیم ($^{58}DSSS$) استفاده می‌گردد.

در فاز دوم هر حسگر داده‌ی خود را در برش زمانی خودش می‌فرستد و CH پس از دریافت همه‌ی اطلاعات حسگرهای موجود در خوشه‌اش، آنها را ترکیب کرده و به ایستگاه پایه می‌فرستد. با توجه به اینکه هر CH همه داده‌های حسگرهای موجود در خوشه را ترکیب می‌کند، در حجم داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه و در نتیجه در مصرف انرژی صرفه‌جویی قابل توجهی بدست می‌آید.

از مهمترین مزایای الگوریتم LEACH این است که اختلاف بین طول عمر گره‌های مختلف نسبت به پروتکل‌های پیشین کم شده است و طول عمر شبکه با استفاده از ایده خوشه بندی دینامیک، افزایش یافته است. اما همین شکل‌گیری خوشه‌ها در ابتدای هر دور باعث تلف شدن انرژی می‌شود که از معایب این پروتکل به شمار می‌رود. LEACH در جاهایی که حسگرها بصورت فشرده در کنار هم قرار گرفته‌اند عملکرد بهتری دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها عملکرد بسیار بهتر LEACH را نسبت به پروتکل‌های قدیمی‌تر مثل ارتباط مستقیم⁵⁹ و حداقل انرژی برای ارسال⁶⁰ نشان می‌دهند.

۲-۲-۲ PEGASIS⁶¹ [Lindsey_02]

این روش در واقع حالت پیشرفت داده شده‌ی پروتکل LEACH است. در این پروتکل به جای تشکیل خوشه‌های مختلف، یک زنجیره‌ی اتصال بین تمامی حسگرها در شبکه برقرار

⁵⁸ Direct Sequence Spread Spectrum

⁵⁹ Direct Communication

⁶⁰ Minimum Transmission Energy

⁶¹ Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

می‌شود، به طوری که هر حسگر با همسایه‌ی خود برای ارسال و دریافت داده‌ها در ارتباط است و در کل شبکه نیز فقط یک حسگر به عنوان فرستنده‌ی داده‌ها به ایستگاه پایه انتخاب می‌شود.

داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرها به حسگرهای همسایه فرستاده می‌شود. هر حسگری که داده‌ای را از همسایه خود دریافت کرد، آن را با داده‌ی خود ترکیب کرده و به حسگر بعدی می‌فرستد. این کار آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا داده‌ها به حسگری که با ایستگاه پایه در ارتباط است، برسند. ارتباط بین حسگرها با حسگرهای همسایه بدین صورت است که هر حسگر آن همسایه‌ای را برای اتصال به زنجیره (درخت) انتخاب می‌کند که به آن نزدیکتر باشد. مثال زیر (شکل ۲-۴) عملکرد PEGASIS را بهتر نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، حسگر c_0 داده‌ی خود را به حسگر c_1 می‌فرستد. حسگر c_1 داده‌ی خود را با این داده ترکیب می‌کند و نتیجه را به حسگر c_2 می‌فرستد. حسگر c_4 نیز داده‌ی خود را به حسگر c_3 می‌فرستد، و حسگر c_3 پس از ترکیب کردن با داده‌ی خود آن را به c_2 ارسال می‌کند. حسگر c_2 نیز داده‌هایی را که از دو طرف دریافت کرده را باهم ترکیب کرده و آنرا به ایستگاه پایه می‌فرستد.

$$c_0 \rightarrow c_1 \rightarrow c_2 \leftarrow c_3 \leftarrow c_4$$



Base Station

شکل ۲-۴ نحوه عملکرد پروتکل PEGASIS.

تفاوت بین LEACH و PEGASIS در این است که PEGASIS به جای خوشه از زنجیره‌ی اتصال بین حسگرها استفاده می‌کند و در نهایت فقط یک حسگر کار ارتباط با ایستگاه پایه را به عهده می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که PEGASIS بین ۱۰۰٪ تا ۳۰۰٪ برای شبکه‌هایی با اندازه‌های مختلف بهتر از LEACH عمل می‌کند. این بهبود بخاطر حذف قسمت

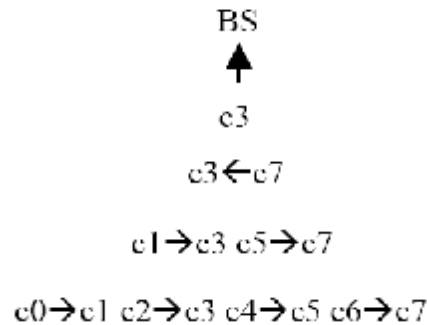
تشکیل خوشه‌ها در LEACH و همچنین کم کردن داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه بدست می‌آید. اما مشکل اصلی PEGASIS بوجود آمدن تأخیر زیاد در ارسال داده‌ی نهایی به ایستگاه پایه می‌باشد. در ضمن وجود تنها یک حسگر برای ارتباط با ایستگاه پایه، مانعی بزرگ برای مقیاس‌پذیری این پروتکل محسوب می‌شود.

PEGASIS سلسله‌مراتبی⁶² روش بهبود یافته‌ی PEGASIS می‌باشد که هدف آن کاهش تأخیر در زمان ارسال داده به ایستگاه پایه است. در این روش چندین حسگر به طور همزمان قادر به ارسال داده‌هایشان به حسگرهای همسایه‌ی خود می‌باشند. برای جلوگیری از تداخل داده‌ها دو راه پیشنهاد می‌شود. اول اینکه از روش‌های کدگذاری سیگنال مثل CDMA استفاده کنیم، یا مطابق روش دوم در یک لحظه، تنها حسگرهایی قادر به ارسال باشند که از لحاظ مکانی از هم دیگر فاصله داشته باشند تا داده‌های آن‌ها باهم تلافی پیدا نکند.

این نسخه از PEGASIS تلاش می‌کند تا با ارسال موازی اطلاعات از تأخیر بکاهد. در این روش تأخیر از مرتبه‌ی $O(\log N)$ می‌باشد که N تعداد حسگرها در شبکه است. مثال زیر (شکل ۲-۵) بیانگر نحوه‌ی عملکرد پروتکل است. حسگر $c3$ به عنوان حسگر برگزیده برای ارتباط با ایستگاه پایه در دور حاضر انتخاب شده است. با توجه به اینکه $c3$ در مکان سوم درخت قرار گرفته است، تمام حسگرهایی که شماره‌ی زوج دارند داده‌ی خود را به همسایه‌ی خود می‌فرستند. در مرحله‌ی بعدی تمام حسگرهایی که داده دریافت کرده‌اند، این داده‌ها را با داده‌ی خود ترکیب کرده و به نزدیکترین همسایه در جهت راست خود می‌فرستند. چون $c1$ همسایه سمت راست نزدیک‌تری که شماره آن فرد باشد ندارد، داده‌ی خود را در مرحله‌ی دوم به $c3$ می‌فرستد. اما در مرحله‌ی دوم $c5$ داده‌ی خود را به $c7$ که در سمت راست خود است می‌فرستد.

⁶² Hierarchical-PEGASIS

c7 نیز در مرحله‌ی سوم آن را با داده‌ی خود ترکیب کرده و چون همسایه‌ی دیگری در سمت راست خود ندارد، آنرا به c3 می‌فرستد و در نهایت c3 داده‌های دریافتی از c1 و c7 را باهم ترکیب کرده و نتیجه را به ایستگاه پایه می‌رساند.



شکل ۲-۵ نحوه عملکرد پروتکل PEGASIS سلسله‌مراتبی.

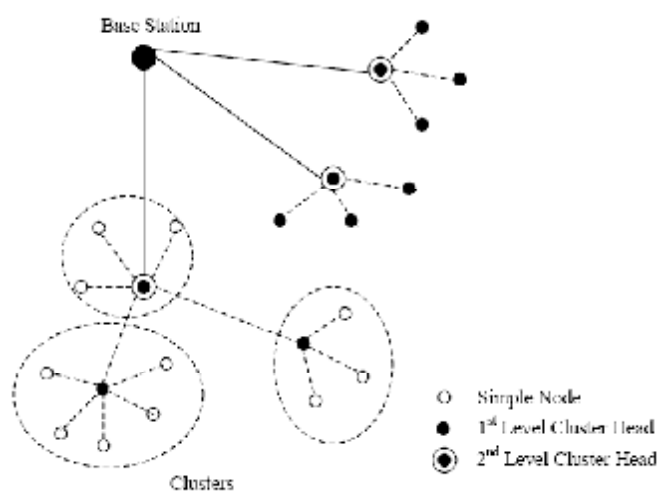
نتایج شبیه‌سازی‌ها نشانگر بهتر بودن این پروتکل نسبت به PEGASIS عادی می‌باشد. مشکلی که اساساً در PEGASIS وجود دارد این است که هر حسگر نیاز دارد تا موقعیت حسگر همسایه خود را بداند که بواسطه‌ی آن داده‌ی خود را ارسال کند. ارسال اطلاعات مکانی باعث افزایش ترافیک در شبکه می‌شود و در طراحی پروتکل برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم سعی می‌شود که حتی‌الامکان از ارسال این اطلاعات جلوگیری شود.

۲-۲-۲ TEEN⁶³ [Manjeshwar_01]

این پروتکل برای شرایطی طراحی شده است که قرار است تغییرات ناگهانی در پارامتر در حال اندازه‌گیری، سریع گزارش شود. در این کاربردها، شبکه دائماً در شرایط فعال نیست بلکه وقتی تغییر مورد نظر حاصل شود، به ایستگاه پایه گزارش داده می‌شود. TEEN یک پروتکل

⁶³ Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

سلسله‌مراتبی است اما در آن از ترفندهای پروتکل‌های Data-Centric نیز استفاده شده است. عملکرد این پروتکل بدین صورت است که حسگرهایی که نزدیک هم هستند باهم یک خوشه تشکیل می‌دهند و این کار یک مرحله‌ی دیگر نیز ادامه می‌کند و در نهایت به ایستگاه پایه می‌رسد. چگونگی این کار در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲ نحوه خوشه بندی در پروتکل TEEN.

بعد از این که خوشه‌ها تشکیل شدند. CHها دو آستانه را به همه حسگرها می‌فرستند. اسامی این آستانه‌ها، آستانه‌ی نرم^{۶۴} و آستانه‌ی سخت^{۶۵} می‌باشند.

آستانه‌ی سخت در واقع مقداری از پارامتر در حال اندازه‌گیری است که اگر مقدار بدست آمده از یک حسگر از این آستانه بیشتر باشد، مقدار بدست آمده گزارش می‌شود، ولی اگر کمتر باشد دیگر این اتفاق نمی‌افتد. در واقع این آستانه باعث می‌شود که هر وقت مقدار پارامتر در محدوده دلخواه است گزارش شود و بدین صورت از حجم داده‌های ارسالی تا حد زیادی کاسته

⁶⁴ Soft-Threshold

⁶⁵ Hard-Threshold

می‌شود. اما آستانه‌ی نرم مقداری از پارامتر در حال اندازه‌گیری است که هر وقت مقدار بدست آمده زیر آستانه‌ی سخت باشد اما اختلاف پارامتر اندازه‌گیری شده با نمونه‌ی قبلی بیش از این مقدار باشد، حسگر باز هم مقدار پارامتر را گزارش می‌کند. وجود آستانه‌ی نرم نیز باعث کاهش داده‌های ارسالی می‌شود. با تنظیم سطوح آستانه‌ی نرم و سخت می‌توان حجم داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه را تنظیم کرد. برای ارسال داده‌ها به ایستگاه پایه هر حسگر داده‌ی خود را به CH مرحله اول می‌فرستد. CH مرحله اول نیز آن را به CH مرحله دوم می‌فرستد و در نهایت به ایستگاه پایه فرستاده می‌شود.

TEEN در کاربردهایی مناسب است که گزارش اطلاعات بصورت پریودیک مورد نظر نباشد. یعنی هر وقت اتفاق خاصی در شبکه رخ داد گزارش شود.

۲-۲-۴ [Manjeshwar_02] ^{۶۶}APTEEN

یک نسخه‌ی بهبود یافته از TEEN است که در آن شبکه علاوه بر گزارش اتفاقات مهم، قادر است تا بصورت پریودیک اطلاعات حسگرها را بگیرد. در این پروتکل بعد از شکل گرفتن خوشه‌ها، CHها پارامترهای مورد نظر، مقادیر آستانه‌ها و زمان‌بندی ارسال حسگرها را به آنها می‌فرستند. برای صرفه‌جویی در انرژی، CHها داده‌های حسگرهای هر خوشه را ترکیب می‌کنند و بعد می‌فرستند.

APTEEN سه نوع درخواست متفاوت به شبکه می‌فرستد. اول تاریخچه‌ای^{۶۷} که برای آنالیز داده‌های گذشته است، دوم لحظه‌ای^{۶۸} که بصورت لحظه‌ای اطلاعات شبکه را جمع‌آوری می‌کند، و سوم دائمی^{۶۹} است که برای نظارت بر اتفاقات برای یک پریود زمانی می‌باشد.

^{۶۶} Adaptive Threshod sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

^{۶۷} Historical

APTEEN از نظر کارایی در مصرف انرژی و طول عمر شبکه بدتر از TEEN است و TEEN با کاهش اطلاعات ارسالی، کارایی بهتری را نشان می‌دهد. مشکل عمده‌ی هر دو پروتکل در شکل‌دهی خوشه‌ها است. در واقع تشکیل خوشه‌ها در TEEN و APTEEN کمی پیچیده و مشکل است.

۲-۳ پروتکل‌های بر مبنای مکان (Location-Based Protocols)

اکثر پروتکل‌های مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، به اطلاعات مکانی حسگرها نیاز دارند. در اکثر موارد این اطلاعات برای محاسبه‌ی فاصله بین حسگرها به منظور تخمین مقدار انرژی مورد نیاز برای ارسال داده‌ها به کار گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه هیچ شمای آدرس‌دهی اساسی مثل IP در شبکه‌های حسگر بی‌سیم وجود ندارد، اطلاعات جغرافیایی می‌تواند کمک بسیار مفیدی برای استفاده‌ی کارآمد از انرژی باشد. برای مثال، اگر حسگرها مکان خود را بدانند، درخواست ایستگاه پایه می‌تواند فقط به آن منطقه‌ای ارسال شود که مورد نظر است و بدین صورت از حجم اطلاعات ارسالی تا حد زیادی کاسته می‌شود. برخی از پروتکل‌های این دسته در ابتدا برای شبکه‌های ad hoc طراحی شده‌اند ولی با این وجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیز کاربرد دارند. برخی از پروتکل‌هایی که برای شبکه‌های ad hoc طراحی شده‌اند، برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مناسب نیستند، زیرا در طراحی آنها انرژی حسگرها مورد توجه قرار نگرفته است. در ادامه یکی از پروتکل‌های مطرح از این دسته مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۳-۱ GEAR^{۷۰}

⁶⁸ One-Time

⁶⁹ Persistent

⁷⁰ Geographic and Energy Aware Routing

با توجه به اینکه معمولاً درخواست‌ها برای یک قسمت مکانی خاص در شبکه است، در این پروتکل سعی شده است که برای ارسال درخواست‌ها به مکان مورد نظر از اطلاعات مکانی حسگرها استفاده شود. در واقع هر حسگری که درخواستی را دریافت می‌کند، سعی می‌کند آنرا به آن حسگر همسایه‌ای بفرستد که بطور ضمنی از خودش به مقصد نزدیک‌تر باشد. بدین صورت به جای اینکه مانند Directed Diffusion یک درخواست در کل شبکه پخش شود، فقط به مکان مورد نظر فرستاده می‌شود و در نتیجه با این روش در مصرف انرژی بیشتر صرفه‌جویی می‌شود.

در GEAR، هر حسگر هزینه‌ی تخمین زده شده^{۷۱} و هزینه‌ی یاد گرفته شده^{۷۲} تا مقصد را دارد. هزینه تخمین زده شده ترکیبی از انرژی باقیمانده و فاصله تا مقصد می‌باشد. در حالیکه هزینه یاد گرفته شده مقدار تصحیح شده هزینه تخمین زده شده در اطراف حفره‌هاست. یک حفره در شبکه وقتی اتفاق می‌افتد که یک حسگر هیچ همسایه‌ای که نزدیکتر از خودش به مقصد باشد نداشته باشد و همچنین خودش نیز به مقصد دسترسی نداشته باشد. اگر هیچ حفره‌ای وجود نداشته باشد، هزینه‌ی یاد گرفته شده برابر با هزینه تخمین زده شده است. وقتی یک داده به مقصد می‌رسد، هزینه یاد گرفته شده به صورت پله‌پله به عقب (مسیری که طی شده) فرستاده می‌شود تا هزینه‌ها تصحیح شود و بدین صورت برای داده‌های بعدی اطلاعات مسیر اصلاح شده باشد. این الگوریتم شامل دو بخش می‌باشد.

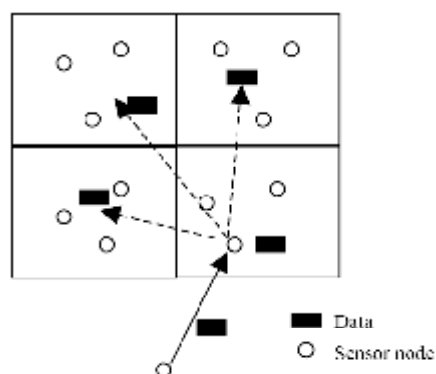
۱. ارسال داده‌ها به سمت منطقه مورد نظر: هر حسگر وقتی یک داده را دریافت کرد، به همسایه‌های خود نگاه می‌کند. اگر همسایه‌ای وجود داشت که از خودش به مقصد نزدیکتر بود، داده را به آن می‌فرستد. در مواقعی که چند همسایه نزدیکتر به مقصد وجود دارند، همسایه‌ای انتخاب می‌شود که از همه به مقصد نزدیکتر باشد. اگر هیچ همسایه‌ای نزدیکتر به مقصد نباشد و خود حسگر نیز

⁷¹ Estimated Cost

⁷² Learning Cost

به طور مستقیم به مقصد دسترسی نداشته باشد، یک حفره در شبکه اتفاق افتاده است. در این هنگام بر مبنای هزینه‌ی یاد گرفته شده یکی از همسایه‌ها به عنوان گیرنده‌ی داده‌ها انتخاب می‌شود و داده‌ها به آن فرستاده می‌شود. این انتخاب می‌تواند بر مبنای همگرایی هزینه‌ی یاد گرفته شده هر دفعه به‌روز شود.

۲. **رساندن داده به مقصد در منطقه مورد نظر:** وقتی که داده به منطقه مورد نظر رسید، برای رساندن آن به مقصد از روش ارسال مکانی بازگشتی^{۷۳} و یا از روش Flooding محدود استفاده می‌شود. روش Flooding محدود وقتی که حسگرها به صورت فشرده جایگذاری نشده‌اند، مناسب می‌باشد و در شبکه‌های فشرده روش ارسال مکانی بازگشتی کارایی بهتری از روش Flooding محدود از نقطه نظر مصرف انرژی دارد. در این حالت، منطقه‌ی مورد نظر به چهار زیربخش تقسیم می‌شود و چهار نسخه از داده به آنها ارسال می‌شود. این تقسیمات تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که مناطقی شامل تنها یک حسگر باقی بماند و داده به مقصد برسد. در شکل ۷-۲ این فرآیند قابل مشاهده است.



شکل ۷-۲ نحوه عملکرد روش ارسال مکانی بازگشتی.

⁷³ Recursive Geographic Forwarding

GEAR با یک پروتکل تقریباً مشابه به نام GPSR [Karp_00] که البته انرژی حسگرها در آن لحاظ نمی‌شود مقایسه می‌شود. GPSR یکی از کارهای در زمینه مسیریابی مکانی است که مشکل حفره‌ها را با گرافهای سطحی حل می‌کند. این پروتکل برای شبکه‌های متحرک ad hoc طراحی شده است. GEAR با صرفه‌جویی در انرژی و مسیریابی مناسب‌تر، بهتر از GPSR عمل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در شرایط توزیع نامتعادل ترافیک، GEAR نزدیک به ۷۰٪ تا ۸۰٪ بیشتر از GPSR داده انتقال می‌دهد و در شرایط توزیع متعادل ترافیک این مقدار به ۲۵٪ تا ۳۵٪ می‌رسد.

۲-۴ پروتکل‌های مبتنی بر جریان شبکه^{۷۴} و QoS

اکثر پروتکل‌های مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم در تقسیم‌بندی‌های قبلی می‌گنجند. تنها تعدادی از پروتکل‌ها وجود دارند که می‌توان آنها را در این تقسیم‌بندی قرار داد. در پروتکل‌های بر مبنای جریان شبکه، مسیریابی و تعیین مسیرها به عنوان یک مسأله‌ی جریان شبکه مطرح می‌شود و این مسأله توسط روشهای فعلی برای آن، حل می‌شود. در پروتکل‌های بر مبنای QoS تأخیر ارسال داده به عنوان مسأله‌ی اصلی مطرح می‌شود. یکی از این پروتکل‌ها در زیر بررسی شده است.

۲-۴-۱ SAR^{۷۵} [Sohrabi_99]

این پروتکل، اولین روش برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بود که در آن ایده‌ی QoS مطرح شده بود. دو روش SMAC و EAR برای لایه‌ی MAC در این پروتکل معرفی شده است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

⁷⁴ Network Flow Model Protocols

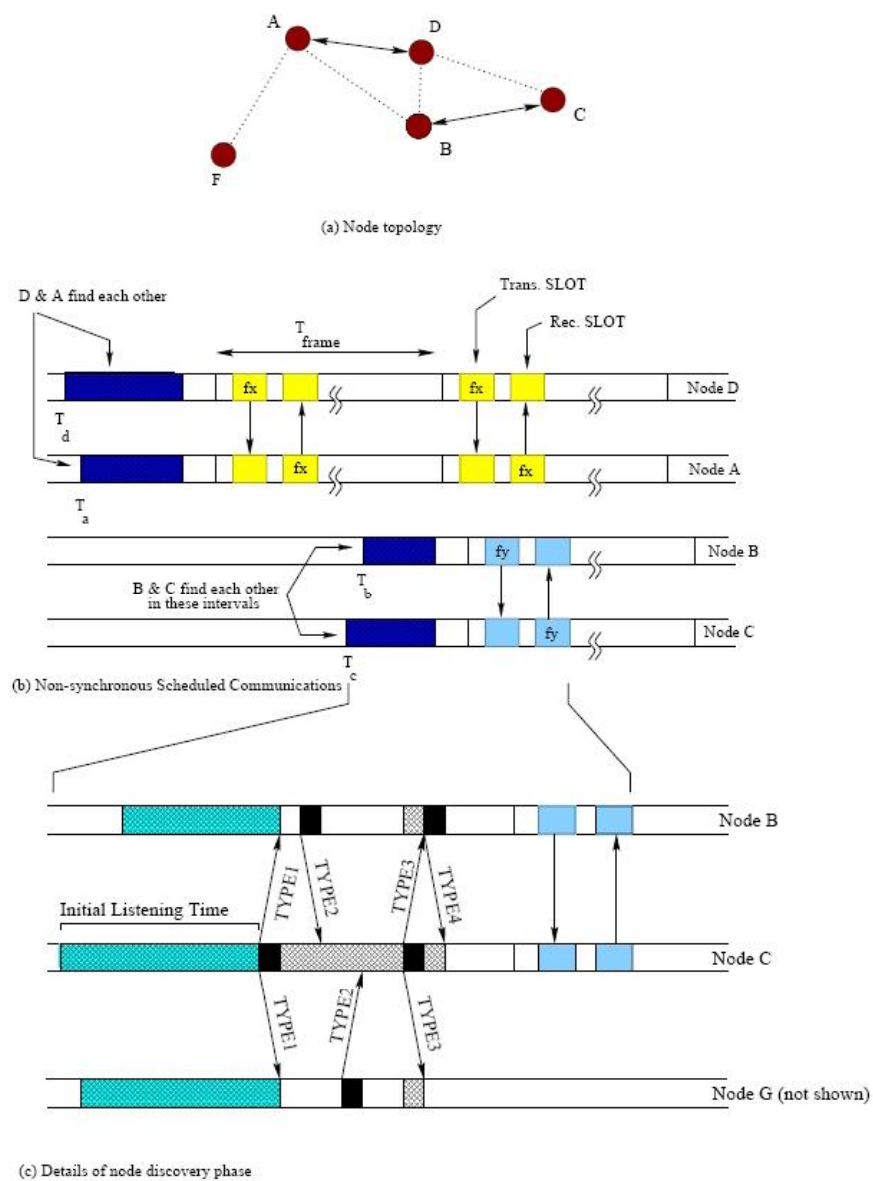
⁷⁵ Sequential Assignment Routing

SMAC برای برقراری ارتباط بین دو حسگر ثابت طراحی شده است. در این روش هر حسگر به یک مقدار تصادفی در حالت سکوت^{۷۶} فرو می‌رود. بعد از اتمام این دوره هر حسگر به اندازه‌ی یک مدت تصادفی به پیغامها گوش می‌کند. در صورتی که هیچ پیغام دعوتی^{۷۷} (TYPE 1) از همسایه‌ها در این زمان دریافت نکرد، خودش این پیغام را ارسال می‌کند. اگر یکی از حسگرهای همسایه در حال گوش کردن به شبکه بود و این پیغام را دریافت کرد پیغام پاسخ (TYPE 2) را به فرستنده می‌فرستد. نکته جالب اینجاست که برای جلوگیری از تداخل پیغامها، هر حسگر پیغام پاسخ خود را پس از یک زمان تصادفی می‌فرستد. حسگر اول که پیغام دعوت را فرستاده بود، یکی از پاسخ‌دهندگان را بر مبنای اولین پاسخ دهنده یا SNR^{۷۸} سیگنال دریافتی انتخاب می‌کند و به آن یک پیغام TYPE 3 می‌فرستد که در آن زمان‌بندی کارش وجود دارد. حسگر گیرنده این اطلاعات را با اطلاعات و برنامه‌ی خود مقایسه کرده و دو برش زمانی و یک فرکانس تصادفی را در قالب پیغام TYPE 4 به فرستنده می‌فرستد. انتخاب فرکانس تصادفی به این دلیل است که بین سیگنالهای همسایه‌ها تداخل بوجود نیاید. بدین صورت بین دو حسگر همسایه یک راه ارتباطی بوجود می‌آید. با وصل شدن همسایه‌ها به یکدیگر، حسگرها در شبکه به هم وصل می‌شوند. شکل ۲-۸ نمایانگر عملکرد SMAC است.

