بهبود کیفیت سرویس و کاهش توان مصرفی در شبکه‌های اقتضایی از طریق کنترل توزیعی توان با در نظر گرفتن هزینه توان و SINR

رویا هراتیان و احمدرضا شرافت

چکیده: در این مقاله مسأله کنترل توزیعی توان در شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی در لایه فیزیکی با هدف بهبود کیفیت سرویس کل شبکه و کاهش توان مصرفی بررسی می‌شود. این مسأله را با کمک نظریه بازی‌ها تحلیل می‌کنیم و برای رسیدن به هدف بهبود کیفیت سرویس کل شبکه و کاهش توان مصرفی، راهکاری را ارائه می‌نماییم. هر کاربر در شبکه دارای تابع بهره‌ای است که مقدار آن به‌صورت کمی بیانگر کیفیت سرویس دریافتی آن کاربر است و به‌صورت تابعی از نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز کاربر تعریف می‌شود. هر کاربر با هدف بیشینه‌کردن مقدار تابع بهره خود، مقدار سطح توان ارسالی خود را انتخاب می‌کند. بنابراین توان ارسالی کاربر، هم بر تابع بهره آن کاربر و هم بر تابع بهره سایر کاربران تأثیرگذار است. این اثر متقابل کاربران بر روی یکدیگر را می‌توان به‌وسیله نظریه بازی‌ها تحلیل کرد. بیشینه‌کردن تابع بهره هر کاربر به‌طور خودخواهانه با بیشینه‌کردن بهره کل شبکه مغایر است. در این مقاله برای حل این مشکل از روش مبتنی بر هزینه استفاده کرده‌ایم که در آن با کم‌کردن تابع هزینه از تابع بهره، بهره کاربر مشخص می‌شود. رفتار متقابل کاربران را در این شرایط نیز به کمک نظریه بازی‌ها تحلیل کرده و الگوریتمی توزیعی برای به‌روز کردن توان کاربران ارائه کرده‌ایم. همچنین با کمک شبیه‌سازی، بیشینه‌شدن کیفیت سرویس شبکه و کاهش توان مصرفی با کمک روش مبتنی بر هزینه را نشان داده‌ایم.

کلید واژه: **روش مبتنی بر هزینه، شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی، کنترل توان، نظریه بازی‌ها.**

۱- مقدمه

با توجه به محدودبودن انرژی کاربران سیار در شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی[1]، کنترل توان به‌عنوان راهکاری برای کاهش انرژی مصرفی، کاهش تداخل و در نتیجه افزایش کیفیت سرویس شناخته شده است. در مسأله کنترل غیر متمرکز توان، هر کاربر با انتخاب سطح توان مناسب، داده‌های خود را ارسال می‌کند.

کنترل توان بر عملکرد لایه‌های مختلف شبکه تأثیر دارد. این کار در لایه فیزیکی با هدف افزایش کیفیت کانال و نگه‌داشتن نسبت سیگنال به نویز به اضافه تداخل (SINR)[2] بالاتر از یک سطح آستانه انجام می‌شود [۱]. همچنین این کار می‌تواند با هدف افزایش کارایی پروتکل‌های دسترسی انجام شود [۲]. مضافاً سطح توان ارسالی، تعیین‌کننده شعاع همسایگی و در نتیجه مسیریابی در لایه شبکه است [۳]. چون هدف این مقاله بهبود کیفیت کانال از طریق کاهش تداخل و در نتیجه افزایش کیفیت سرویس شبکه است، به‌طور خاص بر روی کنترل توان در لایه فیزیکی متمرکز می‌شویم.

هر کاربر در شبکه دارای تابع بهره‌ای[3] است که مقدار آن به‌صورت کمی بیانگر کیفیت سرویس[4] (QoS) دریافتی آن کاربر بوده و تابعی از SINR است. بنابراین تابع بهره، هم وابسته به توان کاربر و هم وابسته به توان سایر کاربران شبکه است. هر کاربر با انتخاب سطح توان ارسالی، سعی در بیشینه‌کردن مقدار تابع بهره خود دارد. بنابراین انتخاب سطح توان ارسالی هر کاربر به‌طور متقابل بر تابع بهره سایر کاربران شبکه نیز تأثیر دارد.

بیشینه‌کردن تابع بهره هر کاربر به‌طور خودخواهانه با بیشینه‌کردن بهره کل شبکه مغایر است، زیرا با افزایش توان هر کاربر برای رسیدن به بیشینه بهره خود، تداخل برای سایر کاربران افزایش می‌یابد و کیفیت سرویس آنها کاهش می‌یابد. راهکاری که برای حل این مشکل ارائه می‌شود، استفاده از تابع هزینه است. با کم‌کردن تابع هزینه از تابع بهره، کاربران شبکه برای رسیدن به بهره بیشینه، تمایلی به افزایش توان خود ندارند و در نتیجه تداخل بین کاربران کاهش می‌یابد. این امر موجب افزایش SINR هر کاربر می‌شود و در نتیجه بهره کل شبکه افزایش و توان مصرفی کاهش می‌یابد.

برای بررسی رفتار متقابل کاربران مستقل در شبکه‌های اقتضایی با طبیعت پویا و نامتمرکز، نظریه بازی‌ها ابزار مناسبی است. در این نظریه موقعیت‌های رقابتی به شکل بازی و هر یک از تصمیم‌گیرندگان مستقل به‌عنوان بازیکن در نظر گرفته می‌شوند. نتیجه نهایی عملکرد متقابل بین کاربران، به‌عنوان خروجی بازی، بعد از این که همه بازیکنان راهکار خود را انتخاب کردند، مشخص می‌شود [۴].

