



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
دانشکده مهندسی برق

پروژه کارشناسی  
گرایش مخابرات

بیشینه سازی عملکرد سیستم  
چند ورودی-تک خروجی به کمک  
سطوح بازتاب دهنده هوشمند  
با استفاده از بهینه سازی کلاسیک

نگارش

سید علیرضا طباطبائیان نیم آوردی

استاد راهنما

دکتر محمدجواد عمادی

شهریور ۱۴۰۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه - فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تأیید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع - موجود در پرونده آموزشی - را قرار دهید.

## نکات مهم:

- نگارش پایان نامه/رساله باید به **زبان فارسی** و بر اساس آخرین نسخه دستورالعمل و راهنمای تدوین پایان نامه های دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد.(دستورالعمل و راهنمای حاضر)
- رنگ جلد پایان نامه/رساله چاپی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا باید به ترتیب مشکی، طوسی و سفید رنگ باشد.
- چاپ و صحافی پایان نامه/رساله بصورت **پشت و رو(دورو)** بلامانع است و انجام آن توصیه می شود.

به نام خدا

تاریخ: شهریور ۱۴۰۲

## تعهدنامه اصالت اثر




اینجانب سید علیرضا طباطبائی نیم آوردی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

سید علیرضا طباطبائی نیم آوردی

امضا  
  
AUREZA  
سید علیرضا طباطبائی نیم آوردی

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و اتنان تقدیم می  
نمایم به محضر ارز شمنیدر و مادر عزیزم به خاطر همه می تلاشهای محبت آمیزی که در  
دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و بامهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

# سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات و تلاش بی‌دریغ استاد محترم جناب آقای دکتر عمادی، مهندس جعفری و خانواده عزیزم صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم و همچنین از سایر دوستانیکه هر کدام به نحوی در تهیه این پایان‌نامه با این جانب همکاری داشته‌اند تشکر نموده و موفقیت همه آنها را از خداوند متعال خواهانم.

سید علیرضا طباطبائی‌ان نیم‌آوردی  
شهریور ۱۴۰۲

## چکیده

این پروژه به بررسی کاربردهای سطوح بازتابنده هوشمند (IRS) در زمینه شبکه‌های ارتباطی آینده، به ویژه در 6G، می‌پردازد. هدف این مطالعه بهینه‌سازی تابع هدف مجموع نرخ وزن‌دار برای یک سناریو واقعی با دو کاربر است. در این سناریو، دو واحد IRS در نظر گرفته شده است و بازتاب بین دو سطح هوشمند نیز لحاظ شده است. همچنین در جلوی یکی از کاربران یک مانع قرار دارد. برای بهبود عملکرد شبکه‌های ارتباطی، رویکرد بهینه‌سازی مشترک به کار گرفته می‌شود که هم ضرایب IRS و هم ضرایب آنتن را بهینه می‌کند. این بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم CD یا همان AO صورت می‌گیرد که درون آن یک Gradient Descent نیز وجود دارد و با حلقه‌ای تکراری، ضرایب تابش را بهبود می‌بخشد تا عملکرد کلی سیستم را بیشینه کند. این تحقیق همچنین ارزیابی نسبت سیگنال به تداخل بعلاوه نویز (SINR) در حضور بازتاب بین دو IRS را بررسی می‌کند. فرآیند بهینه‌سازی شامل چندین مرحله کلیدی است. ابتدا، تبدیل دوگان لاگرانژی به کار گرفته می‌شود تا تابع لگاریتمی حذف شود و مسئله بهینه‌سازی ساده شود. به علاوه، تکنیک‌های برنامه‌ریزی کسری برای تبدیل عبارات کسری به توابع خطی به کار گرفته می‌شوند که فرآیند بهینه‌سازی را ساده‌تر می‌کند. در فصل اول، مروری کلی بر مفاهیم اولیه مخابرات خواهیم داشت. در فصل دوم، مفاهیم کلی بهینه‌سازی را در حد مباحث مقدماتی یاد خواهیم گرفت. در فصل سوم، سناریو مسئله و کارهای شبیه به سناریو را بررسی می‌کنیم. در فصل چهارم، سیستم مدل و الگوریتم حل مسئله را بررسی می‌کنیم. در نهایت در فصل پنجم نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی را بررسی و مقایسه خواهیم کرد.

## واژه‌های کلیدی:

سطوح بازتاب‌دهنده هوشمند، بازتاب بین سطحی، مجموع نرخ داده‌ها، نزول مختصاتی، گرادیان نزولی

# فهرست مطالب

عنوان

صفحه

۱	علم مخابرات	۱
۱-۱	مقدمه‌ای بر علم مخابرات	۳
۱-۱-۱	اصول اساسی مخابرات	۳
۲-۱	کاربردها و گستره علم مخابرات	۳
۱-۲-۱	کاربردهای اصلی مخابرات	۳
۲-۲-۱	گستره علم مخابرات	۴
۳-۱	آغاز و پیشینه تاریخی علم مخابرات	۵
۱-۳-۱	سازوکارهای اولیه	۵
۲-۳-۱	استفاده از حیوانات و افراد	۵
۳-۳-۱	اختراع رادیو	۵
۴-۱	تکنولوژی مخابرات در قرن بیست و یکم	۶
۱-۴-۱	انقلاب دیجیتالی و اینترنت	۶
۲-۴-۱	شبکه‌های اجتماعی و ارتباطات اجتماعی آنلاین	۶
۳-۴-۱	مخابرات 5G و پیشرفت‌های آینده	۶
۵-۱	مخابرات سیار یا مخابرات بیسیم	۶
۱-۵-۱	تعریف	۶
۲-۵-۱	تاریخچه مخابرات بیسیم	۷
۳-۵-۱	انواع مخابرات بیسیم	۷
۴-۵-۱	کاربردهای مخابرات بیسیم	۷
۶-۱	مخابرات سلولی	۷
۱-۶-۱	تعریف	۷
۲-۶-۱	تقسیمات شبکه‌های سلولی	۷
۳-۶-۱	تکنولوژی‌های نسل‌های مختلف تلفن همراه	۸
۴-۶-۱	تغییرات اجتماعی و اقتصادی از طریق مخابرات سلولی	۸
۷-۱	انواع فرستنده-گیرنده از نظر تعداد آنتن	۸



۸	ارتباط SISO : تک ورودی - تک خروجی
۸	ارتباط MISO : چند ورودی - تک خروجی
۹	ارتباط SIMO : تک ورودی - چند خروجی
۹	ارتباط MIMO : چند ورودی - چند خروجی
۸-۱	سطوح بازتاب دهنده هوشمند (IRS)
۱۰-۱-۱	مفهوم کلی
۱۰-۱-۲	اصول کار
۱۰-۱-۳	کاربردهای سطوح هوشمند
۱۱-۱-۴	چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده
۱۱-۱-۵	نتیجه‌گیری
۲	علم بهینه‌سازی کلاسیک
۱-۲	مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی کلاسیک
۱-۱-۲	مفهوم بهینه‌سازی کلاسیک
۲-۱-۲	کاربردهای بهینه‌سازی کلاسیک
۳-۱-۲	روش‌های بهینه‌سازی
۲-۲	تاریخچه بهینه‌سازی
۱-۲-۲	قدمت تاریخی بهینه‌سازی
۲-۲-۲	تا رسیدن به قرن ۱۷ و ۱۸
۳-۲-۲	قرن ۱۹ و پیدایش بهینه‌سازی ریاضی
۴-۲-۲	قرن ۲۰ و پیشرفت بهینه‌سازی
۵-۲-۲	تا به امروز
۶-۲-۲	نتیجه‌گیری
۳-۲	دسته‌بندی انواع الگوریتم و مسائل بهینه‌سازی
۱-۳-۲	دسته‌بندی انواع توابع هدف
۲-۳-۲	مسائل بهینه‌سازی معروف
۴-۲	تفاوت بهینه‌سازی کلاسیک و مدرن و مزیت‌های هر کدام
۱-۴-۲	الگوریتم‌ها و روش‌ها:

۱۹	۲-۴-۲ کاربردها و پیچیدگی مسائل:
۱۹	۳-۴-۲ قدرت حل و کیفیت راه‌حل:
۲۰	۴-۴-۲ میزان پیشرفت
۲۰	۵-۲ بهینه‌سازی کلاسیک در علم مخابرات
۲۱	۶-۲ تابع محدب
۲۳	۳ کارهای پیشین و سناریوی مسئله
	۱-۳ انواع مسائل مطرح‌شده در زمینه سطوح بازتاب‌کننده
۲۴	هوشمند
۲۵	۱-۱-۳ مسائل میدانی:
۲۵	۲-۱-۳ مسائل سیستمی:
۲۶	۲-۳ مسائل مرتبط با سناریو پروژه
۲۹	۳-۳ سناریوی پروژه
۲۹	۱-۳-۳ سناریو اول: بدون مانع
۲۹	۲-۳-۳ سناریو دوم: با مانع
۳۱	۴-۳ نوآوری ما
۳۳	۴ الگوریتم بهینه‌سازی
۳۵	۱-۴ مدل سیستم و مدل کانال و مسئله بهینه‌سازی
۳۵	۱-۱-۴ مدل سیستم
۳۶	۲-۱-۴ مدل کانال
۳۶	۳-۱-۴ مسئله بهینه‌سازی
۳۷	۲-۴ الگوریتم بهینه‌سازی متناوب
۳۷	۱-۲-۴ تعریف
۳۷	۲-۲-۴ استفاده
۳۸	۳-۴ تبدیل دوگان لاگرانژی
۳۸	۱-۳-۴ تعریف
۳۸	۲-۳-۴ ساده‌سازی مسئله
۳۹	۴-۴ برنامه‌ریزی چند کسری

۳۹	۱-۴-۴ تعریف
۴۰	۲-۴-۴ ساده‌سازی مسئله
۴۰	۵-۴ بهینه‌سازی ضرایب آنتن
۴۰	۱-۵-۴ مقدار بتا بهینه
۴۱	۲-۵-۴ مقدار بهینه بردار آنتن
۴۱	۳-۵-۴ روش جستجوی دوبخشی
۴۱	۴-۵-۴ حد بالای لامبدا
۴۲	۶-۴ بهینه‌سازی ضرایب فاز سطوح هوشمند
۴۳	۱-۶-۴ مقدار اپسیلون بهینه
۴۳	۲-۶-۴ روش گرادیان نزولی
۴۴	۳-۶-۴ ضرایب بهینه سطوح هوشمند یک و دو
۴۵	۴-۶-۴ سه ناحیه اصلی بهینه‌سازی ضرایب فاز
۴۷	۵ نتایج و پیشنهادات
۴۹	۱-۵ نتایج
۵۰	۱-۱-۵ نتایج و تحلیل بهینه‌سازی بدون مانع
۵۲	۲-۱-۵ نتایج و تحلیل بهینه‌سازی با مانع
۵۴	۲-۵ پیشنهادات
۵۴	۱-۲-۵ بازتاب مرتبه ۳
۵۴	۲-۲-۵ ساخت فریم‌ورک برای بهینه‌سازی سطوح هوشمند
۵۵	۳-۲-۵ پیدا کردن طول گام بهینه
۵۷	کتاب‌نامه
۵۹	پیوست
۶۰	واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی
۶۲	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

## فهرست تصاویر

صفحه

شکل

۲۱	تعریف تابع محدب	۱-۲
۳۰	سیگنال‌های دریافتی کاربر اول در شرایط با مانع	۱-۳
۳۰	سیگنال‌های دریافتی کاربر دوم در شرایط با مانع	۲-۳
۳۷	شیوه استفاده الگوریتم مختصات نزولی در پروژه	۱-۴
۵۰	نرخ کاربر دوم در شرایط بدون مانع	۲-۵
۵۰	نرخ کاربر اول در شرایط بدون مانع	۱-۵
۵۰	مجموع نرخ دو کاربر در شرایط بدون مانع	۳-۵
۵۲	نرخ کاربر دوم در شرایط با مانع	۵-۵
۵۲	نرخ کاربر اول در شرایط با مانع	۴-۵
۵۲	مجموع نرخ دو کاربر در شرایط با مانع	۶-۵

## فهرست جداول

صفحه

جدول

## فهرست نمادها

نماد	مفهوم
$N$	تعداد المان‌های آنتن
$M_1$	تعداد المان‌های سطح هوشمند اول
$M_2$	تعداد المان‌های سطح هوشمند دوم
$w_1$	وزن نرخ کاربر اول
$w_2$	وزن نرخ کاربر دوم
$P_t$	ماکسیمم توان دو کاربر
$\sigma$	انحراف از معیار نویز
$\sigma^2$	توان نویز
$n$	ضریب افت توان
$D$	کانال بین دو سطح هوشمند
$G$	کانال بین آنتن و سطوح هوشمند
$h$	کانال منتهی به کاربر
$\gamma$	نرخ دریافتی کاربر
$s$	سمبل دریافتی کاربر
$y$	کل سیگنال دریافتی کاربر به‌همراه نویز
$\phi$	ماتریس قطری ضرایب تغییر فاز سطوح هوشمند
$\alpha$	متغیر اختیاری
$\beta$	متغیر اختیاری
$\lambda$	متغیر اختیاری کنترل توان
$\epsilon$	متغیر اختیاری
$\theta$	بردار ضرایب تغییر فاز سطوح هوشمند
$j$	نماد عدد مختلط
$C^{m \times n}$	ماتریس مختلط با $m$ سطر و $n$ ستون

$Re(.)$  مقدار حقیقی یک عدد

$Im(.)$  مقدار مختلط یک عدد

# فصل اول

## علم مخبرات



در این فصل ابتدا علم مخابرات را تعریف و اصول اساسی آن را بررسی میکنیم. سپس به کاربردها و گستره این علم میپردازیم. در ادامه با بیان تاریخچه آن، درکی نسبی از این علم پیدا میکنیم. سپس بر بخش خاصی از مخابرات به نام مخابرات بیسیم یا مخابرات سیار و سپس مخابرات سلولی متمرکز میشویم. در نهایت نیز انواع فرستنده-گیرنده را از حیث تعداد آنتن بررسی کرده و مفهوم کلی سطوح بازتاب دهنده هوشمند و کاربردهای آن را مورد بررسی قرار میدهیم.

## ۱-۱ مقدمه‌ای بر علم مخابرات

[۱] علم مخابرات یک رشته مهم و چندگانه‌ای است که به مطالعه انتقال، تبادل و تفسیر اطلاعات بین افراد، سیستم‌ها و دستگاه‌ها می‌پردازد. این علم به دنبال بهبود کارایی و امنیت انتقال اطلاعات در فرآیندهای مختلف می‌باشد. مخابرات تأثیر بسزایی بر توسعه اجتماعی، اقتصادی و فناوری دارد و در زمینه‌های مختلفی نظیر تلفن، اینترنت، تلویزیون و ارتباطات نظامی به کار می‌رود.

