

مروری بر روش‌های استفاده از فناوری ارتباطات دوطرفه در سامانه‌های برداشت انرژی

پنهان موسوی نسب^۱، امیرحسین حاجی حسینی گزستانی^۲، سید علی قرشی^۳ و محمد شیخ بهایی^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد برق مخابرات، دانشگاه شهید بهشتی

^۲ دانشجوی دکتری برق مخابرات، دانشگاه شهید بهشتی، ah.hajihoseini@sbu.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی

^۴ استاد تمام، کینگز کالج لندن

چکیده

با پیشرفت روزافزون فناوری‌های الکترونیک و ارتباطات، سامانه‌های بی‌سیم به عنوان یکی از اجزای جدانشدنی زندگی روزمره مطرح شده و به دنبال آن نیاز به منابع طیفی برای پشتیبانی از تعداد کاربران بیشتر در شبکه بی‌سیم، روزبه‌روز افزایش می‌یابد. با توجه به این افزایش نیاز به پهنای باند و جهت استفاده کارآمد از ظرفیت‌های شبکه‌های بی‌سیم مخابراتی، فناوری «ارتباط دوطرفه» اخیراً در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این فناوری با ارسال و دریافت اطلاعات به صورت همزمان و در یک باند فرکانسی، می‌تواند بازدهی طیفی را تا دو برابر نسبت به سامانه‌های یک طرفه سنتی بهبود بخشد. از سوی دیگر در سال‌های اخیر سامانه‌های برداشت‌کننده انرژی به عنوان یک راه حل برای رفع مشکل توان مصرفی گره‌های موجود در شبکه‌های بی‌سیم مطرح شده‌اند. در این مقاله ابتدا سناریوهای مختلف به کارگیری فناوری ارتباطات دوطرفه در سامانه‌های برداشت انرژی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد، سپس توابع هدف مورد استفاده در طراحی این سامانه‌ها بررسی می‌شوند. در انتها نیز چالش‌های به کارگیری فناوری ارتباط دوطرفه در سامانه‌های برداشت انرژی مرور خواهد شد.

کلیدواژه

ارتباط دوطرفه، برداشت انرژی، انتقال بی‌سیم توان، سامانه‌های SWIPT (انتقال بی‌سیم اطلاعات و توان به صورت همزمان).

مقدمه

فناوری ارتباط دوطرفه به خودی خود با وجود داشتن فوائد زیادی همچون بهره‌ی بالای گذردهی، احتمال کمتر رخ دادن تصادم، حل مشکل پایانه مخفی و کاهش تأخیر انتها به انتها، با چالش‌هایی روبه‌رو است [۲]. از جمله این چالش‌ها می‌توان به محدودیت عملکرد به دلیل وجود تداخل خودی، کاهش قابلیت اطمینان خطاً، افزایش پیچیدگی سامانه و نرخ تلفات بسته^۵ بیشتر نسبت به حالت یک‌طرفه، اشاره کرد [۳]. مدیریت تداخل خودی قدرتمند ناشی از ارسال و دریافت همزمان و در یک باند فرکانسی، یکی از چالش‌های مهم در پیاده‌سازی این نوع سامانه‌ها است [۴].

پژوهشگران برای تضعیف توان سیگنال تداخل خودی روش‌های مختلفی از جمله حذف فعال^۶ و حذف غیرفعال^۷ تداخل خودی را پیشنهاد می‌دهند. حذف حوزه آنالوگ^۸، حذف حوزه دیجیتال^۹ و استفاده از سامانه‌های چندورودی- چندخروجی^{۱۱} از جمله روش‌های فعال حذف تداخل خودی و همچنین

با توجه به رشد سریع مخابرات بی‌سیم در سال‌های اخیر، تقاضا برای منابع رادیویی مانند پهنای باند، افزایش یافته است. فناوری ارتباط دوطرفه^۱ به دلیل فراهم آوردن امکان ارسال و دریافت اطلاعات به صورت همزمان و در یک باند فرکانسی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این فناوری، بازدهی طیفی نسبت به سامانه‌های یک طرفه سنتی که با استفاده از تقسیم زمانی^۲ و تقسیم فرکانسی^۳ ارسال و دریافت اطلاعات را به ترتیب در زمان‌های مختلف و فرکانس‌های مختلف انجام می‌دهند، می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد. با توجه به این ویژگی، فناوری ارتباط دوطرفه در زمینه طراحی لایه فیزیکی برای نسل پنجم سامانه‌های ارتباطی، وسایل نقلیه و همچنین کاربردهای دفاعی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱].

^۶ Active Suppression
^۷ Passive Suppression
^۸ Analog Domain Cancellation
^۹ Digital Domain cancellation
^{۱۱} Multiple Input Multiple Output

^۱ Full duplex
^۲ Time Division Duplex (TDD)
^۳ Frequency Division Duplex (FDD)
^۴ Link Reliability
^۵ Packet Loss Ratio
^۶ Self-Interfering

انرژی از طریق سیگنال‌های رادیویی موضوعی است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، اگرچه فناوری آن به اوایل قرن نوزدهم میلادی باز می‌گردد؛ در آن زمان تسلا^{۱۴} آزمایش انتقال بی‌سیم انرژی را برای استفاده از یک برج واردنکلایف انجام داد اما به دلایلی با شکست مواجه شد [۸]. پس از آن در سال ۲۰۰۸ وارشنی آید^{۱۵} انتقال انرژی و اطلاعات در یک شبکه را دنبال کرد [۹].

برداشت انرژی از امواج رادیویی دارای سه ویژگی است که آن را از برداشت انرژی از منابع طبیعی متمایز می‌کند: (۱) می‌تواند انرژی ثابت و قابل کنترلی برای برداشت‌کننده انرژی امواج رادیویی مهیا کند. (۲) در شبکه‌های ثابت برداشت‌کننده انرژی امواج رادیویی،^{۱۶} میزان انرژی برداشت شده در طول زمان قابل پیش‌بینی و نسبتاً پایدار است. (۳) از آنجا که میزان انرژی برداشت شده در یک شبکه به فاصله گره برداشت‌کننده از فرستنده بستگی دارد، مقدار انرژی برداشت شده در فواصل مختلف از فرستنده، متفاوت است [۱۰]. چنین سامانه‌هایی علاوه بر خودکفایی انرژی و طول عمر طولانی، از انرژی‌های تجدیدناپذیر کمتری استفاده می‌کنند و به دلیل عدم نیاز به منابع انرژی ثابت، دارای قابلیت تحرک بدون محدودیت و همچنین قابلیت استفاده در محیط‌های سخت، می‌شوند. مقدار انرژی برداشت شده در فناوری‌های مختلف، متفاوت است و منجر به بازدهی‌های مختلف می‌شود.

مطالعاتی در زمینه برداشت انرژی و ارتباطات دوطرفه در سامانه‌های مختلف رله‌ای، رادیو شناختی^{۱۷} و سلولی انجام شده است و تأمل بر دستاوردهای فعلی به منظور روشن کردن روند تحقیقات آینده، ارزشمند است. نویسندگان در [۱۱] به بررسی کاربردهای فناوری برداشت انرژی از جمله دستگاه‌های پوشیدنی^{۱۸}، برچسب‌های الکترونیکی قیمت که می‌توانند به روزرسانی شوند و شبکه‌های حسگر بی‌سیم^{۱۹} در خانه‌های هوشمند پرداخته‌اند و چالش‌های استفاده از این فناوری مانند کافی نبودن انرژی برداشت شده و بنابراین محدودیت در به‌کارگیری این فناوری در مقیاس‌های بزرگ را مرور کرده‌اند.

در [۱۲] پیشرفت‌های به‌دست آمده در زمینه‌های مختلف مربوط به فناوری برداشت انرژی شامل انواع مدل‌ها و منابع انرژی، قراردادهای^{۲۰} مورد استفاده در این فناوری، مسائل موجود در طراحی و به‌کارگیری این فناوری در شبکه‌های مختلف سلولی،

جداسازی آنتن^{۲۱}، حذف آنتن^{۲۲} و کاهش غیرفعال جهتدار آنتن^{۲۳} از جمله روش‌های غیرفعال حذف تداخل خودی است. در واقع حذف غیرفعال به‌عنوان روشی برای تضعیف توان سیگنال تداخل خودی با کمک اثر تلفات مسیر بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده در یک گره مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه، تعریف می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که دستگاه‌های مخابرات دوطرفه باید قادر باشند حداقل 60 dB حذف حوزه آنالوگ و 50 dB حذف حوزه دیجیتال را فراهم کنند تا بتوانند تداخل خودی را به زیر سطح نویز برسانند. با توجه به این مسئله که حذف در حوزه آنالوگ و دیجیتال نیز به صورت ایده‌آل انجام نمی‌شود، به‌منظور کاهش قدرت سیگنال تداخل خودی، علاوه بر ترکیب این دو روش، استفاده از روش حذف غیرفعال نیز لازم است [۲].

سامانه‌های برداشت انرژی، سامانه‌های چندرودی- چندخروجی حجیم^{۲۴} و شبکه‌های رله، از جمله مواردی هستند که استفاده از فناوری ارتباطات دوطرفه می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد آنها ایجاد نماید [۵]. با توجه به عمر عملیاتی محدود سامانه‌های ارتباطی وابسته به انرژی، تأمین انرژی مورد نیاز این سامانه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. سامانه‌های ارتباطی محدود به انرژی به منظور حفظ ارتباط خود نیازمند تعویض متناوب باتری‌ها و یا شارژ مجدد آنها هستند و این کار پرهزینه، دشوار و گاهی غیر ممکن است [۶]. برداشت انرژی به عنوان اساس مخابرات سبز^{۲۵} به منظور کاهش مصرف انرژی در فعالیت‌های بشری معرفی شده است. اهمیت این نکته وقتی بیشتر روشن می‌شود که بدانیم به زودی مصرف انرژی در شبکه‌های بی‌سیم با افزودن بر میزان گازهای گلخانه‌ای جو، به یکی از دلایل اصلی تغییرات اقلیم و گرمایش کره زمین تبدیل خواهد شد [۷].

