



## دستیابی به نرخ شاره بیشینه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با آنتن‌های جهت‌دار

محمد قدسی\*

دانشکده مهندسی کامپیوتر - دانشگاه صنعتی

شریف

پژوهشکده علوم کامپیوتر، مرکز تحقیقات فیزیک

نظری و ریاضیات

ghodsi@sharif.edu

احمد شیرعلی‌نیا

دانشکده مهندسی کامپیوتر - دانشگاه صنعتی

شریف

مرکز امنیت شبکه شریف

shiralinia@ce.sharif.edu

ابوالفضل آسوده

دانشکده مهندسی کامپیوتر - دانشگاه صنعتی

شریف

asudeh@ce.sharif.edu

**چکیده:** در این مقاله با رویکردی الگوریتمی و دقیق به بررسی مسئله نرخ شاره بیشینه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم<sup>۱</sup> پرداخته شده است و در این رویکرد با الگوبرداری از مسئله شاره بیشینه<sup>۲</sup>، نوعی از مسائل ریزی خطی<sup>۳</sup> به عنوان راه‌حل آن ارائه گردیده است. از آنجا که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم محدودیت‌های بسیاری از لحاظ مصرف انرژی و همچنین تداخل در امواج وجود دارد، استفاده از آنتن‌های جهت‌دار<sup>۴</sup> همواره گزینه مناسبی بوده و به همین دلیل در این مقاله، با در نظر گرفتن شرایط خاص این شبکه‌ها، راه‌حل جامع و کامل‌تری برای این مسئله ارائه گردیده است.

**واژه‌های کلیدی:** نرخ شاره بیشینه، برنامه‌ریزی خطی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، آنتن‌های جهت‌دار

### ۲- کارهای مرتبط

در مرجع [4] ظرفیت بازدهی بیشینه شبکه‌ها بررسی شده و با ارائه یک الگوریتم توزیع شده برای مسیریابی و زمانبندی، یک چهارچوب برای بیشینه‌سازی کارآئی شبکه ارائه می‌کند، مرجع [5] به ارائه یک الگوریتم تقریبی (با ضریب تقریب ثابت) و یک فرمول ریاضی برای مسئله مسیریابی و انتساب کانال در شبکه‌های بی‌سیم چند رادیویی می‌پردازد، مرجع [6] یک الگوریتم تقریبی چند جمله‌ای برای مسئله حداکثر بازده در شبکه‌های بی‌سیم (با در نظر گرفتن مدل‌های تداخل) به همراه ضریب تقریب آن ارائه می‌دهد. در مرجع [7] با استفاده از تکنیک خوشه بیشینه<sup>۷</sup>، ابتدا به تشکیل گراف تداخل می‌پردازند که در آن هر ارتباط بین دو گره در شبکه واقعی، با یک راس نشان داده شده و برای هر تداخل ممکن یک یال رسم می‌کند. آنگاه خوشه بیشینه را در آن یافته و اعلام می‌دارد که تنها یک جریان از این خوشه قابل عبور است، مرجع [8] با فرض اینکه گره‌ها دارای آنتن‌های جهت‌دار<sup>۸</sup> هستند یک شبکه دو سطحی از حسگرها را در نظر می‌گیرد که گره‌های سطح اول داده‌های گره‌های سطح دوم را جمع می‌کنند و نشان می‌دهد که با این رویکرد کارایی طول عمر شبکه بهینه می‌شود، مرجع [9] به بررسی ساختارهای مسیریابی چندگامه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارای آنتن‌های جهت‌دار و آثار تداخل در آنها پرداخته‌اند و سپس مسئله رهیابی تک‌مسیره با حداقل تداخل را فرموله و حل کرده‌اند.

\* این نویسنده توسط مرکز تحقیقات فیزیک نظری (N. CS2386-2-01) حمایت شده است.

### ۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم متشکل از تعدادی گره حسگر می‌باشند که تعداد زیادی از آنها جهت انجام یک وظیفه و هدف مشترک در یک ناحیه با ارتباطات<sup>۵</sup> بی‌سیم در تعاملند. با توجه به محدودیت‌های خاص این شبکه‌ها، دستیابی به حداکثر ظرفیت سیستم برای استفاده در مسائلی همچون ارسال داده، مسیریابی و زمانبندی بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

مهمترین عامل محدود کننده ارسال و دریافت اطلاعات در این شبکه‌ها تداخل امواج ارسالی و دریافتی توسط آنتن‌های گره‌هاست که مانع فعال بودن همزمان ارتباطات متداخل با هم می‌شود. در شبکه‌های معمولی حسگرها به علت داشتن آنتن‌های معمولی که ناحیه ارتباطی آنها به صورت دایره‌ای است محدودیتها و فضای تداخل خیلی بیشتر از شبکه‌های دارای آنتن‌های جهت‌دار که فضای تداخل آنها به صورت یک طیف با شعاع و زاویه مشخص است می‌باشد، ضمن اینکه استفاده از این آنتن‌ها باعث صرفه جویی در منابع به خصوص منابع انرژی هر یک از گره‌ها می‌گردد.