### ۱-۱-۱ اصول اساسی مخابرات

۱. **انتقال اطلاعات:** عملیات انتقال داده‌ها و اطلاعات از یک مکان به مکان دیگر از اصول اساسی مخابرات است. این انتقال می‌تواند به صورت سیمی (مانند کابل‌ها) یا بی‌سیم (از طریق امواج رادیویی یا مایکروویو) انجام شود.

۲. **مدولاسیون و دمدولاسیون:** برای انتقال اطلاعات، آن‌ها به سیگنال‌هایی تبدیل می‌شوند که به راحتی قابل انتقال باشند. این فرآیند به نام مدولاسیون شناخته می‌شود. در مقابل، دمدولاسیون فرآیند بازیابی اطلاعات از سیگنال‌های مدوله شده را شامل می‌شود.

۳. **کدگذاری و کدگشایی:** برای افزایش امنیت و کاهش تداخلات، اطلاعات ممکن است با استفاده از روش‌های کدگذاری به یک فرمت خاص تبدیل شوند. کدگشایی نیز فرآیند بازگرداندن اطلاعات به فرمت اصلی را توصیف می‌کند.

## ۲-۱ کاربردها و گستره علم مخابرات

### ۱-۲-۱ کاربردهای اصلی مخابرات

۱. **تلفنی و تصویری:** انتقال صدا و تصاویر در عصر حاضر از طریق تلفن و ویدئوکنفرانس از کاربردهای اصلی مخابرات به شمار می‌آید.

۲. **شبکه‌های کامپیوتری:** اینترنت و شبکه‌های دیگر از راه‌های ارتباطی بر اساس اصول مخابراتی هستند که به ما امکان ارسال و دریافت اطلاعات را از سراسر جهان می‌دهند.

۳. **تلویزیون و رادیو:** انتقال برنامه‌های تلویزیونی و رادیویی به تلویزیون‌ها و رادیوها نیز از طریق اصول مخابراتی انجام می‌شود.
۴. **تله‌مدیسین و تله‌پزشکی:** از مخابرات برای انتقال اطلاعات پزشکی و تصاویر پزشکی به منظور تشخیص بیماری‌ها و مشاوره‌ی پزشکی از راه دور استفاده می‌شود.
۵. **ارتباطات فضایی:** در مأموریت‌های فضایی و ارتباطات با ماهواره‌ها، اصول مخابراتی برای ارسال و دریافت اطلاعات به کار می‌روند.
۶. **شبکه‌های اجتماعی:** ارتباطات اجتماعی آنلاین از طریق شبکه‌های اجتماعی نیز از تکنیک‌های مخابراتی برای انتقال اطلاعات استفاده می‌کنند.

## ۲-۲-۱ گستره علم مخابرات

علم مخابرات به وسیع‌ترین معانی به سایر حوزه‌های علمی نیز ارتباط دارد. به عنوان مثال:

- **مخابرات نظامی:** در ارتباطات نظامی، امنیت، ردیابی، جاسوسی و انتقال داده‌ها در شرایط خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- **پزشکی:** از مخابرات در تله‌مدیسین، انتقال تصاویر پزشکی و اطلاعات بیماری‌ها برای تشخیص از راه دور استفاده می‌شود.
- **حمل و نقل:** ارتباطات در خودروها، قطارها و هواپیماها جهت بهبود امنیت و کارایی حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- **تکنولوژی اطلاعات و ارتباطات (ICT):** علم مخابرات به عنوان پایه‌ای از علوم مرتبط با ICT، به توسعه ابزارها، سیستم‌ها و نرم‌افزارهای ارتباطی کمک می‌کند.
- **امنیت اطلاعات:** در دنیای امروز، امنیت اطلاعات و محرمانگی داده‌ها نقش بسزایی دارد که از اصول مخابراتی برای رمزنگاری و حفاظت در برابر نفوذ استفاده می‌شود.
- **شبکه‌های هوش مصنوعی:** انتقال داده‌ها و اطلاعات در شبکه‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیا نیز از اصول مخابراتی بهره می‌برد.

علم مخابرات به دلیل تأثیرات وسیع‌تری که بر ابزارها، فرآیندها و جوامع دارد، به یکی از پایه‌های اصلی توسعه فناوری و ارتباطات در جوامع مدرن تبدیل شده است. این علم به دنبال بهبود ارتباطات بین انسان‌ها و دستگاه‌ها در سراسر جهان است و در عصر اطلاعات، نقش بسزایی دارد.

## ۳-۱ آغاز و پیشینه تاریخی علم مخابرات

در طول تاریخ، انسان‌ها همواره تلاش کرده‌اند تا ارتباطات خود را بهبود بخشند. از ارسال پیغام‌های ساده با کمک آتش یا دیگر علائم تا به اختراع وسایل پیام‌رسان پیشرفته، مراحل مختلفی در تاریخچه مخابرات وجود دارد.

### ۱-۳-۱ سازوکارهای اولیه

در دوران‌های اولیه تاریخ، ارتباطات انسان‌ها از طریق نمادها، علائم و صداها انجام می‌شد. انسان‌ها از طریق آتش و دود، نشانه‌های راهبردی می‌ساختند که از دور قابل مشاهده بودند. همچنین، استفاده از پیغام‌های صوتی با استفاده از زنگ‌ها و دستگاه‌های ساده دیگر از مکانیسم‌های اولیه مخابرات بود.

### ۲-۳-۱ استفاده از حیوانات و افراد

با گذر زمان، انسان‌ها از حیوانات و افراد برای انتقال پیغام‌ها و اطلاعات به فاصله‌های بیشتر استفاده کردند. از پیغام‌رسانی با استفاده از کوفی‌ها و مسیرپایی پیاده‌روی‌ها تا ایجاد سیستم‌هایی برای انتقال پیام‌ها با استفاده از اسب‌ها، مثال‌هایی از این دوران‌ها هستند.

### ۳-۳-۱ اختراع رادیو

با پیشرفت فناوری در قرن ۱۹، اختراع رادیو توسط علمایی چون گوگلیلمو مارکونی و نیکولا تسلا انقلابی در زمینه مخابرات ایجاد کرد. رادیو به انسان‌ها امکان ارسال و دریافت امواج الکترومغناطیسی را به صورت بی‌سیم فراهم کرد و ارتباطات بی‌سیم را آغاز کرد.

## ۴-۱ تکنولوژی مخابرات در قرن بیست و یکم

در قرن بیست و یکم، پیشرفت‌های فراوانی در زمینه علم مخابرات رخ داد. با ظهور کامپیوترها و توسعه اینترنت، ارتباطات به طور جهانی و پیچیده‌تری انجام می‌شود. فناوری‌های بی‌سیم مانند موبایل، وای‌فای، بلوتوث و ماهواره‌ها ارتباطات را به سطح جدیدی رسانده‌اند.

### ۱-۴-۱ انقلاب دیجیتالی و اینترنت

در دهه‌های اخیر، انقلاب دیجیتالی و ظهور اینترنت تغییرات اساسی در مخابرات ایجاد کرده‌اند. اینترنت به عنوان یک شبکه جهانی، میلیاردها دستگاه را به یکدیگر متصل کرده و به اشتراک گذاری اطلاعات، ارتباطات اجتماعی و تجارت را تغییر داده است.

### ۲-۴-۱ شبکه‌های اجتماعی و ارتباطات اجتماعی آنلاین

با ظهور شبکه‌های اجتماعی مانند فیسبوک، توییتر، اینستاگرام و لینکدین، ارتباطات اجتماعی به صورت آنلاین و از راه دور انجام می‌شود. این شبکه‌ها نه تنها به اشتراک گذاری تجربیات و اطلاعات، بلکه در پیدا کردن کار، تبلیغات و تأثیرگذاری نیز نقش دارند.

### ۳-۴-۱ مخابرات 5G و پیشرفت‌های آینده

تکنولوژی مخابرات همچنان در حال پیشرفت است. به عنوان مثال، فناوری 5G با امکانات بالاتری در سرعت انتقال داده، کاهش تأخیر و افزایش توانایی اتصال بهتر، در حال توسعه است و قرار است تأثیرات چشمگیری بر ارتباطات و صنایع داشته باشد.

## ۵-۱ مخابرات سیار یا مخابرات بیسیم

### ۱-۵-۱ تعریف

مخابرات سیار یا مخابرات بیسیم به انتقال اطلاعات و ارتباطات بین دستگاه‌ها از طریق امواج رادیویی یا وسایل بی‌سیم مشغول است. این فناوری به ما این امکان را می‌دهد که در هر مکانی و در هر زمانی ارتباط داشته باشیم، بدون نیاز به سیم‌کشی یا اتصال فیزیکی مستقیم.

## ۱-۵-۲ تاریخچه مخابرات بیسیم

مخابرات بیسیم از زمان اختراع رادیو تا به امروز تغییرات بزرگی را تجربه کرده است. اختراع تلگراف بیسیم توسط مارکونی در اواخر قرن نوزدهم توسط وایرلس تلگراف راه اندازی شد. پس از آن، با اختراع رادیو و سایر فناوری‌های بی‌سیم، مخابرات بیسیم به شکلی کاملاً جدید تبدیل شد.

## ۱-۵-۳ انواع مخابرات بیسیم

مخابرات بیسیم به انواع مختلفی تقسیم می‌شود. از جمله انواع مخابرات بیسیم می‌توان به مخابرات سلولی، وای فای، بلوتوث، نسل‌های مختلف تلفن همراه مانند 3G، 4G و 5G و ارتباطات ماهواره‌ای اشاره کرد.

## ۱-۵-۴ کاربردهای مخابرات بیسیم

مخابرات بیسیم در زندگی روزمره ما نقش بزرگی ایفا می‌کند. از تماس‌های تلفنی و پیامک‌ها تا استفاده از اینترنت بی‌سیم، تلویزیون‌های هوشمند، دستگاه‌های هوشمند، سامانه‌های ردیابی موقعیت جغرافیایی، سیستم‌های اطلاع‌رسانی اضطراری و بسیاری از فناوری‌های دیگر، مخابرات بیسیم به‌طور گسترده در حیات ما حضور دارد.

## ۱-۶-۱ مخابرات سلولی

### ۱-۶-۱-۱ تعریف

مخابرات سلولی، یا شبکه‌های تلفن همراه، سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم هستند که از امواج رادیویی برای انتقال صدا، داده و اطلاعات استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها به دستگاه‌های تلفن همراه اجازه می‌دهند تا به تبادل اطلاعات با یکدیگر و به شبکه ارتباطی متصل شوند.

### ۱-۶-۲ تقسیمات شبکه‌های سلولی

شبکه‌های تلفن همراه به چندین منطقه تقسیم می‌شوند که به این مناطق سلول گفته می‌شود. هر سلول یک محدوده جغرافیایی را پوشش می‌دهد و دارای یک تجهیزات ارتباطی مرکزی است که به عنوان ترانس‌هدایت‌کننده مرکزی (BTS) شناخته می‌شود.

### ۱-۶-۳ تکنولوژی‌های نسل‌های مختلف تلفن همراه

شبکه‌های تلفن همراه در طول زمان به نسل‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که به توانایی‌های خاص خود معروف هستند. از نسل اول تا نسل پنجم، هر نسل به سرعت انتقال داده، پهنای باند، قابلیت‌های صوتی و تصویری و کاربردهای دیگر ارتباطات بی‌سیم تأثیر می‌گذارد.

### ۱-۶-۴ تغییرات اجتماعی و اقتصادی از طریق مخابرات سلولی

مخابرات سلولی تغییرات عمده‌ای در جوامع و اقتصادها به وجود آورده است. از تجارت الکترونیک و کسب‌وکارهای آنلاین گرفته تا ارتباطات اجتماعی و تغییرات در رفتارهای انسانی، این تکنولوژی اثرات چشمگیری را در سطح جامعه داشته است.

## ۱-۷ انواع فرستنده-گیرنده از نظر تعداد آنتن

### ۱-۷-۱ ارتباط SISO: تک ورودی - تک خروجی

ارتباط SISO، مخفف Single-Input Single-Output، یک سیستم ارتباطی بی‌سیم ابتدایی است که در آن یک فرستنده تنها از یک آنتن برای ارسال سیگنال به یک گیرنده استفاده می‌کند. در این تنظیم، یک آنتن در فرستنده و یک آنتن در گیرنده وجود دارد. ارتباط در جهت یکطرفه است، به این معنی که فرستنده اطلاعات را ارسال کرده، و گیرنده آن را دریافت می‌کند.

سیستم‌های تک ورودی - تک خروجی در کاربردهای مختلفی از جمله پخش رادیویی سنتی، دستگاه‌های واکی‌تاکی و بسیاری از سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم اولیه استفاده می‌شوند. با وجود سادگی، سیستم‌های تک ورودی - تک خروجی محدودیت‌هایی در زمینه نرخ داده، محدوده پوشش و قابلیت اطمینان دارند. تداخل، خنثی شدن و نویز ممکن است بر کیفیت سیگنال دریافتی نیز تأثیر بگذارد.

### ۱-۷-۲ ارتباط MISO: چند ورودی - تک خروجی

ارتباط MISO، مخفف Multiple-Input Single-Output، در شرایطی به کار می‌رود که یک گیرنده تنها سیگنال‌ها را از چند فرستنده متفاوت که هرکدام دارای آنتن خود هستند، دریافت می‌کند. این تنظیم برای بهبود کیفیت سیگنال، پوشش و نرخ داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. چندین فرستنده می‌توانند با همکاری به تقویت قدرت سیگنال دریافتی و کاهش تأثیر خنثی شدن و خنثی شدگی کمک کنند.

سیستم‌های MISO اغلب در شبکه‌های سلولی به کار می‌روند، جایی که چندین ایستگاه پایه سیگنال‌ها را به یک دستگاه تلفن همراه ارسال می‌کنند. دستگاه تلفن همراه از طریق ترکیب سیگنال‌ها از آنتن‌های مختلف به کیفیت سیگنال دریافتی بهتری دست می‌یابد. این تنظیم به حل مشکلاتی مانند خنثی شدن چندمسیره و اثر سایه ای کمک می‌کند و باعث بهبود کیفیت ارتباط می‌شود.

### ۳-۷-۱ ارتباط SIMO: تک ورودی - چند خروجی

ارتباط SIMO، مخفف Single-Input Multiple-Output، به سیستمی اشاره دارد که یک فرستنده تنها سیگنال را به چندین گیرنده ارسال می‌کند، هر کدام دارای آنتن خود هستند. این تنظیم امکان دریافت تنوعی را فراهم می‌کند، به طوری که گیرنده‌های چندگانه سیگنال را از مسیرهای مختلف دریافت می‌کنند. این کار باعث مقابله با محوشوندگی و بهبود قابلیت اطمینان ارتباط می‌شود.

سیستم‌های SIMO در مواقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند که ارتباط قابل اعتماد بسیار مهم است، مانند ارتباطات بی‌سیم در محیط‌های چالشی یا پوشش دهی داخلی. با استفاده از چندین آنتن در سمت گیرنده، تأثیرات انتشار چندمسیره و محوشوندگی می‌تواند کاهش یابد و از این رو کیفیت ارتباط بهبود می‌یابد.

