
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده برق و رباتیک
گروه مخابرات-گرایش سیستم

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

انتخاب رله در ارتباطات وسیله به وسیله جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات

سونیا نادری

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا جوان

شهریور ۱۳۹۴

شماره : ۱۳۰۹/آ.ت.ب
تاریخ : ۹۴/۰۶/۲۹
ویرایش : ـــــــ

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :

سونیا نـادری رشته : **مهندسی برق** گرایش : **مخابرات**

تحت عنوان : **انتخاب رلـه در ارتباطات وسیله به وسیله جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات**

که در تاریخ **۹۴/۰۶/۲۹** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : عالی امتیاز ۲۰) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹) ۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)

۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ ۱۶) ۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضـــاء
۱ـ استاد راهنما	محمدرضا جبراییل	استادیار	
۲ـ استاد مشاور	ـــــ	ـــــ	ـــــ
۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	عبدالرضا صدیقی	استادیار	
۴ـ استاد ممتحن	امیررضا سرفراز	استادیار	
۵ ـ استاد ممتحن	سید مسعود میرقادری	استادیار	

رئیس دانشکـده :

پروردگارم راشاکرم که از روی کرم، **خانواده‌ای** استوار و فداکار نصیبم ساخته تا از ریشه آن ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و معرفت بهره مند گردم. عزیزانی که وجودشان تاج افتخاری است بر سرم و فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنایی رویشان سرمایه های جاودانگی زندگی ام است.

ای مادر، ای شوق زیبای نفس کشیدن، ای روح مهربان هستی ام، به خود تبریک می گویم که تورا دارم و دنیا با همه بزرگی اش مثل تورا ندارد. این اثر را به پاس یک عمر از خودگذشتگی و محبت بی دریغ، به **مادرم** تقدیم می کنم.

سپاس بی کران **پروردگار** یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی مان ساخت.

سپاس و تقدیر خود را به محضر استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای **دکتر محمدرضا جوان** که در کلیه مراحل انجام این پژوهش با دانش خود و صبورانه و با خوش رویی راهنمایم نمودند تقدیم می دارم.

تعهدنامه

اینجانب سونیا نادری دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی برق گرایش مخابرات سیستم دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی انتخاب رله در ارتباطات وسیله به وسیله جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات تحت راهنمایی دکتر محمدرضا جوان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام‌شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا « Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

چکیده

افزایش تعداد کاربران متحرک، تنوع سرویس‌ها و تقاضای کاربران برای بهبود پارامترهای مختلف کیفیت سرویس موجب شده است که محققان در اندیشه تکامل شبکه‌های نسل چهارم به سمت شبکه‌های نسل پنجم باشند. ارتباطات وسیله به وسیله یکی از فناوری‌های کارآمد به‌منظور افزایش کارایی طیف فرکانسی و کاهش تأخیر در شبکه‌های نسل پنجم است که در آن برخلاف ارتباطات متداول شبکه‌های سلولی که ارتباط بین کاربران تنها از طریق ایستگاه پایه انجام می‌شود، دو کاربر می‌توانند بدون واسطه و به‌صورت مستقیم با یکدیگر ارتباط برقرار کنند که این عمل موجب کارایی بیشتر طیف و افزایش ظرفیت شبکه می‌گردد.

از آنجایی که در ارتباطات وسیله به وسیله، کاربران ارسال اطلاعات را بر روی طیف مشترک و همزمان با شبکه سلولی انجام می‌دهند، تداخل متقابل در شبکه ایجاد و کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین به دلیل ماهیت پخشی شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، تمام کاربران تحت پوشش شبکه قادر به شنود سیگنال‌های ارسالی هستند. بنابراین، برقراری امنیت ارسال اطلاعات در شبکه یکی از مسائل چالش‌برانگیز خواهد بود. از طرفی دیگر با افزایش فاصله بین فرستنده و گیرنده در ارتباطات وسیله به وسیله، به دلیل افت توان سیگنال ارسالی در طول مسیر، احتمالات قطع در ارتباطات وسیله به وسیله افزایش می‌یابد. ارتباطات مشارکتی از طریق رله یکی از روش‌های مؤثر جهت افزایش امنیت ارسال اطلاعات در حضور شنودگر و توسعه محدوده ارتباطات در شبکه است. به همین دلیل، موضوع این پایان‌نامه انتخاب رله در ارتباطات وسیله به وسیله جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات انتخاب شده است.

در این پایان‌نامه دو مدل سیستمی مختلف را بر مبنای امنیت ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله بررسی و جهت حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله را به‌گونه‌ای محدود می‌کنیم که احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی از یک مقدار

آستانه بیشتر نگردد. در مدل سیستمی اول، عملکرد قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حضور چندین رله دیکد و ارسال و شنودگر خارجی را بر اساس طرح انتخاب رله پیشنهادی و طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت در گیرنده و در مدل سیستمی دوم، در حضور یک رله غیرقابل اطمینان تقویت و ارسال که به‌صورت شنودگر در شبکه عمل می‌کند را با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده بررسی می‌کنیم.

از آنجایی که در این پایان‌نامه اثرات تداخل و مسائل امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله را به‌صورت توأم در نظر می‌گیریم و همچنین به دلیل اینکه سیگنال‌ها در طول دو بازه زمانی از طریق کانال مستقیم و کانال رله در گیرنده دریافت می‌گردند، محاسبات احتمال قطع امنیتی به دلیل وجود چندین پارامتر متغیر در شبکه چالش‌برانگیز است. بنابراین، در این پایان‌نامه با به‌کارگیری روش‌هایی احتمالات قطع ارتباط در شبکه سلولی و ارتباطات وسیله به وسیله را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه می‌کنیم.

کلیدواژه: ارتباطات وسیله به وسیله، امنیت لایه فیزیکی، شنودگر، ارتباطات مشارکتی، انتخاب رله، رله دیکد و ارسال، رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان، انتخاب لینک، احتمال قطع امنیتی

مقالات استخراج شده از پایان‌نامه:

مقالات پذیرفته و ارائه شده:

۱- محمدرضا جوان، سونیا نادری، ارتباط امن در شبکه‌های وسیله به وسیله با استفاده از رله تقویت و ارسال، **دومین همایش ملی مهندسی رایانه و مدیریت فناوری اطلاعات**، ۱۸ خرداد ۱۳۹۴، **دانشگاه شهید بهشتی**.

۲- محمدرضا جوان ، سونیا نادری، انتخاب رله در شبکه‌های وسیله به وسیله جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات، **دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن رمز ایران**، ۱۷ تا ۱۹ شهریور ۱۳۹۴، **دانشگاه گیلان**.

مقالات در دست داوری:

1- M. R. Javan, and S. Naderi, "Relay selection for secure device to device communications in 5G cellular networks with direct link," submitted for publication in **IET communications**.

2- M. R. Javan, and S. Naderi, "Outage analysis of the link selection for secure D2D communications with untrusted relay," submitted for publication in **IEEE communications letters**.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مجموعه رله‌های دیکد و ارسال	$K=\{1,...,k\}$
مجموعه رله‌هایی که پیام را دیکد کرده‌اند (مجموعه دیکدکنندگان)	$\mathcal{K}_D$
فضای نمونه تمام مجموعه دیکدکنندگان ممکن	$\Omega=\left\{\varnothing\bigcup\mathcal{K}_D,\ D=1,2,...,2^k-1\right\}$
ضریب کانال بین گره a و b	$\lvert h_{a\to b}\rvert^2$
پارامتر توزیع نمایی ضریب کانال از گره a به گره b	$\sigma^2_{a\to b}$
مقدار مورد انتظار متغیر تصادفی z	$E\{z\}$
تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی z	$F_z\{.\}$
تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی z	$f_z\{.\}$
سمبل ارسالی گره a در بازه زمانی i	x_a^i
توان ارسالی توسط گره a	P_a
سیگنال دریافتی توسط گره b در بازه زمانی i	y_b^i
نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده b	n_b
چگالی طیفی توان نویز در گیرنده	N_0

عنوان	علامت اختصاری
نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل کانال از گره a به گره b در بازه زمانی i	$\gamma_{a\to b}^{i}$
ظرفیت کانال از گره a به گره b در بازه زمانی i	$C_{a\to b}^{i}$
نرخ ارسالی ایستگاه پایه	R^{P}
احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی در بازه زمانی i	$P_{\text{out}}^{C,i}$
احتمال قطع ارتباط در کانال بین گره a و گره b	$P_{\text{out}}^{a\to b}$
نسبت توان ارسالی گره a به چگالی طیفی توان نویز در گیرنده	$\delta_a = \frac{P_a}{N_0}$
مقدار آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی	$\overline{P}_{\text{out}}^{C}$
نرخ داده ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله	R^{D}
نرخ ابهام شنودگر	R^{e}
نرخ ارسال امن اطلاعات کاربران وسیله به وسیله	R^{SD}

عنوان	علامت اختصاری
تمام زیرمجموعه‌های ممکن مجموعه رله‌ها	$K_m \subseteq K,\ m = 0,1,...,2^{\lvert k \rvert} - 1$
احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله	P_{out}
بهترین رله انتخاب شده	r^*
نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گره b از طریق کانال مستقیم و رله دیکد و ارسال از گره a به گره b در طول دو بازه زمانی ارسال سیگنال	$\gamma_{\text{e2e}}^{arb}$
ظرفیت در گره b از طریق کانال مستقیم و رله دیکد و ارسال از گره a به گره b در طول دو بازه زمانی ارسال سیگنال	C_r^{ab}
مجموعه تمام رله‌های متعلق به مجموعه دیکدکنندگان $\mathcal{K}_D$ به غیر از رله r	Z_r
nامین زیرمجموعه غیر تهی از اعضای مجموعه Z_r	$S_r(n)$
بهره تقویت رله تقویت و ارسال	G
رله تقویت و ارسال	R

عنوان	علامت اختصاری
نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل کانال رله تقویت و ارسال از گره a به گره b	γ_{aRb}
نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک X	$\gamma_{\mathrm{e2e}}^{X}$
ظرفیت در گره b از طریق کانال مستقیم و کانال رله تقویت و ارسال از گره a به گره b در طول دو بازه زمانی با استفاده از طرح انتخاب لینک X	$C_{\mathrm{R},X}^{ab}$
ظرفیت امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک X	C_{sec}^{X}
احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک X	P_{out}^{X}
مقدار مجانبی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک X	$P_{\mathrm{out},\infty}^{X}$
نرخ امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در ارسال از طریق رله تقویت و ارسال	R^{S}

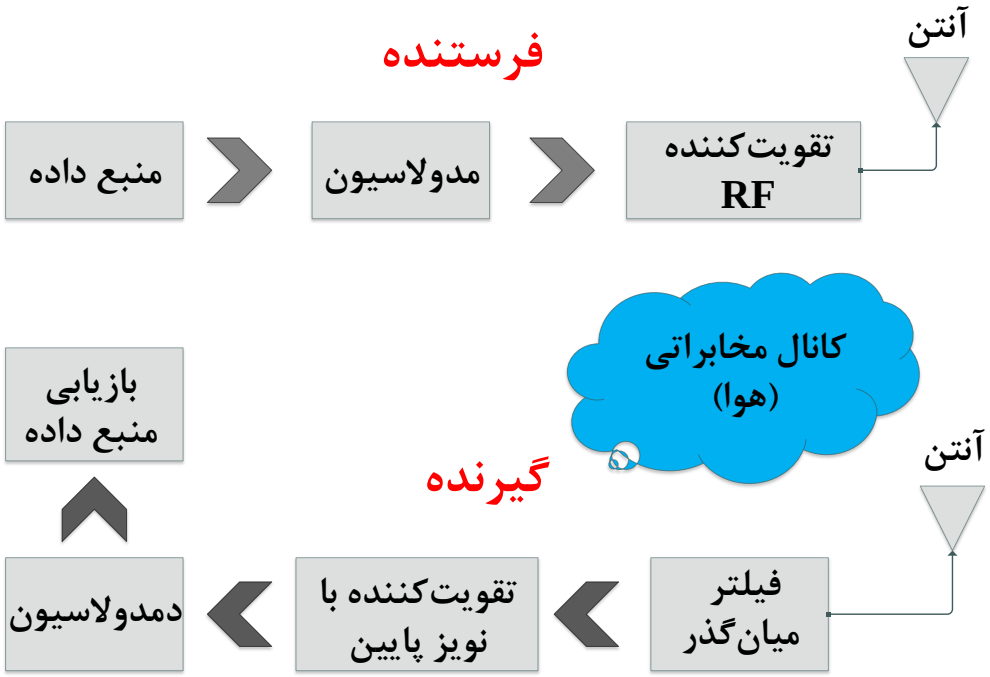
عنوان	علامت اختصاری
تابع انتگرال نمایی	$Ei(.)$
مقدار آستانه در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار	γ_T

فصل اول:

مقدمه

۱-۱-پیشگفتار

انتقال اطلاعات بدون رابط سیم و بوسیله امواج الکترومغناطیسی ارتباط بی‌سیم[1] یا مخابرات بی‌سیم نامیده می‌شود. قدیمی‌ترین ارتباط بی‌سیم به دوران ماقبل دنیای مدرن باز می‌گردد که از دود، آتش، پرچم، و غیره برای انتقال پیام در فواصل دور استفاده می‌شد [۱]. مخابرات بی‌سیم در سال ۱۸۹۷ با اختراع تلگراف بی‌سیم توسط گولیلمو مارکنی[2] ابداع شد [۲] که موفق به ارسال تلگراف بی‌سیم برای حرف S در فاصله حدود سه کیلومتری شده بود [۳]. برخلاف مخابرات باسیم که هر جفت فرستنده[3] و گیرنده[4] بوسیله رابط‌های مجزا و ایزوله از هم، به هم متصل می‌شوند، در مخابرات بی‌سیم کاربران در فضای آزاد مخابره کرده و تداخل[5] زیادی بین آن‌ها وجود دارد [۲]. اجزای یک سامانه مخابره بی‌سیم در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: نمایش شماتیک اجزای یک سامانه مخابره بی‌سیم

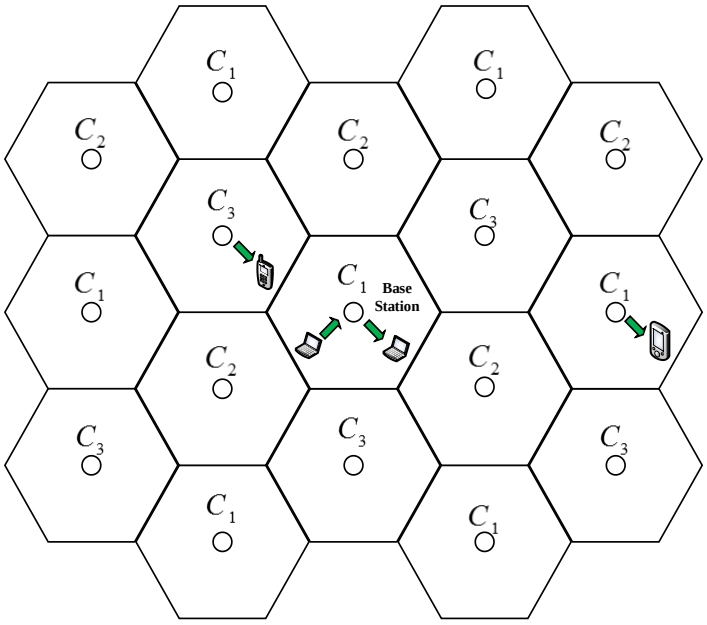
[1] Wireless communication
[2] Guglielmo marconi
[3] Transmitter
[4] Receiever
[5] Interference

سیستم مخابرات بی‌سیم مورد استفاده در یک منطقه جغرافیایی باید به‌گونه‌ای باشد که از لحاظ مخابراتی تمام منطقه را تحت پوشش قرار دهد و از دید امواج رادیویی هیچ نقطه کوری باقی نماند. همچنین، اختصاص فرکانس‌های کاری مورد استفاده باید به‌صورتی باشد که تداخل فرکانسی در سیستم ایجاد نشود. بنابراین هنگام پیاده‌سازی سیستم مخابراتی در یک منطقه جغرافیایی، منطقه مربوطه را به مناطق کوچک‌تری به نام سلول[1] تقسیم‌بندی می‌کنند و فرستنده را در سلول قرار می‌دهند. در این صورت، در شبکه‌های سلولی[2] سرویس‌دهی تنها در منطقه‌ای که سلول بندی شده است ممکن می‌شود و ارسال اطلاعات در هر سلول تنها از طریق ایستگاه پایه[3] امکان‌پذیر می‌گردد. در شبکه‌های سلولی، هرگونه ارتباطات بین کاربرهای شبکه از طریق ایستگاه پایه انجام می‌شود و دو کاربر نمی‌توانند به‌صورت مستقیم با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.

شبکه‌های سلولی دو مزیت عمده دارند. اولین مزیت آن‌ها استفاده مجدد از فرکانس حامل[4] با رعایت فاصله جغرافیایی و دیگری شکافتن سلول‌ها است. شکافتن سلول‌ها به این معنی است که در طرح اولیه شبکه سلولی، سلول را بزرگ انتخاب می‌کنند و در صورت افزایش تعداد کاربران، سلول را می‌توان به سلول‌های کوچک‌تری تقسیم کرد و اصطلاحاً سلول را شکافت و با گذاشتن ایستگاه‌های پایه اضافه، تعداد کاربران بیشتری را سرویس‌دهی کرد. شکل ۱-۲ نمونه‌ای از یک شبکه سلولی را نمایش می‌دهد که در آن هر سلول ناحیه‌ای است که توسط یک ایستگاه پایه پوشش داده می‌شود.

تاریخ کامل مخابرات بی‌سیم به چندین دوره اصلی تقسیم می‌گردد. دوره قبل از همگانی شدن سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم از سال ۱۹۵۰ شروع و تا سال ۱۹۶۰ ادامه یافت. در این دوره، از مخابرات بی‌سیم جهت کاربردهای پلیسی، نظامی و هواپیمایی استفاده می‌شد و تجهیزات ارسال و دریافت، حجیم و گران‌قیمت بود.

[1] Cell
[2] Cellular networks
[3] Base station
[4] Carrier frequency



شکل ۱-۲: نمونه‌ای شماتیک از یک شبکه سلولی [۱]

نسل اول شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ بر پایه فناوری آنالوگ[1] و استفاده از مفهوم سلولی پدید آمد. استفاده از مخابرات بی‌سیم سلولی موجب افزایش ظرفیت[2] سیستم، کاهش هزینه، بهبود کیفیت سرویس[3] و کاهش توان موردنیاز گردید. با افزایش بیش از حد تقاضا، سیستم‌های آنالوگ نسل اول قادر به تأمین ظرفیت موردنیاز برخی از مناطق شهری نبودند. بعلاوه سیستم‌های دیجیتال[4]، نرخ بیت[5] و سرعت بالاتری دارند و حجم اطلاعاتی بیشتری را می‌توان در کانال‌های آن مبادله کرد. شبکه‌های مخابراتی نسل دوم در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ و با استفاده از فناوری دیجیتال تحقق یافت و در سال ۱۹۹۲ در اروپا به بهره‌برداری تجاری رسید. در این سیستم، موبایل‌ها از فرکانس‌های ۸۹۰ تا ۹۱۵ مگاهرتز و ایستگاه پایه‌ها از فرکانس‌های ۹۳۵ تا ۹۶۰ مگاهرتز برای ارسال سیگنال استفاده می‌کنند. همچنین، پهنای باند[6] هر کانال[7] رادیویی ۲۰۰ کیلوهرتز است که توسط ۸

[1] Analoge
[2] Capacity
[3] Quality of service (QOS)
[4] Digital
[5] Bit rate
[6] Bandwith
[7] Channel

کاربر استفاده می‌شود. همزمان با راه‌اندازی موفقیت‌آمیز شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم نسل دوم در دهه ۱۹۹۰ میلادی، تحقیقات پیرامون شبکه‌های نسل سوم آغاز و این شبکه‌ها از سال ۲۰۰۰ به بهره‌برداری تجاری رسیدند. سیستم‌های نسل سوم، سیستم‌های مخابرات فردی[1] نامیده می‌شوند. سیستم‌های مخابرات فردی سیستمی است که با استفاده از آن هر کاربر می‌تواند در هر زمان و هر مکان، با هر شخص دیگر به کمک یک مخابرات فردی واحد تبادل اطلاعات نماید. از مزایای عمده شبکه‌های مخابراتی نسل سوم بر شبکه‌های نسل دوم نرخ بیت بالاتر، پشتیبانی همزمان صدا و تصویر با توجه به نرخ بیت بالا، قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتر، سرویس‌های دسترسی چندگانه همزمان برای یک کاربر و غیره است. دهه ۲۰۱۰ میلادی، دهه ظهور و رشد شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم نسل چهارم است. استفاده از چندین آنتن[2] در ابزارهای بی‌سیم و ایستگاه پایه و همچنین استفاده از پردازش‌های مناسب، موجب بهبود سرعت انتقال داده در این شبکه‌ها گردیده است. علاوه بر این با کاستن تعداد المان‌های شبکه، معماری شبکه در این فناوری‌ها ساده‌تر شده است.

آمارهای به‌دست آمده در طول چند سال اول دهه ۲۰۱۰ و پیش‌بینی‌های موجود برای سال‌های بعد از آن، نشان‌دهنده دو برابر شدن رشد تقاضا در بخش ترافیک داده[3] در هرسال است. به این ترتیب پیش‌بینی می‌شود که تقاضا برای شبکه‌های داده در سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۰۰۰ برابر مقدار آن در سال ۲۰۱۰ برسد. همچنین با افزایش تعداد کاربران متحرک، تنوع سرویس‌ها و تقاضای کاربران برای بهبود پارامترهای مختلف کیفیت سرویس مانند نرخ داده[4]، تأخیر[5] و پوشش[6] پیش‌بینی می‌شود که علیرغم سرویس‌های متمایز شبکه‌های نسل چهارم، این شبکه‌ها در دهه آینده قابلیت پاسخگویی به این نیازهای روزافزون کاربران را نداشته باشند. بنابراین، این عوامل موجب شده است که محققان در اندیشه تکامل

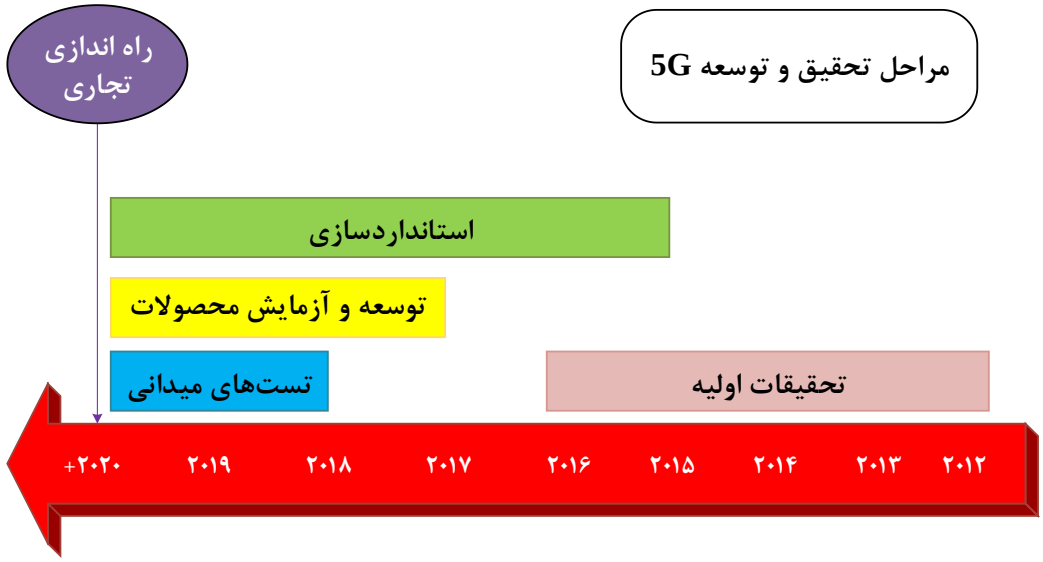
[1] Personal Communication Systems (PCS)
[2] Multiple antenna
[3] Data traffic
[4] Data rate
[5] Delay
[6] Coverage

شبکه‌های نسل چهارم به سمت شبکه‌های فراتر از نسل چهارم که اصطلاحاً شبکه‌های نسل پنجم نامیده می‌شوند، باشند. مقایسه فناوری نسل پنجم با فناوری‌های قبلی در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱: مقایسه فناوری نسل پنجم با نسل‌های قبلی

	نسل دوم (2G)	نسل سوم (3G)	نسل چهارم (4G)	نسل پنجم (5G)
فناوری‌ها	GSM GPRS IS-95	UMTS HSPA HSPA+	LTE LTE-A WiMAX2	?
روش دسترسی چندگانه	TDMA	CDMA	OFDMA	NOMA
پهنای باند	200 KHz	5 MHz	20-100 MHz	1-10 Gbps
نرخ داده	9.6-200 Kbps	2-42 Mbps	300-1000 Mbps	1-10 Gbps
تأخیر	150 ms	50 ms	10 ms	<5 ms
بستر انتقال	TDM سیم مسی و رادیو	TDM سیم مسی و رادیو	IP/MPLS فیبر و رادیو	IP/MPLS رادیو، رادیو موج میلی‌متری
نوع هسته	CS	CS & PS	All IP	All IP-NFV-SDN
سرویس‌ها	صوت-SMS	صوت-داده چندرسانه‌ای	صوت IP- دیتا اینترنت سیار	صوت IP دیتا (HD,3D) تلویزیون، D2D
باند فرکانسی	باند L دارای مجوز	باند L دارای مجوز	باند L و S دارای مجوز	باندهای میلی‌متری دارای مجوز و آزاد اشتراک طیفی

علیرغم تحقیقات و تلاش‌های انجام شده در راستای توسعه نسل پنجم ارتباطات بی‌سیم، این شبکه‌ها هنوز در مراحل اولیه مطالعات خود قرار دارند. شکل ۱-۳ زمان‌بندی مراحل تحقیق و توسعه شبکه‌های نسل پنجم را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: زمان‌بندی مراحل تحقیق و توسعه شبکه‌های نسل پنجم

اگرچه تحقیقات در فناوری نسل پنجم در چند سال اخیر آغاز شده، ولی هنوز تعریف جامع خاصی برای این شبکه‌ها ارائه نشده است. با این وجود، هدف اصلی تمامی تحقیقات پیرامون فناوری‌های این نسل، ارتباط نامحدود اشیا با یکدیگر با ظرفیت ارتباطی نامحدود و کیفیت سرویس بالا است. یک سری ملزومات برای شبکه‌های نسل پنجم تعریف شده است که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: کاهش قابل ملاحظه در تأخیر، افزایش قابلیت اطمینان[1] و در دسترس بودن شبکه، افزایش کارایی طیف[2] فرکانسی، پوشش وسیع‌تر و امنیت[3] بیشتر. جهت برآورده سازی این الزامات، فناوری‌های زیادی برای بهره‌گیری در شبکه‌های نسل پنجم در حال توسعه هستند که یا شکل تکامل یافته‌ای از فناوری‌های مورد استفاده در نسل‌های قبلی هستند و یا فناوری‌های جدیدی هستند که در نسل‌های قبلی مورد استفاده نبوده‌اند.