بنابراین در این مقاله به بررسی این نوع شبکه‌ها و راه‌حل‌های ارائه شده در رابطه با رسیدن به حداکثر نرخ جریان انتها به انتها در آنها پرداخته شده و سعی شده است با یک نگاه الگوریتمی و دقیق‌تر به بررسی

فاصله بین گره $i$ و گره $j$	$d_{ij}$
جهت ارسال از گره $i$ به گره $j$	$\alpha(i, j)$
طیف مورد استفاده توسط گره $i$ برای ارسال به یا دریافت از گره $j$	$\theta_i^j$
لأمین طیف از گره $j$	$b(i, l)$
وجود اتصال $(i, j)$ در طیف $l$ از گره $i$	$b_{i,j}(i, l)$

با توجه به رابطه  $\theta_i^j = \left\lfloor \frac{\alpha(i, j)B}{2\Pi} \right\rfloor$ ، در زیر، نتیجه اضافه کردن محدودیت‌های شبکه به روش شماره بی‌شماره کلاسیک به صورت برنامه‌ریزی خطی مشاهده می‌شود:

$$\max \quad f$$

$$\text{s.t.}$$

$$1. \sum_{\{j|(i,j) \in E\}} x_{i,j} - \sum_{\{j|(j,i) \in E\}} x_{j,i} = \begin{cases} f & i = s \\ 0 & i = V - \{s, d\} \\ -f & i = d \end{cases}$$

$$2. \underbrace{\sum_{u \in b(i,l)} \sum_{(u,v) \in E} x_{u,v} b_{u,v}(u, \theta_u^j)}_{\text{InterferingLinksInLthBeam}} + \underbrace{\sum_{(k,i) \in E} x_{k,i} b_{k,i}(i, l)}_{\text{Incomin gFlow}} \leq 1; \forall l, i$$

$$3. \sum_{(k,i) \in E} x_{k,i} b_{k,i}(i, l) + \sum_{(i,j) \in E} x_{i,j} b_{i,j}(i, m) \leq 1,$$

$$\forall l \geq 1, m \leq B, \quad \forall i \in V$$

$$4. b_{i,j}(i, l) = \begin{cases} 1, & \text{if } l = \theta_i^j \\ 0, & \text{Othwise} \end{cases}$$

$$5. x_{i,j} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in E$$

چنانکه دیده می‌شود هدف بیشینه نمودن شماره می‌باشد. در قید ۱، ما به بیان این مطلب پرداخته‌ایم که بجز در منبع و مقصد، در تمام گره‌ها مقدار شماره ورودی و خروجی باید برابر باشد و در واقع این قسمت عضو بخش‌های مرتبط با حالت کلی مسئله شماره بیشینه است که در مرجع [1] به تفصیل توضیح داده شده است. قید ۲ به این دلیل اضافه شده است: شماره  $u$  به  $v$  (به شرطی که  $u$  در یکی از طیف‌های  $i$  باشد و همچنین  $v$  و  $i$  هم در یک طیف از  $u$  باشند، برای تمام  $u$  های درون طیف  $l$  از  $i$ ) بعلاوه شماره از  $k$  به  $i$  (برای تمام  $k$  های درون طیف  $l$  از  $i$ ) برای هر  $i$  و  $l$  باید نابیشتر از ۱ باشد.

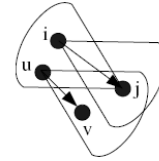
### ۳- بررسی راه‌حل اولیه

یکی از بهترین روش‌ها مطرح شده [2,3] استفاده از برنامه ریزی خطی و نگاشت به مسئله شماره بیشینه است. چنانکه که خواهیم دید پس از حل مسئله به شیوه برنامه‌ریزی خطی به دلیل محدودیت‌های شبکه‌های حس‌گر (برخی از متغیرها تنها می‌توانند شامل مقادیر خاص گسسته باشند)، پاسخ به برنامه‌ریزی اعداد صحیح مخلوط (NP-hard) تبدیل می‌شود.

