

ارائه یک پروتکل MAC چندکاناله‌ی ناهمگام و انرژی‌کارا برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم

غلامحسین اکباتانی‌فرد^۱، رضا منصفی^۲

^۱گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان
ekbatanifard@stu-mail.um.ac.ir

^۲گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
monsefi@um.ac.ir

چکیده

همگام‌سازی گره‌ها جهت خواب و بیداری، سربار انجام این‌کار و همچنین تصادم فریم‌ها و مصرف انرژی جهت ارسال(های) مجدد از جمله چالش‌هایی است که در لایه دسترسی به رسانه (MAC) شبکه‌های حسگر بی‌سیم مطرح است. در این مقاله ما روشی وفقی و ناهمگام، مبتنی بر استفاده از چند فرکانس در لایه MAC را برای صرفه‌جویی در انرژی و افزایش گذردهی شبکه حسگر پیشنهاد کرده‌ایم. این روش با تاکید بر کاربردهای جمع‌آوری داده از گره‌های حسگر پخش شده در محیط بنا نهاده شده‌است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی باعث کاهش مصرف انرژی گره‌ها و افزایش طول عمر شبکه خواهد شد همچنین گذردهی شبکه را نیز افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی

شبکه حسگر بی‌سیم، لایه دسترسی به رسانه (MAC)، چندکاناله، Quorum تورس توسعه یافته، همگام‌سازی

۱- مقدمه

ناهمگام زمان خواب بیداری گره‌ها و همچنین ملاقات گره‌ها با یکدیگر، جهت تبادل داده، را تنظیم می‌کند. همچنین در پروتکل پیشنهادی، چند کانال را برای ارسال و دریافت فریم‌ها در لایه MAC مورد استفاده قرار داده‌ایم که این نوع به کارگیری از چندکانال باعث کاهش تصادم شده و همچنین ارسال‌های همزمان را در حوزه تصادم گره‌ها میسر می‌سازد. که این امر باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش گذردهی شبکه خواهد شد. و همچنین در پروتکل پیشنهادی، گره‌ها با استفاده از تطبیق وفقی بازه‌های بیداری خود با توجه به بار ترافیکی باعث انعطاف پذیری پروتکل در شرایط مختلف می‌شود.

۲- کارهای مرتبط انجام شده

MC-LMAC [2] یک پروتکل MAC تک‌راديو-چندکاناله مبتنی بر زمانبندی را ارائه کرده است. در فاز ابتدایی، گره‌ها طبق یک ساختار درختی با والد خود همگام می‌شوند و در حین کار شبکه نیز هرگاه اختلافی در زمانبندی گره‌ها پیش آید عملیات زمانبندی مجدداً انجام می‌شود. لذا با افزایش گره‌های شبکه سربار پیام‌های کنترلی باعث کاهش

شبکه‌های حسگر بی‌سیم [1] کاربردهای بسیار متنوعی دارند. حوزه‌های کاربرد این شبکه‌ها را می‌توان، از جمله در زمینه کاربردهای نظامی، صنعتی، پزشکی و سلامت، کنترل ترافیک شهری و غیره نام برد. پروتکل‌های طراحی شده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم بسیار وابسته به نوع کاربردی است که شبکه برای آن ایجاد شده است. اما با این وجود یکی از چالش‌های جدی که این نوع شبکه‌ها، در بسیاری از کاربردها، با آن روبرو هستند چگونگی افزایش طول عمر شبکه است که به واسطه محدودیت انرژی گره‌های حسگر بروز می‌کند. عوامل متعددی در هدر رفتن انرژی گره‌ها نقش دارند، مانند تصادم فریم‌ها و در نتیجه انتقال مجددشان، *Overhearing*، *Overemmitting*، *Idle-Listening*، سربار پروتکل‌های طراحی شده.

