تخصیص منابع جهت ارسال امن اطلاعات در شبکه‌های همیار مبتنی بر UAV

ریحانه شاه‌چراغ[۱]، محمدرضا جوان[۲]

[۱]کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۲]دانشیار دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود (javan@shahroodut.ac.ir)

چکیده

در این مقاله یک روش تخصیص منابع در شبکه‌های همیار مبتنی بر وسایل نقلیه بدون سرنشین (UAV[۱]) ارایه می‌شود. شبکه در نظر گرفته شده شامل سه نود است که یکی از آنها فرستنده و دو نود دیگر گیرنده هستند. همچنین در این شبکه یک UAV وجود دارد که به عنوان رله دیکد و ارسال (DF[۲]) عمل می‌کند. مدل کانال در نظر گرفته شده فقط شامل اثرات افت مسیر بوده و ارسال اطلاعات عادی و امن زمانی انجام می‌شود که لینک ارتباطی به صورت خط دید مستقیم[۳] وجود داشته باشد. مسیر حرکتی UAV ازفرستنده به گیرنده‌ها بوده که اطلاعات را از فرستنده دریافت نموده و زمانی که به گیرنده‌ها رسید با استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه نامتعامد (NOMA[۴]) به گیرنده‌ها ارسال می‌نماید. مسأله تخصیص منابع به صورت یک مسأله بهینه‌سازی[۵] نوشته شده است که مسأله‌ای غیرمحدب[۶] بوده و حل آن به سادگی امکان‌پذیر نیست. هدف بیشینه کردن نرخ ارسال عادی و نرخ امن[۷] است. برای حل مسأله از روش تقریب محدب متوالی (SCA[۸]) استفاده شده است که در آن مسأله اصلی به صورت دنباله‌ای از مسایل که به صورت محدب تقریب زده شده‌اند تبدیل می‌شود. برای حل این دنباله مسایل محدب می‌توان از ابزارهای موجود مانند CVX متلب استفاده نمود. در نهایت، روش تخصیص منابع ارایه شده از طریق شبیه‌سازی با متلب مورد بررسی قرار گرفت و کارایی آن در شرایط مختلف شبکه و مقادیر متفاوت پارامترهای سیستمی مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها، کارایی روش پیشنهادی را در شرایط مختلف مورد تایید قرار دادند.

کلیدواژه

تخصیص منابع در شبکه‌های بی‌سیم، وسایل نقلیه بدون سرنشین، روش تقریب متوالی محدب، نرخ امن، روش دسترسی چندگانه نامتعامد.

مقدمه

گسترش شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم چالش‌های بسیاری، مانند پوشش سراسری و نرخ داده بالا، در طراحی و پیاده‌سازی شبکه‌های بی‌سیم ایجاد نموده است. از طرف دیگر، در مناطقی که زیرساخت مخابراتی وجود ندارد و یا بر اثر حوادث و فجایع طبیعی زیرساخت مخابراتی از دست رفته است، نیاز است تا یک شبکه ارتباطی ایجاد شود [۱]. استفاده از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین از جمله راه‌کارهای نویدبخش در ایجاد پوشش شبکه و افزایش نرخ ارسالی کاربران هستند. با استفاده از UAV[۹] در شبکه به عنوان یک نود، مانند ایستگاه پایه و یا رله، می‌توان کارایی استفاده از منابع را در این شبکه‌ها افزایش داد [۱و۲]. در شرایطی که نودهای فرستنده و گیرنده از یکدیگر دور هستند، UAV می‌تواند به عنوان رله عمل کرده و اطلاعات را از فرستنده دریافت کرده، تا مکان گیرنده حرکت کرده، و به گیرنده ارسال کند.

۱ Unmanned Aerial Vehicle
۲ Decode-and-Forward
۳ Line-of-Sight
۴ Non-Orthogonal Multiple Access
۵ Optimization Problem
۶ Non-Convex
۷ Secrecy Rate
۸ Successive Convex Approximation
۹ Unmanned Aerial Vehicle

