

## الگوریتم $k$ همسایگی

در تکنیک های قبلی، الگوریتم ساخت توپولوژی در مورد گره های همسایه علاوه بر وجودشان به اطلاعات دیگری نیز نیاز داشت، اطلاعاتی مانند موقعیت دقیق دکارتی (موقعیت دو یا سه بعدی) یا مختصات قطبی (فاصله و زاویه). هرچند اطلاعات موقعیت یابی همواره در دسترس نیستند و یا هزینه دستیابی به آنها می تواند بسیار زیاد باشد. برای مثال موقعیت گره هایی که دارای gps هستند تنها در مکان هایی که دسترسی مستقیم به سیگنال ماهواره ای دارند می تواند به دست بیاید. سایر تکنیک های موقعیت یابی مانند فراصوت و یا band based های فوق پهن علاوه بر اینکه نیاز به یک پروتکل موقعیت یابی بر روی پروتکل ساخت توپولوژی دارند، می توانند سربار (overhead) ارتباطی را هم افزایش دهند به دلیل اینکه دامنه آنها در مقایسه با پوشش رادیویی بسیار کوچک است. در خصوص مختصات قطبی استفاده از آنتن های هدایتی قیمت و پیچیدگی وسیله ی بیسیم را افزایش می دهد.

تکنیک های بر پایه همسایگی بر این مشکلات غلبه می کنند. به دلیل اینکه فرض می کنند که گره ها تنها نیاز به داشتن تعداد همسایه ها، تغییر قدرت مخابره آنها و در بعضی مواقع محاسبه فاصله میان گره ها دارند. ایده اصلی این الگوریتم ها ساخت یک توپولوژی به هم پیوسته با اتصال هر گره به کمترین مجموعه لازم از همسایه ها و با کمترین قدرت مخابراتی ممکن است. با دانستن اینکه گره ها اطلاعات موقعیتی دقیق ندارند تصمیمات آنها بیشتر بر اساس احتمال انتخاب همسایه مناسب (همسایه ای که شبکه را بیشترین اندازه گسترش می دهد) است. تحت این فرض که گره ها به صورت یکسان و یا به صورت یواسونی توزیع شده اند، بعضی خصوصیات در توپولوژی های به هم پیوسته یافت شده اند که یک حداقل اندازه کراندار همسایگی های یک گره را که w.h.p می تواند یک توپولوژی به هم پیوسته را تولید کند را تعیین می کنند. در نتیجه اکثر پروتکل های همسایه پایه برای ساخت توپولوژی بر اساس ساخت گراف  $k$ -همسایه (K-neighbor) هستند. یک گراف  $k$ -همسایه به صورت فورمال در معادله 7.8 زیر تعریف شده اند:

$$G_k = (N, E_k), \text{ where } E_k = \{(u, v) \in E, u, v \in V \mid d(u, v) \leq d_k(u)\} \quad (7.8)$$

به گونه ای که  $d_k(u)$  فاصله بین  $k$  امین همسایه نزدیک  $u$  است. به عبارت دیگر هر گره دامنه مخابراتی خود را به گونه ای تطبیق می دهد که ارتباط مستقیم با نزدیکترین  $k$

همسایه هایش داشته باشد. سوال اصلی این روش این است که چگونه  $k$  بهینه انتخاب شود به گونه ای که یک توپولوژی به هم پیوسته را ایجاد کند.