لایه MAC یکی از لایه‌های پشت‌پشته‌ی پروتکل است که طراحی درست آن می‌تواند باعث مصرف انرژی کمتر و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه شود. در این مقاله ما پروتکلی برای لایه MAC پیشنهاد می‌کنیم که با استفاده از سیستم Quorum تورس توسعه یافته به صورت وفقی و

- (۱) زمان به برهه‌های زمانی مساوی تقسیم شده است.
- (۲) همه گره‌های حسگر از نظر زمانی همگام هستند.
- (۳) همه گره‌های حسگر دارای شعاع رادیویی ارسال یکسان (r) هستند.
- (۴) گره‌های شبکه دارای حرکت نیستند.
- (۵) گره‌های حسگر به صورت یکنواخت در محیط پخش شده‌اند.
- (۶) شبکه به منظور جمع‌آوری اطلاعات ایجاد شده است.
- (۷) جهت ارسال داده‌های پخش، در صورت نیاز، از سمت سینک است.

۳-۱-۱- *Quorum* تورس توسعه یافته

سیستم‌های *Quorum* به طور گسترده در سیستم‌های توزیع شده برای مقابله با مشکل انحصار متقابل، و همچنین برای طراحی پروتکل *MAC* برای شبکه‌های بی‌سیم [۵، ۸-۱۳]، مورد استفاده قرار گرفته است. یک سیستم *Quorum* به صورت زیر تعریف می‌شود.

تعریف: با داشتن یک مجموعه جهانی $U = \{s_0, s_1, \dots, s_{n-1}\}$ ، یک سیستم *Quorum* به نام Q تحت عبارت است از مجموعه‌ای از زیر مجموعه‌های U که خاصیت اشتراکی زیر را برآورده نماید:

$$\forall A, B \in Q : A \cap B \neq \emptyset$$

سیستم‌های *Quorum* متعددی هم‌چون سیستم *Quorum* مبتنی بر درخت، مبتنی بر اکثریت، چرخه‌ای، مشبک^۲، تورس و امثال آن وجود دارد. ما بدون از دست دادن کلیت موضوع، از سیستم *Quorum* تورس توسعه یافته برای ارائه پروتکل *MAC* چندکاناله خود استفاده می‌کنیم، زیرا قابلیت انعطاف خوبی دارد. *Quorum* تورس توسعه یافته، مبتنی بر آرایه‌ای به ابعاد $t \times w$ است و مجموعه‌ی جهانی هم برای آن برابر است با $U = \{0, \dots, t \times w - 1\}$. قبل از تعریف *Quorum* تورس توسعه یافته دو تعریف زیر را ذکر می‌کنیم.

تعریف نیم‌قطر راست: در یک آرایه $t \times w$ نیم قطر راست شامل عنصر است که از نقطه $[x, y]$ در آرایه آغاز می‌شود، به نحوی که $0 \leq x < t$ و $0 \leq y < w$ است، و $[w/2]$ عناصر موجود در خانه‌های $[(x+i) \bmod t, (y+i) \bmod w]$ را که $i = 1..[w/2]$ است شامل می‌شود.

تعریف نیم‌قطر چپ: در یک آرایه $t \times w$ نیم قطر چپ شامل $[w/2]$ عنصر است که از نقطه $[x, y]$ در آرایه آغاز می‌شود، به نحوی که $0 \leq x < t$ و $0 \leq y < w$ است، و $[w/2] - 1$ عناصر موجود در خانه‌های $[(x+i) \bmod t, (y-i) \bmod w]$ را که $i = 1..[w/2] - 1$ است شامل می‌شود.

کارایی شبکه خواهد شد. *Rainbow* [3] نیز پروتکلی است مبتنی بر درخت که به منظور جمع‌آوری داده پیشنهاد شده است. در این پروتکل از تکنیک *TDMA* محلی و $FHSS^1$ برای کاهش تصادم، افزایش گذردهی و اجتناب از تداخل امواج استفاده شده‌است. از معایب این پروتکل اولاً، سربار زیاد ارسال پیام‌های کنترلی مختلف برای تخصیص کانال و ایجاد درخت است، و دوم اینکه گره‌ها مجبور هستند که در هر سوپرفریم فرکانس خود را تعویض کنند، چه تداخل وجود داشته باشد و چه وجود نداشته باشد، که این عمل باعث افزایش تاخیر و افزایش سربار پروتکل می‌شود. *CMAC* [4] پروتکلی است چندکاناله، ناهمگام که از دو رادیو استفاده می‌کند. یکی همیشه روشن است و برای بیدارسازی گره‌ها استفاده می‌شود و رادیوی دیگر برای دریافت و ارسال داده‌ها به صورت ناهمگام استفاده می‌شود.