بنابراین فناوری برداشت انرژی از محیط به‌عنوان یک راه‌حل اساسی برای تأمین انرژی مورد نیاز سامانه‌های بی‌سیم، مطرح است. به طور کلی برداشت انرژی به دو روش امکان‌پذیر است: در روش اول اجزای سامانه‌های بی‌سیم، انرژی را از یک منبع تجدیدپذیر و طبیعی مانند خورشید، باد، حرکت و ارتعاشات برداشت می‌کنند. اما این روش با وجود داشتن هزینه کم، به دلیل تصادفی بودن مقدار انرژی برداشت شده از محیط و وابستگی زیاد آن به عوامل غیرقابل کنترلی مانند شرایط جوی، مخابرات مطمئن را با دشواری‌هایی روبه‌رو می‌کند. در روش دوم برای مقابله با محدودیت فوق، انرژی از تابش الکترومغناطیسی امواج رادیویی^{۲۶} برداشت می‌شود [۶]. سیگنال‌های رادیویی عمدتاً جهت انتقال بی‌سیم اطلاعات استفاده می‌شوند و انتقال

Wardenclyffe^{۱۴}
 Varshney^{۲۰}
 Fixed RF Energy Harvesting Networks^{۲۱}
 Cognitive Radio^{۲۲}
 Wearable Devices^{۲۳}
 Wireless Sensor Networks^{۲۴}
 Protocol^{۲۵}

Antenna Separation^{۲۶}
 Antenna Cancellation^{۲۷}
 Directional Passive Suppression^{۲۸}
 Massive MIMO^{۲۹}
 Green Communication^{۳۰}
 Radio Frequency (RF)^{۳۱}
 Tesla^{۳۲}

اهمیت مسئله برداشت انرژی، به طور خاص برای این کاربرد، مقالات را از جنبه‌های مختلفی مانند مدل سامانه، توابع هدف و چالش‌ها دسته‌بندی و بررسی کرده‌ایم. جدول ۱ خلاصه‌ای از مقایسه مقالات مروری موجود در زمینه برداشت انرژی را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه مقالات مروری موجود در زمینه برداشت انرژی.

شماره مرجع	سناریو (ها)	مسئله	سال
[۱۱]	شبکه حسگر بی‌سیم	بررسی انواع روش‌های برداشت انرژی - طراحی سامانه‌های برداشت انرژی	۲۰۱۳
[۱۲]	سلولی - شبکه مشارکتی - رادیو شناختی	برداشت انرژی - انواع مدل‌ها و منابع انرژی - قراردادهای مورد استفاده در برداشت انرژی - مسائل موجود در طراحی	۲۰۱۶
[۱۳]	رادیو شناختی	برداشت انرژی - تقسیم طیف - سنجش دوطرفه طیف	۲۰۱۸
[۱۴]	رادیو شناختی - سلولی - پخش	برداشت انرژی - شکل دهی پرتو - امنیت لایه فیزیکی	۲۰۱۸
[۱۵]	رادیو شناختی	برداشت انرژی - ارتباط دوطرفه - حذف تداخل خودی ناشی از ارتباط دوطرفه - سنجش طیف	۲۰۱۷
[۱۶]	ارتباطات مشارکتی	برداشت انرژی و امنیت لایه فیزیکی - SWIPT	۲۰۱۹
[۱۷]	شبکه رله‌ای مشارکتی	برداشت انرژی در مخابرات سبز - مقایسه حالت ارتباط یک‌طرفه و دوطرفه	۲۰۱۹
[۱۸]	شبکه حسگر بی‌سیم - رله مشارکتی - رادیو شناختی	برداشت انرژی امواج رادیویی با تمرکز بر فناوری‌های مختلف در حال ظهور نسل پنجم - ارتباط دوطرفه - SWIPT	۲۰۱۸
[۵]	ارتباطات وسایل نقلیه - چند ورودی چندخروجی حجیم - رله‌ای - سلولی	کاربردهای ارتباط دوطرفه و چالش‌های پیاده‌سازی که در آن به موارد برداشت انرژی هم اشاره شده است.	۲۰۱۹

در اغلب موارد مقالات مروری موجود در این زمینه با تمرکز بر یک سناریوی خاص مانند سلولی، رادیو شناختی و سامانه‌های رله‌ای، به مرور و بررسی فناوری برداشت انرژی و ارتباط دوطرفه در آن پرداخته شده است. در این مقاله اما با توجه به محدود بودن منابع رادیویی از یک سو و عمر عملیاتی محدود سامانه‌های ارتباطی وابسته به انرژی از سوی دیگر، مشخصاً به بررسی کاربرد فناوری ارتباطات دوطرفه در سامانه‌های برداشت انرژی از دید انواع سامانه‌ها و توابع هدف مورد استفاده در آن‌ها می‌پردازیم. برای این منظور، مقالات موجود در این زمینه را از لحاظ مدل سامانه و توابع هدف مورد نظر (شامل معیارهای عملکرد شبکه،

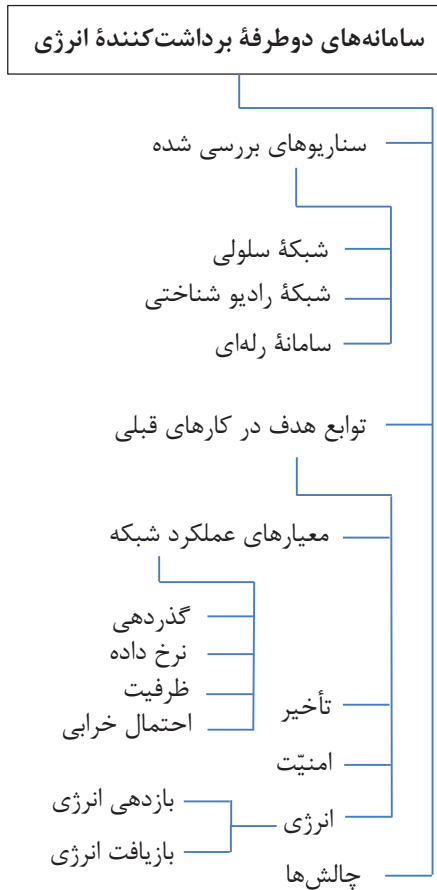
رادیو شناختی و سامانه‌های چندکاربری^{۲۶} مرور شده و در آخر پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات در این سامانه‌ها ارائه شده است. در [۱۳] مروری جامع بر سامانه‌های رادیو شناختی در نسل پنجم ارتباطات انجام شده است که در آن فناوری‌های برداشت انرژی و ارتباط دوطرفه (سنجش دوطرفه طیف)^{۲۷} به‌عنوان فناوری‌های مهم در پیشرفت این سامانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نویسندگان در [۱۴] تأثیر به‌کارگیری شکل‌دهی پرتو^{۲۸} بر عملکرد سامانه‌های دوطرفه رادیو شناختی، سلولی و پخش^{۲۹} که به فناوری برداشت انرژی مجهز هستند را مرور کرده‌اند. همچنین انواع روش‌های شکل دهی پرتو را برحسب اهداف مورد نظر آن‌ها مانند گذردهی، بازدهی انرژی و امنیت لایه فیزیکی طبقه‌بندی کرده‌اند. همچنین نویسندگان در [۱۵] مروری بر برداشت انرژی و مخابرات سبز در شبکه رادیو شناختی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه با تمرکز بر معماری‌های موجود برای این نوع شبکه‌ها انجام داده‌اند.

نویسندگان در [۱۶] امنیت لایه فیزیکی همراه با برداشت انرژی را در سامانه‌های مختلفی از جمله سامانه‌های مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه مرور کرده‌اند و به این نتیجه دست یافته‌اند که با به‌کارگیری انواع روش‌های امنیت لایه فیزیکی (شامل اختلال گر^{۳۰}، شکل‌دهی پرتو و روش‌های چندگانگی)^{۳۱} همراه با روش‌های برداشت انرژی، می‌توان به نرخ امن و بازدهی انرژی بیشتر و همچنین پوشش بهتر شبکه دست یافت. در [۱۷] نیز مروری بر پیشرفت‌های اخیر در شبکه‌های مشارکتی با تغذیه بی‌سیم^{۳۲} با قابلیت برداشت انرژی ارائه شده است. همچنین دو حالت ارتباطی یک‌طرفه و دوطرفه برای رله برداشت‌کننده انرژی مقایسه شده و چالش‌های موجود در این زمینه بیان شده است. پیشرفت‌های اخیر در سامانه‌های انتقال بی‌سیم اطلاعات و توان به صورت همزمان^{۳۳} (SWIPT) همراه با مسائل باز موجود در آن‌ها در [۱۸] بررسی شده و همچنین کاربردهای SWIPT در سناریوهای مختلف مانند سامانه‌های دوطرفه، رادیو شناختی، رله مشارکتی و شبکه حسگر بی‌سیم، مرور شده است.