تعریف حداقل تعداد همسایه های  $k$  که هر گره باید داشته باشد تا ارتباط حفظ شود مسئله ای است که به خوبی مطالعه شده است. بیشتر اعدادی که معمولاً برای این پارامتر انتخاب می شوند بین ۶ تا ۸ هستند و یا میانگین ۳ همسایه به گونه ای که در [51, 85, 65] نمایش داده شده است. به وسیله ی آزمایش هایی که در بخش 7.2 نمایش داده شد برای تعیین جز بزرگ و درجه متوسط گره، ما این نتایج عملی زیر را یافتیم:

- برای داشتن یک توپولوژی به هم پیوسته با احتمال ۱ توپولوژی با ۱۰ گره تعداد همسایگی متوسط ۷ را نشان داد و توپولوژی های با ۱۰۰ و ۱۰۰۰ گره تعداد همسایگی متوسط ۲۰ و ۲۷ را به ترتیب نشان داد.
- برای داشتن یک توپولوژی به هم پیوسته با احتمال ۹۰٪، توپولوژی با ۱۰ گره همسایگی متوسط ۵ را نمایش داد، توپولوژی با ۱۰۰ گره همسایگی متوسط ۱۰ و توپولوژی ۱۰۰۰ تایی متوسط همسایگی ۹ را نشان داد.

## مدل سازی مصرف انرژی

در WSN ها مصرف انرژی یکی از مهمترین مشکلات است زیرا هر سنسور گره یک سطح انرژی محدود دارد. اگر سنسور تمام گره ها درگیر حس کردن شوند افزونگی (redundancy) افزایش می یابد و این باعث مصرف انرژی غیر ضروری می شود. بنابراین ضروری است که مصرف انرژی گره به درستی مدل سازی شود. انرژی مصرف شده در سنسورها شامل انرژی مورد نیاز برای حس کردن، دریافت، ارسال و پردازش داده است. انرژی مصرف شده کل معمولاً تحت سلطه انرژی مورد نیاز برای ارسال و دریافت قرار می گیرد. دو حالت ممکن است برای مد مخابره گره در شبکه در نظر گرفته شود. در حالت اول گره ها با یک قدرت مخابره ثابت مخابره می کنند. نتیجه این معمولاً برد مخابره ثابت است. در حالت دوم گره ها یک مکانیزم را برای تنظیم قدرت مخابره بر اساس فاصله شان تا سینک یا هاپ بعدی به کار می برند. انرژی مورد نیاز برای مخابره یک پکت در سنسور  $i$  را می توان به این صورت مدل سازی کرد:

$$e(d_i) = l(e_i d_i^\alpha + e_o) = k d_i^\alpha + c \quad [10]$$

به گونه ای که  $\alpha$  نماینده توان (exponent) اتلاف در مسیر است. مقدار خاص  $\alpha$  برای WSN

## الگوریتم A3

پروتکل A3 پیشنهاد داده شده در [128] یک نمونه از اجرای توزیع شده ی الگوریتم رشد درخت است. A3 یک مجموعه احاطه کننده متصل غیر بهینه را بر روی یک گراف از ابتدا متصل با توجه به انرژی باقی مانده در گره ها و فاصله بین آنها ایجاد می کند. درخت با استفاده از ۴ نوع پیام ساخته می شود:

۱. پیام سلام (Hello Message)

۲. پیام تشخیص والد (Parent Recognition Message)

۳. پیام تشخیص فرزند (Children Recognition Message)

۴. پیام خواب (Sleeping Message)

پروسه ساخت CDS با یک گره از پیش مشخص شده که می تواند یک سینک باشد دقیقاً بعد از اینکه گره ها مستقر شدند شروع می شود. سینک، نود A در شکل 8.3a پروتکل را با فرستادن یک پیغام سلام اولیه شروع می کند. این پیغام به همسایه های A اجازه می دهد که والدشان را بشناسند. در شکل 8.3a گره های B, C, D و E پیام را دریافت می کنند. گره های F و G خارج از دسترس گره A هستند. اگر گره ای که پیام را دریافت می کند به وسیله ی گرهی دیگر پوشش داده نشده باشد حالتش را به پوشش داده شده تغییر می دهد و فرستنده پیام را به عنوان گره والد خود ثبت می کند و با فرستادن یک پیغام تشخیص والد پاسخ می دهد همان گونه که در شکل 8.3a نشان داده شده است. این پیغام همچنین شامل یک متریک انتخاب است (که بعداً توضیح داده می شود) که بر اساس قدرت سیگنال پیغام سلام دریافت شده و انرژی باقی مانده درون گره است. متریک بعداً به وسیله ی گره والد برای دسته بندی کاندید ها استفاده می شود. اگر دریافت کننده به وسیله ی گره دیگری پوشش داده شده باشد، پیام سلام را نادیده می گیرد. گره والد یک مقدار مشخص زمانی صبر می کند تا پاسخ ها را از همسایه هایش دریافت کند. هر پاسخ (متریک) در یک لیست از کاندید ها ذخیره می شود. هنگامی که این مدت زمان مشخص پایان یافت گره والد لیست را بر اساس متریک و به صورت کاهشی مرتب می کند. سپس گره والد یک پیغام تشخیص فرزند را که شامل لیست کامل مرتب شده است به تمام کاندید ها می فرستد. در شکل 8.3c گره A لیست مرتب شده را به گره های B, C,

