

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم

بهبود راندمان شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر پهنای باند اساس مسیر حرکت پرنده و توان مصرفی شبکه

نگارنده: صدیقه نصرالهی

استاد راهنما:

دکتر سید مسعود میررضایی

مهر ۱۴۰۰

شماره: ۱۸۳۷، ۱۰۰۰

تاریخ: ۱۴۰۰، ۷، ۲۸

ویرایش: —

باسمه تعالی

فرم های ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳): صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم صدیقه نصرالهی کوزانی شماره دانشجویی ۹۶۳۶۰۶۴ رشته مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم تحت عنوان: بهبود راندمان شبکه های مخابراتی مبتنی بر پهباد بر اساس مسیر حرکت پرنده و توان مصرفی شبکه که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☒ نوع تحقیق: نظری	☐ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر سید مسعود میرزایی	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر هادی گرایلو	استادیار	
استاد ممتحن اول	دکتر امیدرضا معروضی	استادیار	
استاد ممتحن دوم	دکتر محمد رضا جوان	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده مهندسی برق

دکتر حسین خسروی

تصوه در صورتی که کسی مردود شود حفاکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) میتواند برای دفاع مجدد (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

این پایان نامه را تقدیم می‌کنم به مهربانترین، همراهان زندگیم، پدر، مادر، همسر عزیزم و آنان که

انسانیت و علم اندوزی را به من آموختند

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهبانی اساتید کرامت قدوم موفق به اتمام این پایان نامه شده ام و وظیفه خود دانسته که
نهایت سپاسگزاری و قدردانی را از تمامی عزیزانی که حمایت های همه جانبه شان د لکرم کننده و یاری رسان من بود، به عل
آورم:

در آغاز لازم است از آموزگاران حقیقی زندگی ام یعنی پدر و مادر عزیزم به خاطر پشتیبانی های بی شکستی، تشویق به علم
آموزی و محبت های دلسوزانه شان تشکر کنم.

از همسر عزیزم که همواره همراه بود و همدل و کمک ها و محبت های بی بدیل، ممنونم.

از استاد بزرگ جناب آقای دکتر سید معود میررضایی

که راهبانی این پایان نامه را به عهده داشته اند کمال تشکر را دارم.

از داوران گرامی جناب دکتر معروضی و دکتر جوان که زحمت تصحیح و نقد و بهبود کیفیت این پایان نامه را متقبل
شدند، نهایت سپاس را دارم.

و در نهایت ممنون و مدیون کسانی، هستم که در طول زندگی و در مقاطع مختلف تحصیلی از آن ها آموخته ام.

تعمدنامه

اینجانب **صدیقه نصراله‌هی** کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم دانشکده مهندسی برق و رباتیک

دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه بهبود راندمان شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر پهنای

اساس مسیر حرکت پرنده و توان مصرفی شبکه تحت راهنمایی دکتر سید مسعود میررضایی‌متعهد

می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

این پایان نامه در طرح گزینش جوانان وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
در قالب کد اعتباری ۱۹۷۰۰۰۱-۹۹-۱۶ مورد حمایت قرار گرفته است.

چکیده

در شبکه‌های ارتباطی بیسیم، استفاده از رله‌ها یا واسطه‌های مخابراتی یکی از عوامل مهم در بهبود عملکرد سیستم است. در واقع رله‌ها می‌توانند نقش موثری در افزایش نرخ ارسال داده و همچنین بهبود توان سیستم داشته باشند. در این پایان نامه وسایل نقلیه‌ی بدون سرنشین¹ (UAVها) یا پرنده‌های هدایت پذیر (پهپادها) به عنوان واسطه‌های مخابراتی در نظر گرفته شده‌اند. در واقع هدف از پژوهش پیش‌رو استفاده از قابلیت تحرک پهپاد به عنوان رله است. از آنجایی که پهپادها دارای باتری‌هایی با ظرفیت محدود هستند، مساله به صورت یافتن مسیر بهینه برای پهپاد با کمترین مصرف توان برای مجموعه در حالیکه بیشترین نرخ ارسال را برای هر ارتباط فراهم کند، تعریف می‌شود. برای یافتن مسیر بهینه و توان، شاخصی مانند نرخ ارسال داده را برای دو طرح یک زوج کاربر و چند زوج کاربر بررسی کردیم. در بیان مساله به این شیوه، هدف بیشینه کردن نرخ ارسال داده در یک یا چند لینک ارتباطی بین فرستنده و گیرنده‌ی k ام با قیودی که روی توان پهپاد و مبدا و مسیر حرکت پهپاد گذاشته می‌شود، است. لذا با یک مساله‌ی بهینه سازی مقید مواجه هستیم که غیر محدب می‌باشد. از آنجا که حل مسائل بهینه سازی غیر محدب دشوار بوده، مساله‌ی اصلی را با ثابت در نظر گرفتن برخی قیود به چند زیر مساله تبدیل کردیم و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی محدب پی در پی² که مبتنی بر تکرار است، زیر مساله‌ها را حل کرده و با حل متوالی آن‌ها به جوابی برای مساله‌ی اصلی رسیدیم. نتایج شبیه سازی نشان دهنده‌ی کارایی الگوریتم پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: رله‌ی پهپادی، پهپاد، بهینه سازی محدب پی در پی، مسیر بهینه، تخصیص توان، غیر محدب، نرخ ارسال داده

¹ Unmanned Aerial Vehicle

² Successive Convex Optimization

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

مقالات ژورنالی:

Nasrollahi, S., Mirrezaei, S.M. Toward UAV-based communication: improving throughput by optimum trajectory and power allocation. J Wireless Com Network 2022, 9 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13638-022-02087-6>

مقالات کنفرانسی:

۱. نصرالهی، صدیقه و میررضایی، سید مسعود، ۱۴۰۰، بهبود راندمان شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر پهنپاد بر اساس مسیریابی و تخصیص توان بهینه، پنجمین کنفرانس مهندسی مخابرات ایران، شاهرود

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- اهداف پایان نامه
۴	۳-۱- ساختار پایان نامه
۵	فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته
۶	۱-۲- مقدمه
۶	۲-۲- معرفی کلی پهپاد
۶	۱-۲-۲- ساختار پهپاد
۹	۲-۲-۲- تاریخچه پهپاد
۹	۳-۲- کارهای انجام شده در حوزه شبکه‌های مبتنی بر پهپاد
۱۰	۱-۳-۲- استفاده از پهپاد به عنوان جمع کننده داده
۱۲	۲-۳-۲- انتقال توان بیسیم با استفاده از پهپاد
۱۴	۳-۳-۲- کاهش انرژی برای شبکه‌های بیسیم با پهپادهای با بال متحرک
۱۷	۴-۳-۲- نقش پهپاد در ارتباطات دستگاه با دستگاه (D2D)
۱۷	۱-۴-۳-۲- پهپاد در نقش ایستگاه پایه‌ی سیار
۲۱	۲-۴-۳-۲- پهپاد در نقش منبع انرژی با استفاده از تکنیک برداشت انرژی
۲۴	۵-۳-۲- نقش پهپاد در شبکه‌های اضطراری در مواقع بحران
۲۷	۶-۳-۲- بهبود امنیت اطلاعات در شبکه‌های مبتنی بر پهپاد
۳۰	۷-۳-۲- پهپاد در شبکه‌های OFDMA
۳۱	۸-۳-۲- پهپاد به عنوان رله‌ی ارتباطی
۳۷	۹-۳-۲- استفاده از چند پهپاد برای پوشش دهی کاربران زمینی
۳۹	۴-۲- نتیجه‌گیری
۴۱	فصل ۳: مفاهیم پایه و ارائه‌ی راهکارهای جدید
۴۲	۱-۳- مقدمه
۴۲	۲-۳- مروری بر مفاهیم پایه‌ی بهینه سازی

۴۳	 تعاریف ۱-۲-۳
۴۴	 روش‌های تشخیص محدب بودن تابع ۲-۲-۳
۴۶	 بیان مساله ۳-۳
۴۶	 طرح یک زوج کاربر ۱-۳-۳
۵۰	 طرح چند زوج کاربر ۲-۳-۳
۵۳	 حل مساله ۴-۳
۵۴	 الگوریتم حل مساله‌ی یک زوج کاربر ۱-۴-۳
۵۸	 الگوریتم حل مساله‌ی چند زوج کاربر ۲-۴-۳
۶۳	 شبیه سازی ۵-۳
۶۳	 پارامترهای شبیه سازی ۱-۵-۳
۶۴	 نتایج شبیه سازی ۲-۵-۳
۷۸	 نتیجه گیری ۶-۳
۷۹	فصل ۴: نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۰	 نتیجه گیری ۱-۴
۸۱	 پیشنهادهایی برای کارهای آینده ۲-۴
۸۲	 مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) اجزای اصلی یک سیستم پهپاد [۱]..... ۷
- شکل (۲-۲) پهپاد در نقش ایستگاه پایه [۲]..... ۸
- شکل (۳-۲) کاربرد پهپاد در مواقع بحران [۳]..... ۸
- شکل (۴-۲) یک سیستم مخابراتی بیسیم G2U با مسیرهای پرواز دایره‌ای و مستقیم [۵]..... ۱۱
- شکل (۵-۲) مصالحه‌ی انرژی ترمینال زمینی و پهپاد با مسیر دایروی و $P_c = 50mW$ یا $10mW$ [۵]..... ۱۱
- شکل (۶-۲) مصالحه‌ی انرژی ترمینال زمینی و پهپاد با مسیر مستقیم و با $Q = 30Mb$ و $Q = 100 Mb$ [۵]..... ۱۲
- شکل (۷-۲) ماکزیمم توان متوسط دریافتی در هر ER نسبت به زمان شارژ وقتی که $K=10$ [۷]..... ۱۴
- شکل (۸-۲) شبکه‌ی مخابراتی بیسیم با پهپاد بال متحرک [۱۰]..... ۱۵
- شکل (۹-۲) مسیر بهینه‌ی پهپاد در سه طرح مختلف با حجم داده‌ی ۱۰۰۰ مگابیت [۱۰]..... ۱۷
- شکل (۱۰-۲) مدل شبکه شامل یک پهپاد و تعدادی DU و کاربر D2D [۱۴]..... ۱۹
- شکل (۱۱-۲) مساله‌ی disk covering با ۵ دیسک [۱۴]..... ۲۰
- شکل (۱۲-۲) نرخ سیستم بر حسب تعداد جفت‌های D2D در هر متر مربع [۱۴]..... ۲۱
- شکل (۱۳-۲) مدل harvest-transmit-store برای شبکه‌ی ارتباطی D2D تغذیه شده با روش برداشت انرژی با ۳ جفت D2D [۱۸]..... ۲۲
- شکل (۱۴-۲) متوسط راندمان بر حسب طول زمان‌های متفاوت [۱۸]..... ۲۳
- شکل (۱۵-۲) شبکه‌ی اضطراری مبتنی بر پهپاد در مواقع بحران [۲۳]..... ۲۵
- شکل (۱۶-۲) مقایسه‌ی نرخ مجموع سیستم در حالت بهینه شده با رندم با تعداد آنتنهای مختلف [۲۴]..... ۲۶
- شکل (۱۷-۲) مسیر بهینه شده‌ی پهپاد برای دو کاربر [۲۵]..... ۲۷
- شکل (۱۸-۲) توان بهینه شده‌ی پهپاد و ایستگاه پایه [۲۵]..... ۲۷
- شکل (۱۹-۲) مدل سیستم استراق سمع با رله‌ی پهپادی [۲۸]..... ۲۸
- شکل (۲۰-۲) مقایسه‌ی مخفی کاری سیستم بر حسب نویزهای مختلف در لینک استراق سمع کننده [۲۸]..... ۲۹
- شکل (۲۱-۲) متوسط نرخ مخفی کاری بر حسب T [۲۹]..... ۳۰

- شکل (۲-۲۲) ماکزیمم بازدهی بر حسب MRR [۳۰] ۳۱
- شکل (۲-۲۳) مدل هندسی سیستم با رله‌ی AF مبتنی بر پهنپاد [۳۸] ۳۳
- شکل (۲-۲۴) مسیر بهینه‌ی پهنپاد [۳۹] ۳۴
- شکل (۲-۲۵) طرح مسیر پهنپاد [۴۱] ۳۵
- شکل (۲-۲۶) مسیر بهینه‌ی پهنپاد برای زمانهای مختلف [۴۲] ۳۶
- شکل (۲-۲۷) مسیر بهینه‌ی پهنپاد حول سه سلول همسایه [۴۳] ۳۷
- شکل (۲-۲۸) مسیر بهینه‌ی پهنپاد برای سیستم دو پهنپادی [۴۶] ۳۸
- شکل (۲-۲۹) پوشش دهی کل بر حسب تعداد پهنپادها [۴۸] ۳۹
- شکل (۳-۱) مجموعه‌ی محدب در چپ و مجموعه‌ی غیر محدب در راست [۴۸] ۴۴
- شکل (۳-۲) نمودار تابع محدب [۴۸] ۴۴
- شکل (۳-۳) ترسیم تابع محدب با شرایط مرتبه اول [۴۸] ۴۵
- شکل (۳-۴) مدل سیستم با رله‌ی پهنپادی با یک زوج کاربر ۴۷
- شکل (۳-۵) مدل سیستم با رله‌ی پهنپادی با چندزوج کاربر ۵۱
- شکل (۳-۶) نتایج تخصیص توان در حالت یک زوج کاربر با مسیر ثابت ۶۵
- شکل (۳-۷) نسبت سیگنال به نویز و نرخ اطلاعات بهینه در حالت تخصیص توان با مسیر ثابت برای یک زوج کاربر ۶۶
- شکل (۳-۸) مقدار تابع هدف بر حسب تکرارهای مختلف در حالت یک زوج کاربر با مسیر ثابت ۶۶
- شکل (۳-۹) مولفه‌ی x بهینه شده در حالت یک زوج کاربر با توان ثابت در تکرارهای مختلف ۶۷
- شکل (۳-۹) مسیر همگرا شده برای حالت یک زوج کاربر با توان ثابت ۶۸
- شکل (۳-۱۰) مقدار تابع هدف بر حسب تکرار برای حالت یک زوج کاربر با توان ثابت ۶۹
- شکل (۳-۱۱) نرخ اطلاعات بهینه برای بهینه سازی مسیر در حالت یک زوج کاربر با توان ثابت ۶۹
- شکل (۳-۱۲) مسیر بهینه برای حالت یک زوج کاربر با بهینه سازی همزمان توان و مسیر ۷۰
- شکل (۳-۱۳) تخصیص توان بهینه برای حالت یک زوج کاربر با بهینه سازی همزمان مسیر و توان ۷۱
- شکل (۳-۱۴) نرخ اطلاعات با سنایوهای مختلف مسیر و توان ۷۲
- شکل (۳-۱۵) نحوه‌ی تخصیص زمانی بهینه برای ۵ زوج کاربر در ۱۰۰ بازه‌ی زمانی ۷۳

- شکل (۳-۱۶) ورودی و خروجی‌های زیر مساله‌ی دوم ۷۴
- شکل (۳-۱۷) مسیر بهینه‌ی پهباد برای زمان ۱۰۰ ثانیه با α مشخص و توان ثابت ۱۰ میلی وات ۷۵
- شکل (۳-۱۸) خروجی‌های بدست آمده از الگوریتم کلی ۷۶
- شکل (۳-۱۹) مسیر بهینه‌ی پهباد برای زمانهای پرواز مختلف ۷۷
- شکل (۳-۲۰) نرخ اطلاعات بر اساس سناریوهای مختلف مسیر ۷۷

فهرست جداول

- جدول (۲-۱) تعداد و شعاع دیسک‌ها در مساله‌ی disk covering ۲۰

علامہ اختصاری

UAV	Unmanned Aerial Vehiecle
LOS	Line Of Sight
NLOS	None Line Of Sight
BS	Base Station
AF	Ampify and Forward
DF	Decode and Forward
SNR	Signal to Noise Ratio
SCO	Successive Convex Optimization
D2D	Device to Device
QOS	Quality Of Service
IoT	Internet Of Things
HAP	High Altitude Platform
LAP	Low Altitude Platform
GN	Ground Node
AP	Access Point
WPT	Wireless Power Transfer
TSP	Travelling Salesman Problem
SPR	Shortest Path Rating
PSO	Particle Swarm Optimization
TDMA	Time Division Multiple Access
DU	Downlink User

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- مقدمه

در سیستم‌های مخابرات بیسیم، استفاده از رله به عنوان یک روش موثر برای بهبود راندمان و قابلیت اطمینان سیستم به شمار می‌رود. به علت محدودیت‌های کاربردی مانند تحرک محدود گره‌ها و سیمی بودن سیستم‌های پشتیبانی، بیشتر روش‌های رله گذاری موجود مبتنی بر رله‌های با مکان ثابت یا رله‌های استاتیک^۱ هستند. یک روش جدید رله گذاری به نام رله گذاری متحرک^۲ ارائه شده است که در آن گره‌های رله قابلیت تحرک با سرعت نسبتا بالایی دارند. برای تحقق چنین رله‌هایی می‌توان به عنوان مثال از وسایل نقلیه‌ی هوایی استفاده کرد. امروزه استفاده از چنین رله‌هایی به دلیل کاهش هزینه‌ها و همچنین کوچک سازی ادوات در تجهیزات مخابراتی پیشرفت گسترده‌ای داشته است.

در مقایسه با سیستم رله گذاری ثابت مرسوم، رله‌ی متحرک دارای چند مزیت اساسی است. به عنوان مثال سیستم‌های با رله‌ی متحرک، سیستم‌هایی مبتنی بر تقاضا هستند و می‌توانند در صورت اعلام نیاز به سرعت مستقر شوند که این ویژگی آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای اضطراری و غیر منتظره و همچنین کاربردهای نظامی برجسته می‌کند. علاوه بر این، تنظیم پویای مکان رله‌ها به گونه‌ای که با محیط ارتباطی متناسب باشد، فرصت‌های جدیدی را برای بهبود عملکرد سیستم فراهم می‌کند.

پرنده‌های هدایت پذیر یا پهپادها به دلیل برخورداری از لینک ارتباطی با خط دید مستقیم (LOS^۳) نقش مهمی را به عنوان رله بین ترمینال‌های زمینی در شبکه‌های ارتباطی بیسیم ایفا می‌کند. چنین رله‌هایی برای مواقعی که گره مبدا و مقصد دور از هم هستند یا مانعی چون کوه یا ساختمان بلندی میان آن‌ها قرار دارد، مناسب می‌باشند. علاوه بر رله، از پهپادها در کاربردهایی چون پخش اطلاعات، جمع آوری داده و به عنوان ایستگاه پایه نیز استفاده می‌شود. بسته به مکانیزم پروازی، دو نوع پهپاد در نظر می‌گیرند: پهپادهای با بال ثابت و پهپادهای با بال دوار. پهپادهای با بال متحرک در مقایسه با پهپادهای با بال ثابت می‌توانند به طور عمودی بلند شده و فرود بیابند، لذا قابلیت استقرار بهتری

¹ Static relaying

² Mobile relaying

³ Line-of-sight

دارند. در سیستم‌های پهنپادی با بال متحرک انتخاب مکان پهنپاد و تخصیص منابع مخابراتی مانند توان ارسالی نقش مهمی را در عملکرد سیستم دارند.

۱-۲- اهداف پایان نامه

در این پایان نامه سناریوهایی در نظر گرفته شده است که یک و چند زوج از کاربرهای زمینی که به دلیل وجود مانعی سخت یا فاصله‌ی زیاد از هم لینک ارتباطی مستقیم ندارند، متقاضی برقراری ارتباط هستند. برای تحقق این ارتباط‌های اولویت دار، پهنپاد نقش رله‌ی واسط بین فرستنده و گیرنده را ایفا می‌کند. در واقع هدف این است که از پهنپاد در نقش رله برای مدیریت بحران استفاده کنیم. منظور از مدیریت بحران شرایطی است که به دلیل بلایای طبیعی مانند سیل یا زلزله، زیرساخت‌های مخابراتی آسیب دیده‌اند یا گره‌های مبدا و مقصد به دلیل فاصله‌ی زیاد یا وجود مانع قادر به برقراری ارتباط نیستند، که در این مواقع پهنپادها با ایجاد کانال با خط دید مستقیم بین خود و فرستنده و گیرنده این امکان را بوجود می‌آورند.

هر چند که استفاده از پهنپادها موجب بهبود عملکرد شبکه‌ی مخابراتی مورد نظر و افزایش ناحیه‌ی پوشش‌دهی می‌شود، اما چالش‌های اندکی را به همراه دارد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به تغییر پیکربندی شبکه و کانال و تعیین آرایش پهنپادها، وجود هم زمان پهنپاد و سلول‌های کوچک، محدودیت انرژی و مدیریت تداخل‌ها اشاره کرد. در این پایان نامه، تنها کانال با خط دید مستقیم را در نظر گرفته و احتمال کانال^۱ NLoS را صفر قرار داده ایم. در کاربرد مورد بررسی ما، چالش اصلی ظرفیت محدود باتری‌های موجود در پهنپاد است. لذا باید الگوریتمی ارائه داد که در آن مسیر حرکت و توان مصرفی مجموعه، هنگامی که تعدادی از زوج گره‌های زمینی نیازمند برقراری ارتباط هستند، بهینه شود با توجه به این که شاخص‌های ارتباطی و پوشش‌دهی رعایت شده و در حد قابل قبولی باقی بماند. بدین منظور روی بیشینه سازی شاخص نرخ ارسال متمرکز می‌شویم و قیدهایی را نیز برای توان مصرفی مجموعه و مسیر حرکت پرنده لحاظ می‌کنیم. مساله‌ی حاصل یک مساله‌ی غیر

¹ None-Line of Sight

محدب است که با الگوریتم‌های تکراری و جعبه ابزارهای بهینه‌سازی در نرم افزار متلب به حل آن می‌پردازیم که در فصل‌های بعدی تشریح خواهیم کرد. خروجی‌های بدست آمده برای مسیر و توان پهپاد، نشان از بهینگی الگوریتم پیشنهادی دارد.

۱-۳- ساختار پایان نامه

در فصل دوم (مروری بر کارهای گذشته) توضیحی مختصر در مورد پهپاد ارائه خواهیم داد و سپس به سیر استفاده از پهپاد در کاربردهای مختلف خواهیم پرداخت. در این فصل مطالعات و پژوهش‌های انجام شده روی مسیریابی بهینه‌ی پهپاد را از دو جهت بررسی خواهیم نمود که در دسته‌ی اول عبور از تعدادی گره زمینی و در دسته‌ی دوم ارتباط زوج کاربر مد نظر است.

در فصل سوم (مفاهیم پایه و ارائه‌ی راهکارهای جدید) ابتدا به تعریف مفاهیم پایه‌ی مسائل بهینه‌سازی محدب و غیر محدب جهت درک مساله‌ی بهینه‌سازی مورد نظر خواهیم پرداخت و سپس مساله‌ی اصلی را ابتدا برای یک زوج کاربر تعریف کرده و پس از ارائه‌ی تحلیل‌ها به چند زوج تعمیم می‌دهیم. در مساله‌ی اصلی چند کاربر زمینی تعریف کرده که می‌خواهند دو به دو ارتباط برقرار کنند و این ارتباط‌ها نیز دارای اولویت می‌باشد. پهپاد نقش رله‌ی ارتباطی بین هر زوج را ایفا کرده و در ارتفاع ثابت و با سرعت ثابت در حال حرکت است. اینکه پهپاد کجا قرار بگیرد تا کمترین توان مصرف شده و بیشترین نرخ ارسال را نیز داشته باشیم با حل مساله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده مشخص می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به تفکیک مکان پهپاد در دو بعد X و Y و همچنین توان و نرخ در این فصل آورده شده است.

در فصل چهارم (نتیجه‌گیری و پیشنهادات) به جمع بندی کلی از آنچه در حوزه‌ی شبکه‌های مخابراتی بیسیم مبتنی بر پهپاد انجام شده و نتایج پژوهش انجام شده خواهیم پرداخت و پیشنهادهایی را برای ادامه‌ی کار ارائه خواهیم داد.

فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مقدمه

در مخابرات بیسیم استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین به یک تکنولوژی جدید برای دست یابی به پوشش دهی در نواحی ای که ساختار زمینی کافی وجود ندارد، بدل شده است. تلاش‌های اولیه روی استفاده از پلتفرم‌های با ارتفاع بالا (^۱HAPS) که در ارتفاع حدود ۲۰ کیلومتر در استراتوسفر مستقر شده‌اند، تمرکز داشته است. اخیراً در مخابرات بیسیم از پلتفرم‌های با ارتفاع کم (^۲LAPS) که در ارتفاع حدود چند کیلومتر از سطح زمین قرار دارند، استفاده می‌شود. LAPها به شکل‌های مختلفی چون *helikite* و پهپاد ساخته می‌شوند. به طور کلی در مقایسه با سایر راه حل‌های هواپرد مانند HAPها و *helikite*ها، شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر پهپاد مزایای بیشتری دارند که از جمله‌ی آن می‌توان به استقرار سریع و بر اساس تقاضا، برخورداری از لینک ارتباطی بهتر در کانال با خط دید مستقیم با گره‌های زمینی و انعطاف پذیری بالاتر شبکه با توجه به کنترل جابجایی پرنده در سه بعد اشاره کرد. بنابراین شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر پهپاد پتانسیل‌های کاربردی زیادی از جمله امنیت عمومی مخابرات، تخلیه‌ی موقت ترافیک برای ایستگاه‌های پایه‌ی سلولی، پخش اطلاعات و جمع‌آوری داده برای اینترنت اشیا (^۳IoT) و بازیابی سرویس‌ها پس از وقوع بلایای طبیعی دارند.

۲-۲- معرفی کلی پهپاد

در این بخش پهپادها را از لحاظ ساختار و نحوه‌ی استفاده‌ی آنها در شبکه‌ها بررسی می‌نماییم.

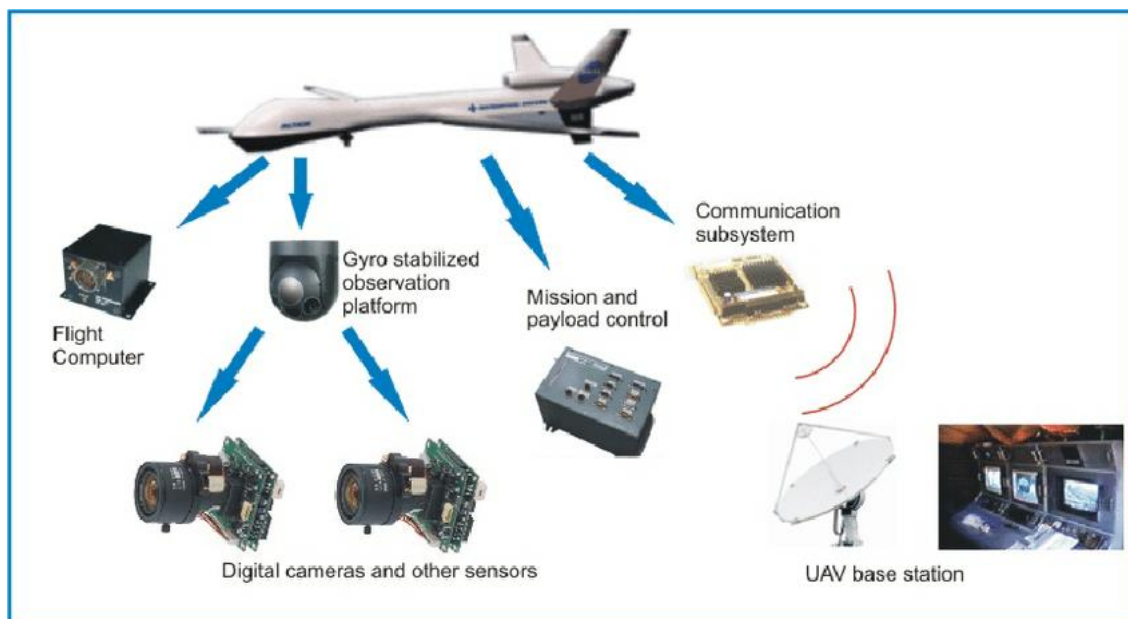
۲-۲-۱- ساختار پهپاد

پهپادها نوعی هواگرد هدایت پذیر از راه دور بی‌خلبان هستند که هر کدام از آنها مجهز به سنسورهای تصویر برداری، سنسورهای موقعیت، پردازنده‌ها و ماژول‌های ارتباطی است. در شکل (۱) اجزای تشکیل دهنده‌ی یک پهپاد را مشاهده می‌کنیم [۱].