⁷⁶ Idle

⁷⁷ Invitation Message

⁷⁸ Signal to Noise Ratio

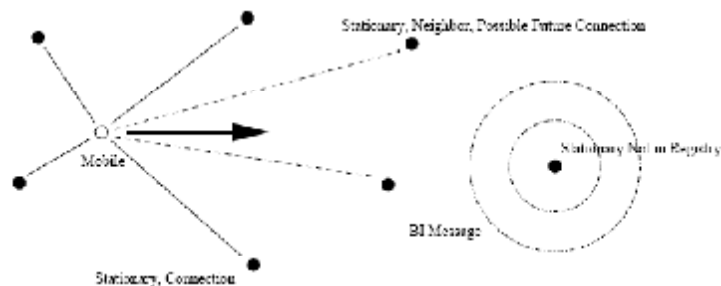


شکل ۸-۲ نحوه عملکرد روش SMAC.

همان‌طور که شکل ۸-۲ نشان می‌دهد، در شبکه‌ی موجود که توپولوژی آن نیز نشان داده شده، جفت‌گره‌های (A,D) و (B,C) یکدیگر را پیدا کرده‌اند و با یکدیگر ارتباط برقرار کرده‌اند. در

قسمت پایین شکل، به عنوان مثال، انتخاب شدن گرهی B توسط گرهی C نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، گرهی B، گرهی C را به G ترجیح داده است.

EAR حالت بهبود یافته‌ی پروتکل SMAC است که ارتباط بین حسگرهای متحرک با بقیه حسگرها را در بر می‌گیرد. در این پروتکل حسگرهای ثابت تا زمانی که برش زمانی خالی دارند به صورت متناوب، پیغام دعوت را می‌فرستند. اگر یک حسگر متحرک یک پیغام دعوت را دریافت کند که SNR آن از یک حد آستانه بالاتر باشد و بتواند به آن حسگر یک جفت برش زمانی مناسب تخصیص دهد، با آن حسگر یک لینک برقرار می‌کند. این ارتباط تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که SNR سیگنالهای بین این دو از یک حد آستانه پایین‌تر نرود. شکل ۹-۲ نمایانگر این موضوع است.



شکل ۹-۲ چگونگی ارتباط حسگرهای متحرک با حسگرهای ثابت در پروتکل EAR

پس از برقراری ارتباط در لایه MAC، مسیریابی توسط پروتکل SAR انجام می‌شود. در SAR درختهای مختلفی از ایستگاه پایه به بقیه‌ی حسگرها در شبکه شروع به رشد کردن می‌کنند. تلاش بر این است که درختهای مختلف که به یک حسگر می‌رسند، لینکهای مشابه نداشته باشند.

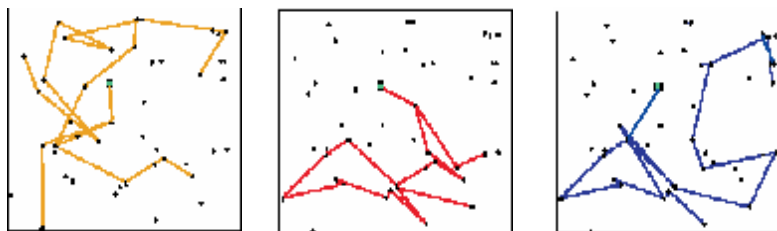
بدین صورت چندین مسیر مختلف بین ایستگاه پایه و حسگرها ایجاد می‌شود. برای انتخاب بهترین مسیر، سه پارامتر مورد نظر است که عبارتند از:

۱. منابع انرژی

۲. کیفیت خدمات (QoS)

۳. اهمیت داده‌ها^{۷۹}

پارامترهای کیفیت خدمات و اهمیت داده‌ها را باهم تحت عنوان معیاری به نام متریک QoS وزن‌دار^{۸۰} معرفی می‌کنند. بدین صورت تلاش می‌شود تا مسیری انتخاب شود که این متریک در آن حداقل باشد. این درختها به صورت متناوب به‌روز میشوند تا اگر حسگری از کار افتاد شبکه این تغییرات را متوجه شود. در شکل ۲-۱۰ چندین درخت بدست آمده در یک شبیه‌سازی نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۱۰ چند مثال از درختهای بدست آمده در SAR.

الگوریتم SAR مسیرهای مختلفی از حسگرها به ایستگاه پایه ایجاد می‌کند. این امر باعث می‌شود که در صورت ایجاد اشکال در یک مسیر، مسیر دیگری به راحتی جایگزین شود. اما

⁷⁹ Priority of the Packets

⁸⁰ Weighted QoS

نگهداری و به‌روز کردن مسیرها و جداول مختلف در زمانیکه تعداد حسگرها در شبکه زیاد است، بسیار مشکل است.

۲-۵ جمع‌بندی پروتکل‌های مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم

شبکه‌های حسگر دارای ویژگی‌های خاصی هستند که این امر باعث شده است تا پروتکل‌های خاصی (MAC، مسیریابی و لایه‌های بالاتر) برای آنها در نظر گرفته شود.

مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم توجه بسیاری را در سالهای اخیر به خود جلب کرده است که باعث شده راههای منحصر به فردی برای حل مشکلات آن ارائه شود. در این فصل، معروف‌ترین پروتکل‌های مسیریابی در این شبکه‌ها به اختصار توضیح داده شد. این پروتکل‌ها به سه گروه عمده‌ی: محوریت داده، سلسله‌مراتبی و مبتنی بر مکان تقسیم شده‌اند. برخی پروتکل‌های دیگر نیز بر مبنای مدل جریان شبکه یا QoS طراحی شده‌اند. تعدادی از پروتکل‌های مطرح شده ویژگی‌های بیشتر از یک گروه را دارند. جدول ۲-۱ مشخصات این پروتکل‌ها را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. پارامتر ترکیب داده‌ها نیز در جدول گنجانده شده است، زیرا وجود این امر در یک شبکه نشانگر صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهینه‌سازی ترافیک در آن پروتکل است.

پروتکل‌هایی که بر مبنای مشخصات و کاربرد شبکه، داده‌ها و درخواست‌ها را اسم‌گذاری می‌کنند، پروتکل‌های با محوریت داده نامیده می‌شوند. در این نوع پروتکل‌ها نیازی به تشکیل خوشه نیست. نحوه نامگذاری و عملکرد این پروتکل‌ها بسیار به کاربرد شبکه بستگی دارد. یک نامگذاری مناسب و استاندارد در این پروتکل‌ها می‌تواند یکی از کارهای آینده در این زمینه باشد. از طرف دیگر، برخی از پروتکل‌ها (پروتکل‌های سلسله‌مراتبی)، شبکه را به چند خوشه تقسیم می‌کنند که هر کدام به صورت مستقل کارهای خود را انجام می‌دهند و هر خوشه دارای یک

سرپرست (CH) می‌باشد. گاهی اوقات CHها طوری انتخاب می‌شوند که از نظر انرژی محدودیت کمتری داشته باشند. هر CH داده‌های حسگرهای خوشه‌ی خودش را دریافت کرده و باهم ترکیب می‌کند و حاصل را به ایستگاه پایه می‌فرستد. جالبترین بخش تحقیقات درمورد این پروتکل‌ها این است که چگونه خوشه‌ها شکل بگیرند تا مصرف انرژی و سایر پارامترها مانند تاخیر شبکه بهینه شوند. همچنین نحوه‌ی ترکیب داده‌ها در هر خوشه نیز باید در آینده بیشتر مورد توجه قرار بگیرد.

افزایش اندازه‌ی شبکه، باعث افزایش و پیچیدگی مسیریابی و رساندن اطلاعات به مرکز اصلی می‌باشد. اما همچنان مسیریابی و پردازش نیاز به انرژی دارند. بنابراین یکی از نکات کلیدی توسعه و ارائه‌ی پروتکل‌های مسیریابی جدید در جهت کاهش و صرفه‌جویی در انرژی مصرفی است. بخش عمده‌ی کار انجام شده در این پروژه در مورد این پروتکل‌ها و بالاخص راجع به تشکیل خوشه‌ها و تعیین CH برای آن‌ها می‌باشد.

جدول ۱-۲ گروه‌بندی پروتکل‌های ارتباطی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

پروتکل مسیریابی	با محوریت داده	سلسله‌مراتبی	مبتنی بر مکان	مبتنی بر جریان داده و QoS	ترکیب داده
SPIN	♦				♦
Directed Diffusion	♦				♦
EAR	♦		♦		
GBR	♦				♦
LEACH		♦			♦
PEGASIS		♦			♦
TEEN	♦	♦			♦
GEAR			♦		
SAR				♦	

پروتکل‌هایی که از مکان حسگرها برای مسیریابی بهینه استفاده می‌کنند پروتکل‌های مبتنی بر مکان نام دارند. در واقع هنوز هم استفاده بهینه از اطلاعات مکانی جهت به کارگیری بهینه انرژی در حال تحقیق و بررسی است.

در برخی دیگر از پروتکل‌ها علاوه بر بهینه‌سازی مصرف انرژی، پارامترهایی دیگر چون QoS نیز مهم می‌باشد. این پروتکل‌ها مثلاً در جاهایی که حسگرها وظیفه‌ی انتقال صوت و یا تصویر را دارند، استفاده می‌شوند. در این کاربردها، در واقع علاوه بر بهینه‌سازی مصرف انرژی، باید پهنای باند مناسب نیز در اختیار حسگرها قرار داده شود تا شبکه بتواند، پاسخگوی نیازهای طراحان باشد. در حال حاضر تحقیقات بسیار کمی در زمینه‌ی ایجاد QoS در شبکه‌های با انرژی محدود مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم در حال انجام است.

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم فقط یک ایستگاه پایه وجود دارد و تعداد زیادی گره‌های حسگر در محیط پخش گردیده‌اند. به علت محدودیت بُرد این حسگرها و انرژی باتری آن‌ها خیلی از گره‌ها قادر به ارتباط مستقیم با مرکز اصلی نمی‌باشند، اما سریعاً با تکیه بر گره‌های نظیر خود و گره‌های حسگر دیگر، به ارتباط با مرکز اصلی می‌پردازد. به این ترتیب، جای زیادی برای تحقیق در زمینه‌ی پروتکل‌های چندگامی⁸¹ که در آن‌ها از چند گره‌ی میانی برای ارسال داده به مقصد استفاده می‌شود، وجود دارد.

یکی از بهترین و جالبترین بخش‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در نظر گرفتن حسگرهای متحرک در شبکه است. اکثر پروتکل‌های فعلی فرض می‌کنند که حسگرها در شبکه ثابت هستند. اما در بعضی از شرایط نیاز است که حسگرها متحرک باشند. در این موارد به‌روز کردن اطلاعات

⁸¹ Multi-Hop Protocols

مسیریابی و انتقال اطلاعات مسیریابی در کل شبکه باعث مصرف زیاد انرژی می‌شود. راه حل‌های مناسب برای استفاده از حسگرهای متحرک در شبکه بشدت مورد بررسی و تحقیق است.

همچنین تحقیقات آینده می‌تواند در مورد اتصال شبکه‌های حسگر بی‌سیم به شبکه‌های امروزی مانند اینترنت باشد. در بسیاری از کاربردها مانند کاربردهای حفاظتی و کنترل محیط، نیاز به این است تا داده‌ها از حسگرها جمع‌آوری شده و به یک ایستگاه پایه جهت بررسی و آنالیز فرستاده شود. از طرف دیگر، درخواست‌های کاربر از طریق اینترنت صادر می‌شود در نتیجه فراهم ساختن این امکان، امری لازم و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

فصل ۳

۳ پروتکل ارتباطی پیشنهادی

۳-۱ پروتکل‌های ارتباطی مربوطه و کارایی آن‌ها در مصرف انرژی

در فصل ۲ و ۳ به ترتیب عوامل مهم در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و پارامترهایی را که باید برای پروتکل‌های مسیریابی در این شبکه‌ها مورد نظر قرار داد، توضیح دادیم. با توجه به کاربردهایی مانند نظارت بر مرزها، کشف آتش در جنگل‌ها، نظارت بر میدان جنگ و کاربرد در فرآیندهای اتوماسیون صنعتی [Tanenbaum_06]، می‌توان نتیجه گرفت که در بین عوامل و پارامترهای توضیح داده شده، عواملی چون اندازه‌ی کوچک، مصرف انرژی و قیمت پایین با توجه به کاربردهای خاص این شبکه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردارند. در بین این سه عامل نیز، مسأله‌ی انرژی مصرفی و کارا بودن در مصرف انرژی در لایه‌های مختلف از پشته‌ی پروتکلی این شبکه‌ها از توجه خاصی برخوردار است، زیرا با توجه به مکان‌های نامانوس استقرار این شبکه‌ها، تعویض باتری‌های هزاران گره حسگر، امری غیرممکن خواهد بود. تحقیقات زیادی در جهت افزایش کارایی این شبکه‌ها در مصرف انرژی انجام شده است. برای مثال، در [Sljepcevic_01] محققان

گره‌های حسگر را به مجموعه‌هایی دو به دو ناسازگار تقسیم کرده‌اند و کاری کرده‌اند که برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، در هر لحظه تنها گره‌های یکی از این مجموعه‌ها روشن باشند و بقیه استراحت کنند. در [Deng_05] مساله‌ی تنظیم خواب گره‌های حسگر در شبکه‌های مبتنی بر خوشه‌بندی که گره‌های آن‌ها توان‌های ارسالی مختلفی را دارند، بررسی شده است. یک پروتکل MAC به نام S-MAC در [Ye_02] معرفی شده است (با روش توضیح داده شده در قسمت ۲-۱-۴ تفاوت دارد) که اهمیت ویژه‌ای به مصرف انرژی داده است و مهم‌ترین مزیت آن دادن مُد استراحت به گره‌ها در زمانی است که قرار نیست داده‌ای را دریافت یا ارسال کنند. محققان در [Rossi_07] و [Shi_07] نیز با استفاده از ایده‌های مشابه، پروتکل‌های MAC کاراتری را ارائه کرده‌اند. کالهن و همراهانش در [Calhoun_05] ایده‌های جدیدی را در سطوح پایین تجرید (سطح گیت و سطح ترانزیستور) برای کاهش مصرف انرژی اجزای دیجیتال و آنالوگ یک گره‌ی حسگر، مانند ADC و واحد فرستنده مطرح می‌کنند. و بالاخره در [Sravan_07] یک معماری مطلع از انرژی^{۸۲} برای گره‌ی حسگر به همراه یک الگوریتم زمان‌بندی وظیفه^{۸۳} که از وضعیت باتری آگاهی دارد^{۸۴} پیشنهاد می‌شود که از دو تکنیک طراحی مدارهای کم توان به نام DVS^{۸۵} و RBB^{۸۶} برای پیشینه کردن طول عمر باتری حسگر استفاده می‌کند. ویژگی مهم این معماری و الگوریتم، کاهش انرژی تراوشی^{۸۷} در گره‌ی حسگر است که سبب می‌شود که در آینده و با کاهش سائز ترانزیستورها، این دو اهمیت بیشتری نیز پیدا کنند.

⁸² Energy-Aware

⁸³ Task Scheduling

⁸⁴ Battery-Aware

⁸⁵ Dynamic Voltage Scaling

⁸⁶ Reverse Body Biasing

⁸⁷ Leakage

پروتکل‌های ارتباطی (که تقریباً می‌توان این پروتکل‌ها را معادل با پروتکل‌های مسیریابی دانست) در کارایی شبکه‌های حسگر بی‌سیم نقشی اساسی دارند. بنابراین، طراحی پروتکل‌های کارا در مصرف انرژی برای شبکه‌های حسگر (ریزحسگر⁸⁸) بی‌سیم، یک ضرورت است. تا با استفاده از آن‌ها نه تنها انرژی کل مصرف شده در شبکه کاهش یابد، بلکه، بار انرژی نیز به طور متعادل و یکنواخت در میان گره‌های شبکه توزیع شود تا طول عمر شبکه به مقدار کافی افزایش یابد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در بین پروتکل‌های مختلف، پروتکل‌های سلسله‌مراتبی (مبتنی بر خوشه‌بندی)، به مقدار زیادی در کل انرژی مصرفی توسط شبکه صرفه‌جویی می‌کنند. در این پروتکل‌ها، تشکیل خوشه‌ها، انتخاب یکی از گره‌ها در هر خوشه به عنوان سرپرست خوشه (CH) و اختصاص وظایف خاصی به آن، به مقدار زیادی در مقیاس‌پذیری شبکه، افزایش طول عمر شبکه و استفاده‌ی کارا از پهنای باند، موثر است [Al-Karaki_04]. علاوه بر این، در پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی، با به کارگیری مکانیزم‌های ترکیب داده، با کاهش تعداد داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه، داده‌های زائد نیز حذف می‌گردند.

یک نکته‌ی مهم در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، متوازن کردن بار انرژی در بین گره‌هاست و یکی از عوامل مهمی که باعث عدم توازن سطح انرژی گره‌ها می‌شود، فاصله‌ی متفاوت گره‌ها از ایستگاه پایه (مقصد داده‌ی آن‌ها) است. اما پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی فعلی (LEACH [Heinzelman_00]، [Heinzelman_02a] TEEN [Manjeshwar_01]، APTEEN [Manjeshwar_02]، EMPAC [Khadiji_05]، FTPASC [Khadiji_06]، SOP [Subramanian_00]، Span [Chen_02]، PEGASIS [Lindsey_02] و نیز تحقیقات انجام شده در [Zhao_06] و [Gupta_03] جهت موازنه‌ی بار انرژی) که راجع به تعدادی از آن‌ها در فصل ۲

⁸⁸ Microsensor

توضیح دادیم، یا به طور کلی تاثیر پارامتر فاصله را در اختلاف سطح انرژی حسگرها در نظر نمی‌گیرند و یا با به کار بردن روش‌های کنترل مرکزی برای جلوگیری از ایجاد اختلاف زیاد بین سطح انرژی گره‌ها، علاوه بر تحمیل تاخیر زیاد به شبکه، مقیاس‌پذیری شبکه را نیز نقض می‌کنند.

در نتیجه، طراحی پروتکل‌های ارتباطی کارا در مصرف انرژی که بدون نقض کردن مقیاس‌پذیری شبکه مانع از ایجاد اختلاف زیاد بین سطح انرژی گره‌های مختلف می‌شوند، برای افزایش طول عمر شبکه لازم است. برای این منظور، این پروتکل‌ها باید تا حد امکان انرژی مصرفی کل شبکه را کاهش دهند و علاوه بر این سعی کنند بار انرژی یکنواختی را به گره‌های حسگر اعمال کنند تا نواحی مرده (تعریف آن در صفحه‌ی ۸۶ آمده است) در شبکه به وجود نیایند.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی، با تشکیل خوشه‌ها، انتخاب یکی از گره‌ها در هر خوشه به عنوان سرپرست خوشه و اختصاص وظایف خاصی به سرپرست خوشه، به مقدار زیادی در کل انرژی مصرفی توسط شبکه صرفه‌جویی می‌کنند. ما نیز در این پروژه سعی کرده‌ایم با استفاده از پروتکل‌های سلسله‌مراتبی فعلی و مخصوصاً پروتکل LEACH و با وارد کردن پارامتر فاصله‌ی گره‌های شبکه از ایستگاه پایه به داخل سیاست‌های خوشه‌بندی، یک پروتکل ارتباطی با ویژگی‌های (۱) کارایی در مصرف انرژی با حفظ مقیاس‌پذیری شبکه و (۲) قابلیت اطمینان در زیر لایه‌ی MAC با در نظر گرفتن تاخیر قابل قبول برای شبکه، را طراحی و پیاده‌سازی کنیم.

۲-۳ معماری پروتکل LEACH:

در بین پروتکل‌های ارتباطی ارائه شده، پروتکل LEACH به دلایل زیر از اهمیت ویژه‌ای

در نزد محققان برخوردار است:

۱. در این پروتکل، خوشه‌های شبکه به صورت تصادفی^{۸۹}، تطبیقی^{۹۰} و به صورت خودپیکربندی شده^{۹۱} تشکیل می‌شوند. در زیر برای روشن شدن هر یک از ویژگی‌های بیان شده توضیحاتی آورده شده است:

تصادفی: به این معنی است که در هر دور، تعداد مشخصی از گره‌ها به صورت تصادفی خود را به عنوان سرپرست خوشه انتخاب می‌کنند و مقام سرپرستی خوشه برای گره‌های خاصی از قبل در نظر گرفته نشده است.

تطبیقی: گره‌هایی که در دور فعلی نقش سرپرستی خوشه را به عهده داشته‌اند، در دور بعدی دیگر نمی‌توانند برای بر عهده گرفتن این نقش کاندید شوند، بنابراین در هر دور، با توجه به دور قبلی کاندیدهای سرپرستی خوشه مشخص می‌شوند. بدین ترتیب انتظار می‌رود که در پایان تعداد مشخصی از دورها، تمامی گره‌ها سرپرست خوشه شوند. بعداً خواهیم دید که لزوماً این اتفاق نمی‌افتد.

خودپیکربندی شده: گره‌های شبکه در این پروتکل بدون کمک هر عامل خارجی و یا گرهی خاصی در شبکه، تشکیل خوشه می‌دهند و این به مقیاس‌پذیری این پروتکل کمک می‌کند. همان‌طور که در ادامه خواهیم دید، تغییرات زیادی برای بهبود کارایی این پروتکل توسط محققان انجام شده که متأسفانه در اکثر آن‌ها این ویژگی از بین رفته است و یک گرهی خاص وظیفه‌ی انتخاب کردن سرپرست خوشه‌ها را بر عهده می‌گیرد که این امر تاثیر منفی روی مقیاس‌پذیری شبکه می‌گذارد.

⁸⁹ Randomized

⁹⁰ Adaptive

⁹¹ Self-Configured

۲. در LEACH انتقال اطلاعات از گره‌های یک خوشه به سرپرست خوشه و از سرپرست خوشه‌ها به ایستگاه پایه با کنترل محلی انجام می‌شود و نیازی به کمک یک عامل خارجی و یا گرهی خاصی در شبکه برای انتقال اطلاعات نیست.

۳. پروتکل MAC استفاده شده در LEACH، با دادن امکان استراحت به حسگرها به مقدار مناسبی در انرژی مصرفی صرفه‌جویی می‌کند.

۴. همان‌طور که قبلاً گفته شد، LEACH نیز همانند سایر پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی از ترکیب داده‌های هر خوشه و ارسال داده‌ی فشرده شده به ایستگاه پایه استفاده می‌کند. بدین ترتیب هم تعداد ارسال و دریافت‌ها در شبکه کاهش می‌یابد و هم داده‌های زائد که به علت نزدیکی حسگرهای یک خوشه به یکدیگر ایجاد می‌شوند، پیش از ارسال به ایستگاه پایه حذف می‌گردند. نوع ترکیب داده‌ها در LEACH ثابت نیست و بستگی به کاربرد شبکه‌ی حسگر بی‌سیم دارد.

