

تخصیص بهینه الگوریتمی منابع در کانال رله گوسی دوطرفه کامل جاذب انرژی با قابلیت انتقال بی سیم توان

محمود محصل فقهی^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - mohasselfeghi@tabrizu.ac.ir

چکیده: جذب (یا برداشت) انرژی اخیراً به عنوان یک فناوری برتر برای رفع محدودیت انرژی در شبکه‌های بی سیم نسل آتی و نیز سامانه‌های صنعتی بر پایه اینترنت اشیا و همچنین به عنوان اساس شبکه‌های مخابرات سبز به منظور کاهش مصرف انرژی در فعالیت‌های بشری معرفی شده است. در این مقاله به پژوهش در مورد ارسال مشارکتی در کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره‌های منبع و رله‌ی جاذب انرژی می‌پردازیم. هدف پیشینه‌سازی تعداد کل بیت‌های ارسالی از منبع به مقصد در مدت زمان مشخص از طریق تخصیص بهینه نرخ و توان به گره‌های جاذب انرژی است. همچنین بر اساس قابلیت گره‌های منبع و رله برای انتقال بخشی از انرژی (توان) خود به هم‌دیگر، دو حالت در نظر گرفته می‌شود که شامل انتقال یک طرفه توان از منبع به رله و انتقال دوطرفه توان بین منبع و رله است. مسأله تخصیص منابع از دیدگاه یافتن جواب بهینه الگوریتمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور شرایطی روی نحوه جذب انرژی در گره‌ها در نظر گرفته می‌شود که در آن شرایط، جواب بهینه الگوریتمی برای انتقال یک طرفه توان به دست می‌آید. برای انتقال دوطرفه توان، جواب بهینه الگوریتمی در حالت عمومی ارائه می‌شود. نهایتاً عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی به صورت عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با نتایج ابزار بهینه‌سازی محدب عددی مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: جذب انرژی، دوطرفه کامل، حل بهینه الگوریتمی، تخصیص منابع، کانال رله، انتقال بی سیم توان.

Optimal Algorithmic Resource Allocation in Energy Harvesting Full-Duplex Gaussian Relay Channel with Wireless Power Transfer Capability

M. Mohassel Feghhi¹, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: mohasselfeghi@tabrizu.ac.ir

Abstract: Energy harvesting (EH) (or scavenging) is introduced recently as a prominent technology for alleviating energy or power delimitations of next generation wireless networks, such as industrial systems based on the internet of things (IoT), and also as a bases for the green communication networks, to reduce energy consumption in man-made activities. In this paper, cooperative transmission is considered in full-duplex Gaussian relay channel with energy harvesting source (S) and relay (R) nodes. This paper aims at maximizing total number of transmitted bits from S to destination (D) in a determined time through optimal rate and power allocation to the EH nodes. Also, based on the nodes' capabilities to transfer some part of their energy (power) to each other, two cases are considered: one-way power transfer (PT) from S to R, and two-way PT between S and R. Optimal resource allocation is investigated to find algorithmic solution. For this purpose, conditions on nodes' EH profile are considered, where optimal algorithmic solution is obtained in one-way PT case. In the case of two-way PT, optimal solution in general form is presented. Finally, the performance of the proposed algorithms is analyzed numerically and compared with numerical convex optimization tools.

Keywords: Energy harvesting, Full-duplex, Optimal algorithmic solution, Resource allocation, Relay channel, Wireless power transfer.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۲

نام نویسنده مسئول: محمود محصل فقهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه مهندسی مخابرات.

۱- مقدمه

به منظور مرتفع نمودن محدودیت انرژی که یکی از محدودیت های همیشگی شبکه های بی سیم است، جذب انرژی از محیط پیرامون به عنوان یک راه حل نوین اخیراً مطرح شده است. گره های جاذب انرژی با دسترسی به منابع نامحدود انرژی، برای افزایش طول عمر شبکه های مخابراتی بی سیم به کار گرفته می شوند. گره های حسگری که اغلب برای پایش محیط تصادفی مورد استفاده قرار می گیرند، دارای محدودیت در توان باتری مورد استفاده، منابع محاسباتی و فضای ذخیره سازی هستند و اغلب پس از به کارگیری، به دلیل عدم امکان دسترسی به این گره ها، امکان شارژ باتری آن ها وجود ندارد. ممکن است گره ها بخواهند از باتری های بزرگ تر استفاده نمایند که سنگین تر، حجیم تر و گران تر خواهد بود. لذا در صورت اتمام باتری گره، باتری جدید جایگزین آن نمی گردد و گره از کار خواهد افتاد و در صورتی که تعداد زیادی از گره ها در شبکه بدین ترتیب از کار بیفتند، عملکرد شبکه دچار اختلال خواهد شد. لذا طول عمر شبکه یکی از مهم ترین مشخصه های شبکه حسگری است [۱] که به طول عمر گره های شبکه وابسته است.

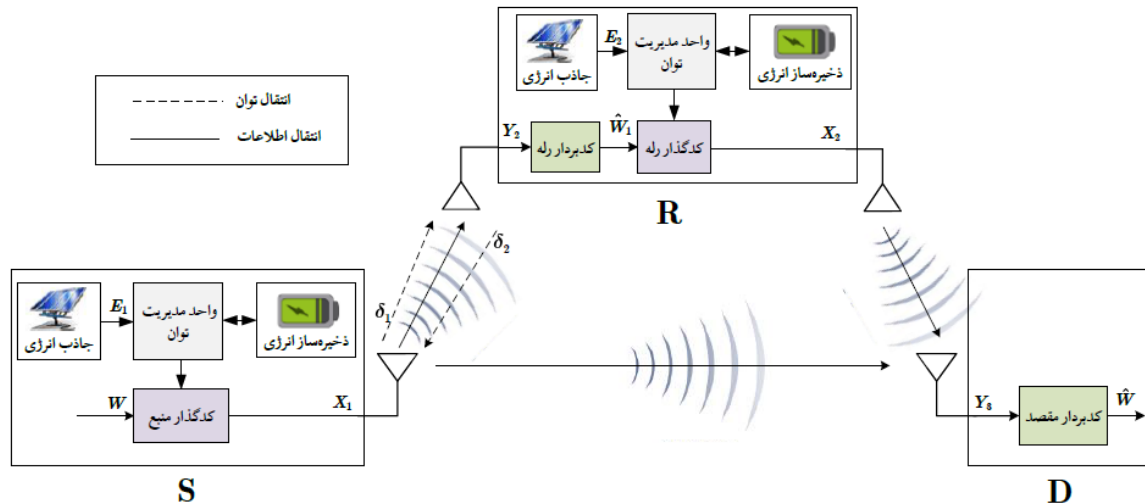
یکی از روش های افزایش طول عمر شبکه با افزایش طول عمر باتری گره های آن که اخیراً مطرح شده است، روش های جذب انرژی است [۲-۴]. جاذب های انرژی، انرژی را از محیط یا منابع دیگر (مانند گرمای بدن) جمع کرده و آن ها را به انرژی الکتریکی تبدیل می نمایند. وسیله های متداول جاذب انرژی عبارتند از سلول های خورشیدی، توربین های بادی، آسیاب آبی، باتری سوختی میکروبی، وسیله های جاذب ارتعاش، مولدهای ترموالکتریک، سلول های پیزوالکتریک و غیره، که انرژی را از محیط جمع آوری می کنند. از میان موارد مذکور، جذب کردن انرژی خورشیدی از طریق اثر فوتوولتائیک^۱ اغلب به عنوان فناوری به کار رفته در بسیاری از گره های حسگر شناخته می شود [۴، ۵]. بر خلاف گره های حسگری که بر اساس باتری کار می کنند، گره های جاذب انرژی به صورت بالقوه به انرژی نامحدود دسترسی دارند؛ اما منبع انرژی و وسیله جاذب انرژی ممکن است طوری باشد که انرژی نتواند در همه زمان ها تولید شود. علاوه بر این، نرخ تولید انرژی ممکن است محدود باشد. لذا بایستی بین پروفایل تولید انرژی در منبع جاذب با پروفایل مصرف انرژی در گره حسگر مطابقت موجود آید.

