به نام خدا

مروری جامع بر SWIPT و NOMA در شبکه های رله ای و شناختی برای سیستم های بی سیم نسل جدید

محمد مهدی عسگری

شماره دانشجویی : 40410724

پروژه درس مخابرات بی سیم باند پهن

دکتر کمال محامدپور

چکیده

در سال‌های اخیر، رشد سریع شبکه‌های بی‌سیم و افزایش چشمگیر تعداد تجهیزات هوشمند، چالش‌های جدیدی را در حوزه‌ی تأمین انرژی و بهره‌وری طیفی به‌وجود آورده است. امروزه میلیاردها دستگاه بی‌سیم در قالب تلفن‌های همراه، حسگرهای اینترنت اشیا، تجهیزات پوشیدنی و گره‌های شبکه‌ای در حال فعالیت هستند که اغلب به منابع انرژی محدود و باتری‌های با ظرفیت پایین وابسته‌اند. این موضوع به‌ویژه در شبکه‌های نسل پنجم و فراتر از آن که نیازمند نرخ داده‌ی بالا، تاخیر کم و اتصال انبوه دستگاه‌ها هستند، به یک مسئله‌ی اساسی تبدیل شده است.

در چنین شرایطی، کاهش وابستگی تجهیزات بی‌سیم به باتری و افزایش طول عمر آن‌ها به یکی از اهداف کلیدی طراحی سیستم‌های مخابراتی تبدیل شده است. یکی از راهکارهای نوین برای پاسخ به این نیاز، بهره‌برداری از سیگنال‌های فرکانس رادیویی (RF) به‌عنوان منبع انرژی است. از آنجا که سیگنال‌های RF به‌طور ذاتی در فرآیند مخابره‌ی اطلاعات وجود دارند، ایده‌ی برداشت انرژی از این سیگنال‌ها و استفاده‌ی همزمان از آن‌ها برای انتقال داده، توجه پژوهشگران و صنعت را به خود جلب کرده است.

بر این اساس، مفهوم انتقال همزمان اطلاعات و توان بی‌سیم یا Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT)مطرح شده است. در سیستم‌های مبتنی برSWIPT ، گیرنده‌ها قادرند علاوه بر استخراج اطلاعات، بخشی از انرژی سیگنال دریافتی را نیز برای تغذیه‌ی مدارات خود یا شارژ باتری‌ها برداشت کنند. این قابلیت، SWIPT را به گزینه‌ای جذاب برای شبکه‌های متراکم، سیستم‌های کم‌مصرف و سناریوهای آینده‌ی مخابرات بی‌سیم تبدیل کرده است.

در کنارSWIPT ، استفاده از فناوری‌هایی نظیر دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA) بیم‌فرمینگ و شبکه‌های رله‌ای نقش مهمی در بهبود کارایی طیفی و انرژی ایفا می‌کند. ترکیب این فناوری‌ها با SWIPT امکان طراحی سیستم‌هایی را فراهم می‌سازد که نه‌تنها نرخ داده‌ی بالاتری ارائه می‌دهند، بلکه از منظر مصرف انرژی نیز بهینه‌تر عمل می‌کنند. به همین دلیل، بررسی و تحلیل سیستم‌های مبتنی بر SWIPT در کنار معماری‌های پیشرفته‌ی مخابراتی، به یکی از محورهای مهم پژوهشی در شبکه‌های5G و 6G تبدیل شده است.

این پژوهش، با تمرکز بر سیستم‌های مبتنی بر SWIPT، مفاهیم پایه، معماری‌ها، مدل‌های برداشت انرژی (خطی و غیرخطی)، اصول NOMA و تحلیل عملکرد در شبکه‌های رله‌ای و CR را بررسی کرده و به نقش SWIPT-NOMA در افزایش نرخ، کاهش خطا و بهبود بهره‌وری انرژی در شبکه‌های 6G می‌پردازد.

