تحلیل عملکرد شبکه‌های رادیو شناختمند مشارکتی با قابلیت برداشت انرژی

محمدجواد مهدوی[1] **فروغ السادات طباطبا[2]**

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
m.jmahdavi68@gmail.com

۲- عضو هیئت علمی- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
fstabataba@cc.iut.ac.ir

چکیده: مخابرات مشارکتی از روش‌های مطرح شده در شبکه‌های بی‌سیم است که مشکلات استفاده از مخابرات بی‌سیم نظیر محوشدگی و سایه افکنی را مرتفع می‌کند. همچنین استفاده حداکثری از ظرفیت طیف‌های فرکانسی موجود برای ارسال اطلاعات از طریق مخابرات رادیو شناختمند امکان‌پذیر است. بعلاوه نسل جدید سیستم‌های مخابراتی و موبایل به دلیل حجم بالای ترافیک اطلاعات به ظرفیت و انرژی زیادی نیاز دارند. بنابراین، یکی از مسائل مورد بحث در این زمینه نحوه تامین انرژی سیستم‌ها است. برداشت انرژی از محیط اطراف و به خصوص از سیگنال رادیو فرکانسی یک راه حل موثر برای حل این مساله است. در این مقاله مدل سیستمی برای شبکه‌های رادیو شناختمند مشارکتی با قابلیت برداشت انرژی پیشنهاد شده است. در مدل سیستم پیشنهادی کاربران ثانویه از سیگنال‌های رادیویی محیط انرژی برداشت می‌کنند. یکی از کاربران ثانویه بصورت انتخابی بعنوان رله در ارسال اطلاعات کاربر اولیه مشارکت می‌کند. کاربران ثانویه بصورت درهم تنیده از زمان‌های خالی استفاده می‌کنند. تحلیل ریاضی و شبیه‌سازی احتمال قطع کاربران اولیه و ثانویه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل ریاضی بر هم منطبق هستند. همچنین روی پارامترهای موجود (مانند ضریب توان برداشتی، احتمال فعالیت کاربر اولیه و ...) و تاثیر آن‌ها روی نتایج مدل پیشنهادی بحث شده و مقادیر بهینه بوسیله شبیه‌سازی محاسبه شده است. در ادامه تاثیر روش‌های مختلف گزینش رله و سیستم‌های چند کاربره رادیو شناختمند روی عملکرد مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که بهترین روش گزینش رله برای مدل پیشنهادی، روش بیشترین هارمونی است. همچنین درحالت چندکاربره با افزایش تعداد کاربران اولیه، احتمال قطع کاربران ثانویه به دلیل افزایش انرژی ذخیره شده در این کاربران کاهش می‌یابد.

واژه های کلیدی: مخابرات بی‌سیم، شبکه‌های مشارکتی، شبکه‌های رادیو شناختمند، برداشت انرژی، احتمال قطع، انتخاب رله

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۳۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر فروغ السادات طباطبا

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان – دانشگاه صنعتی اصفهان– دانشکده‌ی برق و کامپیوتر-کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

فهرست اختصارها و نشانه ها

سیگنال ارسالی از گره a و دریافتی در گره b	y_{ab}
سیگنال به نویز گره بین a و b	γ_{ab}
آستانه سیگنال به نویز	γ_0
فاصله بین گره a و b	d_{ab}
ضریب کانال بین گره a و b	h_{ab}
فرستنده کاربر اولیه	Pu^t
گیرنده کاربر اولیه	Pu^r
فرستنده کاربر ثانویه n ام	$Pu^t{}_n$
گیرنده کاربر ثانویه	B
نمای افت مسیر	m
توان ارسالی کاربر اولیه	P_{Pu}
توان ارسالی رله	P_R
توان ارسالی کاربر ثانویه	P_{Su}
ضریب تبدیل انرژی سیگنال به انرژی الکتریکی	η
طول یک شیار زمانی	T
ضریب توان اختصاص داده شده به برداشت انرژی در روش تقسیم توان	ρ
انرژی برداشت شده در گره یا کاربر n	E_{h_n}
نویز گره b	$n^{[b]}$
واریانس نویز گره b	$\sigma^{[b]}$
احتمال قطع کاربر اولیه	P_{Out}^{Pu}
احتمال قطع کاربر ثانویه	P_{Out}^{Su}
به ترتیب اطلاعات ارسالی کاربر اولیه و ثانویه	x_1 و x_2
متوسط انرژی ذخیره شده در باتری هر کاربر اولیه	$\overline{E}_{h_{Su}}$
متوسط توزیع نمایی کانال b	λ_b

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مخابرات بی‌سیم حجم وسیعی از فعالیت‌های پژوهشی را به خود معطوف کرده و رشد استفاده از تجهیزات بی‌سیم در میان عامه مردم بسیار چشمگیر و قابل توجه بوده است. در شبکه‌های بی‌سیم وجود تلفات موسوم به محو شدگی[۱] مسیر و سایه‌افکنی[۲] باعث تصادفی بودن کانال ارسال می‌شود که با استفاده از روش ارسال نسخه‌های متفاوت از سیگنال اطلاعات و با بهره‌گیری از روش‌های ارائه شده در مخابرات مشارکتی[۳] می‌توان تا حد زیادی اثر نامطلوب این مشکل را کاهش داد [۲، ۱]. سیستم‌های مشارکتی بی‌سیم منجر به بالا بردن چندگانگی فضایی[۴] جهت غلبه بر اثرات نامطلوب کانال‌های بی‌سیم می‌شوند [۳]. برای تحقق چندگانگی فضایی مشارکتی، سیگنال هر کاربر علاوه بر خود او، توسط سایر کاربران نیز ارسال می‌شود. بنابراین هر کاربر، علاوه بر ارسال اطلاعات خود، نقش رله را نیز برای سایر کاربران ایفا می‌کند. چندگانگی فضایی مشارکتی مزایایی چون بهبود عملکرد سیستم از نظر کاهش احتمال خطا، کاهش احتمال قطع و کاهش تداخلات سیستم و اختلالات کانال را به دنبال دارد [۴]. همچنین این کارایی محدودیت‌هایی به لحاظ توان مصرفی، پهنای باند و حداکثر نرخ ارسال داده ایجاد می‌کند.

از طرفی دیگر استفاده بهینه از طیف‌های موجود فرکانسی، موضوع مهمی به نام شبکه‌های رادیو شناختمند[۵] را مطرح کرده است. استفاده از شبکه‌های رادیو شناختمند (CR) در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۸-۵]. امروزه مساله کمبود طیف‌های فرکانسی بیشتر مربوط به سیاست‌های مدیریت طیف وابسته است [۹] و اگر این سیاست‌ها درست تدوین شود، مشکلات مربوط به این کمبود تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند.

طیف‌های فرکانسی جهت مخابره اطلاعات در دسترس بخشی از کاربران مجاز یا همان کاربران اولیه قرار داده می‌شود و کاربرانی که اجازه دسترسی به طیف را ندارند (کاربران ثانویه)، باید به نحوی بتوانند اطلاعات خود را ارسال کنند. کاربران رادیو شناختمند یا همان کاربران ثانویه برای جلوگیری از تداخل با کاربران اولیه ناچارند تدابیری بیاندیشند و محیط اطرافشان را شناسایی کنند [۱۰]. موفقیت این طرح منوط به توانایی‌های کاربر رادیو شناختمند در شناخت محیط اطرافش می‌باشد. هدف اصلی در سنجش طیف ایجاد فرصت‌های دسترسی بیشتر به طیف‌های فرکانسی اشغال نشده است. در نتیجه سخت افزارهای رادیو شناختمند باید توانایی تشخیص بخش‌های خالی باند فرکانسی و استفاده از آن‌ها را داشته باشند و همچنین باید بتوانند به هنگام حضور کاربر اولیه در باند فرکانسی مورد استفاده توسط کاربر رادیو شناختمند، به سرعت آن باند فرکانسی را ترک کنند [۱۰]. مزایای شبکه‌های رادیو شناختمند و مشارکتی محققان را بر آن داشته که در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، از هر دو شبکه‌ها کنار هم استفاده کنند [۱۴-۱۱]. استفاده همزمان از این دو ساختار در کنار هم منجر به بهبود کیفیت در ارسال و استفاده بهینه از طیف‌های فرکانسی می‌شود.