اگر چه *CMAC* نیازی به همگام‌سازی ندارد ولی از یک رادیوی اضافه استفاده می‌کند که این باعث می‌شود که هزینه گره افزایش یابد و در کل هزینه نصب و راه‌اندازی شبکه زیاد شود، همچنین استفاده از یک رادیوی اضافه، خود باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود. در [5] یک پروتکل *MAC* تک کاناله با استفاده از *Quorum* مشبک، پیشنهاد شده است. اگرچه این پروتکل با افزایش زمان خواب گره‌ها سعی در افزایش طول عمر شبکه دارد ولی چون صرفاً از یک کانال استفاده می‌کند در ترافیک‌های بالا باعث افزایش تصادم و ارسال مجدد فریم‌ها و در نتیجه افزایش مصرف انرژی شبکه می‌گردد.

الگوریتم‌های *MAC* دیگری که از مزیت استفاده از چند کانال برخوردارند مانند *MMSN* [6] و *TMCP* [7] در مقالات ارائه شده‌اند اما اکثر آنها نیاز به همگام‌سازی گره‌ها دارند و یا اینکه مانند *TMCP* چون فرکانس‌های ثابتی را به گره‌ها تخصیص می‌دهند باعث بروز مشکلاتی همچون «گیرنده غایب» شده، همچنین عمل تجمیع را ناممکن می‌سازد. لذا عدم وجود پروتکلی مناسب برای لایه *MAC* شبکه‌های حسگر ما را بر آن داشت که پروتکلی طراحی کنیم که بتواند به صورت ناهمگام و با سربار کنترلی حداقل، با بهره‌گیری از چند کانال، کارایی مطلوب را فراهم سازد.

در ادامه این مقاله در بخش ۲ پروتکل پیشنهادی آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش ۳ بیان می‌شود و نهایتاً در بخش ۴ نتیجه آورده شده است.

۳- پروتکل پیشنهادی

در این مقاله ما مفروضات زیر را برای پروتکل پیشنهادی در نظر گرفته‌ایم.

یک سیستم *Quorum* تورس توسعه یافته با هسته k در حقیقت $t + k \times \lfloor \frac{w}{2} \rfloor$ عنصر از یک آرایه به ابعاد $t \times w$ را انتخاب می‌کند. لذا اگر بخواهیم برای زمان‌بندی بیدار شدن گره‌های حسگر از سیستم *Quorum* تورس توسعه یافته با هسته k و ابعاد $t \times w$ استفاده کنیم آنگاه هر گره حسگر نیاز است که $t + k \times \lfloor \frac{w}{2} \rfloor$ برهه زمانی بیدار شده و رسانه را بررسی کند. در استفاده از سیستم *Quorum* برای هماهنگی بین گره‌های حسگر، دو نوع بازه تعریف می‌شود. بازه *Quorum* و بازه غیر *Quorum*.

بازه *Quorum*: بازه‌ای است که در آن گره حسگر بیدار شده و رسانه‌ی انتقال را برای تبادل داده بررسی می‌کند. (مانند بازه‌های زمانی شماره ۲، ۸، ۹، ۱۴، ۱۶، ۱۹، ۲۰، ۲۳، ۲۴ و ۲۶ در شکل ۲) بازه غیر *Quorum*: در این بازه گره حسگر در حالت خواب به سر می‌برد. (مانند، بازه‌های شماره ۰، ۱، ۳، ۴، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ در شکل ۲) دیگر از شکل ۲)

و اما نسبت فعال بودن (*Active Ratio*) که در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نسبتی است که یک گره حسگر باید رادیوی خود را روشن نگه دارد، و برابر است با نسبت بازه‌های *Quorum* به اندازه مجموعه جهانی انتخاب شده ($t \times w = n$). برای *Quorum* تورس توسعه یافته نسبت فعال بودن برابر رابطه زیر خواهد بود:

$$AR(k) = \frac{t + w \lfloor \frac{k}{2} \rfloor + j \lfloor \frac{(w-1)}{2} \rfloor}{t \times w} \quad (1)$$

به طوری که $j=0$ اگر k زوج باشد و در غیر این صورت $j=1$ است.