^۱ Low altitude platforms

^۲ Low altitude platforms

^۳ Internet-of-things

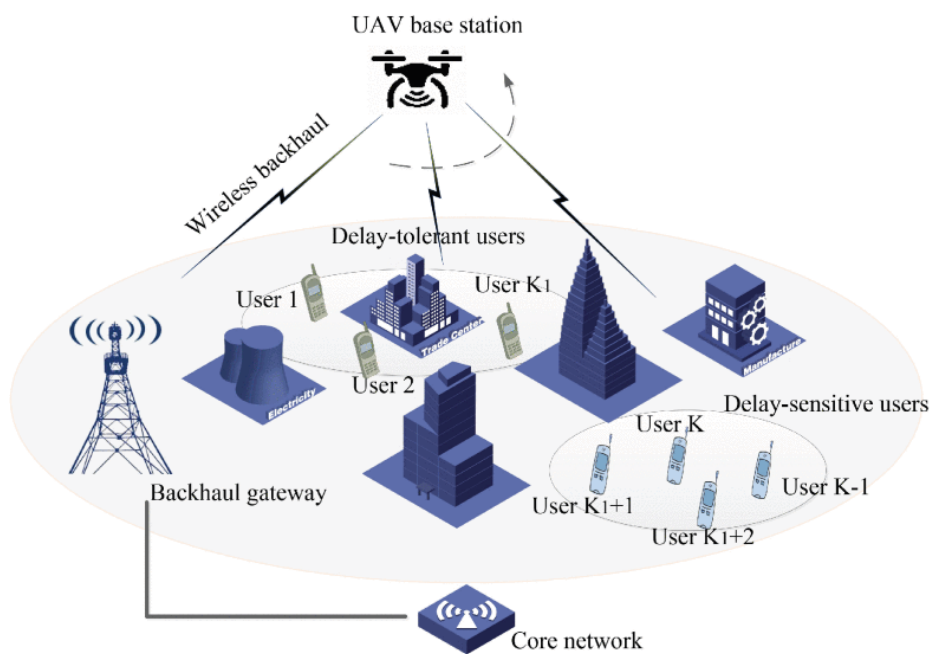


شکل (۱-۲) اجزای اصلی یک سیستم پهپاد [۱].

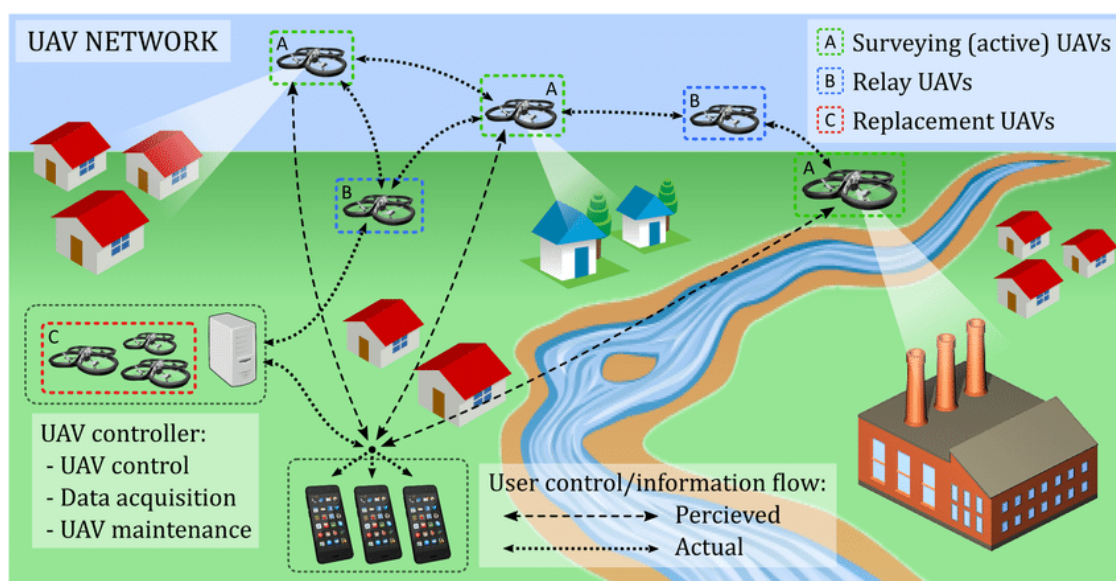
از لحاظ قابلیت حمل و ابعاد، پهپادها را می‌توان به سه دسته تقسیم بندی کرد:

- پهپادهای بسیار کوچک که در حد چند گرم وزن دارند.
- پهپادهای مینیاتوری که کمتر از ۲۵ کیلوگرم وزن دارند.
- پهپادهای سنگین

اشکال زیر کاربرد پهپاد را در یک شبکه در نقش ایستگاه پایه و رله در مواقع بحران نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲) پهپاد در نقش ایستگاه پایه [۲]



شکل (۳-۲) کاربرد پهپاد در مواقع بحران [۳]

۲-۲-۲- تاریخچه‌ی پهپاد

در سال ۱۸۴۹ اتریش، بالن پر از بمب بدون سرنشینی را برای حمله به ونیز فرستاد. نوآوری پهپاد در سال ۱۹۰۰ آغاز شد و در اصل برای آموزش پرسنل نظامی متمرکز شده بود.

توسعه پهپاد در طی جنگ جهانی اول تا هنگامی که شرکت هواپیمایی دیتون-رایت یک اژدر هوایی بدون سرنشین که در یک زمان از پیش تعیین شده منفجر شد ارائه داد، ادامه یافت. در سال ۱۹۵۹، نیروی هوایی ایالات متحده، در مورد از دست دادن خلبانان در خاک دشمن نگران شد، بنابراین شروع به برنامه‌ریزی برای استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین کرد [۴].

با گذشت زمان استفاده از پهپاد از حوزه‌ی نظامی به حوزه‌ی ارتباطات گسترش یافت و امروزه پهپادها کاربردهای زیادی را در شبکه‌های مخابراتی ایفا می‌کنند.

۲-۳- کارهای انجام شده در حوزه‌ی شبکه‌های مبتنی بر پهپاد

وسایل نقلیه‌ی هوایی تجهیز شده با گیرنده‌های ارتباطی کاربردهای زیادی را در مخابرات بیسیم پیدا کرده‌اند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به پخش اطلاعات، رله‌های هوایی، جمع‌آوری داده و ... اشاره نمود. بسته به این که چه مقدار از قابلیت تحرک پهپاد استفاده کنیم، تحقیقات در این زمینه را می‌توان در دو شاخه گنجانده. شاخه‌ی اول روی بهینه‌سازی مکان و آرایش پهپادهای ایستا با هدف دستیابی به بیشترین میزان پوشش دهی ترمینال‌های زمینی تمرکز می‌کند. در شاخه‌ی دیگر هدف بهره‌برداری از بیشترین میزان تحرک پرنده و طراحی مسیر مناسب برای آن است که درجه‌ی آزادی جدیدی را برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های ارتباطی بیسیم به همراه دارد. به طور کلی مطالعاتی که روی یافتن مسیر و توان مصرفی بهینه‌ی پهپادها انجام شده است را می‌توان در دو دسته قرار داد. در دسته‌ی اول مسیر بهینه برای پوشش دهی تعدادی گره زمینی با در نظر گرفتن قید توان تعیین می‌گردد. به عنوان مثال پهپاد کدام مسیر را در پیش بگیرد که از ۲۰ کاربر داده دریافت کند. در

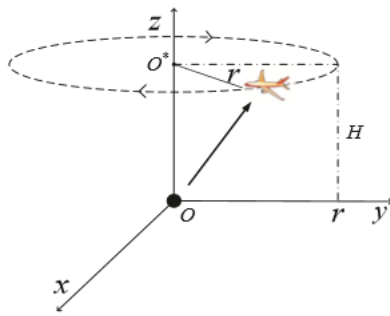
دسته‌ی دوم ارتباط بین یک زوج کاربر مد نظر است که پهپاد ابتدا داده را از گره مبدا گرفته و سپس آن را به مقصد می‌رساند. شاخص مهم دیگر در طراحی سیستم‌های مخابراتی بیسیم آینده، ذخیره‌ی انرژی است. به عنوان مثال در مطالعات پیشین روی کمینه سازی انرژی در پهپادها و ترمینال‌های زمینی در شبکه‌های ارتباطی مختلف، کار شده است. در این تحقیقات تنها روی کمینه سازی مصرف انرژی در شبکه‌های بیسیم مرسوم تمرکز شده است. در پهپادها مصرف انرژی ارتباطی در مقایسه با مصرف انرژی محرکه‌ای که باید پهپاد را در بالا نگه داشته و حرکت آن را ممکن سازد، بسیار کمتر است. لذا برای داشتن ارتباط با بهره‌وری انرژی بالا، فاکتور مهم و اساسی انرژی محرکه است. از این رو محققان مدل ریاضی برای مصرف انرژی محرکه‌ی پهپاد با بال ثابت با توجه به مسیر بهینه ارائه داده و آن را بهینه کردند. در ادامه به بررسی چند مورد از پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه‌ی شبکه‌های مبتنی بر پهپاد می‌پردازیم.

۲-۳-۱- استفاده از پهپاد به عنوان جمع کننده‌ی داده

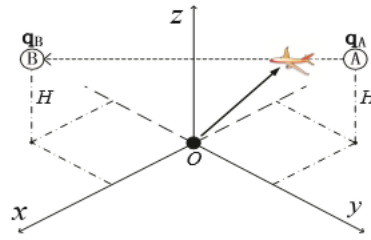
در [۵]، سیستمی بررسی شده است که در آن از یک پهپاد به عنوان جمع کننده‌ی داده از یک ترمینال زمینی که در مکان ثابتی قرار دارد، استفاده شده است. در پهپاد انرژی ارتباطی در مقایسه با انرژی محرکه مقدار کمتری دارد، پس برای داشتن ارتباط با بهره‌وری بالا، فاکتور مهم انرژی محرکه است. واضح است که هر چقدر پهپاد به ترمینال زمینی نزدیک باشد، انرژی ارسالی از ترمینال زمینی در لینک بالا که برای ارسال داده لازم است کاهش یافته اما انرژی محرکه‌ی پهپاد که لازمه‌ی تحرک آن است افزایش می‌یابد. لذا باید بین این دو شاخص مصالحه برقرار نمود. برای برقراری این مصالحه، دو مسیر حرکت به نام‌های پرواز دایره‌ای^۱ و پرواز مستقیم^۲ برای پهپاد در نظر گرفته شده است. در مسیر دایره‌ای پهپاد حول یک دایره دور ترمینال زمینی پرواز کرده و در مسیر مستقیم از مکان اولیه-ی q_A به مکان q_B با سرعت ثابت پرواز می‌کند. این مسیرها در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.

^۱ circular flight

^۲ Straight flight



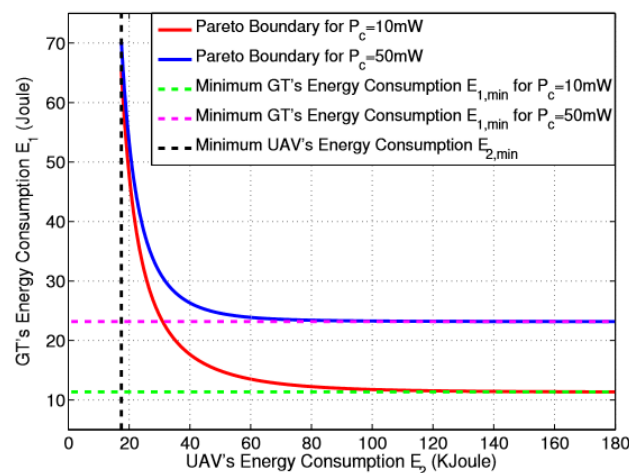
(الف) پرواز دایره‌ای



(ب) پرواز مستقیم

شکل (۲-۴) یک سیستم مخابراتی بیسیم G2U^۱ با مسیرهای پرواز دایره‌ای و مستقیم [۵]

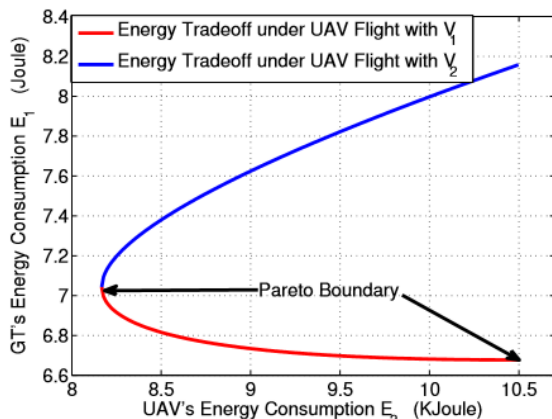
در سیستم بالا ترمینال زمینی در مکان‌های ثابت شناخته شده‌ای قرار دارند و داده‌ای با حجم کلی Q بیت را فرستاده و پهنای که در ارتفاع ثابت H پرواز می‌کند جمع کننده‌ی این حجم از داده است. برای هر کدام از حالت‌های پرواز مستقیم و دایره‌ای، عبارت ریاضی مصرف انرژی برای پهنای ترمینال‌های زمینی بدست آمده (E_1 و E_2) و کل مصرف انرژی شبکه‌ی GT-UAV که برای آپلود یک فایل کافی است را توسط زوج (E_1, E_2) نشان داده اند. در این زوج همواره افزایش یک پارامتر با کاهش دیگری ممکن خواهد بود. توان بهینه با استفاده از بررسی مرز پارتو^۲ در دو مسیر دایره‌ای و مستقیم بدست می‌آید. در اشکال زیر برخی از نتایج مصالحه‌ی انرژی نشان داده شده است.



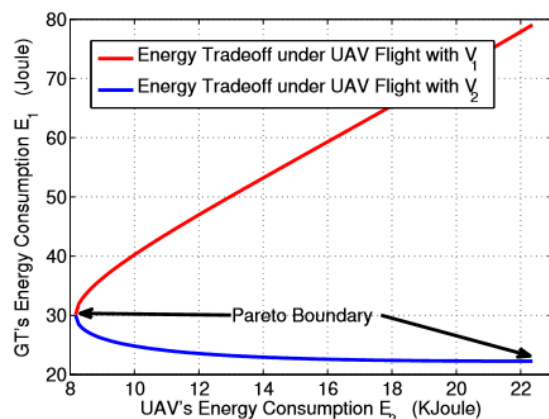
شکل (۲-۵) مصالحه‌ی انرژی ترمینال زمینی و پهنای با مسیر دایره‌ای و $P_c = 50\text{mW}$ یا 10mW [۵]

^۱ Ground to UAV

^۲ Pareto boundary



$\bar{Q} = 30 \text{ Mb}$ (الف)



$\bar{Q} = 100 \text{ Mb}$ (ب)

شکل (۲-۶) مصالحه‌ی انرژی ترمینال زمینی و پهپاد با مسیر مستقیم و با $\bar{Q} = 30 \text{ Mb}$ و $\bar{Q} = 100 \text{ Mb}$ [۵]

۲-۳-۲- انتقال توان بیسیم با استفاده از پهپاد

انتقال توان بیسیم (WPT^۱) مبتنی بر سیگنال‌های رادیو فرکانسی به عنوان یک روش جدید برای ایجاد منابع انرژی همیشگی و مقرون به صرفه برای ادوات الکترونیکی کم توان مانند سنسورها و ادوات اینترنت اشیا محسوب می‌شود. در سیستم‌های WPT سنتی، فرستنده‌های انرژی (ETs^۲) روی مکان‌های ثابتی قرار گرفته بودند تا به مجموعه‌ی گسترده‌ای از گیرنده‌های انرژی (ERs^۳) سرویس داده و آن‌ها را شارژ کنند. در این حالت به دلیل از دست دادن سیگنال RF در فاصله‌ی زیاد مبتنی بر انتشار شدید، کارایی سیستم WPT به خصوص در مواقعی که فاصله‌ی انتقال بین فرستنده و گیرنده زیاد است، پایین می‌آید [۶].

اخیرا با توجه به پیشرفت و گسترش شبکه‌های مخابراتی بیسیم مبتنی بر پرنده‌های هدایت پذیر، سیستم‌های WPT با ساختار جدیدی با به کارگیری پهپاد به عنوان فرستنده‌ی انرژی متحرک به وجود آمده اند. در این ساختار پهپادها می‌توانند بر فراز ناحیه‌ی وسیعی پرواز کنند و تعدادی از گیرنده‌های انرژی که روی زمین گسترده‌اند را شارژ نمایند. با بهره برداری کامل از قابلیت تحرک

^۱ Wireless power transfer

^۲ Energy transmitters

^۳ Energy receivers

پهپاد با طراحی مسیر مناسب برای آن، انتظار می‌رود سیستم WPT جدید کارایی بهتری نسبت به حالت سنتی با فرستنده‌ی در مکان ثابت داشته باشند. از آنجایی که پهپادها می‌توانند آزادانه در سه بعد در فضا حرکت کنند و همچنین به دلیل احتمال برخورداری از خط دید مستقیم با گیرنده‌های زمینی، سیستم WPT جدید با سیستمی که از وسایل نقلیه‌ی زمینی متحرک استفاده می‌کند متفاوت است، چرا که حرکت وسایل نقلیه‌ی زمینی متحرک در دو بعد بوده و کانال‌های زمینی از مشکلاتی چون افت مسیر و سایه افکنی رنج می‌برند [۷].

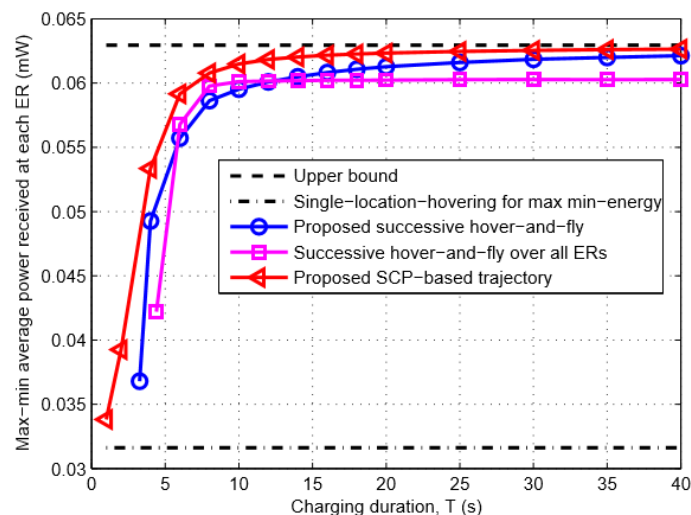
در [۷] پژوهش صورت گرفته در [۸] به سناریوی گسترده‌تری با یک پهپاد و بیش از دو گیرنده‌ی انرژی تعمیم داده شده است. در این مقاله یک فرمول بندی جدید برای بیشینه سازی انرژی در سیستم WPT مبتنی بر پهپاد ارائه می‌شود. در واقع هدف این است که مینیمم انرژی برداشت شده توسط ERها در طول یک بازه‌ی شارژ را با بهینه کردن مسیر پهپاد با توجه به قیدهای سرعت، بیشینه کنیم. مساله‌ی حاصل غیر محدب بوده که حل مستقیم آن دشوار است. برای غلبه بر این دشواری ابتدا حالت خاصی را در نظر می‌گیریم که در آن قیدهای ماکزیمم سرعت حذف شده باشند و مساله‌ی بیشینه سازی کمترین مقدار انرژی^۱ را در این حالت حل می‌کنیم که حل آن حد بالایی از پاسخ را بدست می‌دهد. حل این مساله با روش دوگان لاگرانژ انجام می‌شود. در حالت بهینه نشان داده می‌شود که پهپاد می‌بایست حول نقاط محدودی با مکان مشخص پرواز کند. زمان پرواز^۲ نیز حول هر نقطه‌ی ثابت بهینه می‌شود. در مرحله‌ی بعد حالت کلی مساله حل می‌شود. در این حالت از الگوریتم successive hover-and-fly استفاده شده است. در این طرح با پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر حرکت برای رسیدن به مکان‌های پیدا شده‌ی قبلی یعنی همان نقاط محدود با مکان ثابت، زمان پرواز نیز کمینه می‌شود. سپس در بخش بعدی مقاله یک مسیریابی کارآمد مبتنی بر روش برنامه ریزی محد پی در پی (SCP^۳) ارائه شده است. نتایج شبیه سازی‌های این پژوهش نشان داده است که

¹ Min-energy maximization

² Hovering duration

³ Successive convex programming

سیستم WPT پیشنهادی در مقایسه با حالتی که ETها در مکان ثابتی قرار داشتند، عملکرد بهتری داشته و انرژی دریافت شده توسط ERها بیشتر است. در شکل (۷-۲) نمونه‌ای از نتایج این مقاله را مشاهده می‌کنیم.

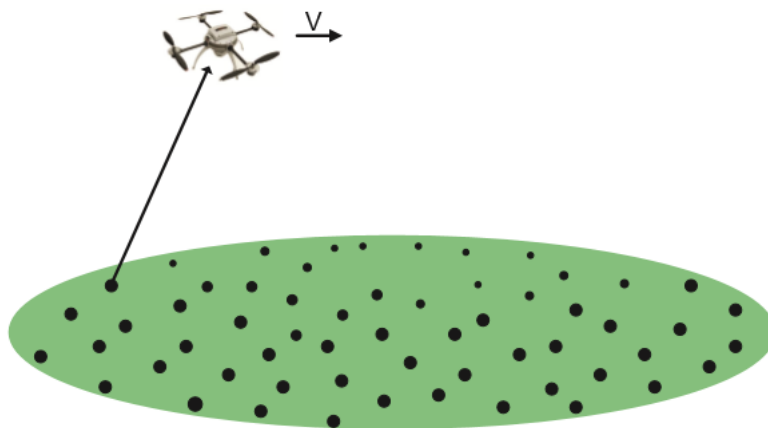


شکل (۷-۲) ماکزیمم توان متوسط دریافتی در هر ER نسبت به زمان شارژ وقتی که $K=10$ [۷]

۳-۳-۲- کاهش انرژی برای شبکه‌های بیسیم با پهپادهای با بال متحرک

اولین کارهایی که برای طراحی شبکه‌های ارتباطی پهپادی با بهره‌وری انرژی مناسب صورت گرفت، با پهپاد با بال ثابت بود که در آن بهره‌وری انرژی با ارائه‌ی مدلی که تابع شتاب و سرعت بود ماکزیمم می‌شد [۹]. به دلیل تفاوت‌های ساختاری در طراحی مکانیکی و تفاوت در مدل انرژی محرکه، این نتایج را نمی‌توان به پهپاد با بال متحرک نیز تعمیم داد. همچنین در مطالعه روی شبکه با پهپاد بال ثابت [۹] تنها یک گره زمینی در نظر گرفته شده بود. لذا در [۱۰] شبکه‌ی مخابراتی بیسیم با پهپاد

بال متحرک و تعدادی گره زمینی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل زیر چنین شبکه‌ای قابل ملاحظه است.



شکل (۸-۲) شبکه ی مخابراتی بیسیم با پهپاد بال متحرک [۱۰]

در این مقاله، مشابه مقاله‌ی [۱۱] هدف کاهش مصرف انرژی پهپاد شامل انرژی محرکه و انرژی‌های بخش ارتباطی است به گونه‌ای که توان مورد نیاز هر گره زمینی (GN^1) تامین شود. با این تفاوت که مسیرهای دایره‌ای و مستقیم تعریف نمی‌شود. بدین منظور یک مدل تحلیلی برای مصرف توان محرکه‌ی پهپادهای با بال متحرک با توجه به پژوهش‌های حوزه‌ی صنایع هوایی بدست آورده-اند [۱۲ و ۱۳]. همانطور که انتظار می‌رفت این رابطه با رابطه‌ی بال ثابت متفاوت است. به عنوان مثال برای پهپاد بال ثابت با سرعت v ، مصرف توان تابعی محدب از v است. علاوه بر این مصرف توان برای پهپاد های بال ثابت در $v=0$ بی‌نهایت است که بیانگر این قضیه است که پهپاد با بال ثابت به حداقل سرعتی نیاز دارد تا در هوا باقی بماند. مدل توان محرکه برای پهپاد با بال متحرک تابعی به مراتب پیچیده‌تر است که نه نسبت به v محدب بوده و نه مقعر است. از طرفی در حالت سرعت صفر مصرف توان بی‌نهایت نیست، چراکه پهپاد با بال متحرک می‌تواند در هوا بماند. به دلیل این مشخصات منحصر به فرد، روش‌های طراحی مسیر بهینه برای پهپاد با بال متحرک متفاوت است.

¹ Ground node

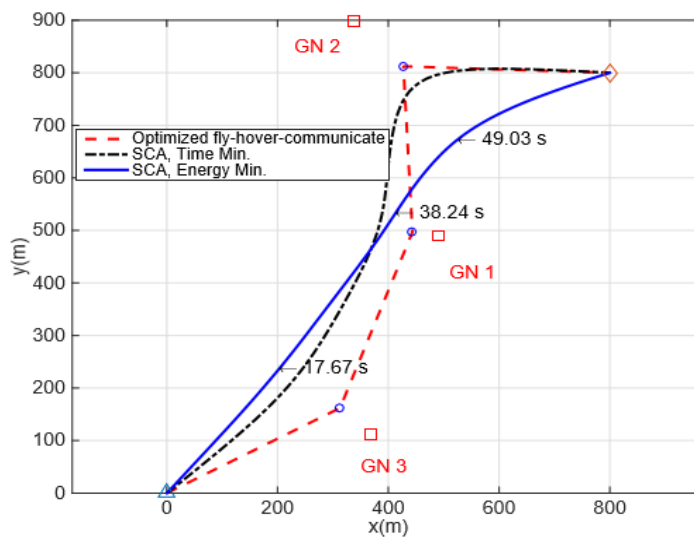
در مساله‌ی کمینه سازی انرژی که مبتنی بر رابطه‌ی مصرف توان استخراج شده است، به طور همزمان مسیر حرکت پهپاد، تخصیص زمان ارتباط دهی برای گره‌های زمینی و کل زمان انجام ماموریت بهینه می‌شوند. چنین مساله‌ای غیر محدب بوده و شامل بی‌نهایت متغیر بهینه‌سازی با توابع پیوسته در زمان است. لذا حل آن دشوار می‌باشد. برای رسیدن به دید بهتر ابتدا طرح ساده‌ی fly-hover-communicate را در نظر می‌گیریم. در این طرح پهپاد مجموعه‌ای از مکان‌های بهینه را به طور پی در پی می‌پیماید و با هر گره زمینی تنها موقع پرواز حول مکان متناظر با آن ارتباط می‌گیرد. بنابراین در این حالت مساله به یافتن این نقاط بهینه و بازه‌ی زمانی پرواز حول این نقاط ساده می‌شود. هر چند حل مساله‌ی جدید همچنان دشوار است، برای حل آن از الگوریتم‌های فروشنده‌ی دوره‌گرد (¹TSP) و روش‌های بهینه سازی محدب کمک گرفته می‌شود و نهایتاً تقریب خوبی از جواب حاصل می‌گردد. در مرحله‌ی بعد، حالت کلی‌تر در نظر گرفته می‌شود که پهپاد در هنگام پرواز نیز در حال مخابره است. در این حالت از روش گسسته سازی مسیر² استفاده می‌شود تا مساله‌ی اصلی که متغیرهای بی‌نهایتی داشت را به مساله‌ای با متغیرهای محدود تبدیل کند. با گسسته سازی مسیر نیازی به تعریف کل زمان انجام ماموریت نیست و این متغیر بهینه سازی حذف خواهد شد. حال مساله با روش SCA³ که یک الگوریتم تکراری بوده و در هر تکرار مسیر پهپاد و تخصیص زمانی به روز می‌شود، حل خواهد شد. نکته‌ی قابل توجه این است که در حل این مساله، هر دو حالت کانال با خط دید مستقیم و بدون خط دید مستقیم در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده که پهپاد از پروتکل دسترسی چندگانه با تقسیم زمانی (⁴TDMA) برای ارتباط با گره‌های زمینی استفاده کرده است. شکل (۲-۹) مسیر بهینه برای پوشش دهی تعدادی گره زمینی، که یکی از خروجی‌های مساله‌ی بهینه سازی است را نشان می‌دهد [۱۰].

¹ Travelling salesman problem

² Path discretization

³ Successive Convex Approximation

⁴ Time-division multiple access



شکل (۲-۹) مسیر بهینه‌ی پهپاد در سه طرح مختلف با حجم داده‌ی ۱۰۰۰ مگابیت [۱۰]

۲-۳-۴- نقش پهپاد در ارتباطات دستگاه با دستگاه (D2D)^۱

۲-۳-۴-۱- پهپاد در نقش ایستگاه پایه‌ی سیار

یکی از مزایای استفاده از پهپادها به عنوان ایستگاه‌های پایه‌ی در حال پرواز، بهبود ظرفیت و ناحیه‌ی پوشش دهی شبکه‌های بیسیم موجود است. در [۱۴ و ۱۵] یک شبکه‌ی ارتباطی بیسیم بررسی شده که در آن پهپاد به عنوان یک ایستگاه پایه برای پوشش دهی یک ناحیه‌ی جغرافیایی مشخص که در آن جفت‌های D2D با یکدیگر ارتباط می‌گیرند، در نظر گرفته شده است. در واقع در این مقاله وجود همزمان پهپاد که در لینک پایین (فروسو) داده می‌فرستد و شبکه‌ی ارتباطی D2D مورد ملاحظه و بررسی قرار گرفته است. خود شبکه‌ی D2D در نقاط حساس یا منطقه‌ای که زیرساخت ارتباطی کافی وجود ندارد، امکان ارتباط مستقیم را بین کاربرها فراهم می‌کند. در مطالعات قبلی وجود همزمان شبکه‌ی D2D و شبکه‌های MIMO در حالت تک سلولی [۱۶] و چند سلولی [۱۷] بررسی شده ولی به همزیستی D2D و پهپاد پرداخته نشده بود.