۳-۲-۱ الگوریتم انتخاب سرپرست خوشه (CH)

در این پروتکل زمان به قسمت‌هایی با طول مساوی به نام دور (Round) تقسیم می‌شود. هر دور نیز به دو فاز تقسیم می‌شود که فاز اول که فاز راه‌اندازی (Set-up) نام دارد، فاز تشکیل خوشه‌ها می‌باشد و فاز دوم که فاز حالت پایدار (Steady-State) نامیده می‌شود مربوط به عملکرد عادی شبکه و انتقال اطلاعات است. این فاز، از تعدادی فریم زمانی تشکیل شده است که در هر فریم کل گره‌های یک خوشه داده‌هایشان را به CH می‌فرستند و CH داده‌های دریافتی را در انتهای فریم به ایستگاه پایه (BS) ارسال می‌کنند. شکل ۳-۱ این تقسیم‌بندی زمانی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ تقسیم‌بندی زمان در پروتکل LEACH.

در فاز راه‌اندازی بنابر تابع احتمال زیر CH‌ها انتخاب می‌شوند. انتخاب CH‌ها بدین صورت است که هر حسگر یک عدد به صورت تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌کند. اگر این عدد کوچکتر از آستانه تعیین شده در رابطه زیر باشد، آن حسگر در طول آن دور به عنوان CH انتخاب می‌شود.

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{if } C_i(t) = 1 \\ 0 & \text{if } C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

که در رابطه بالا p درصد پیشنهادی برای تعداد CH‌ها برای شبکه‌ی موجود است که از قبل تعیین شده است. که برابر است با k_{opt}/N k_{opt} تعداد بهینه‌ی خوشه‌هاست که بعداً در مورد نحوه‌ی بدست آوردن آن مفصلاً بحث خواهیم کرد و N تعداد گره‌های شبکه می‌باشد، r شماره دور جاری و $C_i(t)$ یک تابع شاخص می‌باشد که نشان می‌دهد که گره‌ی i در ظرف $(r \bmod \frac{1}{p})$ دور گذشته CH بوده است یا نه. لازم به ذکر است که $C_i(t)$ در صورتی یک است که گره‌ی i ظرف $(r \bmod \frac{1}{p})$ دور گذشته CH نشده باشد و در این صورت برای دور جاری قابلیت CH شدن را خواهد داشت. این رابطه طوری طراحی شده است که در پس از گذشت تعداد $(\frac{1}{p})$ دور

می‌توان انتظار داشت که هر حسگر یک بار CH شود و بدین صورت مصرف انرژی روی کل شبکه پخش شود. برای مثال برای دور شماره‌ی صفر، $P_i(t)$ برابر با p و برای دور شماره‌ی یک، برابر با $\frac{p}{1-p}$ و این احتمال برای گره‌هایی که CH نشده‌اند در هر دور افزایش یافته تا اینکه در دور شماره‌ی $1 - \frac{1}{p}$ این احتمال به ۱ می‌رسد. انتخاب این رابطه در پروتکل LEACH به گونه‌ای بوده است که:

۱. گره‌هایی که اخیراً CH نبوده‌اند در دور آتی CH شوند زیرا می‌توان انتظار داشت که این گره‌ها نسبت به گره‌هایی که اخیراً وظیفه‌ی CH بودن را (که انرژی زیادی مصرف می‌کند) بر عهده داشته‌اند، انرژی بیشتری دارند.

۲. می‌توان انتظار داشت که در هر دور N/K_{opt} ، هر گره به طور متوسط یک بار CH شود (امید ریاضی).

برای درک بهتر رابطه‌ی ۱-۳ و ملاحظه‌ی دو مورد فوق، به مثال زیر توجه کنید (شکل ۲-۳):



شکل ۲-۳: مثالی از احتمال‌های CH شدن هر گره در یک شبکه شامل ۹ گره و تعداد CH‌های برابر با ۲.

به دلیل اینکه تابع شاخص $C_i(t)$ در صورتی یک است که گرهی i در زمان t (برای دور آینده) قابلیت CH شدن را داشته باشد، عبارت $\sum_{i=1}^N C_i(t)$ نشان دهنده تعداد گرههایی است که در زمان t قابلیت CH شدن را دارند و داریم:

$$E \left[\sum_{i=1}^N C_i(t) \right] = N - k_{opt} \times (r \bmod \frac{N}{k_{opt}})$$

(۲-۳)

با استفاده از دو رابطه‌ی اخیر، می‌توان نشان داد که همان‌طور که قبلاً نیز گفته شده بود،

امید ریاضی تعداد CHها برای هر دور برابر با k_{opt} می‌شود:

$$\begin{aligned} E [\#CH] &= \sum_{i=1}^N P_i(t) \times 1 = \\ &\left(N - k_{opt} \times (r \bmod \frac{N}{k_{opt}}) \right) \times \frac{k_{opt}}{N - k_{opt} \times (r \bmod \frac{N}{k_{opt}})} \\ &= k_{opt} . \end{aligned}$$

(۳-۳)

لازم به ذکر است که در LEACH فرض می‌شود که پارامترهای N و k_{opt} قبل از شروع به کارکرد شبکه، در گره‌ها برنامه‌ریزی شده‌اند.

۲-۲-۳ الگوریتم تشکیل خوشه

هنگامیکه CHهای دور آتی با استفاده از تابع احتمالی که قبلاً در مورد آن بحث شد انتخاب شدند، CHها باید به تمامی گره‌های دیگر اطلاع دهند که در دور آتی نقش سرپرست خوشه را بر عهده دارند. برای این کار هر گرهی CH یک پیام تبلیغ (ADV) را با استفاده از

پروتکل زیر لایه‌ی دسترسی به رسانه‌ی انتقال $\text{nonpersistent CSMA}$ ^{۹۲}، در کل شبکه منتشر می‌کنند. در پاراگراف زیر درباره‌ی جزئیات این پروتکل توضیح داده شده است.

در پروتکل $\text{nonpersistent CSMA}$ ، تلاش آگاهانه جهت ارسال بر روی کانال با اصرار کمتری نسبت به پروتکل‌های دیگر از این نوع (p -persistent) انجام می‌گیرد: هر گره قبل از ارسال، کانال را بررسی (شنود) می‌کند؛ اگر گره‌ی دیگری در حال ارسال نباشد، آن گره فریم خودش را می‌فرستد ولیکن هرگاه کانال از قبل در اختیار گره‌ی دیگری باشد، ایستگاه به طور دایم به شنود کانال نخواهد پرداخت. در عوض، هرگاه گره کانال را مشغول تشخیص بدهد، به اندازه‌ی یک زمان تصادفی صبر کرده و پس از آن الگوریتم فوق را تکرار می‌کند. در حالیکه در روش 1-persistent CSMA هرگاه یک گره داده‌ای برای ارسال داشته باشد، ابتدا به کانال گوش می‌دهد تا ببیند که آیا در این لحظه گره‌ی دیگری در حال ارسال هست یا خیر. اگر کانال مشغول باشد، گره آنقدر منتظر می‌ماند (به کانال گوش می‌دهد) تا کانال آزاد شود؛ ولی اگر گره کانال را آزاد تشخیص دهد فریم خود را ارسال می‌کنند. اگر تصادمی رخ بدهد گره به اندازه‌ی یک زمان تصادفی صبر کرده و تمام مراحل را از نو آغاز می‌کند. به همین علت این پروتکل 1-persistent (پروتکل پافشاری بر ارسال) نامیده می‌شود، چرا که وقتی یک گره کانال را آزاد تشخیص بدهد با احتمال ۱ فریم خود را ارسال می‌کند. به همین ترتیب در پروتکل p -persistent CSMA هرگاه ایستگاهی آماده‌ی ارسال شود، ابتدا کانال را شنود می‌نماید؛ اگر کانال آزاد باشد فریم خود را با احتمال p ارسال می‌کند و یا به احتمال $q = 1 - p$ ارسال خود را تا فرا رسیدن برش زمانی بعدی به تعویق می‌اندازد. و این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا آنکه فریم ارسال شود یا آنکه گره‌ی دیگری ارسال خود را آغاز نماید. در حالت دوم (یعنی هنگامیکه گره‌ی دیگر موفق به ارسال شود) گره‌ی ناموفق،

^{۹۲} nonpersistent Carrier-Sense Multiple Access

همانند وقتی که تصادم رخ داده عمل می‌کند، یعنی به اندازه‌ی یک زمان تصادفی صبر کرده و از نو شروع می‌نماید.

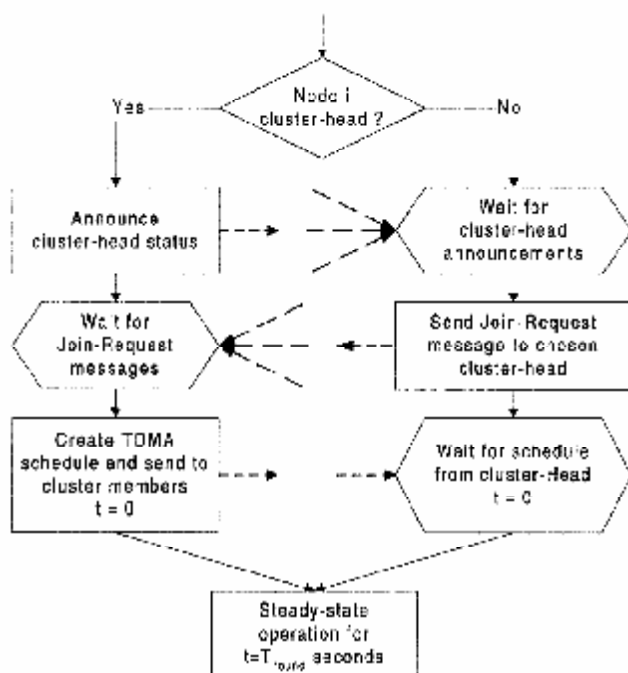
پیام ADV پیام کوچکی است که شامل ID گره و سرآیند کوچکی است که این پیام را به عنوان یک پیام ADV متمایز می‌کند. هر گره‌ای که CH نیست (non-CH) خوشه‌ی خود را برای دور آتی با انتخاب CH‌ای که کمترین انرژی لازم را برای ارتباط با آن لازم دارد، تعیین می‌کند و این انتخاب بر اساس قدرت سیگنال دریافتی پیام ADV دریافت شده از CH‌های مختلف، انجام می‌گیرد. معمولاً برای هر گره‌ی non-CH، نزدیکترین CH این خصوصیت را داراست و به عنوان سرپرست آن گره انتخاب می‌شود. و اگر گره‌های CH با شرایط مساوی داشتیم، یک گره به صورت تصادفی به عنوان CH انتخاب می‌شود.

بعد از اینکه هر گره در مورد خوشه‌ای که در دور آتی به آن تعلق دارد تصمیم گرفت، باید CH مربوطه را آگاه سازد. برای این منظور، هر گره یک پیام join-request (Join-REQ) را به CH مورد نظرش با استفاده از پروتکل nonpersistent CSMA می‌فرستد. این پیام نیز یک پیام کوچک شامل ID خود گره و ID سرپرست انتخابی می‌باشد.

CH‌ها پس از دریافت این پیام‌های Join-REQ به عنوان مراکز کنترل محلی در پروتکل LEACH، برای هماهنگ کردن انتقال داده‌ها در خوشه‌ها و عدم امکان رخداد تصادم بین داده‌های گره‌های یک خوشه، یک برنامه‌ی زمانی TDMA⁹³ درست می‌کند و این برنامه‌ی زمانی را برای اعضای خوشه می‌فرستد. در نتیجه، تضمین می‌شود که تصادمی بین پیام‌های داده‌ی یک خوشه پدید نمی‌آید و همچنین این امر اجازه می‌دهد که اجزای رادیویی گره‌های non-CH در تمامی بازه‌های زمانی مگر در بازه‌ی زمانی مربوط به خودشان خاموش باشد. به این ترتیب انرژی مصرفی

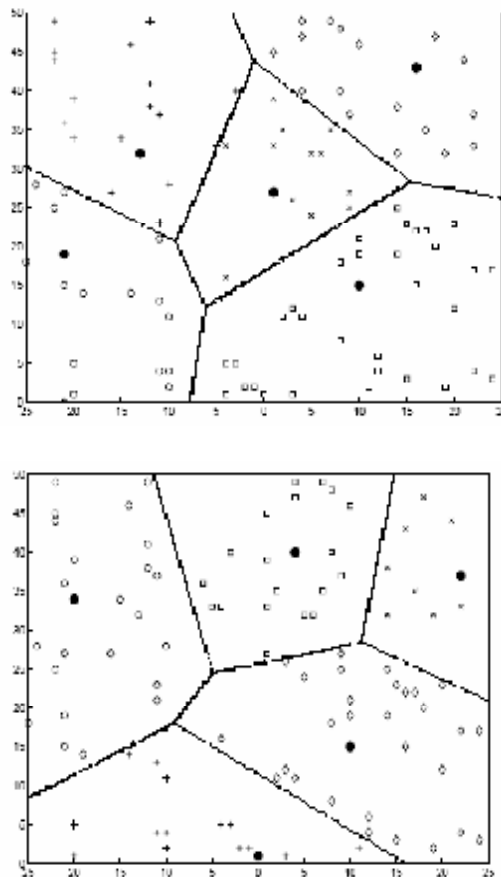
⁹³ Time Division Multiple Access

توسط گره‌ها کاهش می‌یابد. بعد از اینکه برنامه‌ی زمانی TDMA توسط تمامی گره‌های خوشه شناخته شد، فاز راه‌اندازی کامل شده و فاز حالت پایدار (فاز انتقال داده‌ها) آغاز می‌گردد. در شکل ۳-۳ فلوچارت الگوریتم تشکیل خوشه‌ها در LEACH نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ فلوچارت الگوریتم تشکیل خوشه‌ها در LEACH.

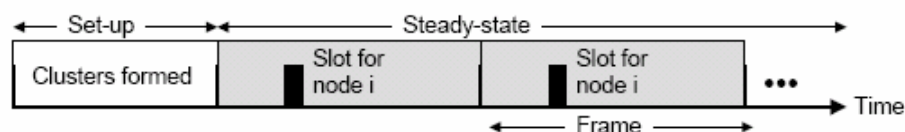
شکل ۳-۴ مثالی را از خوشه‌های تشکیل شده در دو دور مختلف از اجرای پروتکل LEACH نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید در هر دور تعداد پنج خوشه تشکیل شده است و انتخاب این خوشه‌ها کاملاً به صورت تصادفی بوده است. البته در پروتکل LEACH تضمینی برای اینکه حتماً تعداد مشخصی از گره‌ها CH شوند، وجود ندارد.



شکل ۳-۴ تشکیل دینامیک خوشه‌ها در دو دور مختلف از پروتکل LEACH. گره‌های با علامت یکسان، متعلق به یک خوشه هستند و CH‌ها با دایره‌ی توپر نشان داده شده‌اند.

۳-۲-۳ فاز حالت پایدار

عملکرد شبکه در فاز حالت پایدار، به تعدادی فریم زمانی تقسیم می‌شود که در هر فریم کل گره‌های یک خوشه، داده‌ی خود را در برش زمانی در نظر گرفته شده برای آن‌ها به CH می‌فرستند. با توجه با اینکه طول برش زمانی در نظر گرفته شده برای هر گره ثابت است، طول یک فریم زمانی بستگی به تعداد گره‌های خوشه دارد. شکل ۳-۵ قسمت‌های تشکیل دهنده‌ی یک دور را در LEACH نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ تقسیم‌بندی یک دور در پروتکل LEACH.

در پروتکل LEACH فرض بر این است که گره‌ها همیشه با یکدیگر همگام هستند و فاز راه‌اندازی را همزمان با یکدیگر آغاز می‌کنند. برای تحقق بخشیدن به این امر، می‌توان کاری کرد که ایستگاه پایه پالس‌های همگام‌سازی برای گره‌های شبکه ارسال کند. همچنین برای کاهش مصرف انرژی هر گرهی non-CH بر اساس قدرت سیگنال ADV دریافتی از CH، از مکانیزم کنترل توان برای تنظیم توان ارتباطات بعدی‌اش در دور جاری با CH استفاده می‌کند. علاوه بر این همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، اجزای رادیویی هر گرهی non-CH تا هنگام فرا رسیدن برش زمانی مربوط به خودش خاموش می‌باشند.

در LEACH با توجه به اینکه طراحی پروتکل برای حالتی انجام شده که تمام گره‌ها داده برای ارسال به CH دارند، استفاده از روش TDMA، بهره‌گیری موثر از پهنای باند خواهد بود و نشان دهنده‌ی یک روش با تاخیر کم^{۹۴} و کارا در مصرف انرژی می‌باشد.

هنگامیکه CH تمامی داده‌های گره‌های خوشه‌اش را دریافت کرد از عمل ترکیب داده برای بهبود سیگنال مشترک و کاهش نویز ناهمبسته^{۹۵} در بین سیگنال‌های دریافتی استفاده می‌کند. در آنالیز و ارزیابی پروتکل LEACH فرض بر همبستگی کامل^{۹۶} بین سیگنال‌های یک خوشه می‌باشد، به گونه‌ای که تمام سیگنال‌های منفرد می‌توانند ترکیب شده و به یک سیگنال نماینده تبدیل شوند.

^{۹۴} Low-Latency

^{۹۵} Uncorrelated

^{۹۶} Perfect Correlation

داده‌ی حاصل، از CH به ایستگاه پایه ارسال می‌شود و چون ایستگاه پایه ممکن است از CH دور باشد و طول پیام‌های داده نیز زیاد است، این ارسال با انرژی مصرفی زیادی همراه است.

در بحث‌های قبلی، ارتباطات درون یک خوشه توضیح داده شد که در آن‌ها پروتکل‌های MAC و مسیریابی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که مصرف پایین انرژی در گره‌ها و عدم رخداد تصادم بین داده‌ها در یک خوشه تضمین شود. با این حال چون امواج رادیویی ذاتاً رسانه‌ای پخش‌ی هستند، به طرز اجتناب‌ناپذیری انتقال اطلاعات در یک خوشه تأثیر منفی روی ارتباطات خوشه‌های همسایه می‌گذارد. برای کاهش تداخل بین خوشه‌ها، در LEACH ارتباطات هر خوشه با استفاده از روش طیف گسترده با توالی مستقیم یا DSSS انجام می‌شود. هر خوشه از یک کد توزیعی⁹⁷ یکتا استفاده می‌کند و تمام گره‌های خوشه داده‌هایشان را با استفاده از این کد توزیعی ارسال می‌کنند و CH سیگنال‌های دریافتی را بر اساس این کدهای توزیعی فیلتر می‌کند. به این گونه تخصیص کد، تخصیص کد بر مبنای فرستنده⁹⁸ گفته می‌شود. برای مطالعه‌ی بیشتر در خصوص این روش، جزییات بیشتری در [Hu_93] یافت می‌شود. به اولین CH ای که پیام ADV را برای دور آتی می‌فرستد، اولین کد موجود در یک لیست کد از پیش تعریف شده اختصاص می‌یابد و دومین کد به دومین CH ای که ADV فرستاده و به همین ترتیب به تمامی CH ها یک کد توزیعی اختصاص می‌یابد. اگر تعداد کدهای موجود به حد کافی باشد، خوشه‌های همسایه با احتمال خوبی باهم تداخل نخواهند داشت. برای کاهش بیشتر این احتمال (احتمال تداخل خوشه‌های همسایه با یکدیگر) و همچنین برای دستیابی بیشتر به هدف کارایی در مصرف انرژی، هر گره، توان ارتباطی خود را تنظیم می‌کند تا سیگنال آن به مقدار کمی به داخل خوشه‌های همسایه نفوذ کند.

⁹⁷ Spreading Code

⁹⁸ Transmitter-Based Code Assignment

داده‌های ترکیب شده در گره‌های CH با روش CSMA و با استفاده از یک کد توزیعی برای تمامی CH^{۹۹}ها برای ایستگاه پایه فرستاده می‌شوند. هنگامیکه یک CH داده‌ای برای ارسال دارد (در انتهای فریم زمانی‌اش) باید کانال را شنود کند تا ببیند که آیا گره دیگری با استفاده از کد توزیعی ثابت ذکر شده (کد توزیعی مربوط به ایستگاه پایه) در حال ارسال هست یا خیر. اگر این طور باشد، مدتی برای ارسال داده‌اش صبر می‌کند و در غیر این صورت، CH مذکور با استفاده از کد توزیعی مربوط به ایستگاه پایه داده‌اش را می‌فرستد.

جدول ۱-۳، پروتکل‌های MAC استفاده شده در مراحل مختلف LEACH را به همراه تعداد بسته‌های رد و بدل شده در هر بخش نشان می‌دهد. ستون آخر نشان دهنده‌ی این است که آیا احتمال رخداد تصادم در این مرحله زیاد است یا خیر.

جدول ۱-۳ پروتکل‌های MAC استفاده شده و تعداد بسته‌های ارسالی در LEACH.

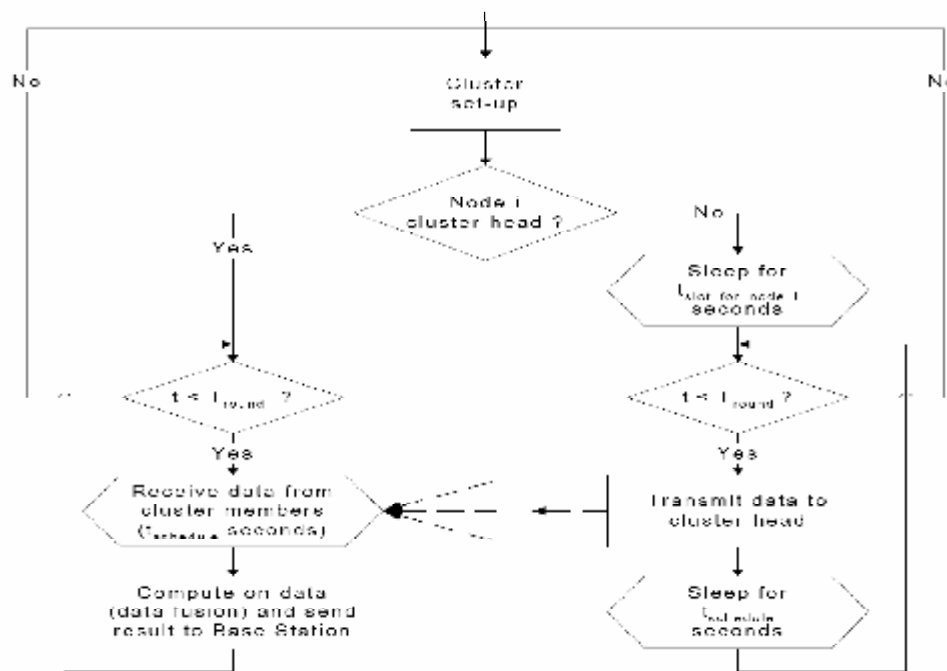
Phase	Task / # of Packets	MAC Protocol	Collisions
Set-up	CH nodes broadcast ADV message. / k_{opt}	Nonpersistent CSMA	Yes (Not probable)
	Nodes notify their preferable CH with a Join-REQ message. / $N - k_{opt}$	Nonpersistent CSMA	Yes
	CH nodes transmit TDMA schedule to cluster members. / k_{opt}	Nonpersistent CSMA	Yes (Not probable)
Steady-State (one frame only)	Nodes send their data to the CH during their allocated time slot. / $N - k_{opt}$	Different spreading code for each cluster TDMA for cluster members	No
	CH nodes transmit the aggregated data to the base station. / k_{opt}	DSSS but all CHs use the same spreading code and CSMA	Yes (Not probable)

⁹⁹ Fixed Spreading Code

با توجه به مطالب ذکر شده، در فاز حالت پایدار از LEACH، با فرض اختیار داشتن کدهای توزیعی کافی، تصادم رخ نمی‌دهد، اما در تمام مراحل فاز راه‌اندازی احتمال رخداد تصادم وجود دارد و این احتمال در بخش دوم از این فاز که تعداد بسته‌های ارسالی زیاد است، بسیار بیشتر است.

لازم به ذکر است که اشکال استفاده از روش DSSS در ارتباطات داخل خوشه، نیاز این روش به همگام‌سازی زمانی بسیار دقیق است که ممکن است نیاز به یک سری ارتباطات اضافه بین CH و اعضای خوشه داشته باشد.

در شکل ۶-۳ فلوچارت مربوط به فاز حالت پایدار در LEACH نشان داده شده است. عبارت Data Fusion در شکل را می‌توان معادل با ترکیب داده‌ها در نظر گرفت.