۳-۲- مدل شبکه حسگر

در این مقاله، فرض می‌کنیم که گره‌ی سینک در یک گوشه از محیط انتخاب شده قرار گرفته است و گره‌ها در داخل محیط پخش شده‌اند. آنگاه گره‌های داخل شبکه را بر حسب فاصله آن‌ها تا سینک، در واقع تعداد جهش لازم برای رسیدن به سینک، به گروه‌هایی دسته‌بندی می‌کنیم، مانند شکل ۴. این کار به آسانی با ارسال یک پیام اعلان-پرش توسط گره سینک در فاز آغازین شبکه قابل انجام است به نحوی که سینک بسته‌ای را با مقدار اعلان پرش ۱ به صورت پخش‌ی به شبکه ارسال می‌کند، گره‌هایی که با یک جهش از سینک در دسترس هستند این بسته را دریافت کرده و فاصله خود تا سینک را می‌فهمند، آنگاه عدد موجود در بسته را یکی افزوده و مجدداً به صورت پخش‌ی ارسال می‌کنند. و این عمل تکرار می‌شود تا هر گره تعداد جهش‌های مورد نیاز برای دسترسی به سینک را متوجه شود. در این میان اگر گره‌ای که تعداد

0	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23

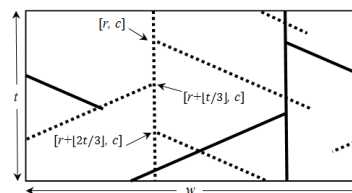
شکل (۱): نمونه‌هایی از نیم‌قطر در یک آرایه 4×6 . نیم قطر راست به رنگ خاکستری تیره است و از خانه $[0, 2]$ آغاز شده و نیم‌قطر سمت چپ که با رنگ خاکستری روشن نشان داده شده و از خانه $[2, 2]$ شروع شده است

تعریف *Quorum* تورس توسعه یافته با هسته k ($e\text{-torus}(k)$): این سیستم برای هر عدد صحیح k که $0 < k \leq t$ است، با انتخاب مکان-تصادفی $[r, c]$ که $0 \leq r < t$ و $0 \leq c < w$ است، شکل می‌گیرد. به نحوی که *Quorum* شامل تمام عناصر ستون c بعلاوه k تا نیم قطر است. که این نیم قطرهای یکی در میان نیم‌قطر راست و چپ هستند و از نقطه آغازین $[r + \lfloor i \times \frac{t}{k} \rfloor, c]$ ، $i = 0..k-1$ شروع می‌شوند. در واقع *Quorum* تورس توسعه یافته با هسته k شبیه یک درخت کاج می‌شود که دارای یک تنه و k شاخه است. به عنوان نمونه در شکل ۲ یک *Quorum* تورس توسعه یافته 5×6 با هسته $k=2$ نشان داده شده است که نقطه انتخابی $[r, c] = [0, 2]$ در نظر گرفته شده است.

0	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29

شکل (۲): یک *Quorum* تورس توسعه یافته 5×6 با هسته $k=2$ و $[r, c] = [0, 2]$

در شکل ۳ چگونگی تقاطع دو *Quorum* تورس توسعه یافته با هسته‌های $k=2$ و $k=3$ در یک سیستم *Quorum* به ابعاد $t \times w$ نشان داده شده است. همچنین مختصاتی که در آن نیم‌قطرهای یکی از *Quorum*‌ها از آنجا آغاز می‌شود نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود دو *Quorum* یکدیگر را حداقل در ۳ و حداکثر در ۵ نقطه ملاقات می‌کنند، حداقل در سه نقطه که محل تقاطع شاخه‌های درخت با تنه‌ی درخت دیگر است، و حداکثر در ۵ نقطه، چون خود شاخه‌ها نیز بسته به انتخاب محل $[r, c]$ ممکن است یکدیگر را قطع کنند.