[1] Reliability
[2] Spectrum
[3] Security

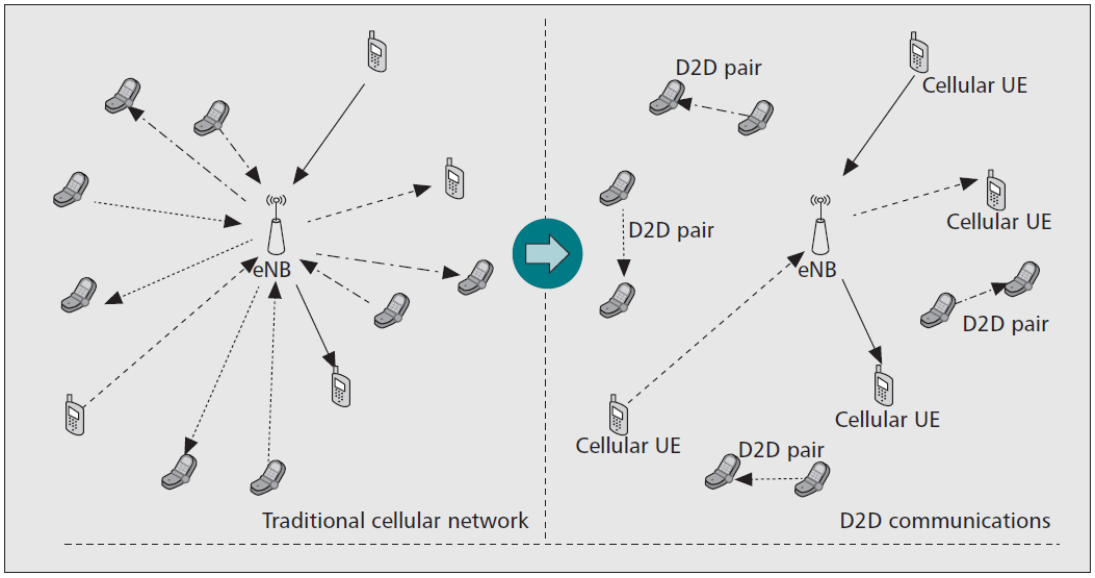
همچنین، بسیاری از فعالیت‌های تحقیقاتی جاری بر ارائه روش‌های جدید یا بهبودیافته در بخش دسترسی رادیویی[1] و به‌منظور افزایش کارایی طیف فرکانسی و کاهش تأخیر متمرکز هستند که نیازمند ارتباط مستقیم[2] بین دو کاربر نزدیک به هم است. بنابراین، ارتباطات وسیله به وسیله[3] به‌عنوان یکی از فناوری‌های کارآمد در شبکه‌های نسل چهارم و به‌ویژه نسل پنجم مطرح می‌گردد [۴, ۵].

همان‌طور که بیان شد، در شبکه‌های سلولی تمامی ارتباطات بین کاربران از طریق ایستگاه پایه برقرار می‌گردد. ارتباطات وسیله به وسیله یکی از تکنیک‌های برقراری ارتباط بین کاربران در شبکه‌های سلولی است که در آن کاربران به‌صورت زمینه‌ای[4] در شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌نمایند [۶]. برخلاف ارتباطات متداول شبکه‌های سلولی که در آن ارتباط بین کاربران تنها از طریق ایستگاه پایه انجام می‌شود، در ارتباطات وسیله به وسیله دو کاربر می‌توانند بدون واسطه و به‌صورت مستقیم با یکدیگر ارتباط برقرار کنند که این عمل موجب بهبود کارایی طیف[5] و افزایش ظرفیت شبکه می‌گردد. به همین دلیل، ارتباطات وسیله به وسیله در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۷, ۸]. از آنجایی که کاربران وسیله به وسیله[6] ارسال اطلاعات را بر روی طیف مشترکی با ارتباطات متداول شبکه سلولی انجام می‌دهند، تداخل متقابل[7] در شبکه ایجاد می‌شود و کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، مدیریت تداخل در ارتباطات وسیله به وسیله چالش‌برانگیز است. شکل ۱-۴ مدل سیستمی ارتباطات وسیله به وسیله را نشان می‌دهد.

بنابراین، به دلیل اینکه شبکه‌های نسل چهارم و به‌ویژه نسل پنجم از ارتباطات وسیله به وسیله به‌عنوان یک فناوری کارآمد جهت بهره‌وری بهینه از طیف فرکانسی، افزایش انرژی و ظرفیت شبکه

[1] Radio access
[2] Direct transmission
[3] Device-to-Device communications (D2D)
[4] Underlay
[5] Spectrum efficienty
[6] Device-to-Device users
[7] Mutual interference

استفاده می‌کنند، در این پایان‌نامه، برقراری ارتباط بین کاربران در شبکه سلولی را برمبنای ارتباطات وسیله به وسیله در نظر می‌گیریم.



شکل ۱-۴: مدل سیستمی ارتباطات وسیله به وسیله [۹]

تخصیص منابع[1] یکی از فاکتورهای اصلی در طراحی شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم است که علاوه بر کنترل تداخل کاربران و افزایش ظرفیت شبکه، کیفیت سرویس درخواستی کاربران را نیز فراهم می‌کند. منابع شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم شامل توان ارسالی توسط کاربران، نرخ ارسال داده، فرکانس‌های کاری، شکل بیم در فرستنده‌های چند آنتنی و کدهای ارسالی است که در بین آن‌ها توان ارسالی و طیف فرکانسی مهم‌ترین پارامترهای تخصیص منابع جهت کنترل تداخل کاربران و افزایش ظرفیت شبکه محسوب می‌شوند [۱۰].

ازلحاظ در دسترس بودن اطلاعات ضرایب کانال‌ها[2]، نرخ و توان‌های ارسالی در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، دو حالت کلی وجود دارد. در حالت اول، فرض می‌شود اطلاعات لحظه‌ای[3] شبکه نظیر ضرایب لحظه‌ای کانال یا اطلاعات کانال[4] در دسترس هستند و استراتژی ارسال یعنی نرخ‌های داده و توان‌های

[1] Resource allocation
[2] Channel coefficients
[3] Instantaneous information
[4] Channel side information (CSI)

ارسالی جهت بهینه‌سازی عملکرد کیفیت سرویس به‌صورت متغیر با زمان تخصیص داده می‌شوند که به آن تخصیص منابع می‌گویند. در حالت کلی، مسائل تخصیص منابع را به‌صورت روابط بهینه‌سازی مطرح می‌کنند که در آن تابع هدف، تابعی افزایشی از گذردهی یا نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل[1] کاربر و یا تابعی کاهشی از توان ارسالی کاربران است. به این تابع هدف تابع بهره[2] کاربر می‌گویند. قیود این مسئله بهینه‌سازی[3] شامل انواع محدودیت‌های کاربران یا سیستم نظیر بیشینه توان ارسالی کاربران، کیفیت سرویس درخواستی آن‌ها و بیشینه نرخ ارسال است. حالت دوم زمانی است که اطلاعات موردنیاز نظیر اطلاعات لحظه‌ای کانال در دسترس نباشد. این امر به این دلیل است که در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، همواره برقرار کردن لینک فیدبکی[4] با ظرفیت مناسب جهت فراهم کردن اطلاعات کانال در فرستنده امکان‌پذیر نیست. این امر معمولاً در شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم[5] و برخی دیگر از شبکه‌های ادهاک[6] خاص اتفاق می‌افتد که در آن کانال فیدبک با ظرفیت بالا در دسترس نیست. در این حالت، استراتژی ارسال با نرخ یا توان ارسالی ثابت استفاده می‌شود و عملکرد ارتباطی شبکه برمبنای احتمال قطع[7] اندازه‌گیری می‌گردد.

با توجه به اینکه در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم همواره لینک فیدبکی با ظرفیت مناسب در فرستنده برقرار نمی‌گردد و فرستنده اطلاعات لحظه‌ای کانال را در اختیار ندارد، در این پایان‌نامه فرض می‌کنیم اطلاعات لحظه‌ای کانال در فرستنده‌های شبکه در دسترس نیست و ارسال سیگنال با نرخ و توان ارسالی ثابت انجام می‌شود که در این حالت عملکرد شبکه را بر اساس احتمال قطع بررسی می‌کنیم.

[1] Signal-to-interference-and-noise ratio
[2] Utility function
[3] Optimization problem
[4] Feedback link
[5] Wireless sensor networks
[6] Ad hoc networks
[7] Outage probability

به دلیل ماهیت پخشی[1] شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، تمام کاربران موجود در ناحیه تحت پوشش شبکه قادر به کشف سیگنال ارسالی توسط فرستنده‌ها هستند. بنابراین، برقراری امنیت در حضور شنودگر[2] یکی از مسائل چالش‌برانگیز در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم است. هدف اصلی برقراری ارتباطات امن در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم این است که گیرنده‌های قانونی شبکه بتوانند با موفقیت پیام ارسالی توسط فرستنده‌ها را دریافت کنند و شنودگرها قادر به کشف این پیام‌ها نباشند.

برقراری امنیت در لایه‌های بالایی شبکه با استفاده از روش‌های رمزنگاری[3] انجام می‌شود که مقیاس بزرگ، دینامیک[4] و نامتمرکز شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم چالش‌های بسیاری را بر این روش‌ها تحمیل کرده است [۱۱]. یکی از ایده‌های نویدبخش جهت افزایش امنیت ارسال اطلاعات در مقابل حمله شنودگر، به‌کارگیری مشخصات لایه فیزیکی کانال بی‌سیم است که امنیت لایه فیزیکی[5] نامیده می‌شود [۱۲].

اخیراً مسئله برقراری امنیت لایه فیزیکی با استفاده از تئوری اطلاعات[6] توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مفهوم تئوری اطلاعات امنیت، اولین بار توسط شانون[7] [۱۳] معرفی شده است که در آن با به‌کارگیری سیاست‌هایی، امنیت پیام محرمانه حفظ می‌گردد. سپس wyner کانال استراق سمع کننده[8] را معرفی نموده [۱۴] و نشان داده است زمانی که کانال شنودگر بدتر[9] از کانال بین فرستنده و گیرنده باشد، فرستنده و گیرنده می‌توانند به خوبی پیام محرمانه را مبادله کنند و شنودگر قادر به دیکد کردن[10] هیچ اطلاعاتی نخواهد بود. هدف اصلی این مقاله بیشینه‌سازی نرخ امنیتی[11] است. در [۱۵]، نویسندگان

[1] Broadcast
[2] Eavesdropper
[3] Cryptographic
[4] Dynamic
[5] Physical layer security
[6] Information theory
[7] Shannon
[8] Wiretap channel
[9] degraded
[10] Decoding
[11] Secrecy rate

ظرفیت امن[1] کانال استراق سمع کننده گوسی[2] را مطالعه نموده و اختلاف بین ظرفیت شانون[3] کانال بین فرستنده و گیرنده و ظرفیت شانون کانال بین فرستنده و شنودگر را ظرفیت امن کانال گوسی نامیده‌اند. همچنین، csiszar و korner کانال استراق سمع کننده را به کانال پخشی[4] کلی تعمیم داده و نشان داده‌اند زمانی که ظرفیت کانال بین فرستنده و شنودگر از ظرفیت کانال بین فرستنده و گیرنده کمتر باشد ارتباط امن محقق می‌گردد [۱۶]. بنابراین، برقراری امنیت لایه فیزیکی یکی از مسائل اساسی در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم است و به همین منظور در این پایان‌نامه مسئله امنیت لایه فیزیکی شبکه در حضور شنودگر را بررسی می‌کنیم.

در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم زمانی که فاصله بین فرستنده و گیرنده زیاد باشد، به دلیل اثرات افت مسیر[5] [۱] توان سیگنال ارسالی در طول مسیر تضعیف می‌شود و احتمال قطع ارتباط در شبکه افزایش می‌یابد. از طرفی به دلیل وجود محدودیت حداکثر توان[6] ارسالی توسط فرستنده‌ها و وجود تداخل متقابل بین ارتباطات شبکه سلولی و ارتباطات وسیله به وسیله، قادر به افزایش توان ارسالی توسط فرستنده‌های وسیله به وسیله و جبران افت توان سیگنال ارسالی در طول مسیر نیستیم. به‌منظور توسعه محدوده ارتباطات وسیله به وسیله، ارسال اطلاعات به‌صورت مشارکتی[7] و از طریق رله[8] پیشنهاد می‌گردد. ارتباطات مشارکتی[9] به کمک رله که در آن رله سیگنال دریافتی از فرستنده را به گیرنده هدایت می‌کند، قابلیت اطمینان کانال فرستنده تا گیرنده را بهبود می‌بخشد و به دلیل قابلیتش در افزایش ظرفیت و کاهش توان مصرفی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۷]. دو نوع متداول از رله‌ها، رله‌های دیکد و ارسال[10] و تقویت و ارسال[11] نام دارند. در رله دیکد و ارسال، رله سیگنال دریافتی

[1] Secrecy capacity
[2] Gaussian
[3] Shannon capacity
[4] Broadcast channel
[5] Path loss
[6] Power peak
[7] Cooperative
[8] Relay
[9] Cooperative communications
[10] Decode and forward
[11] Amplify and forward

از فرستنده را پس از دیکد کردن، مجدداً کدگذاری نموده و به گیرنده ارسال می‌کند. در رله تقویت و ارسال، رله پس از دریافت سیگنال از فرستنده، آن را تقویت کرده و به گیرنده ارسال می‌کند.

ارتباطات مشارکتی می‌تواند با استفاده از چندین رله بین فرستنده و گیرنده انجام شود که در آن کانال‌های با طول بلندتر با چندین کانال با طول کوتاه‌تر جایگزین می‌شوند که این امر موجب بهبود نسبت سیگنال به نویز[1]های میانگین کانال می‌گردد. برخلاف ارتباطات مشارکتی بررسی شده در [۱۸] که در آن تمام رله‌ها در ارسال سیگنال به فرستنده کمک می‌کنند، در ارتباطات مشارکتی بر مبنای انتخاب رله[2] پیشنهادی در [۱۹]، تنها بهترین رله جهت ارسال سیگنال فرستنده انتخاب می‌شود و صرف‌نظر از تعداد رله‌ها، ارسال اطلاعات تنها از طریق دو کانال (کانال بهترین رله و کانال مستقیم[3]) انجام می‌شود که این عمل موجب استفاده مؤثر از طیف می‌گردد.

مطالعات اولیه انجام شده در زمینه امنیت ارتباطات مشارکتی در [۲۰] آورده شده است که در آن، کانال رله [۲۱] و استراق سمع کردن [۱۴] به‌صورت کانال رله-شنودگر[4] تعمیم داده شده است. از دید تئوری اطلاعات، ظرفیت امن شبکه با استفاده از ارتباطات مشارکتی بهبود می‌یابد. بنابراین، در ارتباطات مشارکتی از طریق رله علاوه بر توسعه محدوده ارتباطات، عملکرد امنیتی شبکه در حضور شنودگر نیز بهبود می‌یابد.

در ارتباطات وسیله به وسیله‌ای که علاوه بر کانال مستقیم از رله جهت ارسال اطلاعات استفاده می‌شود، به دلیل آنکه اطلاعات یکسانی از طریق کانال مستقیم و کانال رله ارسال می‌گردد، در گیرنده چندگانگی[5] بوجود می‌آید. بنابراین، انتخاب لینک[6] در گیرنده یکی از مسائل اساسی در ارتباطات

[1] Signal to noise ratio (SNR)
[2] Relay selection
[3] Direct channel
[4] Relay-eavesdropper channel
[5] Diversity
[6] Link selection

مشارکتی با استفاده از رله است. در حالت کلی سه طرح انتخاب لینک متداول ترکیب حداکثر نسبت[1]، ترکیب انتخابی[2] و ترکیب سوییچ و استقرار[3] وجود دارد که بر اساس آن‌ها می‌توان نسبت سیگنال به نویز دریافتی حاصل از دو کانال مستقیم و رله را در گیرنده تعیین نمود. در این پایان‌نامه، جهت توسعه محدوده ارتباطات وسیله به وسیله و برقراری امنیت ارسال اطلاعات در مقابل شنودگر، ارسال اطلاعات از طریق رله را پیشنهاد و سه طرح انتخاب لینک در گیرنده را بررسی می‌کنیم.

۱-۲- اهداف و نوآوری‌های پایان‌نامه

با توجه به مطالب بیان شده در بخش قبل، هدف اصلی این پایان‌نامه بررسی مسئله امنیت ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله است که به‌صورت زمینه‌ای با شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌کند و همچنین در آن از ارتباطات مشارکتی برای بهبود امنیت ارسال در حضور شنودگر استفاده شده است. در این حالت، ارتباطات وسیله به وسیله و ارتباطات شبکه سلولی به دلیل استفاده از طیف فرکانسی مشترک تداخل متقابل بر روی یکدیگر ایجاد می‌کنند. بنابراین به‌منظور حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی، توان فرستنده‌ها در ارتباطات وسیله به وسیله را به‌گونه‌ای محدود می‌کنیم که احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی از یک مقدار آستانه[4] تعیین شده بیشتر نگردد. به دلیل ماهیت پخشی شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، در این پایان‌نامه مسئله امنیت ارسال اطلاعات در برابر حمله شنودگر را در نظر می‌گیریم. از طرفی، جهت گسترش محدوده ارتباطات وسیله به وسیله و همچنین افزایش امنیت ارسال اطلاعات در حضور شنودگر، علاوه بر برقراری ارتباط توسط کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله، از ارتباطات مشارکتی از طریق رله استفاده نموده و انتخاب لینک بر اساس سه طرح ترکیب حداکثر نسبت، ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را بررسی می‌کنیم. درنهایت، عملکرد

[1] Maximum ratio combining
[2] Selection combining
[3] Switch and stay combining
[4] Threshold

ارتباطی شبکه را برمبنای احتمال قطع امنیتی[1] ارتباطات وسیله به وسیله در حضور شنودگر بررسی می‌کنیم.

با توجه به در نظر گرفتن توأم اثرات تداخل و مسائل امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله و همچنین دریافت سیگنال از طریق کانال مستقیم و رله در گیرنده، محاسبه روابط توابع توزیع تجمعی[2] و توابع چگالی احتمال[3] پارامترهای شبکه و درنتیجه محاسبات احتمال قطع امنیتی دشوار می‌گردد. بنابراین، در این پایان‌نامه با به‌کارگیری روش‌هایی، احتمالات قطع ارتباط در شبکه سلولی و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را به‌صورت یک عبارت بسته[4] محاسبه می‌کنیم.

در این پایان‌نامه دو نوع مدل سیستمی[5] مجزا برمبنای ارتباطات وسیله به وسیله در حضور تداخل متقابل با کاربران شبکه سلولی را در نظر می‌گیریم که در مقایسه با تحقیقات انجام شده در این زمینه دارای نوآوری‌هایی هستند که در این قسمت به آن‌ها اشاره می‌کنیم.

۱- در مدل سیستمی اول، در نظر گرفتن توأم ارتباطات وسیله به وسیله دارای تداخل متقابل با کاربران شبکه سلولی در حضور شنودگر، کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده ارتباطات وسیله به‌وسیله و چندین رله دیکد و ارسال نوین بوده است که با توجه به مطالعات انجام‌شده، تاکنون چنین مدل سیستمی بررسی نگردیده است. ویژگی‌های مدل سیستمی اول و نتایج حاصل شده در آن عبارت‌اند از:

- حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی در مقابل تداخل ناشی از برقراری ارتباطات وسیله به وسیله

[1] Secrecy outage probability
[2] Cumulative distribution functions (CDF)
[3] Probability density functions (pdf)
[4] Closed form expression
[5] System model

- برقراری ارتباط بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله از طریق کانال مستقیم و چندین رله دیکد و ارسال
- پیشنهاد طرح انتخاب رله برمبنای ضریب کانال بین رله تا گیرنده و انتخاب بهترین رله جهت ارسال سیگنال به گیرنده در ارتباطات وسیله به وسیله
- بررسی امنیت لایه فیزیکی شبکه در حضور شنودگر
- بررسی طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر
- محاسبه احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب رله پیشنهادی به‌صورت یک عبارت بسته
- محاسبه مقدار بازده امنیتی[1]

۲- در مدل سیستمی دوم، در نظر گرفتن توأم ارتباطات وسیله به وسیله دارای تداخل متقابل با کاربران شبکه سلولی در حضور کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده ارتباطات وسیله به وسیله و یک رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان[2] به‌عنوان شنودگر کاملاً نوین بوده که با توجه به مطالعات انجام شده، تاکنون چنین مدل سیستمی بررسی نگردیده است. ویژگی‌های مدل سیستمی دوم و نتایج حاصل شده در آن عبارت‌اند از:

- حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی در مقابل تداخل ناشی از برقراری ارتباطات وسیله به وسیله
- برقراری ارتباطات وسیله به وسیله بین فرستنده و گیرنده از طریق کانال مستقیم و یک رله تقویت و ارسال
- برقراری امنیت ارتباطات وسیله به وسیله در حضور رله غیرقابل اطمینان

[1] Secrecy throughput
[2] Untrusted amplify and forward relay

- بررسی دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله
- محاسبه احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک پیشنهادی به‌صورت یک عبارت بسته
- محاسبه مقدار بازده امنیتی
- محاسبه احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر[1]
- آنالیزهای مجانبی[2] احتمال قطع در توان‌های ارسالی بالا

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه به این ترتیب سازمان‌دهی می‌شود. در فصل دوم، پیش‌زمینه‌های موردنیاز در مورد مفاهیم بکار رفته در این پایان‌نامه بیان می‌شوند و در ادامه مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه موضوع مورد بحث ارائه و مسئله اصلی مورد مطالعه در این پایان‌نامه بیان می‌گردد.

در فصل سوم، مدل سیستمی پیشنهادی اول مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل در ابتدا مدل سیستم و پارامترهای شبکه معرفی می‌شوند. سپس احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی محاسبه می‌شود و به‌منظور حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها محدود می‌گردند. در ادامه طرح انتخاب رله پیشنهاد می‌شود و بر اساس آن احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حضور شنودگر به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه و درنهایت بازده امنیتی شبکه بررسی می‌شود. در پایان، نتایج شبیه‌سازی مدل سیستمی پیشنهادی بیان می‌گردد که در آن احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب رله پیشنهادی و حالت غیر

[1] Non-zero secrecy capacity
[2] Asymptotic analysis

مشارکتی[1] که در آن از رله جهت ارسال سیگنال استفاده نمی‌شود به ازای تغییرات پارامترهای گوناگون شبکه بررسی می‌شود. در فصل چهارم، مدل سیستمی پیشنهادی دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل نیز مانند فصل سوم، در ابتدا مدل سیستم و پارامترهای شبکه معرفی می‌شوند. همچنین، احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی محاسبه و توان‌های ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان محدود می‌گردند. سپس دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله معرفی می‌شوند و احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در حضور رله غیرقابل اطمینان در این دو طرح، به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه و درنهایت بازده امنیتی، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر و آنالیزهای مجانبی احتمال قطع امنیتی شبکه در توان‌های ارسالی بالا مطالعه می‌شود. در پایان، نتایج شبیه‌سازی مدل سیستمی پیشنهادی بیان می‌شود که در آن احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار به ازای تغییرات پارامترهای گوناگون شبکه بررسی می‌شود. در فصل پنجم، مدل‌های سیستمی و روش‌های حل مسائل مطرح شده در این پایان‌نامه نتیجه‌گیری می‌شوند و پیشنهادهایی برای ادامه کار در آینده ارائه می‌گردد.

[1] Non cooperative

فصل دوم:

پیش‌زمینه، مروری بر تحقیقات انجام شده و بیان مسئله

در این بخش، در ابتدا پیش‌زمینه و مفاهیم موردنیاز بکار برده شده در این پایان‌نامه را مطرح می‌کنیم. سپس تحقیقات انجام شده تاکنون در زمینه موضوع مورد مطالعه را از جنبه‌های مختلف بررسی می‌کنیم. در آخر، با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه موضوع مورد مطالعه، نوآوری‌های مدل‌های سیستمی ارائه شده در این پایان‌نامه و روش‌های پیشنهادی حل مسئله را شرح می‌دهیم.