D و E می فرستد. هنگامی که کاندید ها لیست را دریافت می کنند آنها یک زمان مهلت را بر اساس موقعیتشان در لیست تعیین می کنند. در مدت آن زمان گره منتظر پیام خواب از برادرانش می شود. اگر یک گره در مدت زمان مهلت پیام خواب دریافت کند خود را خاموش می کند به این معنی که یکی از برادرانش یکی از برادرانش شایسته تر است که جزوی از درخت باشد. بر اساس این شما (schema) بهترین گره براساس متریک یک پیغام خواب را اول می فرستد و تمام گره های سر راهش را بلوکه می کند. بنابراین تنها گره های کاندید دیگر که خارج از مکان پوشش آن هستند فرصت شروع پروسه ایجاد خود را پیدا می کنند. برای نمونه در شکل 8.3d گره D یک پیغام خواب را از E قبل از اینکه زمان مهلتش به پایان برسد دریافت می کند بنابراین خاموش می شود. در غیر این صورت یک پیغام خواب را ارسال می کند تا برادرانش را خاموش کند. در آن زمان این گره خاص یک گره والد جدید می شود و پروسه یافتن کاندیدهای خود را شروع می کند. در نهایت اگر یک گره والد هیچ پیغام تشخیص والدی را از همسایه هایش دریافت نکند خاموش می شود مانند حالت گره های B و E در توپولوژی نهایی همان گونه که در شکل 8.3e نمایش داده شده با دانستن اینکه آنها هیچ فرزندی ندارند.

### گراف هندسی چیست؟

- راس های گراف اشکال هندسی هستند.
- یالها بر اساس یک ارتباط هندسی بین اشیا گذاشته شده اند.

### گراف هندسی: مثال های بیشتر

- راس ها: پاره خط هایی در  $Rd$  یالها: بین دو پاره خط که متقاطعند.
- راس ها: سلول های ورونوی یک مجموعه نقطه در  $Rd$  یالها: بین دو سلول که یک منظر  $d - 1$  بعدی مشترک دارند.
- راس ها: نقطه ها در  $Rd$  یالها: از یک نقطه تا نزدیکترین  $k$  نقطه به آن

### گراف های تصادفی چه هستند؟

با داشتن یک گراف  $G = (V, E)$ , یک گراف تصادفی یک توزیع احتمال بر روی مجموعه تمام زیرگراف های  $G$  است.

## گراف های هندسی تصادفی چیستند؟

با داشتن یک گراف  $G = (V, E)$ , یک گراف تصادفی هندسی یک توزیع احتمال بر روی مجموعه تمام زیرگراف های  $G$  است.

## گراف های هندسی تصادفی: تعدادی مثال

- گراف صفحه واحد بر روی یک مجموعه تصادفی توزیع شده از نقطه ها
- گراف ورونوی با باقی ماندن هر سلول ورونوی در گراف به صورت مستقل با احتمال  $p$  و حذف شدن با احتمال  $1-p$

## Yao graph (yg)

الگوریتم نمایش داده شده در [139] که Yao graph (yg) خوانده می شود، یک نسخه اولیه از تکنیک کنترل توپولوژی جهت پایه در فضاهای چند بعدی است. این الگوریتم در دو فاز کار می کند: (۱) کاهش گراف اولیه به یک زیرگراف که شامل یک MST می شود و سپس (۲) حذف یالهای اضافی که فقط MST را باقی می گذارد.