### ۴-۷-۱ ارتباط MIMO: چند ورودی - چند خروجی

ارتباط MIMO، مخفف Multiple-Input Multiple-Output، یک سیستم پیشرفته ارتباطی بی‌سیم است که همزمان از چندین آنتن در فرستنده و گیرنده استفاده می‌کند. تکنولوژی MIMO از تنوع فضایی و انتشار چندمسیره برای دستیابی به نرخ داده، پوشش و اطمینان بیشتر استفاده می‌کند. چندین جریان داده می‌توانند به صورت همزمان روی همان فرکانس ارسال شوند که باعث افزایش ظرفیت سیستم می‌شود.

سیستم‌های MIMO به عنوان یک تکنولوژی بنیادی در استانداردهای ارتباطی بی‌سیم مدرن، از جمله Wi-Fi و شبکه‌های سلولی (مانند 4G و 5G) به کار می‌روند. با استفاده از چندین آنتن، سیستم‌های MIMO می‌توانند از تنوع فضایی برای بهبود کیفیت سیگنال، مهار تداخل و دستیابی به نرخ داده بالاتر استفاده کنند.



## ۸-۱ سطوح بازتاب دهنده هوشمند (IRS)

### ۱-۸-۱ مفهوم کلی

سطوح بازتاب دهنده هوشمند همچنین با نام‌های سطوح بازتاب‌کننده قابل تنظیم یا سطوح بازتاب دهنده هوشیار، فناوری پیشرفته‌ای در ارتباطات بی‌سیم و پردازش سیگنال هستند. این ایده شامل استفاده از سطوحی با عناصر غیرفعال (passive) نمایش داده می‌شود که برای کنترل و مدیریت امواج الکترومغناطیسی به کار می‌روند. با تغییر بازتاب و پراکندگی سیگنال‌ها، سطوح بازتاب‌دهنده هوشمند می‌تواند کیفیت سیگنال‌ها را افزایش داده، پوشش را افزایش داده و عملکرد کلی سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم را بهبود بخشد. در ادامه، مروری اجمالی از این سطوح و کاربردهای آن آورده شده است:

### ۲-۸-۱ اصول کار

IRS شامل یک سطح با عناصر غیرفعال کوچک مانند آنتن‌ها، سوئیچ‌ها یا مواد قابل تنظیم می‌شود. این عناصر می‌توانند فاز و مقدار موج‌های الکترومغناطیسی ورودی را تغییر دهند. با تنظیم دقیق فاز و مقدار، IRS می‌تواند سیگنال‌ها را در جهات مورد نظر بازتاب کند تا تداخل سازنده ایجاد کرده و قدرت سیگنال دریافتی را بهبود دهد.

### ۳-۸-۱ کاربردهای سطوح هوشمند

- **افزایش کیفیت ارتباط بی‌سیم:** یکی از کاربردهای اصلی سطوح هوشمند، بهبود کیفیت و پوشش سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم است. با تغییر سیگنال‌های بازتابی، می‌توان اثر تداخل‌های چندمسیره را کاهش داده، نسبت سیگنال به نویز را بهبود داده و پوشش را به مناطقی با سیگنال ضعیف ترتیب دهد.
- **پوشش داخلی و نفوذ:** IRS می‌تواند در محیط‌های داخلی برای رفع مشکلات نفوذ سیگنال به دلیل دیوارها، مبلمان و موانع دیگر استفاده شود. این فناوری می‌تواند نفوذ سیگنال و پوشش را بهبود داده و ارتباطات داخلی را قابل اعتمادتر کند.
- **5G و به بعد:** IRS در شبکه‌های 5G و سیستم‌های ارتباطی آینده توانمندی‌های بسیاری دارد. این وسیله می‌تواند به زیرساخت‌های سلولی موجود اضافه شود تا نرخ داده را بهبود داده، تاخیر را کاهش داده و ظرفیت شبکه را افزایش دهد.
- **کارآیی انرژی:** IRS نیز می‌تواند به بهبود کیفیت سیگنال‌های دریافتی کمک کند و به دستگاه‌ها

- اجازه دهد با توان کمتر عمل کنند که این منجر به صرفه جویی در مصرف انرژی می شود.
- **ارتباطات امن:** با کنترل جهت سیگنال و کاهش نفوذ سیگنال به مناطق غیر مجاز می تواند به افزایش امنیت ارتباط کمک کند.
  - **اینترنت اشیا (IoT):** در سناریوهای اینترنت اشیا که تعداد زیادی دستگاه با یکدیگر ارتباط دارند، سطوح هوشمند می تواند به بهبود کارایی و قابلیت اعتماد شبکه کمک کند.
  - **ترکیب Massive MIMO:** IRS می تواند با سیستم های MIMO بزرگ ترکیب شود تا عملکرد آن ها را بهبود دهد و سیستم ترکیبی با اجزای فعال و غیرفعال ایجاد کند.
  - **شکل دهی به شعاع و جهت:** IRS با شکل دهی به شعاع و جهت دینامیک اجازه می دهد تا با تطابق به شرایط مختلف ارتباطات پیش برود.

#### ۴-۸-۱ چالش ها و چشم اندازهای آینده

با وجود مزایای فراوان، مواردی مانند پیاده سازی عملی، همگام سازی و تخمین کانال در مورد IRS چالش هایی وجود دارد. با این حال، تحقیقات و توسعه های جاری به منظور غلبه بر این موانع و بهره برداری کامل از تکنولوژی سطوح هوشمند در حال انجام است.

#### ۵-۸-۱ نتیجه گیری

سطوح بازتاب دهنده هوشمند نشان دهنده یک فناوری تحول آفرین در ارتباطات بی سیم هستند. توانایی این فناوری در تغییر موج های الکترومغناطیسی، امکانات جدیدی را برای بهبود کیفیت سیگنال ها، پوشش و ظرفیت ارتباطات ارائه می دهد. در حالی که تحقیقات و نوآوری ها ادامه دارند، انتظار می رود که این سطوح نقش اساسی را در تدوین آینده سیستم های ارتباطات بی سیم ایفا کند.



## فصل دوم

# علم بهینه‌سازی کلاسیک

در این فصل ابتدا به توضیح کلی مفاهیم بهینه‌سازی کلاسیک و کاربردهایی از آن می‌پردازیم. سپس تاریخچه آن را از ابتدا تا کنون به صورت اجمالی بررسی مینماییم. در بخش بعد، به بررسی انواع توابع بهینه‌سازی و مسائل معروف آن می‌پردازیم. در نهایت نیز بهینه‌سازی کلاسیک و مدرن و کاربرد آنها در مخابرات را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

## ۱-۲ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی کلاسیک

### ۱-۱-۲ مفهوم بهینه‌سازی کلاسیک

[۱۰] بهینه‌سازی کلاسیک یک حوزه ریاضی است که به مطالعه فرآیند یافتن مقدار کمینه یا بیشینه یک تابع هدف تحت قیدها می‌پردازد. این تابع هدف می‌تواند معمولاً معیاری از کیفیت یا کمیت یک سیستم یا فرآیند باشد که می‌خواهیم آن را بهینه کنیم. محدودیت‌ها معمولاً شرایط و قیودی هستند که می‌توانند بر روی متغیرهای مستقل تابع هدف اعمال شوند.

### ۲-۱-۲ کاربردهای بهینه‌سازی کلاسیک

بهینه‌سازی کلاسیک در بخش‌های مختلف زمینه‌های علمی و مهندسی به کار می‌رود:

- **مهندسی صنایع و مدیریت:** در مسائل مدیریت موجودی، برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی منابع، بهینه‌سازی کلاسیک به ما کمک می‌کند تا بهترین تصمیم‌ها را برای تخصیص منابع و اجرای عملیات انجام دهیم.
- **علوم کامپیوتر و مهندسی نرم‌افزار:** در طراحی الگوریتم‌ها و بهینه‌سازی عملکرد نرم‌افزارها، بهینه‌سازی کلاسیک به ما کمک می‌کند تا کارایی سیستم‌های نرم‌افزاری را افزایش دهیم.
- **مهندسی برق و مخابرات:** در طراحی شبکه‌ها، انتخاب پارامترهای سیستم‌های ارتباطی، و بهبود کیفیت انتقال اطلاعات، بهینه‌سازی کلاسیک به ما کمک می‌کند تا از منابع محدود بهره‌برداری بهتری داشته باشیم.
- **علوم زیستی:** در تحلیل داده‌های پزشکی و زیست‌شناسی، بهینه‌سازی کلاسیک می‌تواند در شناخت رفتار سیستم‌ها و تخمین پارامترهای مهم مورد استفاده قرار گیرد.
- **مهندسی مکانیک:** در طراحی سازه‌ها، بهینه‌سازی کلاسیک به ما کمک می‌کند تا بهترین ترازبندی و مواد مصرفی را برای ساخت و سازه‌ها انتخاب کنیم.

### ۳-۱-۲ روش‌های بهینه‌سازی

برای حل مسائل بهینه‌سازی کلاسیک، از روش‌های مختلفی مانند روش‌های گرادیانی، روش‌های تکاملی، و روش‌های تقریبی استفاده می‌شود. این روش‌ها بسته به خصوصیات مسئله و محدودیت‌ها ممکن است ویژگی‌های متفاوتی داشته باشند.

## ۲-۲ تاریخچه بهینه‌سازی

### ۱-۲-۲ قدمت تاریخی بهینه‌سازی

تاریخچه بهینه‌سازی به هزاران سال قبل باز می‌گردد. از دوره‌های باستانی، انسان‌ها تلاش می‌کردند تا راه‌های بهتری برای حل مسائل بهینه‌سازی مختلف پیدا کنند. مثلاً در دوره یونان باستان، اقتصاددانان مسائلی مانند بهینه‌سازی تولیدات کشاورزی و مسائل مربوط به تخصیص منابع را مورد مطالعه قرار می‌دادند.

### ۲-۲-۲ تا رسیدن به قرن ۱۷ و ۱۸

در قرن ۱۷، برخی از اصول اساسی بهینه‌سازی توسط ریاضی‌دانان مطرح شد. جان فرشن بهبودهایی در مسائل بهینه‌سازی مطرح کرد و نخستین مبانی بهینه‌سازی را ریاضیاتی بیان کرد. در قرن ۱۸، لگاریتم‌ها و مفاهیم نسبت به مسائل بهینه‌سازی به کار گرفته شدند.

### ۳-۲-۲ قرن ۱۹ و پیدایش بهینه‌سازی ریاضی

در قرن ۱۹، با پیدایش مفاهیمی مانند توابع دیفرانسیل و انتگرال، تئوری بهینه‌سازی به ریاضیات مدرن تبدیل شد. یکی از تازه‌ترین و پرکاربردترین مفاهیم در این دوره، مفهوم گرادیان بود که امکان پیدا کردن نقاط انتهایی توابع بهینه‌سازی را فراهم کرد.

### ۴-۲-۲ قرن ۲۰ و پیشرفت بهینه‌سازی

در قرن ۲۰، با پیشرفت روش‌های عددی، تکنیک‌های بهینه‌سازی به مرحله عملی و قابل استفاده در مسائل پیچیده رسید. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند روش نیوتن و روش ساده کوچک‌ترین مربعات به کمک رایانه‌ها قابل اجرا شدند.

### ۵-۲-۲ تا به امروز

با گذشت زمان، روش‌های بهینه‌سازی پیچیده‌تر و تخصصی‌تری توسعه یافته‌اند. از بهینه‌سازی مبتنی بر شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های تکاملی تا بهینه‌سازی گسسته و پیوسته، انواع و اقسام روش‌های بهینه‌سازی هستند که در زمینه‌های مختلف به کار می‌روند.

## ۶-۲-۲ نتیجه‌گیری

تاریخچه بهینه‌سازی نشان می‌دهد که این حوزه از اوایل تاریخ تا به امروز در توسعه و پیشرفت بوده است. از ریشه‌های باستانی تا تکنیک‌های پیشرفته ریاضیاتی و محاسباتی، بهینه‌سازی به یکی از مهم‌ترین ابزارها در علم و فناوری تبدیل شده است.

## ۳-۲ دسته‌بندی انواع الگوریتم و مسائل بهینه‌سازی

در علم بهینه‌سازی انواع مختلفی از مسائل وجود دارند. برخی از مسائل ساده نیاز به بهینه‌سازی رسمی ندارند، مانند مسائلی که جواب‌های ظاهری دارند یا بدون متغیرهای تصمیم‌گیری هستند. اما در اغلب موارد، لازم است که یک راه حل ریاضی یافت شود و هدف دستیابی به نتایج بهینه است. بیشتر مسائل نیازمند نوعی بهینه‌سازی هستند. هدف از این بهینه‌سازی کاهش هزینه یک مسئله و کمینه کردن ریسک آن است. همچنین ممکن است تابع هدف، چند چندهدفه باشد و شامل تصمیم‌های چندگانه باشد.

سه عنصر اصلی برای حل یک مسئله بهینه‌سازی وجود دارد: هدف، متغیرها و محدودیت‌ها. هر متغیر می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد و هدف یافتن مقدار بهینه برای هر یک است.

## ۱-۳-۲ دسته‌بندی انواع توابع هدف

بیاید انواع مختلف مسائل بهینه‌سازی را بر اساس عناصر متغیر متفاوت بررسی کنیم.

- **بهینه‌سازی پیوسته در مقابل بهینه‌سازی گسسته:** مدل‌هایی که دارای متغیرهای گسسته هستند، مسائل بهینه‌سازی گسسته هستند، در حالی که مدل‌های دارای متغیرهای پیوسته، مسائل بهینه‌سازی پیوسته هستند. مسائل بهینه‌سازی پیوسته در مقابل مسائل بهینه‌سازی گسسته به حل آسان‌تری نسبت به مسائل بهینه‌سازی گسسته می‌انجامد. در مسئله بهینه‌سازی گسسته هدف جستجوی یک شیء مانند عدد صحیح، جایگشت یا گراف از مجموعه‌ای شمارش‌پذیر است. با افزایش در تعداد الگوریتم‌ها به همراه پیشرفت‌هایی در فناوری محاسباتی، اندازه و پیچیدگی مسائل بهینه‌سازی گسسته که به طور کارآمد حل می‌شود، افزایش یافته است. از طرفی، بهینه‌سازی پیوسته در بهینه‌سازی گسسته ضروری است زیرا بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی گسسته، سری زیرمسائل پیوسته را ایجاد می‌کنند. یعنی ابتدا مسئله را پیوسته فرض کرده و سپس پس از حل آن بر روی دامنه پیوسته، جواب را به دامنه



گسسته تبدیل مینماییم.

- **بهینه‌سازی بدون محدودیت در مقابل بهینه‌سازی با محدودیت:** تفاوت مهمی در میان مسائل بهینه‌سازی وجود دارد. مسائلی که محدودیت بر متغیرها دارند و مسائلی که در آن‌ها محدودیت بر متغیرها وجود ندارد. مسائل بهینه‌سازی بدون محدودیت به طور اساسی در بسیاری از کاربردهای عملی وجود دارد. مسائل بهینه‌سازی با محدودیت در کاربردها با محدودیت‌های صریح بر روی متغیرها ظاهر می‌شوند. مسائل بهینه‌سازی با محدودیت بر اساس طبیعت محدودیت‌ها، مانند محدودیت‌های خطی، غیرخطی، محدب تقسیم‌بندی می‌شوند، مانند مسائل مشتق‌پذیر و غیرمشتق‌پذیر.