پژوهش های اولیه در مورد جذب انرژی در شبکه های حسگری در مراجع [۶، ۷] ارائه شدند. در مرجع [۸] ظرفیت شانونی گره حسگر جاذب انرژی که روی کانال AWGN^۲ به ارسال اطلاعات می پردازد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۹] تخصیص برخط^۳ بهینه مجانبی منابع برای گروه وسیعی از توابع فایده در شبکه های مخابراتی جاذب انرژی ارائه شده و نشان داده شده که جواب با لحاظ نمودن الگوی متوسط جذب انرژی و مستقل از پویایی تصادفی آن حاصل می آید. در مرجع [۱۰] ارسال با نرخ ثابت در شبکه های جاذب انرژی در نظر گرفته شده و تحلیل انرژی در چنین شبکه هایی و در کانال های

AWGN و محوشدگی مورد بررسی قرار گرفته است. ارسال توأم اطلاعات و انرژی بر روی لینک بی سیم اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و دارای کاربردهایی در شناسایی فرکانس رادیویی (RFID^۴) [۱۱]، شبکه های محلی تنی (BAN^۵) [۱۲]، پرتوهای توان با استفاده از میکروویو یا لیزر از ماهواره یا هواپیما [۱۳] می باشد. موج الکترومغناطیس انرژی و اطلاعات حمل می کند. اطلاعات بر روی دامنه و فاز موج الکترومغناطیس مدوله می شود، در حالی که انرژی از طریق القای میدان نزدیک یا تشعشع میدان دور انتقال داده می شود. با توجه به این که توان سیگنال به متوسط مربع سیگنال وابسته است، در صورتی که مقدار اطلاعات به میزان تغییرات یا به طور خاص به نرخ آنتروپی سیگنال وابسته است، در نتیجه بیشینه سازی یکی لزوماً منجر به بیشینه شدن دیگری نمی شود. لذا انرژی و اطلاعات محدودیت های متناقضی را در طراحی یک سامانه بی سیم بوجود می آورند [۱۴-۱۷].

در مراجع [۱۸] و [۱۹] مسأله بیشینه سازی گذردهی انتها-به-انتهای در یک شبکه مشارکتی دوپوشی حل شده است. نتیجه بررسی انجام شده این است که خط مشی بهینه توأم برای منبع و رله قابل جداسازی است. به این معنی که منبع، بیشینه سازی گذردهی تک کاربره را با توجه به پروفایل ورود انرژی خود بدون توجه به پروفایل انرژی رله انجام می دهد. رله نیز خط مشی ارسال خود را مطابق با شارش داده ورودی از منبع و نیز پروفایل انرژی ورودی خود تطبیق می دهد. علاوه بر این، راه حل جداسونده فوق یکتا نبوده و لذا امکان وجود راه حل های بهینه دیگر که انرژی کمتری در منبع مصرف می کنند، وجود دارد [۱۹]. در زمینه شبکه های مخابراتی با توان بی سیم، محققین در [۲۰] مفهوم مشارکت انرژی را معرفی نمودند که در آن کاربران بخشی از انرژی جذب شده شان را به منظور شکل دهی و بهینه سازی ورود تصادفی انرژی به اشتراک می گذارند تا عملکرد کلی شبکه را بهبود بخشند. در این جا مشارکت در سطح انرژی باتری به جای سطح سیگنال در شبکه های مشارکتی متداول صورت می گیرد. با این انگیزه که مشارکت و جذب انرژی مزایای زیادی را برای شبکه های مخابراتی نسل آتی فراهم می آورند (از جمله نرخ های داده بالا، کارایی انرژی، و غیره)، یک پرسش اساسی این است که چگونه می توان تخصیص بهینه منابع را در یک کانال رله با گره های جاذب انرژی انجام داد.

برای مطالعه مخابرات مشارکتی در سامانه های جاذب انرژی، در این مقاله مسأله تخصیص بهینه توان در یک کانال رله گوسی دو طرفه کامل (FD^۶) سه گرهی با گره های جاذب انرژی مورد پژوهش قرار می گیرد. تمرکز بر راهبرد رله کدگشایی و گسیل (DF^۷) ناهمدوس^۸ می باشد. اگرچه کران پایین DF ناهمدوس برای ظرفیت کانال رله پایین تر از کران پایین DF همدوس^۹ (که ظرفیت کانال رله نازل است) می باشد، اما پیاده سازی مخابرات ناهمدوس در سامانه های بی سیم راحت تر است. هدف بیشینه سازی تعداد کل بیت هایی است که در بازه زمانی مشخص از گره منبع به گره مقصد ارسال می شوند. در اینجا مدل



شکل ۱: مدل کلی کانال رله گوسی با گره‌های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی.

که در آن a و b به ترتیب بهره‌های کانال منبع-رله و رله-مقصد هستند، با این فرض که بهره کانال منبع-مقصد نرمالیزه در نظر گرفته شود. همچنین داریم $Z_2 \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ و $Z_3 \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$. واحد جاذب انرژی، به جذب انرژی از محیط می‌پردازد. گره‌های فرستنده قادرند تا بخشی از انرژی جذب شده‌شان را به گره‌های دیگر انتقال دهند تا بدین ترتیب کنترل بهتری روی منابع انرژی شبکه داشته باشند. واحد مدیریت توان مقدار انرژی جذب شده به کار رفته برای مخابره اطلاعات و نیز مقدار انرژی منتقل شده به گره‌های دیگر را مشخص می‌نماید. انرژی باقیمانده در واحد ذخیره‌ساز انرژی (به عنوان مثال باتری یا فوق خازن) برای استفاده در آینده ذخیره می‌شود. مسأله مورد بررسی در این مقاله بیشینه سازی تعداد کل بیت‌های است که در مدت زمان T_d از منبع به مقصد ارسال می‌شوند. فرآیند جذب انرژی در منبع و رله همانند مرجع [۲۵] است که از تکرار آن خودداری می‌کنیم. در ادامه مسأله برون خط^{۱۲} را در نظر خواهیم گرفت که در آن لحظات و مقادیر جذب

کلی تر نسبت به پژوهش‌های موجود، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در مدل مورد بررسی، یک مسیر مستقیم بین گره منبع و گره مقصد وجود دارد (بر خلاف [۱۸]، [۲۰]، [۲۱]) و نیز حالت FD بر خلاف حالت نیم‌دوطرفه (HD^{۱۱}) بررسی شده در [۱۹] و [۲۲] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بر اساس توانایی گره‌ها برای انتقال بخشی از انرژی جذب شده به سایر گره‌های شبکه، دو حالت مورد مطالعه قرار می‌گیرد: (۱) انتقال یک‌طرفه انرژی از منبع به رله و (۲) انتقال دوطرفه انرژی بین منبع و رله یا مشارکت انرژی. فرض کرده‌ایم که انتقال انرژی بین گره‌ها بدون هیچ هزینه‌ای مقدور باشد. مطالعه هزینه اشتراک انرژی در بین گره‌ها موضوع تحقیق موازی دیگری است (برای مثال [۲۰] و مراجع موجود در آن را ببینید) که در این مقاله به آن پرداخته نشده است. نمادگذاری‌های به کار رفته در مقاله بدین صورت است: حروف بزرگ (مانند X) بیان گر متغیرهای تصادفی و حروف کوچک (مانند x) بیان گر تحقق آن‌ها است. متغیرهای مرتبط با گره منبع و رله به ترتیب با زیرنویس‌های ۱ و ۲ مشخص می‌شوند. یک بردار با طول N را با حروف ضخیم نشان می‌دهیم (یعنی $\mathbf{V}_i = [V_i^1, V_i^2, \dots, V_i^N]$) که در آن V_i^j زامین مولفه توسط بالانویس j نمایش داده می‌شود (یعنی V_i^j). نمادگذاری‌های اصلی به کار رفته در مقاله در جدول ۱ ارائه شده است.

۲- مدل سامانه

کتاب‌کد، کدگذار، کدبردار و نرخ کانال رله گسسته بدون حافظه (DMRC^{۱۱}) مشابه با [۲۳، فصل ۱۶] قابل تعریف می‌باشد. یک مدل کلی از کانال رله گوسی با گره‌های جاذب انرژی که دارای قابلیت انتقال انرژی هستند، در شکل ۱ نمایش داده شده است. خروجی‌های کانال متناظر با ورودی‌های X_1 و X_2 به صورت زیرند:

$$Y_2 = aX_1 + Z_2 \quad (1)$$

$$Y_3 = X_1 + bX_2 + Z_3 \quad (2)$$

جدول ۱: نمادگذاری به کار رفته در مقاله.