همچنین نویسندگان در [۵] به مروری جامع بر کاربردها و پیاده‌سازی ارتباط دوطرفه در سامانه‌های نظامی، موج میلیمتری، سلول‌های کوچک، سامانه‌های چند ورودی - چند خروجی حجیم، برداشت انرژی و ارتباطات وسایل نقلیه^{۳۴} می‌پردازند. در هر یک از فصل‌های این مقاله، مقالات مرتبط با آن فصل صرفاً به صورت کلی بیان شده‌اند، اما در این مقاله حاضر، با توجه به

^{۲۶} Wireless Powered Cooperative Network
^{۲۷} Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
^{۲۸} Cooperative Relay
^{۲۹} Vehicular Communications

^{۳۰} Multiuser
^{۳۱} Full-Duplex Spectrum Sensing
^{۳۲} Beamforming
^{۳۳} Broadcasting
^{۳۴} Jammer
^{۳۵} Diversity



شکل ۱. رئوس مطالب مورد بررسی در این مقاله.

در [۱۰] چهار معماری موجود برای گیرنده سامانه های SWIPT یعنی معماری گیرنده مجزا^{۳۹} (یا همان معماری سوئیچ آنتن)؛ معماری گیرنده هم مکان^{۴۰}؛ معماری گیرنده مجتمع^{۴۱} و معماری گیرنده ایده آل^{۴۲} شرح داده شده است. در معماری گیرنده مجزا برداشت کننده انرژی و گیرنده اطلاعات دارای دو آنتن مجزا هستند و بنابراین کانال آنها متفاوت است. این معماری اجازه اجرای همزمان دو فرآیند برداشت انرژی و رمزگشایی داده را می دهد.

در معماری گیرنده هم مکان که خود دارای دو مدل سوئیچ زمانی^{۴۳} و جداسازی آنتن است، برداشت کننده انرژی و گیرنده اطلاعات از یک آنتن مشترک استفاده می کنند و بنابراین کانال آنها یکسان است و گیرنده مبتنی بر این معماری می تواند نسبت به معماری گیرنده مجزا اندازه کوچکتری داشته باشد. در عمل، مدل جداسازی توان مبتنی بر یک جداکننده توان است و مدل سوئیچ زمانی به یک سوئیچ کننده ساده تر نیاز دارد. همچنین نشان داده شده است که مدل جداسازی توان به عملکرد بهتری

تأخیر، امنیت و انرژی (انرژی) بررسی و دسته بندی می کنیم. همچنین چالش های موجود در به کارگیری فناوری ارتباط دوطرفه در سامانه های برداشت کننده انرژی را مرور خواهیم کرد. شکل ۱ رئوس مطالب بررسی شده در این مقاله را نشان می دهد.

ساختار این مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم با سناریوهای کاربردی استفاده از فناوری ارتباطات دوطرفه در سامانه های برداشت انرژی آشنا می شویم. بخش سوم توابع هدف مختلف شامل امنیت، تأخیر، انرژی و برخی دیگر معیارهای عملکردی شبکه که در کارهای موجود در این زمینه مورد توجه قرار گرفته اند، ارائه می شود. در بخش چهارم چالش های اصلی موجود در زمینه به کارگیری فناوری ارتباط دوطرفه در سامانه های برداشت انرژی بررسی خواهد شد و در نهایت جمع بندی در بخش پنجم ارائه می شود.

سامانه های برداشت انرژی

در این بخش به بررسی سامانه های برداشت انرژی و سناریوهای در نظر گرفته شده در آن می پردازیم. یک سناریوی کاربردی مهم برای انتقال بی سیم اطلاعات و توان به صورت همزمان (SWIPT) استفاده از رله های با منبع تغذیه بی سیم^{۴۴} است. در این روش، انتقال اطلاعات از منبع به مقصد از طریق گره رله انجام می شود و انرژی رله به صورت بی سیم از فرستنده دریافت می شود. دو طرح عملی برای سامانه های SWIPT تحت نام های جداسازی توان^{۳۷} و تجزیه زمانی^{۳۸} معرفی شده اند. در طرح تجزیه زمانی، مدت زمان مربوط به دریافت سیگنال به دو بخش تقسیم می شود که بخش اول آن مربوط به انتقال داده و رمزگشایی آنها بوده و بخش دوم آن مربوط به برداشت انرژی است. در طرح جداسازی توان، توان دریافتی در گیرنده به دو قسمت تقسیم شده و بخشی برای برداشت انرژی و بخش دیگر برای رمزگشایی داده استفاده می شود [۱۹].

^{۳۹} Co-located Receiver Architecture
^{۴۰} Integrated Receiver Architecture
^{۴۱} Ideal Receiver Architecture
^{۴۲} Time Switching (TS)

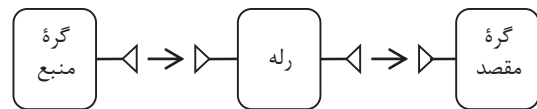
^{۳۶} Wireless Powered Relaying (WPR)
^{۳۷} Power Splitting
^{۳۸} Time Splitting
^{۳۹} Separated Receiver Architecture
^{۴۰} Antenna-Switching

مقاله مزایا و معایب استفاده از هر دو آنتن رله در مرحله اول (مرحله مربوط به برداشت انرژی) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که اگرچه به دلیل استفاده از تمام منابع سخت‌افزاری موجود در مرحله مربوط به برداشت انرژی، روش به‌کارگیری هر دو آنتن در مقایسه با به‌کارگیری تنها یک آنتن (آنتن مربوط به دریافت اطلاعات) یک روش منطقی‌تر به نظر می‌رسد، اما به دلیل پیاده‌سازی ساده‌تر روش تک آنتنی و همچنین به دلیل عملکرد مشابه دو روش در شرایط مقادیر بالای نسبت سیگنال به نویز، روش استفاده از یک آنتن رله در مرحله برداشت انرژی، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

در [۲۲] کنترل رله در سامانه‌های SWIPT با دو مدل برداشت-ارسال و برداشت-ارسال-ذخیره مورد بررسی قرار گرفته است. مدل برداشت-ارسال نیز مانند موارد قبل دارای گره‌های منبع و مقصد و رله AF بوده و پروتکل دو مرحله‌ای مشابه آنچه در [۲۱] دیدیم را به‌کار گرفته است. در مدل کلی برداشت-ارسال-ذخیره، مرحله اول دوره کامل مخایره (T) به برداشت انرژی اختصاص یافته است و در مرحله دوم، گره رله می‌تواند بسته به سطح انرژی باقیمانده در باتری مربوط به رله، به برداشت انرژی از گره منبع و یا انتقال اطلاعات به صورت ارتباط دوطرفه بپردازد. در چنین سامانه‌ای، انرژی برداشت شده در مرحله اول به شکل $E_h = \eta_h p_s |h_1|^2 \alpha T$ است که در آن T دوره کامل مخایره، $\alpha \in (0, 1)$ ضریب زمانی برداشت انرژی، p_s توان سیگنال ارسالی فرستنده، h_1 کانال بین فرستنده و رله و η_h ضریب تبدیل انرژی مربوط به مدار یکسوساز^{۴۸} است. توان ارسالی رله در مرحله دوم این سامانه به شکل $p_r = \frac{\eta_t E_h}{(1-\alpha)T}$ است که در آن $\eta_t \in (0, 1)$ بازدهی مصرف انرژی است. سیگنال دریافتی در رله به شکل $y_r = \sqrt{p_s} h_s x_s + \beta \sqrt{p_r} x_r + n_r$ و x_r به ترتیب، سیگنال ارسالی فرستنده و سیگنال ارسالی رله، نویز سفید گاوسی جمع‌شونده^{۴۹} در رله و β ضریب کانال تداخل خودی در رله است. همچنین در این رابطه $x_r = G y_r$ است که در آن G بهره رله در حالت ارتباط دوطرفه است. این مقاله نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی کنترل رله با قید مربوط به تضمین کیفیت خدمات^{۵۰} در آن، منجر به بهبود عملکرد سامانه از لحاظ احتمال قطع و نرخ موفق می‌شود. در شکل ۳

از لحاظ توازن بین نرخ اطلاعات و انرژی برداشت شده دست می‌یابد [۱۰].

در [۲۰] از یک گره رله تقویت و ارسال^{۵۱} (AF) با محدودیت انرژی برای کمک به انتقال اطلاعات از یک گره منبع به گره مقصد استفاده شده است. برای این منظور یک پروتکل دو مرحله‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن رله مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه بوده و به صورت همزمان انتقال بی‌سیم اطلاعات و توان را به صورت چند ورودی-یک خروجی^{۵۲} (MISO) انجام می‌دهد. مطابق شکل ۲ و با فرض آن که گره منبع و رله هر یک به ترتیب دارای M و N خروجی هستند، در مرحله اول یعنی نصف دوره مربوط به انتقال داده، اطلاعات از گره منبع به رله منتقل شده و در مرحله دوم ضمن تقویت سیگنال دریافتی توسط رله و ارسال آن به گره مقصد، به منظور برداشت انرژی، سیگنال‌های انرژی تخصیص یافته از منبع به رله ارسال می‌شوند. بنابراین رله در مرحله دوم به صورت دوطرفه عمل می‌کند.



شکل ۲. یک سامانه رله‌ای با منبع تغذیه بی‌سیم مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه.