در [۵] راهکاری برای کنترل توان در شبکه بی‌سیم اقتضایی با استفاده از تابع لگاریتمی بهره در لایه فیزیکی ارائه شده است. اما راهکارهای مبتنی بر هزینه به‌منظور ارتقا بهره کل شبکه پیشنهاد نشده است. همچنین در مرجع مذکور تنها از تابع بهره لگاریتمی در بازی کنترل توان استفاده شده است.

در [۶] راهکاری برای کنترل توان در شبکه‌های بی‌سیم سلولی با در نظر گرفتن تابع بهره شبه‌مقعر معرفی شده است که در آن با ارائه روش

این مقاله در تاریخ ۲۸ آبان ماه ۱۳۸۷ دریافت و در تاریخ ۲ دی ماه ۱۳۸۸ بازنگری شد.

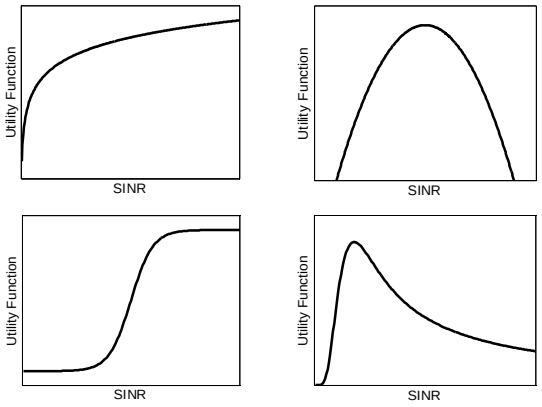
رویا هراتیان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (emails: roya.haratian@gmail.com).

احمدرضا شرافت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (emails: Sharafat@modares.ac.ir).

1. Ad Hoc
2. Signal to Interfrence plus Noise Ratio
3. Utility Function
4. Quality of Service

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱: نمونه‌هایی از چهار دسته توابع بهره به‌ترتیب از بالا سمت چپ، مثال‌هایی از توابع دسته اول، دوم، سوم و چهارم.

مبتنی بر هزینه، بیشینه‌کردن بهره کل شبکه با کمک نظریه بازی‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. گرچه ممکن است به نظر برسد که کنترل نامتمرکز توان در شبکه‌های سلولی شباهت‌هایی با کنترل توان در شبکه‌های اقتضایی داشته باشند ولی در شبکه‌های سلولی، هر کاربر فقط با ایستگاه پایه به مبادله اطلاعات می پردازد، در حالی که در شبکه‌های اقتضایی، هر کاربر با سایر کاربران و بدون استفاده از ایستگاه پایه مرکزی در تماس است. بنابراین در این مقاله مدل شبکه شبیه به مدلی است که در [۵] در نظر گرفته شده است.

در [۷] به‌منظور ارتقای کارایی شبکه از روش‌های مبتنی بر هزینه متفاوت با مقالات قبلی استفاده شده است. تابع هزینه در [۷] بر خلاف مقالات قبلی که تنها تابعی از توان ارسالی کاربر تعریف شده‌اند، هم تابع توان ارسالی کاربر و هم تابع توان ارسالی سایر کاربران شبکه است.

مسأله کنترل توان در شبکه‌های چندورودی- چندخروجی اقتضایی در [۸] مورد بررسی قرار گرفته و با نظریه بازی‌ها تحلیل شده است، که در آن از تابع بهره لگاریتمی متناسب با نرخ ارسال، و از تابع هزینه‌ای که تنها متناسب با توان ارسالی است، استفاده شده است. همچنین در به‌روز رسانی توان ارسالی کاربران چنانچه نرخ ارسال داده کمتر از آستانه مشخصی باشد، از ادامه انتقال داده جلوگیری می‌شود.

در این مقاله با تعریف بازی کنترل توان برای چهار دسته تابع بهره، سطح توان مناسب را به‌صورت نامتمرکز برای ارسال داده‌ها توسط کاربران شبکه اقتضایی به‌دست می‌آوریم. با استفاده از توابع هزینه پیشنهادی در دو دسته کلی، علاوه بر بیشینه‌کردن تابع بهره هر کاربر، بهره کل شبکه را نیز بیشینه می‌کنیم. در دسته اول مانند [۶] تابع هزینه، تابعی از توان ارسالی کاربر است و در دسته دوم مانند [۷] هم تابع توان ارسالی کاربر و هم تابع توان ارسالی سایر کاربران شبکه است. همچنین یکتایی و پایداری بازی پیشنهادی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

ساختار این مقاله به‌صورت زیر است. کنترل توان با استفاده از نظریه بازی‌ها در بخش ۲ بررسی شده است. در بخش ۳ بازی کنترل توان مبتنی بر هزینه را ارائه می‌کنیم. بازی کنترل توان پیشنهادی را در بخش ۴ شبیه‌سازی کرده و جمع‌بندی این مقاله را در بخش ۵ ارائه می‌کنیم.