نمادگذاری	
E_1, E_2	به ترتیب انرژی‌های جذب شده در گره منبع و گره رله
T	بردار لحظات زمانی جذب انرژی
P_1, P_2	به ترتیب توان‌های تخصیص یافته به گره منبع و گره رله
T_d	مدت زمان ارسال
K	تعداد لحظات جذب انرژی در مدل جذب انرژی
$\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$	توزیع گوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس σ^2
a	بهره کانال مسیر منبع به رله
b	بهره کانال مسیر رله به مقصد
$\xi, \mu, \vartheta, \phi$	ضرایب لاگرانژ
$\mathcal{C}(x)$	$\log_2(1+x)$
$[x]^+$	$\max\{1, x\}$
N_0	چگالی طیف توان نویز
W	پهنای باند
Ψ	تلفات مسیر

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_t^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{E}_t^i, \quad \forall k \quad (11)$$

اثبات لم. پیوست الف را ببینید.

ملاحظه ۱. ابتدا توان کل را به جای اینکه به صورت $\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$

تعریف کنیم، به صورت $\tilde{\mathbf{P}}_t = \mathbf{P}_1 + b^2 \mathbf{P}_2$ تعریف می‌کنیم. لازم به

ذکر است که یک جواب ممکن P_1^i و P_2^i برای نامساوی

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_t^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{E}_t^i, \quad \forall k$$

$$\sum_{i=1}^k P_t^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_t^i, \quad \forall k$$

افرازبندی ممکن \tilde{P}_t^i به P_1^i و P_2^i الزاماً یک افرازبندی ممکن P_t^i نیست.

با بکارگیری لم ۱، معادلات (۹-۵) به صورت زیر خواهند بود.

$$\max_{\{P_1^i\}, \{\tilde{P}_t^i\}, \{\delta_1^i\}} \sum_{i=1}^{K+1} \left(\lambda^i C \left(\frac{\tilde{P}_t^i}{N_0} \right) + (1 - \lambda^i) C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) \right) l^i \quad (12)$$

$$s.t. P_1^i \geq 0, \tilde{P}_t^i - P_1^i \geq 0, \delta_1^i \geq 0, i = 1, \dots, K + 1, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^k P_1^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_1^i - \delta_1^i, \quad i = 1, \dots, K + 1, \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_t^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{E}_t^i, \quad i = 1, \dots, K + 1, \quad (15)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این مسأله محدب است. لذا

لاگرانژین به فرم زیر قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} L = & \sum_{i=1}^{K+1} \left(\lambda^i C \left(\frac{\tilde{P}_t^i}{N_0} \right) + (1 - \lambda^i) C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) \right) l^i \\ & - \sum_{k=1}^K \xi_k \left(\sum_{i=1}^k P_1^i l^i - \sum_{i=0}^{k-1} (E_1^i - \delta_1^i) \right) \\ & - \sum_{k=1}^K \mu_k \left(\sum_{i=1}^k \tilde{P}_t^i l^i - \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{E}_t^i \right) \\ & + \sum_{i=1}^{K+1} \vartheta_i P_1^i + \sum_{i=1}^{K+1} \eta_i (\tilde{P}_t^i - P_1^i) + \sum_{i=1}^{K+1} \phi_i \delta_1^i \end{aligned} \quad (16)$$

شرایط بهینگی KKT^{۱۷} برای (۱۶) عبارتند از:

$$\frac{(1 - \lambda^i) [a^2]^\dagger}{[a^2]^\dagger P_1^i + N_0} - \sum_{k=i}^K \xi_k + \vartheta_i - \eta_i = 0, \quad \forall i \quad (17)$$

$$\frac{\lambda^i}{\tilde{P}_t^i + N_0} - \sum_{k=i}^K \mu_k + \eta_i = 0, \quad \forall i \quad (18)$$

$$-\sum_{k=i}^K \xi_k + \phi_i = 0, \quad \forall i \quad (19)$$

انرژی در منبع و رله (E_1^i و E_2^i) پیش از آغاز ارسال برای منبع و رله مشخص هستند. علاوه بر این، در نظر گرفتن مسأله برون‌خط، گره‌های فرستنده را قادر می‌سازد تا انرژی‌های جذب شده را در حالت برون‌خط به اشتراک گذارند. همچنین از هرگونه عدم کارایی در انتقال انرژی بین گره‌ها صرف‌نظر شده است.

برای رله نیز از راهبرد DF ناهمدوس استفاده شده است که از لحاظ پیاده‌سازی نسبت به حالت همدوس مناسب‌تر است. با این طرح کدنگاری، نرخ زیر برای DMRC دست‌یافتنی است [۲۳، فصل ۱۶].

$$C \geq \max_{p(x_1)p(x_2)} \min \{I(X_1, X_2; Y_3), I(X_1, Y_2 | X_2)\} \quad (3)$$

نرخ متناظر برای کانال رله گوسی بصورت زیر داده شده است.

$$C \geq \min \left\{ C \left(\frac{P_1 + b^2 P_2}{N_0} \right), C \left(\frac{\max\{1, a^2\} P_1}{N_0} \right) \right\} \quad (4)$$

که در آن P_1 و P_2 به ترتیب توان‌های منبع و رله هستند.

۳- انتقال یک‌طرفه انرژی از منبع به رله در کانال رله دوطرفه کامل جاذب انرژی

در این بخش کانال رله گوسی DF ناهمدوس دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی با انتقال یک‌طرفه انرژی از منبع به رله (مشابه با [۲۰]) را در نظر گرفته و به مطالعه جواب بهینه الگوریتمی برای مسأله تخصیص توان در آن می‌پردازیم. در این حالت در شکل ۱ داریم $\delta_1 \neq 0, \delta_2 = 0$. ابتدا مسأله را به فرم زیر فرمول‌بندی می‌کنیم.

$$\max_{\{P_1^i\}, \{P_2^i\}, \{\delta_1^i\}} \sum_{i=1}^{K+1} \left(\lambda^i C \left(\frac{P_1^i + \tilde{P}_2^i}{N_0} \right) + (1 - \lambda^i) C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) \right) l^i \quad (5)$$

$$s.t. P_1^i \geq 0, P_2^i \geq 0, \quad i = 1, \dots, K + 1, \quad (6)$$

$$\delta_1^i \geq 0, \quad i = 1, \dots, K + 1, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^k P_1^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_1^i - \delta_1^i, \quad i = 1, \dots, K + 1, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_2^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_2^i - \delta_1^i, \quad i = 1, \dots, K + 1, \quad (9)$$

در آن δ_1^i بیانگر انتقال انرژی در دوره i از منبع به رله است و نیز $\tilde{\mathbf{P}}_2 = b^2 \mathbf{E}_2$ و $\tilde{\mathbf{P}}_1 = b^2 \mathbf{P}_2$ سپس تابع هزینه را به صورت زیر تغییر می‌دهیم.

$$C \geq \min \left\{ C \left(\frac{\tilde{P}_t}{N_0} \right), C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1}{N_0} \right) \right\} \quad (10)$$

که در آن $\tilde{\mathbf{P}}_t = \mathbf{P}_1 + \tilde{\mathbf{P}}_2$

لم ۱. قید علیت انرژی برای رله در (۹) قابل جایگزینی با قید زیر است.

$$s.t. \tilde{P}_t^i \geq 0, \quad i = 1, \dots, K + 1, \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_t^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{E}_t^i, \quad k = 1, \dots, K + 1, \quad (32)$$

الگوریتم ۱: الگوریتم تخصیص توان بهینه در انتقال انرژی یک طرفه از منبع به رله.

ورودی: T و E_T, E_1
خروجی: L_T, L_1, P_T, P_1

۱: تخصیص توان کل

۲: قرار بده $\tilde{E}_t^i = E_1^i + b^2 E_T^i, i = 1, \dots, K + 1$

۳: تخصیص توان بهینه را برای \tilde{P}_t^i بصورت زیر بیاب

$$o_v = \operatorname{argmin}_{o_{v-1} < i \leq K+1} \frac{\sum_{j=o_{v-1}}^{i-1} \tilde{E}_t^j}{T^i - T^{o_{v-1}}}$$

$$\tilde{P}_t^{v*} = \frac{\sum_{j=o_v-1}^{o_v} \tilde{E}_t^j}{T^{o_v} - T^{o_v-1}}$$

۴: مسأله امکان پذیری برای تخصیص توان در منبع

۵: اگر $\exists \delta_1^* \geq 0$ s.t. $\sum_{i=1}^k \frac{\tilde{P}_t^{i*}}{[a^2]^i} l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_1^i - \delta_1^*$ $\forall k$ آنگاه

۶: تخصیص توان مجزا برای منبع ورله

۷: تخصیص توان بهینه را برای منبع بصورت $P_T^{v*} = \frac{\tilde{P}_t^{v*}}{[a^2]^i}$ بیاب

۸: تخصیص توان بهینه را برای رله بصورت $P_T^{v*} = \frac{([a^2]^i - 1) \tilde{P}_t^{v*}}{[a^2]^i b^2}$ بیاب

۹: وگرنه

۱۰: بازگشت جواب بهینه الگوریتمی در حالت کلی معلوم نیست.