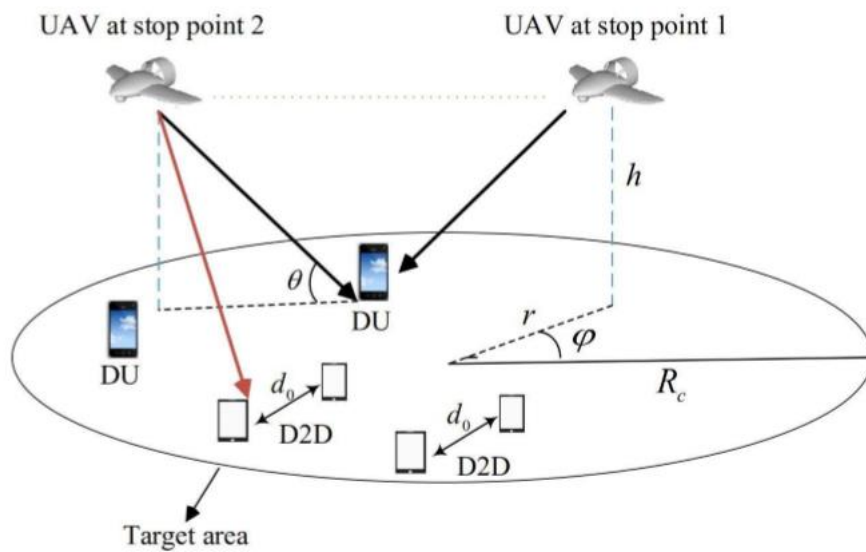
¹ Device-to-device

در سناریوی مطرح شده در این مقاله باند طیفی مجاز بین پهپاد و جفت‌های D2D تقسیم می‌شود. لذا مدیریت تداخل‌ها به عنوان یک چالش مطرح می‌شود. هدف اصلی این مقاله تحلیل پوشش‌دهی و نرخ شبکه‌های مخابراتی بیسیم مبتنی بر پهپاد در حضور جفت‌های D2D است. در این پژوهش ناحیه‌ی پوشش‌دهی دایره‌ای با شعاع R_C تعریف شده است که در آن دو نوع کاربر وجود دارد. یکی کاربر DU^1 که داده‌اش را از پهپاد می‌گیرد و به صورت یکنواخت در سلول توزیع شده است و دیگری کاربر D2D که به طور مستقیم با دیگر کاربران ارتباط می‌گیرد و توزیع آن از تابع PPP^2 پیروی می‌کند. دو حالت پهپاد ثابت و متحرک بررسی می‌شود. با استفاده از هندسه‌ی تصادفی متوسط احتمال پوشش‌دهی برای کاربرهای DU و D2D را بدست آورده و تاثیر ارتفاع پهپاد و چگالی کاربرهای D2D را روی عملکرد شبکه بررسی نموده است. برای حالت ایستا، مقادیر بهینه‌ی ارتفاع پهپاد که منجر به بیشترین احتمال پوشش‌دهی DU می‌شود، بدست آمده و همچنین با در نظر گرفتن DU و D2D ارتفاع بهینه‌ای که بیشترین نرخ را برای سیستم نتیجه می‌دهد، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع بهینه‌ی پهپاد با افزایش چگالی کاربرهای D2D، کاهش می‌یابد. برای حالتی که پهپاد متحرک است، فرض می‌شود که پهپاد می‌تواند حول ناحیه‌ای پرواز کند و تنها در نقاطی با مکان مشخص برای خدمت رسانی به DUها توقف کند. با استفاده از مساله‌ی disk covering کمترین نقاط توقف که توسط آن‌ها پهپاد می‌تواند کل ناحیه را بپیماید مشخص می‌شود. این مسیر سریع‌ترین مسیر برای پوشش کل ناحیه با کمترین میزان توان ارسالی است. این نقاط توقف به منزله‌ی تاخیر³ هستند. برای بهبود پوشش‌دهی باید نقاط توقف بیشتر باشد ولی این امر باعث افزایش تاخیر می‌شود. لذا باید بین تعداد این نقاط و احتمال پوشش‌دهی DUها مصالحه برقرار شود. در شکل (۲-۱۰) شبکه‌ای که توضیح داده شد، به نمایش در آمده است.

¹ Downlink user

² Poisson point process

³ Delay

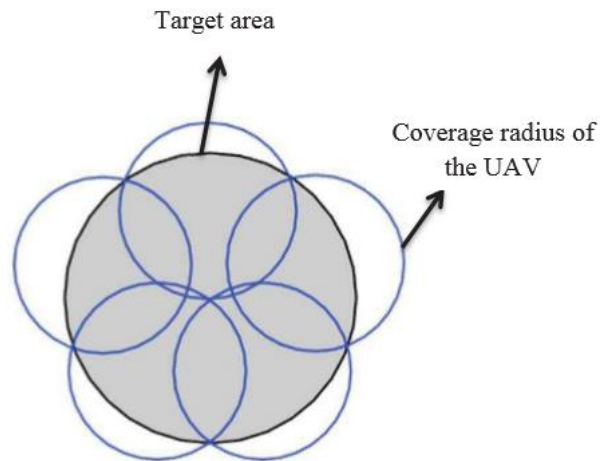


شکل (۲-۱۰) مدل شبکه شامل یک پهپاد و تعدادی DU و کاربر D2D [۱۴]

در ساختار بالا گیرنده و فرستندهی D2D در فاصله‌ی ثابتی از هم قرار دارند. سیگنالی که گیرنده‌ی D2D دریافت می‌کند، شامل سیگنال مطلوب از فرستنده و تداخل از سایر D2D ها است.

در توضیح مساله‌ی disk covering می‌توان گفت که یک دیسک واحد^۱ داریم. هدف این است که کوچکترین شعاع M دیسک کوچکتر را پیدا کنیم که به طور کامل دیسک واحد را پوشش دهند. در فرم دوگان این مساله، به ازای شعاع داده شده از دیسک‌های کوچک، می‌بایست کمترین تعداد دیسک‌ها را برای پوشش‌دهی دیسک بزرگتر پیدا کنیم. در شکل (۲-۱۱) مثالی از این مساله در کاربرد مورد نظر آورده شده است.

^۱ Unit disk



شکل (۱۱-۲) مسالهی disk covering با ۵ دیسک [۱۴]

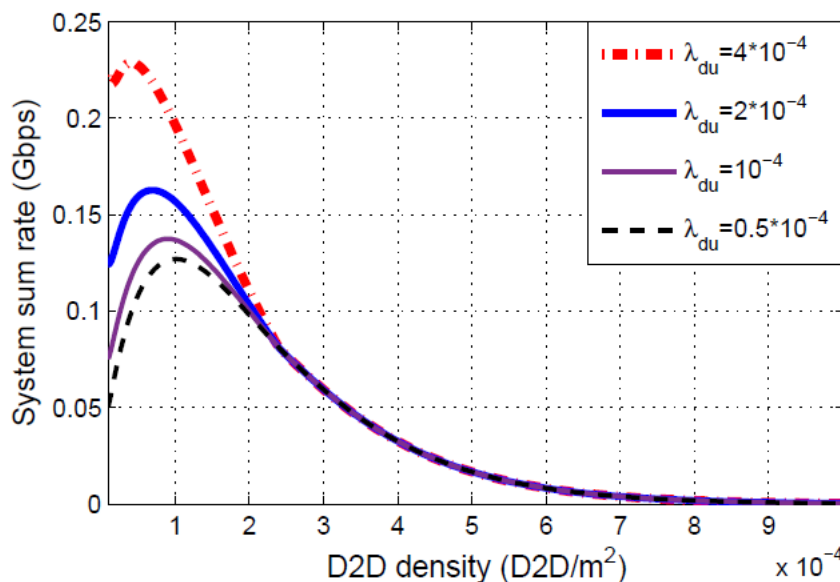
در شکل بالا، مرکز دیسک‌های کوچک همان نقاط توقف تلقی می‌شوند و شعاع هر دیسک نیز شعاع پوشش‌دهی پهپاد است. در جدول زیر مقادیر مختلف نقاط توقف و کمترین شعاع پوشش‌دهی پهپاد برای پوشش‌دهی کل منطقه آورده شده است.

جدول (۱-۲) تعداد و شعاع دیسک‌ها در مسالهی disk covering

Number of stop points	Minimum required coverage radius ($R_{\min}$)
$M = 1, 2$	R_c
$M = 3$	$\frac{\sqrt{3}}{2} R_c$
$M = 4$	$\frac{\sqrt{2}}{2} R_c$
$M = 5$	$0.61 R_c$
$M = 6$	$0.556 R_c$
$M = 7$	$0.5 R_c$
$M = 8$	$0.437 R_c$
$M = 9$	$0.422 R_c$
$M = 10$	$0.398 R_c$
$M = 11$	$0.38 R_c$
$M = 12$	$0.361 R_c$

لازم به ذکر است که هر چه تعداد نقاط توقف افزایش یابد، مدت زمانی که پهپاد برای پوشش‌دهی کل منطقه صرف می‌کند نیز افزایش می‌یابد و این معادل افزایش تاخیر کل سیستم است.

به عنوان یکی از خروجی‌ها شکل (۲-۱۲) نمایشگر رابطه‌ی نرخ سیستم با چگالی کاربرهای D2D است. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای کاربرهای کمتر، تداخل کمتر و در نتیجه نرخ بیشتری خواهیم داشت.



شکل (۲-۱۲) نرخ سیستم بر حسب تعداد جفت‌های D2D در هر متر مربع [۱۴]

طرح مقاله‌ی بالا با استفاده از تکنیک کلیدی ارتباط دو طرفه (FD^۱) در ارتباطات نسل پنجم بررسی شده است. تکنیک FD در مقایسه با HD^۲ بهره‌وری طیفی را دو برابر می‌کند [۱۵].

۲-۳-۴-۲- پهنای در نقش منبع انرژی با استفاده از تکنیک برداشت انرژی^۳

در شبکه‌های با کاربر D2D، پهنای می‌تواند نقش منبع انرژی نیز داشته باشد. در [۱۸] مسالهی تخصیص منابع برای شبکه‌های مبتنی بر پهنای بررسی شده است که در آن پهنای به عنوان منبع انرژی، انرژی رادیو فرکانسی (RF) را برای جفت‌های D2D که عموماً منابع انرژی ثابتی ندارند تامین

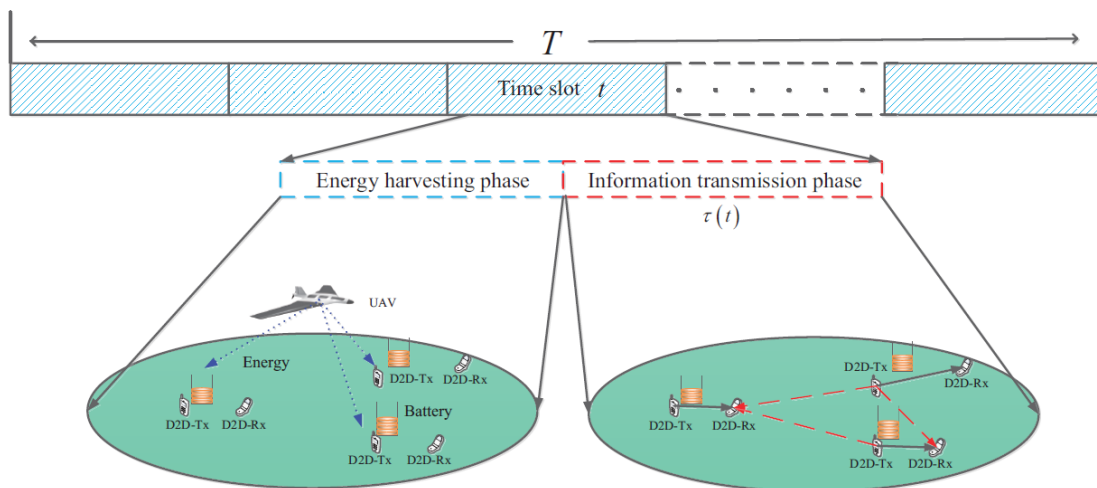
^۱ Full-duplex

^۲ Half-duplex

^۳ Energy harvesting

می‌کند. تکنولوژی برداشت انرژی که در [۱۹-۲۱] به آن پرداخته شده است، امروزه به عنوان یک تکنولوژی مهم برای افزایش طول عمر شبکه محسوب می‌شود.

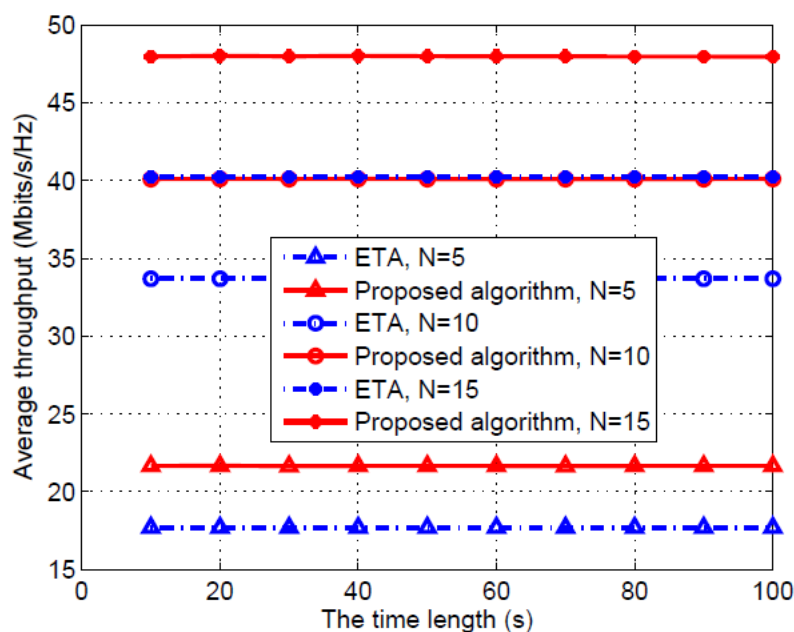
عموما در مخابرات مبتنی بر برداشت انرژی از دو مدل harvest-then-transmit [۲۰] و harvest-transmit-store استفاده می‌شود. مدل دوم نسبت به مدل اول عمومی‌تر و واقعی‌تر است، چرا که در مدل دوم انرژی برداشت شده می‌تواند به طور مستقیم استفاده شود و یا اینکه ذخیره شده و سپس استفاده گردد. در این مقاله از مدل دوم استفاده شده است که در هر بازه‌ی زمانی، جفت‌های D2D هم می‌توانند انرژی برداشت یا ذخیره کنند و هم اطلاعات ارسال کنند. شماتیک آنچه گفته شد در شکل (۲-۱۳) قابل ملاحظه است.



شکل (۲-۱۳) مدل harvest-transmit-store برای شبکه‌ی ارتباطی D2D تغذیه شده با روش برداشت انرژی با ۳ جفت D2D [۱۸]

در طرح در نظر گرفته شده در این مقاله، جفت‌های D2D مجاز هستند که از طیف فرکانسی مشابهی استفاده کنند. همچنین تداخل متقابل جفت‌ها برای بهبود عملکرد سیستم در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن کانال ارتباطی نیز هم کانال با خط دید مستقیم و هم غیر مستقیم در نظر گرفته شده است.

از آنجایی که کنترل توان مصرفی سیستم از جمله استراتژی‌های مهم در بهبود راندمان سیستم است، مساله‌ی تخصیص منابع در این مقاله به صورت بهینه سازی توامان توان و زمان فرموله شده است. چنین مساله‌ای به دلیل غیر محدب بودن پیچیده است که در این مقاله الگوریتمی برای حل آن ارائه داده شده است. ابتدا مساله‌ی غیر محدب بیشینه سازی توان را با معرفی روش لاگرانژ به یک مساله‌ی $(MINIP^1)$ تبدیل کرده و سپس با استفاده از تفاضل دو تابع محدب $(D.C.^2)$ الگوریتمی برای حل آن طراحی شده و جواب بهینه بدست آمده است. نهایتاً کارایی الگوریتم پیشنهادی بررسی شده است. جهت بررسی کارایی الگوریتم، تاثیر فاکتورهای کلیدی سیستم مثل ارتفاع پهنای باند، زمان و ضریب افت مسیر مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج مشاهده می‌شود که راندمان بهینه به ازای طول زمان‌های متفاوت یکسان است که با تحلیل‌های تئوری مطابقت دارد و در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است. ETA نیز به عنوان یک benchmark مورد مقایسه قرار گرفته است که در آن تخصیص زمانی برای برداشت انرژی و ارسال سیگنال اطلاعات برابر در نظر گرفته شده است [۱۸].



شکل (۲-۱۴) متوسط راندمان بر حسب طول زمان‌های متفاوت [۱۸]

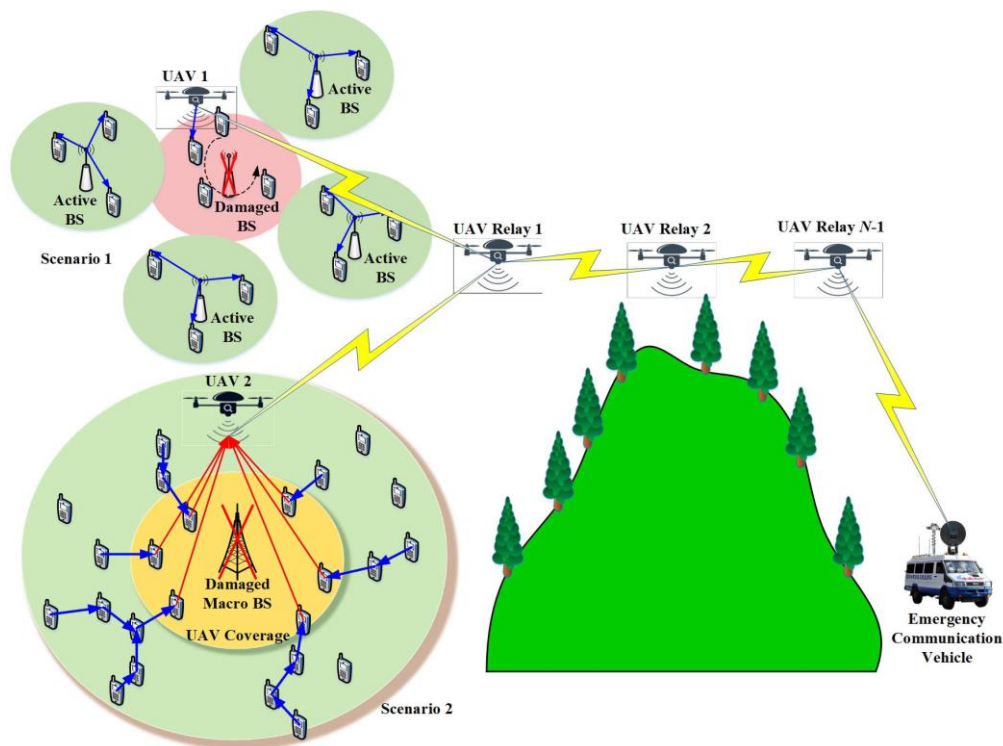
¹ Mixed integer nonlinear programming

²² Difference of two convex function

در [۲۲] نیز به بحث برداشت انرژی در شبکه‌هایی که پهپاد نقش رله‌ی متحرک را دارد، پرداخته شده است. مساله‌ی اصلی نیز همان بیشینه سازی راندمان سیستم است. در این مقاله فرض شده است که تنها منبع انرژی موجود برای فرستنده‌ی کاربر که مجهز به ادوات برداشت انرژی است، باتری با ظرفیت محدود است و بقیه‌ی انرژی مورد نیاز می‌بایست از محیط برداشت شود.

۲-۳-۵- نقش پهپاد در شبکه‌های اضطراری در مواقع بحران

داشتن ارتباطی مطمئن و قابل انعطاف در مواقع اضطرار و وقوع بلایای طبیعی یکی از مباحث مورد توجه در پژوهش‌های اخیر است. به عنوان مثال وقتی فاجعه‌ی رخ داده از قبیل سیل و زلزله، عملکرد ایستگاه پایه را مختل کرده و یا آن را تخریب کرده است، شبکه‌های مبتنی بر پهپاد یکی از راهکارهایی است که می‌تواند شبکه‌های اضطراری را بر پا کند. با این که در پژوهش‌های زیادی به استفاده از پهپاد به عنوان ایستگاه پایه پرداخته شده است، در [۲۳] منحصراً به کاربرد آن در مواقع اضطرار و وقوع فجایع طبیعی پرداخته شده است که در شکل (۲-۱۵) قابل مشاهده است. در این مقاله ابتدا مسیر پهپاد و زمان‌بندی ارتباط گیری پهپادها برای پوشش‌دهی منطقه در حضور کاربران و ایستگاه پایه‌ی فعال به طور همزمان بهینه می‌شود و سپس برای گسترش پوشش دهی پهپاد سناریوی بدون ایستگاه پایه‌ی زمینی بررسی می‌شود. علاوه بر این برای درک تبادل اطلاعات بین منطقه‌ی بحران و منطق خارج از آن تحت دو سناریوی بالا طرح multihop relaying پیشنهاد شده است که نقاط ایست پهپاد در طول پرواز را بهینه می‌کند.



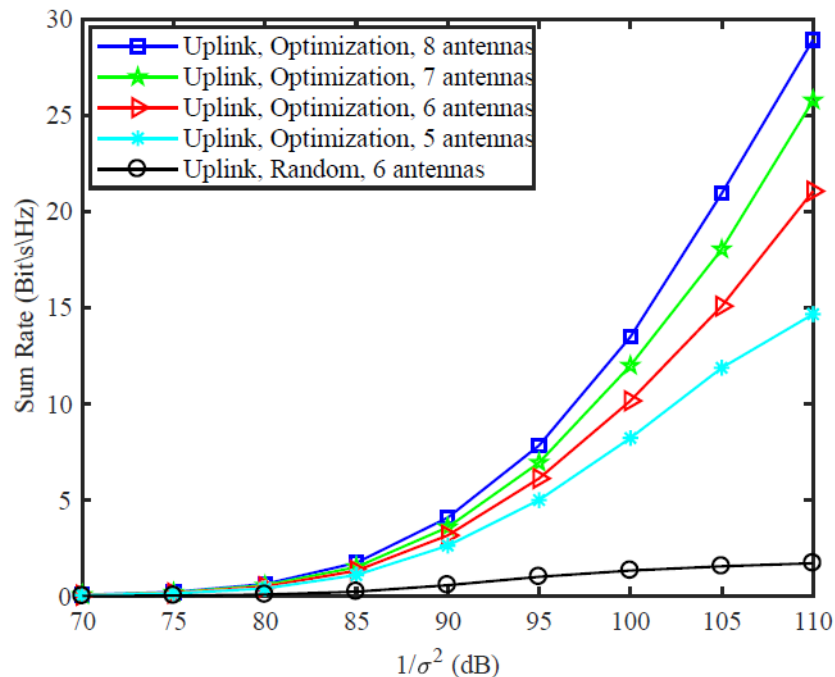
شکل (۲-۱۵) شبکه‌ی اضطراری مبتنی بر پهپاد در مواقع بحران [۲۳]

[۲۴] به کاربرد پهپاد در پوشش‌دهی شبکه‌های IoT در مواقعی که بلایای طبیعی زیر ساخت‌های ارتباطی را تخریب کرده است، پرداخته است. در این مقاله یک طرح چند آنتنه برای گیرنده و فرستنده و همچنین ارتباطات multihop دستگاه با دستگاه برای افزایش پوشش دهی پهپاد برای IoT و همچنین انتقال مطمئن اطلاعات پیشنهاد شده است. از آنجایی ناحیه‌ی آسیب دیده ممکن است بسیار بزرگ باشد در حالی که شعاع پوشش‌دهی پهپاد محدود است، استفاده از ارتباطات D2D مطرح شده است. در این مقاله، ناحیه‌ی آسیب دیده یک ناحیه‌ی دایروی با شعاع R در نظر گرفته شده که پهپاد M آنتنه در نقطه‌ی ثابتی در مرکز دایره قرار دارد. شعاع پوشش دهی نیز طبق رابطه بدست آمده و کاربرهای خارج از شعاع از طریق ارتباط D2D سرویس دهی می‌شوند. طراحی نحوه‌ی استقرار D2D ها با استفاده از الگوریتم ^۱ SPR صورت گرفته است. در تحلیل‌های نهایی نیز از شاخص احتمال برون‌دهی ^۲ استفاده شده که در مقاله ابتدا احتمال ارتباط موفق محاسبه شده و سپس با تفریق آن از

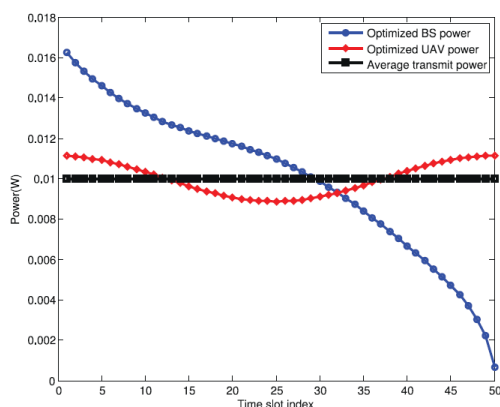
^۱ shortest-path-routing

^۲ outage

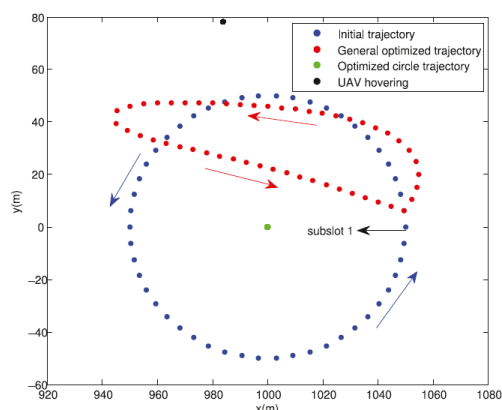
یک مقدار برون دهی شبکه بدست آمده است. نرخ شبکه نیز به عنوان یکی از خروجی‌ها تحلیل شده است که در شکل (۲-۱۶) مشاهده می‌شود. قابل ملاحظه است که هر چه پهپاد مجهز به آنتن‌های بیشتری باشد سیستم عملکرد بهتری خواهد داشت.



شکل (۲-۱۶) مقایسه‌ی نرخ مجموع سیستم در حالت بهینه شده با رندم با تعداد آنتن‌های مختلف [۲۴] علاوه بر مقالات فوق در [۲۵] نیز به کاربرد پهپاد در شرایط اضطراری به هنگام تخریب زیر ساخت- های IoT در بروز فاجعه پرداخته شده است. با در نظر گرفتن یک سناریوی چند کاربره، پهپاد در نقش رله عمل کرده و اطلاعات را از ایستگاه پایه که ارتباطش با کاربران قطع شده دریافت می‌کند و به کاربران می‌رساند. در گام اول روند مقاله، مساله مدل سازی می‌شود و عبارتی برای نرخ شبکه بدست آورده می‌شود. سپس مساله‌ی بهینه سازی با هدف بیشینه کردن نرخ شبکه با بهینه سازی مسیر پهپاد و توان پهپاد و ایستگاه پایه تعریف می‌شود. از آنجایی که مساله غیر محدب است برای حل آن از الگوریتم تکراری استفاده شده که در آن ابتدا مسیر پهپاد با توان ثابت و سپس توان پهپاد و ایستگاه پایه با مسیر ثابت بدست می‌آید و این دو مرحله تا رسیدن به همگرایی ادامه می‌یابد. مسیر و توان بهینه در اشکال زیر نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۸) توان بهینه شده ی پهباد و ایستگاه پایه [۲۵]



شکل (۲-۱۷) مسیر بهینه شده ی پهباد برای دو کاربر [۲۵]

۲-۳-۶- بهبود امنیت اطلاعات در شبکه های مبتنی بر پهباد

طبق آنچه که تا کنون گفته شد، یکی از مزایای استفاده از پهباد برخورداری آن از کانال LOS است. اما چنین کانالی چالش جدیدی را برای امنیت اطلاعات در شبکه های مبتنی بر پهباد به همراه دارد. هر چند که برقراری امنیت با استفاده از روش های رمزگذاری در لایه های بالاتر قابل انجام بوده، امروزه امنیت لایه ی فیزیکی^۱ به عنوان یک تکنولوژی مورد توجه در بحث امنیت شبکه های بیسیم مطرح است. یکی از شاخص های مهم در امنیت لایه ی فیزیکی نرخ مخفی کاری^۲ است که نشان می دهد اطلاعات محرمانه به طور قابل اعتمادی منتقل می شود [۲۶]. در [۲۷] برای داشتن ارتباط ایمن پهباد تلاش شده است که به وسیله ی طراحی مناسب مسیر حرکت پهباد و توان آن، لینک های ارتباطی مجاز را بهبود بخشیده و لینک های استراق سمع را حذف کند و از این طریق متوسط نرخ مخفی کاری را بیشینه کند. در این مقاله مکان استراق سمع کننده ها^۳ مشخص در نظر گرفته شده است. [۲۸] طرحی را در نظر گرفته که در آن یک نقطه ی دسترسی موبایل (AP)^۴، یک ایستگاه پایه، یک پهباد به

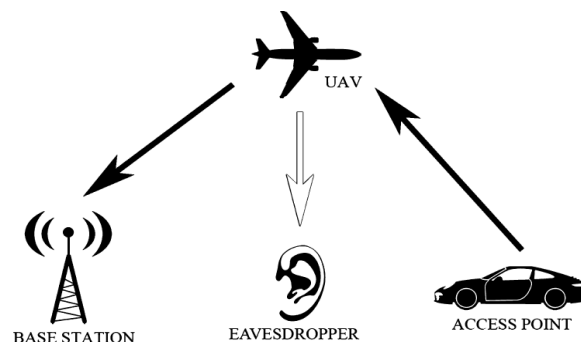
¹ physical layer

² Secrecy rate

³ eavesdropper

⁴ Access point

عنوان رله و یک منبع شنود ایستا وجود دارد. کاربر موبایل می‌خواهد اطلاعاتی را به ایستگاه پایه‌ای بفرستد که در محدوده‌ی پوشش آن قرار ندارد. لذا سیگنال را به پهپاد فرستاده تا از طریق آن به نقطه‌ی مد نظر بفرستد. در این میان استراق سمع کننده‌ای سعی در رهگیری سیگنال دریافتی پهپاد دارد. پهپاد تک آن‌تنه بوده و مجهز به دوربین‌ها و رادارهایی است که مکان منبع شنود را شناسایی می‌کند. مدل چنین سیستمی در شکل (۱۹-۲) آمده است.