تامین انرژی سیستم‌های بشری همواره مبحثی چالش برانگیز در بین دانشمندان بوده است، بطوری که تامین انرژی مدارهای کم‌مصرف الکترونیکی نظیر سنسورها و سیستم‌های بی‌سیم در سالهای اخیر مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته است [۱۶و۱۵]. به دلیل حجم گسترده اطلاعات، نسل جدید سیستم‌های مخابراتی و موبایل نیازمند ظرفیت بالا و انرژی زیاد هستند. به همین منظور استفاده از باتری‌ها در این سیستم‌ها مطرح می‌شود. وزن زیاد، عمر محدود باتری‌ها همچنین مشکل تعویض آن‌ها، از دلایل اصلی مورد توجه قرار گرفتن برداشت انرژی[۶] الکتریکی از منابع انرژی محیطی است. برداشت انرژی از منابعی چون انرژی خورشیدی، ارتعاشات مکانیکی، لرزش، باد، امواج، سیگنال‌های رادیو فرکانسی و ... صورت می‌پذیرد [۱۷و۱۶]. به دلیل وجود سیگنال رادیو فرکانسی در سیستم‌های مخابراتی، برداشت انرژی می‌تواند از این سیگنال‌ها صورت پذیرد [۱۸-۱۵]. برداشت انرژی از

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter 2018

راه‌های مختلفی امکان‌پذیر است که تقسیم توان[۷] و سوئیچینگ زمانی[۸] از مهم‌ترین روش‌های آن است [۱۶]. در روش تقسیم توان، بخشی از توان سیگنال برای برداشت انرژی و بخش دیگر صرف انتقال اطلاعات می‌شود، ولی روش سوئیچینگ زمانی به این صورت عمل می‌کند که ضریبی از زمان دردسترس سیگنال به مدارهای برداشت انرژی و باقیمانده زمان صرف ارسال اطلاعات می‌شود. در برخی از مراجع مثل [۱۹] نویسنده به محاسبه و بررسی احتمال قطع سیستم‌های رله‌ای در حضور برداشت انرژی پرداخته است. در این روش سیستم مشارکتی دارای مسیر مستقیم است و توان رله ثابت در نظر گرفته شده است. عدم موفقیت برداشت انرژی در کاربر رله با احتمال (P_{ex}) مشخص شده است که با افزایش این احتمال عملکرد سیستم نیز بدتر می‌شود. در این مرجع از روش رله‌ای تقویت و ارسال استفاده شده است. در مرجع [۲۰] یک سیستم مشارکتی با مبدا و مقصد واحد و دو رله در نظر گرفته شده است. رله اول به منظور کمک در ارسال اطلاعات از منبع تغذیه بیرونی بهره می‌برد و رله دیگر انرژی مورد نیاز خود را با استفاده از روش سوئیچینگ زمانی از سیگنال‌های ارسالی منبع و رله دیگر برداشت می‌کند. در این مقاله نشان داده شده است که با استفاده از رله دوم که از قابلیت برداشت انرژی بهره می‌برد انتقال اطلاعات با احتمال قطع بهتری انجام می‌پذیرد. نویسنده مقاله [۲۱] از روش تقسیم توان برای برداشت انرژی کاربران رله در شبکه مشارکتی استفاده نموده است که در آن در نهایت رله‌ای که بهترین شرایط را از لحاظ سیگنال به نویز دارد اطلاعات را انتقال می‌دهد.

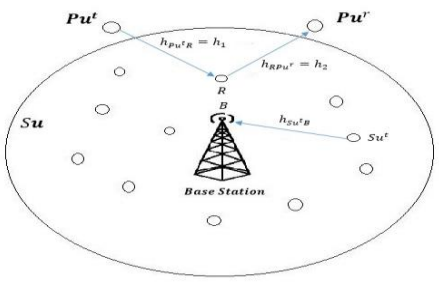
می‌توان از مشارکت در سیستم‌های رادیو شناختمند بهره‌مند شد. قابلیت مشارکت در شبکه‌های رادیو شناختمند در دو بخش سنجش طیف و کمک به ارسال کاربر اولیه استفاده می‌شود و باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شود [۱۴و۱۳و۲۵-۲۲]. در [۱۳] مخابرات مشارکتی به منظور افزایش میزان گذردهی و بالابردن نرخ انتقال اطلاعات کاربران ثانویه مورد استفاده قرار گرفته است. کاربران ثانویه در کانال‌هایی که از سوی کاربران اولیه اشغال نشده است به انتقال اطلاعات از طریق مشارکت کمک می‌کنند. در برخی منابع مثل مراجع [۲۲و۱۴] نویسنده از مخابرات مشارکتی به منظور اطمینان از حضور و یا عدم حضور کاربر اولیه در کانال و سنجش طیف بهتر بهره می‌برد و درنهایت احتمال آشکارسازی را به یک نزدیک‌تر می‌کند. در مرجع [۲۵] احتمال قطع کاربر اولیه و کاربران ثانویه زمانی که کاربران ثانویه به عنوان رله در انتقال اطلاعات به کاربر اولیه کمک کنند محاسبه شده است و نشان داده شده است که با افزایش تعداد کاربران ثانویه احتمال قطع کاربر اولیه شرایط بهتری پیدا می‌کند. مقاله [۲۶] به بررسی احتمال قطع و گذردهی کاربر ثانویه در یک سیستم رادیو شناختمند می‌پردازد که در آن با فرض دور بودن کاربر اولیه از شبکه ثانویه، یک رله در انتقال اطلاعات به کاربر ثانویه کمک می‌کند. در مرجع [۲۶] از روش زیرگذاری[۹] برای ارسال اطلاعات کاربر اولیه استفاده شده است و استخراج سیگنال کاربران در مقصد با استفاده از کدینگ میسر می‌شود. ولی در مقاله فعلی از روش درهم تنیده[۱۰] استفاده شده است و کاربر ثانویه در زمان‌های سفید که از سوی کاربر اولیه اشغال نباشد اقدام به ارسال اطلاعات می‌کند. به علاوه در مقاله [۲۶] دو کاربر ثانویه اقدام به ارسال اطلاعات می‌کنند و یک رله که قابلیت برداشت انرژی را داراست در ارسال به کاربران اولیه کمک می‌کند ولی در این مقاله بهترین کاربر ثانویه از لحاظ کانال برای ارسال اطلاعاتش انتخاب می‌شود. همچنین در مرجع [۲۶] با استفاده از یک مساله بهینه‌سازی رله‌ای که مجموع مقادیر ظرفیت ارسال کاربران ثانویه و مقدار انرژی برداشت شده را ماکزیمم می‌کند انتخاب می‌شود در حالی که در این مقاله از چند روش مرسوم انتخاب رله بهره‌گیری شده است.

چنانچه سیستم رادیو شناختمند مشارکتی که مزایای آن در مراجع مذکور آمده است، بتواند از محیط اطراف انرژی لازم را برای ارسال کسب نماید، سیستمی با طول عمر بیشتر حاصل می‌شود. در مقاله حاضر این نوع سیستم‌ها و عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به گونه‌ای که در مراجع قبلی، سیستم رادیو شناختمند مشارکتی که بتواند انرژی خود را از سیگنال‌های موجود برداشت کند و در ضمن کارایی سیستم از جنبه‌های مختلف مثل احتمال قطع بهبود یابد، مورد بررسی قرار نگرفته بود.

در این مقاله یک مدل سیستم جدید برای شبکه رادیوشناختمند مشارکتی با قابلیت برداشت انرژی پیشنهاد شده است. در این سیستم کاربران ثانویه از سیگنال‌های رادیویی محیط انرژی برداشت می‌کنند. یکی از کاربران ثانویه بصورت انتخابی بعنوان رله در ارسال کاربر اولیه مشارکت می‌کند. کاربران ثانویه بصورت درهم تنیده از زمان‌های خالی طیف استفاده می‌کنند. در ادامه مدل سیستم توصیف شده و سپس تحلیل احتمال قطع کاربران اولیه و ثانویه آمده است. صحت تحلیل ها به کمک شبیه سازی مونت کارلو در قسمت شبیه سازی بررسی شده است. در ادامه تاثیر روش‌های مختلف گزینش رله و سیستم‌های چند کاربره رادیو شناختمند روی عملکرد مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

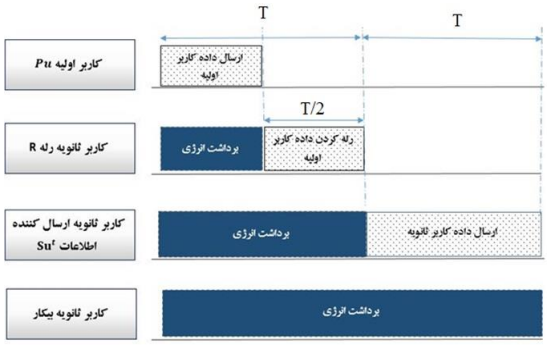
۲- مدل سیستم

در این بخش سیستم رادیو شناختمندی ارایه می‌شود که در آن کاربران ثانویه هم به‌عنوان رله برای کاربر اولیه عمل می‌کنند و هم پس از دسترسی به فضای خالی با استفاده از انرژی برداشت شده از سیگنال رادیوفرکانسی، اقدام به ارسال اطلاعات خود می‌کنند. در حقیقت سیستم رادیو شناختمند مطرح شده در این مقاله از نوع درهم‌تنیده است.