۱۱: پایان

این معادل است با قرار دادن $\lambda^i = 1, \forall i$ در (۱۲). در این حالت، با جایگزینی $\lambda^i = 1, \forall i$ در (۲۵) خواهیم داشت

$$\tilde{P}_t^i = \frac{1}{\sum_{k=i}^K \mu_k} - N_0, \quad \forall i \quad (33)$$

مشخص است که جواب بهینه برای \tilde{P}_t^i بر اساس الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر قابل حصول است [۲۵]. چراکه سه لم لازم برای این استنتاج [۲۶، لم ۱، ۲ و ۳] با استفاده از (۳۳) قابل حصول است. اگر قرار دهیم $\tilde{P}_t^i = [a^2]^i P_1^*, \forall i$ ، رابطه (۲۸) برآورده خواهد شد. با جایگذاری در (۲۹) خواهیم داشت $\exists \delta_1^* \geq 0, \forall i$ به گونه‌ای که $\sum_{i=1}^k \frac{\tilde{P}_t^i}{[a^2]^i} l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_1^i - \delta_1^*, \forall k$. در نتیجه تخصیص بهینه بصورت زیر خواهد بود

$$\tilde{P}_1^{i*} = \frac{\tilde{P}_t^{i*}}{[a^2]^i}, \quad \tilde{P}_2^{i*} = \frac{([a^2]^i - 1) \tilde{P}_t^{i*}}{[a^2]^i b^2}, \quad \forall i \quad (34)$$

این تخصیص با توجه به تعریف ۱ ممکن خواهد بود. توجه شود که این افزایش سبب می‌گردد \tilde{C}_1 و \tilde{C}_2 مساوی شوند. شایان ذکر است هنگامی که منبع در شرایط مناسب جذب انرژی است، الگوریتم ۱ هرگز وارد خط ۱۰ (بازگشت) نمی‌گردد. این بدان معنی است که شرط موجود در خط ۵ همواره برآورده خواهد شد. بدین ترتیب اثبات پایان می‌یابد. □

ملاحظه ۲: شرایطی را در نظر بگیرید که انرژی جذب شده در منبع به اندازه کافی بزرگ باشد به گونه‌ای که جواب بهینه در شرایطی به

شرایط لقی مکمل^{۱۴} نیز به صورت زیر خواهند بود.

$$\mu_k \left(\sum_{i=1}^k \tilde{P}_t^i l^i - \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{E}_t^i \right) = 0, \quad \forall k \quad (20)$$

$$\xi_k \left(\sum_{i=1}^k P_1^i l^i - \sum_{i=0}^{k-1} (E_1^i - \delta_1^i) \right) = 0, \quad \forall k \quad (21)$$

$$\vartheta_i P_1^i = 0, \quad \forall k \quad (22)$$

$$\eta_i (\tilde{P}_t^i - P_1^i) = 0, \quad \forall k \quad (23)$$

$$\phi_i \delta_1^i = 0, \quad \forall k \quad (24)$$

نتایج تخصیص بهینه توان در زیر ارائه شده است.

$$\tilde{P}_t^{i*} = \frac{\lambda^i}{\sum_{k=i}^K \mu_k} - N_0, \quad \forall i \quad (25)$$

$$P_1^{i*} = \frac{(1 - \lambda^i)}{\sum_{k=i}^K \xi_k} - \frac{N_0}{[a^2]^i}, \quad \forall i \quad (26)$$

$$P_2^{i*} = \frac{\tilde{P}_t^{i*} - P_1^{i*}}{b^2}, \quad \forall i. \quad (27)$$

حال فرض کنید گره منبع در شرایط مناسب جذب انرژی باشد.

تعریف ۱. دسته‌ای از مسائل تعریف شده در روابط (۹) - (۵) با عنوان مسائلی که در آن‌ها منبع در شرایط مناسب جذب انرژی است تعریف می‌شود که در آن‌ها $P_1^i, P_2^i, \forall i$ (در جواب بهینه) روابط زیر را برآورده می‌سازند.

$$\tilde{C}_2^i(P_1^{i*}) \geq \tilde{C}_1^i(P_1^{i*}, P_2^{i*}), \quad \forall i \quad (28)$$

$$\forall k, \exists \delta_1^{i*} \geq 0 \text{ s.t. } \sum_{i=1}^k P_1^{i*} l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_1^i - \delta_1^{i*} \quad (29)$$

این بدان معنی است که منبع نه تنها انرژی کافی برای ارسال اطلاعات خود را از محیط اطراف جذب کرده، بلکه امکان فراهم آوردن انرژی برای رله با ارسال بخشی از انرژی جذب شده را نیز دارد. در این‌جا، تنگنا کران^{۱۵} MAC \tilde{C}_1 می‌باشد. تخصیص بهینه برای حالتی که منبع در شرایط مناسب جذب انرژی است در الگوریتم ۱ ارائه شده است.

لم ۲. الگوریتم ۱ جواب بهینه الگوریتمی برای مسأله تخصیص توان در کانال رله گوسی DF ناهمدوس دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی با انتقال یک طرفه انرژی از منبع به رله را در حالتی که منبع در شرایط مناسب جذب انرژی است، بدست می‌دهد.

اثبات لم. وقتی منبع در شرایط مناسب جذب انرژی است، مطابق با تعریف ۱، تابع هزینه بصورت $\tilde{C}_1(\tilde{P}_t)$ می‌باشد. در نتیجه، مسأله (۱۲) به فرم زیر تبدیل می‌شود.

$$\max_{\{\tilde{P}_t^i\}} \sum_{i=1}^{K+1} C \left(\frac{\tilde{P}_t^i}{N_0} \right) l^i \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^k P_1^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_1^i - \delta_1^i + \delta_2^i, \quad k = 1, \dots, K+1, \quad (41)$$

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_2^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} E_2^i - \delta_2^i + \delta_1^i, \quad k = 1, \dots, K+1, \quad (42)$$

که در آن δ_1^i بیانگر انتقال انرژی در دوره i ام از منبع به رله و δ_2^i بیانگر انتقال انرژی در دوره i ام از رله به منبع می‌باشد.

قید (۴۰) ناشی از این حقیقت است که از سال و دریافت هم‌زمان انرژی بی‌معنی است. این قید با عنوان *قید انتقال انرژی دوطرفه غیرهم‌زمان* در هر دوره شناخته می‌شود. این مسأله به دلیل رابطه (۴۰) محذب نمی‌باشد. حال، مسأله فوق را به یک مسأله بهینه‌سازی محذب تبدیل می‌کنیم.

لم ۴. مسأله تعریف‌شده در روابط (۳۷-۴۲) معادل با مسأله بهینه‌سازی محذب زیر است.

$$\max_{P_1, \tilde{P}_2} \sum_{i=1}^{K+1} \min \left\{ C \left(\frac{\tilde{P}_t^i}{N_0} \right), C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) \right\} l^i \quad (43)$$

$$s.t. P_1^i \geq 0, \tilde{P}_t^i \geq 0, \quad i = 1, \dots, K+1, \quad (44)$$

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_t^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{E}_t^i, \quad k = 1, \dots, K+1, \quad (45)$$

به عبارت دیگر دو مسأله فوق مقادیر بهینه یکسانی دارند.

اثبات لم. پیوست ب را ببینید.

قضیه ۱. الگوریتم ۲ جواب بهینه الگوریتمی را برای مسأله تخصیص توان در کانال رله گوسی DF ناهمدوس دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی با انتقال دوطرفه انرژی بین منبع و رله که در معادلات (۳۷-۴۲) داده شده است، فراهم می‌آورد.

اثبات. [سرخط اثبات] ابتدا مسأله تعریف‌شده در معادلات (۳۷-۴۲) را با استفاده از لم ۴ به مسأله تعریف‌شده در معادلات (۴۳-۴۵) تبدیل می‌کنیم. این تبدیل نشان می‌دهد که تنها مسأله امکان‌پذیری تخصیص توان کل بایستی برآورده شود و هر P_1^{i*}, P_2^{i*} که معادله (ب.۱) را برآورده سازد، یک تخصیص ممکن خواهد بود. با قرار دادن $\tilde{P}_t^i = [a^2]^\dagger \tilde{P}_t^i, \forall i$ به تخصیص‌های زیر خواهیم رسید.

$$P_1^i = \frac{\tilde{P}_t^i}{[a^2]^\dagger}, \quad P_2^i = \frac{([a^2]^\dagger - 1)\tilde{P}_t^i}{[a^2]^\dagger b^2}, \quad \forall i \quad (46)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این حالت مسأله تنها بر حسب \tilde{P}_t قابل بیان می‌باشد. در نتیجه، ابتدا توان کل شبکه به صورت بهینه بر اساس الگوریتم ارائه‌شده برای کانال نقطه‌به‌نقطه (الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر [۲۴]) تخصیص می‌یابد. سپس، توان کل بر اساس (۴۶) به توان منبع و رله افزای می‌شود. همان‌گونه که در اثبات لم ۴ ذکر شد، تخصیص بهینه همانند بخش‌های پیشین، یکتا نمی‌باشد.