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱

مقالات بسیاری به مسأله طراحی شبکه‌های بی‌سیم با استفاده از UAV پرداخته‌اند [۳-۱۳]. مسایل بررسی شده طیف وسیعی از کاربردهای UAV و چالش‌های طراحی را در بر می‌گیرد. در [۳]، مسأله مکان‌یابی سه بعدی UAV به منظور افزایش منطقه تحت پوشش بررسی شده است. نویسندگان یک الگوریتم برای یافتن مکان بهینه UAV به منظور افزایش تعداد کاربران تحت پوشش با مصرف کمترین توان ممکن ارایه کرده‌اند. مدل کانال در نظر گرفته شده به صورت ترکیبی احتمالی از برقراری لینک خط دید مستقیم (LoS[۱۰]) و لینک خط دید غیر مستقیم (NLoS[۱۱]) است. در [۴]، یک شبکه وسیله به وسیله (D2D[۱۲]) مبتنی بر UAV بررسی شده است. فرض شده است که کاربرانD2D از طریق UAV انرژی دریافت نموده و مسأله‌ای با هدف بیشینه کردن کارایی انرژی مطرح شده است که در آن به صورت توأم زمان برداشت انرژی[۱۳] و تخصیص توان تعیین می‌شود. در [۵]، استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه نامتعامد (NOMA[۱۴]) در شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر UAV بررسی شده است. از NOMA در لینک بکهال[۱۵] به منظور ارسال اطلاعات به UAV استفاده شده است. همچنین فرض شده است که UAV در ارسال اطلاعات به کاربران با یکدیگر همکاری می‌کنند. هدف تعیین مکان و ترتیب دیکد کردن سیگنال‌های دریافتی توسط UAV به منظور بیشینه کردن نرخ کاربران شبکه است. در [۶]، مسأله تخصیص منابع و جایابی ایستگاه پایه در شبکه‌های بیسیم مبتنی بر UAV بررسی شده است. فرض شده است که UAV قادر به برداشت انرژی از سیگنال دریافتی از ایستگاه پایه زمینی است. هدف بیشینه کردن نرخ ارسالی است در حالی که از تکنیک‌های دسترسی تقسیم فرکانس و تقسیم زمان استفاده می‌شود. در [۷]، یک شبکه بی-سیم مبتنی بر UAV بررسی شده است که در آن UAV از سیگنال رادیویی برای ارسال انرژی به کاربران زمینی استفاده می‌کند. کاربران از انرژی برداشت شده برای ارسال در سمت فراسو[۱۶] استفاده می‌کنند. در این سیستم، هدف بیشبنه کردن نرخ ارسال فراسوی کاربران روی مسیر پرواز UAV تحت محدودیت بیشینه سرعت UAV است. با توجه به غیرمحدب بودن مسأله، از روش تقریب متوالی محدب (SCA[۱۷]) برای حل مسأله استفاده شده است. در [۸]، از UAV جهت کاهش بار شبکه سلولی استفاده شده است. در واقع، UAV جهت سرویس دهی به کاربران لبه سلول استفاده شده است. در این سیستم، هدف بیشینه کردن کارایی انرژی با تعیین توأم تخصیص منابع و مسیر UAV است. در [۹]، مسأله بیشینه کردن نرخ ارسالی کاربران در یک شبکه مبتنی بر UAV بررسی شده است که در این شبکه چندین UAV در حال پرواز و ارایه سرویس هستند. هدف بیشینه کردن کمینه نرخ کاربران با تعیین توأم تخصیص منابع، زمان‌بندی ارسال، و مسیر UAV است. در [۱۰]، مسأله ارسال امن اطلاعات در شبکه‌های مبتنی بر UAV با استفاده از سیگنال جمینگ بررسی شده است. در این سیستم، از دو UAV استفاده می‌شود. یک UAV اقدام به ارسال اطلاعات به کاربر می‌کند و UAV دوم با ارسال سیگنال تداخلی باعث می‌شود که شنودگر زمینی نتواند سیگنال ارسالی UAV اول را دیکد کند. در [۱۱]، از UAV در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به منظور جمع-آوری اطلاعات استفاده شده است. در این سیستم، نودهای حسگر به صورت گروهی درآمده و اطلاعات خود را از طریق یک نود نماینده به UAV ارسال می‌کنند. جهت حل مسأله یک الگوریتم ابتکاری[۱۸] ارایه شده است.

از UAV در شبکه‌های بی‌سیم به عنوان رله نیز استفاده شده است تا کارایی ارتباط مخابراتی را بالا ببرد [۱۲-۱۳]. در [۱۲]، مسأله تخصیص منابع و طراحی مسیر UAV در شبکه‌های همیار چند جهشی بررسی شده است که در آن، اطلاعات فرستنده از طریق چند UAV به سمت گیرنده ارسال می‌شود. در این سیستم، هدف بیشینه کردن نرخ ارسال از طریق تعیین توأم تخصیص منابع و مسیر UAV تحت محدودیت‌های تحرک UAV، علی بودن ارسال اطلاعات، پرهیز از تصادف، و متوسط و بیشینه توان ارسالی است. در [۱۳]، از UAV به عنوان رله تقویت و ارسال[۱۹] استفاده شده است که به ارسال اطلاعات بین دو نود شبکه که دور از یکدیگر هستند کمک می‌کند. در این سیستم، هدف بیشینه کردن نرخ ارسالی با تعیین توأم تخصیص توان و مسیر UAV است.