- **بدون هدف، یک هدف یا چند هدف:** اگرچه اکثر مسائل بهینه‌سازی دارای تابع هدف تک‌هدفه هستند، موارد غیرمعمولی وجود دارد که مسائل بهینه‌سازی هیچ هدفی ندارند یا چند تابع هدف دارند. مسائل بهینه‌سازی چندهدفه در مهندسی، اقتصاد و جریان‌های لجستیک پیش می‌آیند. اغلب، مسائل با چند هدف به عنوان مسائل تک‌هدفه بازنویسی می‌شوند.

- **بهینه‌سازی قطعی در مقابل بهینه‌سازی تصادفی:** بهینه‌سازی قطعی زمانی است که داده‌ها برای مسئله داده شده به دقت شناخته شده باشند. اما گاهی اوقات به دلایل مختلف داده‌ها نمی‌توانند به دقت شناخته شوند. خطای اندازه‌گیری ساده می‌تواند دلیلی برای این باشد. دلیل دیگر این است که برخی از داده‌ها اطلاعاتی درباره آینده را توصیف می‌کنند و بنابراین با قطعیت قابل شناخته نیستند. در بهینه‌سازی به مسائلی با عدم قطعیت، بهینه‌سازی تصادفی نامیده می‌گویند که عدم قطعیت با این مدل ترکیب می‌شود.

## ۲-۳-۲ مسائل بهینه‌سازی معروف

- **برنامه‌ریزی خطی:** در مسائل برنامه‌ریزی خطی (LP)، تابع هدف و تمام محدودیت‌ها توابع خطی از متغیرهای تصمیم‌گیری هستند. از آنجا که تمام توابع خطی محدب هستند، حل مسائل برنامه‌ریزی خطی به طور ذاتی آسان‌تر از مسائل غیرخطی است.

- **برنامه‌ریزی مربعی:** در مسئله برنامه‌ریزی مربعی (QP)، هدف یک تابع مربعی از متغیرهای تصمیم‌گیری است و محدودیت بر متغیرها، توابع خطی هستند. یک مسئله برنامه‌ریزی مربعی که پرکاربرد است، مسئله بهینه‌سازی پرتفوی میانگین-واریانس مارکویتز است. تابع هدف واریانس پرتفوی و محدودیت‌های خطی حداقلی برای بازدهی پرتفو را مشخص می‌کنند.

## ۴-۲ تفاوت بهینه‌سازی کلاسیک و مدرن و مزیت‌های هر کدام

بهینه‌سازی کلاسیک و مدرن به دو دیدگاه متفاوت و پیچیدگی‌های مختلف اشاره دارد. در زیر به مقایسه این دو رویکرد در چند زمینه مهم اشاره خواهیم کرد:

### ۱-۴-۲ الگوریتم‌ها و روش‌ها:

- کلاسیک: روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک اغلب بر اساس روش‌های تحلیلی و ریاضی مبتنی بوده‌اند. این روش‌ها ممکن است در صورت وجود توابع هدف و محدودیت‌های پیچیده، تحلیل دستی دشواری داشته باشند.

- مدرن: در بهینه‌سازی مدرن، از الگوریتم‌های محاسباتی پیچیده مانند الگوریتم‌های تکاملی (مثل الگوریتم‌های ژنتیک)، الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گراف، روش‌های بهینه‌سازی تصادفی و شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها به دلیل قابلیت استفاده در مسائل پیچیده و چندبعدی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

### ۲-۴-۲ کاربردها و پیچیدگی مسائل:

- کلاسیک: بهینه‌سازی کلاسیک به خصوص در مسائل ساده و با پیچیدگی پایین مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی مربعی و بهینه‌سازی تابع‌های معین پرکاربرد است.

- مدرن: بهینه‌سازی مدرن می‌تواند در مسائل پیچیده‌تر و چندوجهی کاربرد داشته باشد، از جمله بهینه‌سازی با محدودیت‌های غیرخطی، بهینه‌سازی چند هدفه، بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت و مسائل با تعداد زیادی متغیرها و محدودیت‌ها.

### ۳-۴-۲ قدرت حل و کیفیت راه‌حل:

- کلاسیک: روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک معمولاً برای مسائل ساده و خطی می‌توانند راه‌حل‌های دقیق و بهینه ارائه دهند.

- مدرن: الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدرن به دلیل پیچیدگی بیشتر مسائل معمولاً به راه‌حل‌های تقریبی می‌رسند، اما می‌توانند در مسائل پیچیده‌تر و با تعداد زیادی متغیرها و محدودیت‌ها عملکرد مناسبی داشته باشند.

## ۴-۴-۲ میزان پیشرفت

- کلاسیک: روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک به طور کلی از دهه‌های گذشته وجود دارند و توسعه آن‌ها به نسبت کمتری انجام می‌شود.

- مدرن: به دلیل پیشرفت‌های چشمگیر در محاسبات و تکنیک‌های هوش مصنوعی، روش‌های بهینه‌سازی مدرن همچنان در حال توسعه و بهبود هستند.

در نهایت، انتخاب بین استفاده از بهینه‌سازی کلاسیک یا مدرن بسته به مسئله‌ای که در دست دارید، میزان پیچیدگی آن، توانمندی‌های محاسباتی و تجربه شما خواهد بود. همچنین، ترکیب این دو رویکرد نیز در بسیاری از موارد می‌تواند به نتایج بهتری منجر شود.

## ۵-۲ بهینه‌سازی کلاسیک در علم مخابرات

بهینه‌سازی کلاسیک در علم مخابرات، که به عنوان بهینه‌سازی در شبکه‌ها نیز شناخته می‌شود، در طراحی و بهبود سیستم‌های ارتباطی، شبکه‌های ارتباطی و تخصیص منابع در مخابرات تأثیرگذار است. این حوزه در مخابرات از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا در ارتباطات، منابع محدودی مانند پهنای باند، طیف فرکانسی، توان انتقال و... وجود دارد و نیاز به تخصیص بهینه این منابع به منظور دستیابی به کارایی و کیفیت بالا در انتقال اطلاعات داریم. در زیر، تعدادی از کاربردهای بهینه‌سازی کلاسیک در علم مخابرات را می‌توانید مشاهده کنید:

- **تخصیص پهنای باند:** در شبکه‌های ارتباطی، پهنای باند یک منبع محدود است و نیاز به تخصیص بهینه آن به منظور انتقال داده‌ها با کیفیت و سرعت مناسب داریم. بهینه‌سازی کلاسیک می‌تواند به مشکلات تخصیص پهنای باند در شبکه‌های مخابراتی پاسخ دهد.
- **تخصیص طیف فرکانسی:** در ارتباطات بی‌سیم، طیف فرکانسی محدود است و چندین سیگنال بی‌سیم هم‌زمان در یک محدوده فرکانسی وجود دارند. بهینه‌سازی کلاسیک می‌تواند به تخصیص بهینه طیف فرکانسی به منظور کاهش تداخل و افزایش کیفیت ارتباطات کمک کند.
- **تخصیص منابع در شبکه‌های حسگر بی‌سیم:** در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، منابع محدودی مانند انرژی و زمان وجود دارند و نیاز به تخصیص بهینه آن‌ها به منظور جمع‌آوری داده‌ها از محیط

داریم. بهینه‌سازی کلاسیک می‌تواند در تخصیص منابع به حسگرها به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه مفید باشد.

• **تخصیص توان انتقال:** در ارتباطات سیمی و بی‌سیم، تخصیص توان انتقال به سیگنال‌ها به منظور انتقال بهینه و کاهش نویز در ارتباطات اهمیت دارد. بهینه‌سازی کلاسیک می‌تواند به تخصیص مناسب توان انتقال به سیگنال‌ها کمک کند.

• **طراحی شبکه‌های ارتباطی:** در طراحی شبکه‌های ارتباطی مانند شبکه‌های تلفن همراه و اینترنت، نیاز به تعیین مکان و تعداد تجهیزات مورد نیاز و ترتیب ارتباط بین آن‌ها وجود دارد. بهینه‌سازی کلاسیک می‌تواند به طراحی بهینه شبکه‌های ارتباطی با توجه به منابع موجود کمک کند.

در کل، بهینه‌سازی کلاسیک در علم مخابرات برای بهبود کارایی، کیفیت، واگذاری منابع و کاهش هدررفت منابع محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۶-۲ تابع محدب

در این بخش، تعریفی ارائه میشود که میتواند در آینده کاربردی باشد.  
تابع محدب، تابعیست که در رابطه زیر صدق کند:

$$f(tx_1 + (1-t)x_2) \leq tf(x_1) + (1-t)f(x_2)$$

شکل ۱-۲: تعریف تابع محدب



## فصل سوم

### کارهای پیشین و سناریوی مسئله

در این فصل ابتدا انواع مسائل مطرح شده در زمینه سطوح بازتاب‌کننده هوشمند را بررسی میکنیم و سپس مسائلی که تا حدودی با سناریوی ما شبیه است یا به درک بهتر این سناریو کمک میکند را بصورت سطحی بررسی میکنیم. در نهایت نیز سناریوی مورد تحلیل را شرح داده و تفاوت این سناریو را با سایر سناریوها بررسی میکنیم.

## ۳-۱ انواع مسائل مطرح‌شده در زمینه سطوح بازتاب‌کننده

### هوشمند

در زمینه سطوح بازتاب‌کننده هوشمند، مسائل مختلفی مطرح است. یکی از دسته‌بندی‌های کلی مسائل مطرح شده در این زمینه، به شرح زیر است:

### ۳-۱-۱ مسائل میدانی:

- طراحی سطوح هوشمند: یکی از چالش‌هایی که همواره دانشمندان و محققان در حال دست و پنجه نرم کردن با آن هستند، طراحی سطوح هوشمند در تعداد بالا و با هزینه پایین می‌باشد. البته سطوح هوشمند تا کنون در ابعاد کوچک و بصورت نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده‌است که بازده مناسبی نیز داشته است.
- تحلیل مسئله از لحاظ جنبه‌های الکترومغناطیسی که نسبت مقاله‌های آن کمتر از تحلیل‌های سیستمی است.

### ۳-۱-۲ مسائل سیستمی:

- بهینه‌سازی ضرایب آنتن
- بهینه‌سازی ضرایب فاز:

□ تک IRS

- ✱ وجود دید مستقیم فرستنده به گیرنده
- ✱ عدم وجود دید مستقیم فرستنده به گیرنده

□ چند IRS

- ✱ وجود دید مستقیم فرستنده به گیرنده
- وجود بازتاب سیگنال بین IRS ها
- عدم وجود بازتاب سیگنال بین IRS ها
- ✱ عدم وجود دید مستقیم فرستنده به گیرنده
- وجود بازتاب سیگنال بین IRS ها
- عدم وجود بازتاب سیگنال بین IRS ها



## ۲-۳ مسائل مرتبط با سناریو پروژه

توسعه و بکارگیری سطوح هوشمند بازتاب‌کننده در مخابرات بیسیم به‌عنوان یک تکنیک امیدوار کننده برای افزایش نرخ گذردهی و بازده طیفی در نظر گرفته می‌شود. سطوح هوشمند بازتاب‌کننده از تعداد زیادی المان‌های بازتاب‌کننده تشکیل شده‌است که هر کدام به‌صورت مستقل می‌توانند سیگنال بازتابش را به گونه‌ای که مد نظر آنهاست کنترل کنند. با تغییر فاز هوشمندانه این سطوح بازتاب‌کننده، IRS می‌تواند سیگنال الکترومغناطیسی بازتاب‌شده را به گونه‌ای که ویژگی‌هایی خاص داشته باشد تغییر دهد. این تکنولوژی یک پیشرفت و بهینگی قابل توجه‌ای را مورد اشاره قرار می‌دهد به‌طوری که هم هزینه تولید این صفحات بسیار پایین است و هم توان مصرفی آنها در حد بسیار کمی نسبت به سایر تکنولوژی‌های موجود قرار دارد. همچنین این وسیله به راحتی بر روی انواع سطوح ساختمانی قابل نصب می‌باشد. به‌کارگیری سطوح هوشمند در مخابرات نسل ۵ و نسل ۶ نوید یک انقلاب در صنعت را می‌دهد. این سطوح توانایی اتصال به دیوار برای بازتاب مقدار قابل توجه‌ای از موج الکترومغناطیسی تابیده به سطوح را دارد و باعث افزایش نرخ کاربرد فضایی که خود منجر به افزایش مجموع نرخ قابل دسترسی کاربران یا افزایش نرخ امنیت است، می‌شود.

در این بخش، مسائل از پیش حل شده‌ای که با سناریوی فعلی ما سازگاری و شباهت دارد را بصورت اجمالی مورد بررسی قرار می‌دهیم:

- در [۸]، یک بررسی پایه‌ای بر روی مدل کردن سیگنال، معماری سخت‌افزار و شروط عملی در حل مسئله بهینه‌سازی داشته است. همچنین اشاره‌ای به جنبه‌های مهم طراحی سطوح هوشمند از جمله بهینه‌سازی فاز، تخمین کانال و استراتژی‌های مختلف پیاده‌سازی سطوح هوشمند داشته است.

- در [۴]، به بررسی و آنالیز عملکرد IRS در سناریو شامل فرستنده تک آنتنه (بدون نیاز به بهینه‌سازی ضرایب آنتن) و کاربر به‌گونه‌ای که دید مستقیم بین آنتن و کاربر وجود ندارد پرداخته است. در این سناریو، سطح هوشمند با  $M$  المان بازتاب‌کننده مجهز شده‌است. تحلیل نهایی نیز بر روی احتمال قطع شدن سیگنال، نرخ خطای سمبل و حد بالای نرخ قابل دسترسی انجام شده‌است. آنالیزها نشان داده است که سطح هوشمند می‌تواند بهینه‌سازی از مرتبه  $M$  انجام دهد.

- در [۶]، چارچوب بهینه‌سازی قابل مقیاس را برای پیکربندی سطوح بازتاب‌دهنده هوشمند (IRS) بزرگ در سیستم‌های ارتباطات بی‌سیم ارائه می‌دهد. سطوح هوشمند می‌توانند محیط‌های انتشار

بی‌سیم را با معرفی بازتاب‌های سیگنال قابل پیکربندی تغییر دهند. برای امکان بهینه‌سازی مقیاس‌پذیر، المان‌های واحد IRS به دسته‌هایی تقسیم‌بندی می‌شوند. پاسخ هر دسته با استفاده از مفاهیم فیزیک و الکترومغناطیس مدل می‌شود. این تکنیک، اجتناب از بهینه‌سازی هر المان واحد به طور جداگانه را فراهم می‌کند. برای اینکار، یک رویکرد بهینه‌سازی دو مرحله‌ای پیشنهاد می‌شود. مرحله طراحی آفلاین که مدل حالت‌های انتقال برای هر دسته را ایجاد می‌کند و مرحله بهینه‌سازی آنلاین که بهترین حالت انتقال برای هر دسته را انتخاب می‌کند تا عملکرد سیستم بهینه‌سازی شود. در سناریو downlink چند کاربره، الگوریتم‌ها برای کمینه کردن توان انتقالی در حالی که اطمینان از کیفیت خدمات برای هر کاربر با بهینه‌سازی همزمان تنظیم IRS و تشکیل دهنده تابش فرستنده ارائه می‌شود.