شکل (۳): فصل مشترک بین *Quorum* تورس توسعه یافته با هسته $k=2$ با یک *Quorum* تورس توسعه یافته با هسته $k=3$

کمتر است می‌توانند سیستم *Quorum* ی با هسته‌ی k کوچک را انتخاب کنند.

قضیه: اگر گره حسگر a که در دسته i ام است بخواهد داده‌ای را برای دسته‌ی $i-1$ ارسال کند، آنگاه احتمال (p) اینکه در زمان بیدار شدن گره حسگر a ، حداقل یکی از n_a گره‌ی حسگر موجود در حوزه رادیویی‌اش در دسته $i-1$ بیدار باشند برابر است با $p = 1 - (t \times w - AR(k_{i-1}))^{n_a}$ که k_{i-1} هسته‌ی k بی هسته‌ی $i-1$ برای *Quorum* توریس توسعه یافته خود برگزیده‌است.

اثبات: احتمال اینکه یکی از گره‌های حسگر موجود در دسته $i-1$ بیدار باشند، طبق رابطه (۱) برابر است با $AR(k_{i-1})$. لذا احتمال خواب بودن یک گره در این دسته برابر خواهد بود با $t \times w - AR(k_{i-1})$. حال احتمال اینکه n_a گره حسگر موجود در دسته $i-1$ که در حوزه رادیویی گره‌ی a قرار دارند همگی خواب باشند برابر خواهد بود با $(t \times w - AR(k_{i-1}))^{n_a}$. پس در نتیجه احتمال اینکه حداقل یکی از این گره‌ها بیدار باشد مساوی است با $1 - (t \times w - AR(k_{i-1}))^{n_a}$.

طبق قضیه فوق مشخص می‌شود که هرچه n_a و یا هسته k عدد بزرگتری باشد در آن صورت احتمال بیدار بودن یک نود در دسته $i-1$ و متعاقب آن احتمال ملاقات و ارسال اطلاعات گره‌سنگر به دسته بعدی بیشتر خواهد بود.

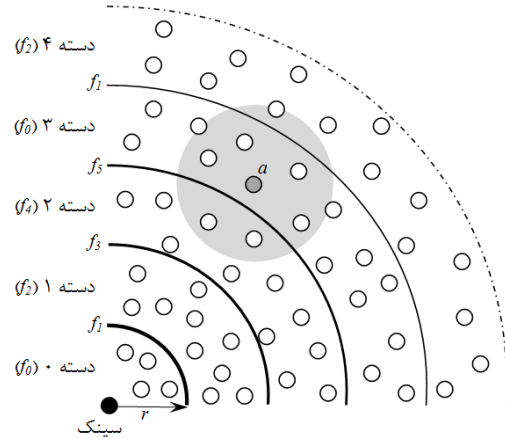
۳-۳- نحوه‌ی تبادل اطلاعات در پروتکل پیشنهادی

در این قسمت چگونگی ارسال و دریافت داده در شبکه حسگر را، با توجه به مدل پیشنهادی که برای شبکه در قسمت قبل بررسی کردیم، ارائه می‌کنیم. در زیر مراحل کار شبکه به تفکیک آورده شده است:

۱. گره شروع به کار می‌کند (روشن می‌شود) و فاز آغازین انجام می‌پذیرد (فاز تشخیص لیستی از فرکانس‌های آزاد (بدون تداخل) محیط، دسته‌بندی نودها بر حسب تعداد جهش تا سینک و تخصیص فرکانس به آن‌ها) به طوری که: $(1-1)$ به گره‌های دسته i فرکانس $f(2i \bmod 6)$ برای ارسال داده داخل دسته i استفاده می‌شود. $(2-1)$ برای تبادل اطلاعات بین دسته i و دسته $i+1$ فرکانس $f((2i+1) \bmod 6)$ تخصیص داده می‌شود.