۲-۱- پیش‌زمینه

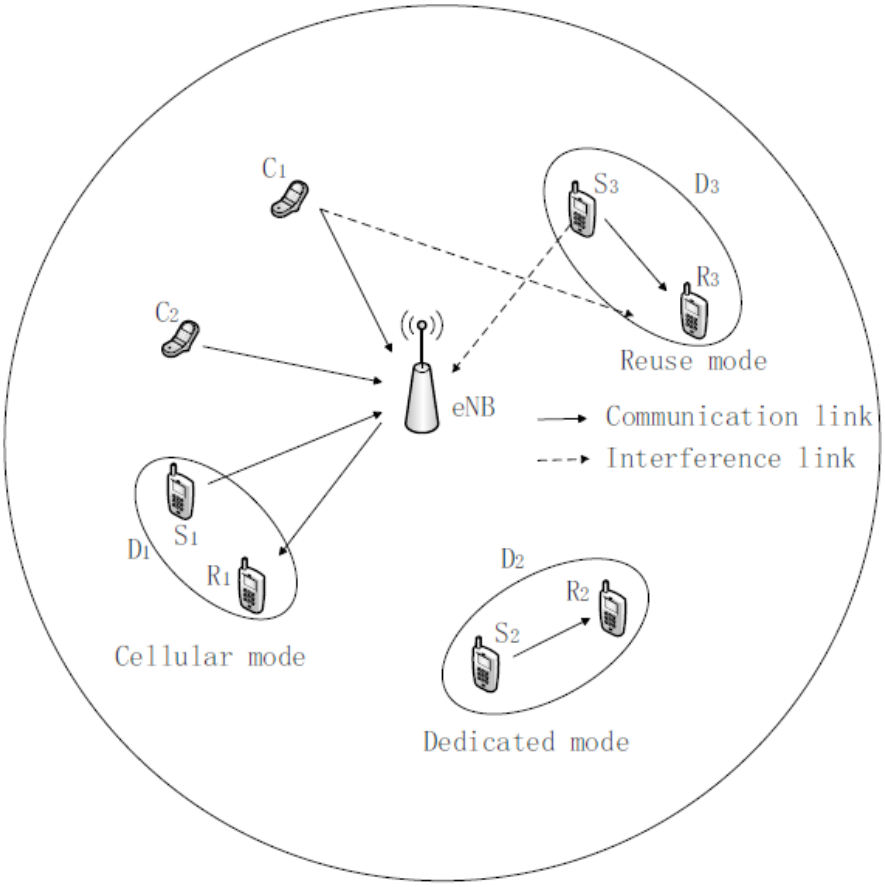
۲-۱-۱- ارتباطات وسیله به وسیله

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، ارتباطات وسیله به وسیله، روشی جهت برقراری ارتباط مستقیم بین دو کاربر است که در شبکه سلولی به‌صورت زمینه‌ای ارسال اطلاعات می‌کنند و در آن، دو کاربر بدون استفاده از ایستگاه پایه با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. این ارتباطات دارای خاصیت بهره جهش[۱]، بهره نزدیکی[۲] و بهره استفاده مجدد[۳] هستند [۲۲]. بهره جهش به این معنی است که برقراری ارتباط بین کاربران در ارتباطات وسیله به وسیله به‌صورت مستقیم و تنها به‌وسیله یک جهش و بدون استفاده از ایستگاه پایه انجام می‌شود. بهره نزدیکی به معنی برقراری ارتباط بین کاربرهای نزدیک است و بهره استفاده مجدد به این معنی است که کاربران در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از سیاست‌های مدیریت تداخل مناسب، از طیف کاربران شبکه سلولی مجدداً استفاده می‌کنند.

به دلیل اینکه کاربران در ارتباطات وسیله به وسیله، اطلاعات خود را بر روی طیف کاربران شبکه سلولی ارسال می‌کنند، چگونگی تسهیم طیف[۴] بین کاربران شبکه در ارتباطات سلولی و وسیله به وسیله یکی از مسائل اساسی است. مدل سیستمی ارتباطات وسیله به وسیله و حالت‌های ارتباطی آن در شکل

[1] Hop gain
[2] Proximity gain
[3] Reuse gain
[4] Spectrum sharing

۲-۱ نشان داده شده است [۲۳]. در این شکل یک سلول منفرد[1] شامل M کاربر سلولی[2] $\{C_1, C_2, ..., C_M\}$ که با ایستگاه پایه در ارتباط هستند و K جفت کاربر ارتباطات وسیله به وسیله $\{D_1, D_2, ..., D_K\}$ در نظر گرفته شده است. همچنین، S_k و R_k فرستنده و گیرنده جفت وسیله به وسیله k را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۱: مدل سیستمی ارتباطات وسیله به وسیله و سه حالت ارتباطی آن [۲۳]

همان‌طور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، سه حالت[3] ارتباطی در ارتباطات وسیله به وسیله وجود دارد که عبارت‌اند از [۲۳]:

۱- **حالت سلولی**[4]: در این حالت، دو کاربر مانند کاربران شبکه در ارتباطات سلولی از طریق ایستگاه پایه با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند که معمولاً از این حالت در زمانی که دو کاربر از یکدیگر

[1] Single cell
[2] Cellular user
[3] Mode
[4] Cellular mode

دور باشند استفاده می‌شود. همچنین، این حالت نسبت به حالات دیگر منابع کانال بیشتری را مصرف می‌کند و زمانی استفاده می‌شود که دو حالت دیگر در دسترس نباشند. در این حالت ارتباطی، هر دو کانال فراسو[1] و فروسو[2] به جفت کاربر وسیله به وسیله اختصاص می‌یابد که نسبت سیگنال به نویز کانال فراسو جفت وسیله به وسیله k به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\xi_{k,\mathrm{up}}^{(1)} = \frac{p_k^{(1)} h_{k,B}^D}{\sigma_N^2} \qquad (۱-۲)$$

که در آن $p_k^{(1)}$ توان ارسالی جفت وسیله به وسیله k در حالت سلولی، $h_{k,B}^D$ ضریب کانال بین فرستنده جفت وسیله به وسیله k و ایستگاه پایه و σ_N^2 توان نویز سفید گوسی جمع شونده[3] است. به‌طور مشابه، نسبت سیگنال به نویز کانال فروسو به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\xi_{k,\mathrm{down}}^{(1)} = \frac{p_{k,B}^{(1)} h_{k,B}^D}{\sigma_N^2} \qquad (۲-۲)$$

که در آن $p_{k,B}^{(1)}$ بیانگر توان ارسالی ایستگاه پایه است. بنابراین ظرفیت کانال جفت وسیله به وسیله k در حالت سلولی برابر است با:

$$C_k^{(1)} = \min\left\{\log_2(1+\xi_{k,\mathrm{up}}^{(1)}), \log_2(1+\xi_{k,\mathrm{down}}^{(1)})\right\} \qquad (۳-۲)$$

در حالت سلولی، جهت تضمین کیفیت سرویس کاربران وسیله به وسیله باید نسبت سیگنال به نویز کانال‌های فراسو و فروسو از مقدار آستانه $\xi_{\min}$ بزرگ‌تر باشند. بنابراین داریم:

$$\min\left\{\xi_{k,\mathrm{up}}^{(1)}, \xi_{k,\mathrm{down}}^{(1)}\right\} \geq \xi_{\min} \qquad (۴-۲)$$

[1] Uplink
[2] Downlink
[3] Additive white Gaussian noise (AWGN)

۲- **حالت تخصیص داده شده**[1]: در این حالت، دو کاربر به‌صورت مستقیم و با استفاده از کانالی که در حال حاضر توسط کاربران شبکه در ارتباطات سلولی استفاده نمی‌شود، ارتباط برقرار می‌کنند و این ارتباط زمانی برقرار می‌شود که دو کاربر به یکدیگر نزدیک باشند. در این حالت، کاربران ارتباطات وسیله به وسیله منابع کانال کمتری را در مقایسه با حالت سلولی مصرف می‌کنند و به علت نزدیکی کاربران بازده انرژی بهبود می‌یابد. همچنین، در این حالت جفت وسیله به وسیله تنها به یک کانال فراسو یا فروسو نیاز دارد. بنابراین، نسبت سیگنال به نویز جفت وسیله به وسیله k در حالت تخصیص داده شده به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\xi_k^{(2)} = \frac{p_k^{(2)} h_k^D}{\sigma_N^2} \qquad (۵-۲)$$

که در آن $p_k^{(2)}$ و h_k^D به ترتیب توان ارسالی جفت وسیله به وسیله k در حالت تخصیص داده شده و ضریب کانال بین جفت وسیله به وسیله k است.

۳- **حالت استفاده مجدد**[2]: در این حالت، دو کاربر به‌صورت مستقیم و به‌وسیله استفاده مجدد از کانالی که در حال حاضر توسط کاربران شبکه در ارتباطات سلولی استفاده می‌شود، ارتباط برقرار می‌کنند. بنابراین، نسبت به دو حالت قبل این حالت دارای بیشترین بهره‌وری از طیف است. اما تداخل کانال باید به‌گونه‌ای مدیریت شود که عملکرد کاربران شبکه در ارتباطات سلولی و وسیله به وسیله تحت تأثیر قرار نگیرد. در این حالت، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل جفت وسیله به وسیله k زمانی که از کانال فراسو کاربر سلولی m به‌صورت مجدد استفاده می‌کند به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\xi_{k,m}^{(3)} = \frac{p_{k,m}^{(3)} h_k^D}{p_{k,m}^C h_{k,m} + \sigma_N^2} \qquad (۶-۲)$$

[1] Dedicated mode
[2] Reuse mode

که در آن $p_{k,m}^{(3)}$ و $p_{k,m}^{c}$ به ترتیب توان‌های ارسالی جفت وسیله به وسیله k و کاربر سلولی m در حالت استفاده مجدد جفت وسیله به وسیله k از طیف کاربر سلولی m و $h_{k,m}$ ضریب کانال تداخلی بین کاربر سلولی m و گیرنده جفت وسیله به وسیله k است که به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$h_{k,m} = \overline{G}\beta_{k,m} d_{k,m}^{-\alpha} \qquad (۷-۲)$$

که در آن $\overline{G}$، α، $\beta_{k,m}$ و $d_{k,m}$ به ترتیب بیانگر ثابت افت مسیر[1]، توان افت مسیر[2]، مؤلفه محوشوندگی کانال[3] و فاصله بین کاربر سلولی m و گیرنده جفت وسیله به وسیله k است. همچنین، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل کاربر سلولی m در این حالت که جفت وسیله به وسیله k بر روی آن تداخل ایجاد می‌کند به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\xi_{k,m}^{c} = \frac{p_{k,m}^{c} h_{m,B}^{c}}{p_{k,m}^{(3)} h_{k,B}^{D} + \sigma_N^2} \qquad (۸-۲)$$

که در آن $h_{m,B}^{c}$ بیانگر ضریب کانال بین کاربر شبکه سلولی m و ایستگاه پایه است. از آنجایی که در این حالت کاربران شبکه سلولی دارای اولویت استفاده از طیف هستند، باید کیفیت سرویس آن‌ها تضمین گردد. بنابراین، کاربران ارتباط وسیله به وسیله زمانی می‌توانند به‌صورت مجدد از طیف استفاده کنند که رابطه $\xi_{k,m}^{c} \geq \xi_{\min}$ برقرار باشد.

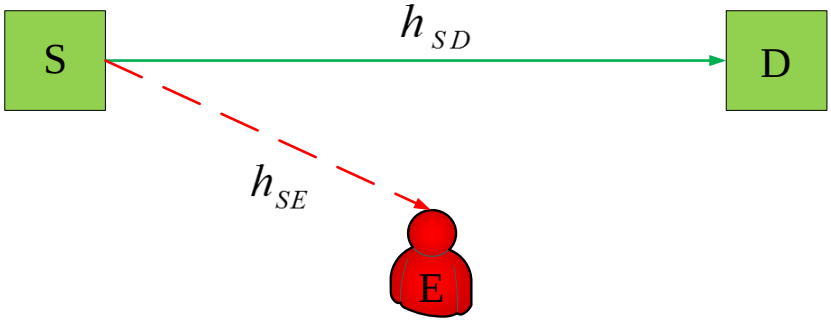
همان‌طور که بیان شد، انتخاب حالت[4] ارتباطی کاربران در ارتباطات وسیله به وسیله در حضور کاربران شبکه سلولی، یکی از مسائل اساسی در ارتباطات وسیله به وسیله است. در این پایان‌نامه

[1] Path loss constant
[2] Path loss exponent
[3] Channel fading component
[4] Mode selection

ارتباطات وسیله به وسیله را در حالت استفاده مجدد بررسی می‌کنیم چرا که بهره‌وری طیفی بالاتری دارد.

۲-۱-۲- امنیت در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم

شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم دارای خاصیت پخشی است و تمام کاربران تحت پوشش شبکه قادر به شنود سیگنال‌های ارسالی توسط فرستنده‌ها هستند. در شکل ۲-۲، نمونه‌ای از یک شبکه مخابراتی بی‌سیم در حضور شنودگر نشان داده شده است که در آن شنودگر قادر به شنود سیگنال ارسالی توسط فرستنده است. پارامترهای h_{SD} و h_{SE} به ترتیب بیانگر ضرایب کانال از فرستنده به گیرنده و از فرستنده به شنودگر است.



شکل ۲-۲: مدل سیستمی شبکه مخابراتی بی‌سیم در حضور شنودگر

زمانی که فرستنده اطلاعات کانال‌های شبکه را در اختیار داشته باشد، جهت بهینه‌سازی عملکرد کیفیت سرویس، نرخ و توان ارسالی‌اش را متناسب با شرایط کانال تغییر می‌دهد و در صورت در دسترس نبودن اطلاعات کانال در فرستنده، استراتژی ارسال با نرخ و توان ثابت اتخاذ می‌گردد و عملکرد شبکه بر مبنای احتمال قطع بررسی می‌شود. بنابراین، مسئله برقراری امنیت شبکه در حضور شنودگر بر اساس در دسترس بودن اطلاعات کانال اصلی و شنودگر در حالت‌های گوناگونی بررسی می‌گردد. معمولاً جهت محاسبه ظرفیت امن در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، فرض می‌شود که اطلاعات کانال در فرستنده‌ها وجود دارد [۲۴]. در این صورت اگر فرستنده ضرایب کانال ازجمله کانال شنودگر را بداند، با تطبیق نرخ

کد استراق سمع کردن[1] به امنیت کامل دست می‌یابد و در این صورت قابلیت اطمینان شبکه تضمین می‌گردد.

زمانی که فرستنده اطلاعات کانال اصلی را در اختیار داشته باشد اما شنودگر در خارج از شبکه و یا غیرفعال[2] بوده و اطلاعات کانال شنودگر در دسترس نباشد، برقراری امنیت کامل در شبکه تضمین نمی‌شود و آنالیزهای امنیتی احتمالی اجرا می‌گردد [۲۵]. در این حالت با توجه به اینکه اطلاعات کانال اصلی در دسترس فرستنده قرار دارد، فرستنده نرخ ارسال بر روی کانال اصلی را بر اساس ظرفیت لحظه‌ای خود تغییر می‌دهد و احتمال هدایت اطلاعات به شنودگر به ازای نرخ امنیتی ثابت تعیین می‌شود. در این حالت که اطلاعات کانال اصلی در دسترس است، آنالیزها بر اساس اختلاف اطلاعات متقابل لحظه‌ای در گیرنده و شنودگر انجام می‌شود. برای نرخ ارسال ثابت، احتمال اینکه اطلاعات به شنودگر هدایت شود منجر به تعریف مفهوم احتمال قطع امنیتی می‌گردد. مفهوم احتمال قطع امنیتی برای اولین بار در [۲۵] معرفی شده است. اگر فرض کنیم اطلاعات کانال اصلی را می‌دانیم، می‌توانیم کد استراق سمع کننده‌ای را طراحی کنیم که شامل تعداد 2^{nR} کلمه کد[3] است که R برابر با ظرفیت کانال اصلی لحظه‌ای ساخته می‌شود که مقدار آن توسط C_m تعیین می‌گردد. سپس تعداد کلمه کدها در هر bin را مساوی با 2^{nR_e} تنظیم می‌کنیم که R_e نرخ ابهام[4] شنودگر است. منظور از نرخ ابهام شنودگر حداکثر نرخی است که می‌تواند توسط شنودگر جهت ارسال امن اطلاعات دریافت شود و اگر شنودگر اطلاعات را بیشتر از این نرخ شنود کند، امنیت شبکه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این حالت، نرخ امنیتی برابر با مقدار ثابت $R_s = R - R_e = C_m - R_e$ است و $R_e = C_m - R_s$ با شرایط کانال اصلی تغییر می‌کند. بنابراین، در این حالت پیشامد قطع به عنوان احتمال اینکه ظرفیت کانال لحظه‌ای C_e از نرخ R_e و یا اینکه R_s از تفاضل بین ظرفیت لحظه‌ای کانال‌های اصلی و شنودگر تجاوز کند تعریف می‌شود، یعنی

[1] Wiretap code
[2] Passive
[3] Codeword
[4] Equivocation rate

$\Pr(C_m - C_e < R_s)$ [۲۶]. حالت بعدی زمانی است که فرستنده هیچ اطلاعاتی از کانال‌های شبکه در اختیار نداشته باشد. در این سناریو زمانی که C_m شناخته شده نیست، تعداد کلمه کدها را برابر با مقدار ثابت 2^{nR} انتخاب می‌کنیم و تعداد کلمه کدها در هر bin مساوی با مقدار ثابت 2^{nR_e} است. همچنین نرخ ثابت ارتباط امن برابر با $R_s = R - R_e$ است و اگر R از C_m یا اگر C_e از R_e تجاوز کند، قطع ارتباط در شبکه رخ می‌دهد [۲۶-۲۸]. بنابراین، در این حالت احتمال قطع امنیتی به‌صورت اجتماع دو پیشامد زیر محاسبه می‌شود:

۱- گیرنده موردنظر قادر به دیکد کردن پیام ارسالی نباشد که آن را با عنوان پیشامد قطع در ارسال قابل‌اطمینان[1] مشخص می‌کنیم.

۲- ظرفیت لحظه‌ای کانال شنودگر بیشتر از نرخ ابهام کد استراق سمع استفاده شده باشد که آن را با عنوان پیشامد قطع در ارسال امن[2] مشخص می‌کنیم.

بنابراین، در صورتی که کانال‌های اصلی و شنودگر مستقل باشند، احتمال قطع امنیتی به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$S = \Pr\{(C_m < R) \bigcup (C_e \geq R_e)\} = P_m + P_e + P_m \times P_e \qquad (۹-۲)$$

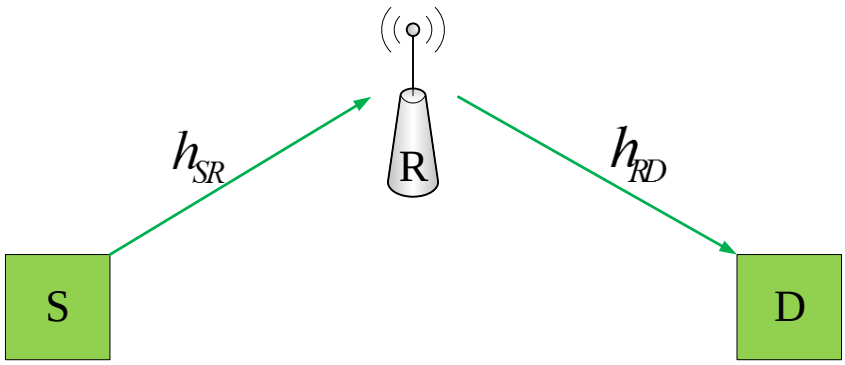
که در آن $P_m = \Pr(C_m < R)$ احتمال پیشامد قطع در ارسال قابل‌اطمینان، $P_e = \Pr(C_e \geq R_e)$ احتمال پیشامد قطع در ارسال امن و $\bigcup$ عملگر اجتماع[3] است [۲۷, ۲۸].

با توجه به‌ضرورت برقراری امنیت اطلاعات در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم و حفظ پیام محرمانه در مقابل حمله شنودگر، در این پایان‌نامه مسئله برقراری امنیت ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله را بررسی می‌کنیم.

[1] Reliability outage
[2] Secrecy outage
[3] Union operator

۲-۱-۳- ارتباطات مشارکتی

در صورتی که در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم فرستنده و گیرنده‌ها در فواصل دوری از هم قرار داشته باشند، توان سیگنال ارسالی توسط فرستنده در طول کانال به علت اثرات افت مسیر تضعیف می‌گردد [۱] و بنابراین احتمالات قطع ارتباط در شبکه افزایش می‌یابد. ارتباطات مشارکتی بیان شده در [۱۸] یک روش نویدبخش جهت بهبود عملکرد ارتباطی در شبکه است که در آن ارسال اطلاعات بین فرستنده و گیرنده از طریق رله پیشنهاد می‌شود. همچنین ارتباطات مشارکتی موجب افزایش امنیت ارسال اطلاعات در مقابل حمله شنودگر در شبکه می‌گردد. بنابراین، رله در بین فرستنده و گیرنده شبکه قرار می‌گیرد و سیگنال دریافتی از فرستنده را به گیرنده هدایت می‌کند. شکل ۲-۳ مدل سیستمی مشارکتی ساده را نشان می‌دهد که در آن ارتباط بین فرستنده و گیرنده از طریق رله برقرار می‌گردد. پارامترهای h_{SR} و h_{RD} به ترتیب بیانگر ضرایب کانال‌های بین فرستنده و رله و همچنین رله و گیرنده است.

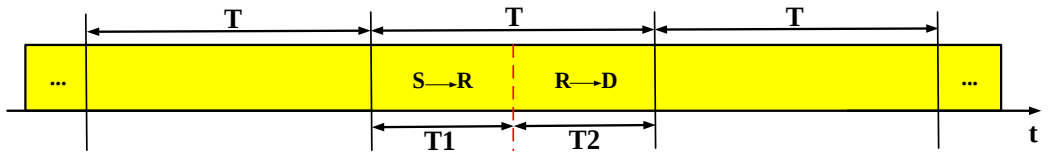


شکل ۲-۳: مدل سیستمی مشارکتی به همراه یک رله

با توجه به اینکه تاکنون ظرفیت کانال رله محاسبه نشده است و به‌منظور ساده سازی پروتکل ارتباطی در کانال رله، فرض می‌شود ارسال اطلاعات از طریق کانال رله در طول دو بازه زمانی[1] انجام می‌گردد. در این حالت اگر طول دوره ارسال سیگنال را $T = T_1 + T_2$ ثانیه در نظر بگیریم، در بازه زمانی اول، یعنی T_1، فرستنده به ارسال سیگنال به رله اقدام می‌کند و در بازه زمانی دوم، یعنی T_2، رله سیگنال دریافتی

[1] Time slot

را به گیرنده ارسال می‌کند. شکل ۲-۴ ارسال اطلاعات در طول دو بازه زمانی از طریق کانال رله را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: ارسال اطلاعات توسط رله در طول دو بازه زمانی

دو نوع متداول از رله‌ها، رله دیکد و ارسال و رله تقویت و ارسال نام دارند. رله دیکد و ارسال، سیگنال دریافتی از فرستنده شبکه را پس از دیکد کردن مجدداً کدگذاری نموده و به گیرنده شبکه ارسال می‌کند که در این حالت رابطه ظرفیت کانال رله به‌صورت زیر است [۱۸]:

$$C_{SRD}^{DF} = \min(C_{SR}^{DF}, C_{RD}^{DF}) \qquad (۱۰-۲)$$

که در آن C_{SR}^{DF} و C_{RD}^{DF} به ترتیب بیانگر ظرفیت کانال فرستنده به رله و کانال رله به گیرنده است. بنابراین، با جایگذاری روابط ظرفیت کانال در رابطه فوق داریم [۲۹]:

$$\begin{aligned} C_{SRD}^{DF} &= \min\left(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma_{SR}^{DF}), \frac{1}{2}\log_2(1+\gamma_{RD}^{DF})\right) \\ &= \frac{1}{2}\log_2\left(1+\min(\gamma_{SR}^{DF}, \gamma_{RD}^{DF})\right) \end{aligned} \qquad (۱۱-۲)$$

که در آن ضریب $\frac{1}{2}$ به‌دلیل ارسال یک پیام در طول دو بازه زمانی و γ_{SR}^{DF} و γ_{RD}^{DF} به ترتیب بیانگر نسبت سیگنال به نویز در کانال فرستنده به رله و کانال رله به گیرنده است. بنابراین با توجه به رابطه (۲-۱۱)، رابطه نسبت سیگنال به نویز کانال رله در حالت استفاده از رله دیکد و ارسال به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\gamma_{SRD}^{DF} = \min(\gamma_{SR}^{DF}, \gamma_{RD}^{DF}) \qquad (۱۲-۲)$$

همچنین رله تقویت و ارسال، پس از تقویت سیگنال دریافتی از فرستنده شبکه، آن را به گیرنده شبکه ارسال می‌کند که رابطه ظرفیت کانال رله در آن به‌صورت زیر خواهد بود:

$$C_{\mathrm{SRD}}^{\mathrm{AF}} = \frac{1}{2}\log_2\left(1+\gamma_{\mathrm{SRD}}^{\mathrm{AF}}\right) \qquad (۱۳-۲)$$

که در آن $\gamma_{\mathrm{SRD}}^{\mathrm{AF}}$ بیانگر نسبت سیگنال به نویز در کانال رله در حالت استفاده از رله تقویت و ارسال است و به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۱۸, ۳۰]:

$$\gamma_{\mathrm{SRD}}^{\mathrm{AF}} = \frac{\gamma_{\mathrm{SR}}^{\mathrm{AF}}\gamma_{\mathrm{RD}}^{\mathrm{AF}}}{1+\gamma_{\mathrm{SR}}^{\mathrm{AF}}+\gamma_{\mathrm{RD}}^{\mathrm{AF}}} \qquad (۱۴-۲)$$

که در آن $\gamma_{\mathrm{SR}}^{\mathrm{AF}}$ و $\gamma_{\mathrm{RD}}^{\mathrm{AF}}$ به ترتیب بیانگر نسبت سیگنال به نویز در کانال فرستنده به رله و کانال رله به گیرنده است.