زیرگراف تولید شده بعد از مرحله اول پردازش، یک Yao graph نامیده می شود.

فرض کنید که از هر گره  $v$  در  $V$ ,  $k \geq 6$  پرتوهای به یک اندازه که از  $v$  متصاعد می شوند و  $k$  مخروط را ایجاد می کنند. انتخاب تعداد مخروط ها مشخص می کند که هر مخروط حداکثر یک زاویه  $\theta \leq 60^\circ$  یا  $\theta \leq \pi/3$  دارد که ضمانت می کند که هر گره نه تنها حداکثر  $K$  همسایه دارد بلکه هر فاصله بین گره ها درون مخروط طولانی ترین یال مثلث ایجاد شده با گره در مرکز و هر دوی گره های همسایه آن نیست. این خاصیت برای ساخت MST الزامی است. شکل 7.11 یک مثال از Yao graph یک توپولوژی MaxPower کوچک است. بعد از اینکه مخروط شکل گرفت گره  $v$  همسایه هایش را در هر کدام از  $k$  مخروط پیمایش می کند. گره  $v$  فاصله از تمام همسایه ها را محاسبه می کند و کوتاهترین یال را از هر کدام از مخروط ها انتخاب می کند، یک یال جهت دار  $(v, u)$  به گونه ای می سازد که  $u$  نزدیکترین گره به  $v$  در آن مخروط است. اگر هر گونه طوقه در انتخاب نزدیکترین همسایه وجود داشته باشد، هر متدولوژی مانند انتخاب تصادفی و یا استفاده از گره ID می تواند برای شکستن طوقه استفاده شود. مولف اثبات می کند که یک MST در مجموعه یالهایی که از این مرحله اول منتج شده اند وجود دارد.

در فاز دوم برای محاسبه MST یک پردازنده جامع و مرکزی برای مشکلات پسا دفتری (post office) مورد نیاز است که برای هر نقطه  $u \in V$  نزدیکترین نقطه  $u \in V$  را به گونه ای مشخص می کند که  $d(v, u) < d(v, w), \forall w \in V, w \neq u$ .

الگوریتم کامل MST یک پیچیدگی از  $f(n) + O(n \log \log n)$  دارد به گونه ای که  $f(n)$  هزینه یافتن کوتاهترین یال در یک مخروط است.

هرچند مهم است که یادآوری کنیم که اگر برد مخابراتی همسایه انتخاب شده بیشتر از برد مخابراتی گره ارزیابی نباشد، الگوریتم، اتصال را تضمین نمی کند. یک توسعه از Yao graph که بر مشکل ناهمگون برد ارتباطی غلبه می کند در [74] نمایش داده شده است. نشان داده شده است که پروتکل YG این خواص خوب را داراست:

- درجه گره کراندار مساوی و یا کوچکتر از  $k$  است به گونه ای که  $k \geq 6$  مخروط است.
- ارتباط شبکه ای محفوظ است تا زمانی که گره ها همگون باشند.
- پروتکل توزیع شده (Yao Graph) و مرکزی (MST).
- اطلاعات محلی حداقل در طول فاز اول

## GRG گراف

### B.2

یک تئوری خوب که در نگاه اول برای آنالیز خواص شبکه های موردی/سنسوری کاربرد دارد تئوری گراف (بولوباس، پالمر ۱۹۸۵) است. در این تئوری یک گراف، با وارد کردن تعداد مشخصی یال بین گره های تصادفی در گراف شکل می گیرد و چندین خاصیت این گراف مطالعه شده است (برای نمونه ارتباط، حد های بالا و پایین در درجه گره و ...).