شکل(۱): مدل سیستم

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018



شکل(۲): تقسیم بندی زمانی ارسال کاربران

مدل سیستم در نظرگرفته شده در شکل ۱ آمده است. در این مدل که دو دسته کاربر اولیه (Pu) و کاربر ثانویه (Su) در نظر گرفته شده است، که برای سادگی فرض بر این است که فقط یک کاربر اولیه ارسال کننده وجود دارد و کاربران ثانویه در مجموعه‌ای کنار هم قرار گرفته‌اند و همه در صورت فرصت پیداکردن، اطلاعات خود را برای یک ایستگاه پایه[۱۱] ارسال می‌کنند. فواصل بین کاربران در شبکه اولیه و شبکه ثانویه و نیز بین دو شبکه با توجه به مقالات [۳۱-۲۷] نرمالیزه در نظر گرفته شده است. طبق توضیحات و همانند مراجع مرتبط با موضوع توزیع کانال‌ها از نوع رایلی است [۲۷] و از اثر سایه افکنی به دلیل حضور گره‌ها در محیط شهری کم تراکم و بدون کوه و تپه صرفنظر شده است. در شکل ۱ که h_{ij} $i \in \{Pu^t, Su^t, R\}$ و $j \in \{Pu^r, B, R\}$ ، ضریب کانال بین کاربر iام و jام است. h_{ij} دارای توزیع گوسی مختلط با متوسط صفر و واریانس یک می‌باشد. فرض بر این است که مسیر مستقیم بین منبع و مقصد کاربر اولیه وجود ندارد و یکی از کاربران ثانویه که شرایط بهتری برای کمک کردن به کاربر اولیه را دارد به‌عنوان رله انتخاب می‌شود و در ارسال اطلاعات با کاربر اولیه مشارکت می‌کند. کاربران ثانویه‌ای که فرصت کمک به کاربر اولیه را نیافته‌اند از سیگنال ارسال شده توسط کاربر اولیه انرژی برداشت می‌کنند و مرتباً کانال را مورد سنجش قرار می‌دهند و به محض خالی شدن کانال از سوی کاربر اولیه یکی از کاربران ثانویه‌ای که کانال ارسال بهتری دارد، اقدام به ارسال اطلاعاتش می‌کند. در این زمان سایر کاربران ثانویه به برداشت انرژی ادامه می‌دهند. در واقع در سیستم پیشنهادی گره‌ای که به عنوان کاربر ثانویه ارسال کننده انتخاب می‌شود هم انرژی را برداشت می‌نماید و هم سیگنال حاوی اطلاعات را دریافت و به یک ایستگاه پایه ارسال می‌کند (مشابه روش SWIPT[۱۲]). این درحالی است که سایر کاربران ثانویه انرژی را از طریق برداشت انرژی از سیگنال‌های موجود در باتری خود ذخیره می‌کنند.

احتمال فعال بودن کاربر اولیه با توزیع برنولی مدل شده است و این احتمال با P_{act} نمایش داده شده است. در شبیه‌سازی این مقدار برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ چگونگی تقسیم‌بندی زمانی در دو دوره زمانی T برای کاربران اولیه و ثانویه مشاهده می‌شود.

زمان یک شیار زمانی T در نظر گرفته شده است و فرض شده است که زمان سنجش کانال در برابر زمان کل بسیار ناچیز باشد. فرض بر آن است که در زمان فعال بودن کاربر اولیه، رله با استفاده از روش برداشت انرژی تقسیم توان، بخشی از توان سیگنال ارسال شده از سوی کاربر اولیه را صرف برداشت انرژی و بقیه را صرف انتقال اطلاعات می‌کند و برای ارسال از روش تقویت و ارسال استفاده می‌کند. نحوه انتخاب کاربر مشارکت کننده بدین صورت است که از میان کاربران ثانویه، کاربری که شرایط کانال بهتری جهت انتقال اطلاعات از منبع به رله را دارد، انتخاب می‌شود، یعنی کاربر با بهترین کیفیت کانال منبع-رله در مشارکت شرکت می‌کند. اگر کاربر انتخاب شده را با R نمایش دهیم و تعداد کاربران ثانویه را n_{Su} در نظر بگیریم، داریم:

$$R = arg\ \max_n |h_{Pu^t n}|^2 \qquad n = 1,2,...n_{Su} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱ نحوه انتخاب رله ثانویه ارسال کننده مشخص شده است.

۲-۱- محاسبه متوسط انرژی ذخیره شده در باتری کاربران ثانویه

در مدل پیشنهادی فرض شده است که هر یک از کاربران ثانویه دارای باتری هستند. با توجه به مقادیر مختلف انرژی که در زمان‌های مختلف توسط کاربران ثانویه برداشت می‌شود، می‌توان مقدار متوسط انرژی ذخیره شده در باتری هر یک از کاربران را محاسبه نمود و در فرمول‌ها از آن استفاده کرد. اینگونه در نظر گرفته شده است که هر کاربر ثانویه دارای یک باتری است و در مواقع کم بودن مقدار انرژی برداشتی از مقدار متوسط، مقدار کمبود انرژی از این باتری تامین می‌شود و در مواقع بیشتر بودن انرژی، مقدار اضافی در باتری ذخیره می‌شود. با توجه به شکل ۲ اگر کاربر ثانویه به عنوان رله انتخاب شود، در یک شیار زمانی مقدار مشخصی انرژی برداشت می‌کند که این مقدار از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E_h = E_{h_R} \triangleq \frac{\eta \rho P_{Pu} |h_{Pu^t R}|^2}{d^m_{Pu^t R}} \frac{T}{2} \qquad (۲)$$

باید به این نکته توجه کرد که کاربر رله با استفاده از روش تقسیم توانی در مدت زمان نصف شیار زمانی اقدام به برداشت انرژی می‌کند. در رابطه ۲ P_{Pu} توان ارسالی کاربر اولیه، d_{AB} و h_{AB} در کلیه فرمول‌های این مقاله به ترتیب برابر فاصله گره A از گره B و ضریب کانال بین گره A تا B هستند و m نمای افت مسیر[۱۳]، η ضریب کارایی نامیده می‌شود و به آن ضریب تبدیل توان سیگنال به توان الکتریکی نیز می‌گویند. مقدار این ضریب به روند یکسوسازی و عملکرد مدارهای برداشتگر انرژی بستگی دارد و ρ مشخص کننده ضریبی از توان دریافتی رله است که در روش تقسیم توان برای برداشت انرژی استفاده می‌شود و $0 < \eta, \rho < 1$ هستند.

سایر کاربرانی که در ارسال اطلاعات کاربر اولیه مشارکت نکردند، از سیگنال ارسالی کاربر اولیه و سیگنال ارسالی رله در طول یک شیار زمانی انرژی برداشت می‌کنند. برداشت انرژی از هر یک از توان‌های کاربر اولیه (P_{Pu}) و رله (P_R) در نصف شیار زمانی انجام می‌پذیرد. این کاربران از روش سوئیچینگ زمانی برای برداشت انرژی استفاده می‌کنند. مقادیر انرژی برداشت شده در این کاربران بصورت زیر است:

$$E_{h_{Su^t_n}} = \frac{\eta P_{Pu} |h_{Pu^t Su_n}|^2}{d^m_{Pu^t Su_n}} \frac{T}{2} + \frac{\eta P_R |h_{RSu_n}|^2}{d^m_{RSu_n}} \frac{T}{2} \qquad (۳)$$

$$n = 1,2,...n_{Su} \qquad , n \neq R$$

زمانی که کانال از سوی کاربران ثانویه خالی تشخیص داده شد، یکی از کاربرانی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]

که شرایط بهتری از لحاظ کانال دارد، به عنوان کاربر ثانویه ارسال کننده انتخاب می‌شود. سایر کاربران ثانویه اقدام به برداشت انرژی از این سیگنال ارسالی (با توان P_{Su}) می‌کنند. در این ارسال نیز از روش سوئیچینگ زمانی جهت برداشت انرژی استفاده می‌گردد. انرژی در کل یک شیار زمانی برداشت می‌شود. این مقدار در رابطه زیر آمده است:

$$E_{h_{Su_n}} = \frac{\eta P_{Su} \mid h_{Su^tSu_n} \mid^2}{d^m_{Su^tSu_n}} T \qquad n = 1,2,...n_{Su}, n \neq L \qquad (۴)$$

در روابط ۲، ۳ و ۴ مقادیر لحظه‌ای انرژی برداشت شده محاسبه شد. برای محاسبه مقدار متوسط، باید مقادیر میانگین توزیع نمایی $|h|^2$ یعنی یک را در روابط مذکور جایگذاری کرد. مقدار متوسط انرژی برداشت شده در یک شیار زمانی بصورت زیر محاسبه می‌شود. مقادیر P_{Su} و P_R در روابط ۳ و ۴ برابر همان مقدار متوسط انرژی ذخیره شده در باتری کاربران ثانویه است که در ادامه محاسبه می‌شود.

برای محاسبه مقدار متوسط انرژی ذخیره شده در باتری کاربران ثانویه باید مقادیر احتمال فعال بودن کاربر اولیه (P_{act})، احتمال انتخاب یک کاربر بعنوان رله، احتمال ارسال یک کاربر ثانویه و مقادیر انرژی برداشت شده توسط هر یک از کاربران در ارسال‌های مختلف مورد توجه قرار گیرد. مقدار متوسط انرژی ذخیره شده در باتری کاربران ثانویه از رابطه زیر بدست می‌آید. این رابطه برای کاربر ثانویه اول به ازای دو کاربر ثانویه، بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{E}_{h_{Su}} = P_{act}\left[Pr(\text{Su is relay}) \times \bar{E}_{h_R} + (1 - Pr(\text{Su is relay})) \times E_{h_{Su_n}}\right] + (1 - P_{act}) \times \left[Pr(\text{Su transmit}) \times 0 + (1 - Pr(\text{Su transmit})) \times \bar{E}_{h_{Su_n}}\right] \qquad (۵)$$