با توجه به اهمیت ارتباطات مشارکتی در بهبود عملکرد ارتباطی و افزایش امنیت ارسال اطلاعات در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، در این پایان‌نامه با استفاده از دو مدل سیستمی مجزا، ارتباطات مشارکتی در دو حالت رله دیکد و ارسال و تقویت و ارسال را بررسی می‌کنیم.

۲-۱-۴- چندگانگی

یکی از تکنیک‌های قدرتمند جهت کاهش اثرات محوشوندگی[1] کانال‌های مخابراتی بی‌سیم، استفاده از ترکیب چندین[2] سیگنال دریافتی از مسیرهای مستقل از هم است. این امر به این دلیل است که مسیرهای سیگنال مستقل از هم، به‌طور همزمان دارای احتمال کمتری از اثرات محوشوندگی شدید هستند. چندگانگی به معنی ارسال داده یکسان بر روی مسیرهای گوناگون با محوشوندگی مستقل از هم است و این مسیرهای مستقل به‌گونه‌ای با یکدیگر ترکیب می‌شوند که اثرات محوشوندگی سیگنال

[1] Fading
[2] Diversity combining

حاصل، کاهش یابد. به‌عنوان مثال، ارسال اطلاعات یکسان از طریق کانال مستقیم و کانال رله بین فرستنده و گیرنده، موجب چندگانگی در گیرنده می‌شود. چندگانگی مشارکتی[1] [۱۸] اثرات محوشوندگی کانال را کاهش و بازده را بهبود می‌بخشد و قابلیت اطمینان شبکه را بدون استفاده از چندین آنتن افزایش می‌دهد.

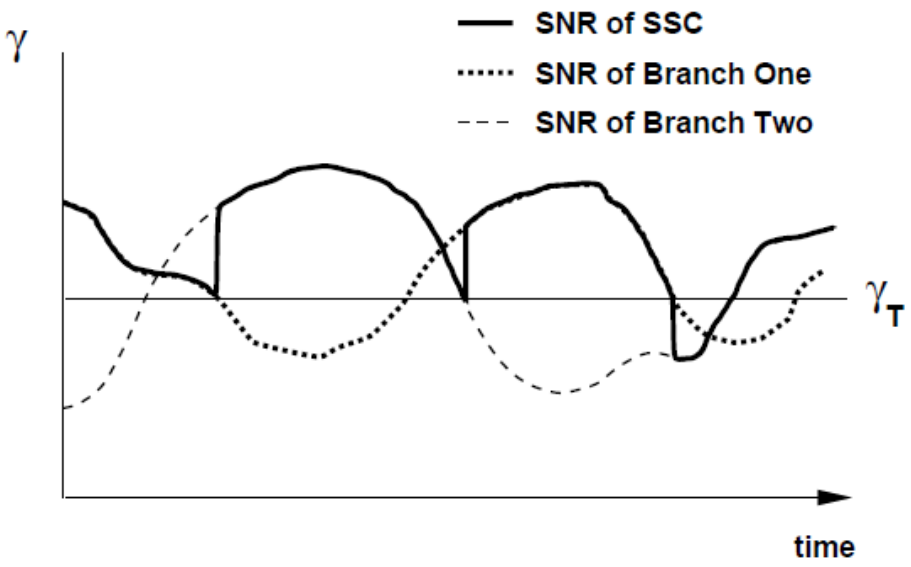
در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، روش‌های گوناگونی برای دسترسی به مسیرهای با محوشوندگی مستقل از هم وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از چندین آنتن در فرستنده یا گیرنده است که آرایه آنتن[2] نامیده می‌شود. در این حالت، المان‌های آرایه در یک فاصله مشخص پخش می‌گردند. بنابراین، این نوع از چندگانگی، چندگانگی فضایی[3] نامیده می‌شود.

چندگانگی فضایی می‌تواند در فرستنده و یا گیرنده صورت گیرد. با استفاده از چندگانگی فضایی در گیرنده، مسیرهای با محوشوندگی مستقل بدون افزایش توان سیگنال ارسالی و پهنای باند تحقق می‌یابد و ترکیب سیگنال‌های ناشی از چندگانگی، منجر به افزایش نسبت سیگنال به نویز در گیرنده نسبت به حالتی می‌شود که در آن از چندگانگی استفاده نشده است. در چندگانگی فضایی فرستنده، چندین آنتن فرستنده وجود دارد که توان ارسالی بین این آنتن‌ها تقسیم می‌گردد. بنابراین، با ترکیب سیگنال‌های ارسالی نسبت سیگنال به نویز دریافتی مشابه با حالت استفاده از یک آنتن می‌شود. چندگانگی در فرستنده، در شبکه‌هایی نظیر شبکه سلولی مطلوب است. این امر به این دلیل است که در این شبکه‌ها فضا، توان و قابلیت پردازش در سمت فرستنده بیشتر از سمت گیرنده است. با توجه به دو مدل سیستمی ارائه شده در این پایان‌نامه و برقراری ارتباطات مشارکتی با استفاده از رله، ترکیب چندگانگی در گیرنده را بررسی می‌کنیم. در حالت کلی چندین روش ترکیب چندگانگی در گیرنده وجود دارد [۱] که متداول‌ترین آن‌ها ترکیب حداکثر نسبت، ترکیب انتخابی و ترکیب آستانه‌ای[4] است.

[1] Cooperative diversity
[2] Antenna array
[3] Space diversity
[4] Threshold combining

در ترکیب حداکثر نسبت، نسبت سیگنال به نویز حاصل از ترکیب مسیرهای گوناگون در گیرنده، برابر با مجموع نسبت سیگنال به نویز هرکدام از مسیرها است. در ترکیب انتخابی، نسبت سیگنال به نویز در گیرنده، برابر با بیشترین نسبت سیگنال به نویز از بین مسیرهای گوناگون ترکیب شده در گیرنده است.

در ترکیب آستانه‌ای، نسبت سیگنال به نویز حاصل از ترکیب مسیرهای گوناگون در گیرنده، با نسبت سیگنال به نویز آستانه γ_T مقایسه می‌شود و در صورتی که تنها دو مسیر در گیرنده ترکیب شود، ترکیب سوییچ و استقرار نام دارد که عملکرد آن در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. در این حالت، در ابتدا یک مسیر در گیرنده انتخاب می‌شود و تا زمانی که نسبت سیگنال به نویز آن مسیر از مقدار آستانه γ_T بیشتر باشد خروجی تغییر نمی‌کند و به‌محض اینکه نسبت سیگنال به نویز این مسیر از مقدار آستانه γ_T کمتر گردد خروجی به مسیر بعدی سوییچ[1] می‌کند.



شکل ۲-۵: نسبت سیگنال به نویز طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده [۱]

اگر $\gamma_1(n)$ و $\gamma_2(n)$ به ترتیب نسبت سیگنال به نویز لحظه‌ای مسیر ۱ و مسیر ۲ در زمان $t=nT$ و γ_n نسبت سیگنال به نویز لحظه‌ای دریافتی در گیرنده با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ

[1] Switch

و استقرار در زمان $t = nT$ باشد، با توجه به عملکرد طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار رابطه زیر برقرار است [۳۱]:

$$\gamma_n = \gamma_1(n) \quad \text{iff} \quad \begin{cases} \gamma_{n-1} = \gamma_1(n-1) & , \quad \gamma_1(n) \geq \gamma_T \\ \gamma_{n-1} = \gamma_2(n-1) & , \quad \gamma_2(n) < \gamma_T \end{cases} \qquad (۱۵-۲)$$

از آنجایی که در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار، لزوماً مسیری با بیشترین نسبت سیگنال به نویز در گیرنده انتخاب نمی‌شود، عملکرد آن بین دو حالت بدون چندگانگی و طرح ترکیب انتخابی قرار دارد. همچنین، عملکرد طرح ترکیب حداکثر نسبت از طرح ترکیب انتخابی بهتر است [۱].

۲-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

در ارتباطات وسیله به وسیله در حالت استفاده مجدد، دو کاربر نزدیک به هم با استفاده از طیف شبکه سلولی و به‌صورت مستقیم با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. استفاده از پهنای باند مشترک موجب ایجاد تداخل متقابل بین ارتباطات سلولی و وسیله به وسیله می‌شود که طراحی ارتباطات وسیله به وسیله را چالش‌برانگیز کرده است. بنابراین، مطالعات بسیاری در زمینه تخصیص مؤثر منابع جهت مدیریت تداخل متقابل بین ارتباطات وسیله به وسیله و سلولی انجام شده است [۲۳] [۳۲-۳۵]. در [۲۳] طرح انتخاب حالت و تخصیص منابع در ارتباطات وسیله به وسیله بررسی شده است که در آن نویسندگان سه حالت ارتباطی سلولی، تخصیص داده شده و استفاده مجدد را در ارتباطات وسیله به وسیله در نظر گرفته‌اند. سپس الگوریتم توأم انتخاب حالت، تخصیص کانال[۱] و کنترل توان[۲] جهت بیشینه ساختن بازده سیستم پیشنهاد شده است که به‌واسطه آن نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل کاربران ارتباطات سلولی و وسیله به وسیله تضمین می‌گردد. همچنین، در [۳۵] عملکرد ارتباطات وسیله به وسیله تحت شبکه سلولی برای کانال‌های محوشوندگی رایسی[۳] ارائه شده است.

[1] Channel assignment
[2] Power control
[3] Rician fading

همان‌طور که اشاره شد، زمانی که فاصله بین فرستنده و گیرنده شبکه زیاد باشد عملکرد ارتباط مستقیم بین نقاط شبکه تضعیف می‌شود. بنابراین، در این حالت استفاده از ارتباطات مشارکتی پیشنهاد می‌شود که موجب بهبود عملکرد ارتباطی شبکه می‌گردد [۳۶-۴۴]. در برخی از تحقیقات، فرض شده است که اطلاعات لحظه‌ای شبکه نظیر ضرایب لحظه‌ای کانال در دسترس هستند و استراتژی ارسال یعنی نرخ‌های داده و توان‌های ارسالی جهت بهینه‌سازی کیفیت سرویس کاربران به‌صورت وفقی تغییر می‌کنند [۳۶-۴۰]. با این حال، زمانی که اطلاعات موردنیاز نظیر اطلاعات لحظه‌ای کانال در فرستنده در دسترس نباشد، استراتژی ارسال با نرخ و توان ارسالی ثابت اتخاذ می‌شود و عملکرد ارتباطات، برمبنای احتمال قطع اندازه‌گیری می‌گردد [۴۱-۴۴].

در [۴۱, ۴۲]، یک شبکه رادیو شناختی[1] در نظر گرفته شده است که شبکه اولیه[2] و شبکه ثانویه[3] دارای تداخل متقابل بر یکدیگر هستند و توان فرستنده‌های شبکه ثانویه جهت حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه اولیه محدود می‌شود. در [۴۱]، ارتباط بین کاربران شبکه ثانویه علاوه بر کانال مستقیم از طریق چندین رله دیکد و ارسال و در [۴۲] از طریق چندین رله تقویت و ارسال انجام می‌شود و انتخاب لینک در گیرنده شبکه ثانویه، بر اساس طرح ترکیب حداکثر نسبت انجام می‌گیرد. سپس مسئله انتخاب بهترین رله مطرح و احتمالات قطع ارتباط در شبکه محاسبه می‌گردد.

نویسندگان در [۴۳, ۴۴]، عملکرد ارتباطات مشارکتی در یک شبکه رادیو شناختی را به ترتیب در حضور یک و چندین گیرنده شبکه اولیه در نظر گرفته‌اند که فرستنده‌های شبکه ثانویه بر روی گیرنده‌های شبکه اولیه تداخل ایجاد می‌کنند. بنابراین، فرستنده‌های شبکه ثانویه توان ارسالی‌شان را بر اساس محدودیت تداخل بر شبکه اولیه و بیشینه توان ارسالی‌شان تنظیم می‌کنند. علاوه بر کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده، ارتباط مشارکتی در دو حالت چندین رله دیکد و ارسال و چندین رله تقویت و ارسال پیشنهاد می‌شود و انتخاب لینک در گیرنده بر اساس طرح ترکیب انتخابی انجام می‌گیرد.

[1] Cognitive radio
[2] Primary network
[3] Secondary network

همچنین، رله‌ای جهت ارسال سیگنال انتخاب می‌شود که دارای بیشترین نسبت سیگنال به نویز از فرستنده به گیرنده باشد و درنهایت احتمالات قطع ارتباط در شبکه محاسبه می‌گردد.

ماهیت پخشی شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم و قابلیت شنود سیگنال ارسالی توسط تمام کاربران تحت پوشش شبکه، برقراری امنیت لایه فیزیکی شبکه در حضور شنودگر را به امری چالش‌برانگیز تبدیل کرده است. ارتباطات مشارکتی از طریق رله موجب بهبود عملکرد امنیتی شبکه در حضور شنودگر می‌شود. به همین دلیل، تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه برقراری ارتباطات مشارکتی در حضور شنودگر انجام شده است [۴۵-۵۳].

در [۴۵]، نویسندگان ارتباطات مشارکتی شامل فرستنده، گیرنده و یک رله دیکد و ارسال در حضور شنودگری که قادر به شنود سیگنال ارسالی توسط فرستنده و رله است و بدون هیچ‌گونه تداخلی را در نظر گرفته‌اند. ارسال اطلاعات بین فرستنده و گیرنده از طریق کانال مستقیم و رله انجام می‌شود که گیرنده از طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت استفاده می‌کند و درنهایت احتمالات قطع ارتباط در شبکه محاسبه می‌گردد.

در [۴۶-۴۹] ارتباطات مشارکتی شامل فرستنده، گیرنده، چندین رله و یک شنودگر بدون حضور کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده و تداخل در نظر گرفته شده و احتمالات قطع ارتباط در سیستم محاسبه می‌شود. در [۴۶] ارتباط بین فرستنده و گیرنده از طریق چندین رله دیکد و ارسال انجام می‌شود و انتخاب رله بر اساس دو طرح بهینه[1] و زیر بهینه[2] پیشنهاد می‌گردد. طرح بهینه اطلاعات لحظه‌ای و طرح زیر بهینه اطلاعات متوسط کانال شنودگر را در نظر می‌گیرد. نویسندگان در [۴۷] نیز ارتباط از طریق چندین رله دیکد و ارسال را در نظر گرفته و سه طرح انتخاب رله را بررسی کرده‌اند. در [۴۸] ارتباط از طریق چندین رله تقویت و ارسال انجام می‌شود و انتخاب رله توسط دو طرح بهینه و

[1] Optimal
[2] Suboptimal

زیر بهینه اجرا می‌گردد. همچنین در [۴۹] برقراری ارتباط بین فرستنده و گیرنده در دو حالت چندین رله دیکد و ارسال و چندین رله تقویت و ارسال در نظر گرفته شده است.

نویسندگان در [۵۰, ۵۱] عملکرد قطع ارتباطات مشارکتی در حضور یک فرستنده، یک گیرنده، چندین رله دیکد و ارسال و یک شنودگر را بدون حضور تداخل در نظر گرفته‌اند و فرستنده و گیرنده شبکه از طریق کانال مستقیم نیز با یکدیگر در ارتباط هستند. در [۵۰] رله‌ای با بیشترین ظرفیت امنیتی جهت ارسال سیگنال انتخاب می‌گردد و گیرنده شبکه از طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت استفاده می‌کند. در [۵۱] سه طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت، ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده بررسی می‌شود.

در [۵۲, ۵۳] ارتباطات مشارکتی در حضور شنودگر در نظر گرفته شده است که در آن ارتباط بین فرستنده و گیرنده از طریق چندین رله دیکد و ارسال و بدون استفاده از کانال مستقیم برقرار می‌گردد. همچنین فرض می‌شود زمانی که رله سیگنال را به گیرنده ارسال می‌کند، به ترتیب یک و چندین فرستنده دیگر در شبکه حضور دارند و موجب تداخل بر روی گیرنده و شنودگر می‌شوند. در ادامه، دو طرح انتخاب رله بهینه و زیر بهینه مطرح می‌شود و بر اساس آن احتمالات قطع ارتباط در شبکه محاسبه می‌گردد.

از آنجایی که رله‌ها یکی از کاربران شبکه هستند که به ارسال سیگنال بین فرستنده و گیرنده کمک می‌کنند، ممکن است اجازه کشف سیگنال دریافتی را نداشته و به‌صورت یک شنودگر در شبکه عمل نمایند که در این صورت به چنین رله‌هایی، رله غیرقابل اطمینان می‌گویند. از آنجایی که رله‌های غیرقابل اطمینان اجازه دیکد کردن سیگنال دریافتی را ندارند، این رله‌ها را از نوع رله تقویت و ارسال در نظر می‌گیرند. با توجه به مطالعات انجام‌شده، برخی از تحقیقات عملکرد رله غیرقابل اطمینان در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم را از منظر امنیت تئوری اطلاعات [۵۴-۵۶] و برخی دیگر بر اساس آنالیزهای احتمال قطع [۵۷-۵۹] بررسی کرده‌اند.

نویسندگان در [۵۷, ۵۸] عملکرد قطع امنیتی ارتباطات مشارکتی در شبکه‌ای را بررسی کرده‌اند که در آن ارتباط بین فرستنده و گیرنده علاوه بر کانال مستقیم از طریق یک رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان و بدون حضور تداخل برقرار می‌شود. در [۵۷]، گیرنده از طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت استفاده می‌کند. در [۵۸] در صورتی که نرخ امنیتی کانال مستقیم از نرخ امنیتی کانال مثلثی (شامل کانال مستقیم و رله) بیشتر باشد، ارسال تنها از طریق کانال مستقیم صورت می‌گیرد و اگر نرخ امنیتی کانال مستقیم از نرخ امنیتی کانال مثلثی کمتر باشد، ارسال از طریق کانال مثلثی انجام می‌شود. همچنین در حالت استفاده از کانال مثلثی، گیرنده از طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت استفاده می‌کند. درنهایت، احتمال قطع ارتباط امنیتی شبکه در این حالات محاسبه می‌گردد.

در [۵۹] نویسندگان ارتباطات مشارکتی را در نظر گرفته‌اند که فرستنده جهت ارسال پیام محرمانه‌اش به گیرنده علاوه بر کانال مستقیم از یک رله غیرقابل اطمینان تقویت و ارسال استفاده می‌کند و هیچ‌گونه تداخلی در شبکه وجود ندارد. گیرنده طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت را بر روی سیگنال‌های دریافتی از کانال مستقیم و رله اعمال می‌کند و احتمال قطع امنیتی شبکه در حالات مختلف با استفاده از رله مجهز به یک و چندین آنتن محاسبه می‌گردد.

۲-۳- بیان مسئله

با توجه به تحقیقات انجام شده در بخش قبل و مروری بر کارهای صورت گرفته در زمینه موضوع پایان‌نامه، مشاهده می‌شود که تاکنون مدل سیستمی شامل ارتباطات وسیله به وسیله دارای تداخل متقابل با شبکه سلولی در حضور شنودگر در شبکه که قادر به کشف سیگنال‌های ارسالی است و در آن فرستنده و گیرنده جهت افزایش امنیت ارسال اطلاعات علاوه بر کانال مستقیم با استفاده از رله با یکدیگر در ارتباط هستند، به‌صورت توأم بررسی نشده است. حضور توأم اثرات تداخل، مسائل امنیتی در حضور شنودگر، کانال مستقیم و کانال رله بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله، موجب پیچیده

شدن روابط توابع توزیع تجمعی و توابع چگالی احتمال پارامترهای شبکه و درنتیجه محاسبه روابط احتمال قطع امنیتی می‌گردد.

در این پایان‌نامه دو مدل سیستمی مجزا پیشنهاد می‌شود که با به‌کارگیری روش‌هایی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه می‌کنیم. فرض می‌کنیم ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله بر اساس حالت ارتباطی استفاده مجدد است و جهت حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی در مقابل تداخل ناشی از ارتباطات وسیله به وسیله، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله را به‌گونه‌ای محدود می‌کنیم که احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی از یک مقدار آستانه تعیین شده بیشتر نگردد.

در مدل سیستمی اول، فرض می‌کنیم یک شنودگر در شبکه حضور دارد که قادر به کشف سیگنال ارسالی توسط فرستنده‌ها در ارتباطات وسیله به وسیله است. جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات در حضور شنودگر، ارتباط بین فرستنده و گیرنده در ارتباطات وسیله به وسیله علاوه بر کانال مستقیم از طریق چندین رله قابل اطمینان دیکد و ارسال انجام می‌شود. همچنین، هم گیرنده ارتباطات وسیله به وسیله و هم شنودگر، طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت را بر روی سیگنال‌های دریافتی از طریق کانال مستقیم و کانال رله در طول دو بازه زمانی ارسال اعمال می‌کنند. بعلاوه، طرح انتخاب رله برمبنای ضریب کانال بین رله و گیرنده وسیله به وسیله پیشنهاد می‌شود و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه و رابطه بازده امنیتی شبکه مطالعه می‌گردد.

در مدل سیستمی دوم، برقراری ارتباط بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله، علاوه بر کانال مستقیم، از طریق یک رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان انجام می‌شود که رله غیرقابل اطمینان قادر به شنود سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله است. دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله بررسی و درنهایت احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک پیشنهادی و در حضور رله غیرقابل اطمینان به‌صورت یک

عبارت بسته محاسبه و رابطه بازده امنیتی، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر و آنالیزهای مجانبی احتمال قطع امنیتی در توان‌های ارسالی بالا مطالعه می‌گردد.

مدل سیستمی تحقیقات انجام شده در زمینه موضوع مورد مطالعه و دو مدل سیستمی پیشنهادی در این پایان‌نامه در جدول ۲-۱ دسته‌بندی شده است. با توجه به جدول ۲-۱ مشاهده می‌شود که تاکنون مدل سیستمی که به‌صورت توأم اثرات تداخل، کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده، رله و مسائل امنیتی در شبکه را در نظر بگیرد به دلیل دشواری‌های محاسباتی بررسی نشده است. بنابراین، در دو مدل سیستمی بررسی شده در این پایان‌نامه این اثرات را به‌صورت توأم در نظر می‌گیریم و احتمال قطع امنیتی شبکه را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه می‌کنیم.

جدول ۲-۱: دسته‌بندی و مقایسه تحقیقات انجام شده و دو مدل سیستمی پیشنهادی

مراجع	مدل سیستمی					
	تداخل	کانال مستقیم	رله			امنیت
			دیکد و ارسال	تقویت و ارسال	غیرقابل اطمینان	
[۴۱]	✓	✓	✓	✓	–	–
[۴۲]	✓	✓	–	✓	–	–
[۴۴ ,۴۳]	✓	✓	✓	✓	–	–
[۴۵]	–	✓	✓	–	–	✓
[۴۷ ,۴۶]	–	–	✓	–	–	✓
[۴۸]	–	–	–	✓	–	✓
[۴۹]	–	–	✓	✓	–	✓
[۵۰]	–	✓	–	✓	–	✓
[۵۱]	–	✓	✓	–	–	✓
[۵۳ ,۵۲]	✓	–	✓	–	–	✓
[۵۹-۵۷]	–	✓	–	✓	✓	✓
سیستم اول	✓	✓	✓	–	–	✓
سیستم دوم	✓	✓	–	✓	✓	✓

فصل سوم:

انتخاب رله دیکد و ارسال جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات

۳-۱- مقدمه

در این فصل یک مدل سیستمی شامل ارتباطات مشارکتی از طریق چندین رله دیکد و ارسال جهت بهبود امنیت ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله را پیشنهاد می‌کنیم. در این مدل سیستمی فرض می‌کنیم ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله بر اساس حالت استفاده مجدد انجام می‌شود و از آنجایی که در این حالت ارسال اطلاعات بر روی طیف شبکه سلولی انجام می‌گیرد، این دو شبکه دارای تداخل متقابل بر یکدیگر هستند. بنابراین، جهت حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی، توان ارسالی توسط فرستنده‌ها در ارتباطات وسیله به وسیله را به‌گونه‌ای محدود می‌کنیم که احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی از یک مقدار آستانه تعیین شده بیشتر نگردد.