متأسفانه تئوری گراف تصادفی نمی تواند به صورت مستقیم در تحقیقات خواص شبکه های موردی/سنسوری به کار رود به دلیل یک فرض بنیادی در این مدل که می گوید احتمال وقوع یال در گراف مستقل است. که در مورد شبکه های بیسیم و موردی این گونه نیست. در حقیقت یک حالت را در نظر بگیرید که ۳ گره  $v, u, w$  به گونه ای قرار گرفته اند که  $\delta(v, u) < \delta(v, w)$ . با تکنولوژی های بیسیم معمول که از آنتن های چند جهته استفاده می کنند و بدون توجه به تاثیرات سایه اندازی و محو بر روی اتصاع سیگنال رادیویی اگر  $u$  یک لینک به  $w$  داشته باشد در این صورت باید یک لینک به گره نزدیکتر  $v$  داشته باشد به این معنی که روی دادن یال  $(v, u)$  به صورت مثبت با روی دادن یال  $(u, w)$  مرتبط است.

حتی اگر ما کانال های رادیویی بهتری که سایه اندازی و محو کردن سیگنال رادیویی را مدیریت کرده اند در نظر بگیریم، این حقیقت که گره  $u$  می تواند با گره  $w$  ارتباط داشته باشد هنوز بر روی محتمل بودن ارتباط  $u$  با گره نزدیکتر  $v$  تاثیر دارد.

در حالی که خواص سنتی تئوری گراف تصادفی در آنالیز نظری خواص بنیادی شبکه های موردی/سنسوری زیاد کاربرد ندارد یک تئوری احتمال جدیدتر و در حال توسعه به نظر می آید که برای این هدف بسیار پرکاربرد است. تئوری گراف های هندسی تصادفی (GRG) همان گونه که اسم پیشنهاد می کند تئوری GRG می تواند به عنوان یک توسعه تئوری سنتی گراف تصادفی دیده شود که در آن گراف به عنوان یک موجودیت انتزاعی (مجموعه ای از گره ها، متصل شده با تعدادی یال) در نظر گرفته نمی شود بلکه به عنوان یک موجودیت هندسی (مجموعه ای از نقطه ها در فضای  $d$  بعدی، متصل شده بر اساس یک رابطه نزدیکی) دیده می شود.

در یک مدل GRG خاص یک مجموعه از  $n$  نقطه بر اساس بعضی pdf در یک منطقه  $d$ -بعدی  $R$  توزیع شده اند و خواص بدون علامت جایگذاری گره های منتج شده برای  $n \rightarrow \infty$  مورد مطالعه قرار می گیرد. در بین خواص مطالعه شده در این تئوری ما این ها را می گوئیم:

- درجه گره حداقل و حداکثر در یک مدل که دو گره در گراف به هم متصل اند اگر و فقط اگر آنها در فاصله حداکثر  $r(n)$  از همدیگر باشند (توجه کنید که فاصله ارتباط تابعی از تعداد گره های مستقر شده است). ببینید (اپل و روسو ۱۹۹۷، پنروز ۱۹۹۹)
- طولانی ترین لینک نزدیکترین همسایگی، که مقدار طولانی ترین فاصله بین یک گره و نزدیکترین همسایه آن است. ببینید (دت و هنز ۱۹۸۹، پنروز ۱۹۹۹، ستیل و تیرنی ۱۹۸۶)

- طول کوتاهترین مسیری که تمام گره های مستقر شده را به هم متصل می کند. ببینید (ستیل ۱۹۸۱)

- طول یال کلی، تعداد اجزای متصل و عدد همسایگی بحرانی یک گراف  $k$ -همسایگی که با اتصال هر گره به  $k$  نزدیکترین همسایگی اش به دست می آید. ببینید (آورام و بارتسیماس ۱۹۹۳، پنروز و یوکیچ ۲۰۰۱، وان و یی ۲۰۰۴، زو و کومار ۲۰۰۴)
- طول یال کلی سه گوش سازی دلونی ایجاد شده بر گره های مستقر. ببینید (آورام و بارتسیماس ۱۹۹۳)