در رابطه ۵ زمانی که کاربر اولیه فرصت ارسال دارد (P_{act}) به دو صورت انرژی می‌تواند برداشت شود. قسمت اول مربوط به زمانی است که کاربر اول رله باشد. در این قسمت مقدار متوسط محاسبه شده از رابطه ۲ جایگذاری می‌شود. اگر کاربر اول رله نباشد، می‌تواند از سیگنال کاربر اولیه و رله انرژی برداشت کند. اگر کاربر ثانویه فرصت ارسال پیدا کند ($1 - P_{act}$) دو حالت وجود دارد. حالت اول اینکه کاربر ثانویه اول اقدام به ارسال اطلاعاتش کند که در این حالت مقدار انرژی برداشت شده برابر صفر است. در حالت دوم در صورت ارسال نکردن کاربر اول، این کاربر می‌تواند از سیگنال ارسالی کاربر دوم انرژی برداشت کند که از این مقدار با توجه به رابطه (۴) و مقدار کم P_{Su} صرفنظر می‌شود. حال احتمال رله بودن کاربر اول را محاسبه می‌کنیم. این احتمال اینگونه محاسبه می‌شود که مقدار مجذور اندازه کانال اول از مجذور اندازه کانال دوم کوچک تر باشد. این احتمال از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$P(\text{Su is relay}) = Pr(|h_{Pu^tSu_1}|^2 > |h_{Pu^tSu_2}|^2) = Pr(|h_{Pu^tSu_1}|^2 - |h_{Pu^tSu_2}|^2 > 0) \qquad (۶)$$

برای محاسبه احتمال رابطه ۶ به تابع چگالی احتمال تفاضل دو توزیع نمایی نیاز است. فرض می‌شود X و Y دارای دو توزیع نمایی بصورت زیر هستند:

$$f_X(x) = \lambda_1 \, exp(-\lambda_1 x) \;, f_Y(y) = \lambda_2 \, exp(-\lambda_2 y)$$

در زیر تابع چگالی احتمال تفاضل دو توزیع نمایی (Z=X-Y) آمده است:

$$f_Z(z) = \begin{cases} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} exp(-\lambda_1 z) & if \;\; z \geq 0 \\ \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} exp(\lambda_2 z) & if \;\; z < 0 \end{cases} \qquad (۷)$$

با توجه به ضابطه اول فرمول ۷ احتمال رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$Pr(|h_{Pu^tSu_1}|^2 - |h_{Pu^tSu_2}|^2 > 0) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \int_0^\infty exp(-\lambda_1 z)\, dz$$

$$= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left(-\frac{1}{\lambda_1} exp(-\lambda_1 z)\right)\Big]_0^\infty = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \qquad (۸)$$

احتمال رله بودن کاربر ثانویه اول از بین کل کاربران ثانویه با فرض داشتن ۵ کاربر ثانویه بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Pr(|h_{Pu^tSu_1}|^2 - |h_{Pu^tSu_2}|^2 > 0, ..., |h_{Pu^tSu_1}|^2 - |h_{Pu^tSu_5}|^2 > 0) = \prod_{i=2}^{5} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_i} \qquad (۹)$$

احتمال ارسال کاربر ثانویه نیز شبیه احتمال رله بودن کاربر ثانویه محاسبه می‌شود و فقط مقادیر متوسط توزیع‌های نمایی فرق می‌کند. محاسبه این احتمال برای دو کاربر ثانویه بصورت زیر است:

$$Pr(|h_{Su_1B}|^2 - |h_{Su_2B}|^2 > 0) = \frac{\lambda_{Su_2B}}{\lambda_{Su_1B} + \lambda_{Su_2B}} \qquad (۱۰)$$

در روابط :

$$P_R = P_{Su} = \frac{\bar{E}_{h_{Su}}}{T}$$

است. حال مقادیر احتمال‌های محاسبه شده را در رابطه ۵ جایگذاری می‌شود و متوسط انرژی ذخیره شده به ازای دو کاربر ثانویه بدست می‌آید:

$$\bar{E}_{h_{Su}} = \frac{P_{act} \frac{\eta P_{Pu} \mid h_{Pu^tR} \mid^2}{d^m_{Pu^tR}} \frac{T}{2} \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \times (\rho - 1) + 1\right]}{\left(1 - (1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \frac{\eta \mid h_{RSu_1} \mid^2}{d^m_{RSu_1}} \frac{P_{act}}{2} - (1 - P_{act})(1 - \frac{\lambda_{Su_2B}}{\lambda_{Su_1B} + \lambda_{Su_2B}}) \frac{\eta \mid h_{Su^tSu_1} \mid^2}{d^m_{Su^tSu_1}}\right)} \qquad (۱۱)$$

حال می‌توان از تقسیم انرژی متوسط ذخیره شده بر زمان یک شیار زمانی، توان متوسط ذخیره شده در باتری کاربران ثانویه را بصورت زیر بدست آورد:

$$\bar{P}_{Su} = \frac{\bar{E}_{h_{Su}}}{T} \qquad (۱۲)$$

در ادامه مقادیر توان ارسالی رله (P_R) و توان ارسالی کاربر ثانویه ارسال کننده (P_{Su}) برابر مقدار محاسبه شده در رابطه ۱۲ است و برای سادگی علامت متوسط آن از روابط حذف شده است.

۳- تحلیل عملکرد سیستم

۳-۱- محاسبه احتمال قطع کاربر اولیه

همانطور که اشاره شد، ازبین کاربران ثانویه کاربری که کانال منبع-رله آن وضعیت بهتری داشته باشد، بعنوان رله در ارسال اطلاعات به کاربر اولیه کمک می‌کند. کاربر ثانویه انتخاب شده بعنوان

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

رله با R نشان داده می‌شود یعنی $R = Su_j^t$ است. سیگنال دریافتی در رله در k امین ارسال بصورت زیر است:

$$y_{Pu^tR}(k) = \frac{1}{\sqrt{d^m_{Pu^tR}}}\sqrt{P_{Pu}}h_{Pu^tR}x_1(k) + n^{[R]}(k) \qquad (۱۳)$$

که در آن $x_1(k)$ نمایشگر سیگنال نرمالیزه شده و نمونه‌برداری شده از منبع، m نشان دهنده نمای افت مسیر و $n^{[R]}(k)$ نویز گره R در ارسال kام است. سیگنال ارسالی از رله (کاربر ثانویه انتخاب شده بعنوان رله) بصورت زیر است:

$$x_R(k) = \frac{\sqrt{P_R}y_{Pu^tR}(k)}{\sqrt{(1-\rho)\frac{P_{Pu}|h_{Pu^tR}|^2}{d^m_{Pu^tR}} + \sigma^2_{n^{[R]}}}} \qquad (۱۴)$$

در نهایت سیگنال دریافتی در مقصد بصورت زیر است:

$$y_{Pu^r}(k) = \frac{1}{\sqrt{d^m_{RPu^r}}}h_{RPu^r}x_R(k) + n^{[Pu^r]}(k) \qquad (۱۵)$$

با قرار دادن مقدار $x_R(k)$ در معادله ۱۵ و سپس ساده‌سازی، سیگنال دریافتی بر حسب سیگنال ورودی بصورت زیر درمی‌آید:

$$y_{Pu^r}(k) = \frac{\sqrt{(1-\rho)P_{Pu}P_R}h_{Pu^tR}h_{RPu^r}x_1(k)}{\sqrt{d^m_{RPu^t}}\sqrt{(1-\rho)P_{Pu}|h_{Pu^tR}|^2 + d^m_{Pu^tR}\sigma^2_{n^{[R]}}}}$$

$$+\frac{\sqrt{P_R d^m_{Pu^tR}}h_{RPu^r}n^{[R]}(k)}{\sqrt{d^m_{RPu^r}}\sqrt{(1-\rho)P_{Pu}|h_{Pu^tR}|^2 + d^m_{Pu^tR}\sigma^2_{n^{[R]}}}} + n^{[Pu^r]}(k) \qquad (۱۶)$$

سیگنال دریافتی در مقصد کاربر اولیه را می‌توان به دو بخش سیگنال اصلی و نویز جدا کرد. با تعریف

$$h_1 \triangleq \frac{h_{Pu^tR}}{d^m_{Pu^tR}} \quad , \quad h_2 \triangleq \frac{h_{RPu^r}}{d^m_{RPu^r}} \qquad (۱۷)$$

مقدار سیگنال به نویز در مقصد کاربر اولیه که از تقسیم توان سیگنال به توان نویز بدست می‌آید، بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\gamma_D = \frac{P_R(1-\rho)P_{Pu}|h_1|^2|h_2|^2}{P_R|h_2|^2\sigma^2_{n^{[R]}} + (1-\rho)P_{Pu}|h_1|^2\sigma^2_{n^{[Pu^r]}} + \sigma^2_{n^{[R]}}\sigma^2_{n^{[Pu^r]}}} \qquad (۱۸)$$

با توجه به محاسبه سیگنال، احتمال قطع قابل محاسبه است. احتمال قطع که به آن احتمال خاموشی نیز گفته می‌شود، زمانی اتفاق می‌افتد که نرخ ارسال بیشتر از ظرفیت سیستم باشد و این معادل است با اینکه سیگنال به نویز از یک مقدار آستانه کوچکتر باشد، که این آستانه به نرخ ارسال اولیه داده $(R_{0_{Pu}})$ وابسته است و آن را با $\gamma_{0_{Pu}}$ نشان می‌دهند.

$$P^{Pu}_{Out} = Pr(R_{0_{Pu}} > C) = Pr(\gamma_D < \gamma_{0_{Pu}}) \qquad (۱۹)$$