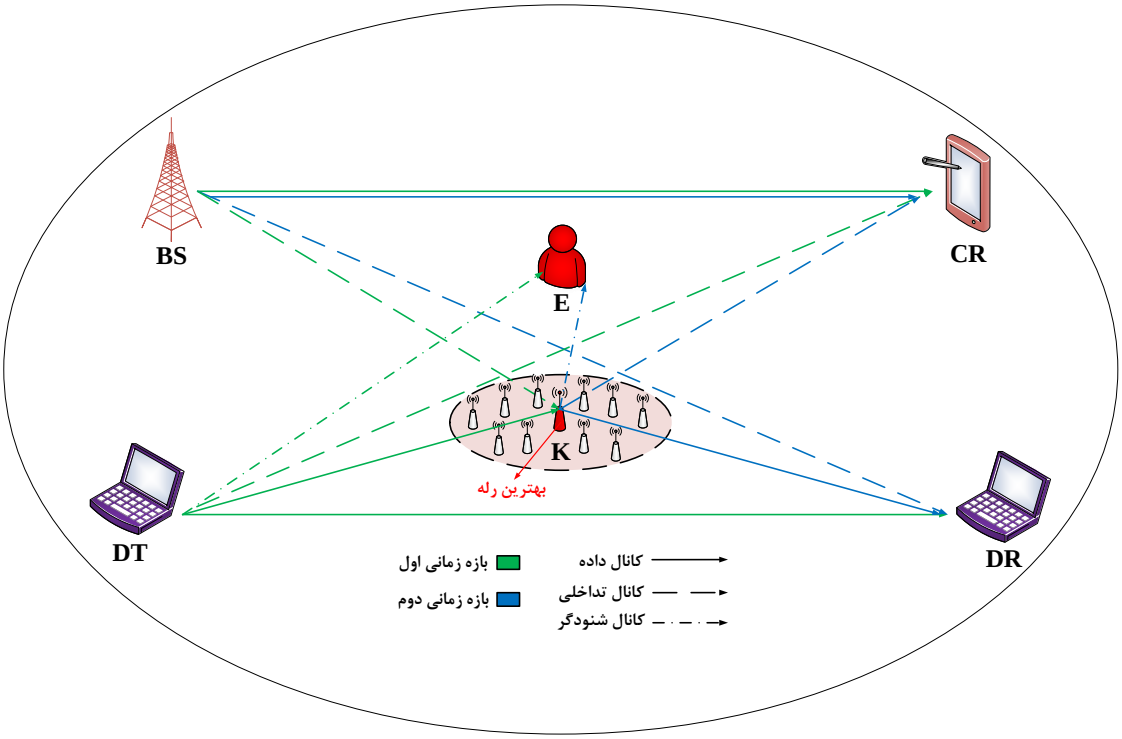
با توجه به خاصیت پخشی شبکه‌های بی‌سیم، فرض می‌کنیم که یک شنودگر در شبکه حضور و سعی در کشف سیگنال‌های ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله را دارد و به این دلیل، برقراری امنیت شبکه در حضور شنودگر مسئله‌ای چالش‌برانگیز است. همچنین، جهت برقراری امنیت ارسال اطلاعات و گسترش محدوده ارتباطات وسیله به وسیله، در این فصل علاوه بر ارسال سیگنال از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده در ارتباطات وسیله به وسیله، ارسال مشارکتی از طریق چندین رله دیکد و ارسال را پیشنهاد می‌کنیم که در آن سیگنال ارسالی فرستنده توسط رله‌ها دریافت و از بین رله‌هایی که قادر به دیکد کردن سیگنال دریافتی هستند، بهترین رله انتخاب شده سیگنال را به گیرنده ارسال می‌کند. همچنین، طرح انتخاب رله برمبنای ضریب کانال رله به گیرنده را پیشنهاد می‌کنیم. از آنجایی که گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در طول دو بازه زمانی سیگنال را از طریق کانال مستقیم و کانال رله دریافت می‌کنند و به دلیل ایجاد چندگانگی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر، در این فصل طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت را پیشنهاد و عملکرد شبکه را بر اساس احتمال قطع امنیتی بررسی می‌کنیم.

با توجه به در نظر گرفتن توأم اثرات تداخل، مسائل امنیتی، کانال مستقیم و ارتباطات مشارکتی در مدل سیستمی پیشنهادی، محاسبه توابع توزیع تجمعی و توابع چگالی احتمال متغیرهای شبکه و درنتیجه محاسبه رابطه احتمال قطع امنیتی چالش‌برانگیز است که در این فصل توانستیم با استفاده از روش‌هایی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه کنیم.

۳-۲-مدل سیستمی و بیان مسئله

یک مدل سیستمی شامل ارتباطات وسیله به وسیله که به‌صورت زمینه‌ای در شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌کند را در نظر می‌گیریم که به دلیل استفاده از طیف فرکانسی مشترک دارای تداخل متقابل بر یکدیگر هستند. شبکه سلولی شامل ایستگاه پایه و گیرنده شبکه سلولی و ارتباطات وسیله به وسیله شامل فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله است.

ارسال سیگنال از ایستگاه پایه به گیرنده شبکه سلولی تنها از طریق کانال مستقیم و ارسال سیگنال از فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله علاوه بر کانال مستقیم از طریق مجموعه رله‌های $K=\{1,...,k\}$ که از نوع دیکد و ارسال هستند، صورت می‌گیرد و یک شنودگر در ناحیه تحت پوشش شبکه حضور دارد که قادر به شنود سیگنال‌های ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله است. همچنین فرض می‌کنیم ایستگاه پایه، گیرنده سلولی، فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله، رله‌ها و شنودگر هرکدام مجهز به یک آنتن هستند. مدل سیستمی پیشنهادی در شکل ۳-۱ نشان داده شده است که در آن BS، CR، DT، DR، K و E به ترتیب بیانگر ایستگاه پایه، گیرنده شبکه سلولی، فرستنده وسیله به وسیله، گیرنده وسیله به وسیله، مجموعه رله‌ها و شنودگر هستند.



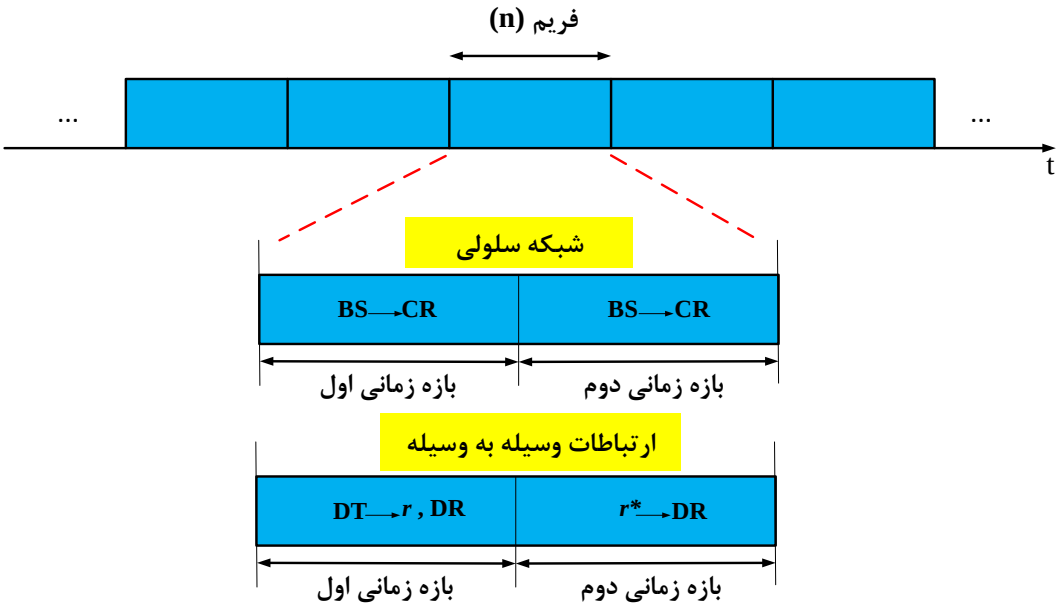
شکل ۳-۱: مدل سیستمی مشارکتی پیشنهادی با استفاده از چندین رله دیکد و ارسال

فرآیند ارسال سیگنال در طرح مشارکتی پیشنهادی در شکل ۳-۲ نشان داده شده است که در آن هر فریم[1] ارسال سیگنال، به دو بازه زمانی تقسیم می‌شود. در شبکه سلولی، در هر دو بازه زمانی اطلاعات از ایستگاه پایه به گیرنده شبکه سلولی ارسال می‌گردد. در ارتباطات وسیله به وسیله، در بازه زمانی اول، فرستنده وسیله به وسیله اطلاعات را ارسال می‌کند و گیرنده وسیله به وسیله، رله‌ها و شنودگر آن را دریافت می‌کنند. از بین تمام رله‌ها، رله‌هایی که قادر به دیکد کردن سیگنال دریافتی هستند مجموعه دیکدکنندگان[2] $\mathcal{K}_D$ را تشکیل می‌دهند. در این صورت، فضای نمونه[3] تمام مجموعه‌های دیکدکنندگان ممکن برابر است با:

$$\Omega = \left\{ \varnothing \bigcup \mathcal{K}_D,\ D = 1, 2, \ldots, 2^k - 1 \right\} \qquad (۱-۳)$$

[1] Frame
[2] Decoding set
[3] Sample space

که در آن $\varnothing$ بیانگر مجموعه تهی[1] و $\mathcal{K}_D$ زیرمجموعه غیر تهی[2] از k رله و به‌صورت $\mathcal{K}_D \subseteq \{1,...,k\}$ است. در بازه زمانی دوم در صورتی که مجموعه دیکدکنندگان غیر تهی باشد، بر اساس طرح انتخاب رله پیشنهادی که در ادامه این فصل معرفی می‌شود، بهترین رله از مجموعه دیکدکنندگان انتخاب و سیگنال دریافتی را ارسال می‌کند که در این حالت گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر آن را دریافت می‌کنند. در این پایان‌نامه فرض می‌کنیم فرستنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم و در زمان ارسال سیگنال توسط رله‌ها هیچ‌گونه اطلاعاتی را ارسال نمی‌کند [۵۱] [۶۰, ۶۱]. بنابراین، اگر مجموعه دیکدکنندگان تهی و هیچ رله‌ای قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله نباشد، هیچ ارتباطی در بازه زمانی دوم برقرار نمی‌گردد و سیگنال دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در طول دو بازه زمانی ارسال، تنها ناشی از ارسال از طریق کانال مستقیم در بازه زمانی اول است.



شکل ۳-۲: فرآیند ارسال سیگنال در طرح مشارکتی پیشنهادی

به دلیل دریافت سیگنال از طریق کانال مستقیم و کانال رله در طول دو بازه زمانی ارسال و ایجاد چندگانگی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر، در این فصل فرض می‌کنیم گیرنده وسیله به وسیله

[1] Empty set
[2] Non empty subset

و شنودگر از طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت برای سیگنال‌های دریافت شده در طول دو بازه زمانی استفاده می‌کنند که در آن نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در طول دو بازه زمانی برابر با مجموع نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در هرکدام از دو بازه زمانی است.

۳-۳- پارامترهای شبکه

فرض می‌کنیم کانال‌ها مستقل و دارای توزیع یکسان[1] بوده و $h_{a\to b}$ بیانگر ضریب کانال بین گره‌های $a\in\{\mathrm{BS},\mathrm{DT},r\}$ و $b\in\{\mathrm{CR},\mathrm{DR},r,\mathrm{E}\}$ است. همچنین، کانال‌ها دارای محوشوندگی رایلی[2] هستند و در این صورت ضرایب کانال‌ها دارای توزیع نمایی[3] با پارامتر $\sigma^2_{a\to b}$ است [۶۲] که در طول هر فریم ارسال ثابت می‌مانند و به‌صورت مستقل از یک فریم به فریم دیگر تغییر می‌کنند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$|h_{a\to b}|^2 \sim \sigma^2_{a\to b} e^{-\sigma^2_{a\to b} t} \qquad (۲-۳)$$

که در آن $\sigma^2_{a\to b}=\dfrac{1}{E\{|h_{a\to b}|^2\}}$ و $E\{z\}$ بیانگر مقدار مورد انتظار[4] متغیر تصادفی[5] z است.

با استفاده از تعاریف بیان شده فرض می‌کنیم در ارتباطات سلولی، در بازه‌های زمانی اول و دوم ایستگاه پایه به ترتیب سمبل‌های x_C^1 و x_C^2 را با توان ثابت P_{BS} به گیرنده شبکه سلولی ارسال می‌کند و در ارتباطات وسیله به وسیله، در بازه زمانی اول فرستنده وسیله به وسیله سمبل x_D را با توان ثابت P_{DT} و در بازه زمانی دوم بهترین رله انتخاب شده r^* از مجموعه دیکدکنندگان، سمبل x_{r^*} را با توان ثابت P_{r^*} ارسال می‌کند. سیگنال‌های دریافتی در گیرنده شبکه سلولی، در طول دو بازه زمانی برابر است با:

[1] Independent and identically distributed (i.i.d)
[2] Rayleigh fading
[3] Exponential distribution
[4] Expectation value
[5] Random variable

$$y_{\mathrm{CR}}^{1}=\sqrt{P_{\mathrm{BS}}}h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}x_{C}^{1}+\sqrt{P_{\mathrm{DT}}}h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}}x_{D}+n_{\mathrm{CR}}^{1} \qquad (۳-۳)$$

$$y_{\mathrm{CR}}^{2}=\sqrt{P_{\mathrm{BS}}}h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}x_{C}^{2}+\sqrt{P_{r^*}}h_{r^*\to\mathrm{CR}}x_{r^*}+n_{\mathrm{CR}}^{2} \qquad (۴-۳)$$

که در آن n_{CR}^{1} و n_{CR}^{2} به ترتیب بیانگر نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده شبکه سلولی در بازه‌های زمانی اول و دوم، با میانگین صفر و چگالی طیفی توان[1] N_0 و در نتیجه دارای توزیع به‌صورت $n_{\mathrm{CR}}^{1}\sim CN(0,N_0)$[2] و $n_{\mathrm{CR}}^{2}\sim CN(0,N_0)$ هستند. نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده شبکه سلولی به ترتیب در بازه‌های زمانی اول و دوم به‌صورت زیر است:

$$\gamma_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{1}=\frac{P_{\mathrm{BS}}\,|\,h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\,|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{DT}}\,|\,h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}}\,|^{2}} \qquad (۵-۳)$$

$$\gamma_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{2}=\frac{P_{\mathrm{BS}}\,|\,h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\,|^{2}}{N_0+P_{r^*}\,|\,h_{r^*\to\mathrm{CR}}\,|^{2}} \qquad (۶-۳)$$

بنابراین، ظرفیت کانال بین ایستگاه پایه و گیرنده شبکه سلولی به ترتیب در بازه‌های زمانی اول و دوم به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۹] :

$$C_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{1}=\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{BS}}\,|\,h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\,|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{DT}}\,|\,h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}}\,|^{2}}\right) \qquad (۷-۳)$$

$$C_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{2}=\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{BS}}\,|\,h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\,|^{2}}{N_0+P_{r^*}\,|\,h_{r^*\to\mathrm{CR}}\,|^{2}}\right) \qquad (۸-۳)$$

در ارتباطات وسیله به وسیله همانطور که بیان شد، در بازه زمانی اول فرستنده وسیله به وسیله سمبل x_D را با توان ثابت P_{DT} ارسال و گیرنده وسیله به وسیله، رله‌ها و شنودگر آن را دریافت می‌کنند. سیگنال‌های دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله، رله r و شنودگر در بازه زمانی اول برابر است با:

[1] Power spectral density

[2] $CN(\mu,\sigma^2)$ بیانگر توزیع گوسی با میانگین μ و واریانس σ^2 است.

$$y_{\mathrm{DR}}^{1}=\sqrt{P_{\mathrm{DT}}}h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}x_{D}+\sqrt{P_{\mathrm{BS}}}h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}x_{C}^{1}+n_{\mathrm{DR}}^{1} \quad (۹-۳)$$

$$y_{r}^{1}=\sqrt{P_{\mathrm{DT}}}h_{\mathrm{DT}\to r}x_{D}+\sqrt{P_{\mathrm{BS}}}h_{\mathrm{BS}\to r}x_{C}^{1}+n_{r} \quad (۱۰-۳)$$

$$y_{\mathrm{E}}^{1}=\sqrt{P_{\mathrm{DT}}}h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}x_{D}+\sqrt{P_{\mathrm{BS}}}h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}x_{C}^{1}+n_{\mathrm{E}}^{1} \quad (۱۱-۳)$$

که در آن n_{DR}^{1}، n_{r} و n_{E}^{1} به‌ترتیب بیانگر نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی اول، رله r و شنودگر در بازه زمانی اول با میانگین صفر و چگالی طیفی توان N_0 و دارای توزیع به‌صورت $n_{\mathrm{DR}}^{1}\sim CN(0,N_0)$، $n_{r}\sim CN(0,N_0)$، و $n_{\mathrm{E}}^{1}\sim CN(0,N_0)$ هستند. نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله، رله r و شنودگر در بازه زمانی اول به‌صورت زیر است:

$$\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}^{1}=\frac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}\right|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}\right|^{2}} \quad (۱۲-۳)$$

$$\gamma_{\mathrm{DT}\to r}^{1}=\frac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to r}\right|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to r}\right|^{2}} \quad (۱۳-۳)$$

$$\gamma_{\mathrm{DT}\to E}^{1}=\frac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}\right|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}\right|^{2}} \quad (۱۴-۳)$$

بنابراین در ارتباطات وسیله به وسیله، ظرفیت کانال بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله، فرستنده وسیله به وسیله و رله r و فرستنده وسیله به وسیله و شنودگر در بازه زمانی اول به‌ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}^{1}=\frac{1}{2}\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}\right|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}\right|^{2}}\right) \quad (۱۵-۳)$$

$$C_{\mathrm{DT}\to r}^{1}=\frac{1}{2}\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to r}\right|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to r}\right|^{2}}\right) \quad (۱۶-۳)$$

$$C_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}^{1}=\frac{1}{2}\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}\right|^{2}}{N_0+P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}\right|^{2}}\right) \quad (۱۷-۳)$$

که در آن ضریب $\frac{1}{2}$ به این دلیل است که در ارتباطات مشارکتی از طریق رله، هر فریم ارسال سیگنال شامل دو بازه زمانی است و در ارسال سیگنال از فرستنده وسیله به وسیله به گیرنده وسیله به وسیله، رله r و شنودگر، یک بازه زمانی طی می‌شود.

در ارتباطات وسیله به وسیله، ارسال سیگنال در بازه زمانی دوم به مجموعه دیکدکنندگان بستگی دارد. در صورتی که مجموعه دیکدکنندگان تهی باشد و هیچ رله‌ای قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله در بازه زمانی اول نگردد، هیچ‌گونه ارسال سیگنالی در بازه زمانی دوم برقرار نمی‌شود و سیگنال دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در طول دو بازه زمانی تنها ناشی از ارسال اطلاعات از طریق کانال مستقیم در بازه زمانی اول است. در صورتی که مجموعه دیکدکنندگان تهی نباشد، در بازه زمانی دوم بهترین رله یعنی r^* بر اساس طرح انتخاب رله پیشنهادی که در ادامه این فصل بیان می‌شود از مجموعه دیکدکنندگان انتخاب می‌گردد. سپس رله انتخاب شده پس از دوباره اینکد[1] کردن پیام دریافتی، سمبل x_{r^*} را با توان ثابت P_{r^*} ارسال و گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر آن را دریافت می‌کنند. سیگنال‌های دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در بازه زمانی دوم برابر است با:

$$y_{\mathrm{DR}}^2 = \sqrt{P_{r^*}} h_{r^*\to \mathrm{DR}} x_{r^*} + \sqrt{P_{\mathrm{BS}}} h_{\mathrm{BS}\to \mathrm{DR}} x_C^2 + n_{\mathrm{DR}}^2 \qquad (۱۸-۳)$$

$$y_{\mathrm{E}}^2 = \sqrt{P_{r^*}} h_{r^*\to \mathrm{E}} x_{r^*} + \sqrt{P_{\mathrm{BS}}} h_{\mathrm{BS}\to \mathrm{E}} x_C^2 + n_{\mathrm{E}}^2 \qquad (۱۹-۳)$$

که در آن n_{DR}^2 و n_{E}^2 به ترتیب بیانگر نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در بازه زمانی دوم با میانگین صفر و چگالی طیفی توان N_0 و دارای توزیع به‌صورت $n_{\mathrm{DR}}^2 \sim CN(0, N_0)$ و $n_{\mathrm{E}}^2 \sim CN(0, N_0)$ است. بنابراین، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در بازه زمانی دوم به‌صورت زیر است:

[1] Encode

$$\gamma^2_{r^*\to \mathrm{DR}} = \frac{P_{r^*} \mid h_{r^*\to \mathrm{DR}} \mid^2}{N_0 + P_{\mathrm{BS}} \mid h_{\mathrm{BS}\to \mathrm{DR}} \mid^2} \quad (۲۰-۳)$$

$$\gamma^2_{r^*\to \mathrm{E}} = \frac{P_{r^*} \mid h_{r^*\to \mathrm{E}} \mid^2}{N_0 + P_{\mathrm{BS}} \mid h_{\mathrm{BS}\to \mathrm{E}} \mid^2} \quad (۲۱-۳)$$

با توجه به ارسال یک سیگنال مشترک در طول دو بازه زمانی از طریق کانال مستقیم و کانال رله و به دلیل ایجاد چندگانگی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر، در این فصل طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت را پیشنهاد می‌کنیم. با اعمال طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در طول دو بازه زمانی ارسال سیگنال برابر با مجموع نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی از طریق کانال مستقیم و کانال رله در طول دو بازه زمانی است. به این ترتیب، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در طول دو بازه زمانی ارسال سیگنال که در آن ارسال اطلاعات از طریق بهترین رله دیکد و ارسال انتخاب شده r^* و کانال مستقیم انجام می‌شود برابر است با:

$$\gamma^{\mathrm{DT}r^*\mathrm{DR}}_{\mathrm{e2e}} = \gamma^1_{\mathrm{DT}\to \mathrm{DR}} + \gamma^2_{r^*\to \mathrm{DR}} \quad (۲۲-۳)$$

$$\gamma^{\mathrm{DT}r^*\mathrm{E}}_{\mathrm{e2e}} = \gamma^1_{\mathrm{DT}\to \mathrm{E}} + \gamma^2_{r^*\to \mathrm{E}} \quad (۲۳-۳)$$

بنابراین، ظرفیت دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر در طول دو بازه زمانی از طریق کانال بهترین رله انتخاب شده r^* و کانال مستقیم به‌صورت زیر است:

$$C^{\mathrm{DTDR}}_{r^*} = \frac{1}{2}\log_2\left(1+\gamma^{\mathrm{DT}r^*\mathrm{DR}}_{\mathrm{e2e}}\right) \quad (۲۴-۳)$$

$$C^{\mathrm{DTE}}_{r^*} = \frac{1}{2}\log_2\left(1+\gamma^{\mathrm{DT}r^*\mathrm{E}}_{\mathrm{e2e}}\right) \quad (۲۵-۳)$$

که در آن ضریب $\frac{1}{2}$ به دلیل ارسال یک سیگنال مشترک در طول دو بازه زمانی است.

اکنون با در اختیار داشتن روابط مربوط به نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده‌ها و ظرفیت تمامی کانال‌های موجود در شبکه، احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را محاسبه می‌کنیم.

۳-۴- احتمالات قطع ارتباط در شبکه سلولی

همان‌طور که بیان شد، با توجه به در نظر گرفتن حالت استفاده مجدد در ارتباطات وسیله به وسیله، فرستنده‌ها در ارتباطات وسیله به وسیله سیگنال خود را بر روی طیف شبکه سلولی ارسال می‌کنند که در این صورت تداخل متقابل در شبکه ایجاد می‌گردد و کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، جهت تضمین کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی از عملکرد احتمال قطع استفاده می‌کنیم [۴۱] و توان‌های ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها را به‌گونه‌ای محدود می‌کنیم که احتمال قطع ارتباط کاربران شبکه سلولی از یک مقدار آستانه تعیین شده بیشتر نگردد. زمانی که کیفیت سرویس موردنیاز کاربران شبکه سلولی زیاد باشد، کاربران در ارتباطات وسیله به وسیله تنها می‌توانند با توان خیلی پایینی سیگنال‌های خود را ارسال کنند و بازده ارتباطات وسیله به وسیله محدود می‌گردد.

فرض می‌کنیم ایستگاه پایه اطلاعات خود را با نرخ ثابت R^P به گیرنده شبکه سلولی ارسال می‌کند. از آنجایی که شنودگر قادر به کشف سیگنال‌های ارسالی توسط فرستنده شبکه سلولی نیست، زمانی ارتباط در شبکه سلولی قطع می‌شود که ظرفیت کانال بین ایستگاه پایه و گیرنده شبکه سلولی از نرخ ارسالی ایستگاه پایه که برابر با مقدار ثابت R^P است، کمتر گردد. بنابراین، احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی در حضور تداخل ناشی از ارتباطات وسیله به وسیله در بازه‌های زمانی $i \in \{1,2\}$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{\text{out}}^{C,i} = \Pr\left(C_{\text{BS}\to\text{CR}}^{i} < R^P\right) \qquad (۲۶-۳)$$

قضیه ۳-۱: احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی به ترتیب در بازه‌های زمانی اول و دوم برابر است با:

$$P_{\text{out}}^{\text{C},1}=1-\frac{\frac{\sigma_{\text{DT}\to\text{CR}}^2}{\delta_{\text{DT}}}}{\frac{\sigma_{\text{BS}\to\text{CR}}^2}{\delta_{\text{BS}}}\vartheta+\frac{\sigma_{\text{DT}\to\text{CR}}^2}{\delta_{\text{DT}}}}e^{(-\frac{\sigma_{\text{BS}\to\text{CR}}^2}{\delta_{\text{BS}}}\vartheta)} \qquad (۲۷-۳)$$

$$P_{\text{out}}^{\text{C},2}=1-\frac{\frac{\sigma_{r\to\text{CR}}^2}{\delta_r}}{\frac{\sigma_{\text{BS}\to\text{CR}}^2}{\delta_{\text{BS}}}\vartheta+\frac{\sigma_{r\to\text{CR}}^2}{\delta_r}}e^{(-\frac{\sigma_{\text{BS}\to\text{CR}}^2}{\delta_{\text{BS}}}\vartheta)} \qquad (۲۸-۳)$$

که در آن $\delta_{\text{BS}}=\frac{P_{\text{BS}}}{N_0}$، $\delta_{\text{DT}}=\frac{P_{\text{DT}}}{N_0}$ و $\delta_r=\frac{P_r}{N_0}$ به ترتیب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه، نسبت سیگنال به نویز ارسالی فرستنده وسیله به وسیله و نسبت سیگنال به نویز ارسالی رله r و همچنین $\vartheta=2^{R^{\text{P}}}-1$ است.