شکل ۶-۳ فلوچارت فاز حالت پایدار در LEACH

۳-۲-۴ پروتکل LEACH-C^{۱۰۰}

با اینکه استفاده از LEACH، یک الگوریتم خوشه‌بندی به صورت تصادفی، تطبیقی و خود پیکربندی شده را به همراه دارد، این پروتکل تضمینی در مورد تعداد و نحوه‌ی قرار دادن CHها نمی‌کند. بنابراین، استفاده از یک الگوریتم کترلی مرکزی برای تشکیل خوشه‌ها به شکل گیری خوشه‌هایی بهتر با پراکنده کردن CHها در سراسر شبکه کمک خواهد کرد. این ایده در ایجاد پروتکلی دیگر به نام LEACH-C استفاده شده که برخلاف LEACH از یک الگوریتم تشکیل خوشه‌ی مرکزی استفاده می‌کند و فاز حالت پایدار آن دقیقاً مانند LEACH است.

در فاز راه‌اندازی LEACH-C هر گره اطلاعاتی را در مورد موقعیت فعلی‌اش (که مثلاً با گیرنده‌ی GPS آن را بدست آورده) و سطح انرژی فعلی خویش برای ایستگاه پایه می‌فرستد. ایستگاه پایه علاوه بر تشکیل خوشه‌های خوب (مثلاً با موقعیت فیزیکی مناسب و تعداد گره‌های تقریباً یکسان)، نیاز دارد که تضمین کند که بار انرژی به طور یکنواخت (عادلانه) میان تمامی گره‌ها توزیع می‌شود. برای این منظور، ایستگاه پایه میانگین سطح انرژی گره‌های شبکه را محاسبه می‌کند، گره‌هایی که سطح انرژی آن‌ها از این مقدار میانگین کمتر است، برای دور آتی نمی‌توانند CH باشند. ایستگاه پایه از مابقی گره‌ها با استفاده از الگوریتم Annealing [Murata_94] برای حل مسأله‌ی NP-hard پیدا کردن بهینه‌ترین خوشه‌ها (که تعداد آن‌ها برابر با k_{opt} است) استفاده می‌کند [Agarwal_99]. این الگوریتم تلاش می‌کند تا مقدار انرژی لازم را برای گره‌هایی غیرسرپرست (non-CH) برای انتقال داده‌شان به CH، به حداقل برساند. این کار با کمینه کردن مجموع مربعات فاصله‌های بین تمام گره‌های non-CH و نزدیک‌ترین CH به آن‌ها انجام می‌شود.

¹⁰⁰ LEACH-centralized

هنگامیکه CHها و خوشه‌های متناظر پیدا شدند، ایستگاه پایه پیامی را در شبکه منتشر می‌کند که حاوی ID گره CH برای هر گرهی حسگر است. اگر در پیام دریافت شده توسط یک گره، ID گرهی CH مساوی با ID خود گره باشد، آن گره CH است؛ در غیر این صورت، گره برش زمانی خود را در زمان‌بندی TDMA برای انتقال داده‌اش را یاد می‌گیرد و خاموش می‌شود (به مُد sleep می‌رود) تا زمان ارسالش فرا برسد. فاز حالت پایدار LEACH-C عیناً مشابه LEACH است.

۳-۲-۵ آنالیز و شبیه‌سازی LEACH

در این بخش، پروتکل LEACH با دو پروتکل پیشین به نام‌های حداقل انرژی برای ارسال (MTE¹⁰¹) و خوشه‌بندی استاتیک (SC¹⁰²) از نظر طول عمر سیستم، انرژی مصرفی، مقدار داده‌ی انتقال یافته و تاخیر شبکه مقایسه می‌شود. ابتدا اندکی در مورد نحوه‌ی کارکرد دو پروتکل مذکور توضیح می‌دهیم و پس از بیان مدل انرژی مصرفی و محاسبه‌ی تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها، مقایسه‌های انجام شده از طریق شبیه‌سازی را ارائه خواهیم کرد.

۳-۲-۵-۱ پروتکل‌های پیشین

۱. پروتکل MTE

در پروتکل MTE هر گره به جای ارسال مستقیم داده‌اش به ایستگاه پایه، از تعدادی گره‌ی میانی استفاده می‌کند تا در نهایت به ایستگاه پایه برسد. گره‌های میانی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که مجموع مربعات فاصله‌های بین آنها مینیموم شود. در این صورت، با فرض ناچیز بودن انرژی‌های لازم برای مدار دریافت داده و مدار ارسال داده (که فرض درستی نیست)، و با فرض

¹⁰¹ Minimum-Transmission-Energy

¹⁰² Static Clustering

اینکه انرژی با توان دوم فاصله‌ی بین گره‌ها مرتبط است، برای مسیر انتخاب شده، انرژی کل ارسال مینیموم می‌شود. برای مثال در این روش برای گره‌های A، B و C گرهی A در صورتی از B برای ارسال داده به C استفاده می‌کند که داشته باشیم:

$$E_{TX}(d = d_{AB}) + E_{TX}(d = d_{BC}) < E_{TX}(d = d_{AC})$$

or

$$d_{AB}^2 + d_{BC}^2 < d_{AC}^2.$$

(۴-۳)

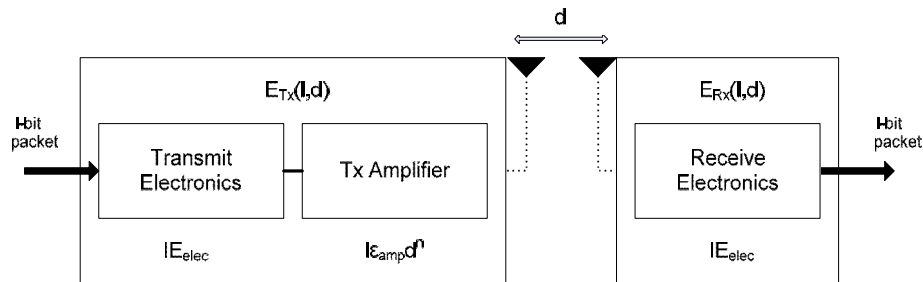
همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، این روش از انرژی مصرف شده در مدار دریافت داده و مدار ارسال داده صرفه نظر می‌کند و در نتیجه ممکن است که واقعا مسیرهای با کمترین مقدار مصرف انرژی را به دست ندهد.

۲. پروتکل Static Clustering

در این پروتکل قبل از شروع به کارکرد شبکه، گره‌ها توسط ایستگاه پایه در خوشه‌های بهینه سازماندهی می‌شوند. و خوشه‌ها و CH‌ها در تمام مدت کارکرد شبکه ثابت باقی می‌مانند. در این پروتکل نیز همانند LEACH گره‌های یک خوشه در طول هر فریم زمانی (با استفاده از TDMA و DSSS) داده‌ی خود را به CH مربوطه می‌فرستند و CH نیز داده‌های اعضای خوشه‌اش را ترکیب می‌کند و نتیجه را برای ایستگاه پایه ارسال می‌کند. لازم به ذکر است که در این پروتکل هنگامیکه انرژی CH به پایان رسید، گره‌های عضو خوشه‌ی آن CH توانایی ارتباط با ایستگاه پایه را ندارند و مرده تلقی می‌شوند.

۲-۵-۲-۳ مدل مصرف انرژی

مدل مصرف انرژی که در اینجا برای اجزای رادیویی شبکه به جهت ارزیابی پروتکل LEACH به کار گرفته شده، به این صورت است که E_{elec} (واحد: nJ/bit) انرژی است که در مدار الکترونیکی گیرنده یا فرستنده برای دریافت یا ارسال یک بیت از بسته‌ی داده مصرف می‌گردد و به عواملی چون نحوه‌ی کدگذاری، نوع مدولاسیون، نوع فیلترینگ و چگونگی توزیع سیگنال^{۱۰۳} بستگی دارد. ϵ_{amp} (واحد: pJ/bit/mⁿ) نیز انرژی مصرف شده در تقویت‌کننده‌ی رادیویی گره فرستنده برای ارسال یک بیت از بسته‌ی داده در کانال به طول d بین گره‌ی فرستنده و گره‌ی گیرنده می‌باشد که به عواملی چون نرخ خطای بیتی بستگی دارد. شمای این مدل مصرف انرژی در شکل ۷-۳ آمده است.



شکل ۷-۳ مدل مورد استفاده قرار گرفته برای انرژی مصرفی در اجزای رادیویی [Rappaport_96].

همان‌طور که از شکل پیداست، گره‌ی فرستنده هم برای راه‌اندازی مدار الکترونیکی رادیویی خود (برای قرار دادن داده روی کانال) و هم برای راه‌اندازی تقویت‌کننده‌ی رادیویی خود (برای انتقال داده در طول کانال) انرژی مصرف می‌کند. درحالی‌که گره‌ی گیرنده فقط برای

¹⁰³ Signal Spreading

راه اندازی مدار الکترونیکی رادیویی اش (برای برداشتن داده از روی کانال) انرژی مصرف می کند.

در نتیجه برای محاسبه انرژی ارسال و دریافت، روابط زیر را خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} E_{Tx}(l, d) &= lE_{elec} + l\epsilon_{amp}d^n \\ E_{Rx}(l, d) &= lE_{elec}, \end{aligned}$$

(۵-۳)

در رابطه ی فوق، l طول بسته ی ارسالی / دریافتی، d فاصله ی بین گیرنده و فرستنده و n نمای اتلاف مسیر^{۱۰۴} می باشد که برای مدل فضای آزاد یا 10^5 fs برابر با ۲ می باشد (مناسب برای فواصل کوتاه و بدون مانع)، و بسته به نوع محیط و توپولوژی شبکه ممکن است به مقدار ۶ نیز برسد [Rappaport_96]. برای اینکه شبیه سازی ها به واقعیت نزدیک تر شوند، برای فواصل کمتر از یک فاصله ی آستانه، d_0 با مقدار $87/7$ متر، از مدل فضای آزاد (fs) استفاده می شود که در این مدل داریم:

$$\epsilon_{amp} = \epsilon_{fs}, n = 2.$$

(۶-۳)

برای فواصل بیشتر از d_0 از مدل چند مسیره یا 10^6 mp استفاده می شود که در این مدل داریم:

$$\epsilon_{amp} = \epsilon_{mp}, n = 4.$$

(۷-۳)

علاوه بر این، گره های CH در پروتکل LEACH مسوولیت ترکیب داده های (سیگنال های) اعضای خوشه را بر عهده دارند که در حالت همبستگی کامل، یک سیگنال نماینده از ترکیب سیگنال های گره ها حاصل می شود. انرژی لازم برای این ترکیب سازی داده برابر با مقدار IE_{DA} برای

¹⁰⁴ Path Loss Exponent

¹⁰⁵ Free Space Model

¹⁰⁶ Multipath Model

هر سیگنال دریافت شده توسط CH لحاظ می‌شود که در این رابطه E_{DA} انرژی لازم برای ترکیب داده است و در کل آزمایش‌ها به آن مقدار 5 nJ/bit/signal تخصیص داده می‌شود.

۳-۲-۳ تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها

در [Heinzelman_02a] تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها (k_{opt}) که برای پروتکل LEACH یک پارامتر سیستمی به حساب می‌آید، به صورت تحلیلی محاسبه شده است. برای این محاسبه فرض شده که مدل مصرف انرژی که قبلاً به طور کامل توضیح داده شد (بخش ۳-۲-۵)، بر شبکه حکمفرماست. همچنین فرض شده است که ارتباطات داخل یک خوشه و ارتباطات با خارج خوشه (ارسال داده ترکیب شده از CH به ایستگاه پایه) به ترتیب از مدل فضای آزاد و مدل چند مسیر استفاده می‌کنند. بدین ترتیب، انرژی مصرف شده توسط یک گره‌ی CH در طول یک فریم زمانی برابر خواهد بود با:

$$E_{CH} = lE_{elec} \left(\frac{N}{k_{opt}} - 1 \right) + lE_{DA} \frac{N}{k_{opt}} + lE_{elec} + l\epsilon_{mp} d_{toBS}^4,$$

(۸-۳)

در رابطه‌ی فوق، l تعداد بیت‌های هر پیام داده و d_{toBS} فاصله‌ی بین CH تا ایستگاه پایه است. ترم‌های رابطه‌ی فوق به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: ۱- انرژی مصرف شده برای دریافت سیگنال‌های گره‌های عضو خوشه (که تعداد آن‌ها برابر تعداد متوسط گره‌های یک خوشه، $\frac{N}{k_{opt}}$ منهای خود CH است). ۲- انرژی لازم برای ترکیب سیگنال‌های دریافتی که تعداد آنها به اضافه‌ی سیگنال نماینده تولید شده برابر است با $\frac{N}{k_{opt}}$. ۳- و دو ترم آخر مطابق رابطه‌ی ۳-۵، انرژی لازم برای ارسال سیگنال ترکیب شده‌ی حاصل به ایستگاه پایه می‌باشند.

از سوی دیگر، یک گرهی non-CH در طول یک فریم زمانی فقط باید در برش زمانی مربوطه داده‌اش را برای CH ارسال کند. بنابراین انرژی مصرف شده توسط هر گرهی non-CH برابر خواهد بود با:

$$E_{non-CH} = lE_{elec} + l\varepsilon_{fs} d_{toCH}^2, \quad (9-3)$$

در رابطه‌ی فوق، d_{toCH} فاصله‌ی بین گره تا CH می‌باشد.

برای یک شبکه که شامل N گره است که به صورت یکنواخت در یک ناحیه‌ی $M \times M$ توزیع شده‌اند، می‌توان با محاسبه‌ی امید ریاضی مربع فاصله‌ی گره‌های یک خوشه از CH ($E[d_{toCH}^2]$)، انرژی مصرفی در گره‌های non-CH خوشه در طول یک فریم را محاسبه کرد و سپس با بدست آوردن انرژی کل مصرفی در طول یک فریم و گرفتن مشتق از آن نسبت به k_{opt} و برابر صفر قرار دادن آن، رابطه‌ی مربوط به تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها را بیابیم. برای اطلاع از جزئیات دقیق نحوه‌ی بدست آوردن $E[d_{toCH}^2]$ به [Heinzelman_02a] مراجعه کنید.

$$E[d_{toCH}^2] = \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{k_{opt}}, \quad (10-3)$$

با جایگذاری $E[d_{toCH}^2]$ از رابطه‌ی فوق در رابطه‌ی ۹-۳ خواهیم داشت:

$$E_{non-CH} = lE_{elec} + l\varepsilon_{fs} \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{k_{opt}}. \quad (11-3)$$

همان‌طور که می‌دانیم، انرژی کل مصرفی یک خوشه در طول یک فریم برابر است با:

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left(\frac{N}{k_{opt}} - 1\right)E_{non-CH} \approx E_{CH} + \frac{N}{k_{opt}}E_{non-CH}.$$

(۱۲-۳)

و انرژی مصرفی کل شبکه در طول یک فریم به صورت زیر در می آید:

$$E_{total} = k_{opt} E_{cluster} = l(E_{elec} N + E_{DA} N + k_{opt} \varepsilon_{mp} d_{toBS}^4 + E_{elec} N + l \varepsilon_{fs} \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{k_{opt}} N).$$

(۱۳-۳)

گرفتن مشتق از رابطه‌ی فوق نسبت به k_{opt} و برابر صفر قرار دادن آن، رابطه‌ی مربوط به تعداد

بهینه‌ی خوشه‌ها را به صورت زیر بدست می‌دهد:

$$k_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}} \frac{M}{d_{toBS}^2}}.$$

(۱۴-۳)

۳-۲-۵-۴ پیکربندی شبکه‌ی مورد آزمایش

مشخصات شبکه‌ای که در آن LEACH با پروتکل‌های MTE و Static Clustering از نظر

طول عمر سیستم، انرژی مصرفی، مقدار داده‌ی انتقال یافته و تاخیر شبکه مقایسه شده، در جدول

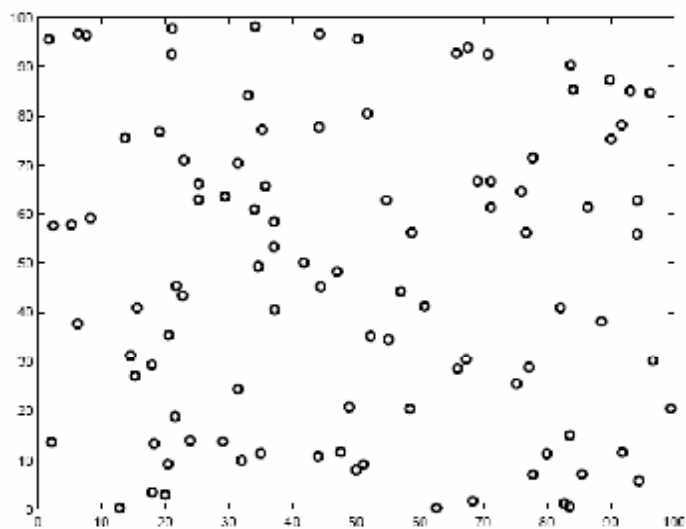
۳-۲ آمده است.

شکل ۳-۸ نیز خود شبکه‌ی مذکور را به تصویر می‌کشد. لازم به ذکر است که در این

شبکه، ۱۰۰ گره به صورت تصادفی در سطح شبکه توزیع شده‌اند.

جدول ۲-۳ پارامترهای شبکه‌ی استفاده شده در ارزیابی LEACH.

پارامترها	مقدار
محدوده‌ی شبکه	(0,0) to (100,100)
N	100
d_0	87.7 m
موقعیت ایستگاه پایه	(50,175)
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
P_{LEACH}	0.05
تعداد فریم‌های زمانی در هر دور	1
طول هر فریم زمانی	20 s
E_{DA}	5 nJ/bit/signal
انرژی اولیه‌ی هر گره	2 J
اندازه‌ی بسته	500 bytes



شکل ۳-۸ شبکه‌ی مورد استفاده قرار گرفته در ارزیابی LEACH.

با توجه به مشخصات موجود در جدول ۳-۲ برای شبکه‌ی استفاده شده در ارزیابی پروتکل LEACH داریم: $N = 100$ (تعداد گره‌ها)، $M = 100$ m، $\epsilon_{fs} = 10$ pJ/bit/m²، $\epsilon_{mp} = 0.0013$ pJ/bit/m⁴ و $75 \text{ m} < d_{toBS} < 185 \text{ m}$. بنابراین انتظار داریم که تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها (k_{opt}) در بازه‌ی [1,6] باشد. به ازای مقادیر مختلف برای k_{opt} در این بازه پروتکل LEACH برای مدت ۱۰۰۰ ثانیه شبیه‌سازی شده است و متوسط انرژی مصرف شده در هر دور به عنوان ملاک انتخاب بهترین مقدار k_{opt} بوده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که برای شبکه‌ی مذکور، تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها بین ۳ و ۵ است. لازم به ذکر است که هنگامیکه تعداد خوشه‌ها کم باشد (مثلاً ۱ یا ۲)، گره‌های non-CH اغلب مجبورند داده‌شان را برای رساندن به یک گره‌ی CH به مسافتی دور بفرستند که در این صورت انرژی‌شان زود تمام می‌شود و اگر تعداد خوشه‌ها زیاد باشد (بیشتر از ۵)، اثر ترکیب داده‌ها در گره‌های CH کم‌رنگ خواهد شد. در آزمایش‌هایی که در این بخش برای مقایسه LEACH با سایر پروتکل‌ها به کار رفته‌اند، k_{opt} برابر با ۵ لحاظ شده است.

۳-۲-۵ نتایج شبیه‌سازی‌ها

در آزمایش‌های انجام شده، فرض شده که اولاً مطابق جدول ۳-۲ هر گره با انرژی $J = 2$ شروع به کار می‌کند و ثانیاً گره‌ها داده‌های نامحدودی برای ارسال به ایستگاه پایه دارند (در تمام فریم‌ها، داده دارند).

هر گره با توجه به رابطه‌ی ۳-۱ در شروع هر دور وضعیت خودش را مشخص می‌کند که آیا در این دور CH خواهد بود یا خیر. طول هر دور نیز ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده، به گونه‌ای که به طور متوسط هر گره انرژی کافی برای حداقل یک بار CH شدن و چندین بار non-CH بودن را در مدت زمان شبیه‌سازی داشته باشد. در شبیه‌سازی‌ها نرخ‌هایی که با آن نرخ، بسته‌های داده به

ایستگاه پایه منتقل می‌شوند و نیز انرژی مورد نیاز برای رساندن داده به ایستگاه پایه، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هنگامیکه در طول مدت شبیه‌سازی، گره‌ها انرژی‌شان را تمام می‌کنند، دیگر قادر به ارسال و دریافت داده نیستند و مرده تلقی می‌شوند.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، انرژی هنگامی مصرف می‌شود که گره‌ای داده ارسال یا دریافت کند و یا اقدام به ترکیب داده کند. استفاده از DSSS (طیف گسترده)، تعداد بیت‌های انتقالی را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب مقدار انرژی مصرف شده در اجزای رادیویی افزایش می‌یابد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده ما فرض می‌کنیم که انرژی استاتیک مصرف نمی‌شود و انرژی مصرف شده هنگام شنود کانال (Carrier-Sense) را نیز نادیده گرفته‌ایم؛ در نتیجه، شبیه‌سازی‌های انجام شده مزایای بالقوه‌ی LEACH را در استفاده از TDMA نسبت به استفاده از CSMA در پروتکل MTE نشان نمی‌دهند.

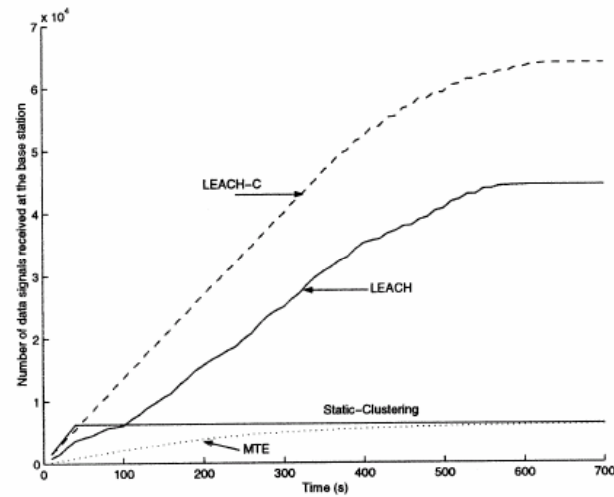
اگرچه برای هر شبکه‌ای، کیفیت تعریف خاص خود را دارد و کیفیت وابسته با کاربرد و نیز نوع داده‌هاست، یک روش تعیین کیفیت، اندازه‌گیری مقدار داده‌ای (تعداد سیگنال‌های داده واقعی و یا همان تعداد سیگنال‌هایی است که از ترکیب آن‌ها سیگنال‌های ترکیبی درست می‌شود و به ایستگاه پایه ارسال می‌گردد) است که در ایستگاه پایه دریافت می‌شود. هرچه ایستگاه پایه داده‌های بیشتری را دریافت کند، کنترل آن روی محیط دقیق‌تر خواهد بود. اگر تمام گره‌های یک خوشه رویداد یکسانی را حس کنند، داده‌ی واقعی و داده‌ی موثر (داده‌ی حاصل از ترکیب داده‌های واقعی)، اطلاعات یکسانی را خواهند داشت و افت کیفیتی با ارسال داده‌ی موثر متوجه شبکه نخواهد شد. از سوی دیگر، اگر گره‌های یک خوشه حوادث مختلفی را حس کنند، CH قوی‌ترین رویداد را انتخاب می‌کند (قوی‌ترین سیگنال در بین سیگنال‌های دریافتی) و آن را برای ایستگاه پایه می‌فرستد. در این حالت به دلیل تبدیل سیگنال‌های مختلف به یک سیگنال نماینده، در شبکه

افت کیفیت خواهیم داشت. همچنین به دلیل ماهیت سیگنال‌های رادیویی، انتشار سیگنال نیز همراه با افت کیفیت خواهد بود، چون انتشار سیگنال به عواملی چون ماهیت خود سیگنال، فاصله‌ی بین رویداد و گره‌ی حسگر و حساسیت حسگر بستگی دارد. اگر فاصله‌ی بین گره‌ها در یک خوشه نسبت به فاصله‌ای که از آن حوادث قابل حس شدن هستند، کمتر باشد و یا فاصله‌ی مکانی بین حوادثی که در محیط رخ می‌دهد، بزرگ باشد، احتمال اینکه گره‌های یک خوشه، رویداد یکسانی را حس کنند زیاد است. در شبیه‌سازی‌ها فرض شده که گره‌های یک خوشه، رویداد یکسانی را حس می‌کنند و در نتیجه افت کیفیت نداریم.