ما در مقاله حاضر، یک مدل شبکه‌ای جدید معرفی کرده‌ایم که در آن از UAV به عنوان رله دیکد و ارسال (DF[۲۰]) استفاده شده است تا به تبادل اطلاعات بین فرستنده و گیرنده‌ها کمک کند. در سیستم بررسی شده یک فرستنده و دو گیرنده وجود دارد که UAV اطلاعات مربوط به هر دو گیرنده را از فرستنده دریافت می‌کند و با استفاده از تکنیک NOMA، اطلاعات دریافتی را به صورت همزمان به فرستنده‌ها ارسال می‌کند. فرض می‌کنیم که فرستنده انرژی محدودی برای ارسال اطلاعات در اختیار دارد. همچنین UAV مجهز به سیستم‌های برداشت انرژی خورشیدی است که می‌تواند انرژی مورد نیاز خود را از این سیستم تأمین کند. همچنین فرض شده است که به هر کاربر اطلاعاتی ارسال

[۱۰] Line-of-Sight
[۱۱] Non-Line-of-Sight
[۱۲] Device-to-Device
[۱۳] Energy Harvesting
[۱۴] Non-Orthogonal Multiple Access
[۱۵] Backhaul
[۱۶] Uplink
[۱۷] Successive Convex Approximation
[۱۸] Heuristic
[۱۹] Amplify-and-Forward
[۲۰] Decode-and-Forward

می‌شود که باید از کاربر دیگر مخفی بماند. برای سیستم پیشنهادی، یک مسأله بهینه‌سازی مطرح کرده‌ایم که هدف آن بیشینه کردن نرخ ارسالی تحت محدودیت انرژی فرستنده، علی بودن مصرف انرژی در UAV، سرریز[۲۱] باطری UAV، و علی بودن ارسال اطلاعات است. مسأله پیشنهادی یک مسأله غیرمحدب[۲۲] بوده که حل آن دشوار است. برای حل مسأله پیشنهادی، از روش تقریب متوالی محدب (SCA[۲۳]) استفاده شده است تا مسأله اصلی به دنباله‌ای از مسایل محدب تبدیل شود که حل آن ساده بوده و با ابزارهای موجود، مانند CVX متلب، قابل حل باشد. نتایج شبیه‌سازی کارامدی سیستم پیشنهادی را در شرایط مختلف نشان داده است.

مدل سیستمی

سیستم مخابراتی در نظر گرفته شده شامل یک UAV و ۳ نود است که یکی از آنها فرستنده و دو نود دیگر گیرنده هستند. فرستنده می‌خواهد به صورت همزمان به هر دو گیرند ارسال اطلاعات داشته باشد. فرستنده و گیرنده‌های مورد نظر به قدری از یکدیگر دور هستند که امکان تبادل اطلاعات به صورت مستقیم بین آنها میسر نیست. در نتیجه، از یک UAV به عنوان رله DF در شبکه استفاده می‌شود تا به ارسال اطلاعات از فرستنده به گیرنده کمک کند.

فرض می‌کنیم که UAV در یک خط مستقیم از سمت فرستنده به طرف گیرنده ها در حرکت است. ارتفاع UAV ثابت و برابر H متر است که با سرعت ثابت V متر بر ثانیه حرکت می‌کند. هنگامی که UAV از روی فرستنده حرکت می‌کند، از فرستنده اطلاعاتی که باید به گیرنده‌ها ارسال شود را در بازه زمانی معین دریافت می‌کند. UAV اطلاعات دریافتی را دیکد کرده و در حافظه خود ذخیره می‌کند. هنگامی که UAV به گیرنده‌ها نزدیک شد، اطلاعات مربوط به گیرنده‌ها را به صورت همزمان با استفاده از تکنیک NOMA به هر دو گیرنده ارسال می‌کند. اطلاعات مربوط به هر گیرنده شامل دو بخش اطلاعات امن و اطلاعات عادی است. اطلاعات امن هر گیرنده باید از دید گیرنده دیگر پنهان بماند.

ارسال بین فرستنده و UAV زمانی اتفاق می‌افتد که احتمال وقوع لینک به صورت LoS بین این دو از یک حد آستانه بیشتر باشد، یعنی داشته باشیم $P_{\text{LoS}} \geq \varepsilon$ که در آن [۳]

$$P_{\text{LoS}}(\theta) = \frac{1}{1+\varphi \exp(-\text{b}(\theta-\varphi))} \qquad (۱)$$

احتمال وقوع لینک LoS هنگامی که زاویه دید فرستنده و UAV برابر θ باشد است و φ و b پارامترهای مدل احتمالی هستند. مسیری که روی آن لینک LoS ایجاد می‌شود به قطعات مساوی تقسیم می‌شود. فرض می‌شود بهره کانال روی هر قطعه ثابت است. فرستنده روی هر قطعه مسیر، اطلاعات را با توان ثابت ارسال می‌کند. در مورد بهره کانال، ما فقط اثر افت مسیر را در نظر می‌گیریم که به صورت

$$\eta_{r,j} = \frac{B_0}{d_{r,j}^2} \times (p_{LoS}(\theta) + \eta_{NLoS} \times p_{NLoS}(\theta)) \qquad (۲)$$