اثبات: در ابتدا احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی در بازه زمانی اول را محاسبه می‌کنیم. با جایگذاری رابطه (۳-۷) در رابطه (۳-۲۶) داریم:

$$\begin{aligned}P_{\text{out}}^{\text{C},1}&=\Pr\left(\log_2(1+\frac{P_{\text{BS}}\,|\,h_{\text{BS}\to\text{CR}}\,|^2}{N_0+P_{\text{DT}}\,|\,h_{\text{DT}\to\text{CR}}\,|^2})<R^P\right)\\&=\Pr\left(\frac{\delta_{\text{BS}}\,|\,h_{\text{BS}\to\text{CR}}\,|^2}{1+\delta_{\text{DT}}\,|\,h_{\text{DT}\to\text{CR}}\,|^2}<\vartheta\right)\end{aligned} \qquad (۲۹-۳)$$

با استفاده از قانون احتمالات کل[1] [۶۳] می‌توان نوشت:

[1] Total probability law

$$P_{\text{out}}^{C,1} = \int_0^{\infty} F_{|h_{\text{BS}\to\text{CR}}|^2}\left(\frac{\vartheta}{\delta_{\text{BS}}} + \frac{\delta_{\text{DT}}\vartheta}{\delta_{\text{BS}}} x\right) \text{f}_{|h_{\text{DT}\to\text{CR}}|^2}(x)dx \qquad (۳۰-۳)$$

که در آن $F_z(.)$ و $f_z(.)$ به ترتیب بیانگر تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی z است. با توجه به اینکه ضرایب کانال‌ها دارای توزیع نمایی با پارامتر $\sigma_{a\to b}^2$ هستند، تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال آن‌ها به ترتیب برابر است با [۶۳]:

$$F_{|\text{h}_{a\to b}|^2}(z) = 1 - e^{-\sigma_{a\to b}^2 z} \qquad (۳۱-۳)$$

$$f_{|\text{h}_{a\to b}|^2}(z) = \sigma_{a\to b}^2 e^{-\sigma_{a\to b}^2 z} \qquad (۳۲-۳)$$

بنابراین با استفاده از روابط فوق و محاسبه انتگرال مربوطه در رابطه (۳-۳۰)، رابطه (۳-۲۷) محاسبه می‌شود. همچنین، رابطه (۳-۲۸) نیز با روشی مشابه با آنچه بیان شد نتیجه می‌گردد.

همان‌طور که اشاره شد، به دلیل تداخل متقابل ناشی از ارتباطات وسیله به وسیله در شبکه سلولی، کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، در این پایان‌نامه روشی را ارائه می‌کنیم که بر اساس آن، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها جهت تضمین کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی به‌گونه‌ای محدود می‌شود که احتمالات قطع ارتباط در شبکه سلولی از مقدار آستانه $\overline{P}_{\text{out}}^C$ بیشتر نگردد. بنابراین داریم:

$$P_{\text{out}}^{C,1} \le \overline{P}_{\text{out}}^C \qquad (۳۳-۳)$$

$$P_{\text{out}}^{C,2} \le \overline{P}_{\text{out}}^C \qquad (۳۴-۳)$$

با جایگذاری روابط (۳-۲۷) و (۳-۲۸) در روابط فوق، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله r به‌صورت زیر محدود می‌شود:

$$P_{\mathrm{DT}} \le \frac{P_{\mathrm{BS}}\sigma^2_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}}}{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}\left[\frac{1}{1-\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}}}e^{\left(-\frac{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}{\delta_{\mathrm{BS}}}\right)}-1\right] \quad (۳۵-۳)$$

$$P_r \le \frac{P_{\mathrm{BS}}\sigma^2_{r\to\mathrm{CR}}}{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}\left[\frac{1}{1-\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}}}e^{\left(-\frac{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}{\delta_{\mathrm{BS}}}\right)}-1\right] \quad (۳۶-۳)$$

همان‌طور که در روابط (۳-۳۵) و (۳-۳۶) مشاهده می‌شود، در صورتی که رابطه $\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}} < 1-e^{\left(-\frac{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}{\delta_{\mathrm{BS}}}\right)}$ برقرار باشد، اتلاف زیادی در شبکه سلولی رخ می‌دهد که در این صورت کاربران ارتباطات وسیله به وسیله اجازه دسترسی به طیف شبکه سلولی را نخواهند داشت و باید توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها صفر گردد. همچنین، به‌منظور کنترل توان ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله، فرض می‌کنیم طبق روابط (۳-۳۵) و (۳-۳۶) فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها از بیشترین توان مجاز خود جهت ارسال سیگنال استفاده می‌کنند [۴۱]. بنابراین، روابط توان ارسالی فرستنده وسیله به وسیله و رله r به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_{\mathrm{DT}} = \frac{P_{\mathrm{BS}}\sigma^2_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}}}{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}\Lambda^{+} \quad (۳۷-۳)$$

$$P_r = \frac{P_{\mathrm{BS}}\sigma^2_{r\to\mathrm{CR}}}{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}\Lambda^{+} \quad (۳۸-۳)$$

که در آن $\Lambda = \frac{1}{1-\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}}}e^{\left(-\frac{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}{\delta_{\mathrm{BS}}}\right)}-1$ است و Λ^{+} به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Lambda^{+} = \max(\Lambda,0) = \begin{cases}\Lambda & \text{if } \Lambda \ge 0\\ 0 & \text{if } \Lambda < 0\end{cases} \quad (۳۹-۳)$$

بنابراین، با محدود کردن توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها، احتمال قطع ارتباطات در شبکه سلولی از مقدار آستانه $\overline{P}_{\text{out}}^{C}$ بیشتر نمی‌شود و کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی حفظ می‌گردد.

۳-۵- احتمالات قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله

در حالتی که فرستنده‌های شبکه در زمان ارسال سیگنال اطلاعاتی در مورد ضرایب کانال‌های شبکه در اختیار نداشته باشند، ارسال اطلاعات با نرخ داده ثابت انجام می‌شود و عملکرد شبکه بر اساس احتمال قطع امنیتی بررسی می‌گردد. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه، به غیر از [۲۷]، [۲۸] و [۴۵] تابحال مدل سیستمی که در آن هیچ‌کدام از ضرایب کانال‌های شبکه در فرستنده‌ها در دسترس نباشند، بررسی نشده است که در [۲۷] و [۲۸] برقراری ارتباط به‌صورت غیر مشارکتی و تنها در [۴۵] به‌صورت مشارکتی از طریق تنها یک رله و بدون حضور هیچگونه تداخلی در شبکه در نظر گرفته شده است. بنابراین، در این فصل فرض می‌کنیم فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها اطلاعاتی در مورد ضرایب کانال‌های اصلی شبکه و کانال شنودگر در اختیار نداشته و هیچ فیدبکی از گیرنده وسیله به وسیله در دسترس نباشد. در این حالت، فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها نرخ داده ارسالی و نرخ ارسال امن اطلاعات خود را به ترتیب به‌صورت مقدار ثابت $R^{D}=R_{\text{fixed}}^{D}$ و $R^{SD}=R^{D}-R^{e}$ تنظیم می‌کنند که در آن R^{e} نرخ ابهام شنودگر است. از آنجایی که نرخ داده ارسالی و نرخ ارسال امن اطلاعات فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها ثابت است و مطابق با شرایط کانال تغییر نمی‌کند و با توجه به در دسترس نبودن ضرایب کانال‌های شبکه در فرستنده‌ها، قطع در ارتباطات وسیله به وسیله رخ می‌دهد. در حالتی که ضرایب کانال‌های اصلی و شنودگر در دسترس نباشند، دو نوع قطع ارتباط با عناوین قطع در ارسال قابل‌اطمینان و قطع در ارسال امن در شبکه رخ می‌دهد. قطع در ارسال قابل‌اطمینان متناظر با حالتی است که ظرفیت کانال اصلی شبکه کمتر از نرخ داده ارسالی R^{D} شود و قطع در ارسال امن زمانی اتفاق می‌افتد که ظرفیت کانال شنودگر از نرخ ابهام شنودگر R^{e} تجاوز کند. توجه به این نکته ضروری است

که قطع ارتباط در شبکه می‌تواند در رله‌ها، گیرنده وسیله به وسیله یا در هردوی رله‌ها و گیرنده وسیله به وسیله اتفاق بیفتد.

فرض کنید تمام زیرمجموعه‌های ممکن مجموعه رله‌ها به‌صورت $\mathcal{K}_m \subseteq K,\ m = 0,1,...,2^{|k|}-1$ باشند که در آن $|A|$ بیانگر تعداد عناصر موجود در مجموعه A و $\mathcal{K}_0 = \varnothing$ مجموعه تهی است. همانطور که بیان شد، مجموعه دیکدکنندگان $\mathcal{K}_D$، مجموعه رله‌هایی هستند که می‌توانند سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله را به‌درستی دیکد کنند. رله‌هایی قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله خواهند بود که ظرفیت کانال فرستنده وسیله به وسیله تا آن رله در بازه زمانی اول، از مقدار نرخ داده ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله که برابر با مقدار ثابت R^D است، بیشتر باشد. بنابراین، مجموعه دیکدکنندگان $\mathcal{K}_D$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathcal{K}_D = \left\{ r \in K : R^D \le C^1_{DT \to r} \right\} \qquad (۴۰-۳)$$

با جایگذاری رابطه (۳-۱۶) در رابطه فوق داریم:

$$\mathcal{K}_D = \left\{ r \in K : \beta \le \gamma^1_{DT \to r} \right\} \qquad (۴۱-۳)$$

که در آن $\beta = 2^{2R^D} - 1$ است و $\gamma^1_{DT \to r}$ در رابطه (۳-۱۳) تعریف شده است.

احتمال قطع ارتباطات وسیله به وسیله در دو حالت رخ می‌دهد. حالت اول زمانی است که در بازه زمانی اول ارسال، هیچ رله‌ای قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله نباشد و همزمان ارسال سیگنال از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله قطع شود. حالت دوم زمانی رخ می‌دهد که در بازه زمانی اول، زیرمجموعه‌ای از مجموعه تمامی رله‌ها قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی باشند اما در بازه زمانی دوم، سیگنال دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله که نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل آن بر اساس طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی برابر با مجموع نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی

اول و کانال بین بهترین رله انتخاب شده r^* و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم است، قطع گردد. در حالت کلی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از قانون احتمال کل به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۴۱]:

$$P_{\text{out}} = \Pr(\mathcal{K}_{\text{D}} = \mathcal{K}_0)\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_{\text{D}} = \mathcal{K}_0) + \sum_{m=1}^{2^{|K|}-1} \Pr(\mathcal{K}_{\text{D}} = \mathcal{K}_m)\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_{\text{D}} = \mathcal{K}_m) \quad (۴۲-۳)$$

که در آن عبارات $\Pr(\mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0)$، $\Pr(\mathcal{K}_D = \mathcal{K}_m)$، $\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0)$ و $\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_D = \mathcal{K}_m)$ به‌ترتیب بیانگر احتمال اینکه هیچ رله‌ای قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی نباشد، احتمال اینکه رله‌های عضو زیرمجموعه $\mathcal{K}_m$ از مجموعه تمامی رله‌ها قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی باشند، احتمال اینکه قطع در ارتباطات وسیله به وسیله رخ دهد به شرطی که هیچ رله‌ای قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی نباشد و احتمال اینکه قطع در ارتباطات وسیله به وسیله رخ دهد به شرطی که رله‌های عضو زیرمجموعه $\mathcal{K}_m$ از مجموعه تمامی رله‌ها قادر به دیکد کردن سیگنال باشند، هستند. توجه به این نکته ضروری است که مقدار P_{out} تابعی از دو متغیر R^D و R^e با شرط $R^e \le R^D$ است.

در رابطه (۳-۴۲)، عبارت $\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_D = \mathcal{K}_m)$ به طرح انتخاب رله بستگی دارد. با توجه به مطالعات انجام شده، طرح‌های انتخاب رله گوناگونی وجود دارد که بر اساس ضرایب کانال‌های موجود در شبکه تعریف می‌شوند. در این فصل طرح انتخاب رله بر اساس ضرایب کانال بین رله‌ها و گیرنده وسیله به وسیله را پیشنهاد می‌کنیم. برای این منظور، باید ضرایب کانال بین هر رله تا گیرنده وسیله به وسیله در دسترس باشد و بر اساس این ضرایب، بهترین رله جهت ارسال سیگنال به گیرنده وسیله به وسیله انتخاب گردد. با توجه به اینکه در مدل سیستمی پیشنهادی در این فصل، ضرایب هیچ‌کدام از کانال‌های شبکه در دسترس نیست، فرض می‌کنیم انتخاب رله بر اساس یکی از دو روش انتخاب رله متمرکز[1]

[1] Centralized relay selection

[۶۴] و انتخاب رله توزیع شده[1] انجام می‌شود و هرکدام از رله‌ها در هر لحظه از زمان، ضریب لحظه‌ای کانال خود تا گیرنده وسیله به وسیله را تخمین[2] می‌زند. در روش انتخاب رله متمرکز، یک ایستگاه پایه مرکزی جهت جمع‌آوری ضرایب کانال ضروری در شبکه اختصاص داده می‌شود و در روش انتخاب رله توزیع شده، انتخاب رله بر اساس روش به‌کارگیری تایمر[3] پیشنهاد شده در [۶۵] انجام می‌گردد [۴۷]. بنابراین، فرض می‌کنیم در طول فرآیند تصمیم‌گیری انتخاب بهترین رله جهت ارسال سیگنال به گیرنده وسیله به وسیله، ضرایب لحظه‌ای کانال‌های رله تا گیرنده وسیله به وسیله در دسترس است.

در طرح انتخاب رله پیشنهادی در این فصل، رله‌ای با بیشترین ضریب کانال بین رله و گیرنده وسیله به وسیله جهت ارسال سیگنال دریافتی از فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله انتخاب می‌شود. بنابراین با استفاده از این طرح پیشنهادی، رله انتخاب شده از مجموعه دیکدکنندگان $\mathcal{K}_D$ جهت ارسال سیگنال به گیرنده وسیله به وسیله، دارای بیشترین ضریب کانال رله به گیرنده وسیله به وسیله خواهد بود. یعنی با توجه به مجموعه دیکدکنندگان $\mathcal{K}_D$، بهترین رله r^* به‌صورت زیر انتخاب می‌گردد:

$$r^* = \arg\max_{r\in\mathcal{K}_D} |h_{r\to \mathrm{DR}}|^2 \qquad (۴۳-۳)$$

در این بخش هرکدام از عبارات موجود در رابطه (۳-۴۲) و درنهایت احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه می‌کنیم.

۳-۵-۱- محاسبه $\Pr(\mathcal{K}_D = \mathcal{K}_m)$

عبارت $\{\mathcal{K}_D = \mathcal{K}_m\}$ به این معنی است که رله‌های متعلق به زیرمجموعه $\mathcal{K}_m$ از مجموعه تمامی رله‌ها، قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله هستند و به ازای رله‌هایی که عضو زیرمجموعه $\mathcal{K}_m$ نیستند، کانال ارتباطی بین فرستنده وسیله به وسیله و رله در بازه زمانی اول دچار قطع

[1] Distributed relay selection
[2] Estimation
[3] Timer

در ارسال قابل اطمینان می‌گردند. بنابراین، برای هر $r\in\mathcal{K}_m$ و $\hat{r}\notin\mathcal{K}_m$ به ترتیب رابطه $R^D\le C^1_{\mathrm{DT}\to r}$ و $C^1_{\mathrm{DT}\to r}<R^D$ برقرار است. در این حالت می‌توان نوشت:

$$\Pr(\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_m)=\prod_{r\in\mathcal{K}_m}\left(1-P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{DT}\to r}\right)\prod_{\hat{r}\in\mathcal{K}_m^c}P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{DT}\to\hat{r}} \qquad (۴۴-۳)$$

که در آن $\mathcal{K}_m^C=K-\mathcal{K}_m$ بیانگر مکمل[1] مجموعه $\mathcal{K}_m$ و $P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{DT}\to r}$ احتمال قطع در ارسال قابل اطمینان کانال بین فرستنده وسیله به وسیله و رله r است که به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{DT}\to r}&=\Pr\left[C^1_{\mathrm{DT}\to r}<R^D\right]=\Pr\left[\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r})<R^D\right]\\&=\Pr(\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}<\beta)=F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}}(\beta)\end{aligned} \qquad (۴۵-۳)$$

که در آن $F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}}(x)$ بیانگر تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی $\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}$ است.

قضیه ۳-۲: رابطه تابع توزیع تجمعی $F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}}(x)$ به‌صورت زیر است:

$$F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}}(x)=1-\frac{\Psi_{1r}}{\Psi_{1r}+x}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to r}x} \qquad (۴۶-۳)$$

که در آن $\Psi_{1r}=\dfrac{\Psi_{\mathrm{BS}\to r}}{\Psi_{\mathrm{DT}\to r}}$.

اثبات: با استفاده از رابطه (۳-۱۳) داریم:

$$\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}=\frac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to r}\right|^2}{N_0+P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to r}\right|^2}=\frac{X_r}{1+Y_r} \qquad (۴۷-۳)$$

که در آن $X_r=\dfrac{P_{\mathrm{DT}}\left|h_{\mathrm{DT}\to r}\right|^2}{N_0}$ و $Y_r=\dfrac{P_{\mathrm{BS}}\left|h_{\mathrm{BS}\to r}\right|^2}{N_0}$ است. بنابراین داریم:

[1] Complement

$$F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}}(x)=\Pr\left(\frac{X_r}{1+Y_r}<x\right)=\int_0^{\infty}F_{X_r}(x+xy)f_{Y_r}(y)dx \qquad (۴۸-۳)$$

از آنجایی که $|h_{\mathrm{DT}\to r}|^2$ و $|h_{\mathrm{BS}\to r}|^2$ متغیرهای تصادفی نمایی با پارامتر $\sigma^2_{\mathrm{DT}\to r}$ و $\sigma^2_{\mathrm{BS}\to r}$ هستند، فرض می‌کنیم X_r و Y_r به ترتیب متغیرهای تصادفی نمایی با پارامتر $\Psi_{\mathrm{DT}\to r}=\frac{N_0\sigma^2_{\mathrm{DT}\to r}}{P_{\mathrm{DT}}}$ و $\Psi_{\mathrm{BS}\to r}=\frac{N_0\sigma^2_{\mathrm{BS}\to r}}{P_{\mathrm{BS}}}$ باشند. بنابراین با استفاده از روابط تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی نمایی داریم [۶۳]:

$$F_{X_r}(\mathrm{z})=1-\mathrm{e}^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to r}\mathrm{z}} \qquad (۴۹-۳)$$

$$f_{Y_r}(\mathrm{z})=\Psi_{\mathrm{BS}\to r}e^{-\Psi_{\mathrm{BS}\to r}\mathrm{z}} \qquad (۵۰-۳)$$

با استفاده از روابط فوق و محاسبه انتگرال مربوطه، رابطه (۴۸-۳) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}}(x)=1-\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to r}}{\Psi_{\mathrm{BS}\to r}+\Psi_{\mathrm{DT}\to r}x}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to r}x}=1-\frac{\Psi_{1r}}{\Psi_{1r}+x}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to r}x} \qquad (۵۱-۳)$$

که در آن $\Psi_{1r}=\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to r}}{\Psi_{\mathrm{DT}\to r}}$ است.

بنابراین با استفاده از قضیه ۳-۲، احتمال $\Pr(\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_m)$ در رابطه (۴۴-۳) به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned}\Pr(\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_m)&=\prod_{r\in\mathcal{K}_m}\left(1-F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to r}}(\beta)\right)\prod_{\hat{r}\in\mathcal{K}_m^{\mathrm{c}}}F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to \hat{r}}}(\beta)\\&=\prod_{r\in\mathcal{K}_m}\left(\frac{\Psi_{1r}}{\Psi_{1r}+\beta}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to r}\beta}\right)\prod_{\hat{r}\in\mathcal{K}_m^{\mathrm{c}}}\left(1-\frac{\Psi_{1\hat{r}}}{\Psi_{1\hat{r}}+\beta}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to \hat{r}}\beta}\right)\end{aligned} \qquad (۵۲-۳)$$

همچنین توجه شود که عبارت $\Pr(\mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0)$ در رابطه (۳-۴۲)، به این معنی است که هیچ رله‌ای قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله نباشد و بنابراین با جایگذاری $\mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0 = \varnothing$ و $\mathcal{K}_0^c = K$ در رابطه (۳-۵۲)، محاسبه می‌شود.

۳-۵-۲- محاسبه $\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0)$

در ارتباطات وسیله به وسیله در بازه زمانی اول، علاوه بر ارسال اطلاعات از فرستنده وسیله به وسیله به مجموعه رله‌ها، اطلاعات از طریق کانال مستقیم از فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله ارسال می‌گردد. بنابراین، در بازه زمانی اول هنگامی‌که رابطه $\mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0$ برقرار و هیچ رله‌ای از مجموعه تمامی رله‌ها قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله نباشد، ارسال اطلاعات از فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله تنها از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی اول انجام می‌شود و اگر این کانال مستقیم قطع شود، هیچ‌گونه اطلاعاتی در ارتباطات وسیله به وسیله ارسال نمی‌گردد. بنابراین، عبارت $\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0)$ به این معنی است که با شرط اینکه هیچ رله‌ای از مجموعه تمامی رله‌ها قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله نباشد، ارتباطات در شبکه وسیله به وسیله قطع گردد که این امر متناظر با قطع ارتباط در کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی اول است. در این مورد، قطع ارتباطات وسیله به وسیله زمانی اتفاق می‌افتد که در کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله قطع در ارسال قابل اطمینان یا قطع در ارسال امن رخ دهد. قطع در ارسال قابل اطمینان متناظر با حالتی است که ظرفیت کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله از نرخ داده ارسالی کمتر گردد و قطع در ارسال امن زمانی رخ می‌دهد که ظرفیت کانال بین فرستنده وسیله به وسیله و شنودگر از نرخ ابهام شنودگر بیشتر شود. بنابراین داریم:

$$\Pr(\text{outage} \mid \mathcal{K}_D = \mathcal{K}_0) = \Pr\Big(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\text{DT}\to\text{DR}}) < R^D \Big| \bigcup \frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\text{DT}\to\text{E}}) \geq R^e\Big) \qquad (۵۳\text{-}۳)$$

که در آن $\Pr\left(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}})<R^D\right)$ احتمال قطع در ارسال قابل اطمینان و $\Pr\left(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}})\geq R^e\right)$ احتمال قطع در ارسال امن است. رابطه فوق را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۶۳]:

$$\begin{aligned}\Pr(\text{outage}\,|\,\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_0)&=\Pr\left(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}})<R^D\right)\\&+\Pr\left(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}})\geq R^e\right)\\&-\Pr\left(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}})<R^D\bigcap\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}})\geq R^e\right)\end{aligned}\qquad(۵۴\text{-}۳)$$

که در آن $\cap$ عملگر اشتراک[1] است. با توجه به روابط (۳-۱۲) و (۳-۱۴) مشاهده می‌شود که $\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}$ و $\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}$ دارای پارامتر مشترکی نبوده و بنابراین از هم مستقل هستند. از آنجایی که احتمال اشتراک دو متغیر تصادفی مستقل برابر با حاصل‌ضرب احتمال هریک از آن دو متغیر تصادفی است [۶۳]، رابطه (۳-۵۴) به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\Pr(\text{outage}\,|\,\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_0)=F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(\beta)+\left(1-F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}}(\alpha)\right)-F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(\beta)\left(1-F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}}(\alpha)\right)\qquad(۵۵\text{-}۳)$$

که در آن $\alpha=2^{2R^e}-1$ است. مشابه قضیه ۳-۲ و با استفاده از روابط (۳-۱۲) و (۳-۱۴) می‌توان نوشت:

$$F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(x)=1-\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}}{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}+\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}x}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}x}=1-\frac{\Psi_2}{\Psi_2+x}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}x}\qquad(۵۶\text{-}۳)$$

$$F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}}(x)=1-\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}}{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}+\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}x}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}x}=1-\frac{\Psi_3}{\Psi_3+x}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}x}\qquad(۵۷\text{-}۳)$$

[1] Intersection operator

که در آن $\Psi_2 = \frac{\Psi_{BS\to DR}}{\Psi_{DT\to DR}}$ و $\Psi_3 = \frac{\Psi_{BS\to E}}{\Psi_{DT\to E}}$ است. بنابراین، با جایگذاری روابط (۳-۵۶) و (۳-۵۷) در رابطه (۳-۵۵)، عبارت احتمال قطع در ارتباطات وسیله به وسیله به شرطی که هیچ رله‌ای از مجموعه تمامی رله‌ها قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله نباشند، به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Pr(\text{outage}\,|\,\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_0)=1-\frac{\Psi_2}{\Psi_2+\beta}e^{-\Psi_{DT\to DR}\beta}+\frac{\Psi_3}{\Psi_3+\alpha}e^{-\Psi_{DT\to E}\alpha}$$
$$-\left(1-\frac{\Psi_2}{\Psi_2+\beta}e^{-\Psi_{DT\to DR}\beta}\right)\left(\frac{\Psi_3}{\Psi_3+\alpha}e^{-\Psi_{DT\to E}\alpha}\right) \qquad (۵۸-۳)$$

۳-۵-۳- محاسبه $\Pr(\text{outage}\,|\,\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_m)$

عبارت $\Pr(\text{outage}\,|\,\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_m)$ به این معنی است که در بازه زمانی اول ارسال، زیرمجموعه $\mathcal{K}_m$ از مجموعه تمامی رله‌ها، قادر به دیکد کردن سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله باشند اما در بازه زمانی دوم، سیگنال دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی اول و کانال بین رله و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم قطع گردد. بنابراین، این احتمال را به ازای تمامی حالات انتخاب هرکدام از رله‌های موجود در مجموعه دیکدکنندگان جهت ارسال سیگنال از فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله محاسبه و تمام حالت‌های ممکن را بررسی می‌کنیم. محاسبه این احتمال به طرح انتخاب رله بستگی دارد. همان‌طور که اشاره شد، در این فصل طرح انتخاب رله بر اساس رابطه (۳-۴۳) پیشنهاد می‌شود که در این بخش عبارت $\Pr(\text{outage}\,|\,\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_m)$ را برای این طرح انتخاب رله محاسبه می‌کنیم.