دست آید که قید (۱۴) برای تمامی دوره‌ها غیرفعال باشد. با استفاده از شرط لقی مکمل داده شده در (۲۱)، داریم $\xi_k = 0, \forall k$. با جایگذاری این رابطه در شرط بهینگی KKT در (۱۹)، بدست می‌آوریم $\phi_t^i = 0, \forall i$. با ترکیب این رابطه با (۱۷) نتیجه می‌گیریم $\lambda^i = 1, \forall i$. لذا در این حالت مسأله (۱۵-۱۲) به (۳۰-۳۲) تبدیل می‌شود. در نتیجه همان‌گونه که انتظار آن می‌رفت، E_1 ‌های به‌اندازه کافی بزرگ حالت خاصی از منبع در شرایط مناسب جذب انرژی می‌باشد و لذا الگوریتم ۱ در این حالات نیز بهینه خواهد بود.

لم ۳. در جواب بهینه بدست آمده از الگوریتم ۱، روابط زیر برقرارند.

$$\sum_{i=1}^{K+1} P_1^{i*} l^i = \sum_{i=0}^K E_1^i - \delta_1^{i*} \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{K+1} P_2^{i*} l^i \leq \sum_{i=0}^K E_2^i + \frac{\delta_1^{i*}}{b^2} \quad (36)$$

این بدان معنی است که منبع بایستی تمامی انرژی‌های جذب‌شده‌اش را یا از طریق ارسال به سمت رله و یا از طریق بهره‌برداری به‌منظور ارسال داده مصرف نماید. از طرف دیگر، رله بایستی تمامی انرژی‌های دریافتی از منبع و جذب‌شده از محیط را تا پایان مدت زمان ارسال مصرف نماید.

اثبات لم. همان‌گونه که در لم ۲ اثبات شد، وقتی منبع در شرایط مناسب جذب انرژی است، تابع هزینه تنها بر حسب \tilde{C}_1 داده می‌شود که تابع افزایشی یکنوا از P_2 می‌باشد. اگر قیدهای (۳۵) و (۳۶) در جواب بهینه با نامساوی اکید برآورده شوند، می‌توانیم δ_1^{K*} را بدون نقض نامساوی (۱۴) افزایش دهیم. در نتیجه می‌توانیم P_2^{K+1*} را نیز افزایش دهیم. با این افزایش \tilde{C}_1 افزایش خواهد یافت. این موضوع با بهینه‌بودن P_1^{i*}, P_2^{i*} و δ_1^{i*} متناقض است. □

۴- انتقال دوطرفه انرژی در کانال رله دوطرفه کامل جاذب انرژی

مدل کانال رله گوسی DF ناهمدوس دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی با انتقال دوطرفه انرژی که در آن منبع و رله انرژی‌های جذب شده را با یکدیگر به اشتراک می‌گذارند، در شکل ۱ با $\delta_1 \neq 0, \delta_2 \neq 0$ معادل است. در این حالت جواب بهینه الگوریتمی کلی را ارائه خواهیم کرد. ابتدا مسأله را به‌صورت زیر بیان می‌کنیم.

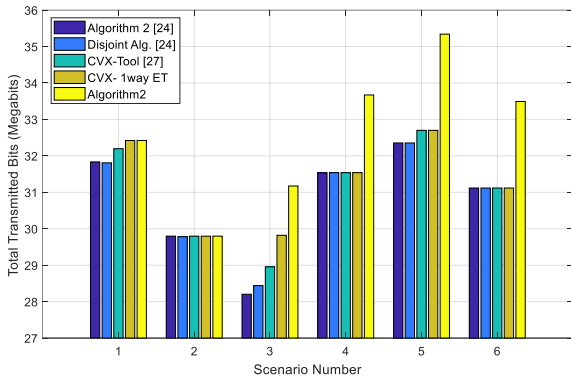
$$\max_{P_1, \tilde{P}_2, \delta_1, \delta_2} \sum_{i=1}^{K+1} \min \left\{ C \left(\frac{P_1^i + \tilde{P}_2^i}{N_0} \right), C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) \right\} l^i \quad (37)$$

$$s.t. P_1^i \geq 0, \tilde{P}_2^i \geq 0, \quad i = 1, \dots, K+1, \quad (38)$$

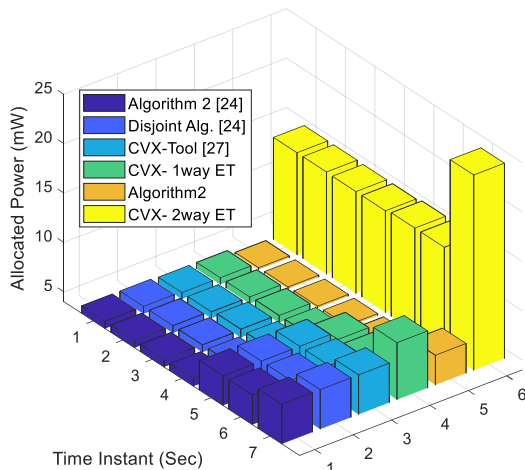
$$\delta_1^i \geq 0, \delta_2^i \geq 0, \quad i = 1, \dots, K+1, \quad (39)$$

$$\delta_1^i \cdot \delta_2^i = 0, \quad i = 1, \dots, K+1, \quad (40)$$

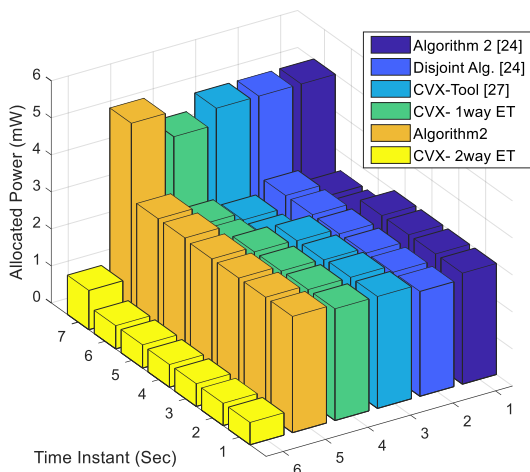
مورد مطالعه قرار گرفته است: سناریوی یک (s1) با پروفایل جذب انرژی در منبع $E_1 = [10, 21, 14, 9]$ و رله $E_2 = [7, 5, 8, 11]$ میلی ژول حالتی است که الگوریتم ۲ مرجع [۲۴] عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی مجزا داشته، در حالی که هر دو آن‌ها زیربینه هستند.



شکل ۲: تعداد کل بیت‌های ارسالی بر حسب مکانیت در الگوریتم‌های مختلف برای کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی.



شکل ۳: تخصیص توان در گره منبع برای کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی در سناریوی ۲.



شکل ۴: تخصیص توان در گره رله برای کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی در سناریوی ۲.

الگوریتم ۲: الگوریتم تخصیص توان بهینه در انتقال دوطرفه انرژی.

ورودی: E_1, E_2, T .

خروجی: P_1, P_2, L_1, L_2 .

۱: تخصیص توان کل

۲: قرار بده $\bar{E}_i^j = E_i^j + b^j E_i^j, i = 1, \dots, K + 1$

۳: تخصیص توان بهینه برای \bar{P}_i^j را بصورت زیر بیاب

$$o_v = \operatorname{argmin}_{o_{v-1} < i \leq K+1} \frac{\sum_{j=o_{v-1}}^{i-1} \bar{E}_i^j}{T^i - T^{o_{v-1}}}$$

$$\bar{P}_i^{o_v*} = \frac{\sum_{j=o_{v-1}}^{o_v-1} \bar{E}_i^j}{T^{o_v} - T^{o_{v-1}}}$$

۴: تخصیص توان تک‌تک برای منبع و رله

۵: تخصیص توان بهینه برای منبع را بصورت $P_1^{v*} = \frac{\bar{P}_i^{o_v*}}{|a^v|^2}$ بیاب

۶: تخصیص توان بهینه برای رله را بصورت $P_2^{v*} = \frac{(|a^v|^2 - 1) \bar{P}_i^{o_v*}}{|a^v|^2 b^v}$ بیاب

لم ۵. جواب بهینه الگوریتمی کلی برای گره‌های کانال رله گوسی DF ناهمدوس دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی با انتقال دوطرفه انرژی که در الگوریتم ۲ ارائه شده است، معادل با بهینه‌سازی مجزا برای منبع و رله با الگوهای تغییر یافته E_1 و E_2 است، به طوری که داریم: $E_2 = E_2 - \delta_2^*/b^2 + \delta_1^*/b^2$ و $E_1 = E_1 - \delta_1^* + \delta_2^*$. اثبات: پیوست ج را ببینید.