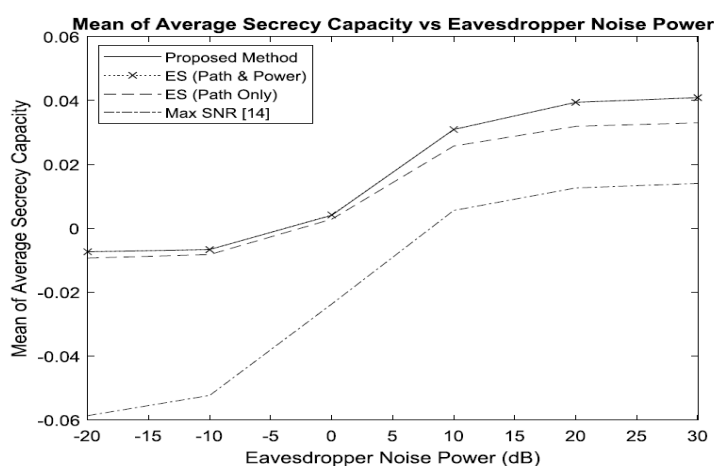


شکل (۱۹-۲) مدل سیستم استراق سمع با رله‌ی پهپادی [۲۸]

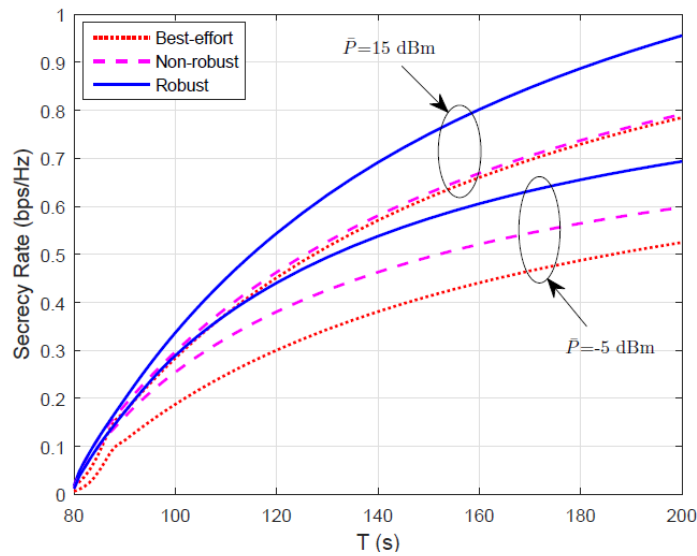
در این مقاله سیگنال به صورت فریم ارسال می‌شود که فریم‌های با شماره زوج برای ارسال لینک بالا از AP به پهپاد و فریم‌های فرد برای ارسال لینک پایین از پهپاد به BS استفاده می‌شود. پس از مدل سازی سیستم عبارتی برای متوسط ظرفیت مخفی‌کاری^۱ سیستم بر حسب SNR بدست می‌آید. هدف بیشینه کردن این ظرفیت با پیدا کردن مسیر و توان بهینه برای پهپاد است. برای این بهینه سازی از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO^۲) استفاده شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی توسط شکل (۲۰-۲) قابل ملاحظه است.

¹ average secrecy capacity

² Particle swarm optimization



شکل (۲-۲۰) مقایسه‌ی مخفی‌کاری سیستم بر حسب نویزهای مختلف در لینک استراق سمع کننده [۲۸] در [۲۹] نیز سناریویی مشابه بالا ولی با K استراق سمع کننده و بدون حضور BS پیاده شده است. یعنی ارتباط بین دو نقطه مد نظر است که یکی از آن‌ها پنهان است. در این مقاله هم هدف بیشینه کردن بدترین حالت نرخ مخفی‌کاری با پیدا کردن مسیری مقاوم برای پنهان و توان آن است با این تفاوت که اطلاعات راجع به مکان استراق سمع کننده‌ها کافی نیست. از آنجا که مساله غیر محدب و حل آن دشوار است، الگوریتمی مبتنی بر روش block coordinate و بهینه‌سازی محدب متوالی ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان از کارایی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با چارچوب‌های معرفی شده دارد.



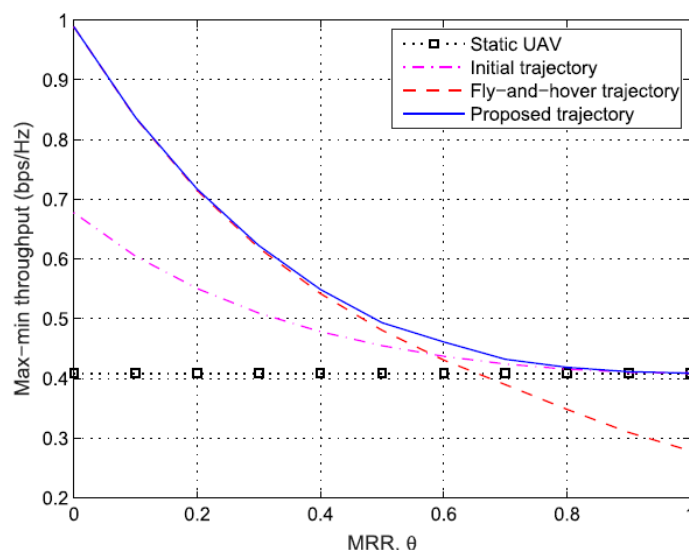
شکل (۲-۲۱) متوسط نرخ مخفی کاری بر حسب T [۲۹]

۲-۳-۷- پهنپاد در شبکه‌های OFDMA^۱

مقاله‌هایی که تا کنون در حوزه‌ی شبکه‌های مبتنی بر پهنپاد بررسی شد، اکثراً برای کاربردهایی بود که نسبت به تاخیر شبکه حساس نبودند. اما در شبکه‌هایی که به تاخیر حساس باشند، تحرک پهنپاد محدود می‌شود. در واقع قیدهای تاخیر روی مسیر پهنپاد تاثیر گذاشته و آن را تغییر می‌دهد. در [۳۰] یک شبکه‌ی OFDMA مبتنی بر پهنپاد بررسی شده است که در آن پهنپاد به عنوان ایستگاه پایه به گروهی از کاربرهای زمینی سرویس می‌دهد. OFDMA یکی از فناوری‌های مورد توجه در نسل پنجم است که مزیت‌هایی همچون پهنای باند قابل انعطاف و تخصیص توان مناسب حول کاربرها دارد [۳۱ و ۳۲]. در این مقاله برای هر کاربر یک نسبت نرخ حداقل (MRR^2) به عنوان کمترین نرخ آنی مورد نیاز به ازای بازدهی مطلوب برای تنظیم درصد ترافیک محدود به تاخیر تعریف می‌شود. هدف پیشنهادی این مقاله بازدهی برای هر کاربر با بهینه سازی مسیر پهنپاد و تخصیص منابع OFDMA با قیدهایی که روی MRR گذاشته می‌شود، است. حل این مساله نیز با استفاده از روش‌های تکراری و تئوری دوگانگی لاگرانژ انجام می‌گیرد. شبیه سازی ها نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد.

¹ orthogonal frequency-division multiple access

² minimum-rate ratio



شکل (۲-۲۲) ماکزیمم بازدهی بر حسب MRR [۳۰]

[۳۳] نیز یک شبکه‌ی OFDM با ساختار $SWIPT^1$ بررسی شده است که در آن حامل‌های فرعی به دو گروه تقسیم شده اند. گروه اول برای ارسال اطلاعات و گروه دوم برای برداشت انرژی. به بیان دیگر در این مقاله پهباد، ایستگاه پایه‌ی هوایی است که هم به K کاربر اطلاعات می‌فرستد و هم انرژی انتقال می‌دهد. همانند قبل هدف این مقاله نیز بیشینه کردن نرخ قابل دسترس برای هر کاربر است به نحوی که مسیر و توان پهباد، الگوی زمان‌بندی و تخصیص حامل‌های فرعی بهینه شود. از آنجایی که تابع هدف غیر محدب است، بازهم برای حل از روش‌های تکراری برای رسیدن به همگرایی پاسخ بهره گرفته شده است.

۲-۳-۸- پهباد به عنوان رله‌ی ارتباطی

در مخابرات بیسیم، رله گذاری یک تکنیک موثر برای بهبود عملکرد و راندمان سیستم است. به دلیل سیمی بودن اکثر سیستم‌های مخابراتی، بیشتر روش‌های رله گذاری موجود روش‌های رله‌گذاری ایستا هستند که در آن‌ها رله در مکان مشخص و ثابتی قرار دارد [۳۴]. امروزه سیستم رله گذاری متحرک با استفاده از پهپادها معرفی شده و به دلیل قابلیت‌های زیاد آن بسیار مورد توجه قرار گرفته

¹ Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

است [۳۵]. امروزه بیشترین کاربرد پهپاد در مخابرات بیسیم در بحث رله‌گذاری است که مقالات زیادی پیرامون این موضوع نگارش شده است. برخی از کاربردهای خاص پهپاد که در عناوین بالا به آن‌ها اشاره شد، به طور کلی‌تر در دسته‌ی کاربرد پهپاد به عنوان رله قرار می‌گیرند.

همانطور که گفته شد در حوزه‌ی کاربرد پهپاد به عنوان رله پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است. در اکثر آن‌ها هدف ماکزیمم کردن نرخ ارسال اطلاعات در شبکه است. آنچه که این پژوهش‌ها را از هم متمایز می‌کند پارامترهای بهینه‌سازی و یا روش حل مساله است. در برخی از پژوهش‌ها پهپاد در مکان ثابتی فرض شده است. به عبارت دیگر از قابلیت تحرک پهپاد به عنوان رله بهره‌ای برده نشده است. در این گونه مقالات، مساله‌ی اصلی پیدا کردن مکان بهینه‌ی پهپاد که در واقع یک نقطه است، می‌باشد به گونه‌ای که کیفیت خدمات (QoS^1) قابل قبول باقی بماند. در [۳۶] چنین سناریویی وجود دارد. در این مقاله پهپاد رله‌ای است که مکان آن و توان ارسال و همچنین پهنای باند بهینه می‌شوند تا سیستم به بیشترین توان عملیاتی برسد. برای ارزیابی کیفیت خدمات شاخص‌هایی چون احتمال برون‌دهی و نرخ خطای بیت در نظر گرفته شده است. در پژوهش دیگری نیز روی ارتفاع بهینه‌ی پهپاد برای بدست آوردن مکان بهینه بحث شده است [۳۷].

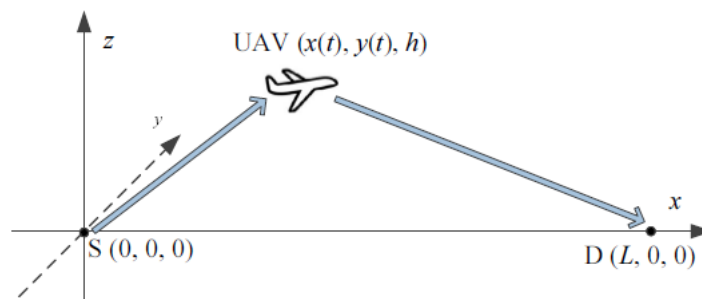
اگر قابلیت تحرک پهپاد را در نظر بگیریم، درجه‌ی آزادی بیشتری برای طراحی سیستم مخابراتی خواهیم داشت. چرا که هر چه پهپاد به نقاط مورد نظر نزدیک‌تر باشد، از کانال ارتباطی بهتری بهره می‌برد. در [۳۸ و ۳۹] حالتی بررسی شده است که پهپاد رله‌ی واسط بین یک گیرنده و فرستنده در مکان ثابت است و پهپاد با بیشترین سرعت خود در حال حرکت است. در هر دو مقاله متغیرهای بهینه‌سازی مسیر پهپاد و توان مبدا و پهپاد است. برای ارسال اطلاعات از پروتکل AF^2 به جای DF^3

¹ quality-of-service

² Amplify-and-forward

³ Decode-and-forward

استفاده شده است. در AF نیازی به کدگشایی دوباره‌ی اطلاعات ارسالی نیست، لذا برای کاربردهای بلادرنگ^۱ مناسب است. شماتیک چنین سیستمی در شکل (۲-۲۳) آمده است:

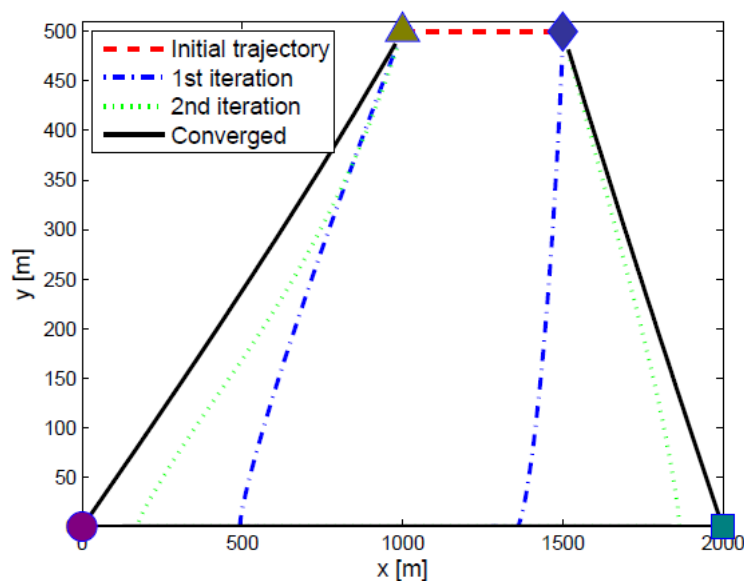


شکل (۲-۲۳) مدل هندسی سیستم با رله‌ی AF مبتنی بر پهپاد [۳۸]

در [۳۹] قیودی روی نقطه‌ی ابتدایی و انتهایی پهپاد و همچنین قید علیت اطلاعات گذاشته شده است. نشان داده شده است که در پهپاد با مسیر ثابت، توان عملیاتی بهینه از ساختار نردبانی^۲ WF پیروی می‌کند. در هر دو مقاله از الگوریتم تکراری با بهینه‌سازی محدب متوالی برای حل مساله‌ی غیر محدب استفاده شده است. شکل (۲-۲۴) مسیر همگرا شده‌ی بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی مقاله‌ی [۳۹] را نشان می‌دهد.

^۱ realtime

^۲ Water filling



شکل (۲-۲۴) مسیر بهینه‌ی پهباد [۳۹]

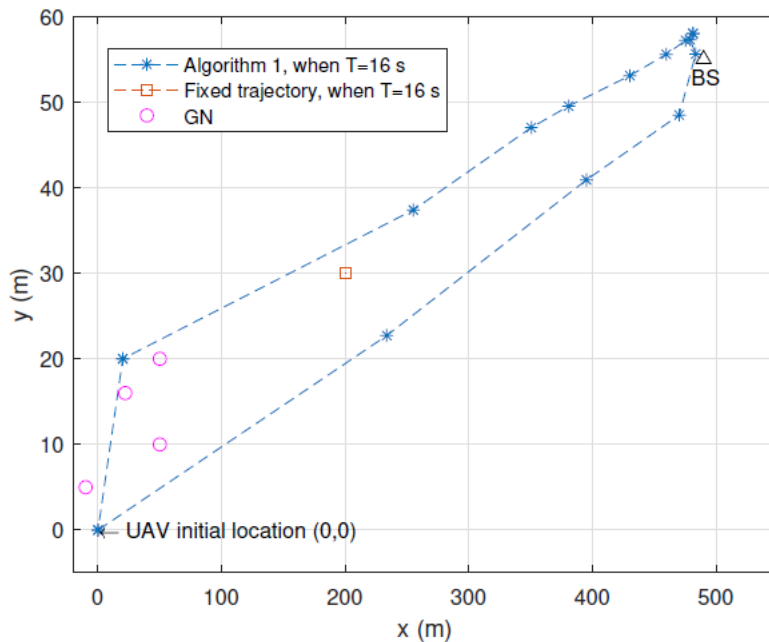
در [۴۰] سیستم مشابه مقاله‌های قبل است. با این تفاوت که برای ارزیابی کارایی سیستم تنها بیشینه کردن نرخ اطلاعات ملاک قرار نمی‌گیرد. همانطور که گفته شد با حرکت پهباد و تغییر مکان آن، کانال ارتباطی تغییر می‌کند. بنابراین ممکن است پهباد در جایی قرار گیرد که از کانال خوبی برخوردار نبوده و کیفیت خدمات مطلوب نباشد. لذا در روش پیشنهادی مقاله دو تابع هدف پیشنهاد شده است. تابع اول مشابه مقاله‌ی قبلی یعنی بیشینه کردن نرخ با بهینه‌سازی مسیر حرکت پهباد و توان مبدا و پهباد و تابع دوم کمینه کردن مجموع توان مصرفی شبکه با قیدی که روی مینیمم نرخ شبکه گذاشته می‌شود. هر دو تابع هدف غیر محدب بوده و با الگوریتم‌های تکراری و با روش SCO^1 حل می‌شوند.

اکنون به بررسی چند مقاله می‌پردازیم که در آن‌ها پهباد رله‌ای در حضور ایستگاه پایه است. در [۴۱] یک رله‌ی پهبادی، یک BS و K کاربر زمینی وجود دارد. ابتدا مدلی برای مصرف انرژی پهباد ارائه شده است. برای ارزیابی بهره‌وری انرژی^۲ سیستم، هم توان عملیاتی سیستم و هم انرژی محرکه‌ی پهباد در نظر گرفته شده است. به پارامترهای بهینه‌سازی علاوه بر مسیر حرکت و توان که در

¹ Successive convex optimization

² Energy efficiency

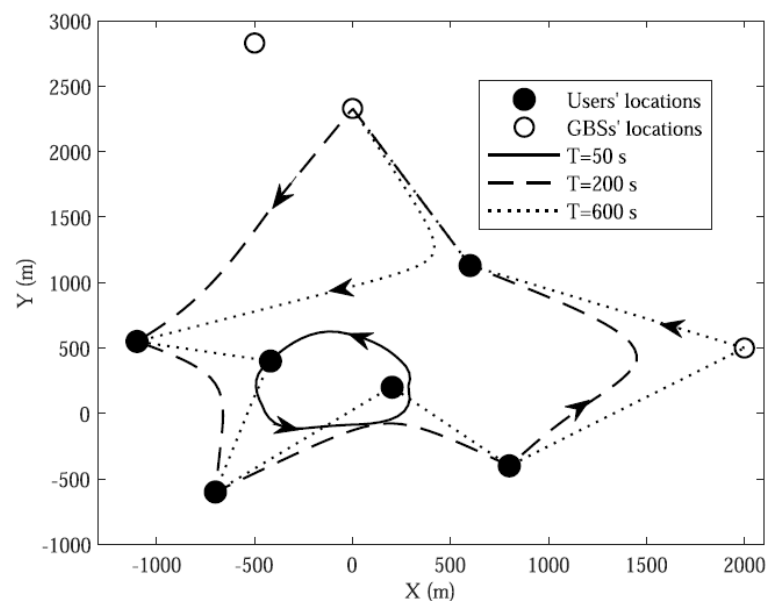
پژوهش‌های قبلی مد نظر بود، سرعت پرواز و شتاب نیز اضافه شده است. شکل (۲-۲۵) مسیر بهینه‌ی بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی مقاله را با حالتی که در آن پهباد ثابت است نشان داده است.



شکل (۲-۲۵) طرح مسیر پهباد [۴۱]

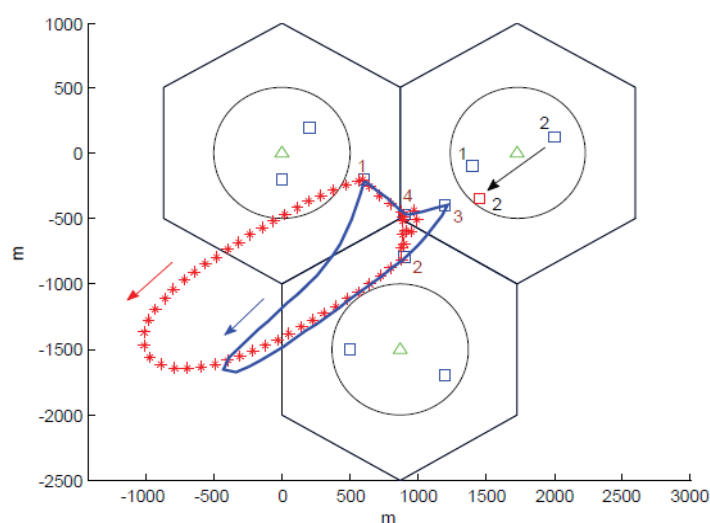
سناریوی دیگری وجود دارد که به جای یک ایستگاه پایه، چند ایستگاه پایه‌ی زمینی وجود داشته باشد و پهباد به عنوان رله به آن‌ها کمک کند تا به کاربرهای زمینی سرویس دهد. این سیستم از دسترسی چندگانه با تقسیم زمانی (^۱TDMA) استفاده می‌کند [۴۲]. مسیر بدست آمده برای چنین حالتی در شکل (۲-۲۶) نشان داده شده است.

¹ time division multiple access



شکل (۲-۲۶) مسیر بهینه‌ی پهباد برای زمان‌های مختلف [۴۲]

در [۴۳] شبکه‌ای متشکل از سه ایستگاه پایه‌ی همسایه با در سلولی به شکل شش ضلعی متصور است. هر ایستگاه پایه در مرکز شش ضلعی قرار دارد و کاربرها به شکل تصادفی در شش ضلعی‌ها توزیع شده‌اند. ایستگاه پایه، کاربرانی که تا شعاع مشخصی از مرکز قرار دارند را پوشش می‌دهد. برای پوشش کاربرانی که در لبه‌ی سلول‌ها قرار دارند از رله‌ی پهبادی استفاده می‌شود. هدف ماکزیمم کردن نرخ اطلاعات این کاربران با طراحی مسیر مناسب برای پهباد است که در شکل نشان داده شده است.



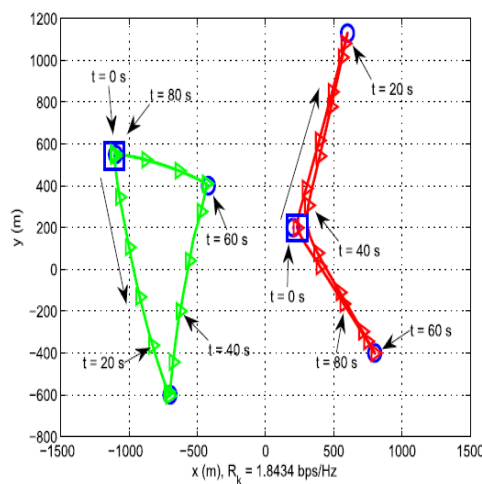
شکل (۲-۲۷) مسیر بهینه‌ی پهباد حول سه سلول همسایه [۴۳]

در [۴۴] یک شبکه‌ی بیسیم مبتنی بر پهباد بررسی شده است که علاوه بر کاربرهای زمینی یک شبکه‌ی سلولی نیز وجود دارد. در مقاله‌ی دیگری نیز ماکزیمم کردن نرخ ارسال اطلاعات از گره منبع به مقصد در شبکه‌ی امواج میلیمتری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله شکل دهی پرتو^۱ به متغیرهای بهینه سازی اضافه شده است [۴۵].

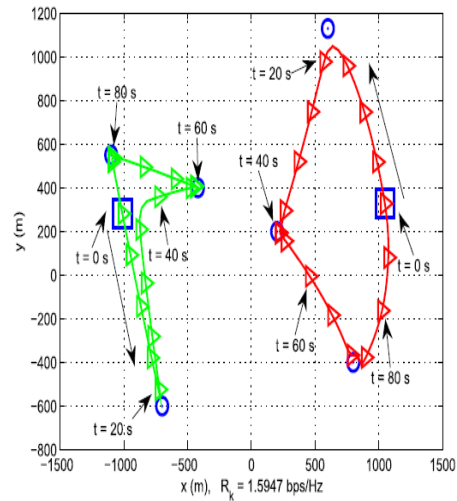
۲-۳-۹- استفاده از چند پهباد برای پوشش دهی کاربران زمینی

در ادامه‌ی پژوهش‌های قبلی روی رله‌های پهبادی، محققان بررسی‌های انجام شده را روی شبکه‌هایی با بیش از یک پهباد گسترش دادند. [۴۶] همانند سناریوهای قبلی به بهینه سازی مسیر، برنامه‌ریزی زمانی و توان با هدف بیشینه کردن توان عملیاتی سیستم می‌پردازد که مساله‌ی تعریف شده با استفاده از الگوریتم block coordinate descent و روش‌های تکراری حل شده و مسیر مطابق شکل (۲-۲۸) بدست می‌آید.

^۱ beamforming



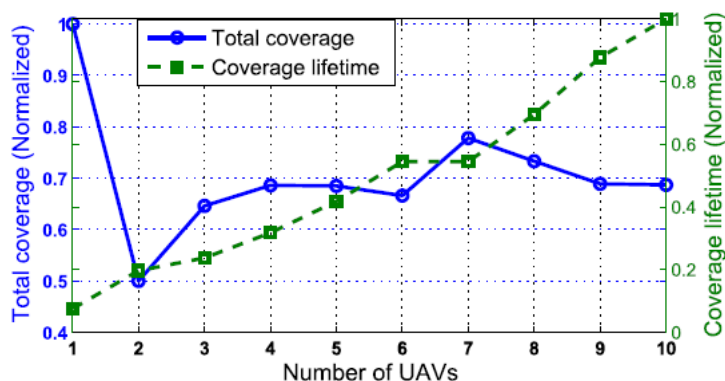
(ب) مسیر پهپادها بدون بهینه سازی توان



(الف) مسیر پهپادها با بهینه سازی توان

شکل (۲-۲۸) مسیر بهینه‌ی پهپاد برای سیستم دو پهپادی [۴۶]

[۴۷] به پارامترهای بهینه سازی مقاله‌ی بالا پهنای باند تخصیص یافته برای هر ارسال را اضافه کرده است. همچنین قیدی برای جلوگیری از برخورد پهپادها به هم گذاشته شده است. جنبه‌ی دیگری که در مورد پهپادها می‌توان به آن پرداخت، ناحیه‌ی پوشش‌دهی است. احتمال پوشش دهی برای هر پهپاد تابعی از ارتفاع پهپاد و بهره‌ی آنتن آن است. با استفاده از نظریه‌ی circle packing مختصات سه بعدی پهپادها برای رسیدن به بیشترین ناحیه‌ی پوشش دهی قابل تعیین است. نتایج بدست آمده در [۴۸] نشان می‌دهد که برای کاهش تداخل‌ها، ارتفاع پهپادها باید بر اساس عرض پرتو آنتن جهت دار پهپاد تنظیم شود. کار دیگری که در این مقاله انجام شده این است که کمترین تعداد پهپاد برای تضمین پوشش‌دهی منطقه‌ی جغرافیایی مورد نظر بدست آورده شده است. در شکل (۲-۲۹) پوشش‌دهی بر اساس تعداد پهپادها نشان داده شده است.



شکل (۲-۲۹) پوشش دهی کل بر حسب تعداد پهپادها [۴۸]

۴-۲- نتیجه گیری

در این فصل به جایگاه مهم و قابل توجه وسایل نقلیه‌ی هوایی بدون سرنشین یا پهپادها در شبکه‌های مخابراتی بیسیم نسل جدید پرداخته شد. دیدیم که پهپادها کاربردهای زیادی در حوزه‌های مختلف مخابراتی بخصوص در کنترل و مدیریت بحران دارند و می‌توانند به عنوان ایستگاه‌های پایه یا رله‌های مخابراتی در سرویس دهی به کاربران نقش داشته باشند. همچنین می‌توانند در افزایش ناحیه‌ی پوشش دهی تاثیرگذار باشند. از آنجایی که پهپادها با باتری‌هایی با ظرفیت محدود کار می‌کنند، آنچه در استفاده از آن‌ها مهم است ای است که مسیر مناسب با کمترین توان مصرفی را بپیمایند یا از روش‌های نوین برداشت انرژی استفاده کنند که در مقالات مختلف به روش‌های مختلف بهینه‌سازی مسیر و توان پهپاد پرداخته شد.