۲- کنترل توان با در نظرگرفتن تابع بهره

۲-۱ مدل شبکه

شبکه بی‌سیم اقتضایی مجموعه‌ای از کاربرانی است که می‌توانند از طریق خطوط بی‌سیم چندپرشی با هم در ارتباط باشند. مجموعه کاربران را با $N := \{1,\dots,N\}$، کاربر مبدأ را با s و کاربر مقصد را با d نشان می‌دهیم. مجموعه خطوط ارتباطی تک‌پرشی بین کاربران را با $L := \{1,\dots,L\}$ نشان می‌دهیم. مجموعه خطوط ارتباطی تک‌پرشی متصل به هم، تعداد $l \in L$ مسیر از کاربر s تا کاربر d را تشکیل می‌دهد. نمایش لحظه‌ای از این شبکه را که در آن سیگنال طیف گسترده‌ای در کل پهنای باند کاربرانی ثابت با مسیری مشخص، گسترده شده است در نظر می‌گیریم. در بازه زمانی مورد نظر هر کاربر تنها نقش فرستنده یا گیرنده را دارد. بنابراین کاربران شبکه را به‌صورت زوج کاربران فرستنده - گیرنده در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که کانال هر خط ارتباطی، متغیر با زمان است و به‌صورت فرایند ایستانِ تصادفی مدل می‌شود که در بازه زمانی مورد نظر، بهره کانال برای هر خط ارتباطی ثابت است. بهره کانال بین زوج فرستنده - گیرنده iام را با h_{ii} و بهره کانال بین فرستنده iام و گیرنده مجاور jام را با h_{ij} نشان می‌دهیم [۵]. توان ارسالی کاربر iام را با p_i نشان می‌دهیم که $p_i \le p_i^{\max}$ بوده و $p_i^{\max}$ بیشینه توان ارسالی کاربر i است. توان نویز در گیرنده را با σ_i^2 نشان می‌دهیم. نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$\gamma_i = \frac{p_i h_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j h_{ji} + \sigma_i^2} \qquad (1)$$

۲-۲ بازی کنترل توان

عملکرد متقابل کاربران شبکه را در انتخاب سطح توان ارسالی مناسب، با کمک نظریه بازی‌ها تحلیل می‌کنیم. بازی غیر تعاونی کنترل توان را در شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی در مدل راهبردی به‌صورت $G = \langle N, (P_i), (u_i) \rangle$ تعریف می‌کنیم. این بازی از سه جزء زیر تشکیل شده است:

۱) مجموعه‌ای محدود از بازیکنان (کاربران بی‌سیم) $N = \{1,2,\dots,n\}$؛

۲) مجموعه‌ای محدود و غیر تهی P_i برای هر بازیکن، $i \in N$، که شامل سطوح توان ارسالی ممکن برای بازیکن i است. مجموعه P که به‌صورت $P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$ تعریف می‌شود، مجموعه سطوح توان ارسالی در شبکه است.

۳) تابع بهره برای هر بازیکن، یعنی $u_i = P \to \Re$، که هر بازیکن قصد بیشینه‌کردن مقدار این تابع بهره را دارد.

بردار توان به‌وسیله $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ نمایش داده می‌شود که در آن $p_i \in P_i$ سطوح توان انتخاب‌شده توسط بازیکن iام است. برای بردار توان $\mathbf{p}$، هر بازیکن $i \in N$، سودی مساوی با $u_i(\mathbf{p})$ به‌دست می‌آورد. برای هر بازی داریم: $\mathbf{p} = (p_i, \mathbf{p}_{-i})$ که بردار توان همه بازیکنان غیر از بازیکن iام به‌صورت $\mathbf{p}_{-i} = [p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_n]^T$ نمایش داده می‌شود.

اکنون تابع بهره یعنی u را که می‌توان به شکل‌های مختلف تعریف کرد [۵] تا [۱۱]، در نظر می‌گیریم. برای تعریف بازی کنترل توان و بررسی یکتایی و پایداری حالت نهایی آن، تابع بهره را در چند دسته کلی در نظر می‌گیریم: توابع مقعر و شبه‌مقعر که هر یک از این دو دسته خود شامل توابع یکنوا و غیر یکنوا می‌شوند (شکل ۱).

دسته اول توابع بهره برای بازی کنترل توان، توابع مقعر یکنوا هستند که به‌صورت صعودی در دامنه تابع تعریف می‌شوند. نمونه‌ای از این توابع $\log(\gamma_i)$ و $\log(1+\gamma_i)$ هستند. تابع $\log(1+\gamma_i)$ متناسب با ظرفیت شانون بوده و نشان‌دهنده برون‌دهی شبکه و نرخ تبادل داده است [۵] و [۸].

Archive of SID
www.SID.ir

توابع مقعر غیر یکنوا، دسته دوم توابع بهره برای بازی کنترل توان تعریف‌شده در این مقاله هستند. تابع $-[\gamma_{\text{target}}-\gamma_i]^2$ نمونه‌ای از این دسته توابع است که در آن هر کاربر سعی دارد SINR خود را به γ_{target} که SINR هدف است، برساند. هر کاربر بسته به شرایط می‌تواند SINR هدف خاص خود را داشته باشد و یا این که SINR هدف در کل شبکه برای همه کاربران یکسان باشد [۱۰].

دسته سوم، توابع شبه‌مقعر یکنوا هستند که برای بازی کنترل توان در نظر گرفته می‌شوند. تابع $1/1+e^{-\alpha\gamma_i}$ نمونه‌ای از این دسته توابع است که تابعی صعودی بوده و در بازه قبل از نقطه عطف تابع، تقعری رو به پایین و در بازه بعد از نقطه عطف دارای تقعری رو به بالا است [۱۱].

توابع شبه‌مقعر غیر یکنوا، دسته چهارم توابع بهره در نظر گرفته شده هستند. تابع $LR\,f(\gamma_i)/Mp$ نمونه‌ای از این دسته توابع است که نشان‌دهنده تعداد بیت اطلاعاتی است که به‌طور موفقیت‌آمیز دریافت می‌شوند. تابع $f(\gamma_i)$ برابر $(1-\text{BER}_i)^M$ تعریف می‌شود که برابر احتمال دریافت صحیح بسته در گیرنده بوده و در آن BER نرخ خطای بیت، L تعداد بیت اطلاعات در بسته به طول M بیت و R نرخ بیت تعریف می‌شود [۶].