۵- نتایج عددی و تحلیل آن‌ها

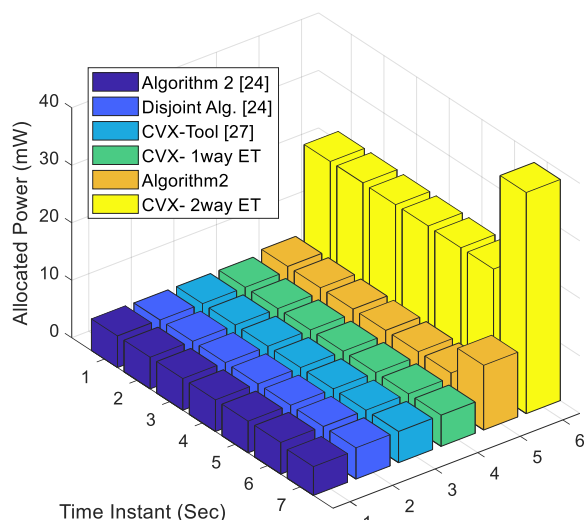
در این بخش، عملکرد الگوریتم‌های تخصیص توان پیشنهادی برای کانال رله گوسی DF ناهمدوس دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. موارد ارائه شده شامل راه‌حل بهینه و نیز راه‌حل‌های زیربینه‌ای است که در برخی از حالات، بهینه می‌باشند و برای سامانه مورد بررسی با انتقال یک‌طرفه انرژی از منبع به رله و نیز انتقال دوطرفه انرژی ارائه شده‌اند.

مدل کانال AWGN باند محدود با چگالی طیف توان $N_0 = 10^{-19}$ W/Hz و پهنای باند $W = 1$ MHz در نظر گرفته شده است. فرض شده است که فاصله بین گره‌ها یک کیلومتر باشد و تلفات مسیر $\psi = 100$ دسی‌بل باشد. لذا برای کانال مورد بررسی نسبت بهره کانال به نویز $(CNR)^{\psi}$ مسیر منبع به رله برابر با $\gamma_{SR} = \frac{a^2 \psi}{N_0 W}$ ، مسیر رله به

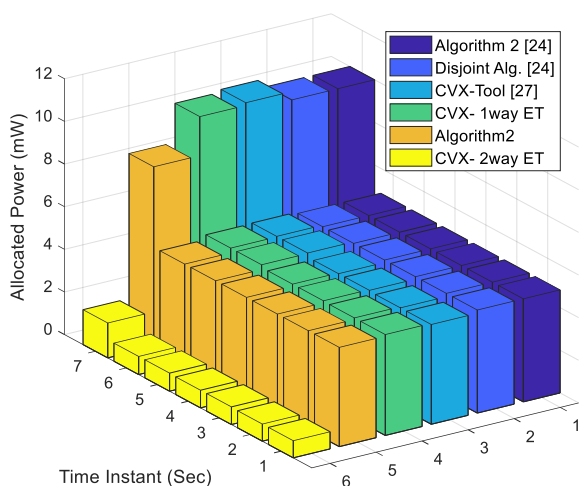
مقصد برابر با $\gamma_{RD} = \frac{b^2 \psi}{N_0 W}$ و مسیر منبع به مقصد برابر با $\gamma_{SD} = \frac{\psi}{N_0 W}$ خواهد بود.

بهره‌های کانال برای مسیرهای منبع به رله و رله به مقصد به ترتیب بصورت $a=2$ و $b=2$ در نظر گرفته شده‌اند. لحظات جذب انرژی بصورت $T = [0, 2, 4, 6]$ ثانیه با مدت زمان مطالعه (T_d) برابر با هفت ثانیه در نظر گرفته شده است. انرژی‌های جذب‌شده در منبع و رله نمونه‌های توزیع پواسن با میانگین $\bar{E}_1 = \bar{E}_2 = 10$ mJ می‌باشند.

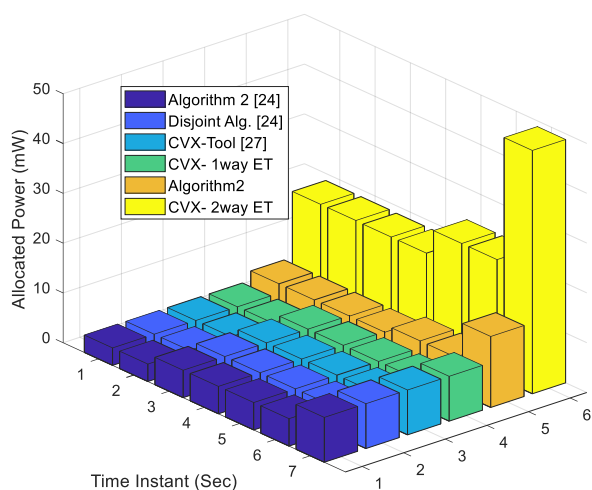
عملکرد دو الگوریتم تخصیص توان زیربینه ارائه شده در [۲۴] (الگوریتم ۲ و الگوریتم بهینه‌سازی مجزا) و نیز تخصیص بهینه پیشنهادی (الگوریتم ۲) در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج فوق با جواب بهینه عددی بدست‌آمده توسط ابزار CVX که یک بسته برای حل مسائل محدب انتظام‌یافته است [۲۷]، مقایسه شده‌اند. شش سناریو



شکل ۵: تخصیص توان در گره منبع برای کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی در سناریوی ۴.



شکل ۶: تخصیص توان در گره رله برای کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی در سناریوی ۴.



شکل ۷: تخصیص توان در گره منبع برای کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره‌های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی در سناریوی ۶.

سناریوی دو (s2) با پروفایل جذب انرژی در منبع $E_1 = [10, 9, 14, 8]$ و رله $E_2 = [7, 5, 5, 5]$ میلی ژول مشابه (s1) است با این تفاوت که الگوریتم ۲ مرجع [۲۴] بهینه است. سناریوی سه (s3) با پروفایل جذب انرژی در منبع $E_1 = [10, 9, 7, 9]$ و رله $E_2 = [2, 10, 10, 13]$ میلی ژول حالتی است که الگوریتم بهینه‌سازی مجزا عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ۲ مرجع [۲۴] ارائه کرده و در عین حال هر دو زیربهینه هستند. سناریوی چهار (s4) با پروفایل جذب انرژی در منبع $E_1 = [17, 7, 9, 5]$ و رله $E_2 = [13, 7, 9, 10]$ میلی ژول مثالی ارائه می‌کند که در آن الگوریتم بهینه‌سازی مجزا بهینه بوده و عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ۲ مرجع [۲۴] دارد. در سناریوی پنج (s5) با پروفایل جذب انرژی در منبع $E_1 = [7, 11, 15, 15]$ و رله $E_2 = [12, 15, 10, 8]$ میلی ژول، دو الگوریتم عملکرد یکسانی دارند در حالی که هر دو زیربهینه هستند و در نهایت سناریوی شش (s6) با پروفایل جذب انرژی در منبع $E_1 = [7, 11, 11, 9]$ و رله $E_2 = [10, 7, 11, 12]$ میلی ژول حالتی است که هر دو راه‌حل الگوریتمی فوق‌الذکر بهینه هستند.