مدل می‌شود. فرض می‌شود که فرستنده برای ارتباط با UAV میزان محدود انرژی U_T در اختیار دارد و روی هر قطعه مسیر i مقدار $\text{u}_\text{S}(\text{i})$ انرژی مصرف می‌کند. در نتیجه میزان اطلاعاتی که روی هر قطعه مسیر به UAV ارسال می‌شود برابر خواهد بود با $t_i \log(1+\frac{p_{S,i} \times \eta_{r,S,i}}{N_{r,S}})$ و میزان کل اطلاعاتی که روی مسیر به UAV ارسال می‌شود برابر خواهد بود با $R_S = \sum_{i=0}^{M} t_i \log(1+\frac{p_{S,i} \times \eta_{r,S,i}}{N_{r,S}})$ که شامل اطلاعات عادی و اطلاعات امن مربوط به هر دو گیرنده است. همچنین فرض می‌شود که UAV با باطری‌های خورشیدی مجهز شده است که در قطعه مسیر i میزان انرژی برابر E_i دریافت نموده و در باطری خود برای مصارف بعدی ذخیره می‌نماید.

هنگامی که UAV به گیرنده‌ها نزدیک می‌شود، فرصت ارسال اطلاعات به گیرنده‌ها را با استفاده از تکنیک NOMA دارد. همانند مرحله قبل، فرض می‌شود که UAV زمانی اقدام به ارسال اطلاعات به سمت گیرنده‌ها می‌کند که لینک LoS ایجاد شود. همچنین، مسیری که روی آن ارسال اطلاعات انجام می‌شود به تعدادی قطعه مسیر با طول یکسان تقسیم می‌شود. فرض می‌شود که هنگامی که کانال UAV به گیرنده D_1 از کانال بین UAV و گیرنده D_2 بهتر باشد، UAV اقدام به ارسال اطلاعات امن به گیرنده D_1 و ارسال اطلاعات معمولی به گیرنده D_2 می‌کند. با توجه به اینکه فقط اثر افت مسیر در نظر گرفته شده است، شرایط کانال فقط به فاصله بین فرستنده و گیرنده ربط خواهد داشت. در واقع، زمانی که UAV به گیرنده D_1 نزدیکتر از گیرنده D_2 باشد، کانال بین UAV و گیرنده D_1 شرایط بهتری دارد. در این حالت، گیرنده D_1 می‌تواند اطلاعات مربوط به گیرنده D_2 را دیکد کند، سیگنال دیکده شده را از سیگنال دریافتی کم کند، و سپس اقدام به دیکد کردن اطلاعات مربوط به خود نماید. ظرفیت کانال بین UAV و گیرنده D_1 روی قطعه مسیر i برابر $\log(1+\frac{p_{D_1,i}^{secure} \times \eta_{r,D_1,i}}{N_{r,D_1}})$ و ظرفیت شنود

---

[۲۱] Overflow
[۲۲] Non-Convex
[۲۳] Successive Convex Approximation

کانال بین UAV و گیرنده D_2 برای شنود اطلاعات مربوط به گیرنده D_1 برابر $\log(1+\frac{p^{secure}_{D_1,i}\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{r,D_2}})$ خواهد بود.

با فرض اینکه زمان ارسال روی قطعه مسیر i برابر t_i ثانیه باشد، میزان اطلاعات امن ارسالی به گیرنده D_1 روی مسیر حرکت برابر

$$R^{secure}_{D_1}= \sum_{i=0}^{M} t_i \log(1+\frac{p^{secure}_{D_1,i}\times\eta_{r,D_1,i}}{N_{r,D_1}}) - \sum_{i=0}^{M} t_i \log(1+\frac{p^{secure}_{D_1,i}\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{r,D_2}}) \quad (۳)$$

خواهد بود که در آن N_{r,D_i} توان نویز در گیرنده D_i است. علاوه بر اطلاعات امن مربوط به گیرنده D_1، UAV اقدام به ارسال همزمان اطلاعات مربوط به گیرنده D_2 می‌نماید. در این حالت سیگنال مربوط به گیرنده D_1 به صورت تداخل عمل کرده و ظرفیت کانال بین UAV و گیرنده D_2 روی قطعه مسیر i برابر $\log(1+\frac{p^{non-secure}_{D_2,i}\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{r,D_2}+p^{secure}_{D_1,i}\times\eta_{r,D_2,i}})$ خواهد بود.

در نتیجه میزان اطلاعات عادی که برای گیرنده D_2 روی مسیر مخابراتی ارسال می‌شود برابر

$$R^{non-secure}_{D_2}= \sum_{i=0}^{M} t_i \log(1+\frac{p^{non-secure}_{D_2,i}\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{r,D_2}+p^{secure}_{D_1,i}\times\eta_{r,D_2,i}}) \quad (۴)$$

خواهد بود.