در [۲۱] نیز یک سامانه چند ورودی-چند خروجی (MIMO) که در آن یک رله رمزگشایی و ارسال^{۵۳} (DF) چند آنتنی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه، از طریق انتقال بی‌سیم انرژی تغذیه می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. این سامانه شامل یک گره منبع (S)، یک گره مقصد (D) و یک رله (R) دارای دو مجموعه آنتن فرستنده (M_T) و گیرنده (M_R) است. در این مقاله، رله با در نظر گرفتن یک پروتکل دو مرحله‌ای متفاوت با مقاله [۲۰] به برداشت انرژی از گره منبع می‌پردازد. در مرحله اول یعنی در زمان αT دوره کامل مخایره و ($\alpha \in (0, 1)$) برداشت انرژی از گره منبع و در مرحله دوم یعنی در زمان $(1-\alpha)T$ باقیمانده، ارسال همزمان از گره منبع به گره رله و از گره رله به گره مقصد صورت می‌گیرد.

در [۶] سناریویی مشابه [۲۱] در نظر گرفته شده است با این تفاوت که هر دو نوع رله AF و DF بررسی شده و رله تنها دارای دو آنتن است. پروتکل دو مرحله‌ای در این مقاله مشابه [۲۱] است و در مرحله دوم که رله به صورت دوطرفه عمل می‌کند، دو آنتن رله (یکی برای دریافت اطلاعات و دیگری برای ارسال آن‌ها) به صورت همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در این

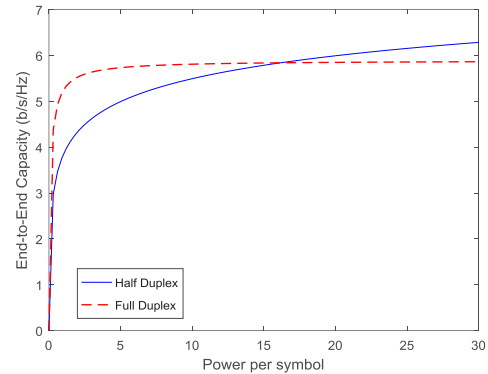
^{۴۸} Rectifier
^{۴۹} Additive White Gaussian Noise
^{۵۰} Quality of service

^{۵۱} Amplify-and-Forward
^{۵۲} Multiple Input Single Output
^{۵۳} Decode-and-Forward

سمع با قابلیت دوطرفه خود، می تواند ضمن استراق سمع، سیگنال اختلال^{۲۲} برای گره مقصد ارسال کند. همچنین فرض شده است گره مقصد نیز برای دریافت سیگنال اطلاعات و ارسال نویز مصنوعی^{۲۳} به گره استراق سمع به صورت همزمان، مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه است. در [۲۵] نیز یک طرح شکل دهی پرتو با هدف حداکثرسازی نرخ امن در یک سامانه انتقال بی سیم اطلاعات و توان به صورت همزمان با یک گره مقصد مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه و یک گره استراق سمع برداشت کننده انرژی ارائه شده است. در این سامانه، گره منبع سیگنال های انرژی و اطلاعات را به صورت همزمان ارسال می کند و گره مقصد ضمن دریافت سیگنال اطلاعات، سیگنال اختلال را برای گره استراق سمع ارسال می کند. گره استراق سمع نیز علاوه بر برداشت انرژی به استراق سمع می پردازد.

سناریوی دیگری که مورد توجه قرار گرفته است، مسئله برداشت انرژی و ارتباطات دوطرفه در شبکه های سلولی است. در [۲۶] با توجه به مصرف زیاد انرژی و هزینه بالای عملیات بک هال نوری^{۲۴} از یک سو و از سوی دیگر با توجه به وجود احتمال عدم دسترسی برخی ایستگاه های پایه سلول های کوچک به شبکه برق، دو مسئله برداشت انرژی و عملیات بک هال خودی^{۲۵} استفاده از ارتباط دوطرفه به صورت همزمان، در شبکه های سلولی مجهز به فناوری چند ورودی-چند خروجی حجیم مورد مطالعه قرار گرفته است (در این فناوری، ایستگاه های پایه سلول های کوچک نیازی به سخت افزار یا طیف فرکانسی اضافی برای عملیات بک هال خود ندارند). نویسندگان در این مقاله یک شبکه سلولی دولایه شامل یک ایستگاه پایه بزرگ (MBS)^{۲۶} با آرایه آنتن های MIMO و N عدد ایستگاه پایه سلول های کوچک (SBS)^{۲۷} با آرایه چند آنتنی را در نظر گرفته اند. در شکل ۲ چنانچه گره منبع را یک MBS، رله را یک SBS و گره مقصد را کاربر سلول های کوچک در نظر بگیریم، به مدل سامانه در نظر گرفته شده در این سناریو دست می یابیم. در این مدل تعداد SBS و کاربران سلول های کوچک می تواند بیش از یک باشد. ایستگاه پایه بزرگ توسط برق شبکه معمولی تغذیه می شود، در حالی که ایستگاه های پایه سلول های کوچک قادر به برداشت انرژی هستند. همچنین در ارتباطات فرسوسو^{۲۸} ارسال همزمان و هم فرکانس از MBS به SBS (ارسال اطلاعات مربوط به عملیات بک هال ایستگاه های پایه سلول های کوچک) و از SBS به کاربران سلول های کوچک در نظر گرفته شده است و بنابراین SBS ها به صورت دوطرفه عمل می کنند.

ظرفیت چنین سامانه ای برای دو حالت ارتباطی دوطرفه و یک طرفه مقایسه شده است.



شکل ۳. مقایسه ظرفیت سامانه برای دو حالت دوطرفه و یک طرفه.

همان طور که در شکل ۳ می بینیم در مقادیر پایین p_s ارتباط دوطرفه عملکرد بهتری نسبت به ارتباط یک طرفه خواهد داشت اما در مقادیر بالای p_s (مقادیر بیشتر از $p_s = 16$) به دلیل غلبه تداخل خودی، ظرفیت در حالت دوطرفه کمتر از ظرفیت در حالت یک طرفه خواهد شد.

در [۲۳] مسئله امنیت در سامانه های SWIPT با در نظر گرفتن یک گره استراق سمع (E) در کنار گره های منبع و مقصد بررسی شده است. در این مقاله یک پروتکل دو مرحله ای در نظر گرفته شده است که در مرحله اول آن گره مقصد، انرژی را از گره منبع برداشت کرده و در مرحله دوم، گره منبع سیگنال حاوی اطلاعات را تحت حفاظت سیگنال نویز مصنوعی ارسال شده توسط گره مقصد، به گره مقصد ارسال می کند. بنابراین در مرحله دوم گره مقصد به صورت دوطرفه عمل کرده و ضمن دریافت سیگنال حاوی اطلاعات از گره منبع، یک سیگنال پارازیت را به منظور جلوگیری از استراق سمع گره E ارسال می کند. در این مقاله نشان داده شده است که به کارگیری روش های ارتباط دوطرفه در سامانه های SWIPT با فرض تضعیف تداخل خودی، به میزان قابل توجهی عملکرد امن سامانه را بهبود می بخشد.

همچنین نویسندگان در [۲۴] به حداکثرسازی نرخ ارسال امن در یک شبکه حسگر بی سیم مبتنی بر خوشه شامل یک گره حسگر (گره منبع)، یک گره رهبر خوشه (گره مقصد) در حضور گره استراق سمع کننده فعال دوطرفه پرداخته اند. در این شبکه فرض شده است که گره منبع از طریق برداشت بی سیم انرژی و گره مقصد با انرژی الکتریکی ثابت تغذیه می شوند. گره استراق

Self-Backhaul^{۲۲}
Macro cell Base Station^{۲۶}
Small cell Base Station^{۲۷}
Downlink^{۲۸}

Cluster^{۲۱}
Jamming^{۲۳}
artificial noise^{۲۳}
Optical Backhaul^{۲۵}

مجموعه از گره‌های دسترسی انرژی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه می‌باشد، در نظر گرفته شده است. در این مقاله نیز از یک پروتکل دو مرحله‌ای (با اندازه‌های مساوی) برای ارسال و دریافت اطلاعات استفاده می‌شود. مطابق شکل ۲ گره منبع به عنوان فرستنده اولیه، رله به عنوان گره‌های دسترسی انرژی و گره مقصد به عنوان فرستنده ثانویه در نظر گرفته شده اند. در مرحله اول ضمن ارسال سیگنال کاربر اولیه از فرستنده اولیه به فرستنده ثانویه و گره‌های دسترسی انرژی، گره‌های دسترسی انرژی نیز که در حالت دوطرفه عمل می‌کنند، به ارسال بی‌سیم انرژی به فرستنده ثانویه می‌پردازند و بنابراین در این مرحله، فرستنده ثانویه انرژی را از گره‌های دسترسی انرژی برداشت می‌کند. در مرحله دوم، اطلاعات مربوط به گیرنده اولیه توسط فرستنده ثانویه و گره‌های دسترسی انرژی به گیرنده اولیه ارسال می‌شود.

در [۳۲] یک شبکه رادیو شناختی که در آن تعدادی کاربر توسط یک ایستگاه پایه حمایت می‌شوند، در نظر گرفته شده است. در این مقاله فرض بر آن است که کاربران مجهز به هر دو فناوری ارتباط یک‌طرفه و دوطرفه هستند و انرژی مورد نیاز خود را با استفاده از فناوری برداشت انرژی خورشیدی تأمین می‌کنند. نویسندگان به منظور افزایش گذردهی سامانه، طرح انتخاب حالت ارتباط (دوطرفه/یک‌طرفه) برای کاربران را پیشنهاد می‌دهند. خلاصه‌ای از سامانه‌های برداشت انرژی در شبکه‌های دوطرفه و سناریوهای در نظر گرفته شده که در بخش سامانه‌های برداشت انرژی مطرح شدند، در جدول ۲ آمده است.