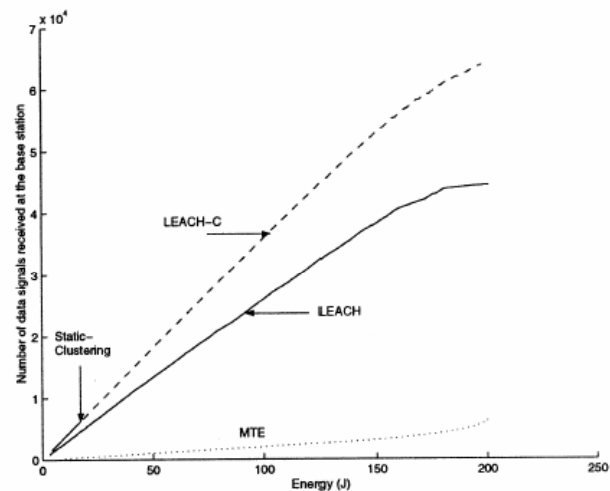
شکل ۳-۹ تعداد سیگنال‌های داده (سیگنال واقعی برای پروتکل MTE و سیگنال‌های موثر برای پروتکل‌های LEACH, Static-Clustering و LEACH-C) که در طول زمان در ایستگاه پایه دریافت شده‌اند و نیز تعداد سیگنال‌های داده که به ازای مصرف مقدار مشخصی از انرژی در ایستگاه پایه دریافت شده‌اند، را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۹(الف) نشان می‌دهد که LEACH در طول زمان شبیه‌سازی مقدار داده‌ی بیشتری را نسبت به روش MTE، به ایستگاه پایه انتقال می‌دهد. دلیل اینکه روش MTE زمان زیادی را برای انتقال داده از گره‌ها به ایستگاه پایه نیاز دارد، این است که هر پیام، چندین گام را برای رسیدن به ایستگاه پایه می‌پیماید. در حالیکه در LEACH، هر پیام فقط از یک گام میانی برای رسیدن به ایستگاه پایه استفاده می‌کند (پیام‌ها از گره‌ها به CHها می‌روند و در آنجا ترکیب می‌شوند و این ارسال داده‌های ترکیبی در کاهش مقدار داده‌های انتقالی خیلی موثر است). شکل ۳-۹(ب) تعداد کل داده‌های دریافتی در ایستگاه پایه را به ازای مقدار مشخصی از انرژی مصرفی نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که LEACH و LEACH-C بیشترین مقدار داده را به ازای مصرف واحد انرژی منتقل می‌کنند. و در نتیجه، بر اساس این دو نمودار، هم از نظر تاخیر و هم از

نظر مصرف انرژی کارآمد هستند. اما پروتکل مسیریابی MTE دارای محاسبات محلی (ترکیب داده) نمی‌باشد و در نتیجه داده‌های زائد زیادی را به سوی ایستگاه پایه روانه می‌کند.



(الف)



(ب)

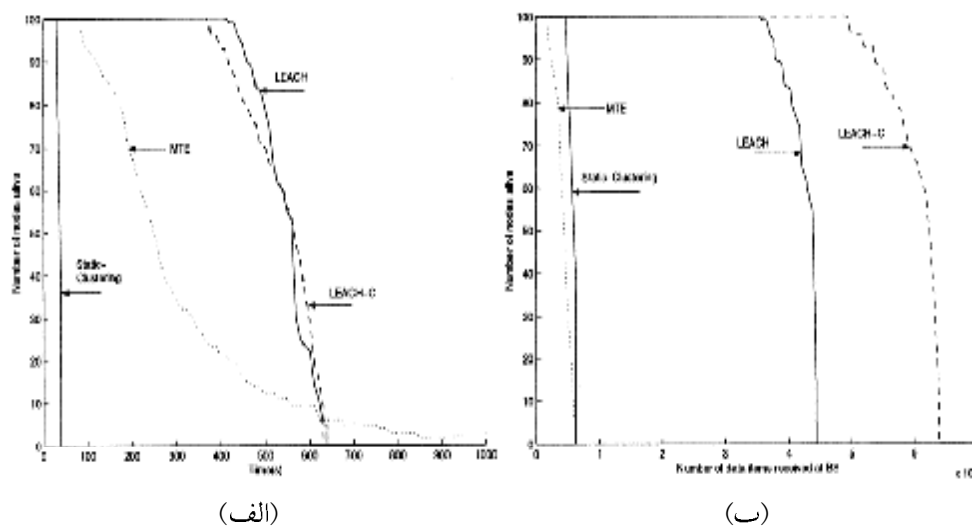
شکل ۳-۹ الف) مقدار کل داده‌ی دریافتی در ایستگاه پایه نسبت به زمان. ب) مقدار کل داده دریافتی در ایستگاه پایه نسبت به مقدار انرژی مصرفی. این نمودارها نشان می‌دهند که LEACH نسبت به MTE به ازای مصرف یک واحد از انرژی، ده برابر بیشتر داده منتقل می‌کند و LEACH-C ۴۰٪ داده‌ی بیشتری را نسبت به LEACH به ازای مصرف یک واحد انرژی منتقل می‌کند. نمودارها نشان می‌دهند که Static Clustering نیز به دلیل اینکه تمام گره‌های شبکه از جمله CHها انرژی محدودی دارند، کارایی خوبی ندارد.

شکل ۳-۹ نشان می‌دهد که LEACH به کارایی LEACH-C نیست (LEACH-C به ازای واحد انرژی، ۴۰٪ داده‌ی بیشتری را منتقل می‌کند) و دلیل این امر مربوط است به اینکه ایستگاه پایه اطلاعات مربوط به موقعیت و انرژی تمام گره‌های شبکه را داراست؛ بنابراین می‌تواند خوشه‌های بهتری را که برای انتقال داده به انرژی کمتری نیاز دارند، تولید کند. علاوه بر این، تشکیل خوشه‌ها به فرمان ایستگاه پایه، ضمانت می‌کند که برای شبکه‌ی استفاده شده در ارزیابی LEACH، تعداد خوشه‌ها در هر دور برابر با ۵ باشد ($k_{opt}=5$). درحالی‌که LEACH در مورد تعداد خوشه‌ها هیچ تضمینی به ما نمی‌دهد و تنها امید ریاضی تعداد خوشه‌های هر دور برابر ۵ است.

شکل ۳-۱۰ (الف) تعداد گره‌های زنده‌ی شبکه را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، شبکه در روش MTE برای مدت بیشتری زنده می‌ماند، زیرا در این روش مقدار داده‌ی منتقل شده به ایستگاه پایه، به مقدار قابل توجهی نسبت به LEACH کمتر است. این موضوع در شکل ۳-۱۰ (ب) مشهود است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، در پروتکل LEACH، شبکه به ازای تعداد گره‌های مرده‌ی یکسان، ده برابر بیشتر داده‌ی موثر نسبت به پروتکل MTE منتقل می‌کند. به دو دلیل پروتکل MTE برای انتقال داده به ایستگاه پایه انرژی بیشتری نیاز دارد (و در نتیجه، به ازای مقدار داده‌ی انتقالی برابر با LEACH، در آن مرگ گره‌ها بیشتر است):

(۱) رخداد تصادم‌ها (۲) نداشتن مکانیزم ترکیب داده‌ها. به دلیل اینکه MTE یک کنترل مرکزی برای زمانی که گره‌ها به ارسال و دریافت بسته‌ها می‌پردازند، ندارد، تصادم‌ها مقدار انرژی لازم را برای ارسال یک پیام به صورت موفق، افزایش می‌دهند. از این گذشته، هر پیام در روش MTE باید به طور متوسط شش گام میانی را برای رسیدن به ایستگاه پایه سپری کند [Heinzelman_02a].

درحالی‌که در LEACH هر پیام فقط یک گام میانی را (برای انجام عملیات ترکیب داده در CH) سپری می‌کند. البته، حرف‌های فوق با فرض ترکیب‌سازی کامل داده‌ها درست خواهند بود.



شکل ۳-۱۰ الف) تعداد گره‌های زنده‌ی شبکه در طول زمان ب) تعداد گره‌های زنده‌ی شبکه بر حسب مقدار داده‌ی ارسال شده به ایستگاه پایه. این نمودارها نشان می‌دهند که پروتکل LEACH نسبت به پروتکل MTE به ازای تعداد گره‌های مرده‌ی برابر، ده برابر بیشتر داده منتقل می‌کند. مزیت چرخش CHها در پروتکل LEACH به وضوح با مقایسه‌ی تعداد گره‌های زنده در LEACH و Static Clustering قابل درک است. انرژی اولیه‌ی تمام گره‌ها برابر با J فرض شده است.

شکل ۳-۱۰ نشان می‌دهد که چرا روش Static Clustering نسبت به LEACH کارایی کمتری دارد. گره‌های CH به دلیل اینکه همیشه CH هستند، دچار مرگ زودرس می‌شوند و به این ترتیب، تمام گره‌های متعلق به خوشه‌ی آن‌ها، چون ارتباطشان با ایستگاه پایه قطع شده، عملاً مرده‌اند. بنابراین چرخش وظیفه‌ی سرپرستی خوشه در LEACH منتج به طول عمر بیشتر شبکه می‌شود.

۳-۳ مشکلات پروتکل LEACH و پروتکل‌های سلسله‌مراتبی دیگر

یک مسأله‌ی مهم در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و مخصوصاً شبکه‌های ریزحسگر بی‌سیم (Wireless Microsensor Networks)، متعادل ساختن بار انرژی بین گره‌های حسگر در

شبکه است. اما پروتکل‌های سلسله‌مراتبی (مبتنی بر خوشه‌بندی) مانند LEACH، پروتکل‌های معاصر و پیشین LEACH و پروتکل‌های مشتق شده از LEACH، تاثیر فاصله‌ی گره‌های حسگر از ایستگاه پایه را در انرژی کل مصرف شده توسط شبکه در نظر نمی‌گیرند و این پارامتر را در سیاست‌های خوشه‌بندی خود وارد نمی‌کنند. در این پروژه، با بررسی و تحلیل مزایا و معایب پروتکل‌های سلسله‌مراتبی فعلی، یک پروتکل ارتباطی مبتنی بر خوشه‌بندی به نام تقسیم‌بندی بر اساس فاصله (Distance-Based Segmentation و یا به اختصار، DBS)، طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی شده است. این پروتکل به مقدار قابل توجهی عدم تعادل در مصرف انرژی را در بین گره‌های شبکه کاهش می‌دهد و این کار با داخل کردن پارامتر فاصله (فاصله‌ی گره‌های حسگر از ایستگاه پایه) به سیاست‌های خوشه‌بندی پروتکل‌های پیشین انجام می‌گردد. علاوه بر این، یک پروتکل MAC که تاخیرهای زاید (به علت رخداد تصادم‌های پی‌درپی) را که در فاز تشکیل خوشه در پروتکل‌های قبلی به وجود می‌آمد، حذف می‌کند، به عنوان پروتکل MAC به کار گرفته شده است. قبل از بیان جزئیات پروتکل DBS به بیان کمبودهای پروتکل‌های فعلی می‌پردازیم:

پروتکل LEACH-C: همان‌طور که قبلاً بیان شد، پروتکل LEACH-C که توسط مبدعان

پروتکل LEACH پیشنهاد شده است، از یک الگوریتم مرکزی برای تشکیل خوشه‌های بهینه استفاده می‌کند. اگرچه این الگوریتم، خوشه‌های بهتری را نسبت به LEACH تشکیل می‌دهد و در آن وظیفه‌ی سرپرست خوشه بودن به گره‌های با سطح انرژی پایین اختصاص داده نمی‌شود (یعنی بار انرژی به صورت منصفانه در میان گره‌ها توزیع می‌گردد)، این الگوریتم از مقیاس‌پذیری شبکه‌ی حسگر بی‌سیم - که یکی از پارامترهای مهم در طراحی این شبکه‌هاست - پشتیبانی نمی‌کند و یا به عبارت دیگر، LEACH-C قابلیت پوشش دادن تعداد زیاد حسگر (چندصد تا چند هزار) را ندارد. زیرا در این پروتکل ایستگاه پایه باید برای هر دور از کارکرد شبکه، مساله‌ی NP-hard پیدا کردن

k_{opt} خوشه‌ی بهینه را حل کند [Agarval_99] که این کار برای شبکه‌ای با تعداد گره‌های زیاد امکان‌پذیر نیست. در حالیکه LEACH نیازی به هیچ گونه کمکی از ایستگاه پایه یا هر گرهی دیگر ندارد (خوشه‌های شبکه به صورت تصادفی و خودپیکربندی شده تشکیل می‌شوند و هر گره به صورت مستقل تصمیم می‌گیرد که برای دور جاری CH بشود یا نه).

پروتکل‌های چندگامی: در بعضی مقالات از جمله [Zhao_06] ارسال داده‌ها به صورت

چندگامی به کار گرفته شده است. در این روش گره‌ای که خواهان ارسال اطلاعات به ایستگاه پایه است، باید چند گره میانی را برای ارسال داده‌اش به ایستگاه پایه پیدا کند. بسته‌های داده از گرهی مبدأ، پس از عبور از چند گرهی میانی به مقصد می‌رسند. مهم‌ترین مزیت ارسال چندگامی خصوصاً هنگامیکه در پروتکل LEACH برای ارتباطات بین خوشه‌ها یعنی رساندن داده‌ی ترکیب شده به ایستگاه پایه از آن استفاده شود، همانند کار انجام شده در [Zhao_06]، این است که انرژی مصرفی شبکه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای روشن شدن این مطلب به مثال زیر توجه کنید:

فاصله‌ی یک CH در یک شبکه حسگر بی‌سیم از ایستگاه پایه برابر ۲۰ متر است، اگر این CH مستقیماً داده‌ی خود را به ایستگاه پایه ارسال کند، انرژی مصرف شده به شرط ناچیز بودن انرژی لازم برای راه‌اندازی مدار الکترونیکی رادیویی، برابر با $400/\epsilon_{amp}$ خواهد بود که همان انرژی کل مصرف شده می‌باشد. در حالیکه اگر این انتقال از طریق مسیری شامل دو CH میانی (که در این حالت فاصله‌ها به ترتیب ۱۰، ۱۲ و ۵ متر هستند) انجام شود، انرژی مصرف شده برای ارسال این داده برابر با $100/\epsilon_{amp} + 144/\epsilon_{amp} + 25/\epsilon_{amp} = 269/\epsilon_{amp}$ خواهد شد.

با این حال، با استفاده از روش‌های چندگامی، حجم ترافیکی که توسط گره‌های مختلف شبکه منتقل می‌شود، بسیار متفاوت خواهد بود؛ هر چه یک گره به ایستگاه پایه نزدیک‌تر باشد، ترافیک بیشتری از آن عبور می‌کند. بدین ترتیب، اگر تمهیدات خاصی برای درست کردن این عدم

تعادل در نظر گرفته نشود، گره‌های مختلف (با فواصل و موقعیت‌های مختلف نسبت به ایستگاه پایه) در زمان‌های مختلف، باتری‌شان تمام می‌شود و این منجر به عدم پوشش تمام نواحی شبکه و تقسیم‌بندی شبکه خواهد شد. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در [Shu_05] نشان می‌دهد که روش‌های چندگامی در صورتی در پروتکل‌های سلسله‌مراتبی فعلی به کار می‌آیند که گره‌های حسگر با مدارهای فرستنده/گیرنده‌ی پیشرفته که برای ارسال یا دریافت یک بیت کمتر از 50 nJ انرژی مصرف می‌کنند، مجهز شده باشند. به همین دلیل در این پروژه همانند کارهای انجام شده در [Heinzelman_00]، [Manjeshwar_01]، [Manjeshwar_02]، [Khadiji_05] و [Khadiji_06]، روش چندگامی به کار گرفته نشده و CH‌ها مستقیماً با ایستگاه پایه ارتباط برقرار می‌کنند. در کارهای آینده سعی خواهیم کرد که ایده‌ی چندگامی شدن را به پروتکل DBS اضافه کنیم.

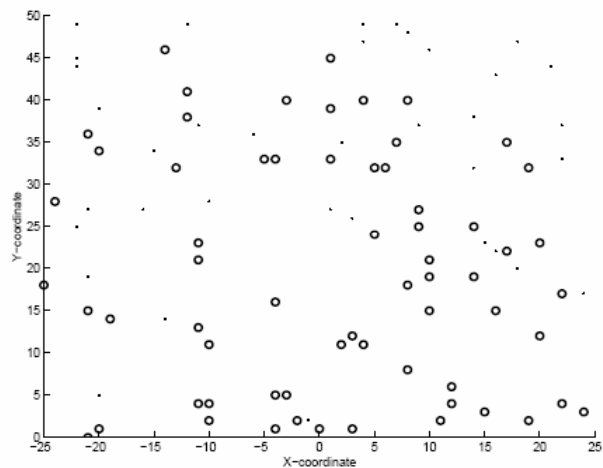
۳-۴ معرفی ایده‌های پروتکل پیشنهادی

از آنجاییکه CH بودن نسبت به non-CH بودن، انرژی بسیار بیشتری را مصرف می‌کند، یک مشکل بالقوه در LEACH این است که این پروتکل با این فرض احتمال CH شدن در دور فعلی را مطابق رابطه‌ی ۳-۱ به گره‌ها اختصاص می‌دهد که عمل CH بودن برای تمام گره‌ها مقدار انرژی یکسانی را مصرف می‌کند. حال آنکه، بر اساس مدل مصرف انرژی برای اجزای رادیویی که در بخش ۳-۲-۵ معرفی شد، در بهترین حالت، بر اساس مدل فضای آزاد، مقدار انرژی لازم جهت راه‌اندازی تقویت‌کننده‌ی رادیویی یک گره (برای انتقال داده در طول کانال) متناسب با مربع فاصله‌ی آن گره تا گره‌ی مقصد می‌باشد [Rappaport_96]. در نتیجه، انرژی مورد نیاز یک CH با فاصله‌ی زیاد از ایستگاه پایه برای برقراری ارتباط با آن ممکن است آنقدر زیاد شود که یک CH

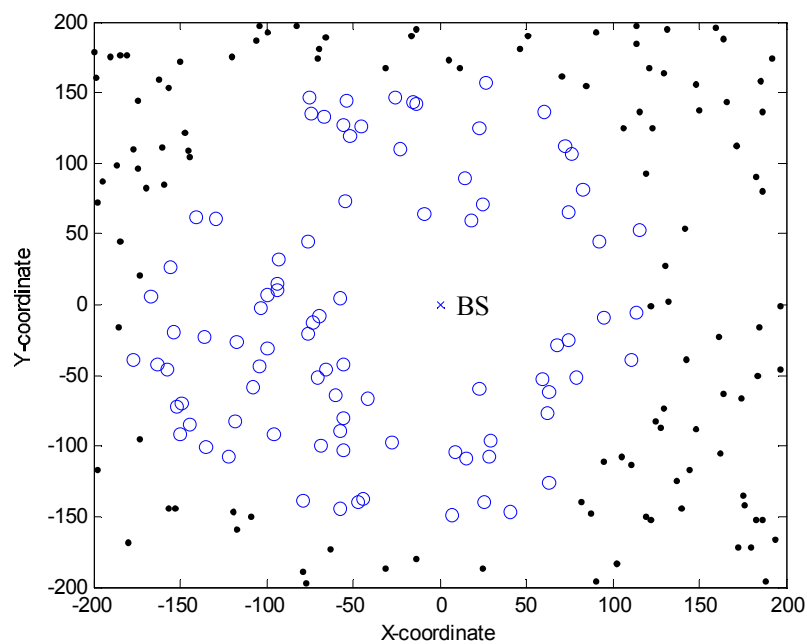
نزدیک می‌تواند با مصرف همین مقدار انرژی، چهار دفعه (و حتی بیشتر) با ایستگاه پایه ارتباط برقرار کند. بنابراین بعد از گذشت چند دور از کارکرد شبکه، تفاوت زیادی بین سطح انرژی گره‌های نزدیک به ایستگاه پایه و گره‌های دور از ایستگاه پایه خواهد بود. اگر تمام گره‌ها با انرژی یکسانی شروع به کار کنند، انرژی گره‌های دور زودتر از گره‌های نزدیک به پایان می‌رسد و بدین ترتیب شبکه به نواحی مرده^{۱۰۷} (نواحی از شبکه که به دلیل مرگ زودرس گره‌های حسگر، قابل نظارت نیست) و نواحی زنده^{۱۰۸} تقسیم می‌شود و دیگر شبکه کارایی لازم را نخواهد داشت. این موضوع در شکل‌های ۱۱-۳ و ۱۲-۳ نشان داده شده است. شکل ۱۱-۳ عیناً از مقاله‌ای که پروتکل LEACH را ارائه داده، آورده شده است. لازم به ذکر است که در این شکل، ایستگاه پایه در مکان (0, -100) قرار دارد و همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، در قسمت بالای شبکه تعداد گره‌های مرده که با نقطه‌های پررنگ نمایش داده شده‌اند، به مراتب بیشتر هستند. تا جاییکه در بالاترین قسمت شبکه، تمامی گره‌ها مرده‌اند و یک ناحیه‌ی مرده پدید آمده است. شکل ۱۲-۳ نتیجه‌ی شبیه‌سازی انجام شده در این پروژه است که در آن پروتکل LEACH بر روی یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم شامل ۲۰۰ گره اعمال شده است که تمام گره‌های آن انرژی اولیه‌ی 0.5 J را داشته‌اند و تعداد بهینه‌ی CHها مطابق بحث‌های پیشین برابر با ۱۶ بدست آمده است.

¹⁰⁷ Dead-Areas

¹⁰⁸ Live-Areas



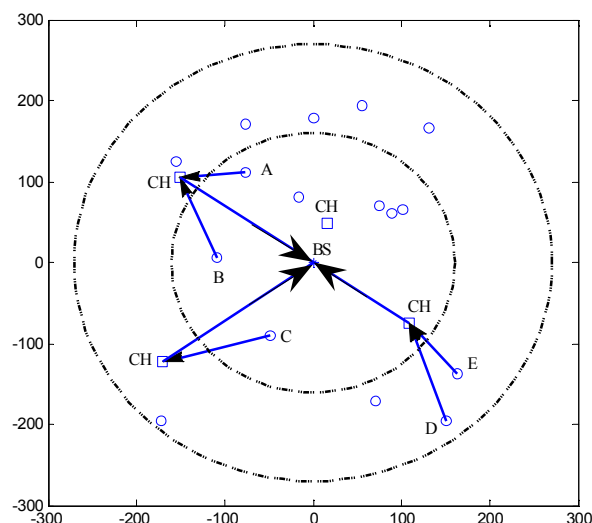
شکل ۳-۱۱ شبکه‌ی حسگر بی‌سیم پس از ۱۲۰۰ دور اجرای پروتکل LEACH. گره‌های زنده با دایره‌های توخالی مشخص هستند و گره‌های مرده با نقطه‌های پررنگ مشخص اند. شکل عیناً از [Heinzelman_00] گرفته شده است و مختصات بر حسب متر است.



شکل ۳-۱۲ شبکه‌ی حسگر بی‌سیم پس از ۴۰۰ دور اجرای پروتکل LEACH. گره‌های زنده با دایره‌های توخالی مشخص هستند و گره‌های مرده با نقطه‌های پررنگ مشخص اند. مختصات بر حسب متر است.

پس از گذشت ۴۰۰ دور از کارکرد شبکه تعداد ۱۱۰ گره مرده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، تمام گره‌هایی که مرده‌اند فاصله‌ی زیادی از ایستگاه پایه داشته‌اند و این نشان می‌دهد که سیاست‌های خوشه‌بندی LEACH به علت در نظر نگرفتن فاصله‌ی گره‌ها از ایستگاه پایه، منجر به پدید آمدن نواحی مرده در شبکه می‌شوند.

یک مشکل دیگر در پروتکل LEACH در شکل ۳-۱۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌کنید، گره‌های A، B و C مجبور به انتخاب CH‌هایی هستند که نسبت به خود آن‌ها فاصله‌ی بیشتری از ایستگاه پایه دارند. بنابراین، این گره‌ها داده‌ی خود را به جای دورتری می‌فرستند و سپس داده‌ی آن‌ها یک مسافت طولانی را طی می‌کند تا به سمت ایستگاه پایه باز گردد. این قبیل انتقال‌ها منابع انرژی شبکه را تلف می‌کنند و آن‌ها را انتقال‌های زاید می‌نامیم. در حالیکه گره‌های D و E داده‌ی خود را از طریق مسیرهای کارا و بدون ارسال داده به نواحی دور به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند.



شکل ۳-۱۳ انتقال‌های زاید در پروتکل LEACH برای گره‌های A، B و C. مختصات بر حسب متر است.