در شکل ۲، نتایج ابزار بهینه CVX برای حالت‌هایی که انتقال یک‌طرفه انرژی از منبع به رله و نیز انتقال دوطرفه انرژی بین منبع و رله امکان‌پذیر است ارائه شده است. در (s1) انتقال انرژی از منبع به رله سبب بهبود عملکرد می‌شود ولی عکس آن برقرار نیست. این نتیجه از آن‌جا حاصل می‌شود که فرآیند جذب انرژی در منبع بهتر از فرآیند آن در رله است. در (s2)، انتقال انرژی بین گره‌ها مزیتی فراهم نمی‌کند چراکه فرآیند جذب انرژی در آن‌ها هم‌سان می‌باشد و به‌اشتراک‌گذاری انرژی سودی ندارد. اما در (s3) انتقال انرژی فرصتی فراهم می‌آورد تا از منابع انرژی شبکه به نحو مطلوب‌تری بهره‌برداری صورت پذیرد. در این‌جا گره‌هایی که قابلیت تبادل دوطرفه انرژی را دارند عملکرد بهتری را نسبت به حالت بدون امکان انتقال انرژی یا انتقال یک‌طرفه انرژی ارائه می‌کنند. در سناریوهای ۴، ۵ و ۶، بر خلاف (s1) تنها عملکرد وقتی بهبود می‌یابد که رله قادر باشد بخشی از انرژی جذب شده خود را به سمت منبع ارسال نماید. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با افزودن قابلیت انتقال انرژی به گره‌های فرستنده، جواب بهینه الگوریتمی را برای حالت‌هایی که بدون آن به‌راحتی امکان‌پذیر نبود، ارائه کرده‌ایم.

یادآوری می‌شود که الگوریتم ۲ پیشنهادی جواب بهینه را برای حالتی که امکان انتقال دوطرفه انرژی میسر است، فراهم می‌آورد. لذا عملکرد آن مشابه با ابزار CVX خواهد بود. اما تخصیص توان‌های آن‌ها که در اشکال ۳-۸ داده شده است، متفاوت خواهد بود.

شکل‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب توان‌های تخصیص‌یافته به منبع و رله را در روش‌های مختلف حل مسأله ارائه شده برای سناریوی ۲ نشان می‌دهند. همچنین شکل‌های ۵ و ۶ به‌ترتیب توان‌های تخصیص‌یافته به گره‌های منبع و رله را در روش‌های گوناگون حل مسأله ارائه شده برای سناریوی ۴ نمایش می‌دهند. نهایتاً شکل‌های ۷ و ۸ به‌ترتیب توان‌های تخصیص‌یافته به منبع و رله را در روش‌های مختلف برای سناریوی ۶ ارائه می‌دهند. در شکل ۴ که الگوریتم ۲ بهینه است، توان‌های تخصیص

انتقال دوطرفه توان بین منبع و رله. بهینه سازی محدب ارائه شده برای حل مسئله، خصوصیات و ویژگی های ساختاری جواب بهینه که برای یافتن جواب الگوریتمی مورد نیاز است را به دست نمی دهد. لذا از یک منظر دیگر، در این مقاله حالت هایی مورد بررسی قرار گرفت و جواب بهینه الگوریتمی برای آن ها محاسبه گردید. این حالت ها با آشکارسازی برخی از خصوصیات کلیدی جواب بهینه عمومی برای ارائه درک شهودی از مسئله مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر این، در کانال رله دوطرفه کامل با انتقال یک طرفه انرژی، یک گروه از مسائل معرفی شد که جواب الگوریتمی بهینه به دست می آید. برای کانال رله مورد مطالعه با انتقال دو طرفه انرژی، ویژگی های جالبی از جواب بهینه به دست آمد که برای یافتن جواب بهینه الگوریتمی در حالت کلی مورد استفاده قرار گرفت.

پیوست ها

پیوست الف: اثبات لم ۱

مشخص است که برای یک جواب ممکن که (۸) و (۹) را اقلان می کند، (۱۱) نیز با ترکیب (۸) و (۹) اقلان خواهد شد. برای اثبات عکس گزاره، اگر (۱۱) برای یک $i = \bar{i}$ اختیاری برآورده شود، آنگاه داریم

$$\sum_{i=1}^{\bar{i}} (P_1^i + \tilde{P}_2^i) l^i \leq \sum_{i=1}^{\bar{i}} E_1^{i-1} + \tilde{E}_2^{i-1}, \quad (1.f)$$

با کسر $P_1^i l^i > 0, \forall i$ از دو طرف نامساوی فوق، خواهیم داشت

$$\sum_{i=1}^{\bar{i}} \tilde{P}_2^i l^i \leq \sum_{i=1}^{\bar{i}} \tilde{E}_2^{i-1} + E_1^{i-1} - P_1^i l^i, \quad (2.f)$$

از آن جا که بر اساس (۷)-(۸) داریم $E_1^{i-1} - P_1^i l^i \geq 0$ ، حال با تعریف $\delta^i = E_1^i - P_1^i l^i$ به رابطه (۹) خواهیم رسید. □

پیوست ب: اثبات لم ۴

کافی است تا نشان دهیم روابط (۴۲)-(۳۹) قابل جایگزینی با رابطه (۴۵) می باشد. اثبات مستقیم سراسر است چرا که با ترکیب (۴۲)-(۴۱) به (۴۵) خواهیم رسید. سپس (۴۰)-(۳۹) قابل حذف شدن هستند چرا که به تابع هزینه و قیدهای مسئله مرتبط نیستند. برای اثبات معکوس، با استفاده از رابطه (۴۵) خواهیم داشت

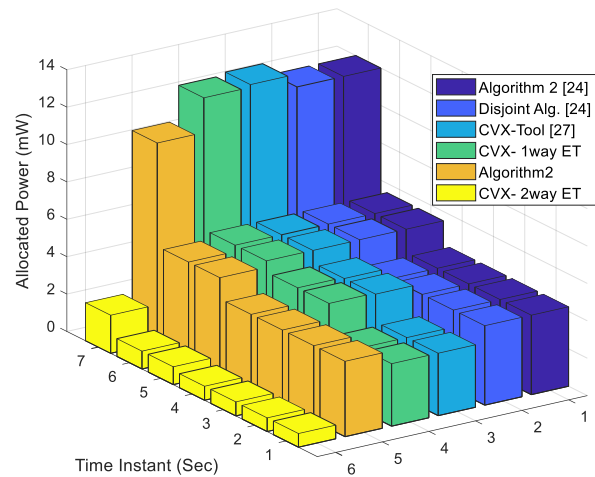
$$\sum_{i=1}^k (P_1^i + \tilde{P}_2^i) l^i \leq \sum_{i=1}^k (E_1^{i-1} + \tilde{E}_2^{i-1}), k = 1, \dots, K+1 \quad (1.b)$$

با کسر نمودن $\tilde{P}_2^i l^i \geq 0$ از دو طرف نامساوی فوق خواهیم داشت

$$\sum_{i=1}^k P_1^i l^i \leq \sum_{i=1}^k E_1^{i-1} + \Delta^i, \quad k = 1, \dots, K+1 \quad (2.b)$$

$$\Delta^i = \tilde{E}_2^{i-1} - \tilde{P}_2^i l^i, \quad \forall i$$

بنابراین نتیجه زیر را خواهیم داشت:



شکل ۸: تخصیص توان در گره رله برای کانال رله گوسی دوطرفه کامل با گره های جاذب انرژی و با قابلیت انتقال انرژی در سناریوی ۶.

یافته به رله به صورت [۵ ۲/۵ ۲/۵ ۳ ۳ ۳ ۳] میلی ژول است. از طرف دیگر، در بهینه سازی مجزا (که در این مثال زیر بهینه است) توان ها [۵ ۲/۸۴ ۲/۸۴ ۲/۸۴ ۲/۸۴ ۲/۸۴ ۲/۸۴] میلی ژول هستند. در نتیجه توان های بهینه الزاماً دارای رفتار یکنوا نیستند. توجه شود که ابزار CVX عملکردی مشابه با الگوریتم ۲ مرجع [۲۴] از خود نشان می دهد. برخلاف (s2)، شکل های ۵ و ۶ حالتی را نشان می دهد که توان همسان شده منبع در الگوریتم بهینه سازی مجزا، یعنی $P_1 = 5/4286$ میلی وات با مدت زمان $L_1 = 7$ ثانیه عملکرد بهینه فراهم می آورد. این بهتر از عملکرد الگوریتم ۲ مرجع [۲۴] (۵ ۵/۵ ۵/۵ ۵/۵ ۵/۵ ۵/۵ ۵/۵) میلی وات برای منبع با تخصیص توان های مشابه برای رله می باشد.