اکنون برای بازی تعریف‌شده، حالت نهایی یا تعادل نش[1] را بررسی می‌کنیم. تعادل نش، نقطه‌ای است که در آن کاربران نتوانند بهره خود را به‌طور یک‌جانبه افزایش دهند. شرایط وجود تعادل نش را با توجه به توابع بهره تعریف‌شده برای بازی کنترل توان بررسی می‌کنیم. به این منظور دو شرط زیر را در نظر می‌گیریم:

۱) مجموعه توان‌ها، یعنی P_i یک زیرمجموعه غیر تهی و فشرده از یک فضای اقلیدسی باشد. با توجه به تعریفی که برای محدوده سطح توان ارسالی هر کاربر شد، یعنی $p_i \in P_i = (0, p^{\max})$، این شرط برقرار است.

۲) بهره کاربر یعنی u_i پیوسته و روی P_i شبه‌مقعر باشد. توابع تعریف‌شده در بخش قبل، توابعی پیوسته هستند و باید ویژگی شبه‌مقعر بودن آنها روی فضای راهکار، یعنی P بررسی شود. چون متغیر تابع بهره SINR است و SINR هر کاربر تابع خطی از توان آن کاربر است و با فرض آن که بردار SINR کاربران شبکه، برداری امکان‌پذیر باشد؛ می‌توان به‌جای بررسی شبه‌مقعر بودن تابع بهره روی فضای راهکار، یعنی P، رفتار تابع بهره را نسبت به SINR بررسی کرد.

چهار دسته تابع بهره معرفی‌شده در این مقاله، طبق تعریف نسبت به SINR مقعر یا شبه‌مقعر هستند. با توجه به تعریف توابع شبه‌مقعر، توابع مقعر نیز شبه‌مقعر هستند [۵] و با توجه به استدلال آمده در بند ۲ می‌توان نتیجه گرفت که چهار دسته توابع بهره معرفی‌شده در این مقاله روی P_i شبه‌مقعر هستند. با توجه به بحث بالا، دو شرط لازم برای وجود تعادل نش حاصل می‌شود. پس در بازی تعریف‌شده برای کنترل توان، تعادل نش وجود دارد و هر کاربر شبکه با بیشینه‌کردن تابع بهره خود نسبت به توان، سعی در رسیدن به سطح توان p_i^*، در بردار توان تعادل نش، یعنی $\mathbf{p}^* = [p_1^*, p_2^*, \ldots, p_n^*]^T$، دارد.

۳- کنترل توان با در نظر گرفتن تابع بهره و تابع هزینه

در بازی کنترل توان هر کاربر سعی در بیشینه‌کردن بهره خود با به‌روز کردن توان ارسالی خود دارد. اما هر کاربر هزینه‌ای را که بر سایر کاربران به‌علت تداخل ایجاد می‌کند، نادیده می‌گیرد. رفتار خود بهینگی کاربر زمانی که کیفیت سرویس سایر کاربران شبکه کاهش می‌یابد منجر به کاهش بهره کل شبکه می‌شود. در [۹] به‌منظور بیشینه‌کردن بهره کل شبکه از روش‌های بهینه‌سازی توزیعی استفاده شده است. از دیگر راه حل‌های این مسأله، استفاده از توابع هزینه است که به‌عنوان راهکاری مؤثر در بیشینه‌کردن بهره کل شبکه شناخته شده است [۶] و [۷]. استفاده از توابع هزینه دو هدف را دنبال می‌کند: ۱) به‌دست آوردن بهره کل شبکه و ۲) تشویق کاربران به استفاده بهتر از منابع. یک روش مؤثر بر مبنای توابع هزینه، منجر به تصمیم‌گیری‌های غیر متمرکز و سازگار با بهره کل شبکه می‌شود. بنابراین بهره کل شبکه که به‌صورت مجموع توابع بهره کاربران تعریف می‌شود، افزایش می‌یابد.

برای این کار می‌توانیم از توابع هزینه مختلفی استفاده کنیم. در [۶] و [۷] از توابع هزینه در شبکه‌های سلولی استفاده شده است. در این مقاله از تابع هزینه در شبکه‌های اقتضایی استفاده می‌کنیم. تابع هزینه مناسب و کارا، به‌درستی هزینه استفاده از منابع شبکه را منعکس می‌کند. معمولاً هزینه‌ای که یک کاربر برای استفاده از منابع می‌پردازد، متناسب با مقدار منابعی است که آن کاربر مصرف کرده است. با کمک این روش می‌توان کارایی کل شبکه را با تشویق کاربران به همکاری با وجود حفظ طبیعت غیر تعاونی افزایش داد. در این روش از تابع بهره هر کاربر، تابع هزینه را کم می‌کنیم. بنابراین تابع بهره به شکل زیر خواهد بود

$$u_i^c(\gamma_i) = u(\gamma_i) - \text{Pricing} \qquad (۲)$$

توابع هزینه را برای بازی کنترل توان به دو دسته تقسیم می‌کنیم. توابع هزینه‌ای که تنها تابع توان کاربر است و توابع هزینه‌ای که هم تابع توان کاربر و هم تابع توان سایر کاربران شبکه است. دسته اول را به‌صورت $\text{Pricing}(p_i)$ نشان می‌دهیم که تابعی صعودی از p_i است و دسته دوم که تابعی صعودی از γ_i بوده و به‌صورت $\text{Pricing}(\gamma_i)$ نشان می‌دهیم. توابع αp_i و $\alpha \log p_i$ جزء دسته اول و توابع $\alpha\gamma_i$ و $\alpha \log \gamma_i$ جزء دسته دوم قرار می‌گیرند. مقدار α ضریب مثبت ثابتی است که برای رسیدن به بهترین ارتقا ممکن در کل شبکه تنظیم می‌شود.