فصل ۳: مفاهیم پایه و ارائه‌ی راهکارهای جدید

۳-۱- مقدمه

با توجه به مزایایی که استفاده از پهپاد در شبکه‌های مخابراتی بیسیم به همراه دارد و در فصل‌های قبلی به آن اشاره شد، در این پایان نامه طرحی تعریف می‌گردد که در آن پهپاد نقش رله‌ی ارتباطی بین کاربرهای زمینی که به صورت جفتی خواستار برقراری ارتباط هستند، ایفا می‌کند. آنچه برای ما مهم بوده، این است که بیشترین نرخ اطلاعات را برای هر زوج کاربر متقاضی داشته باشیم. به عبارت دیگر می‌بایست مسیر حرکت پهپاد و توان فرستنده‌ی اطلاعات و پهپاد و همچنین نحوه‌ی تخصیص زمان به هر زوج کاربر طوری انتخاب شود که به نرخ بالا و در نتیجه‌ی آن بهبود راندمان سیستم مخابراتی ما منجر شود. آنچه توضیح داده شد را در ریاضیات می‌توان با یک مساله‌ی بهینه سازی مدل نمود. لذا لازم است ابتدا با برخی از مفاهیم بهینه سازی از جمله محدب بودن آشنا شده و سپس الگوریتمی برای حل مساله ارائه می‌دهیم.

۳-۲- مروری بر مفاهیم پایه‌ی بهینه سازی

امروزه بهینه سازی یکی از موضوعاتی است که در بسیاری از شاخه‌ها از جمله سیستم‌های کنترل خودکار، تخمین و پردازش سیگنال، ارتباطات و شبکه‌ها، طراحی مدارات الکترونیکی و همچنین اقتصاد کاربرد دارد. منظور از بهینه سازی یافتن بهترین جواب در میان جواب‌های موجود است. در مسائل بهینه سازی عموماً به دنبال کمینه کردن هزینه‌ها برای رسیدن به جواب ممکن هستیم. فرم کلی یک مساله‌ی بهینه سازی ریاضی به صورت زیر است [۴۸]:

$$\text{minimize } f_0(x) \quad (۱-۳)$$

$$\text{subject to } f_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

در مساله‌ی بالا x_i ها متغیرهای بهینه سازی ، تابع f_0 ، تابع هدف^۱ و f_i ها قیدهای مساله‌ی بهینه سازی می‌باشند. مساله می‌تواند بدون قید نیز باشد که در آن صورت فضای جواب کل R^n بوده و مساله حل بسته دارد. اما در مورد مسائل مقید، جواب در ناحیه‌ی محدودی است و حل بسته ندارد. لذا باید از روش‌های تکراری استفاده نمود. مسائل بهینه سازی در انواع متفاوتی دسته بندی می‌شوند. نوع خاصی از مسائل بهینه سازی که می‌خواهیم به آن بپردازیم، بهینه سازی محدب^۲ است. در بهینه سازی محدب هم تابع هدف و هم قیود مساله باید توابعی محدب باشند. برای تشخیص محدب بودن یک تابع باید با مفاهیم و تعاریف زیر آشنا شویم.

۳-۲-۱- تعاریف

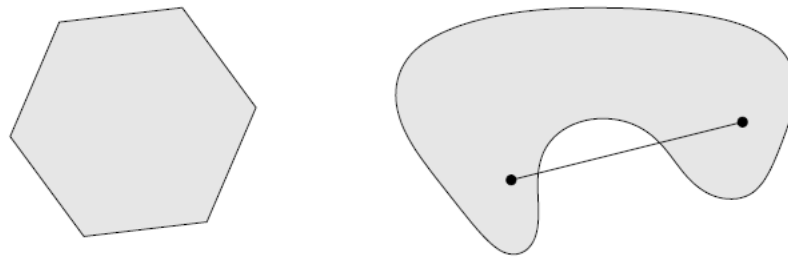
نقطه‌ی شدنی (feasible) نقطه‌ای است که در قیدهای مساله صدق کند. این نقطه را با $\bar{x}$ نشان داده و مجموعه نقاط شدنی را با Ω معرفی می‌کنند.

نقطه‌ی بهینه که آن را با x^* نشان می‌دهند نقطه‌ای است که عضو مجموعه نقاط شدنی باشد و در رابطه‌ی $f_0(x^*) \leq f_0(x)$ صدق کند. این نقطه‌ی بهینه می‌تواند محلی یا سرتاسری باشد. یعنی یا در اطراف خود بهینه باشد و یا اینکه در تمام مجموعه جواب بهینه باشد.

مجموعه‌ی محدب مجموعه‌ای است که به ازای هر دو نقطه‌ی x_1 و x_2 عضو آن مجموعه و $\theta \geq 0$ ، ترکیب $\theta x_1 + (1 - \theta)x_2$ نیز عضو آن مجموعه باشد. به بیانی دیگر هر گاه دو نقطه از یک مجموعه را انتخاب کرده و خط واصل آن را رسم کنیم، اگر خط داخل مجموعه باشد آن مجموعه محدب و اگر خارج از آن قرار گیرد مجموعه نامحدب است. در شکل (۳-۱) یک مجموعه‌ی محدب و یک مجموعه‌ی غیر محدب نشان داده شده است.

^۱ objective function

^۲ convex optimization

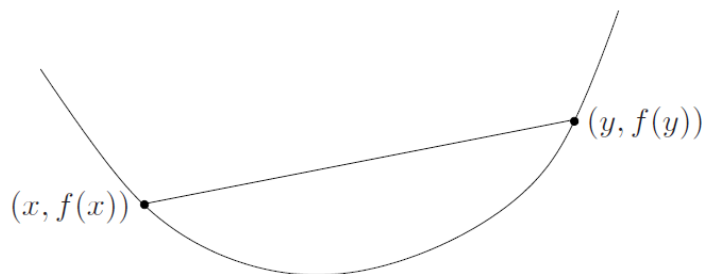


شکل (۳-۱) مجموعه‌ی محدب در چپ و مجموعه‌ی غیر محدب در راست [۴۸]

تابع محدب تابعی است که اولاً دامنه‌ی آن مجموعه‌ای محدب باشد. ثانیاً به ازای هر x و y عضو دامنه‌ی آن و $0 \leq \theta \leq 1$ رابطه‌ی (۳-۲) را داشته باشیم [۴۸].

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y) \quad (۳-۲)$$

نامساوی بالا را از لحاظ هندسی می‌توان اینگونه بیان کرد که قطعه خط بین $(x, f(x))$ و $(y, f(y))$ بالای نمودار تابع f قرار بگیرد. این تعبیر را می‌توان در شکل زیر مشاهده کرد.



شکل (۳-۲) نمودار تابع محدب [۴۸]

همانطور که در شکل قابل مشاهده است، در توابع محدب تنها یک مینیمم وجود دارد.

۳-۲-۲- روش‌های تشخیص محدب بودن تابع

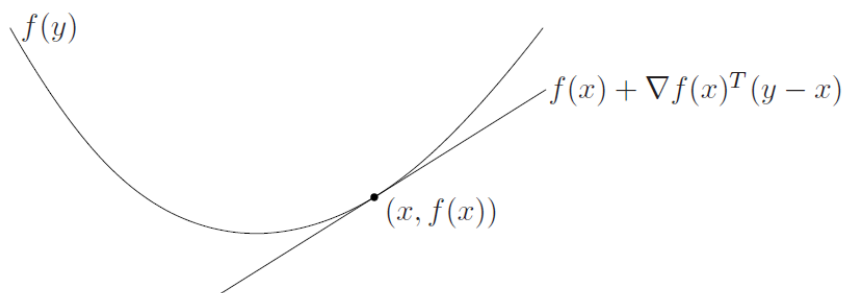
در توابع یک بعدی می‌توان با رسم نمودار تابع و با استفاده از قواعدی که در بالا گفته شد، محدب بودن آن را تشخیص داد. برای توابع دیگر، شرایط مرتبه‌ی اول^۱ و مرتبه‌ی دوم^۱ بررسی می‌شوند.

^۱ First-order

در روش مرتبه اول با استفاده از مشتق اول محدب بودن تابع تشخیص داده می‌شود. شرایط مرتبه اول بدین صورت بیان می‌شود که اگر تابع f یک بار به طور پیوسته مشتق پذیر باشد، f محدب است اگر دامنه‌اش مجموعه‌ای محدب باشد و به ازای هر x و y عضو دامنه‌ی f رابطه‌ی (۳-۳) برقرار باشد [۴۸].

$$f(y) \geq f(x) + \nabla f(x)^T (y - x) \quad (3-3)$$

رابطه‌ی بالا بیان می‌کند که مقدار f از تقریب آن با بسط تیلور مرتبه‌ی اول بزرگتر باشد. به عبارت دیگر تابع f محدب است، اگر تقریب مرتبه‌ی اول آن در هر نقطه یک کران پایین برای آن تابع محسوب شود. آنچه گفته شد در شکل (۳-۳) قابل مشاهده است.



شکل (۳-۳) ترسیم تابع محدب با شرایط مرتبه اول [۴۸]

در روش مرتبه‌ی دوم اگر تابع f دو بار مشتق پذیر باشد، آنگاه محدب است اگر و فقط اگر دامنه‌اش مجموعه‌ای محدب باشد و هسین آن مثبت نیمه معین باشد. یعنی آنچه در رابطه‌ی (۴-۳) آمده است [۴۸]. اگر مقدار هسین منفی باشد، تابع مقعر^۲ است.

$$\nabla^2 f(x) \geq 0 \quad (4-3)$$

لازم به ذکر است که عملیاتی چون جمع وزنی، نگاشت خطی، ماکزیمم گیری نقطه به نقطه و ترکیب دو تابع محدب، محدب بودن تابع را حفظ می‌کنند.

¹ Second-order

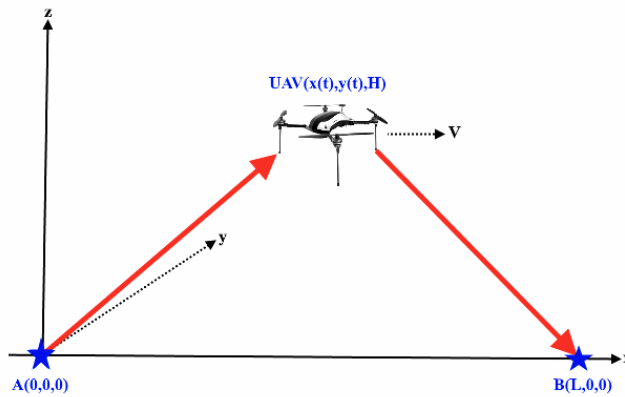
² concave

۳-۳- بیان مساله

حال که مسائل بهینه سازی محدب آشنا شدیم، به تعریف مساله‌ی اصلی می‌پردازیم. همانطور که گفته شد، پهباد به دلیل کاهش هزینه‌ها و کوچک سازی ادوات در کاربردهایی همچون جمع آوری داده، انتشار اطلاعات و رله گذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مساله‌ای که در این پایان نامه تعریف می‌شود، پهباد به عنوان رله در نظر گرفته می‌شود که داده‌ها را بین زوج گره‌های زمینی که به دلایلی از لینک ارتباطی مستقیم مناسبی برخوردار نیستند، عبور می‌دهد. ابتدا سناریوی یک زوج کاربر را بررسی کرده و نهایتاً به چند زوج تعمیم می‌دهیم. در هر دو حالت هدف این است که توان عملیاتی آنها به انتهای سیستم را با طراحی مسیر مناسب برای پهباد و تخصیص توان مناسب برای رله و منبع ارسال اطلاعات، بیشینه کنیم.

۳-۳-۱- طرح یک زوج کاربر

در این سناریو، یک منبع ارسال اطلاعات و یک مقصد به نام‌های A و B که در مکان‌های مشخصی قرار دارند، مفروض است که پهباد در نقش رله می‌خواهد داده‌ها را از مبدا به مقصد برساند. فرض شده است که پهباد در ارتفاع ثابت H پرواز می‌کند. به منظور سادگی محاسبات مکان مبدا و مقصد به ترتیب $(0,0,0)$ و $(L,0,0)$ در نظر گرفته شده است. پهباد در مدت زمان T پرواز کرده و مختصات آن بر حسب زمان $(x(t), y(t), H)$ می‌باشد که $0 \leq t \leq T$. شماتیک مدل در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) مدل سیستم با رله‌ی پهنپای با یک زوج کاربر

برای سادگی تحلیل، کل زمان T را به N بازه‌ی زمانی مساوی تقسیم می‌کنیم. انتخاب N ، موضوع مهمی است که باید به آن توجه نمود. N باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که بازه‌های زمانی که طول آن‌ها $\frac{T}{N}$ است، مقادیر بسیار کوچکی داشته باشند تا بتوان مکان پهنپاد را در هر بازه‌ی زمانی ثابت در نظر گرفت. از طرفی افزایش مقدار N بر پیچیدگی محاسباتی مساله می‌افزاید. لذا باید N طوری انتخاب شود که بین صحت جواب و پیچیدگی مساله مصالحه برقرار گردد. در [۴۶] برای نحوه‌ی انتخاب N رابطه‌ای بیان شده است. اگر $S_{max} = \frac{V_{max}T}{N}$ بیشترین مسافت طی شده توسط پهنپاد در یک بازه‌ی زمانی باشد، می‌توان مینیمم تعداد N برای رسیدن به صحت قابل قبول را با در نظر گرفتن آستانه‌ای به نام ϵ به صورت زیر تعریف کرد.

$$\frac{S_{max}}{H} \leq \epsilon_{max} \rightarrow N \geq \frac{V_{max}T}{H\epsilon_{max}} \quad (۳-۵)$$

با گسسته سازی زمانی مکان پهنپاد را می‌توان با $(x[n], y[n], H)$ نشان داد. اگر v بیشترین سرعت سرعت پرواز پهنپاد در طول مدت پروازش باشد، $\frac{VT}{N}$ بیشترین مسافت طی شده توسط پهنپاد در یک بازه‌ی زمانی خواهد بود. لذا مسیر حرکت پهنپاد باید از قید زیر پیروی کند [۳۸].

$$(x[n+1] - x[n])^2 + (y[n+1] - y[n])^2 \leq \left(\frac{VT}{N}\right)^2 \quad n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (۳-۶)$$

فرض می‌کنیم که به محض اینکه داده از مبدا به پهنپاد رسید، توسط پهنپاد به مقصد فرستاده شود. به عبارتی تاخیر در ارسال در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین برای هر بازه‌ی زمانی دو قسمت در نظر گرفته می‌شود (dual hop). در قسمت اول مبدا سیگنال را به پهنپاد فرستاده و در قسمت دوم پهنپاد آن را در بهره‌ی مشخصی ضرب کرده و به مقصد می‌فرستد. سیگنال دریافتی در پهنپاد به صورت زیر است [۳۸].

$$Y_U[n] = \sqrt{P_A[n]h_{AU}[n]}X_A[n] + Z_1[n] \quad (۷-۳)$$

در رابطه‌ی بالا $P_A[n]$ توان ارسالی مبدا، $X_A[n]$ داده‌ی ارسال شده از مبدا با توزیع $N(0,1)$ ، $Z_1[n]$ نویز سفید گوسی جمع شونده در پهنپاد با توزیع $N(0,\sigma^2)$ و $h_{AU}[n]$ کانال ارتباطی بین پهنپاد و گره-های مبدا است. همانطور که گفته شد، پهنپاد سیگنال را در بهره‌ای ضرب کرده و به مقصد می‌فرستد. در واقع پهنپاد در حالت amplify and forward کار می‌کند. از آنجایی که پهنپاد سیگنال دریافتی را با توان P_U می‌فرستد، این بهره رابطه‌ی مستقیمی با توان ارسالی پهنپاد دارد که به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$G[n] = \sqrt{\frac{P_U[n]}{P_A[n]h_{AU}[n] + \sigma^2}} \quad (۸-۳)$$

با این توصیف، سیگنالی که در مقصد دریافت می‌شود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Y_B[n] = G[n]\sqrt{h_{UB}[n]} Y_U[n] + Z_2[n] \quad (۹-۳)$$

در رابطه‌ی بالا Z_2 نویز سفید گوسی جمع شونده با توزیع $N(0,\sigma^2)$ در مقصد و $h_{UB}[n]$ کانال ارتباطی بین پهنپاد و مقصد است. برای بدست آوردن مقدار کانال باید کانال ارتباطی بین مبدا و پهنپاد و پهنپاد و مقصد را مدل کنیم. مقالاتی راجع به مدل کانال مورد استفاده‌ی پهنپاد نوشته شده است [۴۹ و ۵۰]. کانال ارتباطی هم شامل مولفه‌های LOS و هم مولفه‌های NLOS است. اما بر اساس پروژه‌ی مشارکتی نسل سوم تلفن همراه^۱ (3GPP) در ارتفاع متوسط به بالا یعنی حدود ۴۰ متر بالاتر،

¹ 3rd Generation Partnership Project

احتمال برخورداری از کانال LOS حدود صد درصد است [۵۱]. برای مدل کانال از مدل افت مسیر فضای آزاد استفاده می‌کنیم. همچنین برای سادگی روابط تداخل از سایر کاربرها هم در نظر گرفته نمی‌شود. با توجه به آنچه گفته شد، فرمول بندی ضریب کانال از مبدا به پهنپاد و از پهنپاد به مقصد به ترتیب به شکل زیر است:

$$h_{AU}[n] = \beta_0 d_{AU}^{-2}[n] = \frac{\beta_0}{x^2[n] + y^2[n] + H^2} \quad (۱۰-۳)$$

$$h_{UB}[n] = \beta_0 d_{UB}^{-2}[n] = \frac{\beta_0}{(x[n] - L)^2 + y^2[n] + H^2} \quad (۱۱-۳)$$

در روابط بالا $d_{AU}[n]$ و $d_{UB}[n]$ به ترتیب فاصله‌ی لینک ارتباطی بین مبدا و پهنپاد و مقصد و β_0 ضریب کانال مرجع در فاصله‌ی یک متر است. با توجه به روابط (۸-۳) و (۹-۳) نسبت سیگنال به نویز (SNR)^۱ در مقصد را که با $\gamma[n]$ نشان می‌دهیم، می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\gamma[n] = \frac{P_A[n]P_U[n]h_{AU}[n]h_{UB}[n]}{(P_A[n]h_{AU}[n] + P_U[n]h_{UB}[n] + \sigma^2)\sigma^2} \quad (۱۲-۳)$$

از روی SNR می‌توان نرخ ارسال اطلاعات در لینک ارتباطی از مبدا تا مقصد را به صورت زیر نوشت:

$$R[n] = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma[n]), \quad n = 1, \dots, N \quad (۱۳-۳)$$

هدف این است که نرخ بدست آمده در رابطه‌ی بالا را بیشینه کنیم. همانطور که مشاهده می‌شود تابع هدف ما یعنی نرخ بر حسب $\gamma[n]$ و آن نیز بر حسب توان‌های مبدا و پهنپاد و همچنین کانال که متناسب با عکس مجذور فاصله است می‌باشد. لذا می‌خواهیم با بهینه‌سازی این پارامترها یعنی توان مبدا و پهنپاد و همچنین مسیر حرکت پهنپاد که تعیین کننده‌ی فاصله است، به ماکزیمم نرخ برسیم. اگر به ازای همه‌ی n ها تعریف کنیم $P \triangleq (P_A[n], P_U[n])$ و $W \triangleq (x[n], y[n])$ ، آنگاه مساله‌ی بهینه سازی مورد نظر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

^۱ Signal to noise ratio

$$(P1): \max_{P,W} \min R[n], \quad (3-14-الف)$$

$$\text{subject to } \sum_{n=1}^N P_A[n] \leq N\bar{P}_A, \sum_{n=1}^N P_U[n] \leq N\bar{P}_U, \quad (3-14-ب)$$

$$P_A[n] \geq 0, P_U[n] \geq 0, n = 1, \dots, N, \quad (3-14-ج)$$

$$(x[n+1] - x[n])^2 + (y[n+1] - y[n])^2 \leq \left(\frac{VT}{N}\right)^2 \quad (3-14-د)$$

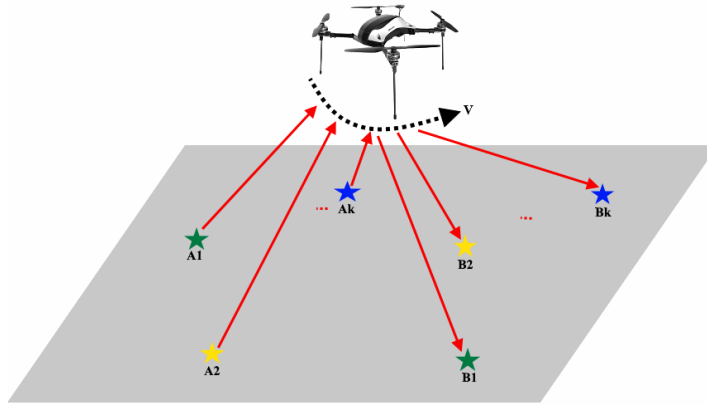
$$n = 1, 2, \dots, N-1$$

در روابط بالا $\bar{P}_A$ و $\bar{P}_U$ متوسط ماکزیمم توان ارسالی مبدا و پهپاد در هر بازه‌ی زمانی هستند. با توجه به تعاریف محدب بودن که در ابتدای این فصل آورده شد، می‌بینیم که مساله‌ی (P1) به خاطر تابع هدف آن یک مساله‌ی غیر محدب است. از آنجایی که حل چنین مساله‌ای دشوار است، الگوریتمی تکراری برای حل آن ارائه داده می‌شود که در بخش بعدی به آن خواهیم پرداخت.

۳-۲- طرح چند زوج کاربر

همان طور که در شکل (۳-۵) می‌بینید، در این سناریو به جای یک زوج کاربر، K زوج کاربر در مکان‌های مشخصی قرار گرفته‌اند که به دلایلی همچون وجود موانع یا فاصله‌ی زیاد، قادر به برقراری ارتباط نیستند. رله‌ی پهپادی در ارتفاع ثابت پرواز کرده و با استفاده از حالت تقسیم زمانی^۱ به زوج‌های ارتباطی سرویس می‌دهد. مختصات افقی مبدا k امین زوج را با (x_{A_k}, y_{A_k}) و مختصات مقصد آن را با (x_{B_k}, y_{B_k}) نشان می‌دهیم. ارتفاع پهپاد هم مثل حالت قبل ثابت و برابر H در نظر گرفته می‌شود. لذا مکان لحظه‌ای پهپاد را می‌توان به شکل $(x(t), y(t), H)$ نشان داد که با تقسیم کل زمان پرواز پهپاد به N بازه‌ی زمانی به شکل $(x[n], y[n], H)$ بازنویسی می‌شود. قید (۳-۶) برای این حالت نیز برقرار است. یعنی مسیر پهپاد باید به گونه‌ای باشد که مسافت طی شده در یک بازه‌ی زمانی از بیشترین مسافتی که پهپاد با توجه به بیشترین سرعتش می‌تواند در یک بازه‌ی زمانی بپیماید، کمتر یا مساوی باشد.

¹ Time-division



شکل (۵-۳) مدل سیستم با رله‌ی پهنپای با چند زوج کاربر

سیگنال دریافتی پهنپاد از k امین مبدا به صورت زیر خواهد بود:

$$Y_{UA_k}[n] = \sqrt{P_{A_k}[n]h_{UA_k}[n]}X_{A_k}[n] + Z_{k1}[n] \quad (۱۵-۳)$$

در رابطه‌ی بالا $P_{A_k}[n]$ توان ارسال k امین مبدا و $X_{A_k}[n]$ سیگنال ارسال شده و $Z_{k1}[n]$ نویز گوسی جمع شونده با میانگین صفر و واریانس σ^2 در پهنپاد است. مطابق قبل کانال ارتباطی را تنها دارای لینک با خط دید مستقیم در نظر می‌گیریم.

$$h_{UA_k}[n] = \beta_0 d_{UA_k}^{-2}[n] \quad (۱۶-۳)$$

فاصله‌ی بین مبدا k امین زوج و پهنپاد از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید و β_0 همان تعریف قبلی را دارد.

$$d_{UA_k} = \sqrt{(x[n] - x_{A_k})^2 + (y[n] - y_{A_k})^2 + H^2} \quad (۱۷-۳)$$

بهره‌ای که پهنپاد سیگنال دریافتی را در آن ضرب می‌کند به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$G_k[n] = \sqrt{\frac{P_U[n]}{P_{A_k}[n]h_{UA_k}[n] + \sigma^2}} \quad (۱۸-۳)$$

سیگنالی که در مقصد B_k دریافت می‌شود نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Y_{UB_k}[n] = G_k[n] \sqrt{h_{UB_k}[n]} Y_{UA_k}[n] + Z_{2k} \quad (۱۹-۳)$$

ضریب کانال بین پهنپاد و مقصد k ام از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$h_{UB_k}[n] = \frac{\beta_0}{((x[n]-x_{B_k})^2 + (y[n]-y_{B_k})^2 + H^2)} \quad (۲۰-۳)$$

نویز موجود در مقصد k ام که با Z_{2k} نشان دادیم، از نویز Z_{1k} از لحاظ آماری مستقل بوده و توزیع $N(0, \sigma^2)$ دارد. از روی روابط بالا نسبت سیگنال به نویز در مقصد k ام به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_k[n] = \frac{P_{A_k}[n]P_U[n]h_{UA_k}[n]h_{UB_k}[n]}{(P_{A_k}[n]h_{UA_k}[n] + P_U[n]h_{UB_k}[n] + \sigma^2)\sigma^2} \quad (۲۱-۳)$$

همانطور که گفته شد، هدف ما ماکزیمم کردن متوسط نرخ اطلاعات همه‌ی جفت‌هاست. برای تعریف کردن عبارت نرخ ابتدا باید پارامتر جدیدی به نام α را معرفی کنیم. طبق توضیحات اولیه پهنپاد در حالت تقسیم زمانی کار می‌کند. پارامتر α برای توضیح چنین حالتی در زبان ریاضی است. در واقع $\alpha_k[n]$ ها متغیرهای باینری هستند که نشان دهنده‌ی نحوه‌ی تخصیص زمانی می‌باشند. هر وقت $\alpha_k[n]$ یک باشد، یعنی بازه‌ی زمانی n ام به زوج k ام تخصیص یافته است و اگر صفر باشد یعنی در آن بازه‌ی زمانی پهنپاد به این زوج سرویس نمی‌دهد و به عبارت دیگر این زوج متقاضی برقراری ارتباط نیستند. در هر بازه‌ی زمانی نیز تنها یک جفت می‌تواند ارتباط بگیرد. پس داریم:

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k[n] \leq 1, \quad \forall n, \quad (۲۲-۳)$$

با تعریف α می‌توان رابطه‌ی نرخ را برای زوج k ام به شکل زیر بازنویسی کرد.

$$R_k[n] = \frac{1}{2} \alpha_k[n] \log_2(1 + \gamma_k[n]), \quad n = 1, \dots, N \quad (۲۳-۳)$$

همانند مساله‌ی یک زوج با تعریف مجموعه‌های P و W و مجموعه‌ی جدید A که به صورت $A \triangleq \alpha_k[n], \forall n$ ، تعریف می‌شود، مساله‌ی بهینه سازی اصلی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$(P2) \quad \max_{A,P,W} \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_k[n] \quad (3-24-الف)$$

$$subject \ to \quad \sum_{n=1}^N P_{A_k}[n] \leq N \overline{P_{A_k}}, \quad \sum_{n=1}^N P_U[n] \leq N \overline{P_U}, \quad (3-24-ب)$$

$$P_{A_k}[n] \geq 0, \quad P_U[n] \geq 0, \quad n = 1, \dots, N, \quad (3-24-پ)$$

$$x[1] = x[N], \quad y[1] = y[N] \quad (3-24-ج)$$

$$(x[n+1] - x[n])^2 + (y[n+1] - y[n])^2 \leq \left(\frac{V_T}{N}\right)^2 \quad (3-24-د)$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k[n] \leq 1, \quad \forall n, \quad (3-24-ه)$$

$$\alpha_k[n] \in \{0,1\}, \quad \forall n, \quad (3-24-ی)$$

در رابطه با قید (3-24-د) در بخش قبل توضیح دادیم. قید (3-24-ج) را برای اعمال سرویس دهی متناوب پهنای قرار دادیم. یعنی فرض کردیم که پهنای پس از پرواز در زمان T به مکان اولیه خود برگردد. $\overline{P_U}$ و $\overline{P_{A_k}}$ هم طبق تعریف بیشترین توان متوسط ارسالی از مبدا k ام و پهنای است. این مساله علاوه بر غیر محدب بودن به دلیل وجود متغیر باینری از نوع mixed-integer است که حل آن دشوار می باشد. برای حل آن نیز از الگوریتم های تکراری استفاده می شود که در بخش حل مساله تشریح خواهد شد.

