گزارش پروژه

درس سیستم‌های مخابرات بی‌سیم

عنوان پروژه: مقایسه عملکرد سیستم‌های ISAC در حضور و عدم حضور سطح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (RIS)

استاد: جناب آقای دکتر محامدپور

گردآورنده: ملیکا مصطفی‌نژاد

شماره دانشجویی: ۴۰۳۱۲۶۵۴

چکیده

در این مقاله، عملکرد سیستم‌های ISAC[1] در دو حالت بدون و با استفاده از RIS[۲] بررسی شده است. تحلیل معیارهای SNR[۳] و CRB[۴] نشان می‌دهد که استفاده از RIS موجب افزایش نسبت سیگنال به نویز و بهبود دقت تخمین پارامترهای هدف می‌شود. به این ترتیب، ISAC همراه با RIS توانایی بهینه‌تری در تقویت قدرت سیگنال و کاهش حداقل واریانس تخمین ارائه می‌دهد و قابلیت اطمینان سیستم در سنجش و ارتباطات را بهبود می‌بخشد. این نتایج اهمیت کاربرد RIS در ارتقای عملکرد سیستم‌های ISAC را به‌وضوح نشان می‌دهند.

---

۱ Integrated Sensing and Communication

۲ Reconfigurable Intelligent Surface

۳ Signal-to-Noise Ratio

۴ Cramér–Rao Bound

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱-مقدمه	۱
۲- مرور ادبیات	۲
۲-۱- سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (RIS)	۲
۲-۱-۱-عملکرد و اصول کاری RIS	۲
۲-۱-۲- نقش RIS در شبکه‌های بی‌سیم	۳
۲-۲- سیستم یکپارچه سنجش و ارتباط (ISAC)	۴
۲-۲-۱- معیارهای عملکردی ISAC	۴
۳-ارزیابی عملکرد سیستم‌های ISAC در حالات حضور و عدم حضور RIS	۵
۳-۱- مقایسه معیار SNR	۶
۳-۲- مقایسه معیار CRB	۷
۴-نتیجه گیری	۸
۵-مراجع	۹

۱–مقدمه

با پیشرفت بی‌سابقه در فناوری‌های ارتباطی بی‌سیم، نسل‌های آینده شبکه‌های موبایل، از جمله شبکه‌های فراتر از ۵G و نسل ششم(۶G) انتظار می‌رود که قابلیت‌های ارتباطی و حسگری بسیار بالایی ارائه دهند و امکان پشتیبانی از برنامه‌های نوآورانه‌ای مانند خودروهای خودران، شهرهای هوشمند و صنایع خودکار را فراهم کنند [۵].

یک چالش اساسی در شبکه‌های بی‌سیم نسل آینده، محدودیت‌های مسیر خط دید (LoS[5]) و افت شدید سیگنال در محیط‌های پیچیده است که می‌تواند عملکرد سیستم‌های ارتباطی و حسگری را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد [۶].

در همین راستا، سامانه‌های حسگری و ارتباطی یکپارچه (ISAC) به‌عنوان یک راهکار نوین برای ترکیب همزمان ارتباط و جمع‌آوری داده‌های محیطی مطرح شده‌اند [۱]. این سیستم‌ها با استفاده از یک پلتفرم واحد، امکان انتقال اطلاعات و همزمان جمع‌آوری داده‌های محیطی را فراهم می‌کنند، که منجر به افزایش بهره‌وری طیف فرکانسی و کاهش نیاز به سخت‌افزار مجزا می‌شود [۳].

با این حال، عملکرد سیستم‌های ISAC زمانی که مسیرهای LoS بین ایستگاه پایه و کاربران یا اهداف حسگری مسدود باشد، می‌تواند به شدت کاهش یابد [۳]. در این زمینه، سطوح هوشمند قابل بازپیکربندی (RIS) به‌عنوان یک فناوری مؤثر معرفی شده‌اند که می‌توانند مسیرهای LoS مجازی ایجاد کرده و مسیر انتشار موج را در حضور موانع اصلاح کنند [۴].