مفاهیم پایه انتقال همزمان اطلاعات و توان بی‌سیم(SWIPT)

با افزایش سریع تعداد گره‌های بی‌سیم و نیاز به شبکه‌های پایدار، ایده‌ی استفاده‌ی همزمان از سیگنال‌های RF برای انتقال اطلاعات و تأمین انرژی مطرح شد. در سیستم‌های مخابراتی سنتی، سیگنال‌های رادیویی صرفاً حامل داده هستند و انرژی موجود در آن‌ها به هدر می‌رود (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) SWIPT این محدودیت را از بین می‌برد و امکان برداشت انرژی از همان سیگنال اطلاعاتی را فراهم می‌کند، که به ویژه در شبکه‌های IoT و گره‌های کم‌توان اهمیت دارد.

اصول اولیه‌ی انتقال توان بی‌سیم به آزمایشات نیکولا تسلا در اواخر قرن ۱۹ بازمی‌گردد که وی تلاش کرد انرژی را به صورت بی‌سیم منتقل کند. در دهه‌های بعد، تکنیک‌های نزدیک-میدانی مثل القای مغناطیسی و تکنیک‌های دور-میدانی با استفاده از مایکروویو توسعه یافتند. با ظهور IoT و شبکه‌های متراکم، SWIPT به‌عنوان یک فناوری کلیدی برای کاهش وابستگی به باتری و افزایش خودکفایی انرژی گره‌ها مطرح شد.

Varshneyدر سال ۲۰۰۸ مفهوم مبادله‌ی نرخ-انرژی (Rate-Energy Trade-off) را معرفی کرد. به این معنی که افزایش توان برداشت انرژی می‌تواند منجر به کاهش کیفیت سیگنال اطلاعاتی و بالعکس شود. این ایده پایه‌ای برای طراحی سیستم‌های SWIPTشد و بعدها با ظهور روش‌های پیشرفته‌تر مثل Time Switching و Power Splitting تکمیل گردید.

معماری‌ها و روش‌های پیاده‌سازی

در گیرنده‌هایSWIPT ، سیگنال دریافتی به دو بخش پردازش اطلاعات (ID – Information Decoding) و برداشت انرژی (EH – Energy Harvesting)تقسیم می‌شود. سه معماری اصلی وجود دارد:

Time Switching (TS) : گیرنده بین حالت دریافت اطلاعات و برداشت انرژی به صورت متناوب سوئیچ می‌کند. اگر T دوره زمانی یک فریم باشد، βT برای برداشت انرژی و (1-β)T برای دریافت اطلاعات اختصاص می‌یابد. این روش ساده و مناسب پیاده‌سازی است اما نرخ داده مؤثر کاهش می‌یابد.

فرمول توان برداشت شده:

$$P_h = \frac{\eta \beta P_{\text{in}}}{1-\beta} \quad , \; P_{\text{in}} < P_{\text{sat}}$$

P_hتوان برداشت شده، η بهره یا کارایی تبدیل انرژی، β ضریب تقسیم توان، P_{sat} حداکثر توان قابل جمع اوری است.

این رابطه فقط در ناحیه غیر اشباع درست است و قید پذاشته شده به همبن علت میباشد.

Power Splitting (PS) : سیگنال دریافتی به‌طور همزمان به دو مسیر تقسیم می‌شود. نسبت ρ از توان برای برداشت انرژی و (1-ρ)برای پردازش اطلاعات استفاده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بالایی دارد و امکان بهینه‌سازی نرخ–انرژی را فراهم می‌کند.

$$P_{EH} = \eta \rho Ps|\mathrm{h}|^2$$

Antenna Switching (AS) :در سیستم‌های MIMO یا چندآنتنی، برخی آنتن‌ها به برداشت انرژی و برخی به دریافت اطلاعات اختصاص می‌یابند. این روش در کاربردهای MIMO موثر است و پیاده‌سازی سخت‌افزاری کمتری نیاز دارد.