در این شبکه‌ها گره‌ها دارای آنتن‌های جهت‌دار هستند. هر نوع از آنتن‌ها دارای دو مشخصه شعاع و زاویه ارتباطی هستند و می‌توانند جریان را در یک طیف تحت زاویه مشخص و شعاع خاص خود ارسال کنند.

هر آنتن هر دو عمل ارسال و یا دریافت داده‌ها را در جهت خاص انجام می‌دهد. ولی قادر به انجام دو عمل بطور همزمان نمی‌باشد.

گره  $i$  تنها در صورتی می‌تواند ارتباط خود به گره  $j$  را فعال کند که اولاً  $j$  در شعاع ارتباطی آن باشد و ثانیاً هر گره  $u$  درون طیف فعال  $j$  (به سمت  $i$ )، باید طیف فرستنده خود به سمت  $j$  را ساکت نگه دارد (شکل ۱). در حالت کلی هنگامی که یک طیف از یک آنتن فعال است هیچ گره دیگری نمی‌تواند طیفی از خود را که با این طیف اصطلاحاً تداخل دارد فعال کند.



شکل ۱. تداخل امواج  $u$  در ارسال از  $i$  به  $j$

حال با شناخت محدودیت‌های ارتباطی این شبکه‌ها به منظور رسیدن به حداکثر جریان از مدل برنامه ریزی خطی مسئله Max-Flow شروع کرده، محدودیت‌های موجود به آن اضافه می‌شود. توضیحات مربوط به نماد گذاری مورد استفاده در این راه‌حل، در جدول ۱ دیده می‌شود.

جدول ۱. توصیف نمادگذاری

کل تعداد طیف‌های هر گره	$B$
مجموعه یال‌ها	$E$
مجموعه گره‌ها	$V$
اتصال از گره $i$ به گره $j$	$(i, j)$
شماره روی اتصال $(i, j)$	$x_{i,j}$
شماره از گره مبدا $s$ به گره مقصد $t$	$f$
بیشینه شماره روی کمان $(i, j)$	$f_{i,j}$

با توضیحات ارائه شده با هدف بهینه کردن نرخ جریان در شبکه‌های حسگر با آنتن‌های جهت‌دار می‌پردازیم. با حفظ نمادگذاری ارائه شده در بخش قبیل نمادگذاری‌های جدید جهت تکمیل نمادها در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲. توصیف نمادگذاری تکمیلی

$T$	کل بازه زمانی مورد بررسی
$x_{i,j}(t)$	شماره روی اتصال $(i,j)$ در زمان $t$

بنابراین نتیجه به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} & \max f \\ & \text{s.t.} \\ & 1. \sum_{i=1}^r \left( \sum_{\{j|(i,j) \in E\}} x_{i,j}(t) - \sum_{\{j|(j,i) \in E\}} x_{j,i}(t) \right) = \begin{cases} f & i = s \\ 0 & i = V - \{s, d\} \\ -f & i = d \end{cases} \\ & 2. \sum_{u \in b(i,l)} \sum_{v \in b(u,v)} x_{u,v}(t) b_{u,v}(u, \theta_u^i) + \sum_{(k,i) \in E} x_{k,i}(t) b_{k,i}(i,l) \leq 1; \\ & \quad \forall l, i, \quad \forall t \in [0, T] \\ & 3. \sum_{(k,i) \in E} x_{k,i}(t) b_{k,i}(i,l) + \sum_{(i,j) \in E} x_{i,j}(t) b_{i,j}(i,m) \leq 1, \\ & \quad \forall l \geq 1, m \leq B, \quad \forall t \in [0, T], \quad \forall i \in V \\ & 4. b_{i,j}(i,l) = \begin{cases} 1, & \text{if } l = \theta_i^j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ & 5. x_{i,j}(t) \geq 0 \quad \forall (i,j) \in E, \quad \forall t \in [0, T] \end{aligned}$$

همانطور که در قید اول مشاهده می‌شود می‌توان بیان کرد که میزان جریان ورودی و خروجی در هر گره (به جز مبدا و مقصد) در کل زمان مورد بررسی برابر با صفر است. در سایر قیود نیز عنصر زمان وارد شده است و به این ترتیب دقیق شده اند.