برای بازی کنترل توان مبتنی بر تابع هزینه نوع اول، هر کاربر هدف زیر را دنبال می‌کند

$$\max \quad (u_i(\gamma_i) - \text{Pricing}(p_i)) \qquad \forall p_i \qquad (۳)$$

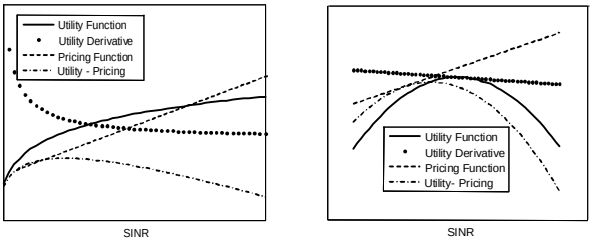
برای بازی تعریف‌شده، ابتدا باید وجود تعادل نش را برای چهار دسته توابع بهره بررسی‌کنیم. چون تابع هزینه نوع اول صعودی است و توان برای مقادیر مثبت تعریف شده است، مشتق تابع هزینه نوع اول مثبت و مشتق دوم آن صفر خواهد بود. توابع بهره نوع اول و دوم طبق تعریف مقعر هستند و مشتق دوم آنها منفی است. بنابراین تابع بهره‌ای که با توجه به توابع بهره نوع اول و دوم و تابع هزینه نوع اول تعریف می‌شود، به‌علت مقعربودن توابع بهره و هزینه، مقعر خواهد بود و در نتیجه مقدار $\partial^2 u_i^c / \partial p_i^2$ برای این دسته از توابع کوچک‌تر از صفر است (شکل ۲). در نتیجه $u_i^c(\gamma_i)$ مقعر بوده و تعادل نش برای بازی کنترل توان این دسته توابع وجود خواهد داشت و سیستم به حالت پایدار خواهد رسید.

بهره در بازی کنترل توان تعریف‌شده برای تابع بهره دسته سوم که شبه‌مقعر و یکنوا هستند و تابع هزینه دسته اول، نسبت به ضریب تابع هزینه رفتار متفاوتی خواهد داشت. چنانچه α_i از بیشینه مشتق تابع بهره نسبت به توان بیشتر باشد، تابع بهره نزولی بوده و نقطه تعادلی برای بازی تعریف‌شده $p_i = p^{\min}$ خواهد بود. چنانچه α_i از کمینه مشتق تابع بهره

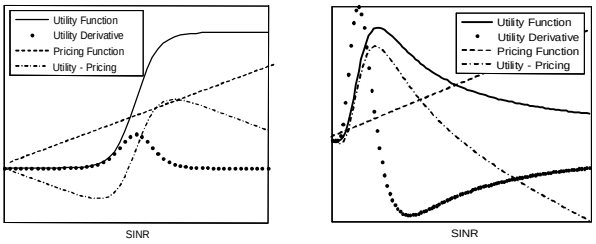
1. Nash Equlibrium

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲: نمونه‌ای از توابع بهره دسته اول و دوم به‌ترتیب از سمت چپ، همراه با مشتق تابع، تابع هزینه و تابع بهره.



شکل ۳: نمونه‌ای از توابع بهره دسته سوم و چهارم به‌ترتیب از سمت چپ، همراه با مشتق تابع، تابع هزینه و تابع بهره.

نسبت به توان بیشتر باشد، تابع بهره صعودی بوده و نقطه تعادلی برای بازی تعریف‌شده $p_i = p^{\max}$ خواهد بود. در غیر این صورت مشتق تابع بهره دو ریشه خواهد داشت که این دو ریشه از تلاقی مشتق تابع بهره و خط α_i به‌دست می‌آیند. چون تابع بهره در این بازه مقعر است، نقطه تلاقی سمت راست، نقطه تعادلی بیشینه بازی کنترل توان خواهد بود.

با بررسی مشتق تابع بهره، رفتار این تابع برای توابع بهره دسته چهارم که شبه‌مقعر و غیر یکنوا هستند و تابع هزینه نوع اول مشخص می‌شود. به‌عنوان مثال برای تابع هزینه $\alpha_i p_i$، ضریب α_i از مشتق تابع بهره کم می‌شود. چنانچه ضریب تابع هزینه، یعنی α_i، از بیشینه مشتق تابع بهره نسبت به p_i بیشتر باشد، تابع بهره نزولی بوده و نقطه تعادلی $p^{\min}$ است. چنانچه مقدار α_i از کمینه مشتق تابع بهره نسبت به p_i کمتر باشد، تابع بهره صعودی بوده و نقطه تعادلی $p^{\max}$ خواهد بود. در غیر این صورت نقطه تعادلی از تلاقی خط α با تابع بهره به‌دست می‌آید. در این شرایط، نقطه تعادلی، کمینه بیشینه توان و نقطه تلاقی سمت راست، خواهد بود (شکل ۳).

برای توابع هزینه دسته دوم، بازی کنترل توان به شکل (۴) در می‌آید

$$\max \quad (u_i(\gamma_i) - \text{Pricing}(\gamma_i)) \qquad \forall p_i \qquad (۴)$$

که رفتار مشتق تابع بهره را در دامنه آن بررسی می‌کنیم. با توجه به (۵) در زیر دیده می‌شود که رفتار مشتق تابع بهره نسبت به γ_i، در ضریب مثبت γ_i / p_i نسبت به رفتار مشتق توابع دسته قبل نسبت به p_i تفاوت دارد. در نتیجه طبق استدلال قبلی در مورد تابع هزینه نوع اول، توابع بهره تعریف‌شده نیز شبه‌مقعر خواهند بود و تعادل نش وجود خواهد داشت

$$\frac{\partial u_i^c}{\partial p_i} = \frac{\partial u_{i\ i}^c}{\partial \gamma_i} \times \frac{\partial \gamma_i}{\partial p_i} = \frac{\partial u_i^c}{\partial \gamma_i} \times \frac{\gamma_i}{p_i} \qquad (۵)$$