- [۵]، این مقاله یک سیستم ارتباطات بی‌سیم را بررسی می‌کند که یک فرستنده (آلیس) پیام‌های محرمانه را به دو گیرنده باب ۱ و باب ۲ در حضور دو شنود کننده غیر مجاز ارسال می‌کند. یک سطح هوشمند، به طور همزمان، عمل فرستندگی و گیرندگی (STAR-RIS) را برای بهبود امنیت بکمک energy harvesting در شنودکنندگان هدایت میکند. STAR-RIS می‌تواند ضرایب انتقال و بازتاب خود را به طور پویا تنظیم کند تا بر انتشار سیگنال کنترل داشته باشد. نرخ امنیت قابل دستیابی و انرژی جذب شده به عنوان توابعی از ضرایب انتقال و بازتاب بدست می‌آیند.

- در [۷] نیز استفاده از سطوح بازتاب‌دهنده هوشمند برای کمک به ارتباطات اپتیکی در فضای آزاد (FSO) را برای ارائه دسترسی به اینترنت پهن‌بند به قطارهای با سرعت بالا (HST) بررسی می‌کند. یک RIS می‌تواند تابش‌های نور را با تنظیم ضرایب انتقال/بازتاب کننده کنترل و هدایت کند. این کار می‌تواند پوشش را گسترش داده و لینک‌های اپتیکی مستقیم از ایستگاه‌های پایه را بهبود ببخشد. مدل‌های تحلیلی برای کانال از لینک‌های مستقیم و RIS-های کمکی در شرایط نوری ضعیف و متوسط تا قوی ارائه می‌شود.

- مقالات [۱۱]، [۳]، [۹]، [۲] سناریوی تأثیر بازتاب بین سطوح را بدون در نظر گرفتن اثر LoS ارائه می‌دهند.

- در [۱۱]، یک سامانه ارتباطی بی‌سیم با کمک دو IRS توزیع شده نزدیک به ایستگاه پایه (BS) و کاربر پیشنهاد می‌دهد. این سامانه یک کانال LoS رنک ۱ بین دو IRSها فرض می‌کند و بهینه‌سازی ضرایب سطوح را برای به دست آوردن توان با مقیاس text به قوه ۴، که K تعداد کل

عنصرهای IRS است، انجام می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی مقیاس قدرت  $K$  به قوه ۴ بدست آمده از استقرار دو IRS کمک‌کننده به یکدیگر را تأیید می‌کند که عملکرد مقیاس قدرت  $K$  به قوه ۲ یک سیستم تک IRS ای را پیش می‌گیرد.

- در [۳]، تخمین کانال و طراحی پاسیو بیم‌فرمینگ برای یک سیستم تک کاربره کمک‌شده توسط IRS دوگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو روش تخمین کانال پیشنهاد می‌شود: (۱) تخمین ماتریس کانال کامل، (۲) تخمین دو بردار برای کانال میان دو IRS رنک ۱.

براساس کانال‌های تخمینی، طراحی پاسیو بیم‌فرمینگ بهینه‌سازی می‌شود تا نرخ دست‌یافتنی را به حداکثر برساند. نتایج شبیه‌سازی افزایش قابل توجهی از نرخ سیستم IRS دوگانه نسبت به IRS تکی نشان می‌دهد، به ویژه با تعداد زیادی عنصر.

- در [۹]، یک سیستم IRS دوگانه را در نظر می‌گیرد که سیگنال‌ها تنها از طریق پیوند BS-IRS1-IRS2-user به کاربر می‌رسند. ضرایب آنتن و ضرایب سطوح هوشمند با استفاده از بهینه‌سازی PSO بهینه‌سازی می‌شود تا توان سیگنال دریافتی را به حداکثر برساند. نتایج نشان می‌دهند که با وجود نبود پیوند مستقیم BS-use، می‌توان به اندازه‌ی مناسبی به نسبت سیگنال به نویز دست یافت، که نشان‌دهنده امکان ارتباط از طریق بازتاب دوگانه IRS است.

- در [۲]، یک سیستم MIMO چند کاربره توسط دو IRS همکاری‌بازتابنده مورد مطالعه قرار می‌گیرد و طراحی پاسیو بیم‌فرمینگ ارائه می‌شود. تجزیه و تحلیل تئوری نشان می‌دهد که برای مورد تک کاربره، SNR بهتر و برای مورد چند کاربره، رتبه بالاتری کانال نسبت به سیستم IRS تکی بدست می‌آید. یک الگوریتم بهینه‌سازی تناوبی AO پیشنهاد می‌شود تا حداقل SINR را در مورد چند کاربره به حداکثر برساند (Min Max Optimization). نتایج شبیه‌سازی افزایش نرخ قابل توجهی را در سیستم IRS دوگانه در تنظیمات مختلف نشان می‌دهند.

- به طور خلاصه، مقالات فوق‌الذکر سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم کمک‌شده توسط IRS دوگانه را تحت مدل‌ها و فرضیات کانال مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند. تمرکز اصلی بر طراحی پاسیو بیم‌فرمینگ بر دو IRS است تا افزایش توان دریافتی نسبت به سیستم‌های IRS تکی را ممکن سازد. هم تجزیه و تحلیل نظری و هم شبیه‌سازی‌ها عملکردهای ممتاز سیستم‌های IRS دوگانه با تابش بهینه را نشان می‌دهند.

### ۳-۳ سناریوی پروژه

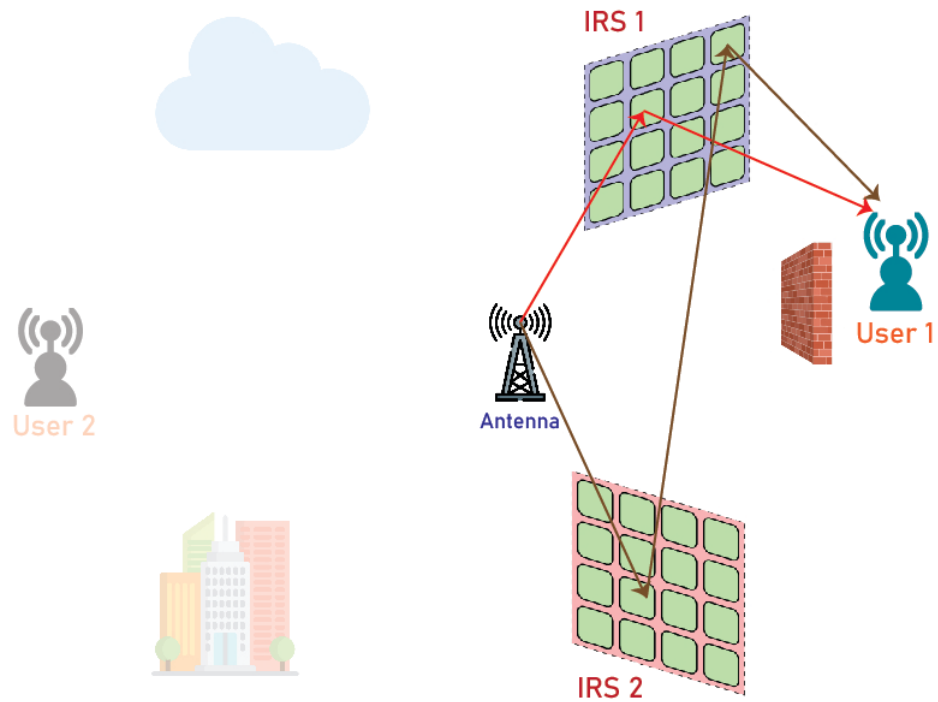
در این پروژه، هدف بهینه‌سازی دو سناریو شبیه به هم می‌باشد.

#### ۱-۳-۳ سناریو اول: بدون مانع

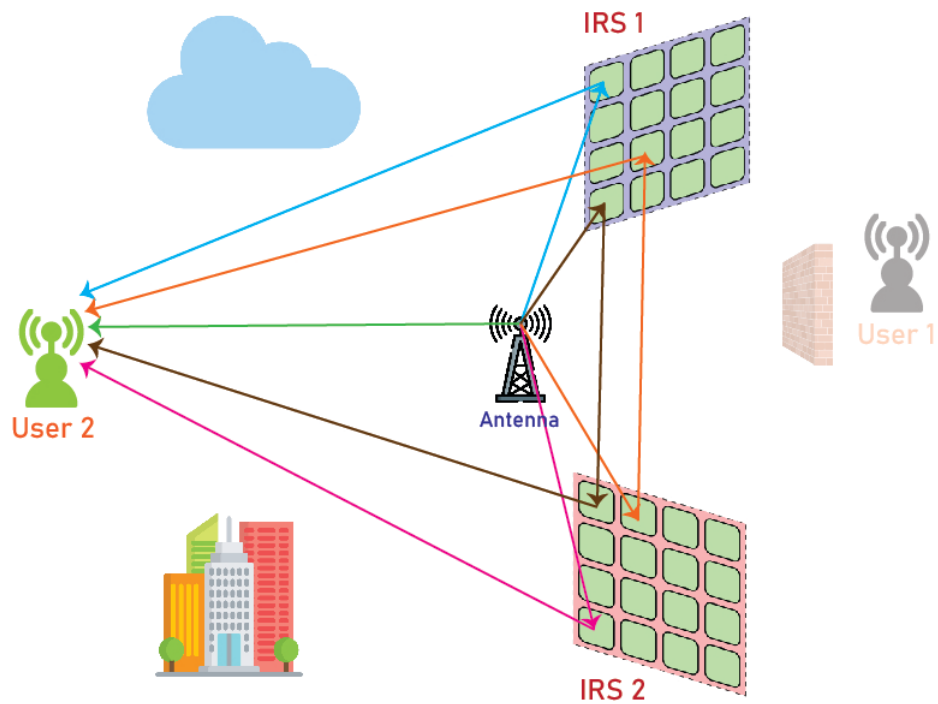
در این سناریو، هر دو کاربر به آنتن دید مستقیم داشته و از هر دو سطح هوشمند نیز سیگنال دریافت می‌کنند. بین سطوح هوشمند نیز سیگنال بازتابی مرتبه اول برقرار است. در این سناریو، وزن نرخ دریافتی کاربران برابر و مساوی مقدار ۱ می‌باشد. آنتن گیرنده هر کاربر دارای یک المان می‌باشد ولی آنتن فرستنده دارای  $N$  المان می‌باشد. سطوح هوشمند نیز به ترتیب دارای  $M_1$  و  $M_2$  المان می‌باشند. در این سناریو، هر کاربر از ۵ مسیر مختلف سیگنال را دریافت می‌کند.

#### ۲-۳-۳ سناریو دوم: با مانع

در این سناریو، فقط کاربر دوم به آنتن دید مستقیم داشته و از هر دو سطح هوشمند سیگنال دریافت می‌کند اما کاربر اول، دید مستقیم به آنتن فرستنده ندارد و فقط از سطح هوشمند شماره ۱ سیگنال دریافت می‌کند. بین سطوح هوشمند نیز سیگنال بازتابی مرتبه اول برقرار است. در این سناریو، وزن نرخ دریافتی کاربران برابر و مساوی مقدار ۱ می‌باشد اما میتوان در صورت نیاز، به علت اینکه کاربر اول تعداد سیگنال کمتری دریافت می‌کند، وزن آن را زیادت‌ر نمود. آنتن گیرنده هر کاربر دارای یک المان می‌باشد ولی آنتن فرستنده دارای  $N$  المان می‌باشد. سطوح هوشمند نیز به ترتیب دارای  $M_1$  و  $M_2$  المان می‌باشند. در این سناریو، کاربر اول از ۲ مسیر و کاربر دوم از ۵ مسیر مختلف سیگنال را دریافت می‌کنند که در تصویر زیر قابل مشاهده است:



شکل ۳-۱: سیگنال‌های دریافتی کاربر اول در شرایط با مانع



شکل ۳-۲: سیگنال‌های دریافتی کاربر دوم در شرایط با مانع

## ۴-۳ نوآوری ما

در حال حاضر، همان‌طور که دیده‌اید، تعداد زیادی مقاله و مطلب در مورد مفهوم سطوح بازتابنده هوشمند وجود دارد. نه تنها تعداد اندکی از آن‌ها اثر بازتاب دوگانه یا بازتاب درجه دوم بین IRS در کل عملکرد سیستم را در نظر گرفته‌اند، بلکه تقریباً تمامی آن‌ها اثر خط دید مستقیم (LoS) را در این سناریوها با اعمال یک مانع نادیده گرفته‌اند. این نادیده گرفتن، انگیزه‌ای برای ما به وجود آورد تا یک سناریو را پیشنهاد دهیم تا اثر بازتاب دوگانه در حضور سیگنال‌های خط دید مستقیم را تجزیه و تحلیل کنیم. در این مقاله، به طور کلی، به تحلیل بهبودی که در حضور بازتاب دوگانه به دست می‌آید، می‌پردازیم تا ببینیم آیا اثر بازتاب دوگانه را می‌توان نادیده گرفت یا خیر.



## فصل چهارم

### الگوریتم بهینه‌سازی



در این فصل ابتدا سیستم مدل و چنل مدل را بیان میکنیم و سپس تکنیک ساده‌کردن مسئله به کمک متغیرهای واسط را شرح میدهیم. در ادامه، الگوریتم اصلی حل مسئله یعنی بهینه‌سازی دوره‌ای را مرور میکنیم و سپس دوگانه لاگرانژ و الگوریتم جستجوی ریشه دوبخشی را توضیح مختصری میدهیم و به کمک آنها، ضرایب آنتن را بهینه میکنیم. سپس ضرایب فاز را بکمک روش معروف گرادیان نزولی بهینه‌سازی کرده و در نهایت، ۳ ناحیه اصلی بهینه‌سازی ضرایب فاز را شرح میدهیم.

## ۱-۴ مدل سیستم و مدل کانال و مسئله بهینه‌سازی

### ۱-۱-۴ مدل سیستم

طبق سناریویی که در فصل قبل شرح دادیم، سیگنال دریافتی در هر کاربر به شرح زیر می‌باشد:

$$x = \sum_{k=1}^K w_k s_k, \quad (1-4)$$

که دیتای کاربر  $k$  ام توسط  $s_k$  نمایش داده می‌شود. همچنین فرض می‌شود که این  $s_k$  ها به ازای  $(k = 1, \dots, K)$  متغیرهای رندوم و مستقل با میانگین صفر و واریانس ۱ باشند.

از طرفی  $w_k \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  بردار ضرایب آنتن فرستنده هستند.