۳-۴- حل مساله

همانطور که گفته شد، مساله های اصلی غیر محدب بوده و حل آنها پیچیدگی های زیادی دارد، لذا باید روش های دیگری برای تسهیل حل مساله ی بیشینه سازی نرخ ارائه داد. الگوریتم هایی که برای حل چنین مسائلی ارائه می شوند، عموماً الگوریتم های مبتنی بر تکرار هستند. علاوه بر آن تقسیم مساله ی اصلی به چند زیر مساله، حل مساله را ساده تر می کند. چرا که ابزارهای بهینه سازی در

موقعی که متغیرهای بهینه سازی زیاد باشند، در تکرارهای بالا به کندی عمل کرده و از دقت جواب بهینه نیز کاسته می‌شود. اما در زیر مساله‌ها با ثابت در نظر گرفتن برخی متغیرها، متغیرهای بهینه سازی را کاهش می‌دهیم تا با سرعت همگرایی بیشتر به جواب دقیق تری برسیم.

۳-۴-۱- الگوریتم حل مساله‌ی یک زوج کاربر

برای حل مساله‌ی P1 یک بار مساله را با مسیر ثابت و پیش فرض حل می‌کنیم تا نحوه‌ی تخصیص توان را بدست آوریم. در زیر مساله‌ی بعد با ثابت در نظر گرفتن توان، مسیر بهینه‌ی پهنپاد برای سرویس‌دهی با بیشینه‌ی نرخ را بدست می‌آوریم.

• زیر مساله‌ی اول:

در حالت اول وقتی که مسیر را مشخص فرض می‌کنیم، قیدهایی که روی مسیر بودند از مساله حذف می‌شوند. مساله را می‌توان به شکل زیر ساده سازی کرد.

$$(P1.1): \quad \max_p \min R[n] \quad (3-25-الف)$$

$$subject \ to \quad \sum_{n=1}^N P_A[n] \leq N\overline{P}_A, \quad \sum_{n=1}^N P_U[n] \leq N\overline{P}_U, \quad (3-25-ب)$$

$$P_A[n] \geq 0, \quad P_U[n] \geq 0, \quad n = 1, \dots, N \quad (3-25-پ)$$

از آنجایی که تابع هدف مساله تغییری نکرده است، مساله همچنان غیر محدب است. عموماً پیدا کردن جواب بهینه برای مسائل غیر محدب دشوار است. در چنین موقعی معمولاً از روش‌های تکراری مبتنی بر تکنیک SCO استفاده می‌شود. ایده‌ی اصلی برای بکار بردن روش‌های تکراری این است که به جای خود تابع از کران پایین تابع استفاده کنیم. در واقع در کار ما، کران پایین تابع هدف اصلی یعنی نرخ را با بهینه سازی تکراری توان مبدا که همان منبع ارسال اطلاعات و پهنپاد است، ماکزیمم می‌کنیم. برای بدست آوردن کران پایین تابع از بسط تیلور مرتبه‌ی اول آن استفاده می‌کنیم، چراکه تقریب

تیلور مرتبه اول هر تابع محدب یک تخمین گر کران پایین سراسری^۱ برای آن تابع در هر نقطه است. یعنی داریم:

$$f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \quad \forall x \quad (26-3)$$

همانطور که گفتیم رابطه‌ی فوق برای توابع محدب درست است. تابع هدف یعنی نرخ یک تابع لگاریتمی از $\gamma[n]$ است. لذا نسبت به $\gamma[n]$ محدب نبوده ولی نسبت به $\frac{1}{\gamma[n]}$ محدب است. حال با توجه به آنچه گفته شد و طبق رابطه‌ی (26-3)، اگر اندیس l را برای تکرار l ام و اندیس $l+1$ را برای تکرار $l+1$ ام در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$R_{l+1}[n] \geq R_l[n] - \frac{\gamma_l^2}{2(\gamma_l[n]+1)} \left(\frac{1}{\gamma_{l+1}[n]} - \frac{1}{\gamma_l[n]} \right) = R_{lb,l+1} \quad (27-3)$$

می دانیم که عبارت $\frac{1}{\gamma[n]}$ نسبت به $P_A[n]$ و $P_U[n]$ محدب است. بنابراین اگر مساله را به صورت زیر بازنویسی کنیم، جواب آن یک کران پایین برای جواب بهینه‌ی مساله‌ی (P1.1) است.

$$(P1.2): \quad \max_P \min R_{lb,l+1}[n] \quad (28-3 \text{ الف})$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{n=1}^N P_{A,l+1}[n] \leq N\bar{P}_A, \quad \sum_{n=1}^N P_{U,l+1}[n] \leq N\bar{P}_U, \quad (28-3 \text{ ب})$$

$$P_{A,l+1}[n] \geq 0, \quad P_{U,l+1}[n] \geq 0, \quad n = 1, \dots, N \quad (28-3 \text{ پ})$$

حال مساله به یک مساله‌ی محدب تبدیل شد که با روش‌های استاندارد بهینه سازی قابل حل است که در نهایت توان منبع و پهنای را در خروجی تولید می‌کند.

• زیر مساله‌ی دوم:

در حالت دوم، نحوه‌ی تخصیص توان مشخص است، پس مساله‌ی بهینه سازی تنها با قیدی روی مسیر حرکت پهنای حل می‌شود. مساله‌ی جدید را به صورت زیر می‌نویسیم.

¹ Global under-estimator

$$(P1.3): \quad \max_W \min R[n] \quad (3-29\text{-الف})$$

$$\text{subject to } (x[n+1] - x[n])^2 + (y[n+1] - y[n])^2 \leq \left(\frac{VT}{N}\right)^2 \quad (3-29\text{-ب})$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1$$

باز هم با مساله‌ای غیر محدب نسبت به مسیر یا به طور دقیق تر نسبت به $x[n]$ و $y[n]$ روبرو هستیم. همانند مرحله‌ی قبل از دو قابلیت تکرار و کران پایین تابع با استفاده از بسط تیلور استفاده می‌کنیم. مجدداً اندیس l و $l+1$ را معرف تکرار در نظر می‌گیریم. از آنجایی که اگر تابعی نسبت به یک مولفه محدب نباشد، نسبت به معکوس آن محدب است، دو پارامتر جدید به نام‌های S_1 و S_2 تعریف می‌کنیم که $s_1[n] = \frac{1}{h_{AU}[n]}$ و $s_2[n] = \frac{1}{h_{UB}[n]}$ هستند. حال گرچه $\gamma[n]$ نسبت به $x[n]$ و $y[n]$ محدب نیست، نسبت به $s_1[n]$ و $s_2[n]$ محدب است. پس می‌توان از تقریب تیلور برای بدست آوردن کران پایین آن استفاده کرد. ابتدا رابطه‌ی $\gamma[n]$ را نسبت به متغیرهای جدیدی که تعریف کردیم می‌نویسیم.

$$\gamma[n] = \frac{P_A[n]P_U[n]}{(P_A[n]s_2[n] + P_U[n]s_1[n] + \sigma^2 s_1[n]s_2[n])\sigma^2} \quad (3-30)$$

حال طبق بسط تیلور داریم:

$$\gamma_{l+1}[n] \geq \gamma_l[n] - C_l[n](s_{1,l+1}[n] - s_{1,l}[n]) - D_l[n](s_{2,l+1}[n] - s_{2,l}[n]) = \quad (3-31)$$

$$\gamma_{lb,l+1}[n]$$

در رابطه‌ی بالا $C_l[n]$ و $D_l[n]$ مشتقات عبارت $\gamma[n]$ نسبت به متغیرهای تعریف شده هستند که برابر

مقادیر زیر هستند:

$$C_l[n] = \frac{P_A[n]P_U[n](P_U[n]\sigma^2 + \sigma^4 s_{2,l}[n])}{(P_A[n]s_{2,l}[n] + P_U[n]s_{1,l}[n] + \sigma^2 s_{1,l}[n]s_{2,l}[n])^2 \sigma^4} \quad (3-32)$$

$$D_l[n] = \frac{P_A[n]P_U[n](P_A[n]\sigma^2 + \sigma^4 s_{1,l}[n])}{(P_A[n]s_{2,l}[n] + P_U[n]s_{1,l}[n] + \sigma^2 s_{1,l}[n]s_{2,l}[n])^2 \sigma^4} \quad (3-33)$$

از روی $R_{lb,l+1}[n]$ ، $\gamma_{lb,l+1}[n]$ طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$R_{lb,l+1}[n] = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{lb,l+1}[n]) \quad (3-34)$$

حال مسالهی محدب شده به شکل زیر تبدیل می‌شود که قابل حل است:

$$(P1.4): \quad \max_W \min R_{lb,l+1}[n] \quad (3-35 \text{ الف})$$

$$\text{subject to } (x_{l+1}[n+1] - x_{l+1}[n])^2 + (y_{l+1}[n+1] - y_{l+1}[n])^2 \leq \quad (3-35 \text{ ب})$$

$$\left(\frac{V_T}{N}\right)^2, n = 1, 2, \dots, N-1$$

اکنون که برای دو زیر مسالهی تعریف شده برای مسالهی اصلی الگوریتم حلی مبتنی بر مسالهی محدب شده ارائه دادیم، با ترکیب آن‌ها الگوریتم کلی را به شکل زیر ارائه می‌دهیم:

الگوریتم اول

مقدار l را برابر صفر قرار داده و به مسیر پهباد و توان مبدا و پهباد مقدار اولیه می‌دهیم.

مراحل زیر را تکرار می‌کنیم.

زیر مسالهی اول را با روش‌های بهینه سازی محدب حل می‌کنیم تا توان جدید پهباد و مبدا بدست آید.

توان بدست آمده را به عنوان توان ثابت زیر مسالهی دوم قرار می‌دهیم و مساله را حل می‌کنیم تا مکان جدید پهباد بدست آید.

به l یک واحد اضافه می‌کنیم.

تا زمانی که به همگرایی برسیم و یا تعداد تکرارهای پیش فرض تمام شود، حلقه‌ی بالا را ادامه می‌دهیم.

$P_A[n]$ ، $P_U[n]$ ، $x[n]$ و $y[n]$ را به عنوان خروجی مسالهی اصلی نمایش می‌دهیم.

۳-۴-۲- الگوریتم حل مساله‌ی چند زوج کاربر

برای حل مساله‌ی (P2)، سعی می‌کنیم از ایده‌های مساله‌ی (P1) استفاده کنیم. یعنی مساله‌ی اصلی را به چند زیر مساله تبدیل کنیم. از آنجایی که مساله‌ی (P2) یک متغیر بیشتر به نام α دارد، می‌توان با تعریف سه زیر مساله و حل متوالی آن‌ها مساله‌ی اصلی را حل کرد.

همانطور که در بخش تعریف مساله گفته شد، به دلیل وجود متغیر باینری α مساله از نوع mixed-integer می‌باشد. اولین گام در روند حل مساله این است که متغیر باینری α را پیوسته کنیم. متغیر جدید را α_k نامگذاری کرده و داریم:

$$0 \leq \alpha_k[n] \leq 1 \quad \forall k, n. \quad (۳-۳۶)$$

حال مساله را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$(P2.1) \quad \max_{A, P, W} \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_k[n] \quad (۳-۳۷ \text{ الف})$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{n=1}^N P_{A_k}[n] \leq N \overline{P_{A_k}}, \quad \sum_{n=1}^N P_U[n] \leq N \overline{P_U}, \quad (۳-۳۷ \text{ ب})$$

$$P_{A_k}[n] \geq 0, \quad P_U[n] \geq 0, \quad n = 1, \dots, N, \quad (۳-۳۷ \text{ پ})$$

$$x[1] = x[N], \quad y[1] = y[N] \quad (۳-۳۷ \text{ ج})$$

$$(x[n+1] - x[n])^2 + (y[n+1] - y[n])^2 \leq \left(\frac{V_T}{N}\right)^2 \quad (۳-۳۷ \text{ د})$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k[n] \leq 1, \quad \forall n, \quad (۳-۳۷ \text{ هـ})$$

$$0 \leq \alpha_k[n] \leq 1 \quad \forall k, n. \quad (۳-۳۷ \text{ ی})$$

زیر مسالهی اول را به پیدا کردن نحوه‌ی تخصیص زمانی با ثابت در نظر گرفتن مسیر حرکت پهپاد و توان تمامی مبداها و پهپاد اختصاص می‌دهیم. سپس در زیر مسالهی دوم با دانستن نحوه‌ی تخصیص زمانی و مسیر پهپاد، توان‌های مجهول را با روش‌های تکراری می‌یابیم. در گام بعدی فرض بر این است که توان و تخصیص زمانی مشخص باشد و مسیر پهپاد بدست بیاید و نهایتاً یک الگوریتم کلی ارائه می‌دهیم.

• زیر مسالهی اول:

در حالت اول که مسیر و توان‌ها مشخص است، قیدهای مساله تنها روی α بسته می‌شوند. لذا داریم:

$$(P2.2) \quad \max_{\hat{A}} \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_k[n] \quad (\text{الف-۳۸-۳})$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k[n] \leq 1, \quad \forall n, \quad (\text{ب-۳۸-۳})$$

$$0 \leq \alpha_k[n] \leq 1 \quad \forall k, n. \quad (\text{پ-۳۸-۳})$$

مسالهی بالا یک مسالهی محدب از نوع برنامه‌ریزی خطی^۱ (LP) است که به راحتی قابل حل می‌باشد.

• زیر مسالهی دوم:

در این حالت که متغیر $\hat{A}$ و W معلوم است، مساله را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$(P2.3) \quad \max_P \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_k[n] \quad (\text{الف-۳۹-۳})$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{n=1}^N P_{A_k}[n] \leq N \overline{P_{A_k}}, \quad \sum_{n=1}^N P_U[n] \leq N \overline{P_U}, \quad (\text{ب-۳۹-۳})$$

$$P_{A_k}[n] \geq 0, \quad P_U[n] \geq 0, \quad n = 1, \dots, N, \quad (\text{پ-۳۹-۳})$$

همانطور که می‌بینیم تنها متغیر بهینه سازی توان است. به عبارتی می‌بایست تخصیص بهینه‌ی توان را به ازای مسیر و تخصیص زمانی مشخص بیابیم. این مساله نسبت به مولفه‌های توان محدب نیست.

^۱ Linear programming

از آنجایی که تابع $f(\alpha) = \log_2(1 + \frac{1}{\alpha})$ نسبت به α محدب است، با در نظر گرفتن $\frac{1}{\gamma_k[n]}$ به جای $\frac{1}{\alpha}$ می توان تقریب تیلور را به صورت زیر نوشت:

$$R_{k,l+1}[n] \geq R_{k,l}[n] - \alpha_k[n] \frac{\gamma_{k,l}^2}{2(\gamma_{k,l}[n]+1)} \left(\frac{1}{\gamma_{k,l+1}[n]} - \frac{1}{\gamma_{k,l}[n]} \right) = R_{k,lb,l+1} \quad (3-40)$$

بر اساس رابطه ی بالا، می بینیم که در به ازای توان های مبدا و پهنای باند آمده در هر تکرار l و $l+1$ کران پایین نرخ مورد نظر از مبدا تا مقصد است. لذا اگر مساله را به صورت زیر بازنویسی کنیم، جواب بهینه ی آن، کران پایینی برای جواب مساله ی اصلی است.

$$(P2.4): \max_P \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_{k,lb,l+1}[n] \quad (3-41 \text{ الف})$$

$$\text{subject to } \sum_{n=1}^N P_{A_k,l+1}[n] \leq N\overline{P_{A_k}}, \sum_{n=1}^N P_{U,l+1}[n] \leq N\overline{P_U}, \quad (3-41 \text{ ب})$$

$$P_{A_k,l+1}[n] \geq 0, P_{U,l+1}[n] \geq 0, n = 1, \dots, N \quad (3-41 \text{ پ})$$

حال مساله تبدیل به یک مساله ی محدب شد که با استفاده از ابزارهای بهینه سازی (yalmip) می توانیم آن را حل کنیم. به عبارت دیگر از حل تکراری (P2.4) به حل مساله ی (P2.3) خواهیم رسید.

• زیر مساله ی سوم:

در این حالت پارامترهای $\hat{A}$ و P مشخص بوده و به دنبال تعیین مسیر بهینه هستیم. بنابراین متغیرهای بهینه سازی به $x[n]$ و $y[n]$ تبدیل می شوند. این متغیرها در پارامتر کانال ارتباطی در تابع هدف وجود دارند. بنابراین با دو بار مشتق گیری از تابع هدف نسبت به این متغیرها می بینیم که مجدداً تابع هدف نسبت به این متغیرها غیر محدب است. همانند سناریوی یک زوج کاربر با یک تغییر متغیر سعی در محدب نمودن تابع داریم تا بتوانیم از تقریب تیلور برای نوشتن کران پایین آن استفاده کنیم. بدین منظور دو پارامتر $F_{k,1}[n] = \frac{1}{h_{hUA_k}[n]}$ و $F_{k,2}[n] = \frac{1}{h_{hUB_k}[n]}$ را تعریف می کنیم. حال

نسبت سیگنال به نویز را نسبت به متغیرهای جدید می‌نویسیم. خواهیم دید که SNR نسبت به این پارامترها محدب است. پس می‌توان بسط مرتبه اول تیلور را حول آن نوشت.

$$\gamma_k[n] = \frac{P_{A_k}[n]P_U[n]}{(P_{A_k}[n]F_{k,2}[n] + P_U[n]F_{k,1}[n] + \sigma^2 F_{k,1}[n]F_{k,2}[n])\sigma^2} \quad (42-3)$$

$$\gamma_{k,l+1}[n] \geq \gamma_{k,l}[n] - G_{k,l}[n](F_{k,1,l+1}[n] - F_{k,1,l}[n]) - J_{k,l}[n](F_{k,2,l+1}[n] - F_{k,2,l}[n]) = \gamma_{k,lb,l+1}[n] \quad (43-3)$$

ضرایب $G_{k,l}[n]$ و $J_{k,l}[n]$ مشتق $\gamma_k[n]$ بر حسب متغیرهایی که جدید تعریف کردیم هستند که طبق روابط زیر بدست می‌آیند.

$$G_{k,l}[n] = \frac{P_{A_k}[n]P_U[n](P_U[n]\sigma^2 + \sigma^4 F_{k,2,l}[n])}{(P_{A_k}[n]F_{k,2,l}[n] + P_U[n]F_{k,1,l}[n] + \sigma^2 F_{k,1,l}[n]F_{k,1,l}[n])^2 \sigma^4} \quad (44-3)$$

$$J_{k,l}[n] = \frac{P_{A_k}[n]P_U[n](P_{A_k}[n]\sigma^2 + \sigma^4 F_{k,1,l}[n])}{(P_{A_k}[n]F_{k,2,l}[n] + P_U[n]F_{k,1,l}[n] + \sigma^2 F_{k,1,l}[n]F_{k,1,l}[n])^2 \sigma^4} \quad (45-3)$$

در این قسمت مساله را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$(P1.4): \quad \max_W \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_{k,lb,l+1}[n] \quad (3-46-الف)$$

$$subject \ to \ (x_{l+1}[n+1] - x_{l+1}[n])^2 + (y_{l+1}[n+1] - y_{l+1}[n])^2 \leq \quad (3-46-ب)$$

$$(\frac{V_T}{N})^2, n = 1, 2, \dots, N-1$$

$$x_{l+1}[1] = x_{l+1}[N], \ y_{l+1}[1] = y_{l+1}[N] \quad (3-46-پ)$$

که در آن $R_{k,lb,l+1}[n] = \frac{1}{2} \alpha_k[n] \log_2(1 + \gamma_{k,lb,l+1}[n])$ است. این مساله را نیز در محیط متلب با جعبه ابزار yalmip مدل سازی کرده و سپس با استفاده از توابع حل کننده‌ی مناسب حل می‌کنیم.

همانطور که گفتیم این مساله در گام اول با پیوسته سازی متغیر α حل شد. این کار برای ساده سازی روند حل مساله بود. در فرم اصلی مساله متغیر α مقادیر صفر و یک را داراست. به عبارت دیگر α در هر بازه‌ی زمانی کوچک تنها به ازای یک k ، یک می‌شود و این بدان معناست که تنها یک جفت

کاربر می‌تواند درخواست برقراری ارتباط داشته باشد. بدین منظور در گام آخر حل مساله، متغیر α را تبدیل به صفر و یک می‌کنیم. برای این کار این گونه عمل می‌کنیم که در هر بازه‌ی زمانی کوچک آن جفتی که بزرگترین مقدار α را دارد انتخاب کرده و مقدار آن را برابر یک در نظر گرفته و بقیه‌ی α ها را صفر می‌کنیم. حال یک بار دیگر مسائل مربوط به بدست آوردن توان و مسیر را با α جدید و گسسته شده حل می‌کنیم و جواب را به عنوان بهینه‌ترین جواب در نظر می‌گیریم.

حال بر اساس آنچه توضیح داده شد و با استفاده از سه زیر مساله‌ی تعریف شده، الگوریتم کلی حل مساله را به شکل زیر می‌نویسیم:

الگوریتم دوم

مقدار l را برابر صفر قرار داده و به پارامترهای مسیر پهباد و توان مبدا و پهباد و تخصیص زمانی مقدار اولیه می‌دهیم.

مراحل زیر را تکرار می‌کنیم.

زیر مساله‌ی اول را با توان و مسیر ثابت حل کرده و تخصیص زمانی بهینه را بدست می‌آوریم.
زیر مساله‌ی دوم را با تخصیص زمانی ثابت که از مرحله‌ی قبل بدست آمد و مسیر ثابت، حل می‌کنیم و توان بهینه را پیدا می‌کنیم.

با تخصیص زمانی و توان بدست آمده از مرحله‌ی قبل و قبل‌تر زیر مساله‌ی سوم را حل می‌کنیم و مسیر بهینه را می‌یابیم.

به l یک واحد اضافه می‌کنیم.

مراحل بالا را تا وقتی که به همگرایی و یا ماکزیمم تکرار تعریف شده برسیم، تکرار می‌کنیم.

تخصیص زمانی خروجی از روند بالا را گسسته می‌کنیم.

با تخصیص زمانی جدید زیر مساله‌های دوم و سوم را حل می‌کنیم و توان و مسیر را می‌یابیم.

W و P، A را به عنوان خروجی نمایش می‌دهیم.

۳-۵- شبیه سازی

۳-۵-۱- پارامترهای شبیه سازی

در حالت یک زوج کاربر فرض می‌کنیم که نقطه‌ی مبدا روی مبدا مختصات قرار داشته و مقصد در فاصله‌ی ۲۰۰ متری از آن است. برای حالت چند زوج نیز ۵ زوج کاربر تعریف می‌کنیم که به طور تصادفی در فضایی به مساحت 3×3 کیلومتر مربع قرار گرفته اند. ارتفاع ثابت پهپاد را نیز برابر ۱۰۰ متر در نظر می‌گیریم. پهنای باند لینک ارتباطی بین مبدا و مقصد برابر ۲۰ مگاهرتز است. چگالی طیف توان نویز را $\sigma^2 = -100 \text{ dBm/Hz}$ و مقدار β_0 را 30dB قرار می‌دهیم. ماکزیمم سرعت پرواز پهپاد ۶۰ متر بر ثانیه و $\overline{P_{A_k}} = \overline{P_U} = \overline{P_A} = 10 \text{ dBm}$ است. در قسمت مقدار دهی اولیه به توان‌ها، مقدار آن‌ها را برابر با $\bar{P}$ متناظرشان در نظر می‌گیریم. کل زمان پرواز ۱۰۰ ثانیه است که به ۱۰۰ بازه-ی زمانی تقسیم می‌شود.

برای مقدار اولیه دهی به مسیر پهپاد مانند زیر عمل می‌کنیم. در حالت یک زوج کاربر فرض می‌کنیم که پهپاد از بالای مبدا یعنی نقطه‌ی (0,0,100) حرکت کرده و در ۱۰۰ ثانیه با بیشترین سرعتش به بالای مقصد یعنی نقطه‌ی (2000,0,100) برسد. برای مسیر اولیه‌ی پهپاد در حالت چند زوج، مسیر دایروی را در نظر می‌گیریم. مرکز دایره مرکز هندسی تمامی کاربرهاست. شعاع دایره هم با در نظر گرفتن قیدهای سرعت و پوشش‌دهی بدست می‌آید. روابط مرکز و شعاع به ترتیب در زیر آمده است.

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K (x_{A_k} + x_{B_k}) , \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K (y_{A_k} + y_{B_k}) \right), \quad (44-3)$$

$$r_o = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left(\sqrt{(x_c - x_{A_k})^2 + (y_c - y_{A_k})^2} + \sqrt{(x_c - x_{B_k})^2 + (y_c - y_{B_k})^2} \right), \quad (45-3)$$

در نوشتن کد نیاز به مختصات قطبی دایره داریم که آن را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\theta_n = \frac{2\pi(n-1)}{N-1} \quad (46-3)$$

از آنجایی که زاویه‌ی بدست آمده بر حسب رادیان است ابتدا آن را با ضرب در عبارت $\frac{180}{\pi}$ به درجه تبدیل می‌کنیم و سپس خواهیم داشت:

$$x_{U0}[n] = x_c + r_o \cos \theta_n \quad n = 1, \dots, N \quad (47-3)$$

$$y_{U0}[n] = y_c + r_o \sin \theta_n \quad n = 1, \dots, N \quad (48-3)$$

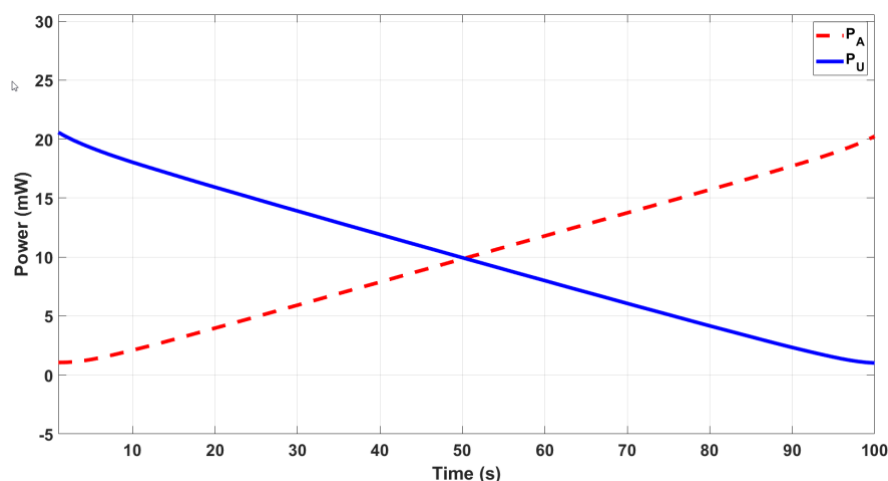
در قسمتی که متغیر α نیاز به مقداردهی اولیه دارد، مقادیر یک را به ازای بازه‌های زمانی مساوی بین جفت‌ها تقسیم می‌کنیم.

۳-۵-۲- نتایج شبیه سازی

با استفاده از پارامترهایی که در مرحله‌ی قبل گفته شد، به بررسی نتایج شبیه‌سازی در حالت یک و چند زوج کاربر می‌پردازیم.

طرح یک زوج کاربر

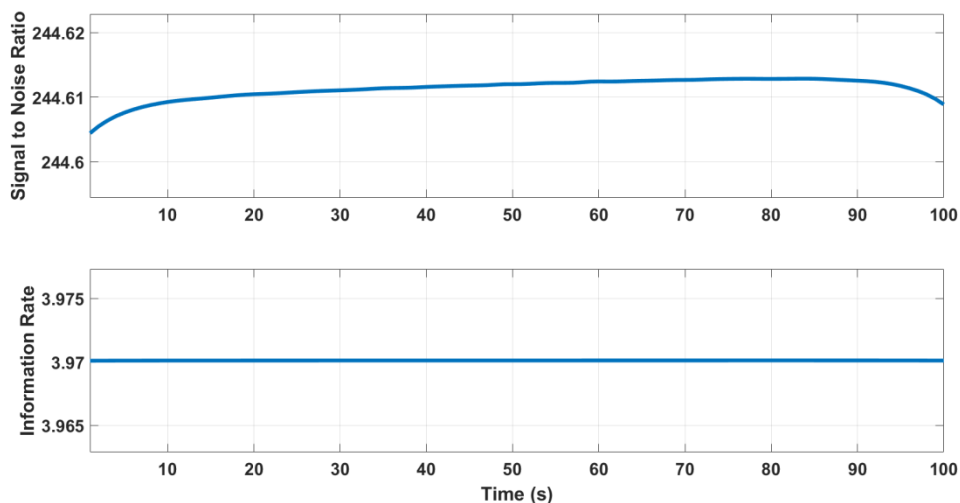
به عنوان خروجی زیر مساله‌ی اول، در شکل (۳-۶) توان بهینه شده‌ی مبدا و پهپاد در طرح یک زوج کاربر برای حالتی که مسیر پهپاد را ثابت در نظر گرفتیم، نشان داده شده است. همانطور که گفته شد، این مسیر ثابت یک مسیر خطی است که پهپاد با سرعت ثابت از مبدا به مقصد را می‌پیماید.