مدل‌های برداشت انرژی(EH Models)

در سیستم های سوییپت نقش حیاتی دارند زیرا دقت عملکرد شبکه به مدل بستگی دارد. در واقع نحوه تبدیل انرژی RF به انرژی الکتریکی و محدودیت های عملی مدارهای رکتیفایر رفتار واقعی شبکه را تعیین میکند. به دلیل رفتار غیرخطی مدارهای یکسوساز و محدودیت‌های فیزیکی، قابل مدل‌سازی دقیق نیست. مدل‌های متداول:

مدل خطی: $P_{EH} = \eta \, . P_{in}$

مدل غیرخطی(Non-linear EH) :

$$\begin{cases} \dfrac{\eta \, \beta P_{\mathrm{in}}}{1-\beta} \, , & P_{in} < P_{sat} \\ \dfrac{\eta \, \beta P_{\mathrm{sat}}}{1-\beta} \, , & P_{in} \geq P_{sat} \end{cases}$$

بازده در توان‌های مختلف تغییر می‌کند و غالباً با یک آستانه (P_sat) مدل می‌شود:

مدل شبه‌پارامتریک: از معادلات logistic یا sigmoid برای تقریب رفتار واقعی یکسوسازها استفاده می‌کند و تحلیل ریاضی دقیق‌تری فراهم می‌آورد.

$$P_{\mathrm{EH}} = \frac{P_{\max}}{1 + \exp(-\mathrm{a}(P_{\mathrm{in}}-\mathrm{b}))}$$

مبادله نرخ-انرژی(Rate-Energy Trade-off)

همان‌طور که گفته شد، اختصاص توان بیشتر به برداشت انرژی معمولاً منجر به کاهش SINR و نرخ داده می‌شود. در یک کانال Rayleigh، نرخ اطلاعات از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$\mathrm{R} = \log(1 + \mathrm{SNR}) = \log_2 \frac{(1\text{-}\rho)\eta\, Ps|\mathrm{h}|^2}{\sigma^2}$$

کاربردهای SWIPT در شبکه‌های 5G,4G

IoTو سنسورهای کم‌انرژی: خودکفایی انرژی و کاهش نیاز به تعویض باتری

شبکه‌های رله‌ای: گره‌های رله می‌توانند انرژی خود را از سیگنال‌ها برداشت کنند و پوشش شبکه را افزایش دهند

Cognitive Radio : کاربران ثانویه می‌توانند هم اطلاعات و هم انرژی از کانال‌های اولیه برداشت کنند

شبکه‌های متراکم و THz: در 6G با path loss شدید، SWIPTهمراه با Massive MIMO و beamforming به انتقال پایدار انرژی کمک می‌کند

اصول و مفاهیمNOMA

با رشد سریع تعداد کاربران و گره‌ها در شبکه‌های بی‌سیم، استفاده از روش‌های سنتی دسترسی چندگانه Orthogonal Multiple Access (OMA) مثل TDMA ، FDMA و OFDMA دیگر قادر به تأمین نیازهای نسل ۵ و ۶ نیست. محدودیت پهنای باند و نیاز به اتصال همزمان تعداد زیادی کاربر، توسعه‌ی Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) را اجتناب‌ناپذیر کرده است.

NOMAاساساً به کاربران اجازه می‌دهد که در یک منبع فرکانسی و زمانی مشترک داده خود را ارسال یا دریافت کنند، اما با اختصاص توان متفاوت و استفاده از تکنیک تفکیک تداخل (SIC – Successive Interference Cancellation) در گیرنده، کاربران از هم تفکیک می‌شوند.

NOMAبرای اولین بار در دهه ۲۰۱۰ به عنوان بخشی از مطالعات 5G مطرح شد، با هدف حل مشکلات شبکه‌های متراکم و افزایش Spectral Efficiency (SE) ایده اصلی بر مبنای Superposition Coding (SC) در فرستنده و SIC در گیرنده است:

Superposition Coding : سیگنال کاربران در دامنه توان ترکیب می‌شوند، به طوری که کاربران نزدیکتر به فرستنده قدرت کمتری دریافت می‌کنند و کاربران دورتر قدرت بیشتری دریافت می‌کنند.