RISها متشکل از آرایه‌ای از عناصر منعکس‌کننده کاملاً غیر فعال هستند که می‌توانند به‌صورت نرم‌افزاری برای تغییر فاز امواج ورودی تنظیم شوند [۲]. این ویژگی امکان هدایت هوشمندانه سیگنال‌ها، بهبود قدرت دریافت، افزایش دقت حسگری و کاهش مصرف انرژی را فراهم می‌کند [۵].

یکی از مزیت‌های کلیدیRIS ، قابلیت بهبود همزمان عملکرد ارتباطی و حسگری در سیستم‌های ISACاست. به‌طور مثال، با قرار دادن RIS بین BS و کاربران/اهداف، می‌توان شدت سیگنال‌ها را افزایش داده، مسیرهای LoS ایجاد کرد، پوشش حسگری و ارتباطی را گسترش داد و تداخل میان عملکردهای حسگری و ارتباطی را کاهش داد [۴].

از دیدگاه کاربردی، سیستم‌های ISAC با کمک RIS در سناریوهایی نظیر خودروهای خودران، شبکه‌های شهری هوشمند، شبکه‌های صنعتی، افزایش دقت تعیین موقعیت، کاهش تداخل و بهبود امنیت اطلاعات را فراهم می‌آورند [۶].

تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که استفاده از RIS در سیستم‌های ISAC می‌تواند عملکرد سیستم‌های با چند هدف و چند کاربر را بهبود دهد.

[5] Line-of-Sight

۲– مرور ادبیات

۲–۱– سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (RIS)

سطوح هوشمند قابل پیکربندی یا Reconfigurable Intelligent Surface، یک فناوری نوین در حوزه ارتباطات بی‌سیم است که به واسطه کنترل دقیق موج‌های الکترومغناطیسی، قادر است عملکرد شبکه‌های مخابراتی را به طور چشمگیری بهبود بخشد.RIS متشکل از آرایه‌ای از عناصر کوچک و ارزان قیمت است که هر یک می‌توانند پاسخ فازی محلی خود را تغییر دهند و به این ترتیب، مسیر، فاز و شدت سیگنال‌های بازتاب شده یا منتقل شده را به شکل دلخواه کنترل کنند. این توانایی باعث می‌شود RIS به‌عنوان یک سطح فعال و هوشمند در محیط‌های بی‌سیم عمل کند و برخلاف روش‌های سنتی که تنها با افزایش قدرت فرستنده یا افزودن تکرارکننده‌ها به بهبود سیگنال می‌پرداختند، امکان کنترل مستقیم امواج در فضای محیطی را فراهم آورد[۲].

ماهیت RIS بر اساس اصول فیزیکی نور و امواج الکترومغناطیسی شکل گرفته است. وقتی یک موج الکترومغناطیسی به سطح RIS برخورد می‌کند، زاویه بازتاب یا شکست آن نه تنها به زاویه تابش و شاخص شکست محیط‌های اطراف وابسته است، بلکه به طول موج سیگنال و شیب فاز اعمال شده روی سطح نیز بستگی دارد .این ویژگی به طراحان امکان می‌دهد تا با تنظیم گسسته یا پیوسته فاز عناصرRIS ، انعکاس‌های غیرعادی (anomalous reflection)ایجاد کرده و موج‌ها را به شکل غیرمعمول یا تمرکزی هدایت کنند[۲].

از منظر شبکه‌های بی‌سیم، RISمی‌تواند نقش‌های متنوعی ایفا کند. این فناوری قادر است سیگنال دلخواه را تقویت، تداخل‌های ناخواسته را کاهش، یا مسیرهای غیرمستقیم برای کاربران ایجاد کند .به همین دلیل در طراحی شبکه‌های پیچیده، به‌ویژه در محیط‌های شهری با موانع متعدد یا در سیستم‌های MIMO و mmWave، RISبه عنوان یک ابزار انعطاف‌پذیر برای مدیریت کانال‌های رادیویی شناخته می‌شود[۲].