با توجه به $C = \frac{P_{act}}{2}\log_2(1+\gamma_D)$ و جایگذاری آن در رابطه (۱۹) $\gamma_{0_{Pu}}$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{0_{Pu}} = 2^{\frac{2R_{0_{Pu}}}{P_{act}}} - 1 \qquad (۲۰)$$

برای محاسبه احتمال قطع داریم:

$$\gamma_D = \frac{\frac{P_{Pu}|h_1|^2}{\sigma^2_{n^{[R]}}}(1-\rho)\frac{P_R|h_2|^2}{\sigma^2_{n^{[Pu^r]}}}}{\frac{P_R|h_2|^2}{\sigma^2_{n^{[Pu^r]}}} + \frac{P_{Pu}|h_1|^2}{\sigma^2_{n^{[R]}}}(1-\rho) + 1} \qquad (۲۱)$$

برای ساده‌سازی و محاسبه احتمال قطع داریم:

$$\gamma_D = \frac{X_1X_2}{X_1+X_2+1}, X_1 = \frac{P_{Pu}|h_1|^2}{\sigma^2_{n^{[R]}}}(1-\rho) \quad , \quad X_2 = \frac{P_R|h_2|^2}{\sigma^2_{n^{[Pu^r]}}} \qquad (۲۲)$$

در هر ارسال از بین کاربران ثانویه، کاربری انتخاب می‌شود که کیفیت کانال منبع - رله بهتری داشته باشد و این یعنی کاربری که سیگنال به نویز بالاتری را دریافت می‌کند. پس توزیع X_1 از نوع توزیع ماکزیمم چند متغیر نمایی است که محاسبه تابع تجمعی آن در زیر آمده است:

$$F_X(x) = Pr(max(x_1, x_2 ... x_{n_{su}}) < x)$$

$$= Pr(x_1 < x) \times ... \times Pr(x_2 < x) = \prod_{i=1}^{n_{su}}(1 - exp(-\lambda_i x)) \qquad (۲۳)$$

در رابطه ۲۳ x_iها متغیرهای نمایی با متوسط $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{P_{Pu}\sigma^2_{h_i}(1-\rho)}{\sigma^{2[R]}_n}$ هستند. X_2 متغیر نمایی است که از متغیر ماکزیمم نمایی‌ها مستقل است. تابع توزیع تجمعی γ_D بصورت زیر است:

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{0_{Pu}}) = \int_0^\infty Pr(\frac{X_1\lambda}{X_1+\lambda+1} \le \gamma_{0_{Pu}})f_{X_2}(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

$$= \int_0^{\gamma_{0_{Pu}}} Pr(X_1 \ge \frac{\gamma_{0_{Pu}}\lambda + \gamma_{0_{Pu}}}{\lambda - \gamma_{0_{Pu}}})f_{X_2}(\lambda)\mathrm{d}\lambda + \int_{\gamma_{0_{Pu}}}^\infty Pr(X_1 \le \frac{\gamma_{0_{Pu}}\lambda + \gamma_{0_{Pu}}}{\lambda - \gamma_{0_{Pu}}})f_{X_2}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \qquad (۲۴)$$

چون مقدار $Pr(X_1 \ge \frac{\gamma_{0_{Pu}}\lambda + \gamma_{0_{Pu}}}{\lambda - \gamma_{0_{Pu}}})$ همواره برابر یک است، انتگرال تابع چگالی احتمال توزیع نمایی به راحتی محاسبه می‌شود. اگر میانگین توزیع نمایی X_2 با $\frac{1}{\lambda_{X_2}} = \frac{P_R\sigma^2_{h_2}}{\sigma^{2[Pu^r]}_n}$ نمایش داده شود، داریم:

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{0_{Pu}}) = 1 - exp(-\lambda_{X_2}\gamma_{0_{Pu}}) + \int_{\gamma_{0_{Pu}}}^\infty Pr(X_1 < th)f_{X_2}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \qquad (۲۵)$$

که در رابطه ۲۵ $th \triangleq \frac{\gamma_{0_{Pu}}\lambda + \gamma_{0_{Pu}}}{\lambda - \gamma_{0_{Pu}}}$ است. بااستفاده از توزیع ماکزیمم نمایی‌ها برای حالت دو کاربر ثانویه داریم:

$$P^{Pu}_{Out} = 1 - exp(-\lambda_{X_2}\gamma_{0_{Pu}}) + \lambda_{X_2}\int_{\gamma_{0_{Pu}}}^\infty (1-exp(-th\lambda_1))(1-exp(-th\lambda_2))exp(-\lambda\lambda_{X_2})\mathrm{d}\lambda$$

$$= 1 - exp(-\lambda_{X_2}\gamma_{0_{Pu}}) + \lambda_{X_2}\int_{\gamma_{0_{Pu}}}^\infty exp(-\lambda\lambda_{X_2})\mathrm{d}\lambda$$

$$-\lambda_{X_2}\int_{\gamma_{0_{Pu}}}^\infty exp(-\lambda_1 th)exp(-\lambda\lambda_{X_2})\mathrm{d}\lambda$$

$$-\lambda_{X_2}\int_{\gamma_{0_{Pu}}}^\infty exp(-\lambda_2 th)exp(-\lambda\lambda_{X_2})\mathrm{d}\lambda$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter 2018

$$-\lambda_{X_2}\int_{\gamma_{0_{Pu}}}^{\infty} exp(-\lambda_3 th)exp(-\lambda\lambda_{X_2})\mathrm{d}\lambda \qquad \lambda_3=\lambda_1+\lambda_2 \qquad (۲۶)$$

حال انتگرال یکی از جملات بالا را با استفاده از مرجع [۳۲] محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda_{X_2}\int_{\gamma_{0_{Pu}}}^{\infty} exp(-\lambda_1 th)exp(-\lambda\lambda_{X_2})\mathrm{d}\lambda$$
$$=2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_1\lambda_{X_2}}exp(-\gamma_{0_{Pu}}(\lambda_1+\lambda_{X_2}))\times K_1\left(2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_1\lambda_{X_2}}\right) \qquad (۲۷)$$

در رابطه ۲۷، $K_1()$ تابع بسل مرتبه اول اصلاح شده نوع دوم است. در نهایت پس از محاسبه تک تک انتگرال‌ها احتمال قطع کاربر اولیه در حالت دو کاربر ثانویه به صورت زیر بدست می‌آید:

$$P_{Out}^{Pu}=1-2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_1\lambda_{X_2}}exp(-\gamma_{0_{Pu}}(\lambda_1+\lambda_{X_2}))$$
$$\times exp(-\gamma_{0_{Pu}}(\lambda_2+\lambda_{X_2}))\times K_1\left(2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_2\lambda_{X_2}}\right)$$
$$\times K_1\left(2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_1\lambda_{X_2}}\right)-2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_2\lambda_{X_2}}\times K_1\left(2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_3\lambda_{X_2}}\right)$$
$$+2\sqrt{(\gamma_{0_{Pu}}^2+\gamma_{0_{Pu}})\lambda_3\lambda_{X_2}}exp(-\gamma_{0_{Pu}}(\lambda_3+\lambda_{X_2})) \qquad (۲۸)$$

تحلیل ریاضی احتمال قطع به ازای دو کاربر ثانویه بصورت دقیق محاسبه شده است. تعداد جملات نمایی و بسل با زیاد شدن تعداد کاربران ثانویه با نمای $2^{n_{Su}}$ افزایش می‌یابد. بطور مشابه برای تعداد کاربر بیشتر می‌توان احتمال قطع را محاسبه کرد.

۳-۲- محاسبه احتمال قطع کاربر ثانویه

کاربر ثانویه در طول زمان برداشت انرژی کانال را مورد سنجش قرار می‌دهد و زمانی که کانال از سوی آن خالی تشخیص داده شد، با فرض اینکه متوسط توان ارسالی تمام کاربران ثانویه برابر است، از بین کاربران ثانویه کاربری که بهترین وضعیت از لحاظ کیفیت کانال را دارد، اطلاعاتش را ارسال می‌کند. اگر کاربر انتخاب شده با L نشان داده شود، داریم:

$$L=arg\ \max_n |h_{nB}|^2 \qquad n=1,2,...n_{Su} \qquad (۲۹)$$

اگر مقصد کاربران ثانویه با B نمایش داده شود، سیگنال دریافتی در مقصد برابر است با:

$$y_B(k)=\frac{1}{\sqrt{d_{Su^tB}^m}}\sqrt{P_{Su}}h_{Su^tB}x_2(k)+n^{[B]}(k) \qquad (۳۰)$$

مقدار P_{Su} همان مقدار متوسط انرژی ذخیره شده در باتری کاربران ثانویه است. حال می‌توان با استفاده از معادله بالا و از تقسیم توان سیگنال به توان نویز، سیگنال به نویز کاربر ثانویه را بدست آورد:

$$\gamma_S=\frac{P_{Su}|h_{Su^tB}|^2}{d_{Su^tB}^m\sigma_{n^{[Su^r]}}^2} \qquad (۳۱)$$

همانند قبل می‌توان برای کاربر ثانویه نیز احتمال قطع و ظرفیت را محاسبه نمود.