در این تحقیق یک تکنیک کنترل توپولوژی توزیع شده جدید ارایه می شود که مدیریت انرژی را بهینه سازی می کند و اختلال رادیویی در شبکه سنسورهای بیسیم را کاهش می دهد. هر گره در شبکه تصمیمات محلی درباره قدرت مخابره می گیرد و اوج این تصمیمات محلی یک توپولوژی شبکه را ایجاد می کند که ارتباط جهانی را حفظ می کند. در مرکز این تکنیک کنترل توپولوژی Smart Boundary Yao Gabriel Graph (SBYaoGG) جدید و بهینه سازی برای اطمینان از اینکه تمام لینک ها در شبکه متقارن و از نظر انرژی بهینه هستند وجود دارد. نتایج شبیه سازی ارایه شده اند و تاثیر این تکنیک را در مقایسه با سایر روش ها برای کنترل توپولوژی نشان می دهد.

### III. SMART BOUNDARY YAO GABRIEL GRAPH (SBYAOGG)

#### A. اهداف

دو هدف طراحی در توسعه تکنیک های پیش بینی شده برای کنترل توپولوژی برای WSN ها وجود داشت. اولین هدف این بود که باید از نظر مصرف انرژی به صرفه باشد و دومی باید اختلال کمی داشته باشد. معیارهای کارایی برای بررسی اینکه این اهداف چه اندازه محقق شده اند به کار می رفت. همچنین برای ارزیابی اینکه چه قدر این اهداف محقق شده اند کارایی نسبی تکنیک جدید در مقایسه با سایر روش های شناخته شده برای کنترل توپولوژی به کار می رفت. هر چند این اهداف باهم رقابت می کنند زیرا بهینه سازی مصرف انرژی همان گونه که با عامل بسط انرژی یک توپولوژی ایجاد شده اندازه گیری می شود سطح تداخل در شبکه که با ماکزیمم و میانگین درجه گره های توپولوژی ایجاد شده اندازه گیری می شود را افزایش می دهد. علاوه بر این کنترل توپولوژی درگیر یک مصالحه میان حفظ انرژی و متصل بودن شبکه می شود.

تکنیک کنترل توپولوژی توسعه پیدا کرده، طراحی شده بود تا دو هدف در رقابت داده شده در بالا را با پیدا کردن یک تعادل میان آنها به وسیله ی الگوریتم های مبتکرانه خاص داده شده در بخش III-C2 محقق کند.



## B. پیشنیازها

برای محقق کردن اهداف طراحی یاد شده زیرگراف  $T$  ایجاد شده به وسیله ی تکنیک کنترل توپولوژی از گراف  $G$  اولیه باید یک سری پیش نیازهایی داشته باشد. تعدادی از این پیش نیازه‌ها برای unicast انرژی حداقل بودند که در ادامه می آیند:

۱. عامل بسط انرژی ثابت یعنی گراف باید یک توسعه دهنده توان  $G$  باشد.

۲. تعداد گره های خطی یعنی گراف باید اسپارس باشد.

۳. محاسبه آسان با یک راه توزیع شده و محلی

علاوه بر این ها زیرگراف  $T$  باید :

۱. با احتمال زیاد متصل باشد به شرطی که گراف اولیه  $G$  متصل باشد.

۲. تخت باشد به این معنی که هیچ دو یال در گراف همدیگر را قطع نکنند. این باعث

امکان کار بعضی الگوریتم های مسیریابی با توپولوژی ساخته شده می شود مانند

Greedy Face Routing (GFR), Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR), Adaptive Face Routing (GOAFR) و Adaptive Face Routing (AFR)

Greedy Other [۲۱].