#### ۵- انعطاف‌پذیری مدل ارائه شده

یکی از زیبایی‌های راه‌حل‌های ارائه شده بر مبنای برنامه‌ریزی خطی، انعطاف‌پذیری بالای آنهاست. با استفاده از این قابلیت و به عنوان نمونه با تعمیم راه حل ارائه شده در مرحله قبل به بررسی امکان مدل‌سازی شبکه‌هایی که آنتن‌های آن در یک لحظه قادر به ارسال و دریافت داده‌ها بطور همزمان می‌باشند، تنها کاری که لازم است انجام دهیم حذف قید سوم است، نیز برای جلوگیری از تداخل در ارسال و دریافت روی

با توجه به اینکه آنتن بطور همزمان نمی‌تواند هم ارسال و هم دریافت داشته باشد ولی ممکن است چند ارسال و یا چند دریافت را بطور همروند انجام دهد، قید سوم بیان می‌دارد: مجموع شاره ورودی به طیف  $I$  از گره  $i$  بعلاوه مجموع شاره خروجی از طیف  $m$  از  $i$  (برای هر  $m$  و  $I$  برای هر  $i$ ) باید نایبتر از ۱ باشد.

قید چهارم زمانی ۱ می‌شود که ارتباط  $(i,j)$  در داخل طیف  $I$  ام گره  $i$  باشد.

شرط پایانی نیز به این معناست که جریان از هر گره به گره دیگر بزرگتر یا مساوی صفر است.

در ظاهر به نظر می‌رسد که به یک راه حل بر مبنای برنامه‌ریزی خطی رسیده‌ایم و بنابراین یک راه حل چند جمله‌ای برای مسئله پیدا شده است. اما یک نکته کاملاً ظریف در اینجا وجود دارد که باعث می‌شود مسئله تبدیل به یک مسئله Np-hard شود و آن نکته این است که در اینجا متغیرها برای گرفتن مقدار آزاد نیستند و فقط می‌توانند از دامنه اعداد صحیح انتخاب شوند و همین امر مسئله را تبدیل به یک مسئله برنامه‌ریزی اعداد صحیح مخلوط کرده است.

#### ۴- ارائه راه‌حل دقیق

همانطور که در بخش قبیل مشاهده شد برای حل مسئله جریان در شبکه‌های حسگر از مسئله بیشینه جریان استاندارد شروع شده و محدودیت‌های شبکه‌های مورد نظر به آن اضافه شده است و اینکه آیا شروط مرتبط با مسئله بیشینه جریان استاندارد در این مسئله صادق است یا نه بررسی نشده و حداقل می‌توان گفت به مسئله با یک نگاه نا دقیق نظر شده است. و حتی با در نظرگیری روش‌های به اشتراک‌گذاری پهنای باند مانند اشتراک زمانی<sup>۹</sup> هم شرایط بهتر نمی‌شود.

با کمی دقت متوجه می‌شویم که شرط اول در راه‌حل ارائه شده به ظاهر با بقیه (عدم ارسال و دریافت همزمان در یک گره) منطبق نیست و نیز تعریف دقیقی برای جریان ارائه نشده است. این مشکلات به این دلیل است که یکی از شروط مسئله بیشینه جریان استاندارد در اینجا مصداق ندارد و آن هم این است که در مسئله بیشینه جریان استاندارد فرض می‌شود که هیچ‌کدام از گره‌ها دارای حافظه میانی<sup>۱۰</sup> نیستند و بنابراین بالاجبار تمامی جریان ورودی در هر لحظه باید در همان لحظه خارج شود و بنابراین جمع تمام جریان‌های ورودی و خروجی از آن در هر لحظه برابر صفر خواهد بود. در صورتیکه در شبکه‌های حسگر مورد نظر همانطور که گفته شد در یک لحظه امکان ارسال و دریافت همزمان در یک گره نمی‌باشد. نکته‌ای ضروری که نمی‌توان آن را از یاد برد وجود عنصر زمان است و اینکه در شبکه‌های حسگر هدف از جریان، نرخ جریان می‌باشد.

بنابراین می‌توان تعریف تداخل را با اضافه کردن عنصر زمان به شروط قبلی دقیق کرد و آن شروط را در هر واحد زمانی در نظر گرفت.

های بدون جهت با این روش اشاره نمود که تنها نیاز به قراردادی مقدار ۱ برای تعداد طیف‌هاست.