شکل (۳-۶) نتایج تخصیص توان در حالت یک زوج کاربر با مسیر ثابت

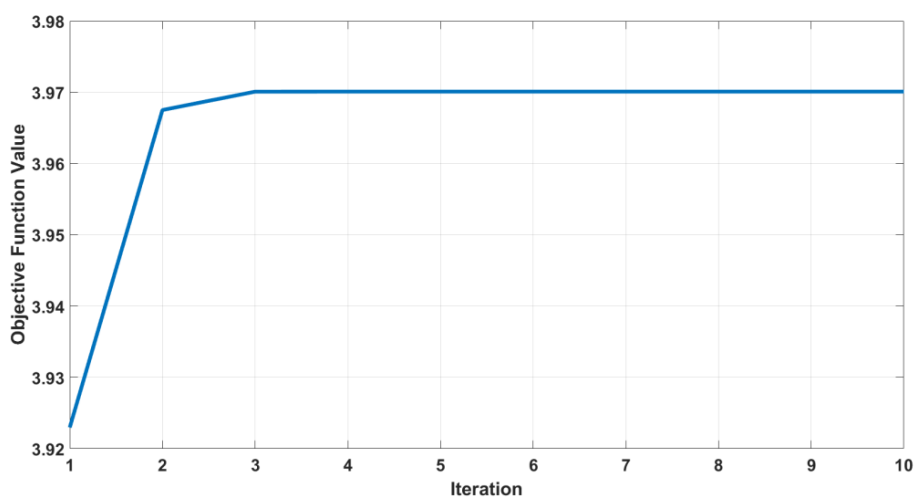
مشاهده می‌شود که هر چه پهنای به نقطه‌ی مبدا نزدیک‌تر باشد، توان بیشتری نسبت به مبدا مصرف می‌کند. چرا که بخشی از توان پهنای صرف انرژی محرکه‌ی آن می‌شود و فاصله‌ی آن از مقصد بیشتر از فاصله‌ی مبدا از پهنای است. همین‌طور هر چه به مقصد نزدیک‌تر شویم، مبدا باید با توان بیشتری سیگنال را ارسال کند. به طور کلی می‌توان گفت که هر چه توان پهنای بیشتر باشد، توان مبدا کمتر است و برعکس. به بیان روشن‌تر توان رابطه‌ی مسقیم با فاصله دارد. هر چه فاصله‌ی لینک ارتباطی بیشتر باشد، افت مسیر بیشتر بوده و توان بیشتری باید ارسال شود. همان‌طور که در شکل بالا به وضوح دیده می‌شود در میانه‌ی مسیر یعنی در زمان ۵۰ ثانیه، توان ارسالی مبدا و پهنای باهم برابر است، چرا که فاصله‌ی پهنای از مبدا و مقصد برابر می‌باشد.

خروجی دیگری که از شبیه سازی حالت مسیر ثابت ارائه خواهیم داد، نسبت سیگنال به نویز و نرخ اطلاعات می‌باشد که در شکل (۳-۷) نشان داده شده است. این نرخ به ازای مسیر ثابت و توان بهینه شده بدست آمده است. نرخ که در این حالت بدست می‌آید برابر ۳/۹۷ بیت بر ثانیه بر هرتز است. همان‌طور که از روابط ریاضی پیداست، نرخ با اعمال تابع لگاریتمی روی نسبت سیگنال به نویز به دست می‌آید. به این منظور در شکل (۳-۷) این نسبت به همراه نرخ نشان داده شده است. این خروجی‌ها در واقع کران پایینی از جواب مساله‌ی اصلی است.



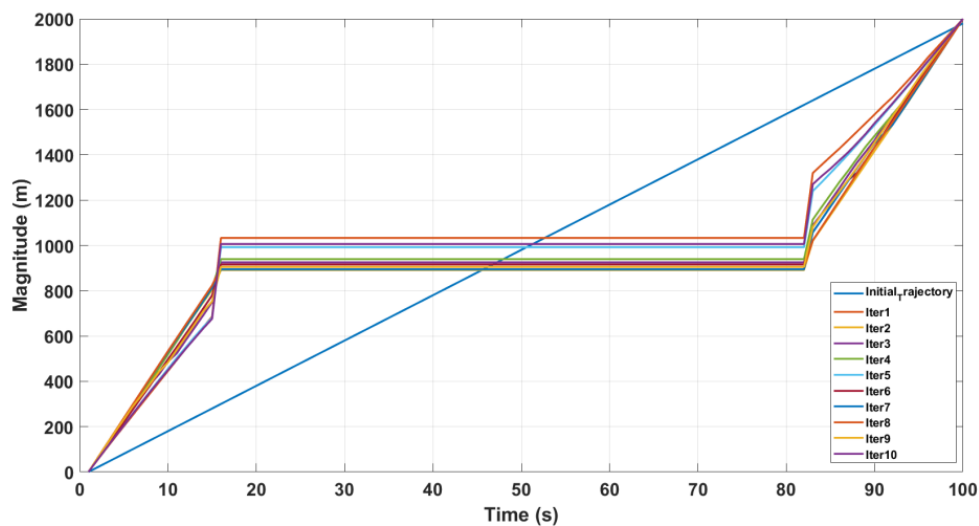
شکل (۳-۷) نسبت سیگنال به نویز و نرخ اطلاعات بهینه در حالت تخصیص توان با مسیر ثابت برای یک زوج کاربر

همانطور که گفته شد، الگوریتم ارائه شده برای بدست آوردن این خروجی‌ها یک الگوریتم تکراری است. لذا مقادیر تابع هدف در تکرارهای مختلف اجرای برنامه متفاوت خواهد بود. شکل (۳-۸) مقدار تابع هدف در تکرارهای مختلف را نشان داده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تابع هدف در حال افزایش است که هدف ما یعنی بیشینه سازی نرخ را برآورده می‌کند. مقدار این تابع از ۳,۹۲۷ حرکت کرده و به مقدار ۳,۹۷ که همان نرخ بهینه شده است رسیده است.



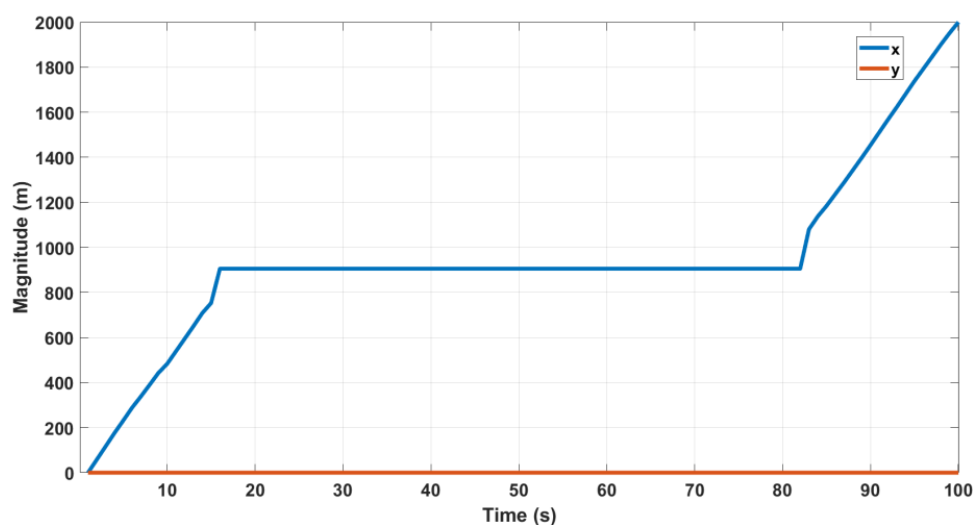
شکل (۳-۸) مقدار تابع هدف بر حسب تکرارهای مختلف در حالت یک زوج کاربر با مسیر ثابت

در حالت بعدی فرض می‌کنیم توان مبدا و مقصد در کل زمان پرواز ثابت و برابر $\bar{P} = 10mW$ است. در این حالت می‌بایست مسیر بهینه شده که شامل دو مولفه‌ی x و y است را با توان ثابتی که در نظر گرفتیم نشان دهیم. در شکل (۹-۳) مولفه‌ی x خروجی از اجرای برنامه یا به عبارتی مولفه‌ی بهینه شده را بر حسب ۱۰ تکرار نشان می‌دهیم. لازم به ذکر است که در اجرای برنامه به ۱۰ تکرار بسنده نکرده و کارایی الگوریتم با تکرارهای بالایی سنجیده شده است ولی به دلیل قابل نمایش نبودن در این قسمت ۱۰ تکرار را انتخاب نمودیم.



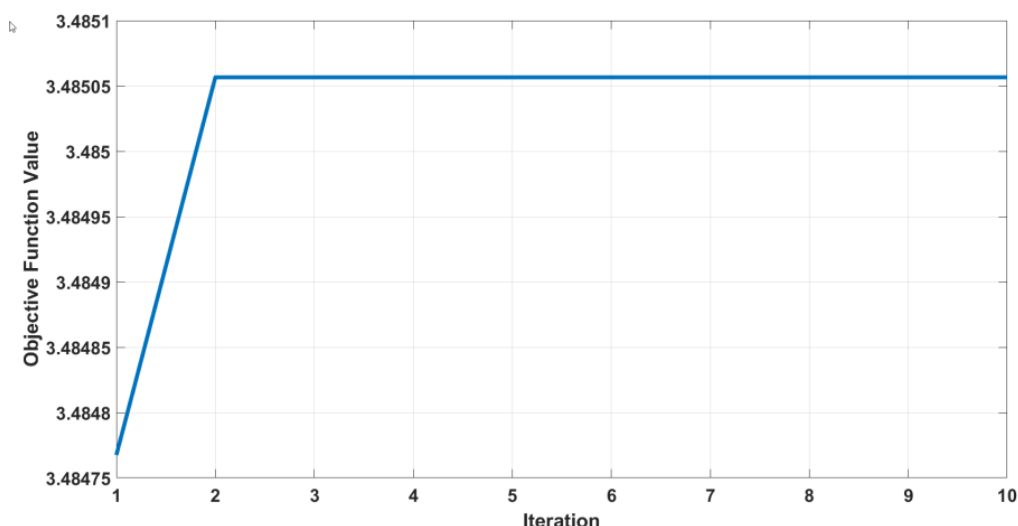
شکل (۹-۳) مولفه‌ی x بهینه شده در حالت یک زوج کاربر با توان ثابت در تکرارهای مختلف

در شکل بالا مسیر اولیه‌ی حرکت پهباد به همراه تکرارهای بعد رسم شده است. مطابق آنچه گفته شد مسیر اولیه‌ی پهباد خطی است که او را با سرعت ثابت از مبدا به مقصد می‌رساند. به خوبی مشاهده می‌شود که مسیر به یک مقدار ثابت که مکان بهینه‌ی پهباد است، همگرا شده است. در مسیر بهینه پهباد از نقطه‌ی مبدا با بیشترین سرعت خود حرکت کرده و به مکانی نزدیک وسط مبدا و مقصد رسیده و در آنجا پرواز می‌کند. در واقع بهترین مکان برای پهباد نقطه‌ای است تقریباً وسط مبدا و مقصد که بیشترین زمان را در آنجا سپری می‌کند زیرا در این مکان نرخ ارسال اطلاعات بیشترین مقدار را دارد که از روی رابطه‌ی مربوط به محاسبه‌ی نرخ قابل اندازه‌گیری است. در شکل بعدی هر دو مولفه‌ی x و y بهینه شده در آخرین تکرار را نشان داده ایم.

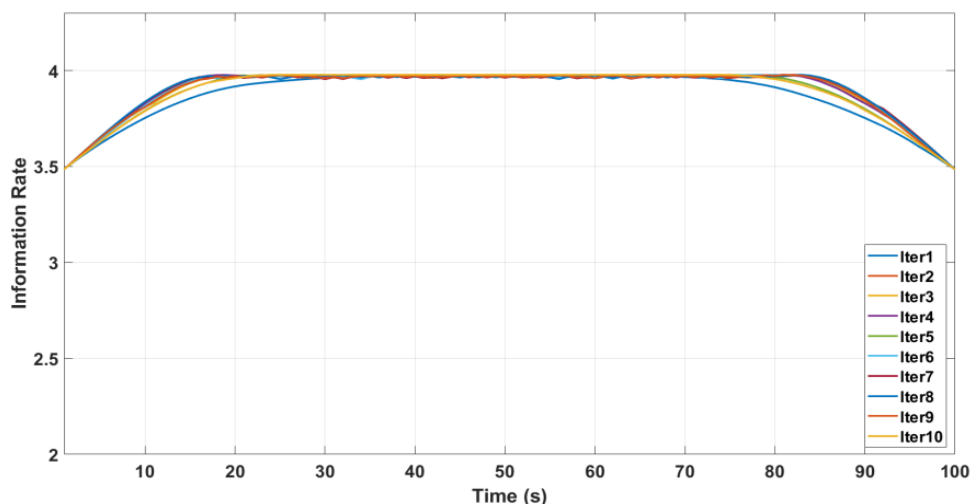


شکل (۳-۹) مسیر همگرا شده برای حالت یک زوج کاربر با توان ثابت

می‌بینیم که مولفه‌ی y بدست آمده از مساله‌ی بهینه‌سازی برابر صفر است. صفر شدن y باعث می‌شود که کمترین فاصله و در نتیجه کمترین افت مسیر و مصرف توان را داشته باشیم. در شکل‌های بعدی نرخ بهینه‌ی بدست آمده از الگوریتم دوم که برای حالت توان ثابت ارائه شده بود و همچنین مقدار تابع هدف در تکرارهای مختلف بدست آمده است. همانطور که گفته شد، تابع هدف ما کران پایینی برای نرخ متناظر آن است که این موضوع از مقایسه‌ی دو شکل بعدی قابل درک است.



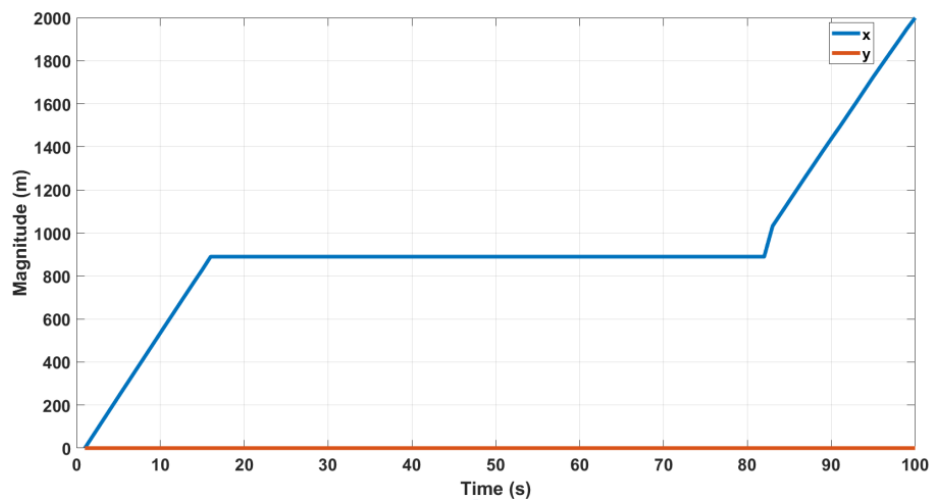
شکل (۳-۱۰) مقدار تابع هدف بر حسب تکرار برای حالت یک زوج کاربر با توان ثابت



شکل (۳-۱۱) نرخ اطلاعات بهینه برای بهینه سازی مسیر در حالت یک زوج کاربر با توان ثابت

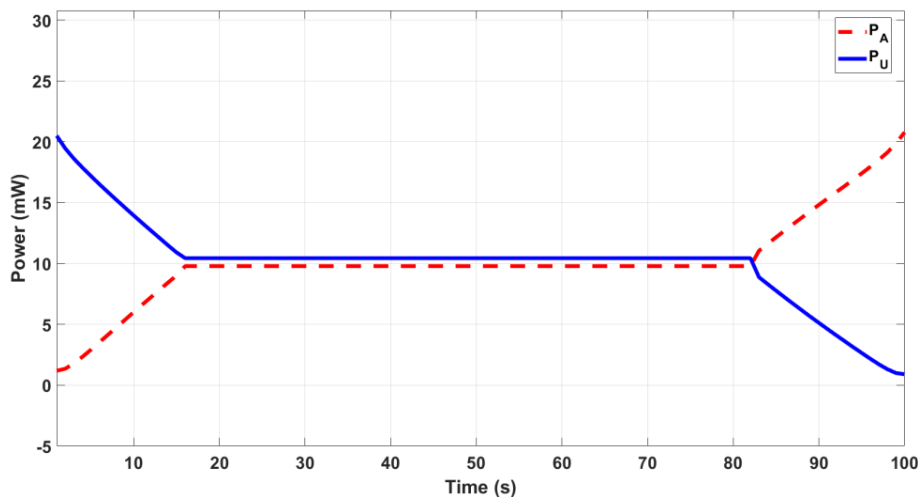
از آنجایی که مکان در یک بازه‌ی زمانی به یک نقطه همگرا شده بود، نرخ نیز باید به مقدار ثابتی برای همان بازه‌های زمانی می‌رسید که این انتظار در شکل بالا قابل مشاهده است. یعنی زمانی که پهنای از مبدا مختصات شروع به پرواز می‌کند تا ثانیه‌ی ۱۷ که ثابت می‌شود، مقدار نرخ نیز رو به افزایش است و در فاصله‌ی زمانی ۱۷ تا ۸۳ ثانیه که مکان ثابت می‌ماند، مقدار نرخ نیز ثابت خواهد ماند. از طرف دیگر می‌بینیم که در بازه‌ی زمانی که پهنای در مکان ثابت در وسط مسیر قرار دارد مقدار نرخ بیشترین مقدار خود است.

در تحلیل‌هایی که تا کنون انجام شد و نتایج آن در قالب شکل‌های بالا نشان داده شد، تنها یک پارامتر بهینه شده بود. در این قسمت نتایج حاصل از بهینه سازی همزمان توان و مسیر را ارائه می‌دهیم. شکل (۱۲-۳) مسیر بهینه را با هر دو مولفه‌اش نشان می‌دهد. در این مسیر خروجی هم مولفه-ی y برابر صفر بدست آمد که در تایید وجوب کمترین فاصله‌ی ارتباطی است. همچنین بهترین نقطه برای پرواز پهباد نقطه‌ای حدود وسط مسیر بدست آمده است.



شکل (۱۲-۳) مسیر بهینه برای حالت یک زوج کاربر با بهینه سازی همزمان توان و مسیر

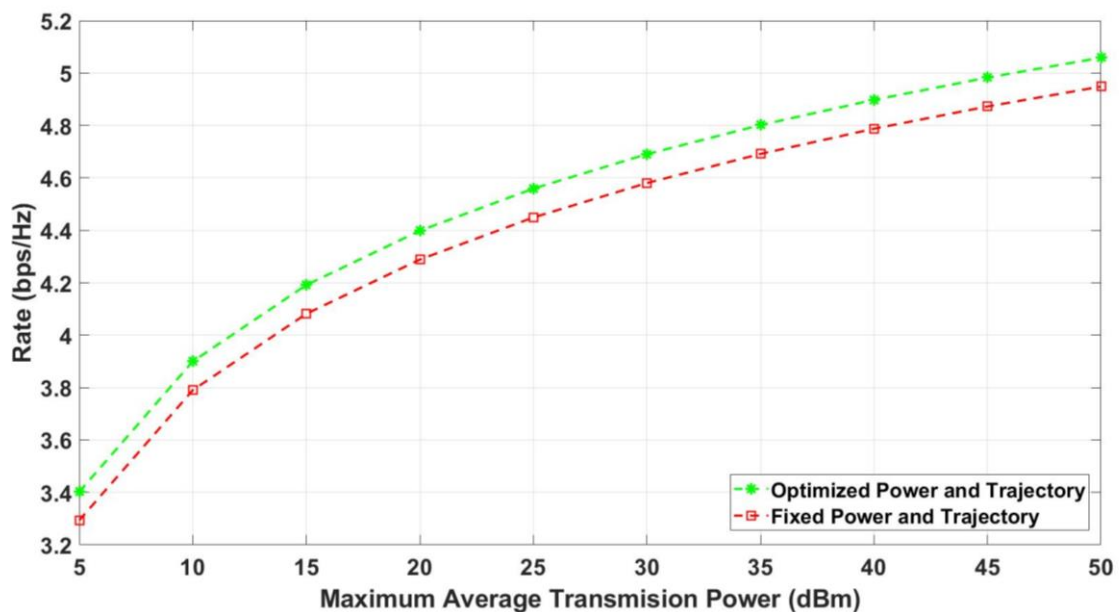
همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، پهباد بیشترین زمان را از ۱۷ تا ۸۳ ثانیه در ارتفاع حدود ۹۰۰ متر پرواز می‌کند. بر اساس رابطه‌ی (۱۳-۳) بیشترین نرخ بدست آمده با مقادیر از پیش تعریف شده‌ی $\bar{P}$ و σ^2 و β_0 در همین فاصله است. بر اساس چنین مسیر بهینه‌ای توان بهینه‌ی بدست آمده مطابق شکل (۱۳-۳) خواهد بود.



شکل (۳-۱۳) تخصیص توان بهینه برای حالت یک زوج کاربر با بهینه سازی همزمان مسیر و توان

بر اساس دو شکل قبل قابل توضیح است که به ازای زمان‌هایی که پهنای باند در وسط مسیر است، توان مبدا و پهنای تقریباً با هم برابر است. این امر به دلیل یکسان بودن فاصله‌ی پهنای از مبدا و مقصد است. یعنی به همان اندازه که مبدا باید توان مصرف کند تا آن را به پهنای برساند، پهنای نیز باید توان مصرف کند تا سیگنال دریافتی را به مقصد برساند.

در گام آخر از شبیه‌سازی سناریوی تک جفت، برای ارزیابی کارایی آن نرخ حاصل از الگوریتم پیشنهادی که مبتنی بر بهینه‌سازی همزمان توان و مسیر بود را با حالتی که در آن توان و مسیر ثابت است مقایسه نمودیم. در حالت توان و مسیر ثابت که به عنوان یک چارچوب معیار مطرح است فرض می‌شود که توان مبدا و پهنای در کل زمان پرواز برابر است. مکان پهنای هم به طور خطی از مبدا تا مقصد با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در طول ۱۰۰ ثانیه پرواز در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل (۳-۱۴) قابل مشاهده است نرخ الگوریتم پیشنهادی بر اساس مقادیر مختلف متوسط توان نسبت به حالت مسیر و توان ثابت مقدار بیشتری داشته است و این نشان از کارایی الگوریتم پیشنهادی دارد.

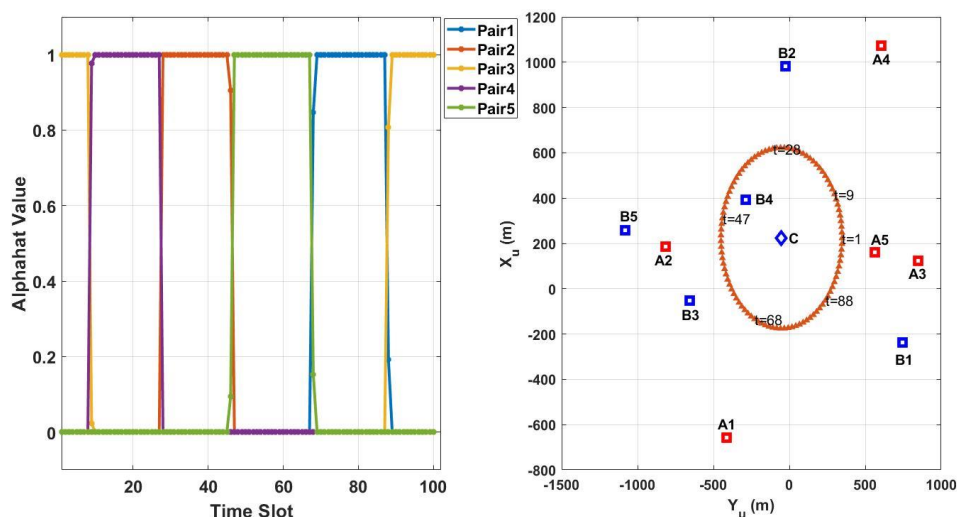


شکل (۳-۱۴) نرخ اطلاعات با سنایوهای مختلف مسیر و توان

طرح چند زوج کاربر

برای حالت چند زوج کاربر، سه زیر مساله‌ی تعریف شده داشتیم که از حل آن‌ها سه نوع خروجی بدست می‌آید. اولین خروجی مقدار پارامتر α است که نحوه‌ی برقراری ارتباط جفت‌ها یا به عبارتی اولویت ارتباط‌ها را مشخص می‌کند. مسیر ثابت در نظر گرفته شده برای این مساله نیز همان مسیر دایروی تعریف شده و توان ثابت نیز برابر بیشینه توان مجاز در هر بازه‌ی زمانی است. در این حالت که α یکی از خروجی‌های برنامه است در واقع بهینه‌ترین نحوه‌ی ارتباط گیری برای رسیدن به ماکزیمم نرخ بدست می‌آید. در شکل (۳-۱۵) این مقادیر نشان داده شده است. محور افقی نشان دهنده‌ی بازه-ی زمانی و محور عمودی مقادیر بدست آمده‌ی α را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، وقتی در یک بازه‌ی زمانی α برای یک زوج مقدار می‌گیرد، بقیه‌ی مقادیر صفر یا کوچک هستند. همچنین به ازای یک‌های متوالی برای یک زوج خاص آن زوج در طول آن بازه در حال ارسال و دریافت اطلاعات هستند و برای سایر جفت‌ها هیچ گونه ارتباطی در نظر گرفته نشده است. باید توجه

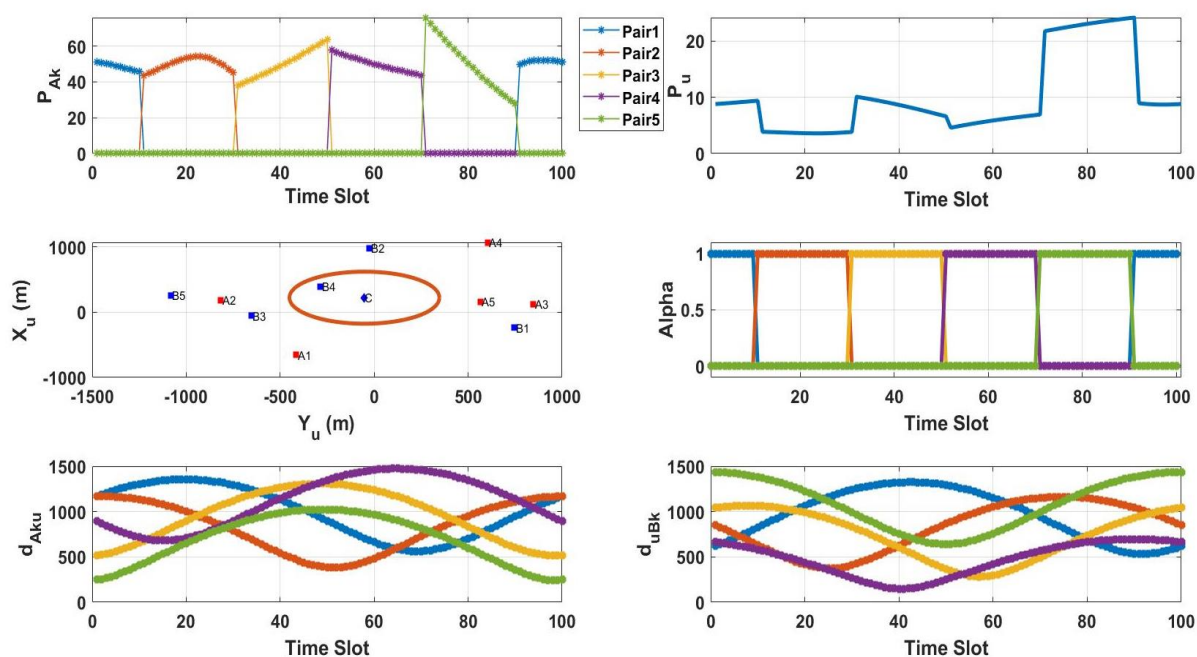
کرد به دلیل اینکه متغیر α ابتدا پیوسته شد خروجی‌های این مرحله در واقع $\hat{\alpha}$ هستند. به همین دلیل مقدار آن‌ها دقیقا صفر یا یک نیست.



شکل (۳-۱۵) نحوه‌ی تخصیص زمانی بهینه برای ۵ زوج کاربر در ۱۰۰ بازه‌ی زمانی

در زیر مسالهی دوم و سوم نحوه‌ی تخصیص زمانی مشخص است. در دنیای واقعی و در بحث مدیریت بحران این سناریو بسیار نمود پیدا می‌کند. به طور مثال ۵ تماس تلفنی از سوی ۵ مدیر منطقه‌ای باهم مد نظر است و ترتیب برقراری ارتباطها و زمان تخصیص یافته به هر کدام نیز بر اساس یک برنامه‌ی تدوین شده مشخص است. در این حالت متغیر α دیگر خروجی بهینه سازی نبوده و بر اساس α ورودی و مشخص، مسیر و توان بهینه برای پهنای باند بدست می‌آید.