Successive Interference Cancellation : کاربر نزدیک ابتدا سیگنال کاربران دورتر را تخمین و حذف می‌کند، سپس سیگنال خود را بازیابی می‌کند. این روش باعث می‌شود interference مدیریت شود و نرخ داده بهینه گردد.

مزیت اصلی NOMA نسبت به OMA در حفظ منابع طیفی و افزایش جمع نرخ داده‌ها (sum rate) است، به‌ویژه در سناریوهای متراکم و با تفاوت فاصله کاربران از فرستنده.

انواعNOMA

Power-Domain NOMA (PD-NOMA) : رایج‌ترین نوعNOMA ، بر پایه اختصاص توان متفاوت به کاربران است.

کاربر نزدیک (Near User) توان کمتر و کاربر دور (Far User) توان بیشتر دریافت می‌کند.

معادله SINR برای کاربران:

$$\gamma_{\text{near}} = \frac{\alpha P |h_{n\text{ear}}|^2}{\sigma^2}$$

$$\gamma_{\text{far}} = \frac{(\alpha\text{-}1) P |h_{\text{far}}|^2}{\alpha P |h_{\text{far}}|^2 + \sigma^2}$$

Code-Domain NOMA (CD-NOMA) :

کاربران با کدهای خاص و اسپارس تمایز می‌یابند، مشابه SCMA (Sparse Code Multiple Access) یا PDMA

پیچیدگی گیرنده بالاتر است اما توانایی پشتیبانی از تعداد کاربران بیشتر را فراهم می‌کند.

Cooperative NOMA (C-NOMA):

کاربر نزدیک به عنوان رله برای کاربر دورتر عمل می‌کند.

ترکیب با SWIPT یاEnergy Harvesting ، امکان برداشت انرژی و انتقال اطلاعات همزمان فراهم می‌شود.

SNR نهایی کاربر دور در حالت cooperative :

$$\gamma_{\mathrm{SU2}}{}^{\mathrm{x2}} = \frac{\zeta_2 P_{EH}|\mathrm{h}|^2}{\psi\zeta_1 P_{EH}|\mathrm{h}|^2 + N_0}$$

SIC و اثرات Imperfect SIC

در عمل، اجرای کامل SIC دشوار است و مقداری تداخل باقی می‌ماند، که Residual Interference (RI) یا ψ نامیده می‌شود.

این اثر بر نرخ داده و احتمال outage تأثیر می‌گذارد:

SINR با imperfect SIC برای کاربر دور:

$$\gamma_{far} = \frac{(1\text{-a})\mathrm{P}|\mathrm{h}|^2}{\mathrm{aP}|\mathrm{h}|^2 + \psi(\mathrm{aP}|\mathrm{h}|^2) + \sigma^2}$$

با افزایشψ ، نرخ کاربران کاهش یافته و احتمال قطع اتصال (Outage Probability) افزایش می‌یابد.

Achievable Rate: $\mathrm{R} = \log_2(1 + \mathrm{SIN}R_k)$

مزایا و کاربردها در شبکه‌های نسل آینده

افزایش بهره‌وری طیفی NOMA :به‌طور همزمان چند کاربر را در یک بلاک فرکانسی پشتیبانی می‌کند.

پشتیبانی از :Massive Connectivity مناسب IoT و سنسورهای متراکم.

همکاری با SWIPT و رله‌ها: امکان برداشت انرژی توسط رله‌ها و انتقال اطلاعات کاربران دورتر.

یکپارچگی با فناوری‌های پیشرفته مانند:

Massive MIMO

RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces)

Cognitive Radio ,SAGIN

ISAC (Integrated Sensing and Communication)

ادغام SWIPT و NOMA در شبکه‌های رله‌ای و Cognitive Radio

در شبکه‌های بی‌سیم نسل ۵ و ۶، افزایش پوشش، بهره‌وری طیفی و کارایی انرژی از اولویت‌های اصلی است. ترکیب SWIPT و NOMA، همراه با استفاده از رله‌ها و محیط‌های Cognitive Radio (CR) ، یک راهکار جامع برای رسیدن به این اهداف ارائه می‌دهد.