در صورتی که مجموعه رله‌هایی که قادر به دیکد کردن سیگنال دریافتی از فرستنده وسیله به وسیله هستند را با $\mathcal{K}_m$ نشان دهیم، جهت محاسبه احتمال قطع ارتباطات وسیله به وسیله تمامی حالت‌های ممکن انتخاب رله از مجموعه دیکدکنندگان را در نظر گرفته و به ازای هر رله انتخاب شده

بر اساس طرح انتخاب رله پیشنهادی که متعلق به مجموعه دیکدکنندگان است، احتمال قطع در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از آن رله را محاسبه می‌کنیم. بنابراین، در این حالت احتمال قطع ارتباطات وسیله به وسیله به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Pr(\text{outage}\,|\,\mathcal{K}_D=\mathcal{K}_m)=\sum_{r\in\mathcal{K}_m}\Pr(r^*=r)\Pr(\text{outage}\,|\,r^*=r) \qquad (۵۹\text{-}۳)$$

که در آن عبارت $\Pr(r^*=r)$ مطابق با طرح انتخاب رله تعیین می‌گردد.

۳-۵-۳-۱- محاسبه $\Pr(\text{outage}\,|\,r^*=r)$

به ازای هر رله انتخاب شده در شبکه، زمانی ارتباطات وسیله به وسیله قطع می‌شود که سیگنال دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی اول و کانال بین رله و گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم قطع گردد که این احتمال قطع شامل احتمال قطع در ارسال قابل اطمینان و احتمال قطع در ارسال امن است. در این حالت، قطع در ارسال قابل اطمینان متناظر با حالتی است که ظرفیت دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله و کانال رله r در طول دو بازه زمانی، از نرخ داده ارسالی کمتر گردد و قطع در ارسال امن زمانی رخ می‌دهد که ظرفیت دریافتی در شنودگر از طریق کانال مستقیم بین فرستنده وسیله به وسیله و شنودگر و کانال رله r در طول دو بازه زمانی، از نرخ ابهام شنودگر بیشتر شود. بنابراین با استفاده از روابط (۳-۲۴) و (۳-۲۵) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}\Pr(\text{outage}\,|\,r^*=r)&=\Pr\left(C_r^{\text{DTDR}}<R^D\bigcup C_r^{\text{DTE}}\geq R^e\right)\\&=\Pr\left(\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DTrDR}}<\beta\bigcup\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DTrE}}\geq\alpha\right)\end{aligned} \qquad (۶۰\text{-}۳)$$

با توجه به مستقل بودن $\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DTrDR}}$ و $\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DTrE}}$، رابطه (۳-۶۰) به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$\begin{aligned}&\Pr(\text{outage}\,|\,r^{*}=r)=\Pr(\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}<\beta)+\Pr(\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{E}}\geq\alpha)\\&-\Pr(\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}<\beta)\Pr(\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{E}}\geq\alpha)\\&=F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}}(\beta)+\left(1-F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{E}}}(\alpha)\right)-F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}}(\beta)\left(1-F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{E}}}(\alpha)\right)\end{aligned}\qquad(۶۱\text{-}۳)$$

که در آن $\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}$ و $\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{E}}$ با جایگذاری روابط (۳-۱۲)، (۳-۱۴)، (۳-۲۰) و (۳-۲۱) در روابط (۳-۲۲) و (۳-۲۳) و به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}=\gamma_{\text{DT}\to\text{DR}}^{1}+\gamma_{r\to\text{DR}}^{2}=\frac{P_{\text{DT}}\,|\,h_{\text{DT}\to\text{DR}}\,|^{2}+P_{r}\,|\,h_{r\to\text{DR}}\,|^{2}}{N_{0}+P_{\text{BS}}\,|\,h_{\text{BS}\to\text{DR}}\,|^{2}}\qquad(۶۲\text{-}۳)$$

$$\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{E}}=\gamma_{\text{DT}\to\text{E}}^{1}+\gamma_{r\to\text{E}}^{2}=\frac{P_{\text{DT}}\,|\,h_{\text{DT}\to\text{E}}\,|^{2}+P_{r}\,|\,h_{r\to\text{E}}\,|^{2}}{N_{0}+P_{\text{BS}}\,|\,h_{\text{BS}\to\text{E}}\,|^{2}}\qquad(۶۳\text{-}۳)$$

قضیه ۳-۳: تابع توزیع تجمعی $F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}}(x)$ برابر است با:

$$\begin{aligned}F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}}(x)&=\frac{\Psi_{\text{DT}\to\text{DR}}}{\Psi_{r\to\text{DR}}-\Psi_{\text{DT}\to\text{DR}}}\frac{\Psi_{\text{BS}\to\text{DR}}}{\Psi_{\text{BS}\to\text{DR}}+x\Psi_{r\to\text{DR}}}e^{-\Psi_{r\to\text{DR}}x}\\&+\frac{\Psi_{r\to\text{DR}}}{\Psi_{\text{DT}\to\text{DR}}-\Psi_{r\to\text{DR}}}\frac{\Psi_{\text{BS}\to\text{DR}}}{\Psi_{\text{BS}\to\text{DR}}+x\Psi_{\text{DT}\to\text{DR}}}e^{-\Psi_{\text{DT}\to\text{DR}}x}+1\end{aligned}\qquad(۶۴\text{-}۳)$$

اثبات: با توجه به رابطه (۳-۶۲) داریم:

$$\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}=\gamma_{\text{DT}\to\text{DR}}^{1}+\gamma_{r\to\text{DR}}^{2}=\frac{P_{\text{DT}}\,|\,h_{\text{DT}\to\text{DR}}\,|^{2}+P_{r}\,|\,h_{r\to\text{DR}}\,|^{2}}{N_{0}+P_{\text{BS}}\,|\,h_{\text{BS}\to\text{DR}}\,|^{2}}=\frac{X_{r}^{'}}{1+Y^{'}}\qquad(۶۵\text{-}۳)$$

که در آن $X_{r}^{'}=X_{1}^{'}+X_{2r}^{'}$، $X_{1}^{'}=\frac{P_{\text{DT}}\,|\,h_{\text{DT}\to\text{DR}}\,|^{2}}{N_{0}}$، $X_{2r}^{'}=\frac{P_{r}\,|\,h_{r\to\text{DR}}\,|^{2}}{N_{0}}$ و $Y^{'}=\frac{P_{\text{BS}}\,|\,h_{\text{BS}\to\text{DR}}\,|^{2}}{N_{0}}$ است.

بنابراین می‌توان نوشت:

$$F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{DT}r\text{DR}}}(x)=\Pr\left(\frac{X_{r}^{'}}{1+Y^{'}}<x\right)=\int_{0}^{\infty}F_{X_{r}^{'}}(x+xy^{'})f_{Y^{'}}(y^{'})dy^{'}\qquad(۶۶\text{-}۳)$$

از آنجایی که $|h_{DT\to DR}|^2$ و $|h_{r\to DR}|^2$ متغیرهای تصادفی نمایی با پارامتر $\sigma^2_{DT\to DR}$ و $\sigma^2_{r\to DR}$ هستند، فرض می‌کنیم X_1' و X_{2r}' به ترتیب متغیرهای تصادفی نمایی با پارامتر $\Psi_{DT\to DR}=\frac{N_0\sigma^2_{DT\to DR}}{P_{DT}}$ و $\Psi_{r\to DR}=\frac{N_0\sigma^2_{r\to DR}}{P_r}$ باشند. بنابراین، روابط تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال این دو متغیر تصادفی مشابه با روابط (۳-۴۹) و (۳-۵۰) تعیین می‌شوند. با توجه به اینکه که متغیر تصادفی X_r' برابر با مجموع دو متغیر تصادفی X_1' و X_{2r}' است، تابع چگالی احتمال آن برابر با کانولوشن[1] تابع چگالی احتمال هرکدام از این دو متغیر تصادفی است [۶۳]. بنابراین می‌توان نوشت:

$$f_{X_r'}(z)=f_{X_1'}(z)*f_{X_{2r}'}(z)=\int_0^z(\Psi_{DT\to DR}e^{-\Psi_{DT\to DR}(z-t)})(\Psi_{r\to DR}e^{-\Psi_{r\to DR}t})dt$$
$$=\frac{\Psi_{DT\to DR}\Psi_{r\to DR}e^{-\Psi_{DT\to DR}z}}{\Psi_{DT\to DR}-\Psi_{r\to DR}}\left(e^{-(\Psi_{r\to DR}-\Psi_{DT\to DR})z}-1\right) \qquad (۶۷\text{-}۳)$$

با توجه به رابطه بین تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی داریم:

$$F_{X_r'}(x')=\int_0^{x'}f_{X_r'}(z)dz$$
$$=\frac{\Psi_{DT\to DR}}{\Psi_{r\to DR}-\Psi_{DT\to DR}}e^{-\Psi_{r\to DR}x'}+\frac{\Psi_{r\to DR}}{\Psi_{DT\to DR}-\Psi_{r\to DR}}e^{-\Psi_{DT\to DR}x'}+1 \qquad (۶۸\text{-}۳)$$

همچنین از آنجایی که $|h_{BS\to DR}|^2$ متغیر تصادفی نمایی با پارامتر $\sigma^2_{BS\to DR}$است، فرض می‌کنیم Y' متغیر تصادفی نمایی با پارامتر $\Psi_{BS\to DR}=\frac{N_0\sigma^2_{BS\to DR}}{P_{BS}}$ باشد. بنابراین، با جایگذاری رابطه تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی نمایی Y' یعنی $f_{Y'}(y')=\Psi_{BS\to DR}e^{-\Psi_{BS\to DR}y'}$ و رابطه (۳-۶۸) در رابطه (۳-۶۶) و محاسبه انتگرال مربوطه، رابطه (۳-۶۴) نتیجه می‌شود.

[1] Convolution

رابطه تابع توزیع تجمعی $F_{\gamma_{e2e}^{\mathrm{DTrE}}}(x)$ نیز به روشی مشابه با قضیه ۳-۳ و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{\gamma_{e2e}^{\mathrm{DTrE}}}(x)=\frac{\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}}{\Psi_{r\to\mathrm{E}}-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}}\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}}{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}+x\Psi_{r\to\mathrm{E}}}e^{-\Psi_{r\to\mathrm{E}}x}+\frac{\Psi_{r\to\mathrm{E}}}{\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}-\Psi_{r\to\mathrm{E}}}\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}}{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{E}}+x\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{E}}x}+1 \qquad (۶۹\text{-}۳)$$

بنابراین، با جایگذاری روابط (۳-۶۴) و (۳-۶۹) در رابطه (۳-۶۱)، عبارت $\Pr(\text{outage}\,|\,r^*=r)$ در رابطه (۳-۵۹) محاسبه می‌گردد.

همان‌طور که اشاره شد، محاسبه عبارت $\Pr(r^*=r)$ در رابطه (۳-۵۹)، به طرح انتخاب رله بستگی دارد که در بخش زیر، این احتمال را در طرح انتخاب رله پیشنهاد شده در این فصل محاسبه می‌کنیم.

۳-۵-۳-۲- محاسبه $\Pr(r^*=r)$ در طرح انتخاب رله پیشنهادی

انتخاب رله در این طرح مطابق با رابطه (۳-۴۳) انجام می‌شود و با توجه به مجموعه دیکدکنندگان، رله‌ای با بیشترین ضریب کانال به گیرنده وسیله به وسیله جهت ارسال اطلاعات انتخاب می‌گردد. بنابراین احتمال $\Pr(r^*=r)$ در این طرح به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Pr(r^*=r)=\Pr\Big(\bigcap_{\substack{i\in\mathcal{K}_D\\ i\neq r}}(|h_{i\to\mathrm{DR}}|^2\le|h_{\mathrm{r}\to\mathrm{DR}}|^2)\Big) \qquad (۷۰\text{-}۳)$$

با توجه به مستقل بودن و تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی نمایی $|h_{i\to\mathrm{DR}}|^2$ و $|h_{r\to\mathrm{DR}}|^2$ داریم:

$$\begin{aligned}\Pr(r^*=r)&=\int_0^\infty\Big(\prod_{\substack{i\in\mathcal{K}_D\\ i\neq r}}F_{|h_{i\to\mathrm{DR}}|^2}(y)\Big)f_{|h_{r\to\mathrm{DR}}|^2}(y)dy\\&=\int_0^\infty\Big(\prod_{\substack{i\in\mathcal{K}_D\\ i\neq r}}(1-e^{-\sigma^2_{i\to\mathrm{DR}}y})\Big)(\sigma^2_{r\to\mathrm{DR}}e^{-\sigma^2_{r\to\mathrm{DR}}y})dy\end{aligned} \qquad (۷۱\text{-}۳)$$

لم ۳-۱: با استفاده از قضیه بسط دوجمله‌ای[1] رابطه زیر برقرار است [۶۳]:

$$\prod_{\substack{i\in\mathcal{K}_D \\ i\neq r}}(1-e^{-\Delta_i y})=1+\sum_{n=1}^{2^{|Z_r|}-1}(-1)^{|S_r(n)|}e^{-(\sum_{i\in S_r(n)}\Delta_i)y} \qquad (۷۲-۳)$$

که در آن Z_r مجموعه تمام رله‌های متعلق به $\mathcal{K}_D$ به غیر از رله r و $S_r(n)$ برابر با n امین زیرمجموعه غیر تهی مجموعه Z_r است.

با استفاده از لم ۳-۱ در رابطه (۳-۷۱) می‌توان نوشت:

$$\Pr(r^*=r)=\int_0^\infty\left(1+\sum_{n=1}^{2^{|Z_r|}-1}(-1)^{|S_r(n)|}e^{-(\sum_{i\in S_r(n)}\sigma^2_{i\to DR})y}\right)(\sigma^2_{r\to DR}e^{-\sigma^2_{r\to DR}y})dy \qquad (۷۳-۳)$$

بنابراین با حل انتگرال فوق، عبارت $\Pr(r^*=r)$ در رابطه (۳-۵۹) در حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Pr(r^*=r)=1+\sum_{n=1}^{2^{|Z_r|}-1}(-1)^{|S_r(n)|}\sigma^2_{r\to DR}\left(\frac{1}{\sum_{i\in S_r(n)}\sigma^2_{i\to DR}+\sigma^2_{r\to DR}}\right) \qquad (۷۴-۳)$$

بنابراین، با جایگذاری روابط محاسبه شده در بخش‌های ۳-۵-۱، ۳-۵-۲ و ۳-۵-۳ در رابطه (۳-۴۲)، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حضور شنودگر به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه می‌گردد.

۳-۶- بازده امنیتی

بازده امنیتی، یکی از معیارهای امنیتی شبکه است که بر مبنای احتمال قطع امنیتی و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۴۵]:

[1] Binomial expansion theorem

$$\tau_{\text{secrecy}} = \frac{R^{SD}}{2}(1-P_{\text{out}}) \qquad (۷۵-۳)$$

که در آن ضریب $\frac{1}{2}$ به این دلیل است که ارسال سیگنال با استفاده از طرح مشارکتی در طول دو بازه زمانی انجام می‌شود. بنابراین، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حضور شنودگر و با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی، با جایگذاری روابط مربوطه در رابطه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله (۳-۴۲) به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه می‌گردد.

۳-۷- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد احتمال قطع و بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را در حالت ارتباطات مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی برحسب پارامترهای گوناگون شبکه بررسی و با حالت غیر مشارکتی مقایسه می‌کنیم.

حالت غیر مشارکتی به حالتی گفته می‌شود که ارسال اطلاعات تنها از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله انجام گیرد و هیچ رله‌ای در شبکه حضور نداشته باشد. در شبیه‌سازی‌ها، حالت غیر مشارکتی را صرفاً جهت مقایسه با طرح مشارکتی پیشنهادی در این فصل و به‌منظور نشان دادن کارایی طرح مشارکتی پیشنهادی در عملکرد امنیتی شبکه در نظر می‌گیریم که عبارت احتمال قطع امنیتی در حالت غیر مشارکتی به‌صورت رابطه (۳-۵۸) تعیین می‌گردد.

۳-۷-۱- بررسی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نرخ ارسال امن اطلاعات

در این بخش، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و ارسال مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی را مقایسه و اثر افزایش نرخ ارسال امن اطلاعات و تعداد

رله‌ها در شبکه را بر عملکرد قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳-۳ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$\sigma^2_{\mathrm{BS-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-DR}} = 1, \sigma^2_{\mathrm{BS-E}} = \sigma^2_{\mathrm{BS-DR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{BS}-r} = 3, \sigma^2_{\mathrm{DT-E}} = \sigma^2_{r-\mathrm{E}} = 4,$$
$$\sigma^2_{r-\mathrm{CR}} = 3.1, \sigma^2_{r-\mathrm{DR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT}-r} = 0.5, \overline{P}^{C}_{\mathrm{out}} = 0.7, \delta_{\mathrm{BS}} = 25\mathrm{dB}, R^P = 1.5\mathrm{bpcu}, R^e = 2\mathrm{bpcu}$$

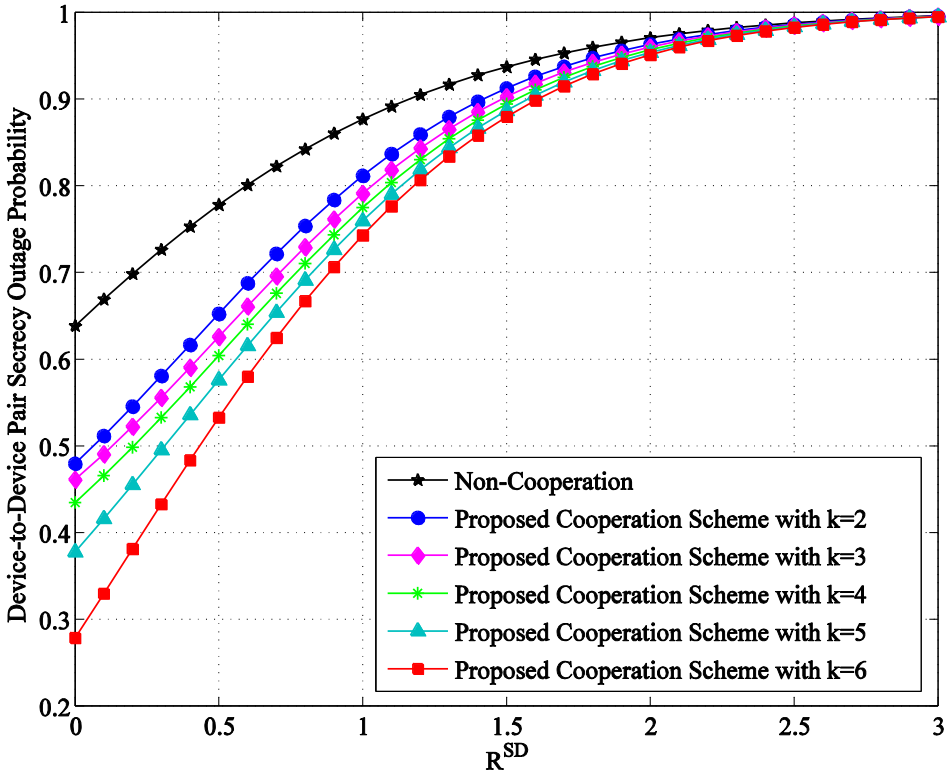
همچنین در این شبیه‌سازی، در هر نقطه از نمودار مقدار نرخ داده ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از رابطه $R^D = R^{SD} + R^e$ تعیین می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ ارسال امن اطلاعات، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو حالت غیر مشارکتی و مشارکتی افزایش می‌یابد و در مقادیر زیاد نرخ ارسال امن اطلاعات شبکه به مقدار یک میل می‌کند.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی نسبت به حالت ارتباط غیر مشارکتی، به دلیل ایجاد چندگانگی در گیرنده کاهش یافته است و بنابراین با استفاده از طرح مشارکتی پیشنهادی، امنیت ارسال اطلاعات شبکه در حضور شنودگر بهبود می‌یابد.

بعلاوه، با افزایش تعداد رله‌ها در طرح انتخاب رله پیشنهادی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله به دلیل افزایش چندگانگی و افزایش ظرفیت لینک داده[1] در شبکه کاهش و امنیت ارسال اطلاعات افزایش می‌یابد.

[1] Data link



شکل ۳-۳: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی به ازای تعداد رله‌های مختلف برحسب نرخ ارسال امن اطلاعات

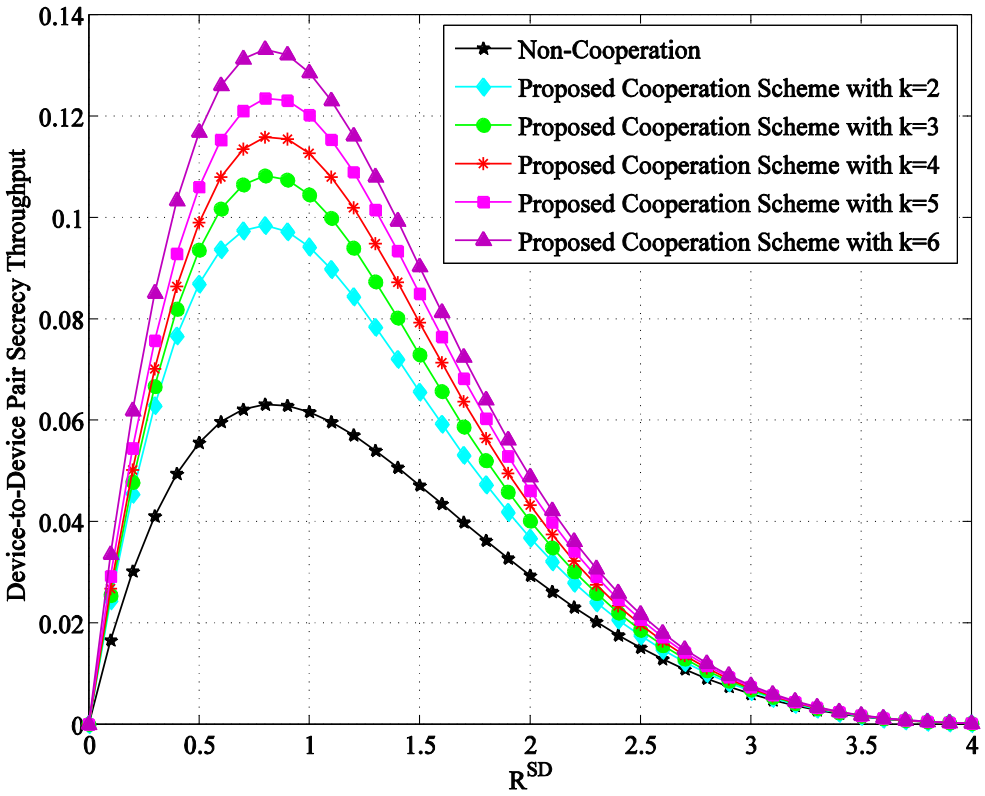
۳-۷-۲- بررسی بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نرخ ارسال امن اطلاعات

در این شبیه‌سازی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و ارسال مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی را مقایسه و اثر افزایش نرخ ارسال امن اطلاعات و تعداد رله‌ها در شبکه را بر عملکرد بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳-۴ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه مطابق با شبیه‌سازی قبلی انتخاب شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ ارسال امن اطلاعات، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو حالت غیر مشارکتی و مشارکتی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با توجه به رابطه (۳-۷۵)، عبارت بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله

تابعی از حاصلضرب دو عبارت است که با افزایش R^{SD}، عبارت اول (R^{SD}) افزایش و عبارت دوم ($1-P_{out}$) کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش R^{SD} در شکل ۳-۴، عبارت بازده امنیتی از مقدار صفر تا یک مقداری افزایش و از آن به بعد تا مقدار صفر کاهش می‌یابد.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بازده امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی نسبت به حالت ارتباط غیر مشارکتی افزایش یافته است و بنابراین با استفاده از طرح مشارکتی پیشنهادی، امنیت ارسال اطلاعات شبکه در حضور شنودگر بهبود می‌یابد. بعلاوه، با افزایش تعداد رله‌ها در طرح انتخاب رله پیشنهادی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۴: مقایسه بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی به ازای تعداد رله‌های مختلف برحسب نرخ ارسال امن اطلاعات

۳-۷-۳- بررسی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نرخ ابهام شنودگر

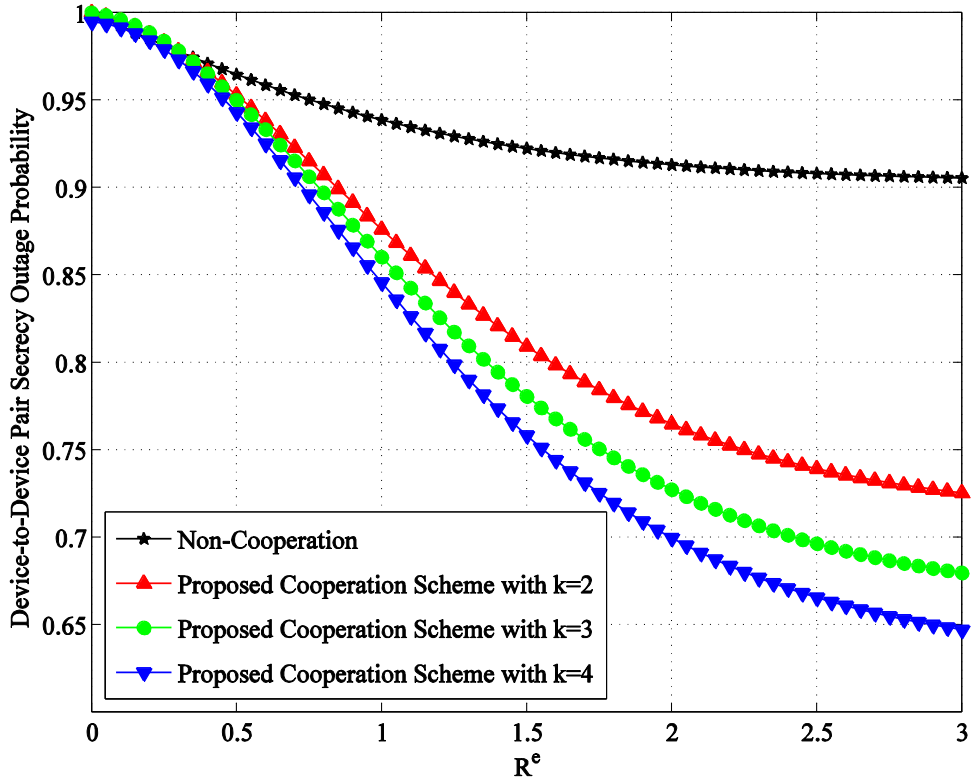
در این شبیه‌سازی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و ارسال مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی را مقایسه و اثر افزایش نرخ ابهام شنودگر و تعداد رله‌ها در شبکه را بر عملکرد قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳-۵ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$\sigma^2_{\mathrm{BS-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-DR}} = 1, \sigma^2_{\mathrm{BS-E}} = \sigma^2_{\mathrm{BS-DR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{BS-}r} = 3, \sigma^2_{\mathrm{DT-E}} = \sigma^2_{r-\mathrm{E}} = 4,$$
$$\sigma^2_{r-\mathrm{CR}} = 3.1, \sigma^2_{r-\mathrm{DR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-}r} = 0.2, \overline{P}^{C}_{\mathrm{out}} = 0.7, \delta_{\mathrm{BS}} = 30\mathrm{dB}, R^P = 2\mathrm{bpcu}, R^D = 3\mathrm{bpcu}$$

همان‌طور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، زمانی که مقدار نرخ ابهام شنودگر صفر است، احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله به بیشترین مقدار خود می‌رسد و برابر با مقدار یک می‌گردد و شنودگر قادر به کشف تمامی سیگنال‌های ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله خواهد بود. همچنین با افزایش نرخ ابهام شنودگر، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو حالت غیر مشارکتی و مشارکتی کاهش می‌یابد.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی نسبت به حالت ارتباط غیر مشارکتی، به دلیل ایجاد چندگانگی در گیرنده کاهش یافته است.