در حالتی که UAV به گیرنده D_2 نزدیکتر از گیرنده D_1 باشد، عکس حالت ذکر شده در بالا اتفاق می‌افتد. در واقع برای گیرنده D_2 اطلاعات امن ارسال می‌شود و برای گیرنده D_1 اطلاعات عادی ارسال می‌شود. روابط ظرفیت در این حالت مشابه حالت قبلی تعریف می‌شود.

در این مقاله از روش برون‌خطی[۲۴] استفاده می‌شود که فرض می‌کند پروفایل دریافت انرژی و میزان انرژی دریافتی در هر قطعه مسیر از قبل معلوم است.

تعریف مسأله بهینه‌سازی و حل آن

هدف ما در این مقاله ابداع یک روش تخصیص منابع است که در آن میزان اطلاعات ارسالی از فرستنده به گیرنده‌ها بیشینه شود و محدودیت‌های انرژی مصرفی کلی، انرژی برداشت شده، و سرریز انرژی باطری است. به زبان ریاضی، هدف حل مسأله بهینه‌سازی زیر است:

$$\max \quad R_S \quad (۱-۵)$$

$$\text{S.T.}: \quad R_S \le R_D \quad (۲-۵)$$

$$\sum_{1=0}^{M} u_S(i) \le U_T \quad (۳-۵)$$

$$\sum_{i=1}^{i} u_D(i) \le \sum_{i=0}^{i} E_r(i),\ i=1,...,M \quad (۴-۵)$$

$$\sum_{i=1}^{i+1} E_r(i) - \sum_{i=0}^{i} u_D(i) \le \beta_r^{max},\ i=1,...,M-1 \quad (۵-۵)$$

که در آن (۵-۱) تابع هدف مسأله است که میزان اطلاعات ارسالی از فرستنده به UAV است، (۵-۲) بیانگر این است که میزان اطلاعات ارسالی از فرستنده به UAV باید به گونه‌ای باشد که UAV بتواند آن را به گیرنده‌ها ارسال نماید که در آن $R_D = R^{secure}_{D_1} + R^{secure}_{D_2} + R^{non-secure}_{D_1} + R^{non-secure}_{D_2}$.

همچنین در مسأله بهینه سازی (۵)، رابطه (۵-۳) بیان می‌کند که انرژی کلی استفاده شده توسط فرستنده باید از مقدار U_T کمتر باشد، (۵-۴) بیان‌گر این است که فقط انرژی برداشت شده می‌تواند توسط UAV مصرف شود، و (۵-۵) محدودیت سرریز انرژی باطری است. فرض می‌شود که میزان انرژی اولیه $E_r(0)$ مقداری تصادفی است.

با بررسی مسأله بهینه‌سازی (۵)، متوجه می‌شویم که مسأله‌ای غیرمحدب است که حل آن بسیار پیچیده است. برای اینکه مسأله را به فرم قابل حل تبدیل کنیم، از تکنیک SCA استفاده می‌کنیم.

نکته ۱: توجه شود که در مسأله بهینه‌سازی (۵)، متغیرهای بهینه‌سازی، میزان انرژی مصرف شده توسط فرستنده برای ارسال به UAV روی قطعه مسیرهای مختلف و میزان انرژی مصرف شده توسط UAV برای ارسال به گیرنده اول و گیرنده دوم روی قطعه مسیرها است. با توجه به میزان ارنژی مصرف شده و زمان ارسال روی هر قطعه میر، توان ارسالی فرستنده و UAV بدست خواهد آمد.

نکته ۲: در تکنیک SCA، مسأله اصلی که یک مسأله غیر محدب است با یک مسأله محدب تقریب زده می‌شود. هر بار این مسأله تقریب زده شده حل می‌شود و جواب آن به عنوان نقطه تقریب برای مسأله تقریب زده شده بعدی استفاده می‌شود. مسأله تقریب زده شده، توسط ابزارهایی مانند CVX متلب قابل حل است. این دنباله مسایل تقریب زده شده محدب به صورت پشت سر هم

[۲۴] Offline

حل شده تا به یک نقطه همگرا شود. این نقطه نهایی به عنوان جواب مسأله اصلی در نظر گرفته می‌شود.

نکته ۳: روش SCA تحت شرایط ذکر شده در [۱۴] به نقطه‌ای همگرا می‌شود که شرایط K.K.T[۲۵] مسأله اصلی را برآورده می‌نماید همگرا شده و در واقع یک جواب زیربهینه[۲۶] مسأله اصلی خواهد بود.