محدودیت‌های سخت‌افزاری و پیچیدگی‌های مدل‌سازی از چالش‌های اصلی RIS محسوب می‌شوند. عواملی مانند تعداد عناصر و کوانتیزه بودن فاز می‌توانند بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارند. با این حال، به دلیل توانایی RIS در کنترل محیط انتشار و بهبود کیفیت ارتباطات با مصرف انرژی و هزینه کم، این فناوری به یکی از گزینه‌های مهم شبکه‌های بی‌سیم آینده تبدیل شده است[۲].

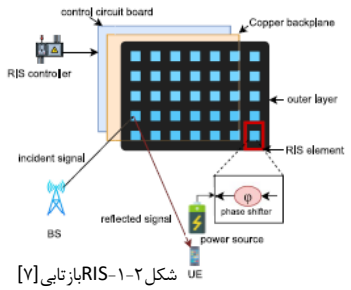
۲–۱–۱–عملکرد و اصول کاری RIS

RISیا **سطوح هوشمند قابل بازپیکربندی**، فناوری نوظهوری در ارتباطات بی‌سیم است که قادر به تغییر هوشمند رفتار کانال‌های رادیویی بوده و امکان طراحی شبکه‌های کارآمد و با کیفیت بالاتر را فراهم می‌کند [۷].

این سطوح از تعداد زیادی عنصر کوچک و کم‌هزینه تشکیل شده‌اند که می‌توانند دامنه، فاز و قطبش امواج الکترومغناطیسی عبوری یا بازتابی را کنترل کنند [۷]. عملکرد RIS مبتنی بر هدایت امواج از طریق بازتاب، شکست یا پراکندگی است، به‌گونه‌ای که امواج به جهت یا نقطه موردنظر شبکه هدایت می‌شوند [۲].

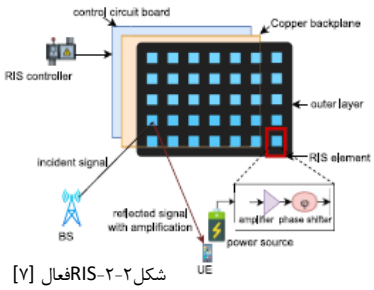
عناصر RIS با تغییر فرکانس رزونانس، امپدانس و قطبش موج، کنترل دامنه و فاز امواج را ممکن می‌سازند و معمولاً به کنترلر هوشمندی متصل‌اند که با استفاده از فیدبک کانال و اهداف شبکه، تنظیمات عناصر را به‌صورت لحظه‌ای و به شکل آنالوگ، دیجیتال، ترکیبی یا مبتنی بر هوش مصنوعی اعمال می‌کند[۷].

انواع عملکردی RIS شامل موارد زیر هستند:



شکل۲-۱-RISبازتابی[۷]

- RIS بازتابی (Reflective RIS): رایج‌ترین نوع، که عناصر آن مانند آینه‌های برنامه‌پذیر عمل می‌کنند و فاز سیگنال ورودی را تغییر می‌دهند تا امواج را به جهت مشخصی هدایت کنند. این نوع RIS معمولاً برای هدایت انرژی سیگنال به سمت گیرنده‌ها یا متمرکز کردن امواج استفاده می‌شود[۷].
- RIS عبوری (Transmissive RIS): این نوع سیگنال‌ها را از سطح عبور می‌دهد و ویژگی‌های آن‌ها مانند فاز و دامنه را تغییر می‌دهد. نبود صفحه مسی در پشت سطح باعث می‌شود که سیگنال‌ها بتوانند از سطح عبور کنند و بدین ترتیب درجه آزادی بیشتری در کنترل مسیر انتشار فراهم شود[۷].
- RIS ترکیبی و STAR (Simultaneously Transmitting And Reflecting RIS): این نوع می‌تواند همزمان امواج را انعکاس داده و عبور دهد. این قابلیت سبب می‌شود RIS بتواند پوشش کامل فضا (۳۶۰ درجه) ایجاد کند و دستگاه‌های بی‌سیم در هر طرف سطح را پشتیبانی نماید. STAR-RIS با استفاده از جریان‌های قطبش الکتریکی و مغناطیسی قادر است هم بازتاب و هم انتقال امواج را مدیریت کند، که باعث انعطاف‌پذیری بیشتر در شبکه‌های پیچیده می‌شود[۷].