ایده‌ی اصلی این است که کاربران نزدیک یا رله‌ها نه تنها اطلاعات را منتقل می‌کنند، بلکه انرژی مورد نیاز خود یا کاربران دیگر را از سیگنال‌های دریافتی برداشت می‌کنند. این رویکرد چندین مزیت کلیدی دارد:

کاهش وابستگی به منابع انرژی خارجی و باتری.

افزایش نرخ داده کاربران دور با کمک cooperative NOMA.

امکان کار همزمان شبکه اولیه (Primary Network) و ثانویه (Secondary Network) در CR با مدیریت تداخل.

یک شبکه SWIPT-NOMA با رله مشترک در CR شامل اجزای زیر است:

شبکه اولیه(Primary Network – PN) شامل فرستنده اولیه (PT) و گیرنده اولیه(PU)

شبکه ثانویه(Secondary Network – SN) شامل فرستنده ثانویه (ST) و دو گیرنده SU_1 وSU_2

SU_1نزدیک به ST عمل می‌کند و همزمان به عنوان رله مشترک برای SU_2 و PN عمل می‌کند.

پروتکل‌های رله:

رله Decode-and-Forward (DF) ، سیگنال را دریافت، دیکد و دوباره ارسال می‌کند.

Time Switching (TS)و Power Splitting (PS) انرژی خود را برداشت کرده و اطلاعات را منتقل می‌کند.

کانال‌ها معمولاً با Rayleigh Fading مدل می‌شوند. قدرت سیگنال دریافتی به فاصله، توان ارسالی و ضریب fading وابسته است:

$$Prx = Pt\,|h|^2 \mathrm{d}^{-\mathrm{m}}$$

که Pt توان فرستنده، h ضریب کانال و m نمای کاهش مسیر است.

مدل برداشت انرژی(Energy Harvesting)

مدل خطی

$$P_{EH} = \eta \,.P_{in}$$

η بازده برداشت انرژی P_{in} توان دریافتی از سیگنالRF این مدل بسیار ساده است ولی در توان‌های بالا دقت ندارد.

مدل غیرخطی در عمل، مدارهای یکسوساز محدودیت دارند و در توان‌های بالا سیر اشباع (saturation) پیدا می‌کنند:

$$\begin{cases} \dfrac{\eta\,\beta P_{\mathrm{in}}}{1-\beta}\ , & P_{in} < P_{sat} \\ \dfrac{\eta\,\beta P_{\mathrm{sat}}}{1-\beta}\ , & P_{in} \geq P_{sat} \end{cases}$$

B نسبت زمانی اختصاص یافته به برداشت انرژی درTS ، P_{sat}حد آستانه توان برداشت، SU_1 قدرت قابل استفاده برای ارسال دوباره توسط رله میباشند.

استراتژی انتقال سیگنال درSWIPT-NOMA

سوپرپوزیشن سیگنال: STسیگنال‌ها را با نسبت‌های توان α و 1 α-ترکیب می‌کند ابتدا سیگنال دور (x_2) را دیکد و حذف می‌کند(SIC) سپس سیگنال خود را بازیابی می‌کند.

ترکیب دو مسیر (direct + relay) نرخ خطا را کاهش می‌دهد و Outage Probability را پایین می‌آورد.

معیارهای عملکرد

Outage Probability (OP) یعنی احتمال اینکه SINR زیر حداقل مورد نیاز باشد. این معیار در شبکه‌های SWIPT-NOMA اهمیت ویژه دارد، زیرا انرژی برداشت شده توسط رله به کاهش مصرف کل کمک می‌کند.

کاربرد درCognitive Radio

Shared Relay CR-NOMA: SU_1 نه تنها برای SU_2 عمل می‌کند، بلکه به PN نیز کمک می‌کند.