۲. اگر گره‌ای در دسته‌ی i در زمان *Quorum* خود بیدار شد و داده‌ای برای ارسال نداشت، مانند شکل ۵-الف، ابتدا به فرکانس دسته خود گوش می‌دهد، اگر داده‌ی پخشی برای دریافت بود آن را می‌پذیرد، در غیر این صورت به فرکانس $f((2i+1) \bmod 6)$ سوئیچ می‌کند تا داده‌های دسته‌ی $i+1$ را در صورت وجود منتقل کند. اگر *RTS* مبنی بر درخواست ارسال

جهش‌ها را متوجه شده، بسته‌ی اعلان-جهش را بصورت تکراری دریافت کند، آن را نادیده می‌گیرد.



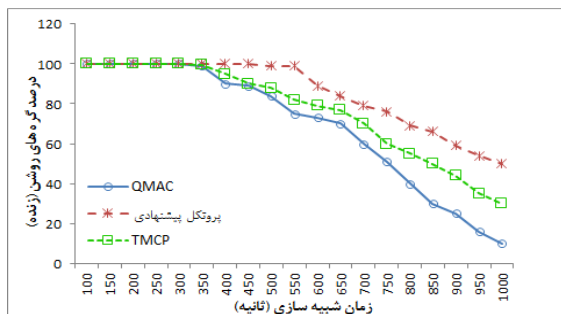
شکل (۴): مدل انتخاب شده برای شبکه حسگر

مساحت دسته صفر (G_0) برابر است با $\frac{1}{4}\pi r^2$ و مساحت دسته‌های دیگر محاسبه می‌شود و به طور کلی برای مساحت دسته G_i داریم $G_i = \frac{(2i+1)}{4}\pi r^2$ و به همین ترتیب برای نرخ مساحت دسته $i+1$ به دسته i ام $G_1/G_0 = 3$ خواهیم داشت $G_{i+1}/G_i = \frac{2i+3}{2i+1}$. و این بدان معناست که یک گره حسگر در دسته i به طور متوسط مسئول انتقال ترافیک $\frac{2i+3}{2i+1}$ گره از دسته $i+1$ است.

حال، اگر فرض کنیم که هر گره برای ارسال گزارش خود نیاز به ارسال x واحد داده داشته باشد، آنگاه به عنوان مثال، یک گره در دسته ۳ (طبق شکل ۴) به جز ارسال x واحد داده خودش، وظیفه ارسال $\frac{9x}{7}$ واحد داده‌ی گره‌های دسته‌ی ۴ را نیز بر عهده دارد، که جمعاً می‌شود $\frac{16x}{7}$. و همین‌طور یک گره دسته ۲ وظیفه ارسال x واحد داده خود و $\frac{16x}{7}$ داده دسته ۳ را برعهده خواهد داشت. لذا (با این فرض که هر گره حسگر در شبکه به طور متوسط x واحد داده برای ارسال یک گزارش خود استفاده می‌کند) به طور کلی می‌توان گفت که در شبکه‌ای که از n دسته گره‌ی حسگر تشکیل شده است، یک گره در دسته i وظیفه ارسال و هدایت F_i واحد داده را طبق رابطه زیر دارد.

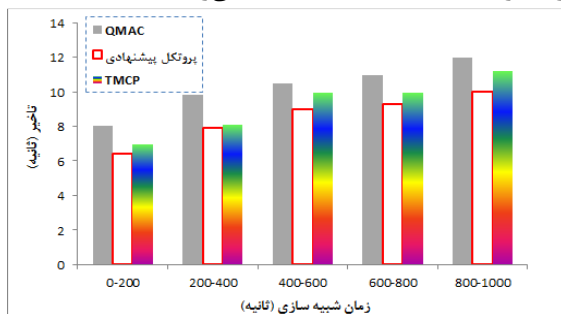
$$F_i = x + \left(\frac{2i+3}{2i+1}\right) F_{i+1}, \quad i = 0, \dots, n, \quad F_{n+1} = 0.$$