اکنون سیگنال دریافتی برای کاربر  $k$  ام به شرح زیر قابل ساده‌سازی می‌باشد:

$$y_k = \underbrace{h_{d,k}^H x}_{\text{لینک مستقیم}} + \underbrace{h_{r_1,k}^H \Phi_1 G_1 x}_{\text{بازتاب مرتبه اول سطح هوشمند ۱}} + \underbrace{h_{r_2,k}^H \Phi_2 G_2 x}_{\text{بازتاب مرتبه اول سطح هوشمند ۲}} + \underbrace{h_{r_1,k}^H \Phi_1 D \Phi_2 G_2 x}_{\text{بازتاب مرتبه دوم سطح هوشمند ۱}} + \underbrace{h_{r_2,k}^H \Phi_2 D^H \Phi_1 G_1 x}_{\text{بازتاب مرتبه دوم سطح هوشمند ۲}} + \underbrace{u_k}_{\text{نویز سفید گاوسی جمع‌شونده}}$$

بگونه‌ای که  $u_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_0^2)$  نشان‌دهنده نویز گاوسی در کاربر  $k$  ام می‌باشد.

اکنون به سراغ نوشتن نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل (SINR) می‌رویم. برای هر کاربر، نویز گاوسی بعلاوه سیگنال کاربران دیگر بعنوان سیگنال مزاحم تلقی شده و در مخرج کسر قرار میگیرند. پس SINR کاربر  $k$  به شکل زیر است:

$$\gamma_k = \frac{|(h_{d,k}^H + h_{r_1,k}^H \Phi_1 G_1 + h_{r_2,k}^H \Phi_2 G_2 + h_{r_1,k}^H \Phi_1 D \Phi_2 G_2 + h_{r_2,k}^H \Phi_2 D^H \Phi_1 G_1) w_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |(h_{d,i}^H + h_{r_1,i}^H \Phi_1 G_1 + h_{r_2,i}^H \Phi_2 G_2 + h_{r_1,i}^H \Phi_1 D \Phi_2 G_2 + h_{r_2,i}^H \Phi_2 D^H \Phi_1 G_1) w_i|^2 + \sigma_0^2}$$

همچنین شرط توان نیز برای مجموع کاربران به شکل زیر نوشته میشود:

$$\sum_{k=1}^K \|w_k\|^2 \leq P_T$$

بگونه‌ای که:  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K] \in \mathbb{C}^{N_t \times K}$

## ۲-۱-۴ مدل کانال

برای مدل کردن کانال، ابتدا از مدل‌های رندوم استفاده مینماییم اما در صورت جواب گرفتن از الگوریتم، آنرا برای مدل‌های رایلی و رایسی نیز بهینه‌سازی میکنیم.

## ۳-۱-۴ مسئله بهینه‌سازی

در این پروژه، هدف، بیشینه‌کردن مجموع نرخ دریافتی کاربران است که به آن WSR گفته میشود. برای اینکار میبایست ضرایب آنتن و ضرایب فاز سطوح هوشمند را بصورت همزمان و توام بهینه‌سازی نماییم زیرا این دو دسته از متغیرها بر یکدیگر تاثیر میگذارند و نمیتوانند بصورت جداگانه بهینه‌سازی شوند. همچنین باید هر جوابی که برای ضرایب آنتن ارائه میشود، در شرط توان صدق نماید. پس مسئله را میتوان به شکل زیر فرموله کرد:

$$(P1) \quad \max_{\mathbf{W}, \Phi_1, \Phi_2} f_1(\mathbf{W}, \Phi_1, \Phi_2) = \sum_{k=1}^K \omega_k \log_2(1 + \gamma_k)$$

$$\text{به شرط} \quad \theta_{m_k} \in \mathcal{F}, \quad \forall m_k = 1, \dots, M_k, \quad (2-4)$$

$$\sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \leq P_T,$$

## ۲-۴ الگوریتم بهینه‌سازی متناوب

در این بخش، الگوریتم Alternating optimization یا بهینه‌سازی پی‌درپی که به الگوریتم Coordinate Descent یا مختصات نزولی نیز معروف می‌باشد را تعریف و نحوه بکارگیری آنرا شرح خواهیم داد.

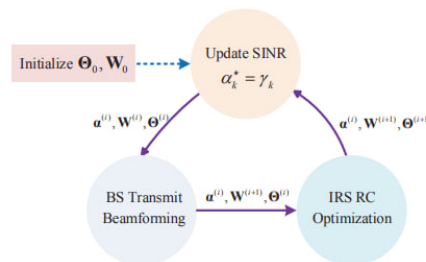
### ۱-۲-۴ تعریف

الگوریتم‌های هماهنگ نزولی مسائل بهینه‌سازی را با حداقل‌سازی تقریبی در امتداد جهت‌های مختصاتی یا ابرصفحه مختصاتی حل می‌کنند. این روش سال‌هاست که در برنامه‌های کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرد و محبوبیت آن به دلیل مفید بودنش در تجزیه و تحلیل داده‌ها، یادگیری ماشین و دیگر زمینه‌های مورد علاقه فعلی، همچنان در حال رشد است.

### ۲-۲-۴ استفاده

در مسئله بهینه‌سازی فعلی، ۲ دسته اصلی پارامتر داریم که باید بهینه‌سازی شوند. دسته اول مربوط به ضرایب آنتن می‌باشد که یک بردار با طول مشخص است. دسته دوم مربوط به ضرایب سطوح هوشمند است که خود به ۲ دسته تقسیم می‌شوند زیرا ۲ سطح هوشمند مستقل از هم داریم. البته لازم به ذکر است که در ادامه و با بوجود آمدن متغیرهای کمکی در طول مسئله، این دسته از متغیرها نیز به پارامترهای بهینه‌سازی اضافه می‌شوند که طول عمر آنها بصورت محلی تعریف می‌شود و جزو پارامترهای اصلی مسئله نیستند.

پس به طول کلی یک حلقه داریم که ابتدا ضرایب اولیه‌ای را برای فاز سطوح هوشمند در نظر گرفته و ضرایب آنتن را بهینه‌سازی مینماییم. سپس ضرایب آنتن را ثابت فرض کرده و ضرایب سطوح هوشمند را بهینه‌سازی مینماییم.



شکل ۴-۱: شیوه استفاده الگوریتم مختصات نزولی در پروژه

### ۳-۴ تبدیل دوگان لاگرانژی

یکی از مشکلاتی که در این مسئله بهینه‌سازی و همه مسائل مرتبط با بهینه‌سازی حداکثر نرخ قابل دسترسی با آن روبرو هستیم، وجود تابع لاگاریتم می‌باشد. اگر فقط یک عدد تابع لاگاریتم وجود داشت، به علت اینکه لاگاریتم تابعی اکیدا یکنوا (اکیدا صعودی) است، می‌توانستیم آن را حذف کرده و فقط تابع جلوی لاگاریتم را بهینه‌سازی نماییم اما در اینجا با جمع چند لاگاریتم روبرو هستیم. شاید یک راه حل احتمالی این باشد که از قانون تبدیل جمع به ضرب در لاگاریتم استفاده شود اما این خود باعث افزایش پیچیدگی مسئله می‌شود.

#### ۱-۳-۴ تعریف

اکنون که مشکل را درک کردیم، به سراغ معروف‌ترین راه حل آن می‌رویم. یکی از تبدیل‌هایی که می‌توان جهت حذف لاگاریتم در چنین مسائلی استفاده نمود، تبدیل دوگانی لاگرانژ لاگاریتمی می‌باشد. این تبدیل توسط دو عضو جامعه علمی برق در سال ۲۰۱۸ در بخش دوم مقاله‌ای جهت استفاده برای حل مسائل مخابرات ارائه گردید.

تکنیک به گونه‌ای می‌باشد که با اضافه کردن پارامترهایی اختیاری به نام آلفا به مسئله، باعث جابجایی تابع جلوی لاگاریتم به بیرون آن می‌شود و عملاً با حذف لاگاریتم، باعث ساده شدن مسئله بهینه‌سازی می‌شود. در ادامه از این تکنیک پرکاربرد استفاده خواهیم نمود.

#### ۲-۳-۴ ساده‌سازی مسئله

این تکنیک در مسئله ما به صورت زیر قابل استفاده می‌باشد:

$$f_{1a}(\mathbf{W}, \boldsymbol{\Theta}, \boldsymbol{\alpha}) = \sum_{k=1}^K \omega_k \log_2(1 + \alpha_k) - \sum_{k=1}^K \omega_k \alpha_k + \sum_{k=1}^K \frac{\omega_k (1 + \alpha_k) \gamma_k}{1 + \gamma_k}$$

همانطور که مشاهده می‌شود، مسئله ۲-۴ قابل تبدیل به مسئله بالا می‌باشد که پارامتر اختیاری آلفا به تعداد کاربران به مسئله اضافه شده است.

همچنین گاما همان نسبت سیگنال به نویز معروف می‌باشد. اکنون شاید این سوال پیش بیاید که آیا با اضافه شدن یک دسته پارامتر جدید، چگونه باعث ساده تر شدن مسئله می‌شویم؟  
جواب این سوال وقتی مشخص می‌شود که به کمک الگوریتم مختصات نزولی شروع به بهینه‌سازی

این دو دسته پارامتر نماییم:

۱- دسته اول همان پارامترهای آنتن و سطوح هوشمند

۲- دسته دوم پارامترهای اختیاری اضافه‌شده به مسئله

برای اینکار، ابتدا پارامترهای دسته اول را ثابت فرض میکنیم و نسبت به پارامترهای دسته دوم مشتق میگیریم. نکته قابل توجه اینکه این مشتق‌گیری به سادگی قابل انجام است و با صفر قرار دادن آن، مقدار بهینه آلفا به شکل زیر یافت میشود:

$$\alpha_k^o = \gamma_k$$

اکنون با ثابت فرض کردن آلفا، مسئله به شکل زیر تبدیل میشود و به سراغ بهینه‌سازی پارامترهای دسته اول میرویم :

$$(P1'') \quad \max \mathbf{W}, \Theta \quad \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_k^* \gamma_k}{1 + \gamma_k}$$

بگونه‌ای که  $\alpha_k^* = \omega_k(1 + \alpha_k)$  میباشد.

اکنون به مجموع چند عبارت کسری رسیدیم که در ادامه با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی چند کسری به حل این مسئله میپردازیم.

## ۴-۴ برنامه‌ریزی چند کسری

اکنون با چند کسر مواجه هستیم که مشتق‌گرفتن از آنها و حل معادله حاصله به راحتی امکان‌پذیر نیست. پس لازم است از تبدیل دیگری به نام برنامه‌ریزی چند کسری استفاده نماییم تا این مسئله به فرم خطی تبدیل شود بگونه‌ای که مسئله حاصله، معادل مسئله اصلی باشد یعنی نقاط بهینه یکسانی داشته باشند.

### ۴-۴-۱ تعریف

این تبدیل در بخش اول مقاله‌ای که در بخش قبل به آن اشاره شد معرفی شده‌است. همانند تبدیل معرفی شده در بخش قبل و سایر تبدیل‌ها، یک دسته پارامتر اختیاری بنام بتا به مسئله اضافه میشوند که البته باعث ساده‌شدن مسئله بهینه‌سازی میشود. در ادامه به نحوه استفاده از این تکنیک در مسئله میپردازیم.

## ۲-۴-۴ ساده‌سازی مسئله

ابتدا برای ساده‌سازی نوشتار، یک پارامتر جدید مربوط به کانال‌ها تعریف می‌کنیم:

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{\Theta}\mathbf{h}_{r,k}$$

پس نسبت سیگنال به نویز به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$\gamma_k = \frac{\|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \sigma_0^2}$$

اکنون با استفاده از تبدیل کسری و اضافه شدن پارامتر بتا، مسئله بهینه‌سازی به شکل زیر تغییر می‌کند و به فرم خطی نوشته می‌شود:

$$f2a(\mathbf{W}, \beta) = \sum_{k=1}^K 2\sqrt{\alpha_k} \Re \{ \beta_k^* \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k \} - \sum_{k=1}^K |\beta_k|^2 \sum_{i=1}^K \|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \sigma_0^2.$$

بگونه‌ای که دامنه بتا برابر اعداد مختلط باشد.

## ۵-۴ بهینه‌سازی ضرایب آنتن

اکنون دوباره با بکارگیری الگوریتم مختصات نزولی یا Coordinate Descent میتوان پارامترهای بتا و سایر پارامترها را در داخل یک حلقه، بهینه‌سازی کرد. برای اینکار میبایست ابتدا نسبت به بتا مشتق گرفته و مقدار بهیه آن را بدست آوریم. این کار به سادگی قابل انجام است.

## ۱-۵-۴ مقدار بتا بهینه

مقدار بهینه بتا در زیر آورده شده‌است:

$$\beta_k^* = \sqrt{\alpha_k} \frac{\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k}{\sum_{i=1}^K \|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \sigma_0^2}.$$

#### ۴-۵-۲ مقدار بهینه بردار آنتن

اکنون نوبت به بهینه‌سازی اولین دسته پارامتر اصلی مسئله یعنی ضرایب فعال آنتن رسیده است. همانند سایر پارامترها برای بدست آوردن مقدار بهینه آن، نسبت به  $W$  مشتق گرفته و برابر صفر قرار می‌دهیم. نتیجه در رابطه زیر قابل مشاهده است:

$$\mathbf{w}_k^* = \sqrt{\alpha_k} \beta_k \left( \lambda_0 \mathbf{I}_M + \sum_{i=1}^K |\beta_i|^2 \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \right)^{-1} \mathbf{h}_k,$$

البته لازم به ذکر است چون بر روی این دسته پارامتر، شرط توان نیاز است رعایت شود باید یک پارامتر کمکی به نام لامبدا به مسئله اضافه کنیم که با تغییر آن، شرط توان را برقرار سازیم. مقدار لامبدا به صورت بهینه توسط حل نامعادله زیر بدست می‌آید:

$$\lambda_0^* = \min \left( \lambda_0 \geq 0 : \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq PT \right).$$

روش حل این نامعادله را توسط سریع‌ترین روش یعنی جستجوی دودخشی در زیر توضیح خواهیم داد.

#### ۴-۵-۳ روش جستجوی دودخشی

یکی از ساده‌ترین و در عین حال بهینه‌ترین روش‌های جستجوی ریشه تابع در یک بازه، روش جستجوی دودخشی یا Bisection Search می‌باشد. این روش می‌تواند به طور همزمان فقط یک ریشه را در یک بازه مشخص پیدا کند. برای اطمینان از وجود ریشه در یک بازه، طبق قضیه مقدار میانی، مقدار تابع باید در ابتدا و انتهای بازه مختلف‌العلامه باشند. این روش ابتدا وسط بازه را به عنوان نقطه سوم در نظر گرفته و مقدار آن را در تابع حساب می‌کند. سپس بازه جستجوی جدید بین نقطه سوم و نقطه‌ایست که علامت متفاوتی با نقطه سوم دارد. به همین روش بازه جستجو را کوچک کرده و در نهایت با یک شرط پایان مثلا تعیین شرط میزان خطا بر روی ریشه، الگوریتم متوقف می‌شود.