توابع هدف در کارهای قبلی

در این بخش، توابع هدف مختلف شامل امنیت، تأخیر، انرژی و برخی دیگر معیارهای عملکردی شبکه که در کارهای موجود در این زمینه مورد توجه قرار گرفته‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

معیارهای عملکرد شبکه

در این بخش، برخی معیارهای عملکرد شبکه همچون گذردهی، نرخ داده، ظرفیت و احتمال قطع که در کارهای قبلی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند، بررسی می‌شود.

گذردهی: مقالات [۶]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۳۳]، [۳۴] و [۳۵] افزایش گذردهی سامانه مورد نظر خود را هدف قرار داده‌اند. در [۶] یک مشخصه تحلیلی گذردهی قابل دستیابی برای سه حالت

در [۲۷] نیز بهبود طول عمر دستگاه‌های بی‌سیم در شبکه‌های سلولی با منبع تغذیه بی‌سیم مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله سه سناریوی مختلف شرح داده شده است. در سناریوی اول از یک ایستگاه پایه مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه، انرژی مورد نیاز کاربران برداشت می‌شود و بنابراین ضمن ارسال اطلاعات فراسو توسط کاربران به ایستگاه پایه، ارسال انرژی به کاربران نیز در همان فرکانس صورت می‌گیرد. در سناریوی دوم، انرژی مورد نیاز کاربران از یک سری منابع توان آگه به صورت متقارن روی دایره‌های حول ایستگاه پایه قرار دارند، برداشت می‌شود. بنابراین در این سناریو ایستگاه پایه به صورت یک طرفه عمل می‌کند. در سناریوی سوم، استقرار همزمان منابع توان و آنتن‌های توزیع شده آگر نظر گرفته شده است که در آن هر کاربر انرژی را از نزدیک‌ترین منبع توان برداشت کرده و اطلاعات را به نزدیک‌ترین آنتن گیرنده ارسال می‌کند.

در [۲۸] نیز یک شبکه سلولی ناهمگن فوق‌چگال شامل یک ایستگاه پایه بزرگ که به صورت یک طرفه عمل می‌کند و تعدادی ایستگاه پایه سلول‌های کوچک که مجهز به فناوری‌های ارتباط دوطرفه و برداشت انرژی هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۲۹] یک شبکه ارتباطی با منبع تغذیه بی‌سیم شامل یک گره دسترسی و دو دستگاه بی‌سیم بررسی شده است. گره دسترسی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه بوده و می‌تواند به صورت همزمان سیگنال انرژی را در فرسو و سیگنال اطلاعات را در فراسو ارسال و دریافت کند. هر یک از دستگاه‌های بی‌سیم نیز مجهز به فناوری برداشت انرژی امواج رادیویی هستند که انرژی ارسالی از گره دسترسی را در باتری با ظرفیت محدود ذخیره می‌کند. در این مقاله با مقایسه عملکرد سامانه از لحاظ مجموع طول صف داده‌های کاربران، در دو حالت ارتباط یک‌طرفه و دوطرفه، به نتیجه برتری حالت ارتباط دوطرفه دست یافتند.

نویسندگان در [۳۰] مخابره امن در یک شبکه سلولی مجهز به فناوری SWIPT در ارتباطات فرسو را با فرض حضور چند گره استراق سمع بررسی کرده‌اند که در آن یک ایستگاه پایه دوطرفه چند آنتنی، کاربران تک آنتنی را در ارسال فرسو و فراسو پشتیبانی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد در نظر گرفتن فناوری SWIPT در ارتباطات فرسو و همچنین طرح دوطرفه بودن ایستگاه پایه منجر به بهبود عملکرد و کاهش توان مصرفی سامانه می‌شود. در [۳۱] شبکه مشارکتی رادیو شناختی با تغذیه بی‌سیم مجهز به فناوری برداشت انرژی که شامل یک زوج فرستنده-گیرنده اولیه و یک زوج فرستنده-گیرنده ثانویه و یک

^{۶۶} Distributed Antenna Element (DAE)
^{۶۷} Sum data queue length

^{۶۸} Wireless Powered Cooperative Cognitive Radio Network

^{۶۹} Wireless-Powered Cellular Network (WPCN)

^{۷۰} Uplink

^{۷۱} Power Beacon

[۶]	سامانه رله ای	دوم	اول	رله	رله
[۲۰]	سامانه رله ای و SWIPT	دوم	دوم	رله	رله
[۲۱]	سامانه رله ای	دوم	دوم	رله	رله
[۲۲]	سامانه رله ای و SWIPT	دوم	دوم	رله	رله
[۲۳]	SWIPT با حضور گره استراق سمع	دوم	دوم	گره مقصد	گره مقصد
[۲۴]	شبکه حسگر بی سیم با حضور گره استراق سمع	-	-	گره استراق سمع و گره مقصد	گره منبع
[۲۵]	SWIPT با حضور گره استراق سمع	-	-	گره مقصد	گره استراق سمع
[۲۶]	سلولی	-	-	ایستگاه های پایه سلول های کوچک	ایستگاه های پایه سلول های کوچک
[۲۷]	سلولی	عدم استفاده از ارتباط دوطرفه	-	عدم استفاده از ارتباط دوطرفه	کاربران
[۲۸]	سلولی	عدم استفاده از ارتباط دوطرفه	-	عدم استفاده از ارتباط دوطرفه	کاربران
[۲۹]	WPCN	-	-	گره دسترسی	گره دسترسی
[۳۰]	سلولی	-	-	ایستگاه پایه	کاربران
[۳۱]	CCRN	اول	اول	گره های دسترسی انرژی	گره های دسترسی انرژی

ارسال لحظه ای^{۶۵}، ارسال با قید تأخیر^{۶۶} و ارسال با تحمل تأخیر^{۶۷} ارائه شده است. همچنین نشان داده شده است که به کارگیری حالت ارتباط دوطرفه به جای حالت ارتباط یک طرفه، گذردهی را برای هر سه حالت فوق افزایش خواهد داد و گذردهی ارسال لحظه ای از دو مورد دیگر بیشتر است. نویسندگان در [۲۰] به بررسی تخصیص توان و طرح شکل دهی پرتو بهینه در رله تحت کانال MIMO به منظور حداکثرسازی گذردهی پرداخته اند و نشان داده اند که با به کارگیری شکل دهی پرتو و تخصیص بهینه توان در رله، گذردهی به مقدار قابل توجهی بهبود می یابد. در [۲۱] نیز گذردهی لحظه ای با بهینه سازی شکل دهنده های پرتو^{۶۸} در فرستنده و گیرنده و همچنین بهینه سازی ضریب تقسیم (α) ، حداکثر می شود. در این مقاله، مقدار بهینه ضریب تقسیم زمان با حل مسئله $\alpha_{opt} = \arg \max_{\alpha} R(\alpha)$ بدست می آید که در آن $R(\alpha) = (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma)$ نشان دهنده مصالحه بین زمان مربوط به برداشت انرژی و گذردهی لحظه ای است و γ نسبت سیگنال به مجموع نویز و تداخل است. نتایج نشان می دهند که شکل دهی پرتو قابلیت های برداشت انرژی و حذف تداخل خودی در سامانه های رله ای دوطرفه را بهبود می بخشد.

در [۲۲] از مدل های برداشت-ارسال و برداشت-ارسال-ذخیره برای حداکثرسازی گذردهی با قید دستیابی به کیفیت خدمات مورد نظر استفاده شده است. اخیراً در [۳۶] گذردهی امن یک شبکه مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه با منبع تغذیه بی سیم شامل یک ایستگاه پایه چندآنتنی دوطرفه و تعدادی کاربر تحت قیود عدالت بررسی شده است. در ارتباط ایستگاه پایه با یکی از کاربران، سایر کاربران به عنوان گره های استراق سمع در نظر گرفته شده اند.

جدول ۲. بررسی سناریوهای مختلف موجود در سامانه های برداشت انرژی در شبکه های دوطرفه.

شماره مرجع	سناریو	مرحله مربوط به ارتباط دوطرفه	مرحله مربوط به برداشت انرژی	نام گره مجهز به فناوری برداشت انرژی	نام گره منبع

نرخ داده: مقالات [۲۲]، [۲۸]، [۳۱]، [۳۷] و [۳۸] بهبود نرخ ارسال داده در سامانه را هدف قرار داده اند. در [۲۸] فرض شده است که عملکرد فرستنده و/یا گیرنده های ایستگاه های پایه سلول های کوچک، بستگی به انرژی کنترل شده توسط منابع تجدیدپذیر دارد. با توجه به گستره عملیاتی کوتاه ایستگاه های

^{۶۸} Beamformer
^{۶۹} Signal to Noise plus Interference Ratio
^{۷۰} Fairness Constraints

^{۶۵} Instantaneous Transmission
^{۶۶} Delay-Constrained Transmission
^{۶۷} Delay Tolerant Transmission

تقریبی و دقیق احتمال قطع با تعریف $p_{out} = p_r(\gamma < \gamma_{th})$ را که در آن γ و γ_{th} به ترتیب نسبت سیگنال به مجموع نویز و تداخل سامانه و مقدار آستانه نسبت سیگنال به مجموع نویز و تداخل است، برای تعیین گذردهی با قید تأخیر، به دست آورده‌اند. در [۲۲] که دو مدل برداشت-ارسال و برداشت-ارسال-ذخیره برای کنترل رله در سامانه‌های SWIPT مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه ارائه شده است، کنترل رله محدود به کیفیت خدمات از لحاظ احتمال قطع، گذردهی و نرخ موفق مورد مطالعه قرار گرفته است.