شکل۲-۲-RISفعال [۷]

- Active RIS: برخلاف RISهای غیرفعال که تنها بازتاب دارند و معمولاً دچار افت مسیر ضربی (multiplicative fading) می‌شوند، Active RIS می‌تواند سیگنال ورودی را تقویت کند و از محدودیت‌های ظرفیت شبکه‌های بی‌سیم غیرفعال عبور کند. این نوع نیاز به توان بیشتر و معماری سخت‌افزاری پیشرفته‌تر دارد و از تقویت‌کننده‌های بازتابی به همراه مدارهای فازشیفت بهره می‌برد[۷].

۲-۱-۲- نقش RIS در شبکه‌های بی‌سیم

با توجه به انواع فناوری‌های RIS که پیش‌تر معرفی شد، این فناوری موجب بهبود عملکرد شبکه‌های بی‌سیم در زمینه‌هایی مانند بهبود قدرت و کیفیت سیگنال، افزایش ظرفیت و بهره‌وری طیفی، کاهش مصرف توان و افزایش کارایی انرژی، مدیریت تداخل و امنیت سیگنال‌ها و انعطاف‌پذیری در طراحی شبکه و پوشش‌دهی می‌گردد.

۲–۲– سیستم یکپارچه سنجش و ارتباط(ISAC)

ISAC (Integrated Sensing and Communication)یک چارچوب یکپارچه است که امکان انجام همزمان حسگری محیطی (مانند شناسایی اهداف، تصویربرداری راداری) و انتقال داده را با استفاده از همان سخت‌افزار و منابع طیفی فراهم می‌کند[۸].

درISAC ، معماری حسگری نقش حیاتی دارد و معمولاً به دو دسته تقسیم می‌شود: حسگری مونوستاتیک و حسگری بایستاتیک. در حسگری مونوستاتیک، فرستنده و گیرنده در یک نقطه مشترک قرار دارند و از همان دستگاه برای ارسال و دریافت سیگنال‌ها استفاده می‌کنند. این ساختار باعث افزایش نسبت سیگنال به نویز(SNR) ، ساده‌تر شدن همگام‌سازی و کاهش پیچیدگی پیاده‌سازی می‌شود و برای کاربردهایی مانند خودروهای خودران و موقعیت‌یابی داخلی مناسب است. اما محدودیت پوشش و چالش در تشخیص برخی اهداف از معایب آن است[۸].

در حسگری بایستاتیک، فرستنده و گیرنده به‌طور فضایی جدا هستند، که مزایایی مانند تنوع فضایی، پوشش گسترده‌تر و کاهش خودتداخل دارد. این ساختار دقت تشخیص را برای اهداف خاص بهبود می‌دهد و برای توسعه‌های بزرگ‌مقیاس مانند زیرساخت شهر هوشمند و کاربردهای دفاعی مناسب است، اما همزمان چالش‌هایی مانند پیچیدگی همگام‌سازی و احتمال از دست رفتن سیگنال در مسیرهای طولانی‌تر را به همراه دارد[۸].