#### ۴-۵-۴ حد بالای لامبدا

یکی از مسائلی که در روش دودخشی باید پیش از اجرای الگوریتم تعیین کنیم، نقطه شروع و پایان الگوریتم می‌باشد. نقطه شروع برای این مسئله همیشه از صفر می‌باشد اما حد بالای آن چگونه یافت



میشود؟

- یک روش آنست که مقداری بسیار بزرگ برای آن قرار دهیم که اتفاقاً در اکثر سناریوها روشی قابل انجام است اما به علت محاسبات سنگین‌تر با اعداد بزرگتر، باعث کند شدن الگوریتم و به علت بزرگ بودن بازه جستجو، دیرتر به ریشه تابع همگرا میشود.

- اما در روش دوم، طبق مقاله [ ] میتوان از ضابطه زیر جهت حد بالای پارامتر لامبدا استفاده نمود:

$$g(\lambda) \leq \sum_{k=1}^K |\alpha_k|^2 |q_k|^2 \sum_{i=1}^N \frac{[\mathbf{Z}_k]_{i,i}}{\lambda_{\max}^2} \triangleq P_{\max}, \Rightarrow \lambda_{\max} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K |\alpha_k|^2 |q_k|^2 \sum_{i=1}^N [\mathbf{Z}_k]_{i,i}}{P_{\max}}}.$$

از طریق روابط زیر نیز قابل اثبات است:

$$g(\lambda) = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|_2^2 =$$

$$\sum_{k=1}^K \text{Tr} \left( \mathbf{F}_1 (\boldsymbol{\Sigma}_1 + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{F}_1^H \alpha_k q_k \bar{\mathbf{h}}_k u_k u_k^H \bar{\mathbf{h}}_k^H q_k \alpha_k \mathbf{F}_1 (\boldsymbol{\Sigma}_1 + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{F}_1^H \right) =$$

$$\sum_{k=1}^K |\alpha_k|^2 |q_k|^2 \text{Tr} \left( (\boldsymbol{\Sigma}_1 + \lambda \mathbf{I})^{-2} \mathbf{F}_1^H \bar{\mathbf{h}}_k u_k u_k^H \bar{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{F}_1 \right) = \sum_{k=1}^K |\alpha_k|^2 |q_k|^2 \sum_{i=1}^N \frac{[\mathbf{Z}_k]_{i,i}}{(\varepsilon_i + \lambda)^2},$$

## ۴-۶ بهینه‌سازی ضرایب فاز سطوح هوشمند

اکنون سراغ بهینه‌سازی دسته دوم از پارامترهای اصلی مسئله می‌رویم. دوباره برای تبدیل کسر به عبارتی خطی، نیاز است از برنامه‌ریزی چند کسری استفاده نماییم که در زیر قابل مشاهده است (اینبار با پارامتر اپسیلون این کار را انجام می‌دهیم):

$$f_{3a}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varepsilon}) = \sum_{k=1}^K 2\sqrt{\bar{\alpha}_k} \text{Re} \{ \varepsilon_k^* \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{a}_{k,k} + \varepsilon_k^* b_{k,k} \} - \sum_{k=1}^K |\varepsilon_k|^2 \left( \sum_{i=1}^K |b_{i,k} + \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{a}_{i,k}|^2 + \sigma_0^2 \right)$$

## ۴-۶-۱ مقدار اپسیلون بهینه

همانند بخش قبل که مقدار بهینه بتا را بدست آوردیم، اکنون به سراغ محاسبه مقدار بهینه اپسیلون می‌رویم:

$$\varepsilon_k^o = \frac{\sqrt{\tilde{\alpha}_k} (b_{k,k} + \theta^H \mathbf{a}_{k,k})}{\sum_{i=1}^K |b_{i,k} + \theta^H \mathbf{a}_{i,k}|^2 + \sigma_0^2}.$$

## ۴-۶-۲ روش گرادیان نزولی

این الگوریتم بهینه‌سازی، در عین مفهوم بسیار ساده‌ای که دارد، یک روش بسیار پرکاربرد و در صورت انتخاب کردن طول گام مناسب، بسیار سریع است.

برای پیدا کردن کمینه محلی، کفایت تابع مشتق‌پذیر باشد تا از آن مشتق گرفته و در جهت خلاف آن حرکت نماییم. برای پیدا کردن بیشینه، کفایت در جهت مشتق حرکت نماییم. لازم به ذکر است که همه الگوریتم‌ها نقاط بهینه محلی می‌دهند و اگر تابع محدب باشد، آن نقطه بهینه محلی، بهینه سراسری نیز می‌باشد.

در این روش نیاز به انتخاب طول گام داریم که سرعت همگرایی را مشخص می‌کند. اگر طول گام خیلی کوچک باشد، ممکن است دیر همگرا شود. اگر طول گام خیلی بزرگ انتخاب شود، ممکن است در بهینه محلی گیر نکند. پس باید مقداری مناسب برای آن قرار دهیم که روش‌های زیادی نیز برای انتخاب طول گام به شکلی تطبیق‌پذیر یا adaptive نوشته شده‌است.

### ۳-۶-۴ ضرایب بهینه سطوح هوشمند یک و دو

برای محاسبه مقدار بهینه تتا میتوان دوباره مشتق گرفت ولی این روش سرعت کمی دارد و بهتر است از روش گرادیان نزولی برای یک بردار استفاده نماییم.  
ابتدا چند تعریف ساده ارائه میدهیم:

$$|b_{i,k} + \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{a}_{i,k}|^2 = (b_{i,k} + \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{a}_{i,k}) (b_{i,k}^* + \mathbf{a}_{i,k}^H \boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{a}_{i,k} \mathbf{a}_{i,k}^H \boldsymbol{\theta} + 2 \operatorname{Re} \{b_{i,k}^* \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{a}_{i,k}\} + |b_{i,k}|^2$$

$$f_4(\boldsymbol{\theta}) = f_{3a}(\boldsymbol{\theta}, \varepsilon^\circ) = -\boldsymbol{\theta}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\theta} + 2 \operatorname{Re} \{\boldsymbol{\theta}^H \mathbf{e}\} + C,$$

$$\mathbf{R} = \sum_{k=1}^K |\varepsilon_k|^2 \sum_{i=1}^K \mathbf{a}_{i,k} \mathbf{a}_{i,k}^H,$$

$$\mathbf{e} = \sum_{k=1}^K \left( \sqrt{\tilde{\alpha}_k} \varepsilon_k^* \mathbf{a}_{k,k} - |\varepsilon_k|^2 \sum_{i=1}^K b_{i,k}^* \mathbf{a}_{i,k} \right),$$

$$C = \sum_{k=1}^K \left( 2\sqrt{\tilde{\alpha}_k} \operatorname{Re} \{\varepsilon_k^* b_{k,k}\} - |\varepsilon_k|^2 \left( \sigma_0^2 + \sum_{i=1}^K |b_{i,k}|^2 \right) \right)$$

ابتدا به کمک گرادیان نزولی و مپ کردن جواب بر روی دایره واحد، مقدار گرادیان را از طریق رابطه زیر محاسبه میکنیم:

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}} f_4 = 2 \operatorname{Re} \{(\mathbf{R}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{e})^* \odot (-j\boldsymbol{\theta})\},$$

اکنون به کمک مفهوم روش iterative گرادیان نزولی، مقدار جدید ضرایب فاز سطح هوشمند شماره ۱ را از ترکیب مقدار قبلی بهمراه ضربی از تغییرات (گرادیان) توسط رابطه زیر بدست می‌آوریم:

$$\boldsymbol{\Theta}^{(t+1)} = \boldsymbol{\Theta}^{(t)} - \gamma^{(t)} \nabla_{\boldsymbol{\theta}} f(\mathbf{X}^{(t)}),$$

محاسبه ضرایب سطح هوشمند شماره ۲ نیز به روش مشابه قابل انجام است.

#### ۴-۶-۴ سه ناحیه اصلی بهینه‌سازی ضرایب فاز

برای بهینه‌سازی ضرایب فاز، ۳ ناحیه اصلی وجود دارد که جواب نهایی را میتوان به آن ناحیه مپ کرد.

- ناحیه اول، ناحیه درون دایره واحد است که اکثر الگوریتم‌ها بصورت پیش‌فرض جواب را در این ناحیه میدهند. این ناحیه الزاما جواب بهینه سراسری نمیدهد زیرا همراه با کاهش توان همراه است (اندازه بردار داخل دایره واحد کمتر از ۱ مییابد).

- ناحیه دوم، ناحیه روی دایره یکه است. احتمال وجود بهینه سراسری در این ناحیه بالا است. جواب های درون دایره واحد که از الگوریتم‌های مرحله قبل بدست می‌آید، به این ناحیه مپ میشوند یعنی اندازه بردار آنها برابر واحد میشود یا به عبارتی آن عدد مختلط را بر اندازه‌اش تقسیم میکنند.
- ناحیه سوم که ناحیه ایست که عملا کاربرد واقعی دارد، ناحیه کوانتیزه‌شده روی دایره یکه است. به عبارتی این ناحیه زیرمجموعه ناحیه قبل است و فقط شامل نقاط محدودی از آن میشود. مثلا می‌توان کوانتیزیشن ۹ بیتی انجام داد که حدودا خطای یک درجه می‌دهد.

این مسئله بر روی ناحیه دوم حل شده است که به راحتی موقع پیاده‌سازی میتواند به نزدیک‌ترین نقطه در ناحیه سوم مپ شود.



## فصل پنجم

### نتایج و پیشنهادات

در این فصل ابتدا نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم توضیح داده‌شده در فصل قبل را برای هر دو سناریو مورد بررسی قرار می‌دهیم و سپس به دو مورد از کارهایی که در آینده برای پیشبرد این تحقیق و کمک به سایر محققان قابل انجام است اشاره می‌کنیم.

## ۵-۱ نتایج

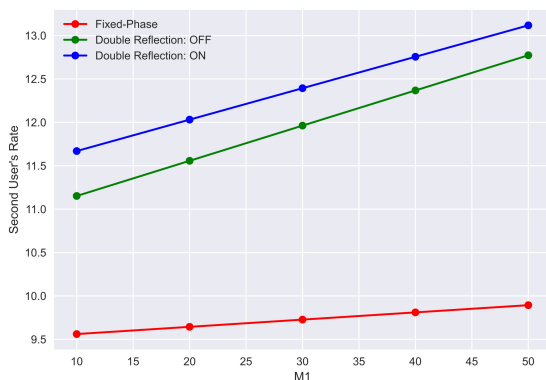
در این بخش، سناریو را در ۲ حالت بدون مانع و همراه با مانع شبیه‌سازی میکنیم. جهت اینکار، پارامترهای لازم در این شبیه‌سازی را مطابق مقادیر زیر قرار داده و برای M1 هایی که مضرب ۱۰ هستند و برای هر M1 ۱۰ بار شبیه‌سازی را اجرا کرده و مقادیر را درونیابی میکنیم تا به نمودارهای زیر برسیم. مقادیر قرار داده‌شده در شبیه‌سازی به شرح زیر است:

- تعداد المان‌های آنتن:  $N = 20$
- تعداد المان‌های سطح هوشمند دوم:  $M2 = 20$
- وزن نرخ هر کاربر: ۱
- مجموع توان دو کاربر: ۱۰ میلی وات
- انحراف از معیار نویز: 0.0001
- ضریب افت توان مسیر دید مستقیم: 2.5
- ضریب افت توان مسیر بین آنتن و سطوح هوشمند یا سطوح هوشمند و کاربر: ۲
- ضریب افت توان مسیر بین سطوح هوشمند: 1.8
- فاصله کاربر ۱ تا آنتن: ۵۰ متر
- فاصله کاربر ۲ تا آنتن: ۶۰ متر
- فاصله سطح هوشمند ۱ تا آنتن: ۲۰ متر
- فاصله سطح هوشمند ۲ تا آنتن: ۳۰ متر
- فاصله کاربر ۱ تا سطح هوشمند ۱: ۵۰ متر
- فاصله کاربر ۱ تا سطح هوشمند ۲: ۳۰ متر
- فاصله کاربر ۲ تا سطح هوشمند ۱: ۴۰ متر
- فاصله کاربر ۲ تا سطح هوشمند ۲: ۲۰ متر
- فاصله بین سطوح هوشمند: ۴۰ متر
- طول گام الگوریتم گرادیان نزولی: 0.1



## ۱-۱-۵ نتایج و تحلیل بهینه‌سازی بدون مانع

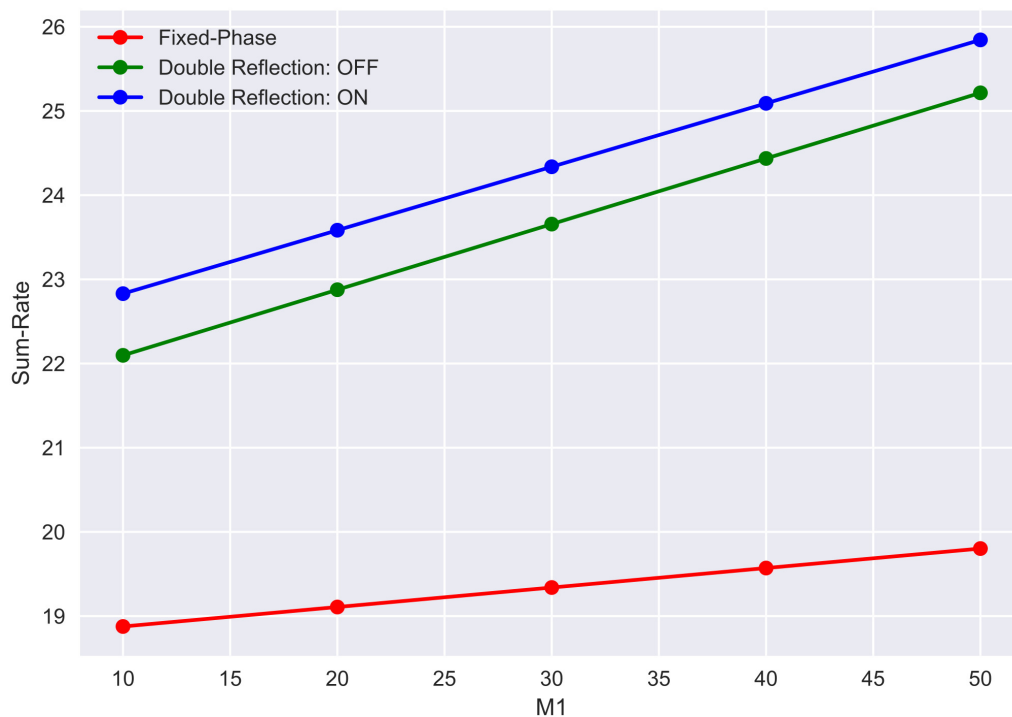
طبق شرایط بالا و در حالت بدون مانع، شبیه‌سازی را اجرا کرده و نمودارهای زیر برای نرخ کاربر ۱، کاربر ۲ و مجموع نرخ هر دو کاربر رسم شده است:



شکل ۵-۲: نرخ کاربر دوم در شرایط بدون مانع



شکل ۵-۱: نرخ کاربر اول در شرایط بدون مانع



شکل ۵-۳: مجموع نرخ دو کاربر در شرایط بدون مانع

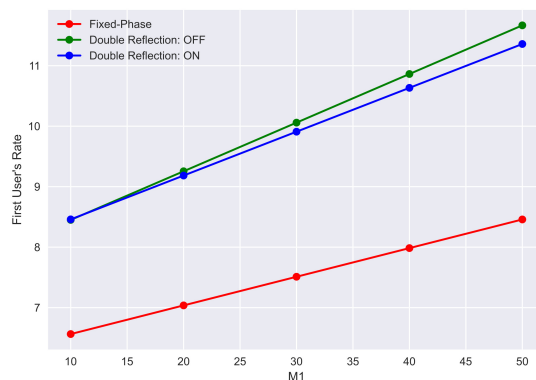
تحلیل: همانطور که مشاهده میشود در حالتی که سیگنال بازتابی بین سطوح در نظر گرفته شده است هر دو کاربر بهبودی را در سیگنال‌های دریافتی مشاهده میکنند اما نکته قابل توجه اینست که با در نظر گرفتن سیگنال بین سطوح باعث ایجاد پیچیدگی در بهینه‌سازی میشویم و زمان اجرا کندتر میشود و این موضوع میتواند سیستم را از حالت real time خارج سازد پس باید هر شخص متناسب با سناریو خود بررسی کند که آیا این مقدار بهبود به اندازه پیچیدگی ایجاد شده ارزش دارد یا خیر؟

## ۲-۱-۵ نتایج و تحلیل بهینه‌سازی با مانع

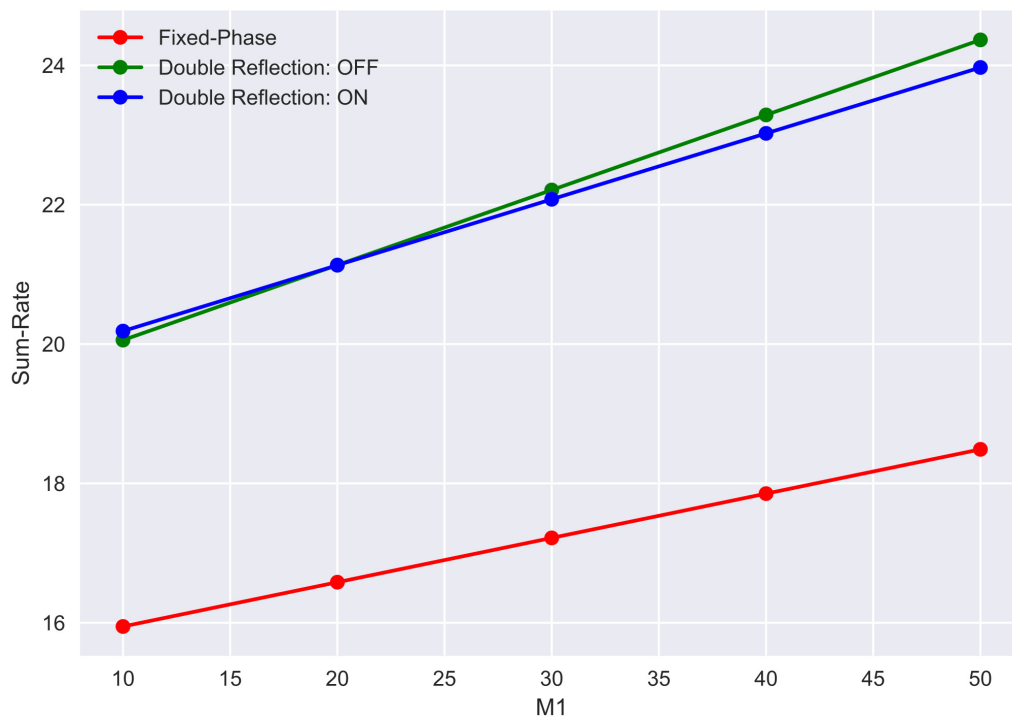
طبق شرایط بالا و در حالت با مانع، شبیه‌سازی را اجرا کرده و نمودارهای زیر برای نرخ کاربر ۱، کاربر ۲ و مجموع نرخ هر دو کاربر رسم شده است:



شکل ۵-۵: نرخ کاربر دوم در شرایط با مانع



شکل ۵-۴: نرخ کاربر اول در شرایط با مانع



شکل ۵-۶: مجموع نرخ دو کاربر در شرایط با مانع

تحلیل: همانطور که مشاهده میشود در حالتی که سیگنال بازتابی بین سطوح در نظر گرفته شده است، هیچ یک از کاربرها بهبود خاصی را مشاهده نمیکنند و فقط با ایجاد پیچیدگی زمانی در مسئله، باعث کاهش سرعت همگرایی آن شده ایم. پس در این سناریو و سناریوهای مشابه استفاده از سیگنال بین سطوح توصیه نمیشود زیرا میتواند بدون هیچ بهبودی، باعث افزایش محاسبات و در نتیجه کاهش سرعت همگرایی شود.

## ۲-۵ پیشنهادات

در این بخش به بررسی سه پیشنهاد (کارهای آینده) میپردازیم که میتواند توجه زیادی را به خود جلب کرده و مشکلات زیادی را حل کند:

### ۱-۲-۵ بازتاب مرتبه ۳

همانطور که در این ستاریو بررسی شد، بازتاب بین سطوح هوشمند فقط تا بازتاب مرتبه ۱ لحاظ شده است و در بخش نتایج مشاهده شد که این بازتاب، تاثیر چندانی بر روی بهینه شدن خروجی به نسبت پیچیدگی که به مسئله اضافه میکند، ندارد اما گاهی ناچار هستیم که این بازتاب را لحاظ کنیم. مثلا در هنگامی که دید مستقیم به فرستنده و یکی از دو سطوح هوشمند وجود ندارد، ناچار به لحاظ این بازتاب هستیم.

اکنون یکی از مسائلی که مطرح میشود، این است که اگر ۳ سطح هوشمند استفاده کنیم و دید مستقیم به دو سطح نداشته باشیم، آیا از نظر نرخ دریافتی کاربر، بهینه است که از سیگنال بازتابی مرتبه ۲ استفاده کنیم تا اطلاعات را به کاربر برسانیم؟

این یکی از سوالاتی است که میتواند در آینده و به کمک سایر محققان جواب داده شود.

### ۲-۲-۵ ساخت فریمورک برای بهینه‌سازی سطوح هوشمند

یکی از چالش‌های اصلی که در برنامه‌نویسی این پروژه برای بهینه‌سازی ضرایب فاز وجود داشت، نبود هیچ فریمورک یا همان چارچوب برنامه‌نویسی خاصی برای حل این مسائل است. ابتدا مجبور بودیم به دنبال الگوریتم بهینه بگردیم و سپس این الگوریتم را پیاده‌سازی نماییم و این امکان وجود داشت که الگوریتم مورد نظر در بیشینه‌های محلی غیر بهینه گیر کرده و نتواند به جواب قابل قبولی برسد. یا حتی ممکن بود این الگوریتم همگرا نشود که محقق در این صورت به ناچار مجبور است به سراغ سایر الگوریتم‌ها رفته که این کار اصلا از نظر زمان و انرژی، بهینه نیست.

اکنون میتوان به عنوان یکی از کارهای آینده، فریمورکی طراحی کرد که کاربر، سناریو خود را به آن داده و این فریمورک، انواع روش‌های مرسوم بهینه‌سازی در این حوزه را امتحان کرده و بهینه‌ترین جواب را انتخاب و به ما نمایش دهد.

البته که این مورد نیاز به صرف زمان و انرژی زیادی دارد که صرفا در قالب پروژه‌های صنعتی و با وجود سرمایه‌گذار قابل انجام است.

### ۳-۲-۵ پیدا کردن طول گام بهینه

یکی از مسائل مهم در سرعت همگرایی الگوریتم گرادیان نزولی، طول گامی است که انتخاب میکنیم. سال‌هاست که تحقیقاتی بر روی پیدا کردن روش‌های تطبیق‌پذیر برای یافتن طول گام بهینه انجام میشود. میتوان این الگوریتم‌ها را در این پروژه پیاده‌سازی کرد و نتایج بهتر و سریع‌تری گرفت.



## کتاب نامه

- [1] A. Bruce Carlson, Paul B. Crilly. *COMMUNICATION SYSTEMS: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication 5th edition*. McGrawHill, 2010.
- [2] Beixiong Zheng, Member, IEEE Changsheng You Member IEEE and Rui Zhang, Fellow, IEEE. Double-irs assisted multi-user mimo: Cooperative passive beamforming design. *arXiv:2008.13701*, 2021.
- [3] Changsheng You, Member, IEEE Beixiong Zheng Member IEEE and Rui Zhang, Fellow, IEEE. Wireless communication via double irs: Channel estimation and passive beamforming designs. *arXiv:2008.11439v1*, 2020.
- [4] Dhanushka Kudathanthirige, Dulaj Gunasinghe and Amarasuriya, Gayan. Performance analysis of intelligent reflective surfaces for wireless communication. *arXiv:2002.05603v1*, 13 Feb 2020.
- [5] Kavianinia, Mohammad Reza and Emadi, Mohammad Javad. Secrecy rate analysis of star-ris in presence of energy harvesting eavesdroppers. *arXiv:2209.12105v2*, 2022.
- [6] Marzieh Najafi, Student Member, IEEE Vahid Jamali Member IEEE Robert Schober Fellow IEEE and H. Vincent Poor, Fellow, IEEE. Physics-based modeling and scalable optimization of large intelligent reflecting surfaces. *IEEE*, 2020.
- [7] Pouya Agheli, Hamzeh Beyranvand and Emadi, Mohammad Javad. High-speed trains access connectivity through ris-assisted fso communications. *arXiv:2110.12804*, 2021.



- 
- [8] Qingqing Wu, Shuowen Zhang, Beixiong Zheng Changsheng You and Zhang, Rui. Intelligent reflecting surface aided wireless communications: A tutorial. *arXiv:2007.02759v2*, 7 Jul 2020.
- [9] Tian, Guodong and Song, Rongfang. Cooperative beamforming for a double-irsassisted wireless communication system. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2021.
- [10] Vandenberghe, Lieven and Boyd, Stephen P. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [11] Yitao Han, Student Member, IEEE Shuowen Zhang Member IEEE Lingjie Duan Senior Member IEEE and Rui Zhang, Fellow, IEEE. Cooperative double-irs aided communication: Beamforming design and power scaling. *arXiv:2004.01846v1*, 2020.

## پیوست

# واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی

Power . . . . .	توان	آ
	ج	
Bisection Search . . . . .	جستجوی دوبخشی	BTS . . . . . ایستگاه زمینی
	چ	Energy Harvesting . . . . . انتقال انرژی
		ب
MISO . . . . .	چند ورودی تک خروجی	Quadratic . . . . . برنامه‌ریزی درجه دوم
MIMO . . . . .	چند ورودی چند خروجی	Programming
	د	Linear Programming . . . برنامه‌ریزی خطی
Data . . . . .	داده	Classic Optimization . بهینه‌سازی کلاسیک
Lagrangian Duality . . . .	دوگانگی لاگرانژی	Convex Optimization . . بهینه‌سازی محدب
Intelligent . . . . .	سطح بازتاب دهنده هوشمند	Multi-Fractional . . برنامه‌ریزی چند کسیری
	Reflective Surface	Programming
	ع	ت
Massive . . . . .	عظیم	SISO . . . . . تک ورودی تک خروجی
	غ	SIMO . . . . . تک ورودی چند خروجی

Passive . . . . . غیر فعال

ک

Encode . . . . . کدگذاری

Decode . . . . . کدگشایی

م

Modulation . . . . . مدولاسیون

Cellular Communication . . . . . مخابرات سلولی

Coordinate Descent . . . . . مختصات نزولی

Gradient Descent . . . . . مشتق نزولی

ه

Artificial Intelligence . . . . . هوش مصنوعی

# واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

<b>A</b>	Encode . . . . . کدگذاری
Artificial Intelligence . . . . . هوش مصنوعی	<b>G</b>
<b>B</b>	Gradient Descent . . . . . مشتق نزولی
BTS . . . . . ایستگاه زمینی	<b>I</b>
Bisection Search . . . . . جستجوی دوبخشی	Intelligent . . . . . سطح بازتاب دهنده هوشمند
<b>C</b>	Reflective Surface
Classic Optimization . . . . . بهینه‌سازی کلاسیک	<b>L</b>
Convex Optimization . . . . . بهینه‌سازی محدب	Linear Programming . . . . . برنامه‌ریزی خطی
Cellular Communication . . . . . مخابرات سلولی	Lagrangian Duality . . . . . دوگانگی لاگرانژی
Coordinate Descent . . . . . مختصات نزولی	<b>M</b>
<b>D</b>	Multi-Fractional . . . . . برنامه‌ریزی چند کسیری
Data . . . . . داده	Programming
Decode . . . . . کدگشایی	MISO . . . . . چند ورودی تک خروجی
<b>E</b>	MIMO . . . . . چند ورودی چند خروجی
Energy Harvesting . . . . . انتقال انرژی	Massive . . . . . عظیم

Modulation . . . . . مدولاسیون	Quadratic . . . . . برنامه‌ریزی درجه دوم
<b>P</b>	Programming
Power . . . . . توان	<b>S</b>
Passive . . . . . غیر فعال	SISO . . . . . تک ورودی تک خروجی
<b>Q</b>	SIMO . . . . . تک ورودی چند خروجی

# Abstract

This research explores the potential application of Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) in the context of future communication networks, specifically focusing on 6G. The study aims to optimize the weighted-sum-rate objective function for a realistic scenario involving two users. In this scenario, the collaboration of two IRS units is considered, with a second-order reflection occurring between them. One of the users experiences an obstacle, highlighting the need for improved network performance. To enhance the communication network's performance, a joint optimization approach is employed, optimizing both the passive beamforming coefficients of the IRS and the active beamforming coefficients of the antenna. This optimization is carried out using a coordinate descent algorithm consisting of a gradient descent inside it, which iteratively refines the beamforming coefficients to maximize the overall system performance. The research also includes an evaluation of the Signal-to Interference-plus-Noise Ratio (SINR) improvement in the presence of the second-order reflection between the two IRS units. The optimization process comprises several key steps. Firstly, the Lagrangian dual transformation is applied to eliminate the logarithmic function, simplifying the optimization problem. This transformation facilitates a more efficient and tractable optimization process. Additionally, fractional programming techniques are employed to convert fractional terms into linear functions, further streamlining the optimization process. These optimization techniques enable the exploration of optimal beamforming strategies and pave the way for enhanced performance in future wireless communication systems.

## Key Words:

IRS, Double Reflection, Sum-Rate, Coordinate Descent, Gradient Descent