برای تقریب محدب، از روش D.C.[۲۷] استفاده می‌کنیم. در این روش، عبارت غیرمحدب به صورت تفاضل دو عبارت مقعر نوشته می‌شود. سپس قسمتی که باعث غیرمحدب شدن عبارت اصلی می‌شود (عبارت دوم) به صورت یک عبارت خطی تقریب زده می‌شود. با نگاهی به مسأله (۵) متوجه می‌شویم که باید برای (۵-۱)و (۵-۱) از تقریب محدب‌سازی استفاده کنیم. بدین منظور، نتایج زیر را برای هر جمله موجود در این روابط خواهیم داشت. ابتدا رابطه مربوط به نرخ ارسال اطلاعات عادی گیرنده D_1 را به صورت زیر به فرم تفاضل دو جمله می‌نویسیم:

$$R_{D_1}^{non-secure} = \sum_{i=0}^{M} t_i[\log(1+\frac{(p_{D_1,i}^{non-secure}+p_{D_2,i}^{secure})\times\eta_{r,D_1,i}}{N_{r,D_1}}) - \log(1+\frac{p_{D_2,i}^{secure}\times\eta_{r,D_1,i}}{N_{r,D_1}})] \quad (۶)$$

سپس جمله دوم در رابطه (۶) را به صورت زیر تقریب می‌زنیم:

$$\log(1+\frac{p_{D_2,i}^{secure}\times\eta_{r,D_1,i}}{N_{r,D_1}}) \approx \log(1+\frac{p_{D_2,i}^{secure}[t_{p-1}]\times\eta_{r,D_1,i}}{N_{D_1,r}}) + \frac{\eta_{r,D_1,i}}{N_{D_1,i}+p_{D_2,i}^{secure}[t_p-1]\times\eta_{r,D_1,i}} \times(p_{D_2,i}^{secure}[t_p]) - p_{D_2,i}^{secure}[t_p-1]), \quad (۷)$$

که در آن t_p شماره تکرار در الگوریتم تکرار شونده است. برای دیگر جملات، مشابه روش قبلی، نتایج زیر را خواهیم داشت:

$$R_{D_2}^{non-secure} \approx \sum_{i=0}^{M} t_i[\log(1+\frac{(p_{D_2,i}^{non-secure}+p_{D_1,i}^{secure})\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{D_2,r}}) - \log(1+\frac{p_{D_1,i}^{secure}[t_p-1]\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{D_2,r}}) - \frac{\eta_{r,D_2,i}}{N_{D_2,i}+p_{D_1,i}[t_p-1]\times\eta_{r,D_2,i}} \times(p_{D_1,i}^{secure}[t_p]) - p_{D_1,i}^{secure}[t_p-1])] \quad (۸)$$

$$R_{D_1}^{secure} \approx \sum_{i=0}^{M} t_i[\log(1+\frac{p_{D_1,i}^{secure}\times\eta_{r,D_1,i}}{N_{D_1,r}}) - \log(1+\frac{p_{D_1,i}^{secure}[tp-1]\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{D_2,r}}) - \frac{\eta_{r,D_2,i}}{N_{D_2,r}+p_{D_1,i}^{secure}[tp-1]\times\eta_{r.D_2}} \times(p_{D_1,i}^{secure}[tp]-p_{D_1,i}^{secure}[tp-1])] \quad (۹)$$

$$R_{D_2}^{secure} \approx \sum_{i=0}^{M} \times t_i[\log(1+\frac{p_{D_2,i}^{secure}\times\eta_{r,D_2,i}}{N_{D_2,r}}) - \log(1+\frac{p_{D_2,i}^{secure}[tp-1]\times\eta_{r,D_1,i}}{N_{D_1,r}}) - \frac{\eta_{r,D_1,i}}{N_{D_1,r}+p_{D_2,i}^{secure}[tp-1]\times\eta_{r.D_2}} \times(p_{D_2,i}^{secure}[tp]-p_{D_1,i}^{secure}[tp-1])] \quad (۱۰)$$

همچنین R_S را به صورت زیر به فرم محدب تقریب می‌زنیم:

$$R_S \approx \sum_{i=0}^{M}[\log(1+\frac{p_{S,i}[t_p-1]\times\eta_{r,S,i}}{N_{S,r}}) - \frac{\eta_{r,S,i}}{N_{S,i}+p_{S,i}[t_p-1]\times\eta_{r,S,i}} \times(p_{S,i}[t_p]-p_{S,i}[t_p-1])] \quad (۱۱)$$

با این تقریب‌ها، مسأله اصلی با یک مسأله محدب تقریب زده می‌شود که می‌تواند به سادگی با استفاده از ابزارهای رایج حل شود.