در نتیجه گره‌های دسته‌های نزدیک‌تر به سینک که ترافیک آنها بیشتر است، می‌توانند سیستم *Quorum* ی با هسته‌ی k بزرگتر انتخاب کنند و متعاقب آن دسته‌های دورتر از سینک چون ترافیک آنها نسبتاً



شکل (۶): تاثیر پروتکل‌ها بر درصد گره‌های حسگر روشن

شکل ۷ نشان دهنده‌ی میانگین تاخیر انتقال پروتکل‌ها در بازه‌های معین است، چون در پروتکل پیشنهادی از چند فرکانس برای ارسال فریم‌ها به سمت سینک استفاده شده است. لذا فریم‌ها در پروتکل پیشنهادی با تاخیر کمتری نسبت به QMAC به مقصد می‌رسند.



شکل (۷): تاثیر پروتکل‌ها بر روی تاخیر رسیدن فریم‌ها به مقصد

چون در QMAC احتمال برخورد فریم‌ها، به دلیل استفاده از یک فرکانس، بیشتر است و این امر خود ارسال مجدد را باعث شده که رسیدن بسته‌ها تا مقصد را با تاخیر مواجه می‌کند. همچنین چون Quorum توریس توسعه یافته که در پروتکل پیشنهادی استفاده شده است نسبت به Quorum مشبک استفاده شده در QMAC از قابلیت تطبیق بسیار بهتری با تغییرات ترافیک شبکه دارد، این امر نیز خود باعث کاهش تاخیر ترافیک در بارهای مختلف ترافیکی می‌گردد. همچنین چون در پروتکل پیشنهادی هر گره شانس ارسال به بیش از یک گره نزدیک‌تر به سینک را دارد لذا این امر باعث کاهش تاخیر پروتکل پیشنهادی نسبت به TMCP می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم MAC چندکاناله ارائه شده است که به‌واسطه استفاده از Quorum توریس توسعه یافته توانسته است به صورت ناهمگام دسترسی به کانال را فراهم کند و زمان خواب و بیداری گره‌ها در شبکه را مدیریت کند. همچنین مدلی برای شبکه حسگر ارائه و مورد بررسی قرار گرفته و چگونگی تخصیص فرکانس‌ها به گره‌ها جهت تبادل داده

از دسته $i+1$ دریافت نشد، گره به حالت خواب می‌رود، در غیر اینصورت CTS ارسال نموده و شروع می‌کند به دریافت داده.

۳. اگر گره‌ای موجود در دسته i در زمان Quorum خود بیدار شد و داده-ای برای ارسال داشت، مانند شکل ۵-ب، ابتدا به فرکانس دسته خود گوش می‌دهد، اگر داده‌ی پخش‌ی برای دریافت بود آن را می‌پذیرد، در غیر این صورت: ۳-۱) اگر داده باید به سمت سینک ارسال شود، آنگاه به فرکانس $f((2i-1) \bmod 6)$ سوئیچ می‌کند تا داده‌ها را به دسته $i-1$ ارسال کند. ۳-۲) اگر داده باید به صورت پخش‌ی در دسته i یا $i+1$ ارسال شود به فرکانس آن دسته سوئیچ کرده و داده را ارسال می‌کند (شکل ۵-ج).
۴. اگر گره در زمان Quorum خود نباشد، در حالت خواب به سر می‌برد.

$f(2i \bmod 6)$	RCV Broadcast Data		ACK
	R	C	ACK
$f((2i+1) \bmod 6)$	T	T	RCV Data
	S	S	Sleep
$f(2i \bmod 6)$	RCV Broadcast Data		ACK
	R	C	ACK
$f((2i+1) \bmod 6)$	T	T	SND Data
	S	S	ACK
$f(2i \bmod 6)$	RCV Broadcast Data		ACK
	$f(2i \bmod 6)$	SND Broadcast Data	ACK
	$f((2i+2) \bmod 6)$	SND Broadcast Data	ACK

(الف)