برای کم کردن اختلاف مقدار انرژی مصرفی بیت گره‌های مختلف شبکه و نیز کم کردن تعداد انتقال‌های زائد فوق، با استفاده از کارهای پیشین [Heinzelman_02a]، [Handy_02] در این پروژه روش DBS ارائه می‌شود که یک پروتکل مبتنی بر خوشه‌بندی با خوشه‌های تطبیقی است که در سیاست‌های خوشه‌بندی آن، فاصله‌ی گره‌ها از ایستگاه پایه نیز وارد شده است. این پروتکل، بر اساس فاصله‌ی گره‌ها از ایستگاه پایه به صورت عادلانه‌ای توزیع CHها را در شبکه انجام می‌دهد. ایده‌ی اصلی این پروتکل این است که گره‌هایی که فاصله‌ی بیشتری از ایستگاه پایه دارند، باید نسبت به گره‌های نزدیک به ایستگاه پایه، کمتر به عنوان CH انتخاب شوند تا مطمئن شویم که اختلاف زیادی بین سطح انرژی یک گره نزدیک و یک گره دور بوجود نخواهد آمد. با اعمال این ایده، اولاً انرژی کل مصرف شده در شبکه کاهش می‌یابد و ثانیاً بار این انرژی مصرفی به طور یکنواخت‌تری نسبت به LEACH در بین گره‌های شبکه توزیع خواهد شد و در نتیجه کارایی شبکه در مصرف انرژی افزایش خواهد یافت. در پروتکل DBS مراحل شکل‌گیری خوشه‌ها درست همانند LEACH است ولی روش انتخاب CHها و پروتکل‌های MAC با LEACH متفاوت‌اند، به گونه‌ای که ارتباطات کاراتری را از نظر مصرف انرژی، قابلیت اطمینان و تاخیر در شبکه میسر می‌سازند. DBS شبکه را با در نظر گرفتن دوایری هم مرکز حول ایستگاه پایه، به حلقه‌هایی^{۱۰۹} هم مساحت تقسیم می‌کند و به هر حلقه بر حسب فاصله‌ی حلقه تا ایستگاه پایه، تعداد خوشه‌های متفاوتی را تحمیل می‌کند. در حلقه‌های نزدیک، احتمال CH شدن نسبت به حلقه‌های دور بیشتر است و در نتیجه تعداد CHها در این حلقه‌ها بیشتر خواهد بود.

برای اعمال کردن DBS، فرضیاتی درست همانند فرضیات موجود در [Heinzelman_00]

برای شبکه حسگر (ریزحسگر) بی‌سیم انجام می‌شود. که عبارتند از:

¹⁰⁹ Segments

۱. ایستگاه پایه ثابت است و گره‌های حسگر نمی‌توانند به ایستگاه پایه خیلی نزدیک باشند.

۲. تمام گره‌ها یکسان‌اند و انرژی اولیه‌ی محدود و یکسانی دارند.

۳. تمام گره‌های شبکه توان لازم برای برقراری ارتباط مستقیم با هر گره دیگر در شبکه (و حتی ایستگاه پایه) را دارند و قادر به انجام پردازش سیگنال جهت ترکیب داده‌ها نیز می‌باشند.

۴. کانال‌های انتشار متقارن هستند (انرژی لازم برای انتقال یک پیام از گره A به گره B به ازای نسبت سیگنال به نویز معین، دقیقاً برابر است با انرژی لازم برای انتقال یک پیام از گره B به گره A).

۵. گره‌ها همیشه برای ارسال به ایستگاه پایه داده دارند و گره‌های همسایه داده‌های همبسته دارند (ارسال کل این داده‌ها به ایستگاه پایه کاری زاید است).

۶. گره‌ها همیشه باهم همگام هستند و قابلیت تنظیم توان ارسالی مصرفی را دارند، تا اولاً در مصرف انرژی ذخیره شود و ثانیاً تداخل‌های بین داده‌های خوشه‌ها کم شود.

۷. ایستگاه پایه یک گره با انرژی اولیه‌ی بالا می‌باشد.

علاوه بر فرضیات فوق، برای راه‌اندازی پروتکل DBS فرض می‌شود که گره‌ها از فاصله‌ی

تقریبی خود تا ایستگاه پایه آگاه‌اند تا بتوانند حدس بزنند که به کدام حلقه از حلقه‌های شبکه تعلق

دارند. این فرض به توجه به در دسترس بودن دستگاه‌های کوچک رادیویی که می‌توانند به عنوان

سیستم پیدا کننده‌ی فاصله^{۱۱۰} عمل کنند و با توجه به اینکه به دنبال فاصله‌ی دقیق تا ایستگاه پایه

¹¹⁰ Distance Finding System

نیستیم، فرضی منطقی است. برای مثال در [Balatin_04] پارامتر قدرت سیگنال برای تخمین زدن فاصله به کار رفته است.

با این فرض که تعداد N گره به صورت یکنواخت در فضای شبکه توزیع شده‌اند. به طور میانگین N/m گره در هر حلقه خواهیم داشت، که m نشان دهنده‌ی تعداد حلقه‌هاست. هر حلقه برای خودش تعداد CH‌های (امید ریاضی) مشخصی، $k_{segment}$ دارد و در نتیجه احتمال CH شدن در هر خوشه، $p_{segment}$ برابر با $k_{segment} / (N/m)$ خواهد بود. بنابراین، شبکه‌ای که از پروتکل DBS استفاده می‌کند، معادل با شبکه‌ای است که در هر حلقه‌اش از پروتکل LEACH استفاده می‌کند و هر حلقه تعداد خوشه‌های خاص خود را دارد. با وجود این، گره‌های حسگر برای ارسال داده‌شان به ایستگاه پایه، محدود به استفاده از CH‌های حلقه‌ی خود نیستند و آزادند که مناسب‌ترین CH (CH‌ای که قدرت سیگنال دریافتی از آن نسبت به بقیه بیشتر است) را در بین CH‌های شبکه انتخاب کنند.

با توجه به توضیحات بالا و با فرض اینکه داخلی‌ترین حلقه، کمترین اندیس را دارد (اندیس یک)، در حلقه‌ی i گره‌ی i با احتمال زیر در دور r که در لحظه‌ی t شروع می‌شود، سرپرست می‌گردد:

$$P_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{k_{segment_j}}{\frac{N}{m} - k_{segment_j} \times (r \bmod \frac{N}{m})} & \text{if } C_{i,j}(t) = 1 \\ 0 & \text{if } C_{i,j}(t) = 0 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{p_{segment_j}}{1 - p_{segment_j} \times (r \bmod \frac{1}{p_{segment_j}})} & \text{if } C_{i,j}(t) = 1 \\ 0 & \text{if } C_{i,j}(t) = 0 \end{cases}.$$

(۱۵-۳)

در این رابطه، تابع شاخص $C_{ij}(t)$ برابر یک است در صورتی که گرهی i در حلقه‌ی j شایستگی سرپرست شدن را در زمان t داشته باشد (یعنی در ظرف $(1/p_{segment_j}) \bmod r$ دور گذشته CH نشده باشد) و در غیر این صورت صفر است. اگر تعداد حلقه‌ها فرد باشد، $p_{segment_j}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{segment_j} = \begin{cases} p_{LEACH} & \text{if } j = \frac{m+1}{2} \\ p_{LEACH} + (\frac{m+1}{2} - j) \times \delta p & \text{otherwise} \end{cases},$$

(۱۶-۳)

که p_{LEACH} همان احتمال CH شدن در LEACH است و برابر با k_{opt}/N می‌باشد که k_{opt} تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها (CHها) در LEACH است که باید بر طبق توضیحات بخش ۳-۵-۲-۳ محاسبه گردد و δp تفاوت بین احتمال CH شدن در دو حلقه‌ی همسایه است. در شبیه‌سازی‌ها با یک مقدار کوچک برای δp شروع می‌کنیم و آن را کم کم افزایش می‌دهیم تا به یک مقدار بهینه برسیم. بیشتر کردن δp از این مقدار بهینه، کارایی شبکه را از نظر مصرف انرژی کاهش خواهد داد، زیرا در خوشه‌های دور تقریباً هیچ سرپرستی انتخاب نخواهد شد و با افزایش اندازه‌ی این خوشه‌ها (با توجه به اینکه رابطه‌ی مستقیم بین δp و سایز خوشه‌های دور برقرار است)، اعضای آن‌ها مجبورند داده‌ی خود را به مسافت‌های دور برای رسیدن به CH ارسال کنند و در نتیجه انرژی آن‌ها زود تمام می‌شود.

در حالتی که تعداد حلقه‌های در نظر گرفته شده برای شبکه زوج باشد، رابطه‌ای مشابه با رابطه‌ی ۱۶-۳ که باز هم توزیع احتمال‌های حلقه‌ها را حول p_{LEACH} تضمین می‌کند استفاده خواهد شد. برای مثال در یک شبکه‌ی ۴ حلقه‌ای خواهیم داشت:

$$p_{segment_j} = \begin{cases} p_{LEACH} + 2\delta p & \text{if } j = 1 \\ p_{LEACH} + \delta p & \text{if } j = 2 \\ p_{LEACH} - \delta p & \text{if } j = 3 \\ p_{LEACH} - 2\delta p & \text{if } j = 4 \end{cases}$$

(۱۷-۳)

با توجه به اینکه در پروتکل DBS، مساحت‌های تمام حلقه‌ها یکسان‌اند و احتمال‌ها به

صورت متقارن حول p_{LEACH} توزیع می‌گردند، در هر دور از این پروتکل، امید ریاضی تعداد

خوشه‌ها (CHها) همانند LEACH برابر با k_{opt} می‌باشد:

$$\begin{aligned} E[\#CH] &= \sum_{i=1}^N P_i(t) \times 1 = \sum_{j=1}^m P_{i,j}(t) \times \frac{N}{m} \\ &= \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{N}{m} - k_{segment_j} \times (r \bmod \frac{N/m}{k_{segment_j}}) \right) \times \frac{k_{segment_j}}{\frac{N}{m} - k_{segment_j} \times (r \bmod \frac{N/m}{k_{segment_j}})} \right) \\ &= k_{opt} \end{aligned}$$

(۱۸-۳)

بنابراین، با توجه به اینکه هر دو پروتکل (DBS و LEACH) در واحد زمان، مقدار داده‌ی

یکسانی را به ایستگاه پایه انتقال می‌دهند، نتیجه می‌گیریم که DBS کیفیت شبکه را از این نقطه‌نظر

(که در بخش ۳-۲-۵ نیز بیان شد) کاهش نمی‌دهد و می‌توانیم به طور عادلانه این دو پروتکل را

با هم مقایسه کنیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که با مصرف انرژی یکسان توسط شبکه به

ازای این دو پروتکل، DBS بسته‌های بیشتری را نسبت به LEACH به ایستگاه پایه انتقال می‌دهد

و نتیجتاً، DBS، مقدار داده‌ی بیشتری را به ازای واحد انرژی بدست می‌دهد. اما با توجه به اینکه

اندازه‌ی خوشه‌ها در DBS متفاوت است، باید در آینده تمهیداتی را برای تغییر مکانیزم ترکیب داده در خوشه‌های مختلف اتخاذ کنیم.

با توجه به اینکه LEACH هیچ تضمینی در مورد مکان و تعداد CHها نمی‌کند، ممکن است که در یک دور از اجرای این پروتکل، شبکه هیچ CHای نداشته باشد. LEACH در این حالت به طور واضح وظیفه‌ی شبکه را که تعداد CHهای آن برابر با صفر است، مشخص نمی‌کند. در DBS برای برطرف کردن این نقصان، یک گره به عنوان سرپرست خوشه‌ی یدکی (SCH¹¹¹) در نزدیکی ایستگاه پایه در نظر گرفته شده است که تمام گره‌ها داده‌های خود را اگر CHای در شبکه موجود نباشد، برای SCH می‌فرستند و این گره بسته‌های داده‌ی گره‌های هر حلقه را ترکیب کرده (در حالت همبستگی کامل، نتیجه‌ی این ترکیب داده، یک بسته خواهد بود) و بسته‌های ترکیب شده را به ایستگاه پایه انتقال می‌دهد. لازم به ذکر است که در این حالت، گره‌ها بسته‌های داده‌ی خود را با استفاده از کد توزیعی ثابت و روش CSMA به SCH ارسال می‌کنند و در این حالت، این بسته‌ها شامل ID گره و ID حلقه‌ی آن می‌باشند.

نمونه‌های دیگر از مصرف بیهوده‌ی انرژی، مربوط به گوش دادن بی مورد به کانال انتقال و ارسال مجدد بسته به دلیل تصادم بین بسته‌ها می‌باشد. پروتکل LEACH مورد اول را با بکار بردن مُد sleep برای گره‌ها در فاز حالت پایدار (در زمان‌بندی TDMA که قبلاً در مورد آن بحث شد) و هنگامیکه نوبت ارسال خود گره نیست، حل می‌کند و اجزای رادیویی هر گره حسگر تا زمان فرا رسیدن برش زمانی مختص آن گره و بعد از آن، خاموش می‌شوند. ولی در فاز راه‌اندازی، LEACH از nonpersistent CSMA برای رد و بدل کردن بسته‌ها بین گره‌های خوشه و CH استفاده می‌کند. روش nonpersistent CSMA از کانال به گونه‌ای کارا استفاده می‌کند و همچنین

¹¹¹ Spare Cluster Head

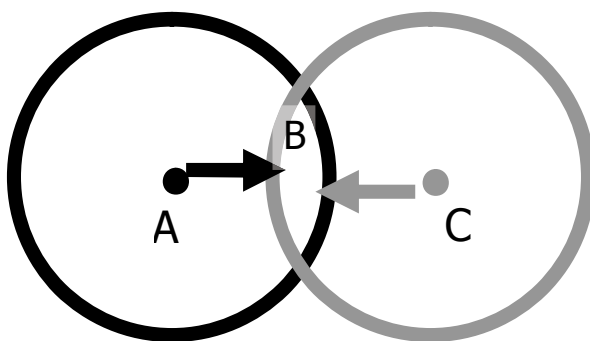
نرخ تصادم‌ها را نیز نسبت به روش‌های p -persistent CSMA تا حدی کاهش می‌دهد. با این وجود در این روش نیز تصادم رخ می‌دهد و با رخداد تصادم‌های پشت سر هم، این روش از تاخیر خیلی زیاد رنج می‌برد (در حالی که بدون رخداد تصادم نیز تاخیر آن زیاد است) که اگر تعداد گره‌های یک شبکه و در نتیجه تعداد گره‌های یک خوشه زیاد باشند، دیگر شبکه نمی‌تواند به کار خود ادامه دهد.

در پروتکل DBS، از یک پروتکل MAC نوع CSMA/CA^{۱۱۲} (پروتکل‌های با اجتناب از تصادم) استفاده می‌شود. استفاده از این پروتکل علاوه بر اینکه با حذف مشکل ایستگاه مخفی^{۱۱۳} که بعداً درباره‌ی آن توضیح داده می‌شود، به میزان قابل توجهی تعداد تصادم‌های بین بسته‌ها را کاهش می‌دهد تاخیرهای زیاد شبکه در رسیدن بسته به ایستگاه پایه را نیز کاهش می‌دهد. دلیل کاهش این تاخیرها این است که گره‌هایی که کانال را اشغال می‌یابند، دقیقاً می‌دانند که کانال در چه زمانی آزاد خواهد شد. در حالیکه در مدل nonpersistent CSMA گره‌ها پس از اینکه کانال را اشغال یافتند، یک زمان تصادفی صبر می‌کنند و بعد از این زمان دوباره به کانال گوش می‌کنند تا ببینند که آیا آزاد شده است یا نه و این امر سبب طولانی‌تر شدن فاز راه‌اندازی در هر دور از پروتکل می‌گردد و سربار بیشتری را به شبکه اعمال می‌کند (مطلوب برای ما این است که طول فاز راه‌اندازی حداقل شود تا طول آن نسبت به طول فاز حالت پایدار قابل صرفه نظر باشد).

مشکل ایستگاه مخفی در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. گره‌ی C در حال ارسال به گره‌ی B است ولی اگر A کانال را بررسی و شنود کند هیچ چیزی نمی‌شنود و به غلط نتیجه می‌گیرد که می‌تواند ارسالش را برای B آغاز کند و در نتیجه B بسته‌هایی را دریافت می‌کند که دچار تصادم شده‌اند.

^{۱۱۲} Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

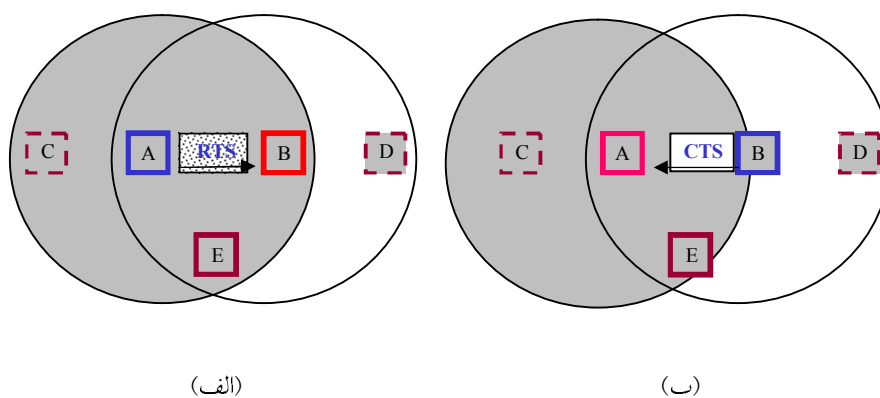
^{۱۱۳} Hidden Terminal Problem



شکل ۳-۱۴ مشکل ایستگاه مخفی.

مشکل ایستگاه مخفی که در شبکه‌های بی‌سیم مسبب تعداد زیادی از تصادم‌هاست، هنگامیکه چندین گره می‌خواهند بسته‌ی خود را به مقصد مشترکی که در میان آن‌ها قرار دارد بفرستند، بیشتر خود را نشان می‌دهد. در نتیجه، در فاز راه‌اندازی پروتکل LEACH و به ویژه در بخش دوم یعنی هنگام ارسال پیام‌های Join-REQ توسط گره‌ها به CH برگزیده شده توسط آن‌ها، تصادم‌های زیادی را به دلیل مشکل ایستگاه مخفی خواهیم داشت. لذا در پروتکل DBS برای این بخش، از یک پروتکل نوع CSMA/CA به نام MACA^{۱۱۴} [Karn_90] استفاده می‌گردد. ایده‌ی اصلی در این روش آنست که فرستنده به نحوی گیرنده را تحریک به ارسال یک بسته‌ی کوتاه برای ایستگاه‌های پیرامون خود کند تا گره‌هایی که در بُرد گیرنده هستند و این بسته‌ی کوتاه را می‌شنوند، از ارسال اطلاعات در خلال زمان دریافت بسته‌ی اصلی، خودداری کنند. این ایده در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است.

¹¹⁴ Multiple Access with Collision Avoidance



شکل ۳-۱۵ پروتکل MACA. الف) A در حال ارسال یک بسته RTS به B. ب) B در حال ارسال بسته CTS به A.

مطابق شکل، گرهی A برای ارسال داده به گرهی B، کارش را با ارسال یک بسته‌ی کوتاه به نام RTS^{۱۱۵} برای گرهی B شروع می‌کند (شکل الف). درون این بسته، طول کل بسته‌ی داده‌ای که قرار است در آینده ارسال گردد مشخص شده است. B در پاسخ، بسته‌ای به نام CTS^{۱۱۶} ارسال می‌نماید. بسته‌ی CTS نیز طول بسته‌ی داده‌ای را که قرار است ارسال شود، مشخص می‌کند (شکل ب). پس از دریافت بسته‌ی CTS، گرهی A می‌تواند ارسال خود را آغاز نماید. در پیوست ۲ جزئیات بیشتری را در مورد بسته‌های RTS و CTS می‌یابید.

در بخش‌های اول و سوم از فاز راه‌اندازی و نیز در بخش دوم از فاز حالت پایدار، با توجه به این که تعداد پیام‌ها زیاد نیست، احتمال رخداد تصادم ناچیز است و نیاز مبرمی به استفاده از پروتکل‌های با اجتناب از تصادم نیست، ولی با این حال به دلیل امکان به وجود آمدن مشکل ایستگاه پنهان، در DBS برای این بخش‌ها نیز از CSMA/CA استفاده شده است. لازم به ذکر است که در بخش اول از فاز حالت پایدار، به این دلیل که گره‌های هر خوشه از کد توزیعی خاص

^{۱۱۵} Ready to Send

^{۱۱۶} Clear to Send

خودشان استفاده می‌کنند و روش TDMA برای ارسال داده‌هایشان به CH به کار گرفته می‌شود،

تصادمی رخ نمی‌دهد و لذا در پروتکل DBS نیز همین روش را به کار برده‌ایم.

جدول ۳-۳، پروتکل‌های MAC استفاده شده در DBS را به همراه تعداد بسته‌های رد و

بدل شده در هر بخش، به صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۳-۳ پروتکل‌های MAC استفاده شده و تعداد بسته‌های ارسال شده در DBS.

Phase	Task / # of Packets	MAC Protocol	Collisions
Set-up	CH nodes broadcast ADV message. / $3k_{opt}$	MACA	Yes (Not probable)
	Nodes notify their preferable CH with a Join-REQ message. / $3(N - k_{opt})$	MACA	Yes (Not probable)
	CH nodes transmit TDMA schedule to cluster members. / $3k_{opt}$	MACA	Yes (Not probable)
Steady-State (one frame only)	Nodes send their data to the CH during their allocated time slot. / $N - k_{opt}$	Different spreading code for each cluster TDMA for cluster members	No
	CH nodes transmit the aggregated data to the base station. / $3k_{opt}$	DSSS but all CHs use the same spreading code and MACA	Yes (Not probable)

لازم به ذکر است با اینکه مطابق جدول ۳-۱ که تعداد بسته‌های رد و بدل شده در DBS

دو برابر بیشتر از LEACH می‌باشد، طول بسته‌های کنترلی اضافه شده (RTS و CTS) نسبت به

طول بسته‌های ADV و Join-REQ ناچیز می‌باشد و هزینه‌ای که در LEACH برای ارسال‌های

مجدد به دلیل وقوع تصادم، پرداخت می‌شود، بسیار بیشتر است.

۳-۵ نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای پروتکل پیشنهادی

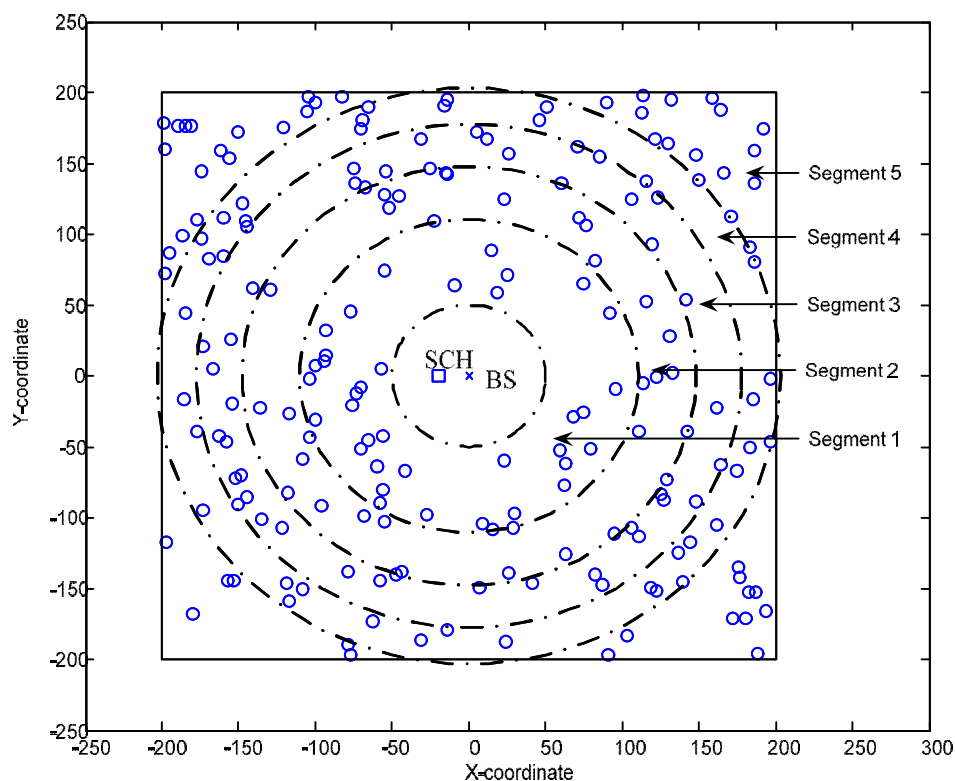
در این بخش کارایی پروتکل DBS مورد ارزیابی قرار گرفته است. یک نرم افزار شبیه‌ساز

در محیط MATLAB برای شبیه‌سازی پروتکل‌های LEACH و DBS و بررسی کارایی آن‌ها

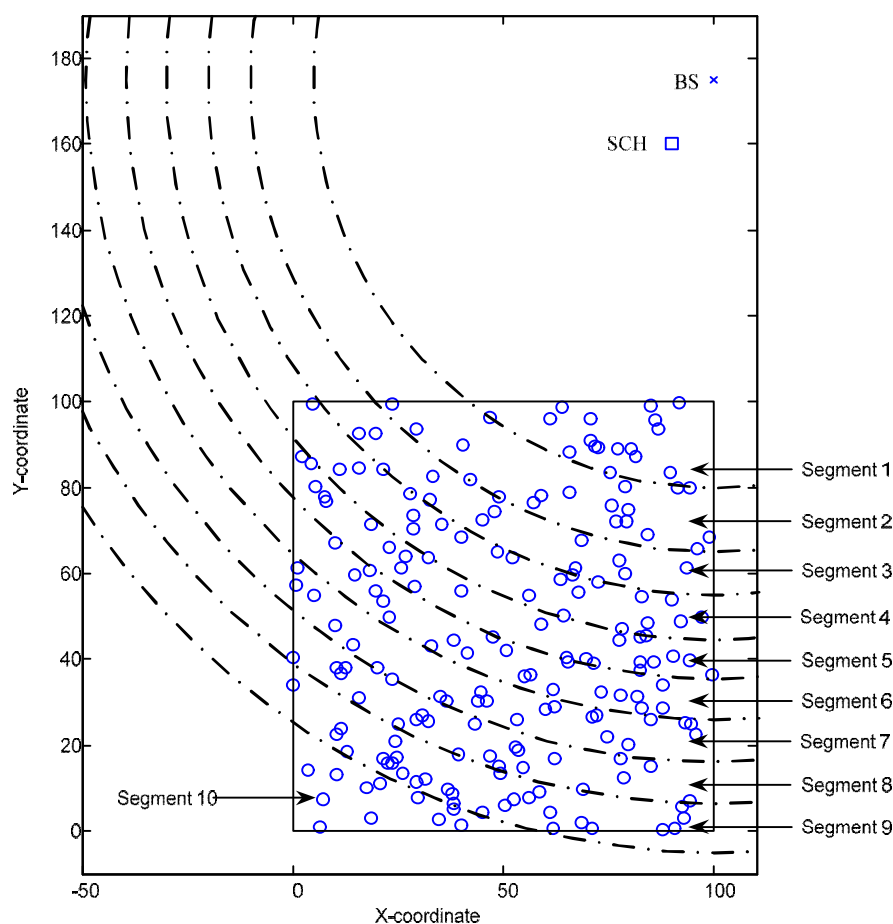
پیاده‌سازی شده است که کد این شبیه‌ساز در پیوست ۳ موجود می‌باشد.