نکته ۴: باتوجه به عبارتهای موجود در مسأله بهینه سازی پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی کم خواهد بود. در واقع می‌توان گفت پیچیدگی به صورت

[۲۵] Karush–Kuhn–Tucker
[۲۶] Sub-Optimal
[۲۷] Difference of Two Concave Functions

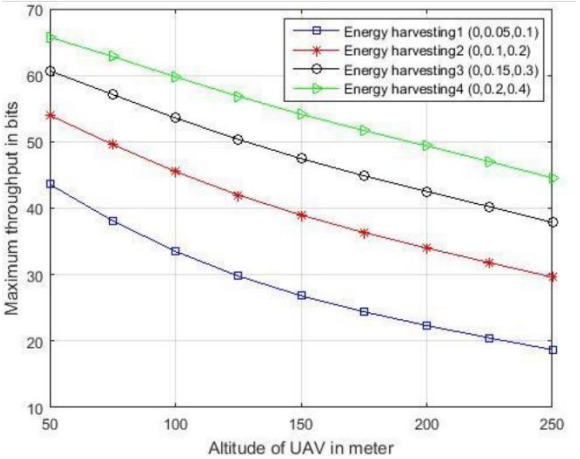
$$F = (M \times M + 2M \times M) \times X \\ = 3M^2 \times X \quad (۱۲)$$

خواهد بود که در آن X تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی الگوریتم SCA است.

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی را در مورد سیستم پیشنهادی ارایه می‌کنیم.

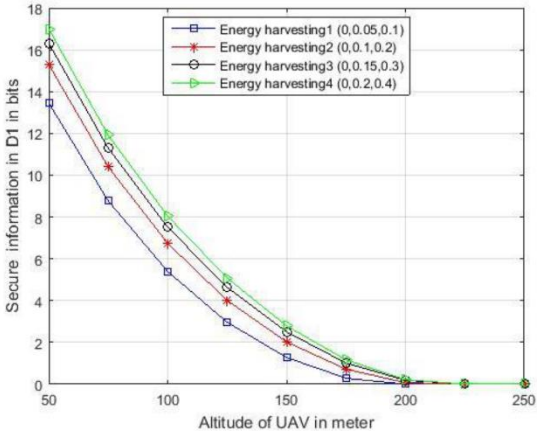
در اولین شبیه‌سازی، فرض می‌کنیم که UAV با سرعت ۱۰ متر برثانیه حرکت می‌کند و فاصله بین دو کاربر گیرنده ۹۰ متر است. مقدار کل انرژی فرستنده برابر $U_T = 200$ ژول است. مقدار ارتفاع UAV را از ۵۰ تا ۲۵۰ متر تغییر می‌دهیم و مقدار بیشینه اطلاعات ارسالی را به ازای مقادیر مختلف نرخ انرژی برداشتی در شکل ۱ رسم می‌کنیم. طول مسیر پرواز UAV را ثابت در نظر می‌گیریم. با فرض اینکه UAV در ارتفاع ۲۵۰ متری حرکت می‌کند و ارسال اطلاعات زمانی انجام می‌شود که احتمال وقوع لینک LoS بیشتر از ۰,۹ باشد، طول مسیر پروازی UAV و نقطه شروع و پایان پرواز را تعیین می‌کنیم. فرض می‌کنیم که UAV در ارتفاع‌های متفاوت پرواز کرده در حالی که مسیر پرواز آن ثابت و برابر مقدار تعیین شده در ارتفاع ۲۵۰ متری است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع UAV میزان نرخ ارسالی نیز کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش ارتفاع، فاصله UAV با نودهای زمینی افزایش یافته و بهره کانال کم می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ انرژی برداشتی، میزان نرخ ارسالی افزایش می‌یابد.



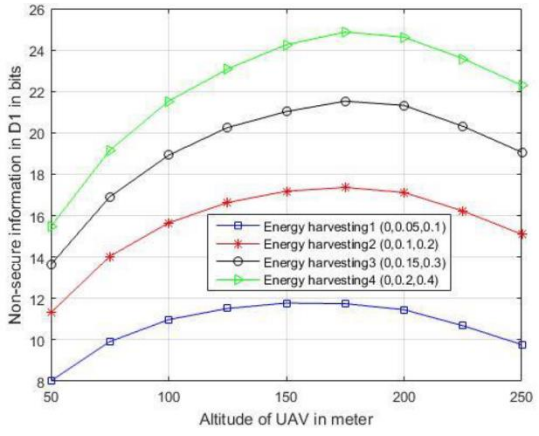
شکل ۱. بیشینه اطلاعات ارسالی برحسب ارتفاع UAV به ازای مقادیر مختلف نرخ برداشت انرژی

علاوه بر بیشینه نرخ ارسالی، در شکل ۲، نرخ امن[۲۸] مربوط به گیرنده اول، یعنی D_1 رسم شده است. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش ارتفاع، نرخ امن گیرنده اول کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش ارتفاع، فاصله دو گیرنده از UAV تقریبا برابر شده و بهره کانال آنها به هم نزدیک می‌شود. در این حالت، ظرفیت کانال بین UAV و گیرنده اول و ظرفیت کانال بین UAV و گیرنده دوم تقریبا برابر شده و تفاضل آنها که همان نرخ امن است به صفر میل می‌کند.