ISACقابلیت پشتیبانی از سناریوهای مبتنی بر زمینه (context-aware) را نیز دارد، از جمله خانه‌های هوشمند، ارتباطاتV2X ، صنایع هوشمند، پایش محیطی و کشاورزی دقیق. این سیستم‌ها می‌توانند داده‌های حسگری را با اطلاعات ارتباطی ترکیب کنند و تصمیمات هوشمند و بهینه‌تری اتخاذ کنند[۸].

در مجموع، ISACرویکردی یکپارچه، کارآمد و آینده‌نگر برای ترکیب حسگری و ارتباطات است که توانایی ارائه همزمان خدمات انتقال داده و پایش محیط را در یک شبکه به‌صورت هوشمند و بهینه فراهم می‌کند[۸].

۲-۲-۱- معیارهای عملکردی ISAC

معیارهای عملکردی سیستم‌های سنجش و ارتباط شامل جنبه‌های مختلفی است که کارایی و کیفیت شبکه را ارزیابی می‌کنند. در حوزه سنجش، این معیارها شامل مکان‌یابی اشیاء، دقت و تفکیک اهداف، تشخیص عملکرد و محیط، تفکیک فضایی، آنتروپی تصویر و برد سنجش هستند. در بخش ارتباطات، شاخص‌های کلیدی شامل قابلیت اطمینان، نرخ خطای بیت، نرخ پوشش شبکه، اعتبار، تأخیر زمانی، نرخ انتقال، تراکم لینک، بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی می‌شوند. معیارهای مرتبط با خدمات شامل اعتمادپذیری، کارایی و زمان پاسخ سیستم است. در حوزه امنیت، شاخص‌ها محرمانگی، یکپارچگی و حریم خصوصی داده‌ها، در دسترس بودن، احراز هویت و پایداری سیستم و همچنین توانایی تشخیص حملات و مشکلات شبکه را پوشش می‌دهند. علاوه بر این، شاخص‌های یکپارچه شامل حد پایین کرامر-راو، اطلاعات متقابل و تابع نرخ-کاهش، برای ارزیابی جامع و کامل سیستم به‌کار می‌روند[۸].

۳–ارزیابی عملکرد سیستم‌های ISAC در حالات حضور و عدم حضور RIS

نسبت سیگنال به نویز (SNR) یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت لینک ارتباطی و قدرت سیگنال دریافتی در سیستم‌های ISAC محسوب می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از RIS با تقویت سیگنال و کاهش تداخل، موجب افزایش بهره کانال، ظرفیت شبکه و قابلیت اطمینان ارتباطی می‌شود [۷]. همچنین، سیستم‌های مجهز به RIS نسبت به ساختارهای بدونRIS ، از نظر SNR و نرخ خطا عملکرد بهتری دارند[۷].

علاوه بر حوزه مخابرات، SNRدر بخش سنجش نیز نقش اساسی ایفا می‌کند. با بهینه‌سازی بیم‌فرمینگ و تنظیم فاز عناصرRIS ، می‌توان SNR خروجی رادار را افزایش داده و کیفیت آشکارسازی و ردیابی اهداف را بهبود بخشید [۴].

در کنارSNR ، کران پایین کرامر–رائو (CRB) به‌عنوان یک معیار نظری مهم برای ارزیابی دقت تخمین پارامترها در سیستم‌های سنجشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معیار حداقل واریانس قابل دستیابی برای تخمین‌گرهای بدون بایاس را مشخص کرده و مبنایی برای تحلیل دقت مکان‌یابی، تخمین زاویه و فاصله اهداف فراهم می‌کند [۴،۷].

در سیستم‌های مبتنی برRIS ، با بهینه‌سازی فاز عناصر و طراحی مناسب بیم‌فرمینگ، کیفیت سیگنال دریافتی افزایش یافته و در نتیجه مقدار CRB کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود دقت تخمین است[۷]. همچنین، تحلیل‌های ارائه‌شده نشان می‌دهند که استفاده از RIS می‌تواند دقت موقعیت‌یابی کاربران و اهداف را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد[۴].