$$P_{Out}^{Su}=Pr(\gamma_S<\gamma_{0_{Su}})$$

$$\gamma_{0_{Su}}=2^{\frac{R_{0_{Su}}}{1-P_{act}}}-1 \qquad (۳۲)$$

$$P_{Out}^{Su}=Pr\left(\frac{P_{Su}|h_{Su^tB}|^2}{d_{Su^tB}^m\sigma_{n^{[Su^r]}}^2}<\gamma_{0_{Su}}\right)$$
$$=Pr(|h_{Su^tB}|^2<\frac{\gamma_{0_{Su}}d_{Su^tB}^m\sigma_{n^{[Su^r]}}^2}{P_{Su}})=Pr(|h_{Su^tB}|^2<\delta) \qquad (۳۳)$$

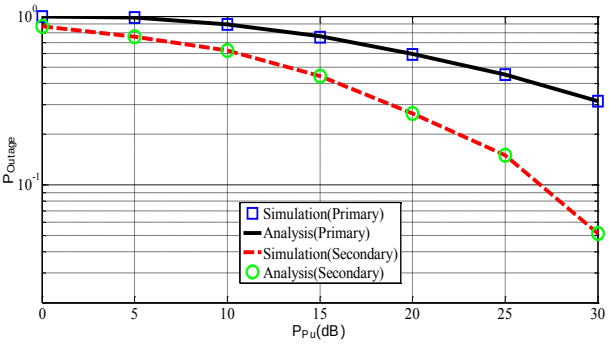
که در آن $\delta=\frac{\gamma_{0_{Su}}d_{Su^tB}^m\sigma_{n^{[Su^r]}}^2}{P_{Su}}$ است. با توجه به اینکه $|h_{Su^tB}|^2$ ماکزیمم $|h_{nB}|^2$ها است، بنابراین این توزیع از نوع ماکزیمم چند توزیع نمایی است و با استفاده از تابع توزیع تجمعی ارائه شده و قرار دادن آستانه بدست آمده در فرمول احتمال قطع قابل محاسبه است:

$$P_{Out}^{Su}=\prod_{i=1}^{n_{su}}(1-exp(-\alpha_i x))|_{x=\delta} \qquad (۳۴)$$

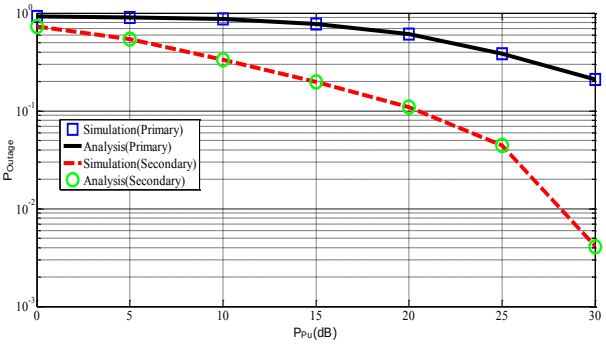
که در آن $\frac{1}{\alpha_i}\triangleq\sigma_{h_{Su^tB}}^2$ است.

۴- شبیه‌سازی

نمودار احتمال قطع برای کاربران اولیه و ثانویه به ازای تعداد کاربران مختلف و به ازای تغییرات توان رسم شده است. در شبیه‌سازی‌ها به دلیل کم بودن مقدار انرژی برداشت شده از سیگنال رله و کاربر ثانویه، در محاسبه مقدار متوسط انرژی باتری کاربران ثانویه کاربر اولیه در دو حالت تحلیل



شکل(۳): نمودار احتمال قطع کاربران اولیه و ثانویه (دو کاربر ثانویه)



شکل(۴): نمودار احتمال قطع کاربران اولیه و ثانویه (۵ کاربر ثانویه)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

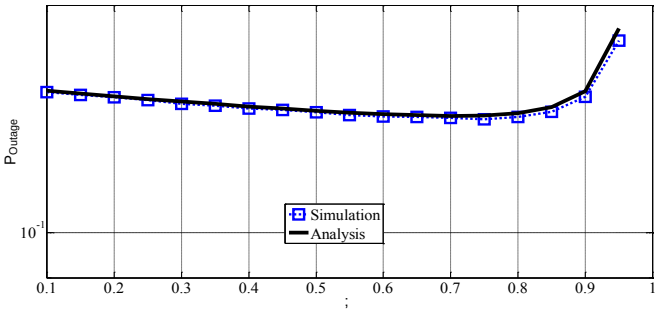
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

ریاضی و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو از این مقدار صرفنظر شده است. توان کاربر اولیه از ۰ تا ۳۰ دسیبل تغییر می‌کند و ضریب تبدیل توان سیگنال به توان الکتریکی یعنی η برابر ۰/۷ درنظر گرفته شده است و مقدار ρ برابر ۰/۵ قرار داده شده است. همچنین مقدار نرخ ارسال کاربران اولیه و ثانویه برای کل شبیه‌سازی‌ها به ترتیب برابر $R_{0_{Pu}} = 0.5\text{bits/s/Hz}$ و $R_{0_{Su}} = 0.2\text{bits/s/Hz}$ است و مقدار P_{act} برابر ۰/۸ قرار داده شده است. فواصل بین کاربران در شبکه اولیه و شبکه ثانویه و نیز بین دو شبکه نرمالیزه در نظر گرفته شده است.[۳۱-۲۷] برای بدست آوردن فواصل، مکان‌های کاربر اولیه ارسال کننده (Pu^t) در نقطه (۱و۱-) و گیرنده کاربر اولیه (Pu^r) در نقطه (۱و۱) و مقصد کاربران ثانویه در مرکز مبدا مختصات (۰و۰) ثابت در نظر گرفته شده است. بوسیله یک عدد تصادفی مختلط مختصات کاربران ثانویه در شبیه‌سازی‌های مختلف مشخص می‌شوند. سپس فواصل کاربران مختلف از هم محاسبه می‌گردد. برای اینکه نتایج شبیه‌سازی به فواصل تولید شده وابسته نباشد، هر نمودار رسم شده از میانگین گیری روی فواصل مختلف بدست آمده است. در کلیه شبیه‌سازی‌ها نمای افت مسیر برابر ۳ است. نویز کانال نرمالیزه، ثابت و برابر واحد در نظر گرفته شده است [۲۷، ۲۸ و ۳۱]. شکل ۳ نمودارهای احتمال قطع کاربران اولیه و ثانویه به ازای دو کاربر ثانویه را نمایش می‌دهد. در شکل ۴ نمودارهای احتمال قطع به ازای ۵ کاربر ثانویه رسم شده است. همانطور که دیده می‌شود، نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی روی هم منطبق شده‌اند.

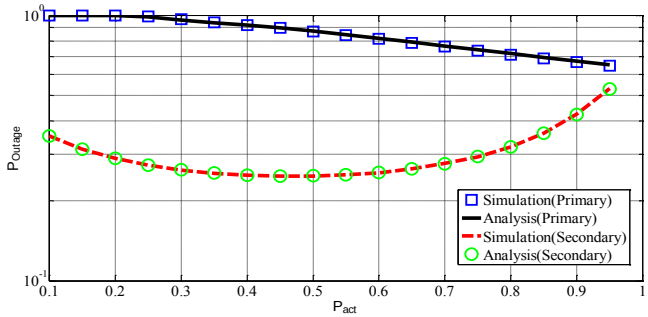
بهتر بودن احتمال قطع کاربر ثانویه نسبت به کاربر اولیه در هر دو حالت ۲ و ۵ کاربره به دلیل وجود چندگانگی از مرتبه دو و پنج در کاربران ثانویه است. به طوری که مثلا وقتی دو کاربر ثانویه وجود دارد و از بین این کاربران بهترین کاربر انتخاب می‌شود، چندگانگی باعث بهبود عملکرد شبکه ثانویه می‌شود.

اگر نمودار احتمال قطع کاربر اولیه را به ازای یک توان ثابت (در اینجا ۲۵ dB) برای ρهای مختلف رسم کنیم مشاهده می‌کنیم که احتمال قطع کاربر اولیه در یک مقدار مشخص ρ مینیمم می‌شود. این نمودار در شکل ۵ به ازای دو کاربر ثانویه نمایش داده شده است. در این نمودار به ازای ρ=۰/۴۵ احتمال قطع کاربر اولیه مینیمم است. دلیل کاهشی و سپس افزایشی بودن این نمودار تاثیر پارامتر ρ روی مقدار احتمال قطع محاسبه شده کاربر اولیه در قسمت ۳-۱ و رابطه ۲۸ و همچنین مقدار انرژی برداشت شده در کاربران ثانویه‌ای است که در ارسال اطلاعات به کاربر اولیه کمک می‌کنند. به طوری که با افزایش مقدار ضریب ρ انرژی برداشت شده کاربران ثانویه افزایش می‌یابد (رابطه ۲) اما از طرفی توان سیگنال داده دریافتی در رله کاهش می‌یابد که باعث افزایش احتمال قطع می‌گردد. برای مقادیر کوچک ρ اثر افزایش انرژی کاربر ثانویه غالب است و احتمال قطع را کاهش می‌دهد اما برای مقادیر بزرگ ρ کاهش توان سیگنال داده احتمال قطع را زیاد می‌کند. همچنین در کاربر ثانویه با افزایش ρ احتمال قطع به مقدار اندکی کاهش می‌یابد. دلیل کاهشی بودن نمودار احتمال قطع کاربر ثانویه این است که هر چقدر ρ افزایش پیدا کند، مقدار انرژی ذخیره شده در باتری کاربر ثانویه بیشتر است، در نتیجه احتمال قطع کاربر ثانویه هم کاهش پیدا می‌کند. به دلیل بدیهی بودن این موضوع نمودار این احتمال قطع آورده نشده است. نمودار تغییرات احتمال قطع نسبت به P_{act} در شکل ۶ به ازای دو کاربر ثانویه رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش احتمال ارسال کاربر اولیه احتمال قطع این کاربر نیز کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، کم شدن مقدار $\gamma_{0_{Pu}}$ با توجه به رابطه ۱۹ است. ولی در مورد کاربر ثانویه با افزایش P_{act}، $\gamma_{0_{Su}}$ در رابطه ۳۱ متضاد توان ارسالی کاربر ثانویه عمل می‌کند یعنی در زمانی که توان کاربر ثانویه با افزایش P_{act} افزایش پیدا می‌کند مقدار $\gamma_{0_{Su}}$ افزایش پیدا می‌کند. ولی اثر این افزایش احتمال کاربر اولیه روی افزایش توان بیشتر است و از این رو احتمال قطع کاهش می‌یابد. بعد از گذر از مقدار مینیمم با کاهش توان ارسالی و افزایش $\gamma_{0_{Su}}$، احتمال قطع به سرعت بالا می‌رود.