۳-۱ بردار نهایی توان

با توجه به بحث قبلی نشان دادیم برای بازی کنترل توان با توابع بهره معرفی‌شده، حالت پایدار نهایی یعنی تعادل نش وجود دارد. در حالت نهایی، کاربران توان مناسب برای ارسال را با هدف بیشینه‌کردن کیفیت سرویس کل شبکه انتخاب می‌کنند. برای رسیدن به بردار نهایی توان در این مقاله از الگوریتم گرادیان استفاده می‌کنیم. هر کاربر به‌طور جداگانه با استفاده از الگوریتم گرادیان، مسأله بهینه‌سازی بازی کنترل توان را حل کرده و توان خود را با توجه به (۶) و با در نظر گرفتن توابع بهره تعریف‌شده، به‌طور توزیعی به‌روز می‌کند. طول گام به‌روز کردن مقادیر را با λ نشان می‌دهیم

$$p_i(t+1) = p_i(t) + \lambda_i \frac{\partial u_i^c}{\partial p_i} \qquad (۶)$$

برای پیاده‌سازی این الگوریتم هر کاربر باید از بهره خود یعنی u_i^c، مقدار SINR خود و بهره کانال یعنی h_{ii}، مطلع باشد. فرض می‌کنیم هر کاربر از مقدار تابع بهره خود مطلع است. مقدار γ_i و h_{ii} قابل اندازه‌گیری در گیرنده و ارسال آن به فرستنده است. در نتیجه با کمک این روش، الگوریتم به‌روز رسانی توان (۶) را می‌توان طور توزیعی پیاده‌سازی کرد.

٤- شبیه‌سازی

یک شبکه اقتضایی محدود در فضای مربع شکل به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ متر را در نظر می‌گیریم. تعداد ۱۰ زوج کاربر فرستنده-گیرنده به‌طور تصادفی با توزیع یکنواخت در این ناحیه جای داده شده‌اند. گیرنده هر فرستنده به‌طور تصادفی در ناحیه‌ای به شعاع ۶۰۰ متر به مرکزیت فرستنده واقع شده است. بهره کانال از فرستنده تا گیرنده را به‌صورت $h_{ij} = ۱۰^{K} / d_{ij}^{*}$ در نظر می‌گیریم که K متغیر تصادفی با توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ۴ دسی‌بل است که نشان‌دهنده محوشدگی سایه بوده و d_{ij} فاصله بین فرستنده iام تا گیرنده j ام است. بیشینه توان را برابر ۲ وات در نظر گرفته‌ایم [۵].

رفتار متقابل کاربران شبکه را برای چهار دسته تابع بهره شبیه‌سازی می‌کنیم. هر کاربر توان خود را با استفاده از الگوریتم گرادیان، برای هر یک از توابع بهره و هزینه، به‌روز می‌کند. در بخش ۲ و ۳ نشان دادیم که برای چهار دسته توابع بهره و توابع هزینه پیشنهادی، تعادل نش و حالت پایدار نهایی وجود دارد و با کمک توابع هزینه می‌توان به بهره کل بیشتری در شبکه دست یافت. اکنون حالت پایدار نهایی و افزایش بهره شبکه توسط توابع هزینه را به کمک شبیه‌سازی نشان می‌دهیم.

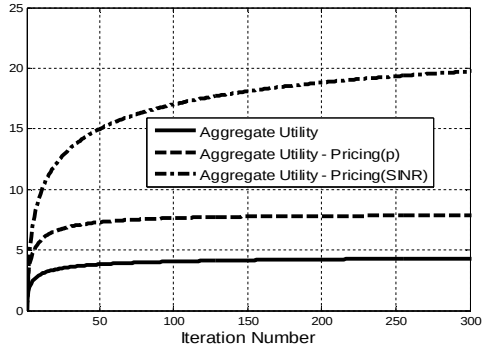
نمونه توابع مثال زده شده در بخش قبلی را برای هر یک از چهار دسته توابع بهره در نظر می‌گیریم. در شبیه‌سازی‌ها تابع هزینه را یک بار αp_i و بار دیگر $\alpha\gamma_i$ فرض می‌کنیم. می‌بینیم که بهره کل شبکه در حالت بدون تابع هزینه کمتر از حالتی است که تابع هزینه در نظر گرفته شده است. با تعریف تابع هزینه، کاربران شبکه برای رسیدن به بهره بیشینه تمایلی به افزایش توان خود ندارند. در نتیجه تداخل بین کاربران کاهش می‌یابد. این امر موجب افزایش SINR هر کاربر می‌شود و در نتیجه بهره کل شبکه افزایش می‌یابد.

در شکل ۴ بهره کل شبکه برای توابع بهره مقعر یکنوا، مقعر غیر یکنوا و دو دسته تابع هزینه نشان داده شده است. می‌بینیم که بهره کل شبکه در شرایطی که از توابع هزینه استفاده می‌شود بیشتر از حالت بدون تابع هزینه است. همچنین می‌بینیم که بهره کل برای تابع بهره مقعر یکنوا، و تابع بهره مقعر غیر یکنوا با تابع هزینه نوع دوم، بیشتر است.