امنیت

مقالات [۲۳]، [۴۱]، [۴۲]، [۴۳]، [۴۴] و [۴۵] مسئله امنیت را در سناریوهای مورد نظر خود بررسی کرده‌اند. مطابق آنچه در بخش ۲ شرح داده شد، در [۲۳] یک پروتکل مخابره امن دو مرحله‌ای سوئیچ زمانی برای افزایش امنیت در یک سامانه SWIPT ارائه شده است که در آن در کنار گره‌های منبع و مقصد، یک گره استراق سمع وجود دارد. در [۴۴] نیز یک اختلال مشارکتی با تغذیه بی‌سیم^{۶۶} برای بررسی مخابره امن بین یک فرستنده و گیرنده اطلاعات در حضور یک گیرنده انرژی (همان گره استراق سمع) در نظر گرفته شده است. در این سناریو، اختلال‌گر مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه است و ضمن آن که انرژی را از سیگنال اطلاعات فرستنده برداشت می‌کند، سیگنال اختلال‌گر را نیز ارسال می‌کند.

نویسندگان در [۴۶] نیز با توجه به اهمیت امنیت لایه فیزیکی، برداشت انرژی و ارتباط دوطرفه در نسل پنجم سامانه‌های ارتباطی، به بررسی نرخ امن^{۶۷} یک خط ارتباطی منبع-رله-مقصد در حضور یک گره استراق سمع پرداخته‌اند که در آن رله مجهز به هر دو فناوری ارتباط دوطرفه و برداشت انرژی است. همچنین به منظور تخریب کانال گره استراق سمع و افزایش امنیت مخابره، یک اختلال‌گر دوطرفه برداشت‌کننده انرژی را در نظر گرفته‌اند و برای دو گره برداشت‌کننده انرژی یعنی اختلال‌گر و رله، مدل سوئیچ زمانی را در نظر گرفته‌اند. در بازه اول زمان به برداشت انرژی می‌پردازند و سپس ارسال اطلاعات را در بازه دوم انجام می‌دهند. مقدار بهینه مدت زمان مربوط به این دو بازه را محاسبه نموده و نشان می‌دهند نرخ امن در حالت دوطرفه بودن اختلال‌گر بیشتر از حالت یک‌طرفه بودن آن است.

همچنین نویسندگان در [۴۵] یک سامانه ارتباطی چند آنتنی با تغذیه بی‌سیم که دارای یک منبع انرژی است، یک منبع اطلاعات

پایه سلول‌های کوچک، انرژی مورد نیاز برای اجرای رمزگشایی، غیر قابل چشم‌پوشی است و این انرژی تابعی از نرخ داده‌های فراسوی کاربران است. در [۲۲] کنترل رله با قید حداکثرسازی کیفیت خدمات انجام شده و نشان داده شده که طرح پیشنهادی در این مقاله برای کنترل رله، بهبود قابل توجهی را در زمینه نرخ ارسال داده موفق به دنبال داشته است. در [۳۱] به منظور بهبود بازدهی طیفی در یک شبکه رادیو شناختی، به بررسی مسئله حداکثرسازی نرخ داده مجموع با توابع هدف قیود مربوط به توان ارسال و قیود مربوط به هزینه پرداخته است.

ظرفیت: مقالات [۶] و [۳۹] از جمله مقالاتی در زمینه برداشت انرژی با استفاده از فناوری ارتباط دوطرفه هستند که ظرفیت سامانه را مورد بررسی قرار داده‌اند. در [۶] گذردهی سامانه‌های برداشت‌کننده انرژی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه بررسی شده است و عبارات تحلیلی مربوط به ظرفیت ارگادیک^{۶۸} برای هر دو پروتکل AF و DF محاسبه شده‌اند. در [۳۹] نیز بهبود ظرفیت شبکه‌های رله‌ای مجهز به فناوری‌های برداشت انرژی و ارتباط دوطرفه مورد بررسی قرار گرفته است و برای این منظور از سامانه SWIPT با طرح جداسازی توان استفاده می‌کند. همچنین در [۴۰] ظرفیت یک سامانه نقطه-به-نقطه^{۶۹} دوطرفه با منبع تغذیه بی‌سیم، که شامل یک فرستنده انرژی و یک کاربر دوطرفه برداشت‌کننده انرژی است، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر تأثیر مثبت سیگنال تداخل خودی به دلیل افزایش میزان انرژی قابل برداشت توسط کاربر هستند.

احتمال قطع: مقالات [۶]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]، [۳۳] و [۴۱] از جمله مقالاتی هستند که احتمال قطع در سامانه‌های مجهز به فناوری‌های ارتباط دوطرفه و برداشت انرژی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در [۲۳] ارسال امن در یک سامانه SWIPT که در آن یک گره استراق سمع وجود دارد، مورد مطالعه قرار گرفته و عبارات به شکل بسته احتمال قطع اتصال^{۷۰} احتمال قطع محرمانه^{۷۱} و احتمال قطع ارسال^{۷۲} به ترتیب برای دستیابی به اهداف قابلیت اطمینان، امنیت و به صورت توأم دستیابی به هر دوی آنها به دست آمده است.

در [۶] نیز عبارات تحلیلی مربوط به احتمال قطع برای هر دو پروتکل AF و DF به دست آورده شده است. نویسندگان در [۲۱] به دنبال محاسبه گذردهی لحظه‌ای و با قید تأخیر برای یک سامانه رله‌ای چند ورودی-چند خروجی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه و با منبع تغذیه بی‌سیم هستند و عبارات به شکل بسته

Transmission Outage Probability (TOP)^{۷۰}
Wireless Powered Cooperative Jamming^{۷۱}
Secrecy Rate^{۷۲}

Ergodic Capacity^{۷۱}
Point-to-Point^{۷۲}
Connection Outage Probability (COP)^{۷۳}
Secrecy Outage Probability (SOP)^{۷۴}

انرژی اشاره شد، یک پروتکل دو مرحله‌ای در یک سامانه رله‌ای AF مجهز به فناوری برداشت انرژی و ارتباط دوطرفه ارائه شده است. این پروتکل سامانه را قادر به بازیافت انرژی خودی^{۸۰} می‌سازد. یعنی در واقع اتصال تداخل خودی در این پروتکل مفید است. به این صورت که علاوه بر انرژی اختصاص یافته توسط منبع، بخشی از انرژی که توسط رله برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود، می‌تواند برداشت شود و مورد استفاده مجدد قرار گیرد. در [۴۷] نیز شکل دهی پرتوی و مسئله تقسیم بهینه توان در سناریویی مشابه با [۲۰]، شامل یک رله دوطرفه AF با فناوری بازیافت انرژی خودی بررسی شده است.

خلاصه‌ای از معیارهای بهبود عملکرد سامانه‌های برداشت انرژی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه که در بخش توابع هدف در کارهای قبلی شرح داده شد، در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. اهداف مورد نظر در کارهای انجام شده در زمینه سامانه‌های ارتباط دوطرفه مجهز به فناوری برداشت انرژی.

شماره مرجع	گذردهی	نرخ	ظرفیت	احتمال قطع	امنیت	تأخیر	انرژی
[۶]	✓		✓	✓		✓	✓
[۲۰]	✓					✓	
[۲۱]	✓			✓			
[۲۲]	✓	✓		✓			
[۲۳]				✓	✓		✓
[۲۶]							✓
[۲۸]		✓					
[۳۱]		✓					
[۳۲]	✓	✓					
[۳۳]	✓			✓			
[۳۴]	✓						
[۳۵]	✓						
[۳۶]	✓						
[۳۷]		✓					
[۳۸]		✓					✓
[۳۹]			✓				
[۴۰]		✓	✓				
[۴۱]				✓			
[۴۲]				✓			
[۴۳]				✓			
[۴۴]				✓			
[۴۵]	✓			✓			✓
[۴۶]		✓					
[۴۷]	✓						✓

چالش‌های به‌کارگیری فناوری ارتباط دوطرفه در سامانه‌های برداشت انرژی

همان‌طور که در مقدمه بیان شده است، به‌کارگیری فناوری ارتباط دوطرفه با وجود داشتن فواید زیادی همچون دستیابی به بهره‌بلای گذردهی، احتمال کمتر رخ دادن تصادم، حل مشکل

مجهز به فناوری‌های ارتباط دوطرفه و بازیافت انرژی، یک گیرنده اطلاعات و یک گیرنده انرژی (همان‌گره استراق سمع) را در نظر گرفته‌اند. در این سامانه منبع اطلاعات ضمن تغذیه توسط منبع انرژی، اطلاعات محرمانه‌ای را به گیرنده اطلاعات ارسال می‌کند. در این مقاله هدف اصلی، حداکثرسازی امنیت برای گیرنده اطلاعات در نظر گرفته شده است.

تأخیر

با توجه به اهمیت مخابره بی‌درنگ در سامانه‌های دوطرفه، مقالات [۲۰] و [۲۱] سعی در کنترل تأخیر در سناریوهای مد نظر خویش دارند. در [۲۰] یک پروتکل دو مرحله‌ای در یک سامانه رله‌ای AF مجهز به فناوری برداشت انرژی و ارتباط دوطرفه برای انتقال انرژی از گره منبع به رله و انتقال اطلاعات توسط رله ارائه داده شده است. این پروتکل به علت عدم نیاز به سوئیچ زمانی و تقسیم توان در رله به منظور برداشت انرژی، انتقال بی‌وقفه اطلاعات را تضمین می‌کند. در [۲۱] نیز همان‌طور که گفته شد، گذردهی لحظه‌ای و محدود به تأخیر برای یک سامانه رله‌ای DF چند آنتنی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه به‌دست آورده شده است.