(ب)

(ج)

شکل (۵) نحوه عملکرد و تعویض فرکانس‌ها در پروتکل پیشنهادی

۴- شبیه‌سازی و ارزیابی پروتکل

پروتکل MAC پیشنهادی را در شبیه‌ساز Opnet Modeler 14.0، شبیه‌سازی کرده و با پروتکل QMAC [5] و TMCP [7] مورد مقایسه قرار دادیم. در شکل ۶، کارایی پروتکل‌ها را از نظر افزایش طول عمر شبکه باهم مقایسه کرده‌ایم، همان‌طور که از شکل دیده می‌شود پروتکل پیشنهادی باعث افزایش طول عمر شبکه نسبت به پروتکل QMAC و TMCP می‌شود.

دلیل آن این است که در پروتکل QMAC چون تنها از یک فرکانس برای ارسال اطلاعات استفاده می‌کند، لذا تصادم‌های بیشتری رخ می‌دهد و ارسال مجدد فریم‌ها باعث مصرف بیشتر انرژی باتری می‌شود. همچنین در TMCP نیز چون هر گره صرفاً به تنها یک گره والد خود می‌تواند داده‌ها را بفرستد لذا انتظاری که برای آماده شدن گره‌والد برای دریافت می‌کشد باعث مصرف انرژی بیشتر می‌شود.

بیان شده است. در انتها با شبیه‌سازی نشان داده شده است که پروتکل پیشنهادی به نحو مطلوبی باعث افزایش طول عمر شبکه و کاهش تاخیر و نتیجتاً افزایش بهره‌وری شبکه گردیده است.

سیاسگزاری

این اثر با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی به انجام رسیده است.

مراجع

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] O. D. Incel, L. Van Hoesel, P. Jansen, and P. Havinga, "MC-LMAC: A multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 9, pp. 73-94.
- [3] Y. Yang and W. Yi, "Rainbow: Reliable data collecting MAC protocol for wireless sensor networks," *IEEE WCNC2010, Sydney, NSW, 2010*.
- [4] K. R. Chowdhury, N. Nandiraju, P. Chanda, D. P. Agrawal, and Q. A. Zeng, "Channel allocation and medium access control for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 307-321, 2009.
- [5] C. M. Chao and Y. W. Lee, "A quorum-based energy-saving MAC protocol design for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, 2010.
- [6] G. Zhou, Y. Wu, T. Yan, T. He, C. Huang, J. A. Stankovic, and T. F. Abdelzaher, "A multifrequency MAC specially designed for wireless sensor network applications," *Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 9, 2010.
- [7] Y. Wu, J. A. Stankovic, T. He, and S. Lin, "Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks," *IEEE INFOCOM, Phoenix, AZ, 2008*.
- [8] J. R. Jiang, Y. C. Tseng, C. S. Hsu, and T. H. Lai, "Quorum-based asynchronous power-saving protocols for IEEE 802.11 ad hoc networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, pp. 169-181, 2005.
- [9] C. M. Chao, J. P. Sheu, and I. C. Chou, "An adaptive quorum-based energy conserving protocol for IEEE 802.11 ad hoc networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, pp. 560-570, 2006.
- [10] S. M. Chen, S. P. Kuo, and Y. C. Tseng, "A quorum-based mechanism as an enhancement to clock synchronization protocols for IEEE 802.11 MANETs," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, pp. 313-315, 2007.
- [11] J. R. Jiang, "Expected quorum overlap sizes of quorum systems for asynchronous power-saving in mobile ad hoc networks," *Computer Networks*, vol. 52, pp. 3296-3306, 2008.
- [12] C. M. Chao and Y. Z. Wang, "A multiple rendezvous multichannel MAC protocol for underwater sensor networks," *IEEE WCNC2010, Sydney, NSW, 2010*.
- [13] Y. C. Kuo, "Quorum-based power-saving multicast protocols in the asynchronous ad hoc network," *Computer Networks*, vol. 54, pp. 1911-1922, 2010.

¹ Frequency Hopping Spread Spectrum

² Grid