## C. گراف Yao-Gabriel با محدوده های هوشمند

برای توسعه ی یک تکنیک که یک توپولوژی شبکه که اهداف ذکر شده را برآورده کند و پیش نیازه‌های مشخص شده را رعایت کند و با انتخاب های انجام شده مطابقت داشته باشد تصمیم گرفته شد که یک الگوریتم گراف که مرکب از الگوریتم های گراف نزدیکی مختلف باشد ایجاد شود. الگوریتم، ترکیبی از الگوریتم گراف Gabriel و الگوریتم گراف Yao با استفاده از کران های منطقه هوشمند است. الگوریتم به عنوان Smart Boundary Yao Gabriel Graph (SBYaoGG) شناخته می شود. توپولوژی در ابتدا با محاسبه ی گراف گابریل از گراف دیسک واحد (UDG) در حداکثر قدرت مخابراتی ایجاد می شود و سپس با محاسبه ی گراف یو بر روی توپولوژی کاهش یافته با هدف ساخت توپولوژی نهایی ادامه می یابد.

با محاسبه ی گراف گابریل از UDG بعضی از پیش نیازها برای توپولوژی نهایی تامین می شود.

- گراف ساخته شده تخت است

- گراف دارای تعداد یالهای خطی است

بعد از محاسبه ی گراف یاو از گراف گابریل تعدادی دیگر از پیش نیازها برای توپولوژی نهایی تامین می شوند.

- گراف متصل است. به این دلیل که هر دو گراف گابریل و یاو متصل هستند اگر گراف اولیه متصل باشد.

- گراف یک توسعه دهنده توان UDG اولیه است. به این دلیل که هر دو گراف گابریل و یاو توسعه دهنده توان هستند.

علاوه بر این:

- گراف نهایی به راحتی قابل محاسبه است.

- الگوریتم از اطلاعات مکانی گره استفاده می کند که می تواند از گره های همسایه به دست بیاید. یالها سپس به صورت محلی فقط با استفاده از اطلاعات موقعیت همسایه محاسبه می شوند.

بنابراین تمام پیش نیازها برای تکنیک کنترل توپولوژی تامین شدند. این به تامین اهداف گراف نهایی که صرفه انرژی و اختلال کم است کمک می کند. یک درجه گره فیزیکی مورد نیاز برای اختلال حداقل و یک عامل بسط انرژی پایین مورد نیاز برای صرفه بالای انرژی، دو هدف در مقابل هم هستند. همان گونه که گفته شد

### (۱) هرس یالهای گراف گابریل

یالهای گراف گابریل محاسبه شده از UDG با محاسبه گراف یاو از توپولوژی کاهش یافته هرس می شود. این در حقیقت گراف YaoGabriel قبلا توسعه داده شده را ایجاد می کند. برای رسیدن به تداخل پایین لازم است که درجه گره را تا جای ممکن کاهش داد در حالی که خواص گسترش دهنده توان گراف گابریل حفظ می شود. گراف YaoGabriel می تواند این را به دست بیاورد. هرچند کاهش بیشتر در سطح تداخل می تواند با انتخاب متغیر محور های مخروط برای هر کدام از مناطق گراف یاو به دست بیاید. پروسه به کار رفته برای کاهش تداخل به قرار زیر است:

- یالهای گراف گابریل را با استفاده از گراف یاو هرس می کنیم
- از مناطق بزرگ برای محاسبه گراف یاو استفاده می کنیم.
- از الگوریتم های ابتکاری برای انتخاب محورهای مخروط ها برای هر منطقه از گراف یاو استفاده می کنیم
- توان مخابراتی هر گره را به پایین ترین حد می رسانیم تا اجازه دهد تا در توپولوژی نهایی به دورترین همسایه اش برسد.