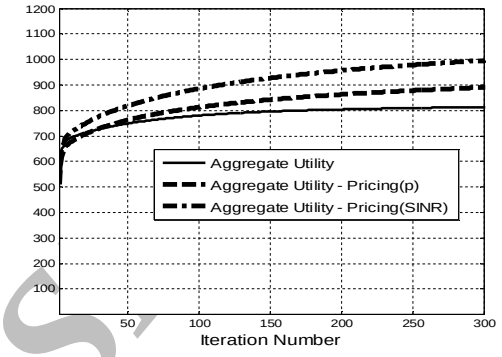
در شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی بهره کل شبکه را برای توابع بهره شبه‌مقعر یکنوا و غیر یکنوا و دو دسته تابع هزینه نشان داده‌ایم. می‌بینیم که بهره کل شبکه در شرایطی که از توابع هزینه استفاده می‌شود، بیشتر از

Archive of SID

www.SID.ir

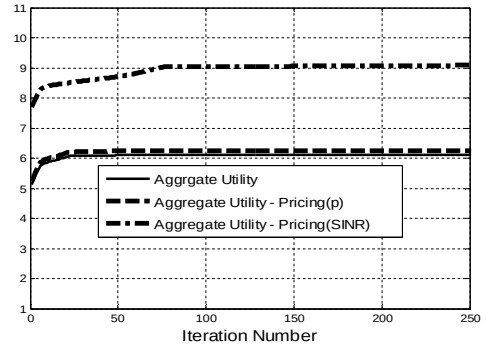


(الف)

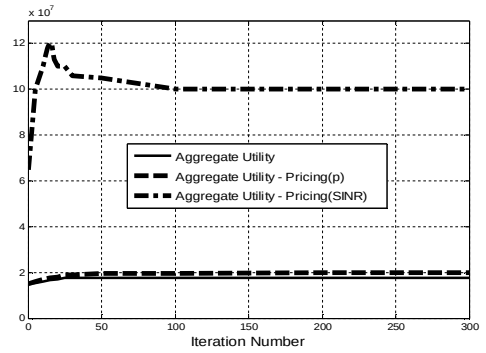


(ب)

شکل ۴: بهره کل شبکه برای توابع بهره (الف) مقعر یکنوا و (ب) مقعر غیر یکنوا.

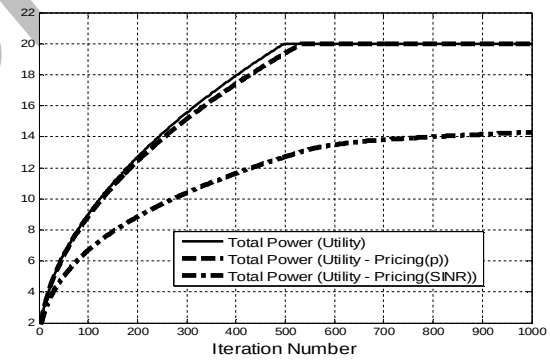


(الف)

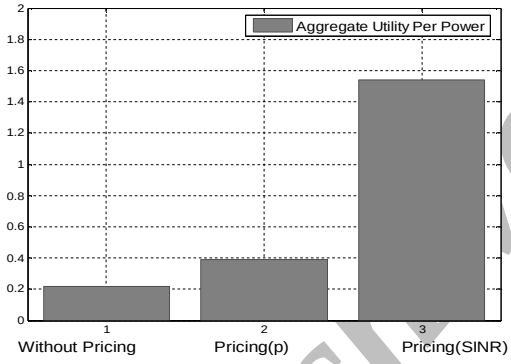


(ب)

شکل ۵: بهره کل شبکه برای توابع بهره (الف) شبه‌مقعر یکنوا و (ب) شبه‌مقعر غیر یکنوا.



شکل ۶: توان مصرفی کل شبکه برای سه حالت بدون تابع هزینه، با تابع هزینه نوع اول و با تابع هزینه نوع دوم.



شکل ۷: نسبت بهره کل شبکه به توان مصرفی برای سه حالت بدون تابع هزینه، با تابع هزینه نوع اول و با تابع هزینه نوع دوم.

حالت بدون تابع هزینه است. بسته به نوع تابع بهره دیده می‌شود که بهره کل برای تابع بهره شبه‌مقعر یکنوا و غیر یکنوا با تابع هزینه نوع دوم، بیشتر است. می‌بینیم که نتایج شبیه‌سازی با بحث نظری انطباق دارد.

توان مصرفی کل شبکه را در سه حالتی که کاربران از تابع بهره نوع اول، تابع بهره منهای تابع هزینه نوع اول و تابع بهره منهای تابع هزینه نوع دوم استفاده می‌کنند، در شکل ۶ نشان داده‌ایم. همان‌طور که می‌بینیم در روش مبتنی بر هزینه، توان مصرفی کل شبکه کمتر است.

نسبت بهره کل به توان مصرفی شبکه، معیار دیگری است که نشان می‌دهد بهره کل شبکه نسبت به توان کل مصرفی به چه مقدار است. مقدار این معیار در شکل ۷ در سه حالتی که کاربران از تابع بهره، تابع بهره منهای تابع هزینه نوع اول و تابع بهره منهای تابع هزینه نوع دوم، به‌عنوان تابع بهره استفاده می‌کنند، نشان داده شده است. می‌بینیم که در روش مبتنی بر هزینه، نسبت بهره کل شبکه به توان مصرفی بیشتر است. یعنی مجموع کاربران، بهره کل بیشتری را بدون نیاز به صرف توان بیشتر به‌دست می‌آورند که این خود نشان‌دهنده برتری دیگر استفاده از روش مبتنی بر هزینه است.

برون‌دهی[1] شبکه به‌صورت مجموع نرخ ارسال داده در شبکه تعریف می‌شود [۹] و نرخ ارسال داده از $\log(1+SINR)$ به‌دست می‌آید. هرچه میزان SINR بیشتر باشد، کیفیت سرویس بالاتر بوده و نرخ ارسال داده بیشتر خواهد بود.