انرژی

در این بخش، برخی از کارهای موجود در این زمینه که بازدهی انرژی و بازیافت انرژی را به عنوان اهداف خویش در نظر گرفته‌اند، بررسی می‌کنیم.

بازدهی انرژی: مقالات [۲۳]، [۲۶] و [۳۸] بازدهی انرژی را به عنوان یکی از اهداف خود انتخاب کرده‌اند. در [۲۳] همان‌طور که در بخش سامانه‌های برداشت انرژی توضیح داده شد، با توجه به عبارات شکل بسته احتمال قطع اتصال، احتمال قطع محرمانه و احتمال قطع ارسال، روابط مربوط به بازدهی انرژی محرمانه^{۷۸} و گذردهی محرمانه به‌دست آورده شده است و به منظور حداکثرسازی این دو پارامتر، به بهینه‌سازی توان ارسالی و ضریب تقسیم زمان (α) پرداخته است. در [۲۶] براساس طرح پیشنهادی، مسئله‌های تخصیص توان و مشارکت سلولی^۹ به عنوان مسئله بهینه‌سازی به منظور بهبود بازدهی انرژی سامانه در نظر گرفته شده‌اند.

بازیافت انرژی: مقالات [۲۰] و [۴۵] با توجه به اهمیت محدودیت منابع انرژی، به بررسی بحث بازیافت انرژی پرداخته‌اند. در [۲۰] همان‌طور که در بخش سامانه‌های برداشت

Self-Energy Recycling ^{۸۰}

Secrecy Energy Efficiency (SEE) ^{۷۸}
Cell Association ^{۷۹}

سامانه‌ها را این گونه بیان می‌کنند که اگرچه انرژی برداشت شده در گره‌های رله می‌تواند عملکرد انتقال اطلاعات را بهبود بخشد، اما منجر به نشت بیشتر اطلاعات و افزایش تداخل حلقه^۳ (LI) می‌شود. این امر منجر به تخریب عملکرد ایمن خواهد شد. علاوه بر این، در صورت استفاده از پروتکل رله AF در چنین سامانه‌ای، قبل از ارسال مجدد اطلاعات به مقصد، توان سیگنال LI تقویت شده و باعث عمیق‌تر شدن مشکلات فوق می‌شود.

برداشت انرژی در سامانه‌های رادیو شناختی مجهز به فناوری ارتباط دوطرفه نیز به دلیل وجود تداخل خودی با چالش روبه‌رو است. از آن‌جا که هر خط ارتباطی دوطرفه پرتوهایی ایجاد می‌کند، به‌کارگیری شکل‌دهی پرتو در آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌تواند به حذف تداخل خودی کمک کند. همچنین در روش برداشت انرژی همراه با شکل‌دهی پرتو، می‌توان به سیگنال تداخل خودی به شکل یک منبع انرژی دیگر نگاه کرد اما هنوز جزئیات این روش در سامانه‌های رادیو شناختی دوطرفه بررسی نشده است [۱۴]. همچنین به طور کلی در حالت ارتباط دوطرفه، در سامانه‌های مختلف سلولی با ایستگاه پایه چند آنتنی، رله‌ای و ... می‌توان بخشی از انرژی مربوط به ارسال اطلاعات را با هدف بازیافت انرژی توسط آنتن گیرنده دریافت کرد [۵۲].

نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، ابتدا سناریوهای کاربردی موجود در سامانه‌های مخابرات بی‌سیم مجهز به فناوری‌های ارتباط دوطرفه و برداشت انرژی بررسی شدند. سپس اهداف مورد نظر برخی از این سناریوها مانند گذردهی، نرخ، ظرفیت و تأخیر به اجمال تشریح شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت فناوری برداشت انرژی علاوه بر بهبود طول عمر دستگاه‌های بی‌سیم در سناریوهای مختلف همچون شبکه‌های سلولی و رادیو شناختی، می‌تواند در کاهش هزینه عملیات بک‌هال با استفاده از عملیات بک‌هال خودی به کار رود.

به طور کلی برخی از سناریوها، یک پروتکل دومرحله‌ای در سامانه‌های رله‌ای را برای تحقق این امر در نظر می‌گیرند. این پروتکل دومرحله‌ای نیز خود می‌تواند به دو شکل پیاده‌سازی شود: (۱) مرحله اول مربوط به انتقال اطلاعات از گره منبع به رله و مرحله دوم مربوط به انتقال همزمان انرژی از گره منبع به رله و انتقال اطلاعات از رله به گره مقصد. (۲) مرحله اول مربوط به برداشت انرژی توسط رله از گره منبع و مرحله دوم مربوط به انتقال همزمان اطلاعات از گره منبع به رله و از رله به گره مقصد. اما با وجود مزایای زیاد دو فناوری ارتباط دوطرفه و برداشت

پایانه مخفی و کاهش تأخیر انتها به انتها با چالش‌هایی رو به رو است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به محدودیت عملکرد به تداخل خودی، کاهش قابلیت اطمینان خط و نرخ تلفات بسته بیشتر نسبت به حالت یک‌طرفه اشاره کرد [۴۸]. مورد آخر به این دلیل است که ارتباط دوطرفه به علت ارسال و دریافت همزمان باید به تعداد دو برابر بسته پردازش کند که این امر موجب افزایش نرخ تلفات بسته می‌شود [۲].

مقالات [۲۶] و [۴۹] برخی چالش‌های موجود در بهره‌برداری از استفاده همزمان دو فناوری برداشت انرژی از ایستگاه‌های پایه سلول‌های کوچک و ارتباطات دوطرفه در شبکه‌های سلولی را مطرح کرده‌اند. در [۲۶] ورود انرژی و محدودیت ظرفیت باتری در سامانه‌های برداشت انرژی را به عنوان عوامل ایجاد چالش در این زمینه مطرح کرده‌اند. علاوه بر این بیان می‌کنند که چون بک‌هال خودی به طور معمول انرژی بیشتری از MBS را برای پشتیبانی از اتصالات بک‌هال مصرف می‌کند، ارتباطات سلولی و تخصیص انرژی در شبکه‌های سلولی کوچک مجهز به برداشت انرژی با بک‌هال خودی، نسبت به شبکه‌های سلولی کوچک مجهز به برداشت انرژی، با چالش بیشتری رو به رو هستند. نویسندگان در [۴۹] نیز حذف تداخل ناشی از ارتباطات دوطرفه و همچنین به اشتراک‌گذاری مؤثر انرژی برداشت شده در میان عملیات گیرنده مانند ارسال انرژی و انرژی رمزگشایی وابسته به نرخ را به عنوان چالش‌های موجود در این زمینه ذکر کرده‌اند.

در [۲۹] بیان شده است که استفاده از انتقال بی‌سیم انرژی^۱ به دلیل تصادفی بودن منابع انرژی تجدیدپذیر، منجر به چالش برانگیز شدن مسئله زمان‌بندی ارسال برای دستیابی به کارایی بالا و مدیریت صحیح انرژی در دسترس می‌شود. در [۵۰] دو چالش مهم در پیاده‌سازی سامانه‌های انتقال بی‌سیم توان مجهز به رله دوطرفه، یعنی تحقق ارتباط دوطرفه و مصرف بالای انرژی مطرح شده است. چالش اول به این علت است که ساختار تقسیم زمانی مبتنی بر سامانه‌های انتقال بی‌سیم توان، عملیات یک‌طرفه را در یکی از شکاف‌های زمانی اتخاذ می‌کند و عملیات دوطرفه تنها در زمان باقی‌مانده تحقق می‌یابد، در حالی که ساختار تقسیم توان مبتنی بر ارتباط دوطرفه نمی‌تواند تمام سیگنال دریافت شده را به مقصد منتقل کند. چالش دوم نیز ناشی از مصرف توان اضافی توسط عملیات حذف تداخل خودی^۲ (SIC) در رله دوطرفه است.

نویسندگان در [۵۱] بر انتقال امن سامانه‌های رله دوطرفه با انتقال توان بی‌سیم متمرکز شده‌اند و چالش اصلی در این

^۳ Loopback Interference (LI)

^۱ Wireless Energy Transfer (WET)
^۲ Self-Interference Cancellation

- [8] "The transmission of electrical energy without wires," *Electrical World and Engineer*, 1905.
- [9] L. R. Varshney, "Transport information and energy simultaneously," in *IEEE International Symposium on Information Theory*, 2008.
- [10] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. In Kim and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757 - 789, 2015.
- [11] R. V. Prasad, S. Devasenapathy, V. S. Rao and J. Vazifehdan, "Reincarnation in the Ambiance: Devices and Networks with Energy Harvesting," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 195 - 213, 2013.
- [12] M.-L. Ku, W. Li, Y. Chen and K. J. R. Liu, "Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1384 - 1412, 2016.
- [13] F. Hu, B. Chen and K. Zhu, "Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15754 - 15776, 2018.
- [14] Y. Alsaba, S. K. Abdul Rahim and C. Y. Leow, "Beamforming in Wireless Energy Harvesting Communications Systems: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1329 - 1360, 2018.
- [15] M. Amjad, F. Akhtar, M. H. Rehmani, M. Reisslein and T. Umer, "Full-Duplex Communication in Cognitive Radio Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2158 - 2191, 2017.
- [16] P. Jindal and R. Kumar, "Physical Layer Security with Energy Harvesting Techniques: A Study," *Information and Communication Technology for Competitive Strategies*, vol. 40, pp. 223-233, 2019.
- [17] S. Pahuja and P. Jindal, "Green Communication for Wireless Cooperative Networks: A Survey," *Information and Communication Technology for Competitive Strategies*, vol. 40, pp. 455-464, 2019.
- [18] T. D. P. Perera, D. N. K. Jayakody, S. K. Sharma, S. Chatzinotas and J. Li, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges," *IEEE*

انرژی، استفاده از آنها با چالش‌هایی از جمله تداخل خودی و روش‌های مقابله با آن، مصرف انرژی بیشتر در سامانه‌های مجهز به یک‌حال خودی و همچنین تخریب عملکرد ایمن به علت نشت بیشتر اطلاعات روبه‌رو است. بازیافت انرژی با استفاده از تداخل خودی ناشی از ارتباط دوطرفه در سامانه‌های رادیو شناختی مجهز به فناوری برداشت انرژی از جمله پژوهش‌های پیش رو است.