از دیدگاه تحلیلی، میان SNR و CRB رابطه مستقیمی وجود دارد، به‌گونه‌ای که افزایش SNR معمولاً منجر به کاهش مقدار CRB می‌شود. بهبود کیفیت سیگنال دریافتی از طریق RIS موجب افزایش اطلاعات فیشر و در نتیجه کاهش کران خطای تخمین می‌گردد [۴،۷].

در مجموع، SNR به‌عنوان شاخص اصلی کیفیت ارتباط و CRB به‌عنوان معیار بنیادین دقت سنجش، دو معیار مکمل در ارزیابی عملکرد سیستم‌های ISAC محسوب می‌شوند. بهره‌گیری از RIS با تقویت مسیرهای انتشار، موجب افزایش SNR و کاهش CRB شده و بهبود هم‌زمان عملکرد مخابراتی و سنجشی سیستم را فراهم می‌سازد [۴،۷].

۳-۱- مقایسه معیار SNR

در سیستم‌های ISAC بدون استفاده ازRIS ، کیفیت لینک ارتباطی و سنجشی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط محیطی، فاصله فرستنده و گیرنده، انسداد مسیر دید مستقیم و محوشدگی چندمسیری قرار دارد. در این ساختارها، مسیر انتشار سیگنال قابل کنترل نبوده و توان دریافتی معمولاً با تضعیف شدید مواجه می‌شود. در نتیجه، مقدار SNR در بسیاری از سناریوها محدود بوده و عملکرد ارتباطی و سنجشی سیستم کاهش می‌یابد [۷].

علاوه بر این، در حالت بدونRIS ، سیستم برای جبران افت SNR ناچار به افزایش توان ارسالی یا استفاده از الگوریتم‌های پیچیده بیم‌فرمینگ است که این موضوع موجب افزایش مصرف انرژی و پیچیدگی پیاده‌سازی می‌شود [۱]. همچنین، در محیط‌های شهری و داخلی که انسداد مسیر مستقیم رایج است، افت SNR شدیدتر شده و کیفیت سرویس کاربران به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد[۴].

در مقابل، در سیستم‌های ISAC مجهز بهRIS ، محیط انتشار به‌صورت هوشمند قابل کنترل می‌شود. عناصر RIS با تنظیم مناسب فاز و دامنه، سیگنال‌های دریافتی را به سمت گیرنده یا هدف هدایت کرده و مسیرهای مطلوب انتشار ایجاد می‌کنند. این قابلیت باعث تقویت سیگنال مفید و کاهش تداخل شده و در نتیجه مقدار SNR افزایش می‌یابد[۷].

از دیدگاه سنجشی، افزایش SNR در حضور RIS موجب تقویت سیگنال‌های بازتابی از هدف شده و کیفیت آشکارسازی و ردیابی را بهبود می‌بخشد. در مقایسه با حالت بدونRIS ، سیستم‌های RIS-aided ISACقادرند سیگنال‌های بازگشتی قوی‌تری دریافت کرده و احتمال کشف اهداف را افزایش دهند[۴].

در سناریوهای چندکاربره نیز،RIS با کاهش تداخل بین کاربران و هدایت هدفمند پرتوها، باعث بهبود SNRهر لینک ارتباطی می‌شود. در حالی که در حالت بدونRIS ، افزایش تعداد کاربران معمولاً منجر به افت شدید SNR می‌گردد، در ساختارهای مبتنی بر RIS این افت تا حد زیادی جبران می‌شود[۷].

به‌طور کلی، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در سیستم‌های بدونRIS ، مقدار SNR به‌شدت وابسته به شرایط محیطی بوده و انعطاف‌پذیری محدودی دارد، در حالی که در سیستم‌های مجهز بهRIS ، SNRبه‌صورت پویا قابل تنظیم و بهینه‌سازی است. این قابلیت، یکی از مهم‌ترین مزایای RIS در چارچوب ISAC محسوب می‌شود [۴،۷].