شش دسته‌ی صدتایی از شبیه‌سازی‌ها طی دو آزمایش بر روی دو شبکه‌ی حسگر بی‌سیم با

پیکربندی‌های مختلف انجام شده است (شکل‌های ۳-۱۵ و ۳-۱۶ را ملاحظه کنید).



شکل ۳-۱۵ یک شبکه‌ی حسگر شامل پنج حلقه که ۲۰۰ گره در آن به صورت تصادفی در میدان توزیع شده‌اند و ایستگاه پایه در مرکز میدان گره‌های حسگر قرار داده شده است. SCH نشان دهنده‌ی سرپرست خوشه‌ی یدکی می‌باشد. مختصات بر حسب متر است.



شکل ۳-۱۶: یک شبکه‌ی حسگر شامل پنج حلقه که ۲۰۰ گره در آن به صورت تصادفی در میدان توزیع شده‌اند و ایستگاه پایه خارج از میدان حسگرها قرار داده شده است. SCH نشان دهنده‌ی سرپرست خوشه‌ی یدکی می‌باشد. مختصات بر حسب متر است.

دو دسته از شبیه‌سازی‌ها مربوط به LEACH و چهار دسته‌ی دیگر مربوط به DBS با دو مقدار مختلف برای تعداد حلقه‌ها بوده است. دو شبکه‌ی حسگر مورد آزمایش که به ترتیب در شکل ۳-۱۵ و شکل ۳-۱۶ نشان داده شده‌اند، هر یک شامل ۲۰۰ گره می‌باشد که در شبکه‌ی اول، همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، ایستگاه پایه در مرکز گره‌های حسگر قرار داده شده و در شبکه دوم، خارج از میدان گره‌های حسگر قرار داده شده است. شبکه‌ی شکل ۳-۱۵ در شبیه‌سازی‌های آزمایش اول مورد استفاده قرار گرفته و در شبیه‌سازی‌های آزمایش دوم، شبکه‌ی شکل ۳-۱۶ به کار

رفته است. نقل و انتقالات داده‌ها در این آزمایش‌ها بر اساس مدل معرفی شده در شکل ۳-۷

شبیه‌سازی شده‌اند. پارامترهای شبیه‌سازی که در هر آزمایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول

۳-۴ موجود می‌باشند.

جدول ۳-۴ پارامترهای شبکه‌های استفاده شده در شبیه‌سازی‌های آزمایش اول و دوم.

پارامترها	آزمایش اول (ایستگاه پایه داخل شبکه است، شکل ۳-۱۵)	آزمایش دوم (ایستگاه پایه داخل شبکه است، شکل ۳-۱۶)
محدوده‌ی شبکه	(-200,-200) to (200,200)	(0,0) to (100,100)
N	200	200
d_0	87.7 m	87.7 m
موقعیت ایستگاه پایه	(0,0)	(100,175)
E_{elec}	50 nJ/bit	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²	10 pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴	0.0013 pJ/bit/m ⁴
P_{LEACH}	0.08	0.04
ماکزیمم تعداد حلقه‌ها	5	10
تعداد فریم‌های زمانی در هر دور	1	1
طول هر فریم زمانی	20 s	20 s
E_{DA}	5 nJ/bit/signal	5 nJ/bit/signal
انرژی اولیه‌ی هر گره	0.5 J	0.5 J
δp	0.02 for 2-segment and 0.01 for 5-segment DBS	0.02 for 2-segment and 0.005 for 10-segment DBS
اندازه‌ی بسته	500 bytes	500 bytes

آزمایش اول: در آزمایش اول تعداد ۱۰۰ شبیه‌سازی برای هر یک از پروتکل‌های LEACH

و DBS (با دو حلقه و با پنج حلقه) روی شبکه‌ی شکل ۳-۱۵ انجام شده است. در این شبکه M (ضلع مربعی که شبکه در آن واقع است) برابر با ۴۰۰ متر است و فاصله‌ی گره‌های شبکه تا ایستگاه پایه به صورت $50\text{ m} < d_{toBS} < 282.8\text{ m}$ می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی مربوط به تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها (بخش ۳-۲-۵) و مقادیر موجود در جدول ۳-۴ یک حد بالا و یک حد پایین برای تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها یافت می‌شود:

$$k_{opt} = \frac{\sqrt{200}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{10}{0.0013(50\text{ m} < d_{toBS} < 282.8\text{ m})^2}} \frac{400}{\Rightarrow}$$

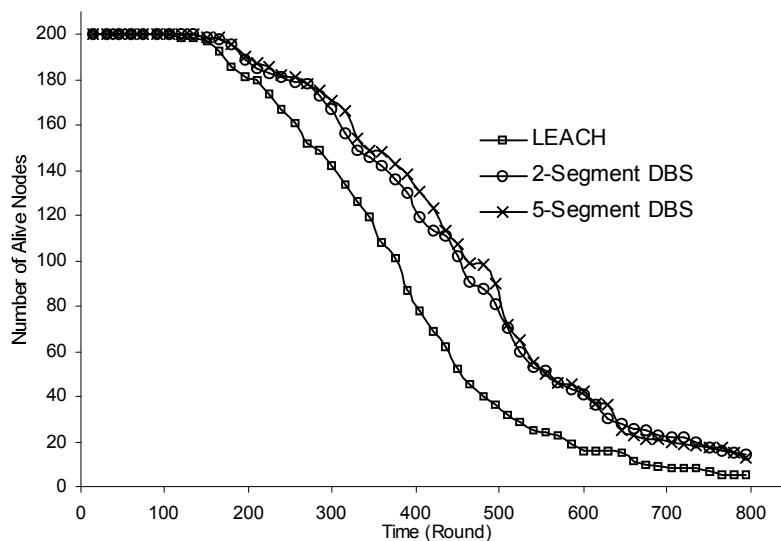
$$3 < k_{opt} < 79.$$

(۳-۱۹)

با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده به ازای مقادیر مختلف k_{opt} در بازه‌ی فوق و در نظر گرفتن میانگین انرژی مصرفی در هر دور و تعداد بسته‌های دریافت شده توسط ایستگاه پایه در واحد زمان، در این آزمایش مقدار k_{opt} برابر با ۱۶ منظور می‌شود (۸٪ گره‌ها در هر دور به عنوان CH عمل می‌کنند).

شکل ۳-۱۷ تعداد گره‌هایی را که در طول زمان شبیه‌سازی LEACH و DBS (با دو حلقه و با پنج حلقه) - که این زمان برابر با ۸۰۰ دور بوده است - زنده مانده‌اند، نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، گره‌ها در پروتکل DBS نسبت به LEACH عمر بیشتری کرده‌اند. به طور شهودی واضح است که هر چه تعداد حلقه‌های شبکه را افزایش دهیم، کارایی شبکه از نظر مصرف انرژی افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه CHها نیز با افزایش تعداد حلقه‌ها به طور منصفانه‌تری در

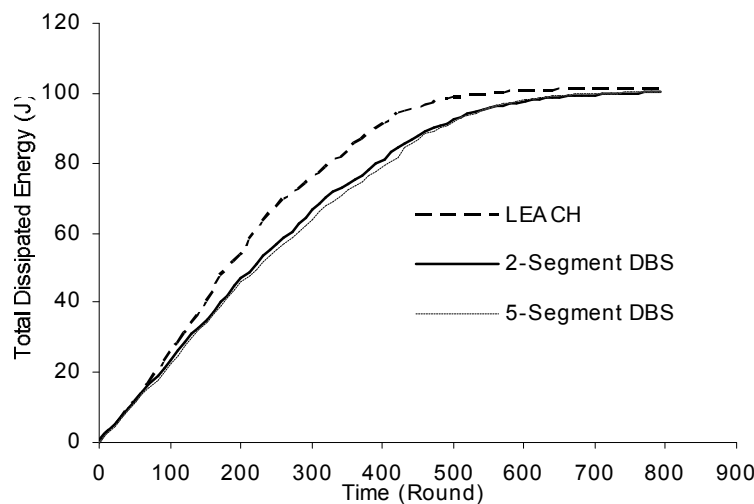
شبکه توزیع می‌گردند، با توزیع عادلانه‌تر بار انرژی، طول عمر گره‌های شبکه زیاد می‌شود. اما در عین حال با افزایش تعداد حلقه‌ها، پیچیدگی کار شبکه (توزیع احتمالات، نیاز به تقریب دقیق تر از فاصله گره تا ایستگاه پایه و ...) افزایش می‌یابد. بنابراین در اینجا به این دلیل که افزایش بیشتر تعداد حلقه‌ها به مقداری بیش از پنج، طول عمر شبکه را به میزان قابل توجهی افزایش نمی‌دهد، تعداد حلقه‌ها را بیش از این افزایش نداده‌ایم. لازم به توضیح است که تمام نمودارهای زیر که برای مقایسه‌ی DBS با LEACH به کار رفته‌اند، نتیجه‌ی حاصل از گرفتن میانگین روی ۱۰۰ شبیه‌سازی انجام شده برای هر یک از پروتکل‌ها هستند.



شکل ۳-۱۷ طول عمر سیستم با اجرای پروتکل‌های LEACH، DBS با دو حلقه و DBS با پنج حلقه (آزمایش اول).

شکل ۳-۱۸ مقدار کل انرژی مصرفی در شبکه را نسبت به زمان نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها درمی‌یابیم که با استفاده از پروتکل DBS تا مقدار ۱۶٪ صرفه‌جویی در انرژی مصرف شده توسط شبکه امکان‌پذیر است. قابل توجه است که نمودار انرژی مصرفی شبکه در

برای تمام پروتکل‌ها در نهایت به سمت 100 J میل می‌کند. زیرا شبکه ۲۰۰ گره دارد و هر یک از آن‌ها دارای انرژی اولیه‌ی 0.5 J می‌باشند. این کاهش انرژی کل مصرف شده در شبکه، همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، مربوط به کم شدن قابل توجه انتقال‌های زاید (شکل ۳-۱۳) در DBS نسبت به LEACH است.



شکل ۳-۱۸ انرژی مصرفی سیستم با اجرای پروتکل‌های LEACH، DBS با دو حلقه و DBS با پنج حلقه (آزمایش اول).

در یکی از نامه‌های اخیر IEEE [Chen_05] در زمینه‌ی شبکه‌های حسگر بی‌سیم نوشته شده که طول عمر شبکه، مدت زمان بین استقرار شبکه تا لحظه ایست که از آن لحظه به بعد شبکه بی‌مصرف^{۱۱۷} به حساب می‌آید و این بی‌مصرف به حساب آمدن شبکه کاملاً وابسته به کاربرد شبکه می‌باشد. برای مثال می‌تواند هنگامی باشد که اولین گره‌ی حسگر می‌میرد، هنگامی باشد که درصدی از گره‌ها مرده‌اند و یا هنگامی باشد که شبکه به علت مرگ گره‌های نزدیک به هم تفکیک

¹¹⁷ Nonfunctional

می‌گردد و یا مساله‌ی عدم پوشش لازم^{۱۱۸} پیش می‌آید. در این نامه سعی شده است که یک فرمول عمومی برای طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدست آید که مستقل از مدل شبکه‌ی مورد نظر، این فرمول برقرار باشد و در آن مواردی چون معماری شبکه و پروتکل‌ها، چگونگی جمع‌آوری داده‌ها، محوشدگی^{۱۱۹} کانال ارتباطی، تعریف طول عمر شبکه و مدل مصرف انرژی، همگی در نظر گرفته شده باشند. ما در اینجا تعاریف ساده‌ی طول عمر را در نظر می‌گیریم [Handy_02] و فرض می‌کنیم که طول عمر یک شبکه‌ی حسگر (یا ریزحسگر) بی‌سیم با نوع سرویسی که این شبکه ارائه می‌دهد مرتبط است. در بعضی موارد لازم است که تمام گره‌های حسگر تا حد امکان زنده بمانند، چون کیفیت شبکه با مرگ اولین گره به شدت کاهش پیدا می‌کند که از این گونه موارد می‌توان کاربردهای کشف آتش و تشخیص اجسام در محیط را نام برد. معیار مرگ اولین گره (FND^{۱۲۰}) مشخص کننده‌ی زمان مرگ اولین گره در شبکه حسگر می‌باشد. در بعضی کاربردها حسگرها در نزدیکی یکدیگر قرار داده می‌شوند. بنابراین گره‌های همسایه داده‌های همبسته و یا حتی یکسانی را تولید می‌کنند. در نتیجه، مرگ یک یا چند گره کیفیت خدمات شبکه را چندان کاهش نمی‌دهد. در این موارد معیار زنده بودن نصف گره‌ها (HNA^{۱۲۱}) معیار خوبی برای تخمین عمر مفید شبکه می‌باشد. از این گونه موارد می‌توان کاربردهای تعیین شتاب^{۱۲۲} و تعیین میزان تغییر شکل یک جسم (Strain) را نام برد که در این کاربردها با داشتن تعداد زیاد گره‌های حسگر، عملاً نیازی به زنده بودن تمام گره‌ها نیست.

¹¹⁸ Loss of Coverage

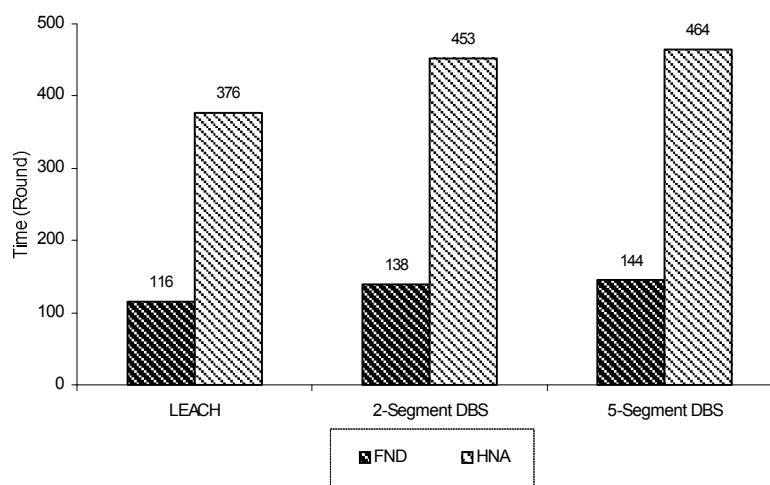
¹¹⁹ Fading

¹²⁰ First Node Dies

¹²¹ Half of the Nodes Alive

¹²² Acceleration

برای مقایسه‌ی دقیق طول عمر مفید شبکه، معیارهای معرفی شده در [Handy_02] را در نظر گرفته‌ایم. معیار دیگر به نام ^{123}LND در پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی مانند LEACH و DBS مطلوب نیست چون برای اجرای این پروتکل‌ها حداقل به چند گره نیاز داریم. بنابراین، برای مقایسه‌ی دقیق LEACH و DBS از نظر طول عمر شبکه دو معیار FND و HNA را در نظر گرفته‌ایم. شکل ۱۹-۳ نتیجه‌ی این مقایسه را نشان می‌دهد.

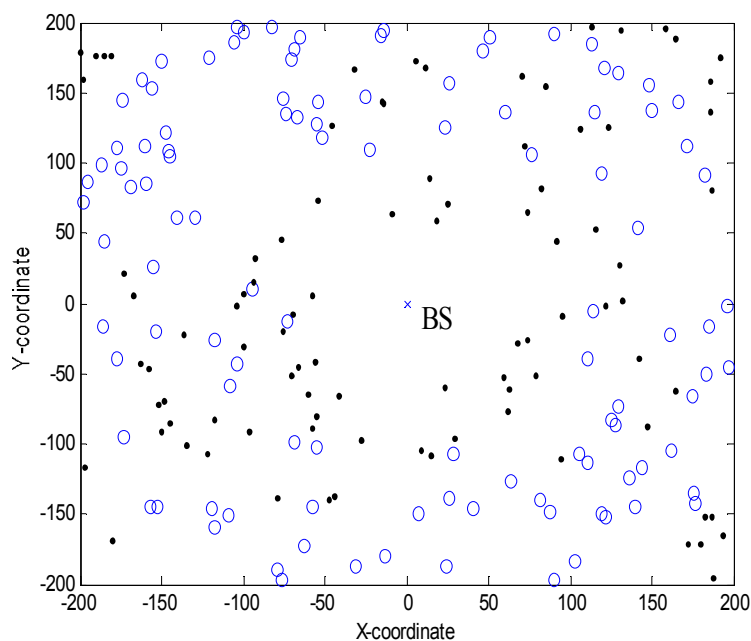


شکل ۱۹-۳ مقایسه‌ی طول عمر شبکه با استفاده از معیارهای FND و HNA بین پروتکل‌های LEACH، DBS با دو حلقه و DBS با پنج حلقه (آزمایش اول).

همان‌طور که در شکل ۱۹-۳ ملاحظه می‌کنید، استفاده از DBS طول عمر مفید شبکه را ۲۴٪ برای FND و بیش از ۲۳٪ برای HNA بهبود می‌دهد. علت این بهبود در این است که اولاً انرژی کل مصرفی در شبکه کاهش یافته و ثانیاً بار انرژی با توزیع مناسب‌تر CHها در سطح شبکه به طرز یکنواخت‌تری میان گره‌های حسگر پخش شده است.

¹²³ Last Node Dies

شکل ۳-۲۰ که نتیجه‌ی یکی از ۱۰۰ شبیه‌سازی انجام شده در آزمایش اول است، گره‌های زنده و مرده را در شبکه‌ی شکل ۳-۱۵ پس از گذشت ۴۰۰ دور از کارکرد شبکه با بکارگیری پروتکل DBS نشان می‌دهد. پس از گذشت ۴۰۰ دور از کارکرد شبکه تعداد ۹۵ گره مرده‌اند، از مقایسه‌ی این شکل با شکل ۳-۱۲ در می‌یابیم که علاوه بر اینکه تعداد گره‌های مرده در DBS نسبت به LEACH کاهش یافته‌اند، گره‌های شبکه در DBS برخلاف LEACH به طرز پراکنده‌تری مرده‌اند و مانند LEACH نواحی کاملاً مرده در مکان‌های دور نسبت به ایستگاه پایه، پدید نیامده است. این شکل نشان می‌دهد که سیاست‌های خوشه‌بندی در DBS نسبت به LEACH مناسب‌تر هستند.



شکل ۳-۲۰ شبکه‌ی حسگر بی‌سیم پس از ۴۰۰ دور اجرای پروتکل DBS. گره‌های زنده با دایره‌های توخالی مشخص هستند و گره‌های مرده با نقطه‌های پررنگ مشخص‌اند (آزمایش اول). مختصات بر حسب متر است.

همچنین، شبیه‌سازی‌های گسترده در این آزمایش نشان می‌دهند که تعداد تصادم‌ها در بخش دوم از فاز راه‌اندازی پروتکل LEACH - تقریباً تمامی تصادم‌ها در این بخش روی می‌دهند - که منشا اکثر آن‌ها مشکل ایستگاه مخفی است، با بکارگیری روش‌های اجتناب از تصادم در DBS به نصف رسیده است. این تعداد به طور میانگین در هر دور از LEACH برابر با ۴۱ تصادم بوده است که در پروتکل پیشنهادی به ۲۲ تصادم کاهش یافته است. لازم به ذکر است که تعدادی از تصادم‌های رخ داده در DBS مربوط به ارسال همزمان بسته‌های RTS بوده است که با توجه به طول کوتاه این بسته‌ها نسبت به سایر بسته‌های کنترلی (مثل بسته ADV)، این تعداد خیلی زیاد نیست.

آزمایش دوم: در آزمایش دوم نیز تعداد ۱۰۰ شبیه‌سازی برای هر یک از پروتکل‌های LEACH و DBS (با دو حلقه و با پنج حلقه) روی شبکه‌ی شکل ۳-۱۶ انجام شده است. در این شبکه M (ضلع مربعی که شبکه در آن واقع است) برابر با ۱۰۰ متر است و فاصله‌ی گره‌های شبکه تا ایستگاه پایه به صورت $75 \text{ m} < d_{toBS} < 201.5 \text{ m}$ می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی مربوط به تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها (بخش ۳-۲-۵) و مقادیر موجود در جدول ۳-۴ یک حد بالا و یک حد پایین برای تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها یافت می‌شود:

$$k_{opt} = \frac{\sqrt{200}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{10}{0.0013}} \frac{100}{(75 \text{ m} < d_{toBS} < 201.5 \text{ m})^2} \Rightarrow$$

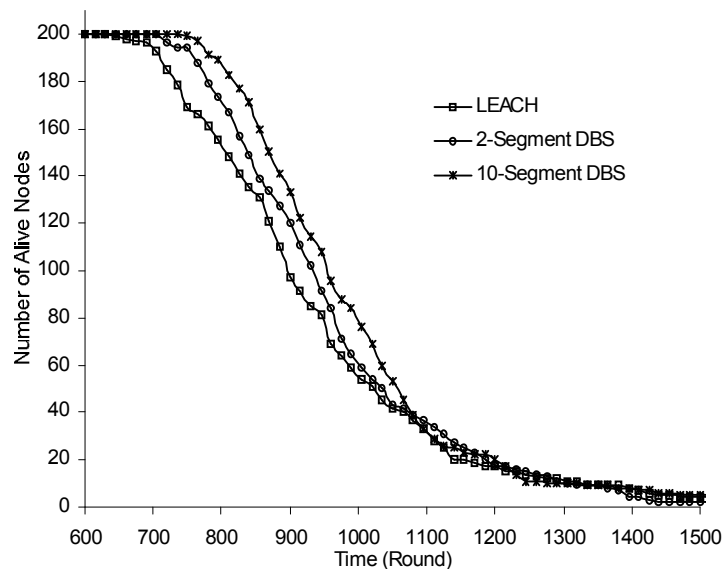
$$2 < k_{opt} < 9$$

(۳-۲۰)

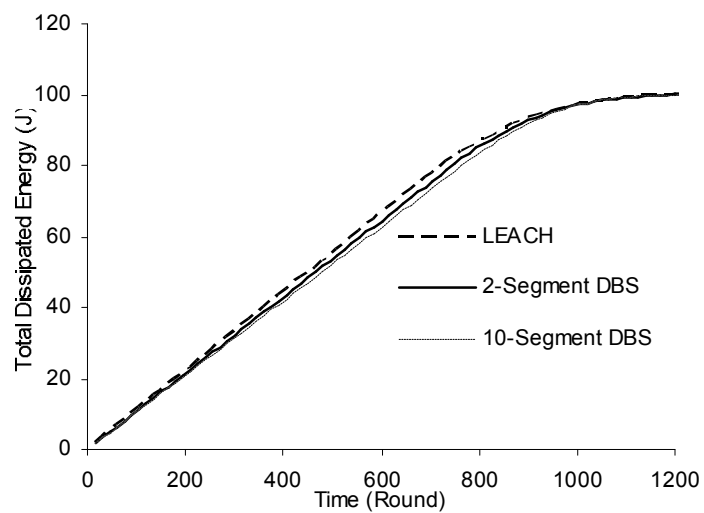
با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده به ازای مقادیر مختلف k_{opt} در بازه‌ی فوق و در نظر گرفتن میانگین انرژی مصرفی در هر دور و تعداد بسته‌های دریافت شده توسط ایستگاه پایه در زمان، در این آزمایش مقدار k_{opt} برابر با ۸ در نظر گرفته می‌شود (۴٪ گره‌ها در هر دور به عنوان CH عمل می‌کنند).