در شکل ۳، میزان اطلاعات عادی ارسالی به گیرنده اول بر حسب ارتفاع UAV رسم شده است. مشاهده می‌شود که مقدار اطلاعات عادی ارسالی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که در ارتفاع‌های پایین اثر افزایش احتمال LoS در بهره کانال بیشتر از اثر افزایش فاصله است به گونه‌ای که در مجموع ظرفیت کانال‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع، اثر افزایش ارتفاع بر افزایش احتمال LoS غلبه کرده و باعث می‌شود که بهره کانال‌ها کم شده و در نتیجه میزان اطلاعات عادی ارسالی کاهش یابد.



شکل ۲. میزان اطلاعات امن ارسالی به گیرنده اول برحسب ارتفاع UAV



شکل ۳. میزان اطلاعات عادی ارسالی به گیرنده اول برحسب ارتفاع UAV

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل شبکه بی‌سیم جدید ارایه کردیم که در آن از UAV به عنوان رله دیکد و ارسال جهت افزایش کارامدی استفاده از منابع شبکه استفاده شده بود. در سیستم پیشنهادی، UAV انرژی مورد نیاز خود را از سیستم‌های برداشت انرژی خورشیدی تأمین میکرد. در شبکه مورد نظر یک فرستنده و دو

[۲۸] Secrecy Rate

گیرنده وجود داشت که UAV اطلاعات مربوطه به دو گیرنده را از فرستنده دریافت می‌کرد و پس از رسیدن به گیرنده‌ها، این اطلاعات را با استفاده از تکنیک NOMA به صورت همزمان به دو گیرنده ارسال می‌کرد. دو نوع اطلاعات عادی و امن برای کاربران ارسال میشد. هدف بیشینه کردن نرخ کاربران تحت محدودیت انرژی فرستنده، علی بودن انرژی مصرفی UAV، سرریز باطری UAV، و علی بود ارسال اطلاعات بود. مسأله پیشنهادی غیر محدب بود که برای حل آن از روش تقریب متوالی محدب استفاده کردیم. با استفاده از شبیه‌سازی، کارایی سیستم پیشنهادی را در شرایط مختلف بررسی کردیم.

مراجع

[1] Y. Zeng, R. Zhang, T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, April 2016.

[2] Y. Kawamoto, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono, R. Miura, "Toward future unmanned aerial vehicle networks: Architecture, resource allocation and field experiments," To appear in IEEE Wireless Communications, 2019.

[3] M. Alzenad, A.r El-Keyi, F. Lagum, H.m Yanikomeroglu, "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 6, no. 4, pp. 434-437, 2017.

[4] M.-N. Nguyen, L. D. Nguyen, T. Q. Duong, H. D. Tuan, "Real-time optimal resource allocation for embedded UAV communication systems," To appear in IEEE Wireless Communications Letters, 2019.

[5] T. M. Nguyen, W. Ajib, C. Assi, "A novel cooperative NOMA for designing UAV-assisted wireless backhaul networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, no. 11, pp. 2497-2507, 2018.

[6] S. Yin, Y. Zhao, L. Li, "Resource allocation and basestation placement in cellular networks with wireless powered UAVs," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 1, pp. 1050-1055, 2019.

[7] L. Xie, J. Xu, R. Zhang, "Throughput maximization for UAV-enabled wireless powered communication networks," To appear in IEEE Internet of Things Journal, 2019.

[8] M. Hua, Y. Wang, C. Li, Y. Huang, L. Yang, "Energy-efficient optimization for UAV-aided cellular offloading," To appear in IEEE Wireless Communications Letters, 2019.

[9] Y. Xu, L. Xiao, D.g Yang, Q. Wu, L. Cuthbert, "Throughput maximization in Multi-UAV enabled communication systems with difference consideration," IEEE Access, vol. 6, pp. 55291-55301, 2018.

[10] C. Zhong, J.g Yao, J. Xu, "Secure UAV communication with cooperative jamming and trajectory control," To appear in IEEE Communications Letters, 2019.

[11] D.-T. Ho, E. I. Grøtli, T. A. Johansen, "Heuristic algorithm and cooperative relay for energy efficient data collection with a UAV and WSN," in 2013 International Conference on Computing, Management and Telecommunications (ComManTel), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2019, pp. 346-351.

[12] G. Zhang, H. Yan, Y. Zeng, M. Cui, Y. Liu, "Trajectory optimization and power allocation for multi-hop UAV relaying communications," IEEE Access, vol. 6, pp. 48566-48576, 2018.

[13] X. Jiang, Z. Wu, Z. Yin, Z. Yang, "Power and trajectory optimization for UAV-enabled amplify-and-forward relay networks," IEEE Access, vol. 6, pp. 48688-48696, 2018.

[14] M. Chiang, C. W. Tan, D. P. Palomar, D. O'Neill, and D. Julian, "Power control by geometric programming," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 6, no. 7 pp. 2640-2651, 2007.