در جمع‌بندی می‌توان گفت که استفاده از RIS موجب افزایش توان سیگنال دریافتی، کاهش تلفات مسیر، کاهش تداخل و بهبود بهره آرایه شده و در نتیجه مقدار SNR در هر دو بخش مخابراتی و سنجشی نسبت به حالت بدون RIS به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این بهبود، زیربنای اصلی ارتقای عملکرد کلی سیستم‌های ISAC محسوب می‌شود[۴،۷].

۳-۲- مقایسه معیار CRB

در سیستم‌های ISAC بدون استفاده ازRIS ، دقت تخمین پارامترهای سنجشی مانند موقعیت، زاویه ورود، فاصله و سرعت اهداف به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و کیفیت کانال قرار دارد. در این ساختارها، به دلیل عدم امکان کنترل مسیر انتشار سیگنال، سیگنال‌های بازتابی معمولاً با تضعیف شدید، نویز بالا و محوشدگی چندمسیری مواجه می‌شوند. این عوامل موجب کاهش اطلاعات فیشر و در نتیجه افزایش مقدار کران پایین کرامر–رائو (CRB) شده و دقت فرآیند تخمین را محدود می‌کنند[۴،۷]. علاوه بر این، در حالت بدونRIS ، سیستم برای بهبود دقت سنجش ناچار به افزایش توان ارسالی، استفاده از آرایه‌های بزرگ یا به‌کارگیری الگوریتم‌های پردازشی پیچیده است. این راهکارها اگرچه تا حدی موجب کاهش CRB می‌شوند، اما هزینه پیاده‌سازی، مصرف انرژی و پیچیدگی محاسباتی سیستم را افزایش می‌دهند[۷].

در مقابل، در سیستم‌های ISAC مجهز بهRIS ، با کنترل هوشمند فاز و دامنه عناصر، مسیرهای انتشار سیگنال به‌صورت هدفمند شکل داده می‌شوند. این قابلیت موجب تقویت سیگنال‌های بازتابی از هدف، کاهش اثر محوشدگی و افزایش کیفیت سیگنال دریافتی می‌شود. در نتیجه، اطلاعات فیشر افزایش یافته و مقدار CRB به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد[۴،۷].

بهینه‌سازی مشترک بیم‌فرمینگ ایستگاه پایه و تنظیم پروفایل فازی RIS امکان کاهش مؤثر CRB مربوط به تخمین زاویه، فاصله و موقعیت اهداف را فراهم می‌کند و باعث می‌شود سیستم حتی در شرایط بدون مسیر دید مستقیم نیز دقت بالای سنجش را حفظ کند[۷].

در حوزه مکان‌یابی و ردیابی کاربران، استفاده از RIS موجب ایجاد مسیرهای مجازی و افزایش تنوع فضایی سیگنال‌ها شده و خطای موقعیت‌یابی را کاهش می‌دهد، در حالی که در ساختارهای بدونRIS ، دقت مکان‌یابی به‌شدت وابسته به وجود مسیر مستقیم است[۴]. همچنین، در حضور RIS می‌توان با توان ارسالی کمتر به مقادیر پایین‌تری از CRB دست یافت که موجب افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی سیستم می‌شود[۴،۷]. در سناریوهای چندهدفه و چندکاربره نیز، RISبا کاهش تداخل و هدایت هدفمند پرتوها، دقت تخمین هر هدف یا کاربر را بهبود می‌بخشد[۷].

به‌طور کلی، در سیستم‌های بدونRIS ، مقدار CRB معمولاً بالا بوده و به‌شدت به شرایط محیطی وابسته است، در حالی که در سیستم‌های مجهز بهRIS ، CRBبه‌صورت پویا قابل کنترل و بهینه‌سازی است. این ویژگی یکی از مهم‌ترین مزایای RIS در چارچوب ISAC محسوب می‌شود[۴،۷].