در شکل ۷ نمودار تغییرات ρ_{opt}ی که احتمال قطع کاربر اولیه را مینیمم کرده است، برحسب توان کاربر اولیه ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار توان کاربر اولیه، مقدار ρ_{opt}ی که احتمال قطع کاربر اولیه را مینیمم می‌کند، افزایش پیدا می‌کند. شکل ۷ را اینگونه می‌توان توجیه کرد که با افزایش توان کاربر اولیه، هر چه مقدار ρ بیشتر باشد، مقدار توان برداشت شده در رله افزایش می‌یابد و احتمال قطع نیز شرایط بهتری پیدا می‌کند. در مدل پیشنهادی از روش انتخاب رله با بهترین کیفیت کانال منبع-رله استفاده شد و کاربر ثانویه جهت کمک به ارسال اطلاعات کاربر اولیه انتخاب شد. در این قسمت روش‌های دیگر گزینش رله برای سیستم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

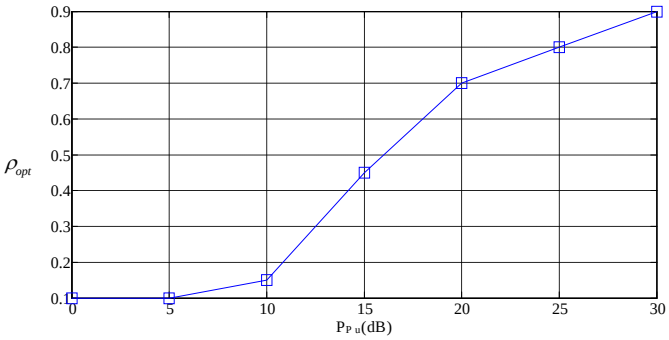


شکل(۵): نمودار احتمال قطع کاربر اولیه به ازای یک توان ثابت (25dB) بر حسب ρ (دو کاربر ثانویه)

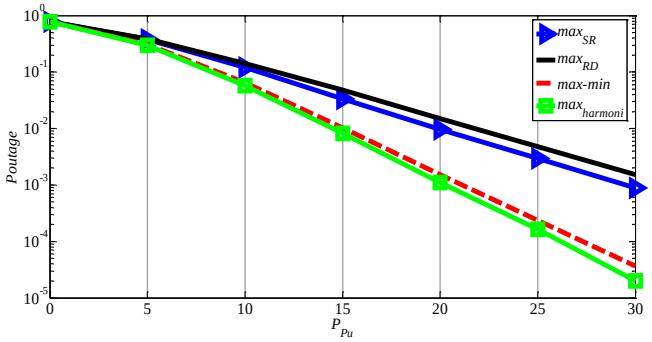


شکل(۶): نمودار احتمال قطع کاربران به ازای یک توان ثابت(20dB) بر حسب P_{act} (دو کاربر ثانویه)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]



شکل(۷): نمودار تغییرات ρ_{opt} کاربر اولیه برحسب توان کاربر اولیه (دو کاربر ثانویه)



شکل(۸): احتمال قطع کاربر اولیه به ازای روش‌های گزینش رله با فاصله ثابت کاربران

شکل ۸ احتمال قطع کاربر اولیه به ازای روش‌های گزینش رله مختلف را نشان می‌دهد. در ادامه برخی از روش‌های انتخاب رله توضیح داده می‌شود. در روش انتخاب رله بیشینه-کمینه که برای اولین بار در [۳۳] پیشنهاد شد، به این صورت عمل می‌کند که برای هر رله از بین کانال‌های منبع-رله و رله-مقصد کانالی که بدترین کیفیت را داشته باشد ابتدا مشخص می‌شود. سپس از بین این رله‌ها رله‌ای که کیفیت کانال بهتری را دارا باشد به عنوان رله انتخاب می‌شود. اگر h_{SR_n} و h_{R_nD} به ترتیب ضرایب کانال بین منبع-رله و رله-مقصد باشند و N رله موجود باشد، داریم:

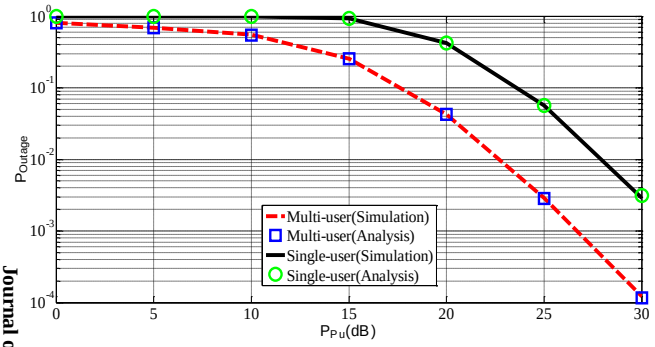
$$R = arg\ \max_{R_n}\left(min(|h_{SR_n}|^2, |h_{R_nD}|^2)\right) \qquad n = 1,2,...N \qquad (۳۵)$$

در روش بیشترین میانگین هارمونی اطلاعات تمامی کانال‌ها نیاز است [۳۳]. این روش که در رابطه (۳۶) آمده است، با توجه به اینکه تمامی ضرایب کانال در انتخاب دخیل هستند نسبت به روش‌های دیگر عملکرد بهتری دارد. مقداری که بیشینه می‌شود، شباهت زیادی به سیگنال به نویز در روش تقویت و ارسال دارد، این روش برای روش تقویت و ارسال کارایی خوبی دارد.

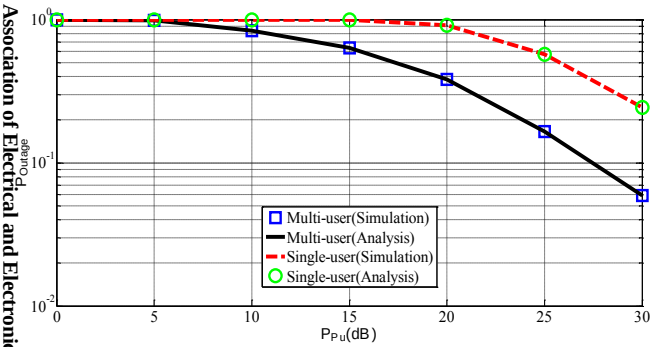
$$R = arg\ \max_{R_n}\left(\frac{|h_{SR_n}|^2 . |h_{R_nD}|^2}{|h_{SR_n}|^2 + |h_{R_nD}|^2}\right) \qquad n = 1,2,...N \qquad (۳۶)$$

در نمودار شبیه‌سازی شده با یک مکان ثابت برای کاربران روش بیشترین میانگین هارمونی بهترین شرایط را داراست و نمودار احتمال قطع آن از سایر روش‌ها پایین‌تر قرار گرفته است. نمودار روش بیشینه-کمینه از دو روش بهترین کیفیت کانال منبع-رله و رله-مقصد وضعیت بهتری دارد و احتمال قطع در این حالت کمتر از دو روش دیگر است. با توجه به فواصل کاربران شبیه‌سازی احتمال قطع روش‌های مختلف گزینش رله بوسیله روش مونت کارلو انجام شده است و تحلیل ریاضی روش‌های مختلف گزینش رله برای مدل پیشنهادی به دلیل پیچیدگی انجام نگرفته است.

در این قسمت اثر افزایش تعداد کاربران اولیه بررسی می‌شود. فرض شده است که ۳ کاربر اولیه داریم که هر کاربر در فرکانس خاصی ارسال انجام می‌دهد و این کاربران بصورت همزمان فعال هستند و محدودیت برداشت انرژی از فرکانس‌های مختلف در مدارها وجود ندارد. در اطراف هر کاربر اولیه سه کاربر ثانویه وجود دارد. فاصله بین هر کاربر ثانویه با کاربران اولیه شبیه قبل محاسبه شده است. لازم به ذکر است کاربران ثانویه بصورت خوشه‌بندی شده و با توجه به مختصات در نظر گرفته شده برای کاربران در نزدیکی هر یک از کاربران اولیه در نظر گرفته شده اند. در شکل ۹ نمودار احتمال قطع کاربر ثانویه در دو حالت چند کاربره و تک کاربره مشاهده می‌شود. همانگونه که انتظار می‌رفت با افزایش تعداد کاربران اولیه چون توان برداشتی از سیگنال‌ها افزایش پیدا می‌کند، احتمال قطع در حالت چند کاربره کمتر می‌شود. نمودار احتمال قطع کاربر اولیه در دو حالت چند کاربره و تک کاربره در شکل ۱۰ رسم شده است. به دلیل افزایش انرژی ذخیره شده در باتری رله، احتمال قطع کاربر اولیه نیز شرایط بهتری پیدا می‌کند.