در شکل های ۷ و ۸ که دو الگوریتم تخصیص زیر بهینه عملکرد بهینه دارند، تخصیص توان ها دقیقاً یکسان می باشد. هم چنین در شکل های فوق مشاهده می شود که گرچه الگوریتم ۲ پیشنهادی مقدار بهینه یکسانی با ابزار CVX با انتقال دوطرفه انرژی بدست می دهد، اما توان های تخصیص یافته در این دو روش کاملاً متفاوت است. همان طور که می بینید در سه سناریوی شکل های ۸-۳ تخصیص توان در الگوریتم ۲ پیشنهادی منصفانه تر از تخصیص توان متمایز ابزار CVX است. در کنار آن، تخصیص توان های زیاد برای منبع در ابزار CVX ممکن است سبب برخی مشکلات فنی در کاربرد عملی گردد. این موضوع کاربردی بودن الگوریتم ۲ پیشنهادی برای به کارگیری در فرستنده های عملی را بیشتر نمایان می سازد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تخصیص توان بهینه الگوریتمی برای کانال رله گوسی کدگشایی و گسیل ناهمدوس دوطرفه کامل سه گرهی با گره های منبع و رله ی جاذب انرژی مورد تحقیق قرار گرفت. دو حالت بر اساس توانایی گره های منبع و رله برای انتقال بخشی از توان شان به هم دیگر در نظر گرفته شد که عبارت بودند از انتقال یک طرفه توان از منبع به رله و

- [2] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol.6, pp.1-8, Sep. 2007.
- [3] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. B. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Inf. Process. in Sensor Networks (IPSN)*, pp.457-462, 2005.
- [4] D. Niyato, E. Hossain, M. M. Rashid, and V. K. Bhargava, "Wireless sensor networks with energy harvesting technologies: A game-theoretic approach to optimal energy management," *IEEE Wireless Commun.*, vol.14, pp.90-96, Aug. 2007.
- [5] V. Raghunathan, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, "Emerging techniques for long lived wireless sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.44, pp.108-114, Apr. 2006.
- [6] A. Kansal and M. B. Srivastava, "An environmental energy harvesting framework for sensor networks," in *Proc. Int. Symp. on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, pp.481-486, 2003.
- [7] M. Rahimi, H. Shah, G. S. Sukhatme, J. Heideman, and D. Estrin, "Studying the feasibility of energy harvesting in a mobile sensor network," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.19-24, 2003.
- [8] R. Rajesh, V. Sharma, and P. Viswanath, "Information capacity of energy harvesting sensor nodes," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp.2363-2367, Jul./Aug. 2011.
- [۹] محمود محصل فقهی و علی اعظم عباسفر، «راه‌حل‌های آنلاین بهینه‌سازی برای شبکه‌های مخابراتی جاذب انرژی»، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، جلد ۱۴، شماره ۲، ۱۳۹۷-۱۳۹۹، تابستان ۱۳۹۷.
- [10] M. M. Feghhi, A. Abbasfar and M. Mirmohseni, "Performance analysis for energy harvesting communication protocols with fixed rate transmission", *IET Communications*, vol. 8, no. 18, pp. 3259-3270, Dec. 2014.
- [11] V. Chawla and S. H. Dong, "An overview of passive RFID," *IEEE Commun. Mag.*, vol.45, pp.11-17, Sep. 2007.
- [12] F. Zhang, S. A. Hackworth, X. Liu, H. Chen, R. J. Scwabassi, and M. Sun, "Wireless energy transfer platform for medical sensors and implantable devices," in *Proc. IEEE Annual Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp.1045-1048, 2009.
- [13] H. Matsumoto, "Research on solar power satellites and microwave power transmission in japan," *IEEE Microw. Mag.*, vol.3, pp.36-45, Dec. 2002.
- [14] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp.1612-1616, 2008.
- [15] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets tesla: Wireless information and power transfer," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp.2363-2367, 2010.
- [16] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.12, pp.1989-2001, May 2013.
- [17] L. R. Varshney, "On energy/information cross-layer architectures," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp.1356-1360, 2012.
- [18] D. Gunduz and B. Devillers, "Two-hop communication with energy harvesting," in *Proc. IEEE International*

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_2^i l^i = \sum_{i=1}^k \tilde{E}_2^{i-1} - \Delta^i, \quad k = 1, \dots, K+1 \quad (۳.ب)$$

که به صورت زیر نیز قابل بیان است.

$$\sum_{i=1}^k \tilde{P}_2^i l^i \leq \sum_{i=1}^k \tilde{E}_2^{i-1} - \Delta^i, \quad k = 1, \dots, K+1 \quad (۴.ب)$$

حال اگر $\Delta^i > 0$ برقرار باشد، تعریف می‌کنیم $\delta_1^i = \Delta^i$. در غیر این صورت برای $\Delta^i < 0$ تعریف می‌کنیم $\delta_2^i = -\Delta^i$. در نتیجه روابط (۳۹)-(۴۲) برقرار خواهند بود. مشخص است که $\delta_1^i, \delta_2^i, \forall i$ یکتا نیستند. بدین ترتیب اثبات پایان می‌یابد. □

پیوست ج: اثبات لم ۵

در جواب بهینه الگوریتم ۲ داریم $\tilde{C}_1 = \tilde{C}_2$. در نتیجه مسأله بصورت زیر است.

$$\max_{P_1, P_2, \delta_1, \delta_2} \sum_{i=1}^{K+1} C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) l^i \quad (۱.ج)$$

$$s.t. \quad (40) - (42), \quad (۲.ج)$$

که به صورت زیر قابل ساده‌سازی است.

$$\max_{P_1, \delta_1, \delta_2} \sum_{i=1}^{K+1} C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) l^i \quad (۳.ج)$$

$$s.t. \quad P_1^i \geq 0, \forall i, (39), (40), (41), \quad (۴.ج)$$

که در آن P_2^i از مسأله حذف شده است. با جایگزینی $\delta_1^i = \delta_1^*$ و $\delta_2^i = \delta_2^*$ خواهیم داشت

$$\max_{P_1} \sum_{i=1}^{K+1} C \left(\frac{[a^2]^\dagger P_1^i}{N_0} \right) l^i \quad (۵.ج)$$

$$s.t. \quad P_1^i \geq 0, \forall i, \quad (۶.ج)$$

$$\sum_{i=1}^k P_1^i l^i \leq \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{e}_1^i, \quad \forall k, \quad (۷.ج)$$

مشخص است که جواب این مسأله (مسأله بهینه‌سازی محدب نسبت به تنها متغیر آن یعنی \mathbf{P}_1) از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر پیروی می‌کند که برای الگوی جذب انرژی تغییر یافته \mathbf{e}_1 ارائه می‌شود. با استفاده از روش مشابه، می‌توان نتیجه دلخواه را برای \mathbf{P}_2 نیز به دست آورد. □

مراجع

- [1] M. Bhardwaj and A. P. Chandrakasan, "Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.1587-1598, 2002.

- [24] M. M. Feghhi, M. Mirmohseni and A. Abbasfar, "Power Allocation in the Energy Harvesting Full-Duplex Gaussian Relay Channels", *International Journal of Communication Systems, Special Issue on Energy Efficient Wireless Communication Networks with QoS*, vol. 30, no. 2, pp. 1-29, Jan. 2017.
- [25] M. M. Feghhi, M. Mirmohseni and A. Abbasfar, "Low Complexity Resource Allocation in the Relay Channels with Energy Harvesting Transmitters", *Ad Hoc Networks*, vol. 77, pp. 108-118, Aug. 2018.
- [26] J. Yang and S. Ulukus, "Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol.60, pp.220-230, Jan. 2012.
- [27] M. Grant and S. Boyd, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1," <http://cvxr.com/cvx>, Mar. 2014.
- [19] C. Huang, R. Zhang, and S. Cui, "Throughput maximization for the Gaussian relay channel with energy harvesting constraints," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.31, pp.1469-1479, Aug. 2013.
- [20] B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang, and S. Ulukus, "Energy cooperation in energy harvesting communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol.61, pp.4884-4898, Dec. 2013.
- [21] O. Orhan and E. Erkip, "Optimal transmission policies for energy harvesting two-hop networks," in *Proc. Annual Conference in Information Sciences and Systems (CISS)*, pp.1-6, Mar. 2012.
- [22] M. Naeem, A. S. Khwaja, A. Anpalagan, and M. Jaseemuddin, "Green cooperative cognitive radio: A multiobjective optimization paradigm," *IEEE Syst. J.*, 2014.
- [23] A. E. Gamal and Y. H. Kim. *Network Information Theory*. Cambridge University Press, 2011.

زیر نویس ها

Coherent	۹
Half-Duplex	۱۰
Discrete Memoryless Relay Channel	۱۱
Offline	۱۲
Karush-Kuhn-Tucker	۱۳
Complementary Slackness	۱۴
Multiple Access Channel	۱۵
Channel-gain to Noise Ratio	۱۶

Photovoltaic Effect	۱
Additive White Gaussian Noise	۲
Online	۳
Radio Frequency Identification	۴
Body Area Network	۵
Full-Duplex	۶
Decode-and-Forward	۷
Noncoherent	۸