به علت محدودیت تداخل (Interference Threshold Q) توان رله کنترل می‌شود. مقایسه با CR-NOMA معمولی نشان می‌دهد در این مورد OPکمتر Throughputبیشتر و EE بهتر را خواهیم داشت.

مزایا :

Beamformingو جمرهای هوشمند برای کاهش تداخل و جلوگیری از شنود اطلاعات.

پوشش بهتر و کاهش OP برای کاربران دور

افزایش بهره‌وری طیفی با استفاده ازNOMA

کاهش مصرف انرژی کل از طریقSWIPT

قابلیت همکاری با CR و فناوری‌های نسل ۶

کاربردهای عملی SWIPT-NOMA در شبکه‌های G6

با ظهور نسل ششم شبکه‌های بی‌سیم، الزامات جدیدی برای نرخ‌های فوق‌العاده بالا، تأخیر فوق‌العاده کم، و مصرف انرژی بهینه مطرح شده است SWIPT-NOMA با ادغام انتقال همزمان اطلاعات و انرژی و دسترسی چندگانه غیرارتوگونال، به‌عنوان یک فناوری کلیدی نقش‌آفرینی می‌کند. در ادامه، کاربردهای عملی آن در محیط‌های پیشرفته شبکه 6 Gبررسی می‌شود.

SWIPT-NOMA در باند THz و شبکه‌های فوق متراکم چالش‌های زیر را دارد

افت مسیر شدید (Path Loss) در باندTHz ، حساسیت بالا به پدیده‌ی Blockage و فیدینگ، افزایش نیاز انرژی برای دستگاه‌ها وIoT ها

در SWIPT-NOMA از راهکارهای زیر میتوان استفاده کرد:

استفاده از Relaying Cooperative برای پوشش کاربران دور و کاهشOP

تقسیم توان یا زمان بهینه برای برداشت انرژی و اطلاعات در رله‌ها

ترکیب با Power-Domain NOMA برای افزایش بهره‌وری طیفی در شبکه‌های فوق متراکم

SWIPT-NOMAوMassive MIMO

Massive MIMO با استفاده از صدها آنتن، قابلیت Beamforming دقیق را فراهم می‌کند.

ترکیب با SWIPT-NOMA مزایای زیر را دارد، افزایش قدرت سیگنال دریافتی برای برداشت انرژی، کاهش تداخل با Beamformingبهینه، امکان سرویس‌دهی همزمان به تعداد زیادی کاربر با نرخ بالا

SWIPT-NOMA وReconfigurable Intelligent Surfaces (RIS)

RISشامل سطح‌های متغیر با واحدهای بازتابنده هوشمند است که زاویه و فاز سیگنال‌ها را کنترل می‌کنند و در سوییپت مزایایی اعم از : تقویت سیگنال کاربران دور، افزایش توان برداشت انرژی بدون افزایش توان فرستنده، کاهش Interference برای کاربران نزدیک را دارد.

SWIPT-NOMAوIntegrated Sensing and Communication (ISAC) :

ISACترکیب عملکرد ارتباطات و سنسینگ است. SWIPT-NOMAدر ISAC نقش کلیدی دارد برای مثال سیگنال‌های ارسالی علاوه بر انتقال اطلاعات و انرژی، برای سنسینگ محیط استفاده می‌شوند. کاربران و رله‌ها می‌توانند با برداشت انرژی، مستقل از باتری به سنسینگ و ارتباط ادامه دهند.

کاربرد در شبکه‌های ترکیبی SAGIN وIoT

SAGIN: Space-Air-Ground Integrated Networks ، ماهواره‌ها UAVها و شبکه زمینی به‌صورت هم‌زمان کار می‌کنند

SWIPT-NOMAدر این محیط‌ها می‌تواند انرژیUAV ها وIoT های دور را تأمین کند، با NOMA کاربران را به‌صورت همزمان سرویس‌دهی کند، با SWIPT و رله‌ها، پوشش و نرخ شبکه افزایش می‌یابد

همچنین با تخصیص توان به کاربران نزدیک و دور و زمان‌بندی برداشت انرژی و اطلاعات منابع را مدیریت میکند.