## ۲) تعیین کرانه های منطقه ای گراف یاو

یک الگوریتم ابتکاری که برای شکل دادن گراف توپولوژی کاهش داده شده استفاده می شد هم راستا کردن محور اولین مخروط استفاده شده در محاسبه گراف یاو با منطقه ای است که گره ها بیشترین چگالی را دارند. این می تواند با به دست آوردن بردار های واحد جهت تمام گره های همسایه و سپس محاسبه ی بردار جهت میانگین انجام شود. بردار جهت میانگین سپس به عنوان محور مخروط برای اولین منطقه گراف یاو استفاده می شود. بردارهای جهت همسایه و بردار جهت میانگین در شکل ۱ نمایش داده شده اند. مخروط های گراف یاو به صورتی هستند که در شکل ۲ نمایش داده شده است. در حالت شکل ۴ و ۵،  $\alpha = 120^\circ$  منطبق است با یک گراف یاو با ۳ مخروط. می توان مشاهده کرد که هم راستا کردن محور یکی از مخروط ها با بردار جهت میانگین باعث ایجاد یک مخروط می شود که تعداد بالایی از گره های همسایه درون آن قرار می گیرند. ممکن است که در ترکیب بندی های خاصی تمام همسایه ها درون این مخروط قرار گیرند، که به این معنی است که تعداد یال های محاسبه شده در زمان کنترل توپولوژی کاهش می یابد.

یک گزینه این است که از مرکز ثقل همسایه به این دلیل استفاده کرد: برخلاف بردار جهت میانگین مرکز ثقل این مشکل را دارد که همسایه هایی که دورتر قرار دارند مختصاتی خواهند داشت که بر مختصات همسایه های نزدیکتر غلبه می کند. میانگین بردار های جهت واحد بر این مشکل فایق می آید. انتخاب  $\alpha \leq 5\pi/6$  برای تامین اتصال الزامی است. بزرگترین مقدار در شبیه سازی ها هنگام تعیین کرانه های گراف یاو جهت کاهش هرچه بیشتر درجه گره با حفظ اتصال استفاده شد.

### (۳) بهینه سازی ها

هنگامی که یالهای گراف گابریل هرس شدند ، تعدادی یال نامتقارن باقی می ماند. یک بهینه سازی که مورد استفاده قرار گرفت این بود که تمام یال ها را با اضافه کردن یال برعکس هر لینک نامتقارن که  $u, v \in E$  ولی  $v, u \notin E$  متقارن می کرد. اگر یک گره یک لینک به یک گره داشت اما هیچ لینکی به گره  $u$  نداشت در این صورت گره  $v$  یک لینک به گره  $u$  اضافه می کند.

این باعث کاهش عامل بسط گراف نهایی می شود و اطمینان حاصل می شود که هیچ لینک نامتقارنی که باری بر پروتکل MAC وارد کند وجود ندارد.

### (۴) الگوریتم

الگوریتم زیر چگونگی ساخت SBYaoGG را توضیح می دهد، جزییات دهی به گره ها در شبکه در ادامه می آید.

### الگوریتم ساخت SBYaoGG

۱. گره ، گره های همسایه اش را با مخابره با نهایت توان کشف می کند.
  ۲. گراف گابریل به صورت محلی ایجاد می شود
  ۳. گرافهای جهت واحد گره های همسایه در گراف گابریل محاسبه می شوند
  ۴. گراف جهت میانگین محاسبه می شود
  ۵. محور مخروط اولین منطقه برای استفاده در محاسبه گراف یاو با محور جهت میانگین منطبق می شود
  ۶. گراف یاو از گراف گابریل محاسبه می شود و توپولوژی کاهش یافته را ایجاد می کند
- مرحله آخر در به دست آوردن SBYaoGG بهینه سازی توپولوژی کاهش داده شده است برای اطمینان از اختلال پایین و خواص خوب گسترش دهنده توان دو بهینه سازی انجام شد
۱. تمام یال ها با اضافه کردن یال برعکس برای هر لینک نامتقارن، متقارن می شوند.
  ۲. سطح توان مخابره کننده به کمترین سطح که به هر گره اجازه می دهد که به تمام گره ها که با آنها یال دارد برسد تنظیم می شود.
- بعد از این SBYaoGG به کلی شکل گرفته است و می توان از آن به عنوان ورودی یک الگوریتم مسیریابی استفاده کرد.