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مشابه آزمایش اول، برای زمان برابر با ۱۵۰۰ دور در شکل‌های ۳-۲۱، ۳-۲۲ و ۳-۲۳ به نمایش درآمده‌اند. این بار استفاده از DBS، تا مقدار ۷٪ صرفه‌جویی در کل انرژی مصرفی را به همراه داشته است و طول عمر مفید شبکه را ۱۵٪ برای FND و حدود ۷٪ برای HNA بهبود داده است.

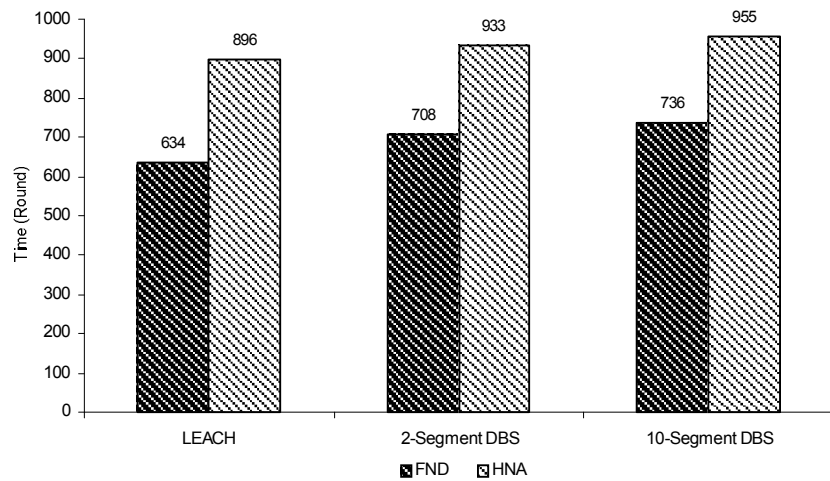
در این آزمایش نیز تعداد تصادم‌های رخ داده در بخش تصادم‌خیز LEACH (بخش دوم از فاز راه‌اندازی) به مقدار قابل توجهی در پروتکل DBS کاهش یافته است.



شکل ۳-۲۱ طول عمر سیستم با اجرای پروتکل‌های LEACH، DBS با دو حلقه و DBS با ده حلقه (آزمایش دوم).



شکل ۳-۲۲ انرژی مصرفی سیستم با اجرای پروتکل‌های LEACH، DBS با دو حلقه و DBS با ده حلقه (آزمایش دوم).



شکل ۳-۲۳ مقایسه‌ی طول عمر شبکه با استفاده از معیارهای FND و HNA بین پروتکل‌های LEACH، DBS با دو حلقه و DBS با ده حلقه (آزمایش دوم).

فصل ۴

۴ جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و کارهای آتی

۴-۱ جمع‌بندی

در این روش جدید، مشکلات یک پروتکل معروف و پرکاربرد در تحقیقات به نام LEACH را برطرف کرده‌ایم؛ تفاوت بسیار زیاد بین سطح انرژی گره‌های دور و گره‌های نزدیک (نسبت به ایستگاه پایه) با تقسیم میدان شبکه به چند حلقه و اعمال کردن احتمال‌های مختلف برای سرپرست خوشه شدن به گره‌های هر حلقه، خنثی شده است. در ضمن، با این کار، تعداد انتقالات زاید در شبکه را نیز کاهش داده‌ایم. در نتیجه، در پروتکل پیشنهادی، با توزیع بار یکنواختی از انرژی بر روی گره‌ها و جلوگیری از ایجاد زودهنگام نواحی مرده و در عین حال، کم کردن انرژی کل مصرفی شبکه، طول عمر مفید شبکه را به میزان قابل توجهی افزایش داده‌ایم.

علاوه بر این، پروتکل ما انتقال داده‌ها را به ایستگاه پایه، هنگامیکه در یک دور از اجرای پروتکل، شبکه فاقد سرپرست خوشه (CH) باشد، تضمین می‌کند. لازم به ذکر است که این مشکل در پروتکل LEACH وجود داشت و نادیده گرفته می‌شد. در نهایت، قابلیت اطمینان و تاخیر

ارتباطات شبکه نیز در پروتکل پیشنهادی بهبود یافته‌اند. این کار با به کار بردن روش‌های دسترسی چندگانه با اجتناب از تصادم (CSMA/CA) در پروتکل زیر لایه‌ی نظارت بر دسترسی به رسانه‌ی انتقال (MAC)، انجام شده است که نه تنها تعداد تصادم‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه تاخیر شبکه را نیز با کوتاه‌تر کردن فاز راه‌اندازی نسبت به LEACH، کم می‌کند.

۴-۲ نتیجه‌گیری و کارهای آتی

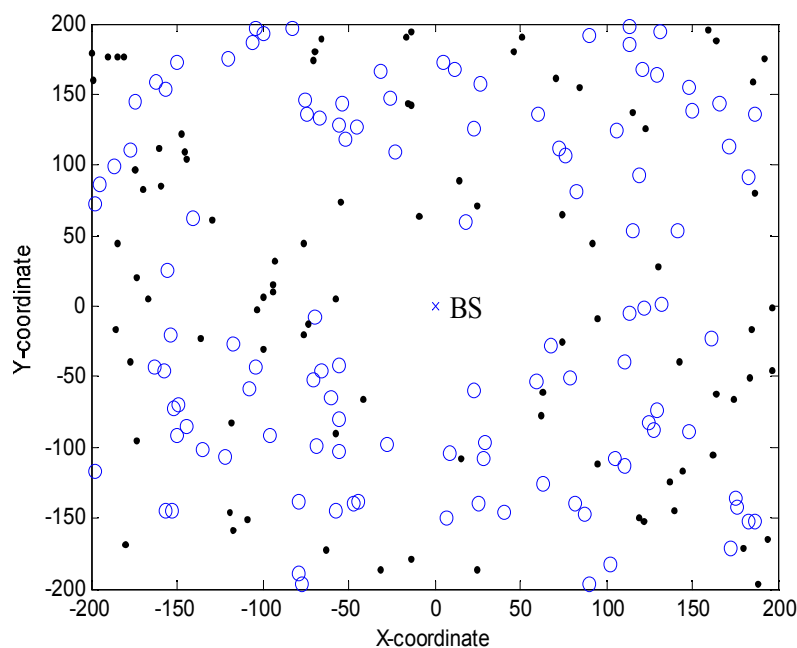
در این پروژه، یک پروتکل ارتباطی برای شبکه‌های حسگر (ریزحسگر) بی‌سیم به نام Distance-Based Segmentation (DBS) معرفی شده است که اساس آن، خوشه‌بندی تطبیقی حسگرهای شبکه بر مبنای فاصله‌ی آن‌ها از ایستگاه پایه می‌باشد. در این پروتکل، گره‌های حسگر شبکه به طور یکنواخت‌تری نسبت به پروتکل‌های پیشین انرژی مصرف می‌کنند و در نتیجه، افت کیفیت خدمات شبکه با زمان نسبت به پروتکل‌های پیشین قابل قبول‌تر خواهد بود. همچنین، پروتکل DBS با افزودن مکانیزمی برای پروتکل‌های کنترل بر دسترسی به لایه‌ی انتقال (MAC)، با کم کردن تعداد تصادم‌ها، ارتباطاتی مطمئن و با تاخیر کم را بین گره‌های شبکه تضمین می‌کند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پروژه تایید می‌کنند که از نظر انرژی کل مصرفی، طول عمر مفید شبکه و قابلیت اطمینان، پروتکل DBS، پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی پیشین را شکست می‌دهد.

در پروتکل ارائه شده، فرض شده است که حسگرهای شبکه، حسگرهایی با نرخ تولید داده‌ی بالا مانند حسگر شتاب، حسگر تغییر شکل و حسگر لرزش می‌باشند. به گونه‌ای که گره‌های حسگر همیشه داده برای ارسال به ایستگاه پایه داشته باشند. این پروتکل می‌تواند به گونه‌ای تغییر داده شود که حسگرها به جای ارسال پی‌درپی داده‌ها، تنها پس از مشاهده‌ی یک رویداد مهم اقدام

به ارسال داده کنند. با این کار می‌توانیم تا حد زیادی در مصرف انرژی صرفه‌جویی کنیم. همچنین، پشتیبانی از گره‌های متحرک نیز از نیازهای یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم می‌باشد که باید در آینده به امکانات پروتکل ارائه شده، افزوده شود. از مهمترین مزایای الگوریتم DBS این است که حسگرها تقریباً باهم می‌میرند و طول عمر شبکه با استفاده از ایده‌ی خوشه‌بندی دینامیک (که از LEACH بدست آمده)، افزایش یافته است. اما همین شکل‌گیری خوشه‌ها در ابتدای هر دور باعث تلف شدن انرژی می‌شود که از معایب این پروتکل به شمار می‌رود. DBS همانند LEACH در جاهایی که حسگرها بصورت فشرده در کنار هم قرار گرفته‌اند عملکرد بهتری دارد.

برای کمینه کردن سربار زمانی، فرض شده است که فاز حالت پایدار (طول یک فریم زمانی در شبیه‌سازی‌ها) نسبت به طول فاز راه‌اندازی بزرگ است. نتایج پروتکل پیشنهادی با محاسبه‌ی دقیق تعداد بهینه‌ی فریم‌های زمانی در هر دور بهبود می‌یابد.

پروتکل DBS باز هم قابل پیشرفت است. برای مثال با اعمال کردن سطوح مختلف از انرژی اولیه بر اساس فاصله‌ی گره‌ها از ایستگاه پایه (اختصاص انرژی اولیه‌ی بیشتر به گره‌های دور تر)، می‌توانیم اختلاف بین سطح انرژی گره‌های دور و گره‌های نزدیک را کاملاً خنثی کنیم و در نتیجه طول عمر شبکه را به حداکثر برسانیم و به طور همزمان از به وجود آمدن نواحی مرده جلوگیری کنیم. شکل ۳-۲۴ نمونه‌ای از نتیجه‌ی اجرای این روش را بر روی شبکه‌ی شکل ۳-۱۵، پس از گذشت ۴۰۰ دور از کارکرد شبکه با بکارگیری پروتکل DBS با اعمال انرژی‌های اولیه‌ی متفاوت به حلقه‌ها، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌کنید که در این حالت، نسبت به شکل ۳-۲۰ گره‌های مرده شبکه به طرز یکنواخت‌تری در سرتاسر شبکه پراکنده‌اند.



شکل ۳-۲ شبکه‌ی حسگر بی‌سیم پس از ۴۰۰ دور اجرای پروتکل DBS. در این شبکه، گره‌ها بر اساس فاصله تا ایستگاه پایه انرژی اولیه‌ی متفاوتی دارند. گره‌های زنده با دایره‌های توخالی مشخص هستند و گره‌های مرده با نقطه‌های پررنگ مشخص اند. مختصات بر حسب متر است.

در DBS فرض کردیم که CHها به طور مستقیم با ایستگاه پایه ارتباط برقرار می‌کنند و بسته‌ی ترکیب شده را خودشان برای ایستگاه پایه می‌فرستند. در آینده، ایده‌ی استفاده از مسیریابی چندگامی برای انتقال داده از CH به ایستگاه پایه را داریم که این کار به صرفه‌جویی در انرژی کل مصرفی توسط شبکه و مقیاس‌پذیری بیشتر پروتکل DBS کمک می‌کند. مهم‌ترین مشکلی که در روش‌های چندگامی با آن مواجه می‌شویم، مربوط به اختلاف زیاد در حجم ترافیک داده‌ای است که به گره‌های مختلف شبکه بر اساس موقعیت فیزیکی آنها در شبکه اعمال می‌شود، برای حل این مشکل به هر گره‌ی CH یک احتمال به طور دینامیک و بر اساس چند فاکتور از قبیل سطح انرژی جاری آن گره‌ی CH اختصاص می‌یابد، که معین می‌کند که آیا این گره‌ی CH باید مستقیماً داده‌ی

خوشه‌ی خودش (یا داده‌ی دریافت شده از CH مربوط به خوشه‌ی دیگر) را به ایستگاه پایه بفرستد یا باید گره‌ی CH دیگری را برای این کار انتخاب می‌کند.

برای رسیدن به اهداف مذکور نیاز به طراحی مجدد نرم افزار شبیه‌ساز پیاده‌سازی شده در این پروژه داریم تا ویژگی‌هایی چون پشتیبانی از مسیریابی چندگامی، گره‌های متحرک و طول متغیر برای فاز حالت پایدار را به آن بیفزاییم.

مراجع

۵ مراجع

A:

- [Agarwal_99] Agarwal P. and C. Procopiuc, "Exact and Approximation Algorithms for Clustering", *Proc. of the 9th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Baltimore, USA, Jan. 1999, pp. 658–667.
- [Akyildiz_02] Akyildiz I. F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci., "Wireless sensor networks: a survey", *Journal of Computer Networks*, Vol. 38, March 2002, pp. 393-422.
- [Al-Karaki_04] Al-Karaki J. N. and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Journal of Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, Dec. 2004, pp. 6–28.
- [Amini_07a] Amini N., S. G. Miremadi and M. Fazeli, "A Hierarchical Routing Protocol for Energy Load Balancing in Wireless Sensor Networks", *Proc. of the 20th IEEE Annual Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vancouver, Canada, Apr. 2007, pp. 1086–1089.
- [Amini_07b] Amini N., M. Fazeli, S. G. Miremadi and M. T. Manzuri, "Distance-Based Segmentation: An Energy-Efficient Clustering Hierarchy for Wireless Microsensor Networks", *Proc. of the 5th Annual Conference on Communication Networks and Services Research (CNSR 2007)*, Fredericton, Canada, May 2007, pp. 18-25.

B:

- [Balatin_04] Batalin M. A., G. S. Shukhatme and M. Hattig, "Mobile Robot Navigation Using a Sensor Network", *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 2004, pp. 636-642.

C:

- [Calhoun_05] Calhoun B. H., D.C. Daly, N. Verma, D.F. Finchelstein, D.D. Wentzloff, A. Wang, S. Cho and A.P. Chandrakasan, "Design Considerations for Ultra-Low

Energy Wireless Microsensor Nodes”, *IEEE Transactions on Computers*, vol. 54, no. 6, Jun. 2005, pp. 727-740.

[Chehri_07] Chehri A., P. Fortier and P. M. Tardif, “Security Monitoring Using Wireless Sensor Networks”, *Proc. of the 5th Annual Conference on Communication Networks and Services Research (CNSR 2007)*, Fredericton, Canada, May 2007, pp. 13-17.

[Chen_02] Chen B., K. Jamieson, H. Balakrishnan and R. Morris, “Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks”, *ACM Wireless Networks Journal*, vol. 8, no. 5, Sep. 2002, pp. 481-494.

[Chen_05] Chen Y. and Q. Zhao, “On the Lifetime of Wireless Sensor Networks”, *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 11, Nov. 2005, pp. 976-978.

D:

[Deng_05] Deng J., Y. Han, W. B. Heinzelman and P. Varshney, “Scheduling Sleeping Nodes in High Density Cluster-based Sensor Networks”, *ACM/Kluwer MONET Special Issue on Energy Constraints and Lifetime Performance in Wireless Sensor Networks*, vol. 10, no. 6, Dec. 2005, pp. 825-835.

G:

[Gupta_03] Gupta G. and M. Younis, “Load-Balanced Clustering in Wireless Sensor Networks”, *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*, Anchorage, USA, May 2003.

[Ganesan_02] Ganesan D., R. Govindan, S. Shenker and D. Estrin, “Highly Resilient, Energy Efficient Multipath Routing in wireless Sensor Networks”, *ACM Mobile Computing and Communications Review*, vol. 1, no. 2, 2002, pp. 11-25.

H:

[Handy_02] Handy M. J., M. Haase and D. Timmermann, “Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection”, *Proc. of 4th IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks*, Stockholm, Sweden, 2002, pp. 368-372.

[Hedetniemi_88] Hedetniemi S., A. Liestman, “A survey of gossiping and broadcasting in communication networks”, *IEEE Networks*, vol. 18, no. 2, 1988, pp. 319-349.

[Heinzelman_00] Heinzelman W. R., A. P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, *Proc. of the 33rd IEEE International Conference on System Sciences*, Honolulu, USA, Jan. 2000, pp. 1-10.

[Heinzelman_02a] Heinzelman W. R., A. P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, “An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, Oct. 2002, pp. 660-670.

[Heinzelman_02b] Heinzelman W. R., J. Kulik, H. Balakrishnan, “Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks”, *Proc. of the ACM MobiCom '99*, Seattle, USA, 1999, pp. 174-185.

[Hu_93] Hu L., “Distributed code assignments for CDMA packet radio networks”, *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, Dec. 1993, pp. 668-677.

I:

[Intanagonwiwat_00] Intanagonwiwat C., R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks", *Proc. of the ACM MobiCom '00*, Boston, USA, 2000, pp. 56–67.

J:

[Jafari_05] Jafari R, A. Encarnacao, A. Zahoory, F. Dabiri, H. Noshadi, M. Sarrafzadeh, "Wireless Sensor Networks For Health Monitoring", *Proc. of The Second ACM/IEEE International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, San Diego, USA, Jul. 2005, pp. 479-481.

K:

[Karn_90] Karn P., "MACA - A New Channel Access Method for Packet Radio", *Proc. of the 9th ARRL Computer Networking Conference*, London, Canada, Sep. 1990, pp. 134–140.

[Karp_00] Karp B. and H. T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless sensor networks", *Proc. of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*, Boston, USA, August 2000, pp. 6-28.

[Katz_99] Katz R. H., J. M. Kahn and K. S. J. Pister, "Mobile Networking for Smart Dust", *Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, Seattle, USA, Aug. 1999, pp. 350-355.

[Khadiwi_05] Khadiwi A., M. Shiva and N. Yazdani, "EPMPAC: an efficient power management protocol with adaptive clustering for wireless sensor networks", *Proc. of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, Sept. 2005, pp. 1154-1157.

[Khadiwi_06] Khadiwi A. and M. Shiva, "FTPASC: A Fault Tolerant Power Aware Protocol with Static Clustering for Wireless Sensor Networks", *Proc. of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, Montreal, Canada, Jun. 2006, pp. 397-401.

[Krishana_02a] Krishnamachari B., D. Estrin and S. Wicker, "The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks", *Proc. of the International Workshop of Distributed Event Based Systems (DEBS)*, Vienna, Austria, Jul. 2002, pp. 575-578.

[Krishana_02b] Krishnamachari B., D. Estrin, S. Wicker, "Modeling Data Centric Routing in Wireless Sensor Networks", *Proc. of the IEEE INFOCOM*, New York, USA, Jun. 2002.

L:

[Lindsey_02] Lindsey S. and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power Efficient GAttering in Sensor Information Systems," *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA, March 2002, pp. 1125-1130.

M:

[Manjeshwar_01] Manjeshwar A. and D. P. Agarwal, "TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks", *Proc. of the IEEE IPDPS*, San Francisco, USA, Apr. 2001, pp 23-26.

[Manjeshwar_02] Manjeshwar A. and D. P. Agarwal, "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor

Networks,” *Proc. of the IEEE IPDPS*, Fort Lauderdale, USA, Apr. 2002, pp. 195-202.

[Min_01] Min R., M. Bhardwaj, S. Cho, E. Shih, A. Sinha, A. Wang, and A. Chandrakasan, “Low Power Wireless Sensor Networks”, *Proc. of International Conference on VLSI Design*, Bangalore, India, Jan. 2001, pp. 205-210.

[Murata_94] Murata T. and H. Ishibuchi, “Performance evaluation of genetic algorithms for flowshop scheduling problems”, *Proc. of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Orlando, USA, Jun. 94, vol. 2, pp. 812–817.

P:

[Perillo] Perillo M., Z. Cheng, and W. B. Heinzelman, “On the Problem of Unbalanced Load Distribution in Wireless Sensor Networks”, *Proc. of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2004) Workshop on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, Dallas, USA, Nov. 2004, pp. 74-79.

R:

[Rabaey_00] Rabaey J. M., M. J. Ammer, J. L. da Silva, D. Patel and S. Roundry, “PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking”, *IEEE Computer Magazine*, Vol. 33, Jul. 2000, pp. 42-48.

[Rappaport_96] Rappaport T., *Wireless Communications: Principles & Practice*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.

[Rossi_07] Rossi M. and M. Zorzi, “Integrated Cost-Based MAC and Routing Techniques for Hop Count Forwarding in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 6, no. 4, Apr. 2007, pp: 434-448.

S:

[Sarrafzadeh_06] Sarrafzadeh M., F. Dabiri, R. Jafari, T. Massey and A. Nahapetian, “Low Power Light-weight Embedded Systems (Tutorial)”, *Proc. of the International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED'06)*, Tegernsee, Germany, Oct. 2006, pp. 207-212.

[Schurgers_01] Schurgers C. and M. B. Srivastava, “Energy efficient routing in wireless sensor networks”, *Proc. of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, McLean, USA, 2001, pp. 357-361.

[Shah_02] Shah R. and J. Rabaey, “Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks”, *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, USA, March 2002, pp. 17-21.

[Shi_07] Shi X. and G. Stromberg, “SyncWUF: An Ultra Low-Power MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 6, Jan. 2007, pp. 115-125.

[Shu_05] Shu T., M. Krunz and S. Vruthula, “Power Balanced Coverage-Time Optimization for Clustered Wireless Sensor Networks”, *Proc. of the 6th ACM international Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Urbana-Champaign, USA, May 2005, pp. 111-120.

[Slijepcevic_01] Slijepcevic S. and M. Potkonjak, “Power Efficient Organization of Wireless Sensor Networks”, *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*, Helsinki, Finland, Jun. 2001, pp. 472–476.

[Sohrabi_99] Sohrabi K., B. Manriquez and G. Pottie, “Near-ground wideband channel measurements”, *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference*, New York, USA, 1999, pp. 571-574.

[Sravan_07] Sravan A., S. Kundu and A. Pal, "Low Power Sensor Node for a Wireless Sensor Network", *Proc. of the 20th International Conference on VLSI Design*, Bangalore, India, Jan. 2007, pp. 445-450.

[Subramanian_00] Subramanian L. and R. H. Katz, "An Architecture for Building Self Configurable Systems", *Proc. of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Boston, USA, Aug. 2000, pp. 63-73.

T:

[Tilak_02] Tilak S., N. B. Abu-Ghazaleh and W. B. Heinzelman, "A Taxonomy of Wireless Microsensor Network Models", *ACM Mobile Computing and Communications Review*, Apr. 2002, pp. 28-36.

[Tanenbaum_02] Tanenbaum A. S., *Computer Networks*, 4th ed. Prentice Hall, 2002.

[Tanenbaum_06] Tanenbaum A. S., C. Gamage and B. Crispo, "Taking Sensor Networks from the Lab to the Jungle", *IEEE Computer Magazine*, vol. 39, no. 8, Aug. 2006, pp. 98-100.

Y:

[Ye_02] Ye W., J. Heidemann and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *Proc. of the IEEE INFOCOM 2002*, New York, USA, Jun. 2002, pp. 1567-1576.

[Yu_01] Yu Y., D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks", *UCLA Computer Science Department Technical Report*, May 2001, UCLA-CSD TR-01-0023.

Z:

[Zhao_06] Zhao J. and A. T. Erdogan, "A Novel Self-Organizing Hybrid Network Protocol for Wireless Sensor Networks", *Proc. of the First NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS 2006)*, Istanbul, Turkey, Jun. 2006, pp. 412-419.