مزایا و چشم‌انداز

افزایش نرخ داده با استفاده از NOMA وBeamforming/THz ، بهره‌وری انرژی بالا با SWIPT وRIS ، پایداری و خودکفایی شبکه با ترکیب رله‌ها و انرژی برداشت‌شده، ادغام با ISAC و SAGIN برای تحقق شبکه‌های هوشمند و خودمختار نسل ۶

پیش‌بینی می‌شود ترکیب SWIPT-NOMA با AI و یادگیری ماشین برای مدیریت منابع، بهینه‌سازی Beamforming و تخصیص انرژی، به عنوان محور اصلی تحقیقات 6 Gباقی بماند.

جمع‌بندی نهایی و نتیجه‌گیری جامع

با رشد روزافزون دستگاه‌ها و کاربردهای بی‌سیم در عصر 5G و ورود به شبکه‌های 6G، فشار بر منابع انرژی و طیف رادیویی افزایش یافته است. فناوری‌های نوینی مانند SWIPT و NOMA به‌طور مستقیم به حل این مشکلات می‌پردازند و با ترکیب مناسب، شبکه‌های بی‌سیم را قادر می‌سازند که علاوه بر بهره‌وری طیفی بالا، از منابع انرژی به‌صورت بهینه استفاده کنند و نیاز به باتری‌های بزرگ و پرهزینه را کاهش دهند.

دستاوردهای کلیدی SWIPT وNOMA

SWIPTامکان برداشت انرژی از سیگنال‌های RF و انتقال همزمان اطلاعات را فراهم می‌کند. این فناوری با استفاده از معماری‌هایی مانند Time Switching (TS) وPower Splitting (PS) ، به تعادل میان نرخ داده و انرژی برداشت‌شده کمک می‌کند و باعث پایداری و خودکفایی انرژی شبکه می‌شود. استفاده از مدل‌های غیرخطیEH ، تحلیل دقیق‌تر و شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تر عملکرد شبکه را ممکن می‌سازد.

NOMAبا بهره‌گیری از تکنیک‌های Power-Domain Multiplexing و Successive Interference Cancellation (SIC) امکان اشتراک منابع فرکانسی و زمانی میان چندین کاربر را فراهم می‌کند. این رویکرد باعث افزایش بهره‌وری طیفی، پشتیبانی از کاربران متعدد و کاهش OP نسبت به OMA می‌شود. توسعه روش‌های Cooperative NOMA و مدیریت Residual Interference، عملکرد شبکه در محیط‌های متراکم را بهبود می‌بخشد.

ترکیب SWIPT و NOMA در شبکه‌های رله‌ای، به ویژه درshared relay CR-NOMA ، سبب افزایشCoverage ، کاهش Outage Probability و بهبود Energy Efficiency (EE) می‌شود. کاربران نزدیک می‌توانند نقش رله را برعهده بگیرند، انرژی برداشت کنند و سیگنال کاربران دور را تقویت کنند.

مزایا و تأثیرات در شبکه‌های 6G

ترکیب SWIPT وNOMA ، به‌ویژه در بستر شبکه‌های رله‌ای وCR ، مزایای زیر را در 6G به همراه دارد:

پشتیبانی از اتصالات فوق متراکم:(Ultra-Dense Connectivity)

کاربران متعدد می‌توانند در یک بلوک زمانی و فرکانسی مشترک سرویس دریافت کنند.

بهره‌گیری از NOMA و Beamforming باعث کاهش تداخل و افزایش Throughput می‌شود.

پایداری انرژی و خودکفایی شبکه:

برداشت انرژی از سیگنال‌های RF و ذخیره آن در باتری‌های کمکی یا سوپرکپاسیتورها.

کاهش وابستگی به شبکه‌های برق یا تعویض باتری‌های سخت‌افزاری.