مراجع

- [1] C. Campolo, A. Molinaro, A. O. Berthet and A. Vinel, "Full-Duplex radios for vehicular communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 182-189, 2017.
- [2] Z. Zhang, K. Long, A. V. Vasilakos and L. Hanzo, "Full-Duplex wireless communications: challenges, solutions, and future research directions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 7, pp. 1369-1409, 2016.
- [3] D. Kim, H. Lee and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of phy and mac layers," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, p. 2017–2046, 2015.
- [4] M. Nascheraghi, s. A. Ghorashi and M. Shikh-Bahaei, "Performance analysis of inband FD-D2D communications with imperfect SI cancellation for wireless video distribution," in *8th International Conference on the Network of the Future*, London, 2017.
- [5] A. Hajihoseini Gazestani, A. S. Ghorashi, B. Mousavinasab and M. Shikh-Bahaei, "A Survey on Implementation and Applications of Full Duplex Wireless Communications," *Physical Communication*, vol. 14, p. 121–134, 2019.
- [6] C. Zhong, H. A. Suraweera, G. Zheng, I. Krikidis and Z. Zhang, "Wireless information and power transfer with full duplex relaying," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 10, pp. 3447 - 3461, 2014.
- [7] م. محصل فقهی و ع. عباسفر، "راه حل‌های برخط بهینه‌مجانبی برای شبکه‌های مخابراتی جاذب انرژی،" نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، جلد ۱۴، شماره ۲، ص ۱۴۹-۱۵۵، ۱۳۹۵.

- [28] A. Yadav, O. A. dobre and N. Ansari, "Energy and traffic aware full-duplex communications for 5G systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11278 - 11290, 2017.
- [29] M. A. Abd-Elmagid, A. Biazon, T. Elbatt, K. G. Seddik and M. Zorzi, "On optimal policies in full-duplex wireless powered communication networks," in *International Symposium on WiOpt*, Tempe, AZ, USA, 2016.
- [30] D.-H. Chen and Y.-C. He, "Full-Duplex Secure Communications in Cellular Networks With Downlink Wireless Power Transfer," *IEEE Transaction on Communication*, vol. 66, no. 1, pp. 265-277, 2018.
- [31] H. Xing, X. Kang, K. K. Wong and A. Nallanathan, "Optimizing DF cognitive radio networks with full-duplex-enabled energy access points," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 7, pp. 4683 - 4697, 2017.
- [32] T. N. K. Hoan, H. Vu-Van and I. Koo, "Joint Full-Duplex/Half-Duplex Transmission-Switching Scheduling and Transmission-Energy Allocation in Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting," *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2295, 2018.
- [33] C. Zhong, S. H.A, G. Zheng, I. Krikidis and Z. Zhang, "Power splitting-based SWIPT with decode-and-forward full-duplex relaying," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 1536-1276, 2016.
- [34] X. Kang, C. Keong Ho and S. Sun, "Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5539 - 5551, 2015.
- [35] R. Aslani and M. Rasti, "Distributed power control schemes for in-band full-duplex energy harvesting wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 5233 - 5243, 2017.
- [36] R. Rezaei, S. Sun, X. Kang, Y. L. Guan and M. R. Pakravan, "Secrecy Throughput Maximization for Full-Duplex Wireless Powered IoT Networks Under Fairness Constraints," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 6964-6976, 2019.
- [37] H. Ju and R. Zhang, "Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication *Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 264 - 302, 2018.
- ف. بهمنی باب اناری و د. عباسی مقدم، "طرح انتقال همزمان [۱۹] بیسیم توان و داده با نرخ انتقال اطلاعات بهینه،" دومین کنفرانس ملی برق و کامپیوتر، ص ۱-۱۲، ۱۳۹۶.
- [20] Y. Zeng and R. Zhang, "Full-duplex wireless-powered relay with self-energy recycling," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 201 - 204, 2015.
- [21] M. e. Mohammadi, "Throughput analysis and optimization of wireless-powered multiple antenna full-duplex relay systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 4, pp. 1769 - 1785, 2016.
- [22] H. Liu, K. Jin Kim, K. Sup Kwak and P. H. Vincent, "QoS-constrained relay control for full-duplex relaying with SWIPT," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 2936 - 2949, 2017.
- [23] W. Yang, W. Mou, X. Xu, W. Yang and Y. Cai, "Energy efficiency analysis and enhancement for secure transmission in SWIPT systems exploiting full duplex techniques," *IET Communications*, vol. 10, no. 4, pp. 1712 - 1720, 2016.
- [24] Q. Vinh Do, T. N. Khai Hoan and I. Koo, "Optimal Power Allocation for Energy-efficient Data Transmission Against Full-duplex Active Eavesdroppers in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 13, pp. 5333 - 5346, 2019.
- [25] Z. Deng, Y. Gao, W. Li and C. Cai, "Robust Secure Beamforming for SWIPT Systems with Full Duplex Receivers and Energy-Harvesting Eavesdroppers," in *IEEE International Conference on Consumer Electronics*, Taiwan, 2017.
- [26] L. Chen, F. R. Yu, . H. Ji, B. Rong, X. Li and V. C. Leung, "Green full-duplex self-backhaul and energy harvesting small cell networks with massive MIMO," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 12, pp. 3709 - 3724, 2016.
- [27] H. Tabassum and E. Hossain, "On the deployment of energy sources in wireless-powered cellular networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 9, pp. 3391 - 3404, 2015.

- Powered Multi-Antenna Relay Channels," *IEEE Signal Processing Letters*, pp. 1-1, 2019.
- [48] M. Naslcheraghi, S. A. Ghorashi and M. Shikh-Bahaei, "Full-duplex Device-to-Device collaboration for low-latency wireless video distribution," in *24th International Conference on Telecommunications*, Limassol, 2017.
- [49] A. Yadav, O. A. Dobre and N. Ansari, "Distributed energy and resource management for full-duplex dense small cells for 5G," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Valencia, Spain, 2017.
- [50] Z. Wei, X. Zhu, S. Sun, Y. Jiang, A. Al-Tahmeesschi and M. Yue, "Research issues, challenges, and opportunities of wireless power transfer-aided full-duplex relay systems," *IEEE Access*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.
- [51] J. Qiao, H. Zhang, X. Zhou and D. Yuan, "Joint beamforming and time switching design for secrecy rate maximization in wireless-powered FD relay systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. pp, no. 99, pp. 1-1, 2017.
- [52] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413 - 1452, 2016.
- network," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 10, pp. 3528 - 3540, 2014.
- [38] V.-D. Nguyen, "Spectral and energy efficiencies in full-duplex wireless information and power transfer," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 5, pp. 2220 - 2233, 2017.
- [39] D. Wang, "Capacity-enhancing full-duplex relay networks based on power-splitting (PS-)SWIPT," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 6, pp. 5445 - 5450, 2017.
- [40] I. Nikoloska, N. Zlatanov and Z. Hadzi-Velkov, "Capacity of a Full-Duplex Wirelessly Powered Communication System With Self-Interference and Processing Cost," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 11, pp. 7648-7660, 2018.
- [41] Y. Be and H. Chen, "Accumulate and Jam: Towards secure communication via a wireless-powered full-duplex jammer," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 8, pp. 1538 - 1550, 2016.
- [42] K. Cumanan, H. Xing and P. Xu, "Physical layer security jamming: theoretical limits and practical designs in wireless networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3603 - 3611, 2016.
- [43] Y. Wang, R. Sun and X. Wang, "Transceiver design to maximize the weighted sum secrecy rate in full-duplex SWIPT systems," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 6, pp. 883 - 887, 2016.
- [44] M. Liu and Y. Liu, "Power allocation for secure SWIPT systems with wireless-powered cooperative jamming," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 6, pp. 1353 - 1356, 2017.
- [45] W. e. a. Wu, "Secure beamforming for full-duplex wireless powered communication systems with self-energy recycling," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 146 - 149, 2017.
- [46] Z. Mobini, M. Mohammadi and C. Tellambura, "Wireless-Powered Full-Duplex Relay and Friendly Jamming for Secure Cooperative Communications," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 14, no. 3, pp. 621 - 634, 2019.
- [47] K. Kwon, D. Hwang, H.-K. Song and S. S. Nam, "Full-Duplex with Self-Energy Recycling in the RF