#### ۸- مراجع

- [1] Cormen, T.H., Leserson, C.E., Rivest, R.L., Stein, C., "Introduction to algorithms", second edition.
- [2] Huang, X., Wang, J., Fang, Y., "Achieving maximum flow in interference-aware wireless sensor networks with smart antennas", Elsevier, 2007.
- [3] Huang, X., Wang, J., Fang, Y., "Interference-Constrained Maximum Flow in Wireless Sensor Networks with Directional Antennas", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Florida, IEEE, 2006.
- [4] Kumar, V.S.A., Marathe, M.V., Parthasarathy, S., Srinivasan, A., "Algorithmic Aspects of Capacity in Wireless Networks", ACM, 2005.
- [5] Alicherry, M., Bhatia, R., Li, L., "Joint Channel Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-radio Wireless Mesh Networks", Bell Laboratories, ACM, 2005.
- [6] Brar, G., Blough, D.M., Santi, P., "Computationally Efficient Scheduling with the Physical Interference Model for Throughput Improvement in Wireless Mesh Networks", ACM, 2006.
- [7] Xue, Y., Li, B., Nahrstedt, K., "Optimal Resource Allocation in Wireless Ad Hoc Networks: A Price-Based Approach", IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006.
- [8] Hou, Y.T., Shi, Y., Pan, J., Midkiff, S.F., Sohrawy, K., "Single-Beam Flow Routing for Wireless Sensor Networks", IEEE, 2005.
- [9] Tang, J., Xue, G., Chandler, C., Zhang, W. "Interference-Aware Routing in Multihop Wireless Networks using Directional Antennas", Department of Computer Science and Engineering of Arizona State University, IEEE, 2005.

<sup>1</sup> Wireless Sensor Networks

<sup>2</sup> Maximum Flow Problem

<sup>3</sup> Linear Programming (LP)

<sup>4</sup> Directional Antennas

<sup>5</sup> Links

<sup>6</sup> Mixed Integer Programming (MIP)

<sup>7</sup> Maximum Clique

<sup>8</sup> Smart Antenna

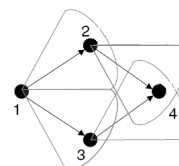
<sup>9</sup> Time Sharing

<sup>10</sup> Buffer

یک طیف از یک آنتن هم می‌توان قیدی با این مفهوم به مدل اضافه نمود: مجموع داده ارسالی از طیف  $l$  از آنتن  $i$  بعلاوه مجموع داده دریافتی در همان طیف (برای هر  $i$  و  $l$ ) باید نایبتر از ۱ باشد.

#### ۶- بررسی یک مثال

در این قسمت به بررسی یک نمونه ساده‌سازی شده از مسئله دستیابی به حداکثر نرخ شارژ در شبکه‌های حسگر می‌پردازیم. به عنوان مثال فرض کنید که شبکه مورد نظر دارای ساختاری همانند شکل ۲ باشد و هدف بیشینه کردن نرخ شارژ در ۴ واحد زمانی باشد.



شکل ۲- ساختار شبکه نمونه

بنابراین با توجه به آنچه در بخش ۴ گفته شد می‌توان مسئله را به فرم زیر به یک مسئله برنامه ریزی مخلوط تبدیل کرد.

$$\begin{aligned} \max \quad & f \\ x_{1,2,0} + x_{1,3,0} + \dots + x_{1,3,3} &= f \\ x_{2,4,0} - x_{1,2,0} + \dots - x_{1,2,3} &= 0 \\ x_{3,4,0} - x_{1,3,0} + \dots - x_{1,3,3} &= 0 \\ x_{2,4,0} - x_{3,4,0} + \dots + x_{3,4,3} &= f \\ x_{1,2,0} + x_{1,3,0} \leq 1, \quad x_{1,2,1} + x_{1,3,1} \leq 1, \quad x_{1,2,2} + x_{1,3,2} \leq 1 \\ x_{1,2,3} + x_{1,3,3} \leq 1, \quad x_{1,2,0} + x_{2,4,0} \leq 1, \quad x_{1,2,1} + x_{2,4,1} \leq 1 \\ x_{1,2,2} + x_{2,4,2} \leq 1, \quad x_{1,2,3} + x_{2,4,3} \leq 1, \quad x_{1,3,0} + x_{3,4,0} \leq 1 \\ x_{1,3,1} + x_{3,4,1} \leq 1, \quad x_{1,3,2} + x_{3,4,2} \leq 1, \quad x_{1,3,3} + x_{3,4,3} \leq 1 \\ x_{2,4,0} + x_{3,4,0} \leq 1, \quad x_{2,4,1} + x_{3,4,1} \leq 1, \quad x_{2,4,2} + x_{3,4,2} \leq 1 \\ x_{2,4,3} + x_{3,4,3} \leq 1 \\ x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \end{aligned}$$

#### ۷- نتیجه گیری

اولاً همانطور که مشاهده شد بررسی مسئله بیشینه شارژ در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با آنتن‌های جهت‌دار بدون در نظر گرفتن عنصر زمان ناقص است و ثانیاً با توجه به نوع راه حل ارائه شده و با توجه به قسمت ۵ به سادگی می‌توان با اعمال محدودیت‌های مسائل مشابه از این راه‌حل برای آنها نیز استفاده کرد که از آن جمله می‌توان به مدل‌سازی آنتن