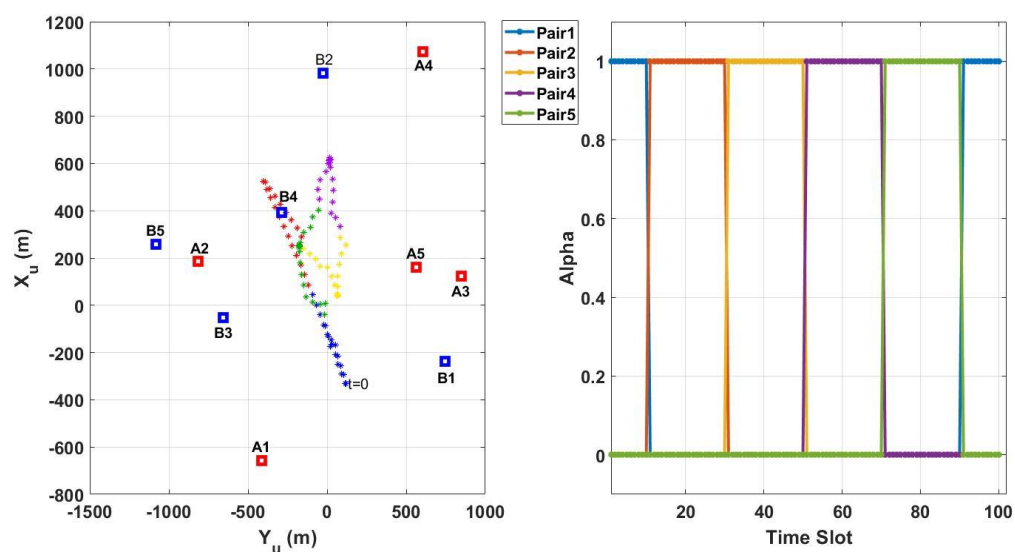
در شکل (۳-۱۶)، α ثابت و مسیر دایروی ثابت به همراه مکان جفت‌های ارتباطی و خروجی زیر مسالهی دوم یعنی توان نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۶) ورودی و خروجی‌های زیر مساله‌ی دوم

در شکل بالا از روی تغییرات فاصله‌ی مبدا تا پهنپاد و پهنپاد تا مقصد می‌توان آن‌ها را توجیه نمود. در زمان‌هایی که پهنپاد از مبدا دور می‌شود، فاصله‌ی آن از مقصد کاهش می‌یابد. لذا توان ارسالی مبدا روند افزایشی و توان پهنپاد روند کاهشی خواهد داشت که در شکل قابل مشاهده است. به عنوان مثال از زمان ۳۰ تا ۴۰ ثانیه که طبق نمودار آلفا، زوج سوم در حال ارتباط گیری است، مقدار d_{UA_k} در حال افزایش و d_{UB_k} در حال کاهش است. به همین ترتیب نمودارهای توان نشان می‌دهند که توان مبدا در این بازه در حال افزایش و توان پهنپاد در حال کاهش است.

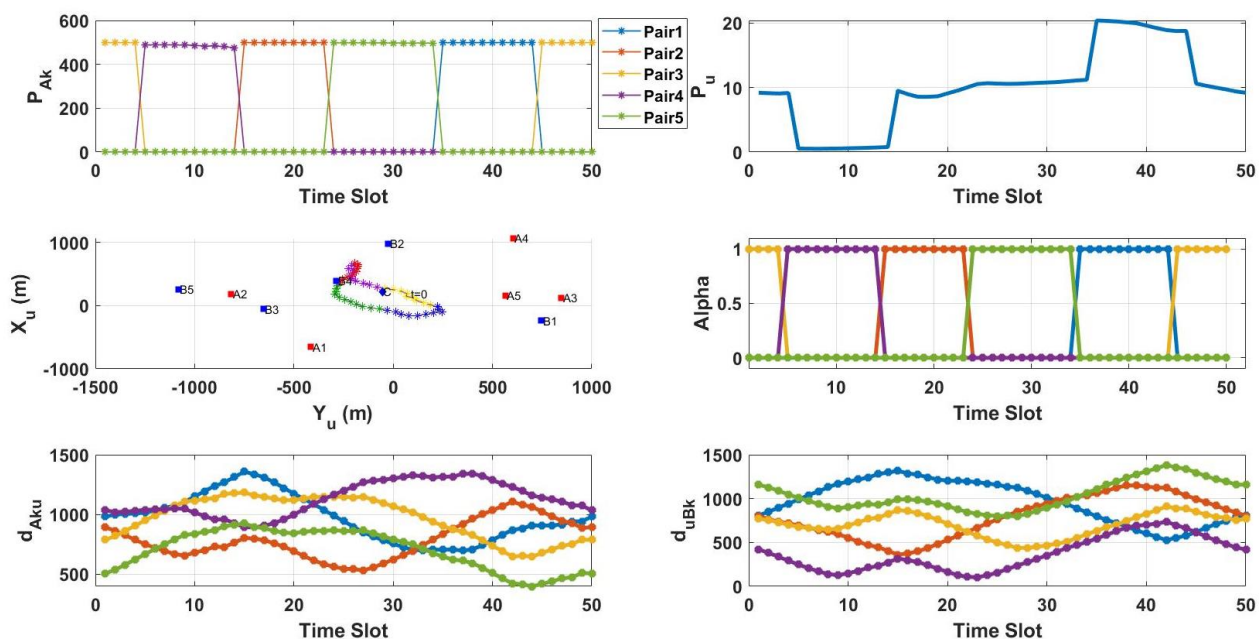
شکل (۳-۱۷) مسیر بهینه‌ی حاصل از حل زیر مساله‌ی سوم برای پوشش‌دهی جفت‌های ارتباطی را نشان می‌دهد. به عبارتی اگر به ازای تخصیص زمانی مشخص ورودی و توان ثابت تعریف شده، پهنپاد روی این مسیر حرکت کند، بیشترین نرخ برای جفت‌های ارتباطی حاصل خواهد شد.



شکل (۳-۱۷) مسیر بهینه‌ی پهباد برای زمان ۱۰۰ ثانیه با α مشخص و توان ثابت ۱۰ میلی وات

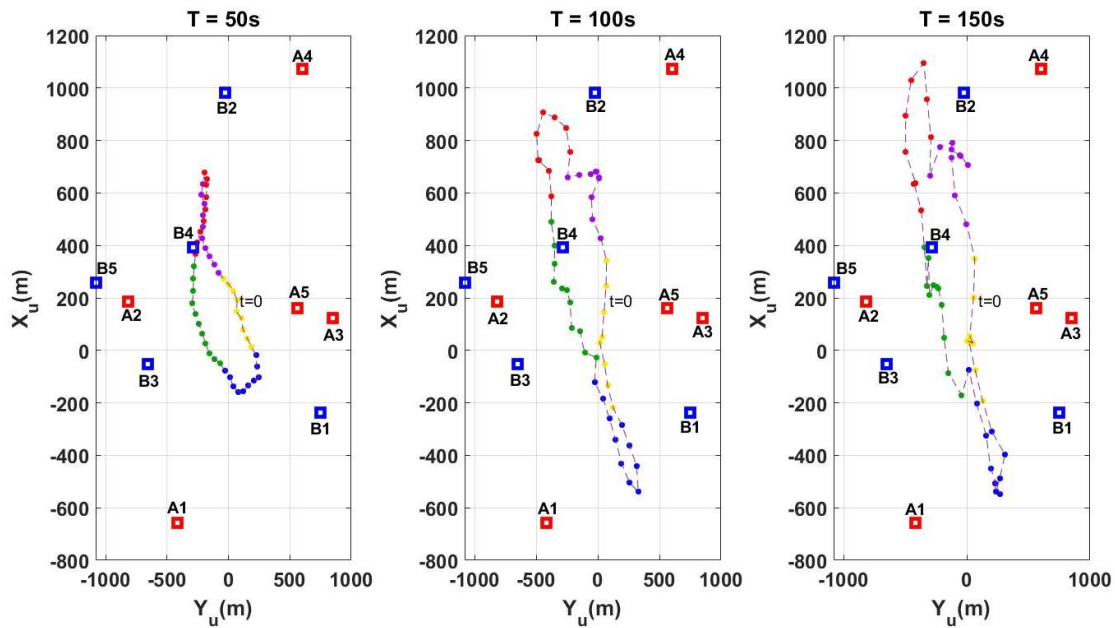
در شکل بالا نقاط مبدا و مقصد و نحوه ی تقسیم زمانی به همراه مسیر بهینه‌ی بدست آمده برای حرکت پهباد نشان داده شده است. رنگ‌های مختلف میزان بازه‌های زمانی اختصاص یافته به هر زوج را مشخص می‌کند. به عبارت دیگر هر رنگ، سهم آن زوج در مسیر را تعیین می‌کند. به عنوان مثال وقتی پهباد در قسمت آبی مسیر قرار دارد، در حال سرویس دهی به زوج اول است. سپس در ۲۰ ثانیه بعدی که با رنگ قرمز نشان داده شده است، به زوج دوم سرویس می‌دهد. همانگونه که از شکل پیداست برای هر زوج مسیر به سمت میانه‌ی آن‌ها متمایل می‌شود.

در شکل (۳-۱۸) خروجی‌های الگوریتم کلی نشان داده شده است که در آن هر سه پارامتر تخصیص زمانی، توان و مسیر از روی بهینه سازی بدست آمده اند.



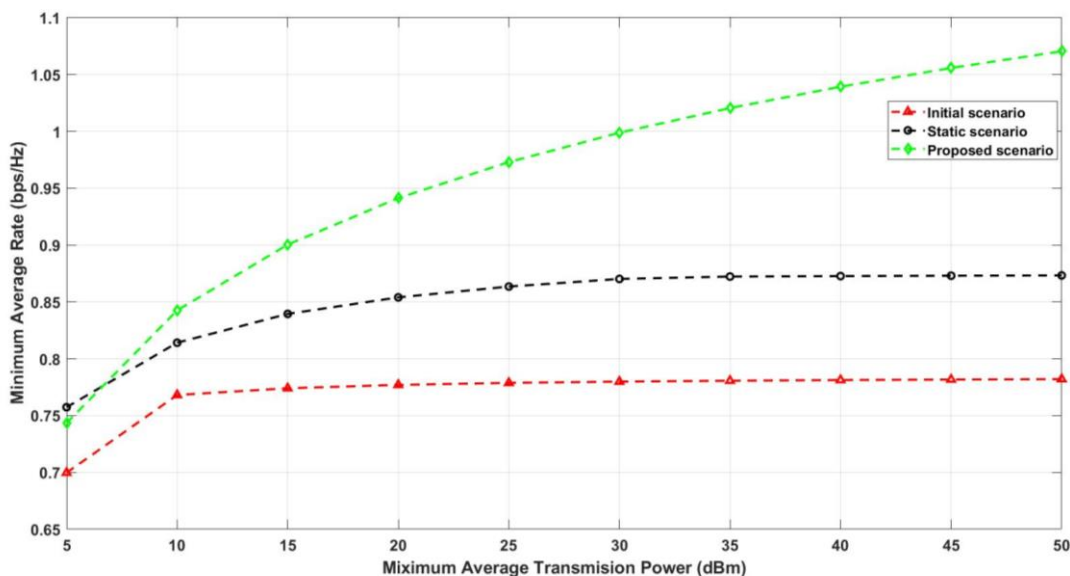
شکل (۳-۱۸) خروجی‌های بدست آمده از الگوریتم کلی

تاثیر افزایش زمان پرواز بر روی مسیر خروجی را می‌توان در شکل (۳-۱۹) دید. در این شکل مسیر را برای سه زمان مختلف ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ ثانیه رسم نموده‌ایم. مشاهده می‌شود که هر چه زمان افزایش یابد، پهباد به نقاط مقصد که می‌خواهد اطلاعات را به آن‌ها برساند نزدیک‌تر می‌شود. چرا که زمان بیشتری برای سرویس‌دهی به هر زوج و برخورداری از کانال مناسب برای آن در اختیار دارد. یعنی با افزایش کل زمان پرواز، تعداد بازه‌های زمانی یا طول بازه‌ی زمانی که به هر جفت اختصاص می‌یابد افزایش می‌یابد و در نتیجه پهباد فرصت دارد تا خود را به نقاط مطلوب نزدیک‌تر کند.



شکل (۳-۱۹) مسیر بهینه‌ی پهپاد برای زمان‌های پرواز مختلف

مجدداً برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، مینیمم متوسط نرخ بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی را با حالتی که پهپاد با تخصیص زمانی و توان ثابت روی دایره‌ی اولیه حرکت کرده و همچنین حالتی که با توان و تخصیص زمانی ثابت در مکان ثابت روی مرکز دایره پرواز می‌کند مقایسه نموده و دیدیم که نرخ الگوریتم پیشنهادی مطلوب تر است. گواه این مطلب شکل (۳-۲۰) می‌باشد.



شکل (۳-۲۰) نرخ اطلاعات بر اساس سناریوهای مختلف مسیر

در شکل بالا مشخص است که نرخ بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی به ازای $\overline{P_U}$ های مختلف بیشتر از چارچوب‌های معیار دیگر است و توانسته ایم نرخ را در مقایسه با حالتی که پهنای روی مرکز ثقل مکان کاربرها قرار دارد، حدود ۲۵٪ بهبود دهیم. چرا که در این حالت از بهینه سازی همزمان توان و مسیر بهره گرفته شده است که به ازای آن پهنای از کانال بهتر با بهره‌ی بیشتری برخوردار است. همچنین مشاهده می‌شود که به ازای $\overline{P_U}$ های بزرگتر در حالتی که $\overline{P_{A_k}}$ ثابت است، افزایش $\overline{P_U}$ تاثیر کمتری بر روی نسبت سیگنال به نویز و به تبع آن نرخ دارد.

۳-۶- نتیجه گیری

در این فصل از پایان نامه به شرح مساله‌ی اصلی پرداختیم. با تعریف دو سناریو که در آن‌ها به ترتیب یک زوج و ۵ زوج کاربر متقاضی برقراری ارتباط هستند، الگوریتم‌هایی مبتنی بر تکرار را برای حل آن‌ها ارائه دادیم تا نرخ ارسال داده و یا نسبت سیگنال به نویز در مقصد به ازای مسیر و توان بهینه‌ی پهنای و مبدا بهینه شود. در نهایت خروجی‌هی شبیه سازی مساله را رسم کردیم که نشان از کارایی الگوریتم پیشنهادی داشتند.

فصل ۴: نتیجه گیری و پیشنهادات

۴-۱- نتیجه گیری

شبکه‌های مخابراتی بیسیم نسل جدید در مقایسه با شبکه‌های قدیمی‌تر، به دلیل افزایش کاربران چه از نوع کاربران انسانی و چه از نوع کاربران ماشینی، با افزایش تقاضا و به تبع آن افزایش بار ترافیکی روبرو هستند. همچنین چالش‌هایی در حوزه‌ی پوشش‌دهی مناسب شبکه‌های بیسیم و همچنین برطرف کردن خلاهای ارتباطی در مواقع بروز بحران و بلایای طبیعی وجود دارد. به منظور رفع این چالش‌ها استفاده از وسایل نقلیه‌ی هوایی بدون سرنشین، به عنوان ایستگاه پایه، رله و فرستنده‌ی انرژی و به همراه تکنولوژی‌های جدید عصر ارتباطات پیشنهاد شده است. آنچه در این پایان نامه بررسی شد، کاربرد پهپاد به عنوان رله‌ی ارتباطی برای برقراری لینک ارتباطی اضطراری برای زوج‌های ارتباطی که به دلیل نبود زیرساخت مناسب قادر به برقراری ارتباط نبودند، بود. در پژوهش‌های پیشین که به حضور چند کاربر پرداخته بودند، ارتباط دو به دوی آن‌ها مد نظر نبوده و تنها سرویس دهی به تک تک کاربران توسط پهپاد بررسی شده بود. در این پایان نامه ارتباطات جفتی اولویت دار برای نخستین بار بررسی شد. با استفاده از قابلیت تحرک پهپاد و همچنین برخورداری از مزیت کانال با خط دید مستقیم برای پهپاد، نقاط و یا به عبارت بهتر مسیری برای حرکت پهپاد طراحی شد که به ازای آن زوج یا زوج‌های ارتباطی متقاضی برقراری ارتباط، بیشترین نرخ ارسال داده را داشته باشند. همچنین نحوه‌ی تخصیص توان مبدا ارسال اطلاعات و پهپاد نیز در مساله‌ی بهینه سازی بدست آمد. در حالت یک زوج کاربر، دیده شد که هر چه پهپاد به مبدا نزدیک‌تر باشد توان ارسال مبدا کمتر ولی توان مصرفی پهپاد بیشتر است و برعکس. مسیر بهینه‌ی پهپاد نیز در این حالت به گونه‌ای بدست آمد که پهپاد بیشترین زمان را در نقطه‌ای وسط مبدا و مقصد پرواز کند. در حالت چند زوج کاربر نیز مشاهده شد، هنگامی که یک زوج متقاضی برقراری ارتباط نیست، توان مصرفی متناظر با آن صفر است. بدین ترتیب در کمینه سازی مصرف توان کل مجموعه کمک می‌کند. مسیر بهینه در این حالت نیز متمایل به مرکز هر زوج است و با افزایش زمان پرواز به نقاط وسط نزدیک‌تر می‌شود. به طور کلی بر اساس نتایج شبیه سازی با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی توانستیم نرخ ارسال اطلاعات را برای

حالت یک و چند زوج کاربر به ترتیب حدوداً ۷ و ۲۴ درصد در مقایسه با حالت مسیر و توان ثابت، افزایش دهیم. لذا نتایج شبیه سازی‌ها نشان دهنده‌ی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی با استفاده از قابلیت تحرک پهپاد در مقایسه با حالتی که پهپاد ثابت است، می‌باشد.

۴-۲- پیشنهادهایی برای کارهای آینده

همانطور که گفته شد در این پایان نامه فقط کانال با خط دید مستقیم در نظر گرفته شد. می‌توان سناریوهای تعریف شده را در حالتی که کانال هم مولفه‌ی LOS و هم NLOS دارد با در نظر گرفتن احتمال آن‌ها بررسی کرد. همچنین می‌توان تداخل از سایر کاربرها که در این پایان نامه در نظر گرفته نشده بود را به پارامترهای مساله اضافه کرد و مساله را با در نظر گرفتن یک سناریوی تداخلی حل کرد. همچنین می‌توان به جای یک پهپاد از چند پهپاد استفاده کرد که در این حالت علاوه بر تخصیص زمانی باید نحوه‌ی تخصیص پهپاد برای ارتباطی خاص نیز مشخص شود.

- [1]. E. Pastor, J. Lopez, and P. Royo, "A Hardware/Software Architecture for پهپاد Payload and Mission Control," 2006 IEEE/AIAA 25TH Digital Avionics Systems Conference, 15-19 Oct. 2006, Portland, OR, USA.
- [2]. Y. Huang, M. Cui, G. Zhang, and W. Chen, "Bandwidth, Power and Trajectory Optimization for پهپاد Base Station Networks With Backhaul and User QoS Constraints," IEEE Access, vol. 8, pp. 67625 - 67634, April 2020.
- [3]. M. Ederlj, B. UK, D. Konam, and E. Natalizio, "From the Eye of the Storm: An IoT Ecosystem Made of Sensors, Smartphones and UAVs", sensors, vol. 8, pp. 75-86, November 2018.
- [4]. "Remote Piloted Aerial Vehicles: An Anthology". *Centre for Telecommunications and Information Engineering, Monash University*. Retrieved 28 March 2016.
- [5]. D. Yang, Q. Wu, Y. Zeng, and R. Zhang, "Energy trade-off in ground-to-UAV communication via trajectory design," IEEE Transactions on Vehicular Technology , Vol.67 , no. 7 ,p.p. 6721 - 6726 ,July. 2018.
- [6]. Y. Zeng and R. Zhang, "Optimized training design for wireless energy transfer," IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 2, pp. 536–550, Feb. 2015.
- [7]. J. Xu, Y. Zeng, R. Zhang , " UAV-enabled multiuser wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization," , IEEE Transactions on Wireless Communications , vol. 17, no. 8, pp. 5092 – 5106, Aug. 2018.
- [8]. J. Xu, Y. Zeng, and R. Zhang, "UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy region characterization," in Proc. IEEE Globecom Workshop, 2017.
- [9]. Y. Zeng and R. Zhang, "Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 6, pp. 3747–3760, Jun. 2017.
- [10]. Y. Zeng, J. Xu, R. Zhang , "Energy Minimization for Wireless Communication With Rotary-Wing UAV," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.18 , no. 4 ,p.p. 2329 - 2345, April 2019.
- [11]. Y. Zeng, J. Xu, and R. Zhang, "Rotary-wing UAV enabled wireless network: trajectory design and resource allocation," in IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2018.
- [12]. A. R. S. Bramwell, G. Done, and D. Balmford, Bramwell's Helicopter Dynamics, 2nd ed. American Institute of Aeronautics & Ast (AIAA), 2001.
- [13]. A. Filippone, Flight performance of fixed and rotary wing aircraft. American Institute of Aeronautics & Ast (AIAA), 2006.
- [14]. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs," IEEE Trans. Wireless Commun. vol. 15, no. 6, pp. 3949–3963, June. 2016.
- [15]. Q. Zeng, B. Zhong, J. Sun , Ch. Lio, "Full-Duplex Relay Aided Device-to-Device Communication Networks Under the Coverage of Unmanned Aerial Vehicle Base Station, " 2018 24rd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Ningbo, China, 12-14 Nov. 2018.
- [16]. S. Shalmashi, E. Björnson, M. Kountouris, K. W. Sung, and M. Debbah, "Energy efficiency and sum rate tradeoffs for massive MIMO systems with underlaid device-to-device communications," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking , available online: arxiv.org/abs/1506.00598., 2015.

- [17]. X. Lin, R. Heath, and J. Andrews, "The interplay between massive MIMO and underlaid D2D networking," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, June. 2015.
- [18]. H. Wang, J. Wang, G. Ding, I. wang, and P.K. Sharma, "Resource Allocation for Energy Harvesting-Powered D2D Communication Underlying UAV-Assisted Networks," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 14-24, March. 2018.
- [19]. X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Commun. Surv. & Tutor.*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Nov. 2015.
- [20]. S. Wang, M. Xia, and Y. C. Wu, "Multipair two-way relay network with harvest-then-transmit users: Resolving pairwise uplink-downlink coupling," *IEEE J. Sel. Signal Process.*, vol. 10, no. 8, pp. 1506-1521, Dec. 2016.
- [21]. P. Du, Q. Yang, Z. Shen, and K. S. Kwak, "Distortion minimization in wireless sensor networks with energy harvesting," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 6, pp. 1393-1396, Jun. 2017.
- [22]. H. Li, X. Zhao, "Throughput Maximization with Energy Harvesting in UAV-assisted Cognitive Mobile Relay Networks," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking(Early Access)*, April. 2020.
- [23]. N. Zhao, W. Lu, M. Sheng, Y. Chen, J. Tang, F. R. Yu, and K.K Wang, "UAV-Assisted Emergency Networks in Disasters," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 45-51, February. 2019.
- [24]. X. Lio, Z .Li, N. Zhao, W. Meng, G. Gui, Y. Chen, and F. Adachi, "Transceiver Design and Multihop D2D for UAV IoT Coverage in Disasters," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 1803-1815, April. 2019.
- [25]. Z. Na, B .Mao, J. Shi, J. Wang, Z. Gao, and M. Xiong, "Joint trajectory and power optimization for UAV-relay-assisted Internet of Things in emergency," *physical communication*, vol. 41, August .2020.
- [26]. Q. Li, Y. Yang, W. K. Ma, M. Lin, J. Ge, and J. Lin, "Robust cooperative beamforming and artificial noise design for physical-layer secrecy in AF multi-antenna multi-relay networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.63, no. 1, pp. 206-220, Jan. 2015.
- [27]. G. Zhang, Q. Wu, M. Cui, and R. Zhang, "Securing UAV communications via trajectory optimization," *2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore, Dec. 2017.
- [28]. M. Ch. Mah, H. S. Lim, and A. Tan, "Secrecy improvement via joint optimization of UAV relay flight path and transmit power," *Vehicular Communications*, vol. 23, June. 2020.
- [29]. M. Cui, G. Zhang, Q. Wu, and D. W. K. Ng, " Robust Trajectory and Transmit Power Design for Secure UAV Communications, " *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 9042-9046, June. 2018.
- [30]. Q. Wu and R. Zhang, "Common Throughput Maximization in UAV-Enabled OFDMA Systems With Delay Consideration," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 12, pp. 6614-6627, Dec. 2018.
- [31]. Q. Wu, W. Chen, M. Tao, J. Li, H. Tang, and J. Wu, "Resource allocation for joint transmitter and receiver energy efficiency maximization in downlink OFDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 2, pp. 416–430, Feb. 2015.
- [32]. F. Wang, W. Chen, H. Tang, and Q. Wu, "Joint optimization of user association, subchannel allocation, and power allocation in multicell multi-association OFDMA

- heterogeneous networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 6, pp. 2672–2684, Jun. 2017.
- [33]. Z. Na, J. Wang, Ch. Lio, M. Guan, and Z. Gao, “Join trajectory optimization and communication design for UAV-enabled OFDM networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 98, March. 2020.
- [34]. Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, “Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus selection,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 8, pp. 3114–3123, Aug. 2007.
- [35]. Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges,” *IEEE Commun.Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, May 2016.
- [36]. R. Fan, J. Cui, S. Jin, K. Yang, and J. An, “Optimal node placement and resource allocation for UAV relaying network,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 4, pp. 808--811, Apr. 2018.
- [37]. Y. Chen, W. Feng, and G. Zheng, “Optimum placement of UAV as relays,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 2, pp. 248-251, Feb. 2018.
- [38]. X. Jiang, Z. Wu, Z. Yin, and Z. Yang, “Power and trajectory optimization for UAV-enabled amplify-and-forward relay networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48688–48696, August. 2018.
- [39]. Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim, “Throughput Maximization for UAV-Enabled Mobile Relaying Systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 12, pp. 4983-4996, Dec. 2016.
- [40]. X. Jiang, Z. Wu, Z. Yin and Z. Yang, “Joint Power and Trajectory Design for UAV-Relayed Wireless Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 697-700, June 2019.
- [41]. S. Ahmed, M. Z. Chowdhury and Y. M. Jang, “Energy-Efficient UAV Relaying Communications to Serve Ground Nodes,” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 849-852, April 2020.
- [42]. Q. Chen, “Joint Trajectory and Resource Optimization for UAV-Enabled Relaying Systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 24108-24119, 2020.
- [43]. F. Cheng, S. Zhang, Z. Li, Y. Chen, N. Zhao, F. R. Yu, and V. C. M. Leung, “UAV trajectory optimization for data offloading at the edge of multiple cells,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 7, pp. 6732–6736, July 2018.
- [44]. Y. Guo, S. Yin and J. Hao, “Joint Placement and Resources Optimization for Multi-User UAV-Relaying Systems With Underlaid Cellular Networks,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 12374-12377, Oct. 2020.
- [45]. L. Zhu, J. Zhang, Zh. Xiao, X. Cao, X. Xia, and R. Schober, “Millimeter-Wave Full-Duplex UAV Relay: Joint Positioning, Beamforming, and Power Control,” *arXiv:2004.11070*.
- [46]. Q. Wu, Y. Zeng and R. Zhang, “Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks,” in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 3, pp. 2109-2121, March 2018.
- [47]. J. Fan, M. Cui, G. Zhang and Y. Chen, “Throughput Improvement for Multi-Hop UAV Relaying,” in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 147732-147742, October 2019.
- [48]. S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.
- [49]. Q. Feng, E. K. Tameh, A. R. Nix and J. McGeehan, "WLCp2-06: Modelling the Likelihood of Line-of-Sight for Air-to-Ground Radio Propagation in Urban Environments," *IEEE Globecom 2006*, San Francisco, CA, 2006, pp. 1-5.

- [50]. D. W. Matolak and R. Sun, “Air–ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part III: The suburban and nearurban environments,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 8, pp. 6607–6618, Aug. 2017.
- [51]. 3GPP TR 36.777, “Study on enhanced LTE support for aerial vehicles,” tech. rep. [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36 series/36.777/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.777/).

Abstract

Relays are important factors to improve the performance of the system in wireless communication networks. In fact, relays have a significant role in increasing the system rate and improvement of system power. In this thesis, unmanned aerial vehicles are employed as relays. We aim to benefit the mobility of UAV and using it as a mobile relay. Since UAVs have batteries with limited capacity, we define the problem as finding the optimal trajectory for the UAV and optimal power allocation for the network, while having maximum data transmission rate for each communication. In order to find the optimal trajectory and power, we consider information rate factor for two scenarios with one and multiple pairs of users. In expressing the problem in this way, our target is to maximize the information rate through one or several communication link between the k -th transmitter and receiver subject to some constraints on the power of source and UAV and also trajectory of UAV. So we face a constrained optimization problem which is not convex. Due to difficulty of solving such non-convex problem, we convert the main problem to some sub-problems by fixing some constraints and solve them with successive convex optimization which is an iterative algorithm and reach the solution for main problem by solving the sub-problems iteratively. Simulation results show the efficiency of proposed algorithm.

Keywords: UAV relaying, UAV, Successive convex optimization, optimal trajectory, power allocation, non-convex, data transmission rate



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

M.Sc. Thesis in telecommunication systems

**Throughput Improvement for UAV-based Communication Networks
According to UAVs Trajectory and Network's Power Consumption**

By: Sedighe Nasrollahi

Supervisor:

Dr. Mirrezaei

October 2021