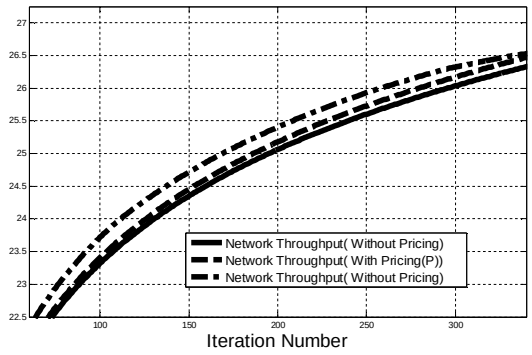
در شکل ۸ برون‌دهی شبکه در سه حالتی که کاربران از تابع بهره بدون تابع هزینه، تابع بهره منهای تابع هزینه نوع اول و تابع بهره منهای تابع هزینه نوع دوم، به‌عنوان تابع بهره استفاده می‌کنند، نشان داده شده است. می‌بینیم که در روش مبتنی بر هزینه، برون‌دهی شبکه بیشتر است و بنابراین روش مبتنی بر هزینه برتری دارد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به محدودبودن انرژی کاربران بی‌سیم در شبکه‌های اقتضایی، در این مقاله مسأله کنترل توان در لایه فیزیکی با هدف بهبود کیفیت

1. Throughput

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸: برون‌دهی شبکه برای سه حالت بدون تابع هزینه، با تابع هزینه نوع اول و با تابع هزینه نوع دوم.

سرویس کل شبکه و کاهش توان مصرفی با کمک نظریه بازی‌ها بررسی شد و برای رسیدن به این هدف، راهکاری را ارائه کردیم. برای هر کاربر چهار دسته تابع بهره در نظر گرفتیم که مقدار آن به‌صورت کمی بیانگر کیفیت سرویس دریافتی آن کاربر بوده و تابعی از SINR است. هر کاربر با هدف بیشینه‌کردن مقدار تابع بهره خود، سطح توان ارسالی را انتخاب می‌کند. با ارائه راهکار مبتنی بر هزینه، کنترل توان با هدف رسیدن به بیشینه بهره کل شبکه بررسی شد. در این مقاله از دو دسته کلی تابع هزینه استفاده کردیم. به کمک نظریه بازی‌ها نشان دادیم که حالت پایدار برای بازی تعریف‌شده وجود دارد و کاربران به حالت پایدار نهایی که همان تعادل نش است، می‌رسند. همچنین الگوریتمی برای رسیدن به نقطه تعادلی ارائه کردیم. با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده شد بهره کل شبکه با استفاده از تابع هزینه افزایش و توان مصرفی کاهش می‌یابد. همچنین نسبت بهره کل به توان مصرفی شبکه و برون‌دهی شبکه نیز با کمک این روش افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] M. S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Capacity of Rayleigh fading channels under different adaptive transmission and diversity-combining techniques," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 48, no. 4, pp. 1165-81, Jul. 1999.

[2] N. Bambos, "Toward power - sensitive network architectures in wireless communications: concepts, issues, and design aspects," *IEEE Pers. Commun. Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 50-59, Jun. 1998.

[3] V. Kawadia and P. R. Kumar, "Principles and protocols for power control in wireless ad hoc networks," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 23, no. 1, pp. 76-88, Jan. 2005.

[4] A. B. Mackenzie and S. B. Wicker, "Game theory in communications: motivation, explanation and application to power control," in *Proc. IEEE Global Telecom. Conf.*, vol. 2, pp. 821-826, San Antonio, TX, US, 25-29 Nov. 2001.

[5] J. Huang, R. A. Berry, and M. L. Honig, "Distributed interfrence compensation for wireless networks," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 24, no. 5, pp. 1074-1084, May 2006.

[6] N. Feng, S. Mau, and N. B. Mandayam, "Pricing and power control for joint network - centric and user - centric radio resource management," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 52, no. 9, pp. 1547-1557, Sep. 2004.

[7] M. Rasti, A. R. Sharafat, and B. Seyfe, "Pareto efficient and goal driven power control in wireless networks: a game theoretic approach with a novel pricing scheme," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 17, no. 2, pp. 556-569, Apr. 2009.

[8] C. Liang and K. Dandekar, "Power management in MIMO ad hoc networks: a game - theoretic approach," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 1164-1170, Apr. 2007.

[9] M. Chiang, "Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks: jointly optimal congestion control and power control," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 104-116, Jan. 2006.

[10] V. Sirvastava, J. Neel, A. B. Mackenzie, R. Menon, L. A. Dasilva, J. E. Hicks, J. H. Reed, and R. P. Gilles, "Using game theory to analyze wireless ad hoc networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 7, no. 4, pp. 46-56, Fourth Quarter 2005.

[11] M. Xio, N. B. Shroff, and E. K. Chong, "A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 11, no. 2, pp. 210-221, Apr. 2003.

رویا هراتیان مدرک خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق گرایش الکترونیک در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعتی اصفهان، و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نموده، و هم‌اکنون دانشجوی دکتری در دانشگاه لندن است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های اقتضایی و سنسور، شبکه‌های بیسیم، و روشهای پیشرفته پردازش سیگنال‌ها.

احمدرضا شرافت در سال ۱۳۵۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف و در سالهای ۱۳۵۵ و ۱۳۶۰ مدارک کارشناسی ارشد و دکترای خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه استنفورد در آمریکا دریافت نمود. وی اینک در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس استاد تمام است. موضوعات پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: روشهای پیشرفته پردازش اطلاعات و سیگنال‌ها، و همچنین سیستم‌ها و شبکه‌های مخابراتی.

Archive of SID
www.SID.ir