در جمع‌بندی می‌توان گفت که بهره‌گیری از RIS با تقویت سیگنال‌های بازتابی، افزایش اطلاعات فیشر و بهینه‌سازی مسیرهای انتشار، موجب کاهش قابل‌توجه CRB شده و دقت سنجش، مکان‌یابی و ردیابی در سیستم‌های ISAC را نسبت به حالت بدون RIS به‌طور محسوسی ارتقا می‌دهد[۴،۷].

۴–نتیجه گیری

مشاهده می‌شود که استفاده از RIS در سیستم‌های ISAC تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارد. از منظرSNR ، حضور RIS موجب افزایش نسبت سیگنال به نویز می‌شود، زیرا انعکاس و هدایت هوشمند سیگنال‌ها توسط عناصرRIS ، قدرت سیگنال دریافتی را تقویت کرده و اثر تضعیف مسیر مستقیم را کاهش می‌دهد. این افزایش SNR به‌طور مستقیم باعث بهبود کیفیت دریافت سیگنال و توانایی سیستم در تشخیص اهداف می‌گردد.

از منظر CRB نیز، نتایج نشان می‌دهد که ISAC همراه با RIS دقت تخمین پارامترهای هدف (مانند فاصله و زاویه) را بهبود می‌بخشد. کاهش مقدار CRB به معنای پایین آمدن حداقل واریانس تخمین است، که نشان‌دهنده افزایش قابلیت اطمینان و صحت سیستم در سنجش و رادار می‌باشد.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب RIS با سیستم ISAC، نه تنها توانایی سیگنال‌دهی و پوشش سیستم را ارتقا می‌دهد، بلکه دقت سنجش را نیز بهبود می‌بخشد. به عبارت دیگر، افزودن RIS به ISAC، عملکرد سیستم را هم از نظر قدرت سیگنال و هم از نظر دقت تخمین پارامترها به شکل محسوسی افزایش می‌دهد، در حالی که سیستم ISAC خالی از RIS محدودیت‌های مسیر مستقیم و نویز بالاتر را تجربه می‌کند.

۵–مراجع

[۱] G. Chopra and S. Ahmed, “RIS-assisted integrated sensing and communication: applications, challenges and usecase scenario,” Discover Appl. Sci., vol. 7, no. 7, p. 650, Jan. 2025.

[۲] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. Di Renzo, and N. Al-Dhahir, “Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities,” IEEE Commun. Surv. Tuts., vol. 23, no. 3, pp. 1546-1577, 2021.

[۳] J. Ye, J. Dai, C. Pan, K. Wang, and J. Li, “Joint active and passive beamforming design for secure RIS-aided ISAC system,” IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 14, no. 3, Mar. 2025.

[۴] M. Asif Haider and Y. D. Zhang, “RIS-aided integrated sensing and communication: A mini-review,” Front. Signal Process., vol. 3, p. 1197240, May 2023.

[۵] Z. Xing, R. Wang, and X. Yuan, “Joint active and passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface enabled integrated sensing and communication,” IEEE Trans. Commun., vol. 71, no. 4, pp. 2457-2474, Feb. 2023.

[۶] M. I. Ismail, A. M. Shaheen, M. M. Fouda, and A. S. Alwakeel, “RIS-assisted integrated sensing and communication systems: Joint reflection and beamforming design,” IEEE Open J. Commun. Soc., vol. 5, pp. 908-927, Feb. 2024.

[۷] A. Umer, I. Müürsepp, M. M. Alam, and H. Wymeersch, “Reconfigurable intelligent surfaces in 6G radio localization: A survey of recent developments, opportunities, and challenges,” IEEE Commun. Surv. Tuts., vol. 27, no. 6, 2025.

[۸] X. Zhu, J. Liu, L. Lu, T. Zhang, T. Qiu, C. Wang, and Y. Liu, “Enabling intelligent connectivity: A survey of secure ISAC in 6G networks,” IEEE Commun. Surv. Tuts., 2024.