پوشش گسترده و قابلیت رله‌ای: Cooperative SWIPT-NOMAو Shared Relay CR-NOMA باعث بهبود کیفیت سرویس در کاربران دور می‌شود.

کاهش OP برای کاربران اولیه و ثانویه.

سازگاری با فناوری‌های نوظهور 6G مثلا ادغام باMassive MIMO ، THz Communications، RISو.ISAC

امکان استفاده از شبکه‌های SAGIN با انرژی خودکفا و تصمیم‌گیری هوشمند.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های متعددی نیز وجود دارد:

مدل‌سازی EH غیرخطی و مدیریت انرژی پیچیده، خطای SIC و تخصیص توان بهینه، افت مسیر و بلوکه شدن سیگنال در باندهای THz و میلی‌متری، امنیت اطلاعات و حریم خصوصی در CR و رله‌های غیرقابل اعتماد و پیچیدگی سخت‌افزاری و هزینه‌های عملیاتی بالا.

این چالش‌ها مستلزم تحقیقات بیشتر در زمینه مدل‌سازی دقیق، الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته، Beamformingو RIS هوشمند، امنیت فیزیکی لایه‌ای و یادگیری ماشین هستند.

مسیرهای پژوهشی آینده

پژوهش‌های آینده باید بر بهینه‌سازی، امنیت، و پیاده‌سازی عملی SWIPT-NOMA تمرکز کنند:

توسعه مدل‌های دقیق EH غیرخطی و شبیه‌سازی رفتار واقعی رکتفایرها.

طراحی الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای تخصیص دینامیک توان، TS/PSو.Beamforming

ادغام RIS و UAV برای پوشش بهتر و افزایش EE و.SE

پیاده‌سازی ISAC و SAGIN برای شبکه‌های خودمختار با انرژی خودکفا.

تقویت امنیت فیزیکی و مقابله با eavesdropping در CR و.Cooperative NOMA

جمع‌بندی نهایی

در نهایت، SWIPTو NOMA با ترکیب در شبکه‌های رله‌ای وCR ، هسته فناوری‌های ۶ Gرا تشکیل می‌دهند. این ترکیب:

بهره‌وری طیفی و انرژی را افزایش می‌دهد،

امکان پشتیبانی از کاربران متراکم و شبکه‌های خودکفا را فراهم می‌کند،

انعطاف‌پذیری در معماری شبکه و سازگاری با فناوری‌های نوظهور را ارائه می‌دهد.

تحقیقات آینده در این حوزه می‌تواند شبکه‌های بی‌سیم نسل ششم را به سیستم‌های پایدار، امن و با عملکرد بالا تبدیل کند، و تحول چشمگیری در ارتباطات انرژی‌ساز و اطلاعاتی ایجاد نماید.

منابع و مـأخذ:

R. Zaino, A. Kumar, M. Selim, "SWIPT-Enabled Relaying Networks: Achievable Rate Analysis and Design," IEEE Access, 2025.

A. Kumar, R. Zaino, "Concurrent Wireless Power and Information Transfer in MISO-NOMA Systems," Results in Optics, 2025.

N. Ashraf, X. Nguyen, "Performance Analysis of SWIPT-Assisted Cooperative NOMA with Non-Linear Energy Harvesting," IEEE Access, 2025.

C. Song, X. Zhao, J. Liu, "Performance Analysis of Shared Relay CR-NOMA Network Based on SWIPT," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2024.

M. Almekhlafi, H. Kha, X.-X. Nguyen, "Integrated Cooperative SWIPT THz-NOMA Networks for 6G," Brunel University Research Archive, 2025.

X.-X. Nguyen, H. H. Kha, "Optimized Design for Integrated Sensing and Communication Networks Using SWIPT and NOMA," Computer Networks, 2025.

M. M. Selim, A. F. M. S. Shah, "Near-Field NOMA-SWIPT Assisted with Dynamic Metasurface Antennas," ResearchGate, 2026.