شکل(۹): احتمال قطع کاربر ثانویه در دو حالت چند کاربره و تک کاربر



شکل(۱۰): احتمال قطع کاربر اولیه در دو حالت چند کاربره و تک کاربره

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با تلفیق شبکه‌های مشارکتی، شبکه‌های رادیو شناختمند و سیستم‌های برداشت انرژی مبحثی تحت عنوان مخابرات رادیو شناختمند مشارکتی با قابلیت برداشت انرژی مطرح شد. مدل سیستمی ارایه شد تا هم

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]

بتوان از مزیت‌های سیستم رادیو شناختمند مشارکتی استفاده نمود و هم بوسیله استفاده از برداشت انرژی عمر سیستم‌های مخابراتی را افزایش داد.

در این مقاله احتمال قطع کاربران اولیه و ثانویه برای تعداد کاربران ثانویه مختلف مورد بررسی و تحلیل ریاضی قرار گرفته است و با روش مونت کارلو در یک نمودار رسم شده است. نمودار شبیه‌سازی و تحلیل ریاضی در کلیه شکل‌ها روی هم منطبق شده‌اند. نمودار احتمال قطع بر حسب تغییرات ρ (ضریب توان برداشتی) نشانگر این مطلب است که افزایش ضریب ρ برای کاربر اولیه تا یک مقدار مشخص باعث کاهش احتمال قطع می‌شود و از آن به بعد احتمال قطع افزایش می‌یابد. اگر هدف کاربران اولیه و ثانویه در یک توان ارسال کاربر اولیه ثابت، افزایش عملکرد کلی سیستم باشد و بتوان احتمال فعال بودن کاربر اولیه که با توزیع یکنواخت انتخاب شده است را تنظیم نمود، می توان به احتمال قطع مناسب برای کاربران اولیه و ثانویه دست پیدا کرد. به ازای مقادیر شبیه‌سازی شده در مقاله و با توجه به نمودار احتمال قطع بر حسب احتمال فعال بودن کاربر اولیه اگر مقدار P_a (در توان ۲۰ دسیبل) تقریباً ۰/۵ انتخاب شود، عملکرد کلی سیستم بهینه می‌شود. نتایج بررسی اثر روش‌های گزینش رله برای مدل پیشنهادی روی احتمال قطع نشان داده شد و اینگونه نتیجه گرفته شد که بهترین روش گزینش رله، روش بیشترین هارمونی است. همچنین نشان داده شد که با افزایش تعداد کاربران اولیه که هر کدام در یک فرکانس خاص کار می‌کنند و بطور همزمان اقدام به ارسال اطلاعات خود می‌نمایند، احتمال قطع کاربران ثانویه شرایط بهتری پیدا می‌کند. این کاهش احتمال قطع به دلیل افزایش انرژی ذخیره شده در کاربران ثانویه است.

مراجع

[1] J. G. Proakis and M. Salehi, Digital communications. McGraw-Hill, 2008.

[2] E. C. Van Der Meulen, "Three-terminal communication channels," Advances in applied Probability, pp. 120–154, 1971.

[3] S. Abdulhadi, M. Jaseemuddin, and A. Anpalagan, "A survey of distributed relay selection schemes in cooperative wireless ad hoc networks," Wireless Personal Communications, vol. 63, no. 4, pp . 917–935, 2012.

[4] W.Zhuang and M. Ismail, "Cooperation in wireless communication networks," Wireless Communications Magazine, IEEE, vol. 19, no. 2, pp. 10–20, 2012

[5] B. Benmammar, A. Amraoui, and F. Krief, "A survey on dynamic spectrum access techniques in cognitive radio networks," International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), vol. 5, no. 2, p.68, 2013.

[6] P. Yadav, S. Chatterjee, and P. P. Bhattacharya, "A survey on dynamic spectrum access techniques in cognitive radio," Int. J. Next-Generation Networks, vol. 4, no. 4, pp. 27–46, 2012.

[7] B. Wang and K. Liu, "Advances in cognitive radio networks: A survey," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, , vol. 5, no. 1, pp. 5–23, 2011.

[8] Zeraatkarmoghadam J, Farrokhi H, Neda N. "Interference Management in Cognitive Radio Networks using Cooperative Beamforming with Imperfect CSI - jiaeee, vol. 14, no. 2, pp. 1–9, Apr. 2017.

[9] P. Ren, Y. Wang, Q. Du, and J. Xu, "A survey on dynamic spectrum access protocols for distributed cognitive wireless networks," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, no. 1 p. 60, 2012.

[10] L. Giupponi and C. Ibars, Cooperative cognitive systems. INTECH Open Access Publisher, 2009.

[11] H. Suraweera, P. J. Smith, N. Surobhi et al, "Exact outage probability of cooperative diversity with opportunistic spectrum access," In Communications workshops, 2008. ICC workshops' 08. IEEE international conference on, pp. 79–84, 2008.

[12] Q. Zhang, J. Jia, and J. Zhang, "Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks," Commu- nications Magazine, IEEE, vol. 47, no. 2, pp. 111–117, 2009.

[13] J. Jia, J. Zhang, and Q. Zhang, "Cooperative relay for cognitive radio networks," In INFOCOM, IEEE, pp. 2304–2312, 2009.

[14] K. B. Letaief and W. Zhang, "Cooperative communications for cognitive radio networks," Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 878–893, 2009.

[15] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, and Z. Han, "Resource allocation in wireless networks with RF energy harvesting and transfer," Network, IEEE, vol. 29, no. 6, pp. 68–75, 2015.

[16] L. Xiao, P. Wang, D. Niyato, D. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contem- porary survey," IEEE Communication Surveys and Tutorials, vol. 7, no. 2, pp. 757–789, 2015.

[17] S. Luo, R. Zhang, and T. J. Lim, "Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmit- ters," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 12, no. 3, pp. 1196–1207, 2013.

[18] X.Zhou, R.Zhang, and C.K.Ho, "Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff," in Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE, pp. 3982–3987, 2012.

[19] T. Li, P. Fan, and K. Letaief, "Outage probability of energy harvesting relay-aided cooperative networks over Rayleigh fading channel," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 65, no. 2, pp. 972-978, 2016.

[20] Nhat, Tran Thong, Tran Trung Duy, and Vo Nguyen Quoc Bao. "Performance evaluation of cooperative relay networks with one full-energy relay and one energy harvesting relay." In Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom), 2nd International Conference on, pp. 7-12. IEEE, 2018.

[21] Gu, Yanju. "Outage Analysis of Energy Harvesting based Opportunistic Cooperative Communication Systems." arXiv preprint arXiv:1801.06854, 2018.

[22] G. Ganesan and Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part i: Two user networks," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 6, no. 6, pp. 2204–2213, 2007.

[23] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey," Physical communication, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, 2011.

[24] S. Yin, Z. Qu, and S. Li, "Achievable throughput optimization in energy harvesting cognitive radio systems," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 33, no. 3, pp. 407–422, 2015.

[25] Y. Zou, J. Zhu, B. Zheng, and Y.-D. Yao, "An adaptive cooperation diversity scheme with best-relay selection in cognitive radio networks," Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 58, no. 10, pp. 5438–5445, 2010.

[26] Son, Pham Ngoc, and Tran Trung Duy. "Performance analysis of Underlay Cooperative Cognitive Full-duplex Networks with Energy-Harvesting Relay." Computer Communications, vol 122, pp 9-19, 2018.

[27] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]

processing," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol.12, no.7, pp.3622–3636, 2013.
[28] Z. Wang, Z. Chen, L. Luo, Z. Hu, B. Xia, and H. Liu, "Outage analysis of cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer," in Communications (ICC), IEEE International Conference on. IEEE, pp. 4348–4353, 2014.
[29] A. El Shafie, M. Ashour, A. Mohamed, and T. Khattab, "Optimal spectrum access for a rechargeable cognitive radio user based on energy buffer state," in Computing, Networking and Communications (ICNC), International Conference on, pp. 242–247, Feb 2015.
[30] G. Zheng, Z. Ho, E. Jorswieck, B. Ottersten et al., "Information and energy cooperation in cognitive radio networks," Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 62, no. 9, pp. 2290–2303, 2014.
[31] I. Krikidis, G. Zheng, and B. Ottersten, "Harvest-use cooperative networks with half/full-duplex relaying," in Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE, pp. 4256–4260, April 2013.
[32] V. Emamian, P. Anghel, and M. Kaveh, "Multi-user spatial diversity in a shadow-fading environment," in Vehicular Technology Conference, Proceedings. VTC 2002-Fall. IEEE 56th, vol. 1. IEEE, pp. 573–576, 2002.
[33] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 24, no. 3, pp. 659–672, 2006.

[1] Fading
[2] Shadowing
[3] Cooperative Communication
[4] Spatial Diversity
[5] Cognitive Radio
[6] Energy Harvesting (EH)
[7] Power Splitting
[8] Time Switching
[9] Underlay
[10] Interweave
[11] Base Station
[12] Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
[13] Path loss Exponent

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.16.7]