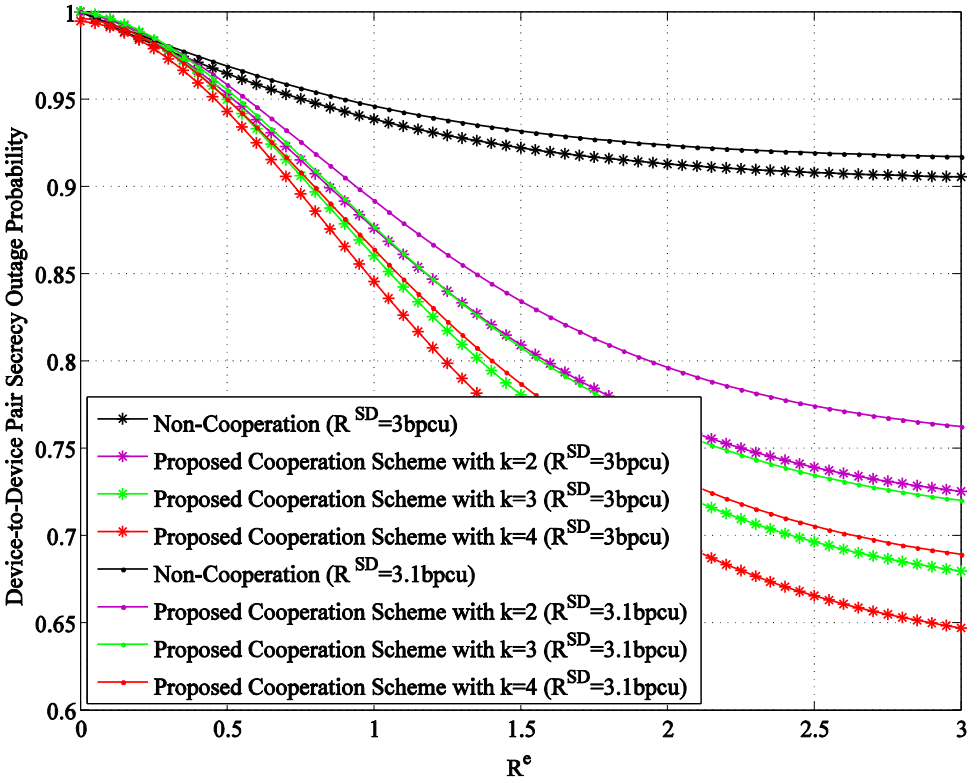
بعلاوه، با افزایش تعداد رله‌ها در طرح انتخاب رله پیشنهادی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله کاهش و امنیت ارسال اطلاعات در حضور شنودگر افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۵: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی به ازای تعداد رله‌های مختلف برحسب نرخ ابهام شنودگر

احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و ارسال مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی به ازای تغییر مقدار نرخ ارسال امن اطلاعات و تعداد رله‌ها در شبکه، برحسب نرخ ابهام شنودگر در شکل ۳-۶ بررسی شده است.

همانطور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود و با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۳-۷-۲، با افزایش نرخ ارسال امن اطلاعات در شبکه، احتمالات قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۶: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی به ازای تغییر مقدار نرخ ارسال امن اطلاعات و تعداد رله‌های مختلف برحسب نرخ ابهام شنودگر

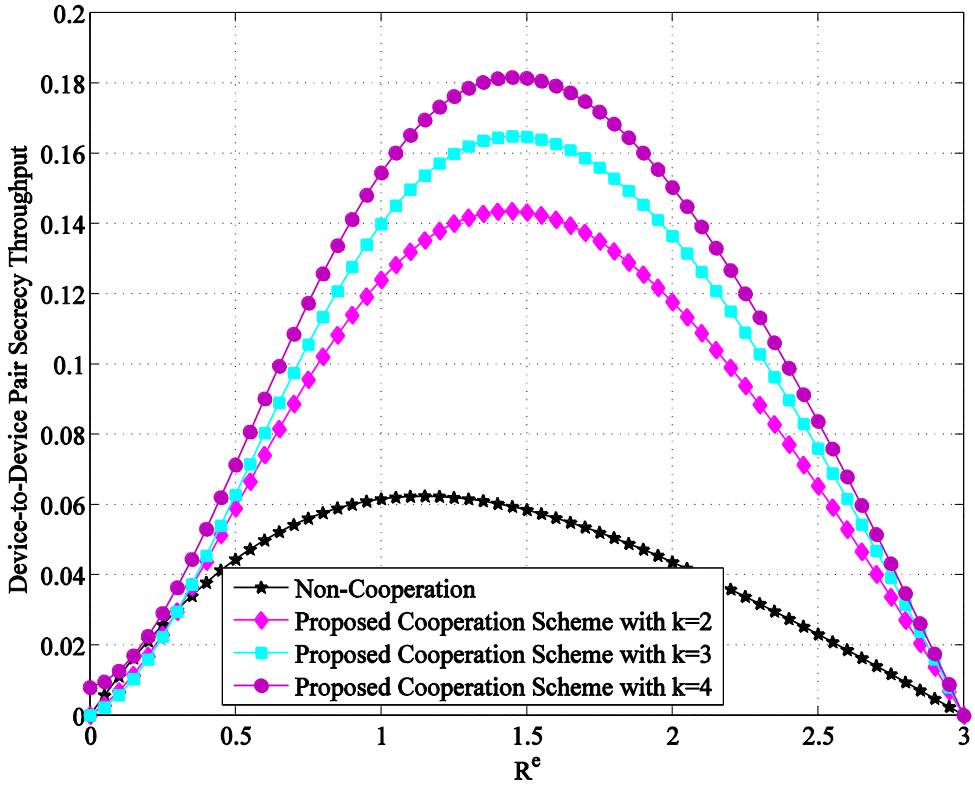
۳-۷-۴- بررسی بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نرخ ابهام شنودگر

در این شبیه‌سازی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و ارسال مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی را مقایسه و اثر افزایش نرخ ابهام شنودگر و تعداد رله‌ها در شبکه را بر عملکرد بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳-۷ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه مطابق با شبیه‌سازی قبلی انتخاب شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ ابهام شنودگر، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو حالت غیر مشارکتی و مشارکتی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این

امر به این دلیل است که با توجه به رابطه $R^{SD} = R^D - R^e$ و ثابت بودن مقدار نرخ داده ارسالی R^D، با افزایش نرخ ابهام شنودگر مقدار R^{SD} کاهش می‌یابد. با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۳-۷-۲، عبارت بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله بیان شده در رابطه (۳-۷۵)، تابعی از حاصل‌ضرب دو عبارت است که با افزایش R^e، عبارت اول (R^{SD}) کاهش و عبارت دوم ($1-P_{\text{out}}$) افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش نرخ ابهام شنودگر در شکل ۳-۷، عبارت بازده امنیتی از مقدار صفر تا یک مقداری افزایش و از آن به بعد تا مقدار صفر کاهش می‌یابد.

همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بازده امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی نسبت به حالت ارتباط غیر مشارکتی افزایش یافته است و بنابراین با استفاده از طرح مشارکتی پیشنهادی، امنیت ارسال اطلاعات شبکه در حضور شنودگر بهبود می‌یابد. بعلاوه، با افزایش تعداد رله‌ها در طرح انتخاب رله پیشنهادی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۷: مقایسه بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی به ازای تعداد رله‌های مختلف برحسب نرخ ابهام شنودگر

۳-۷-۵- بررسی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب افزایش تعداد رله‌ها در شبکه

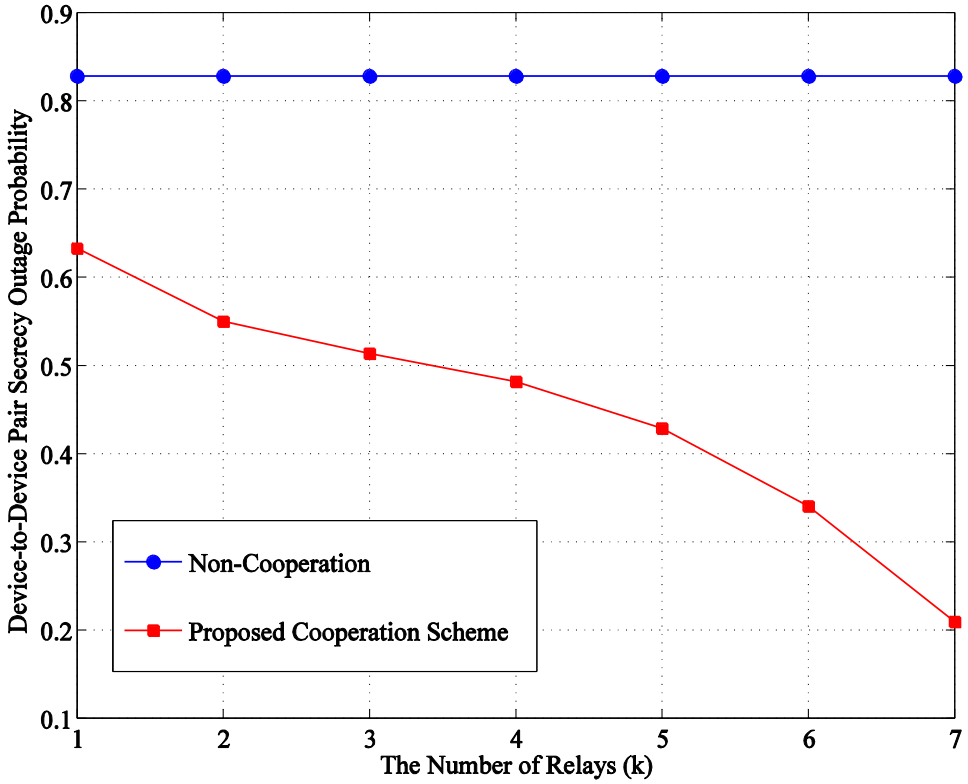
در این بخش، اثر افزایش تعداد رله‌های شبکه بر احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و ارسال مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی را بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳-۸ نشان داده شده است که در آن تعداد رله‌ها از $k=1$ تا $k=7$ افزایش یافته است و پارامترهای شبکه به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$\sigma^2_{\mathrm{BS-CR}}=\sigma^2_{\mathrm{DT-DR}}=0.5,\sigma^2_{\mathrm{BS-E}}=\sigma^2_{\mathrm{BS-DR}}=\sigma^2_{\mathrm{DT-CR}}=\sigma^2_{\mathrm{BS-}r}=4,\sigma^2_{\mathrm{DT-E}}=\sigma^2_{r-\mathrm{E}}=5,\sigma^2_{r-\mathrm{CR}}=4.1,$$
$$\sigma^2_{r-\mathrm{DR}}=0.1,\sigma^2_{\mathrm{DT-}r}=0.1,\overline{P}^{C}_{\mathrm{out}}=0.1,\delta_{\mathrm{BS}}=30\mathrm{dB},R^P=1.5\mathrm{bpcu},R^D=2\mathrm{bpcu},R^e=1\mathrm{bpcu}$$

با توجه به شکل ۳-۸ مشاهده می‌شود که احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی نسبت به حالت غیر مشارکتی کاهش یافته است.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش تعداد رله‌ها در شبکه، احتمال قطع امنیتی در حالت غیر مشارکتی تغییری نمی‌کند. این امر به این دلیل است که در طرح غیر مشارکتی از هیچ رله‌ای جهت ارسال سیگنال استفاده نمی‌گردد و بنابراین در این حالت افزایش تعداد رله‌ها تأثیری بر احتمال قطع امنیتی شبکه نخواهد داشت.

بعلاوه با افزایش تعداد رله‌ها، به دلیل افزایش چندگانگی در شبکه و افزایش ظرفیت لینک داده، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب رله پیشنهادی کاهش و امنیت ارسال اطلاعات در شبکه در حضور شنودگر افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۸: اثر افزایش تعداد رله‌ها در شبکه بر عملکرد احتمال قطع امنیتی حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی

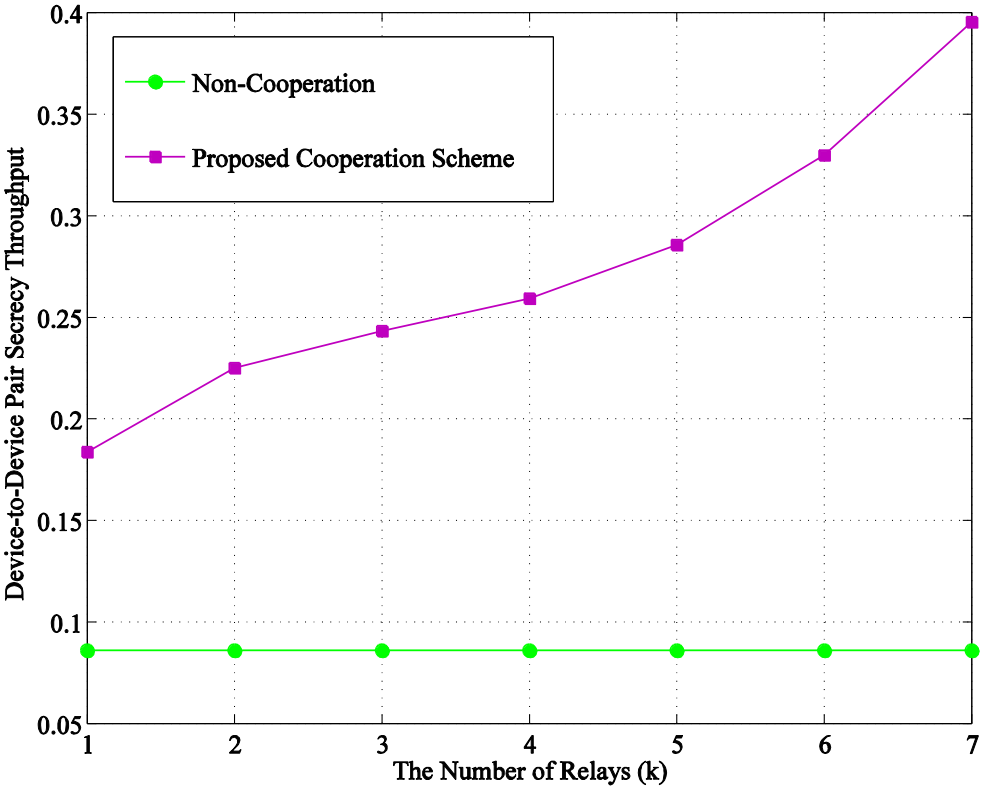
۳-۷-۶- بررسی بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب تعداد رله‌ها در شبکه

در این بخش، اثر افزایش تعداد رله‌های شبکه بر بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و ارسال مشارکتی از طریق طرح انتخاب رله پیشنهادی را بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است که در آن تعداد رله‌ها از $k=1$ تا $k=7$ افزایش یافته است و پارامترهای شبکه مطابق با شبیه‌سازی قبلی انتخاب شده‌اند.

با توجه به شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود که بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی نسبت به حالت غیر مشارکتی افزایش یافته است.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش تعداد رله‌ها در شبکه، بازده امنیتی در حالت غیر مشارکتی تغییری نمی‌کند. بعلاوه با افزایش تعداد رله‌ها در شبکه، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به

وسیله در طرح انتخاب رله پیشنهادی و امنیت ارسال اطلاعات در شبکه در حضور شنودگر افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که در طرح مشارکتی پیشنهادی، با افزایش تعداد رله‌ها احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله کاهش و با توجه به عبارت بازده امنیتی بیان شده در رابطه (۳-۷۵) که تابعی از مقدار $1-P_{\text{out}}$ است، مقدار بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۹: اثر افزایش تعداد رله‌ها در شبکه بر عملکرد بازده امنیتی حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی

۳-۸- نتیجه‌گیری

در این فصل، یک طرح مشارکتی جهت برقراری امنیت شبکه در ارتباطات وسیله به وسیله که به‌صورت زمینه‌ای در شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌کند را پیشنهاد کردیم. در مدل سیستمی پیشنهادی، در شبکه سلولی ایستگاه پایه اطلاعاتش را از طریق کانال مستقیم به گیرنده شبکه سلولی ارسال می‌کند و در ارتباطات وسیله به وسیله فرستنده و گیرنده علاوه بر کانال مستقیم با استفاده از چندین رله دیکد و ارسال بر روی طیف استفاده شده توسط شبکه سلولی ارتباط برقرار می‌کنند. بعلاوه،

یک شنودگر در شبکه حضور دارد که سعی در شنود سیگنال ارسالی توسط فرستنده‌ها در ارتباطات وسیله به وسیله را دارد.

در این فصل، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها را به‌گونه‌ای محدود کردیم که احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی از یک مقدار آستانه بیشتر نگردد و بنابراین کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. همچنین طرح انتخاب رله بر مبنای ضرایب کانال رله‌ها به گیرنده وسیله به وسیله را پیشنهاد کردیم که بر اساس این طرح رله‌ای با بیشترین ضریب کانال رله به گیرنده جهت ارسال سیگنال فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله انتخاب می‌گردد. بعلاوه، از آنجایی که گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر سیگنال را از طریق کانال مستقیم و رله دریافت می‌کنند و به دلیل ایجاد چندگانگی، از طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت در گیرنده ارتباطات وسیله به وسیله و شنودگر استفاده و درنهایت عملکرد طرح مشارکتی پیشنهادی را برمبنای احتمال قطع امنیتی بررسی و احتمال قطع امنیتی در طرح انتخاب رله پیشنهادی را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه کردیم. همچنین، عبارت بازده امنیتی بر اساس احتمال قطع امنیتی شبکه بیان شده است.

در پایان این فصل، عملکرد قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در حالت غیر مشارکتی و حالت مشارکتی با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی را برحسب تغییرات پارامترهای گوناگون شبکه شبیه‌سازی کردیم که نتایج شبیه‌سازی بیانگر بهبود عملکرد قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح مشارکتی پیشنهادی و افزایش امنیت شبکه در حضور شنودگر است.

فصل چهارم:

برقراری امنیت ارسال اطلاعات در حضور رله غیرقابل اطمینان

۴-۱- مقدمه

در این فصل انتخاب لینک بر اساس طرح‌های ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را در ارتباطات وسیله به وسیله‌ای که با استفاده از یک رله غیرقابل اطمینان تقویت و ارسال به‌صورت زمینه‌ای در شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌کند، مطالعه می‌کنیم.

در این فصل، ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله را بر اساس حالت استفاده مجدد در نظر می‌گیریم و توان‌های ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله را جهت حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی محدود می‌کنیم.

به‌منظور گسترش محدوده ارتباطات وسیله به وسیله، علاوه بر ارسال سیگنال از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده، ارسال از طریق یک رله را پیشنهاد می‌کنیم. از آنجایی که رله یکی از کاربران شبکه است که به ارسال اطلاعات بین فرستنده و گیرنده کمک می‌کند، ممکن است اجازه دسترسی به سیگنال ارسالی توسط فرستنده را نداشته و به‌عنوان شنودگر در شبکه عمل نماید. بنابراین، در این فصل فرض می‌کنیم رله غیرقابل اطمینان است و قادر به کشف سیگنال دریافتی از فرستنده وسیله به وسیله است و از آنجایی که رله غیرقابل اطمینان اجازه دیکد کردن سیگنال دریافتی از فرستنده وسیله به وسیله را ندارد، از رله تقویت و ارسال جهت ارسال اطلاعات از فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله استفاده می‌کنیم. بنابراین، در این حالت برقراری امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان یکی از مسائل چالش‌برانگیز است.

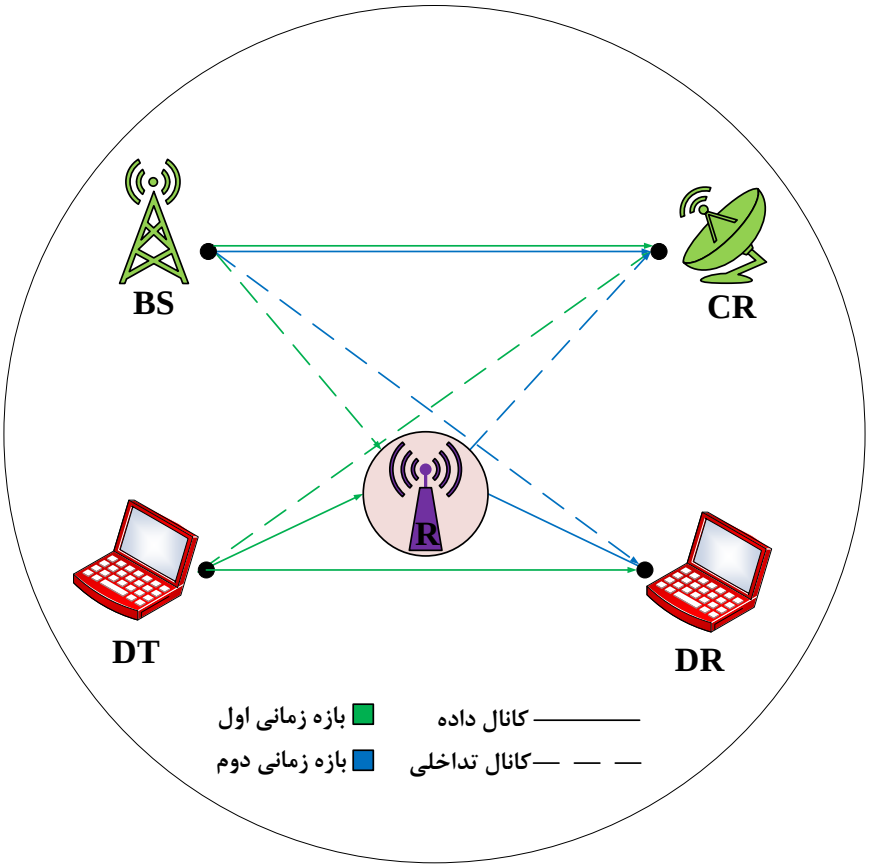
از آنجایی که گیرنده وسیله به وسیله در طول دو بازه زمانی سیگنال را از طریق کانال مستقیم و کانال رله دریافت می‌کند و به دلیل وجود چندگانگی، در این فصل، دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله را پیشنهاد و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را در این دو طرح محاسبه می‌کنیم. با توجه به در نظر گرفتن توأم اثرات تداخل، کانال

مستقیم، ارتباطات مشارکتی و مسائل امنیتی در حضور رله غیرقابل اطمینان در مدل سیستمی پیشنهادی، محاسبه توابع توزیع تجمعی و توابع چگالی احتمال متغیرهای شبکه و درنتیجه محاسبه رابطه احتمال قطع امنیتی چالش‌برانگیز است که در این فصل توانستیم با استفاده از روش‌هایی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه کنیم.

۴-۲- مدل سیستمی و بیان مسئله

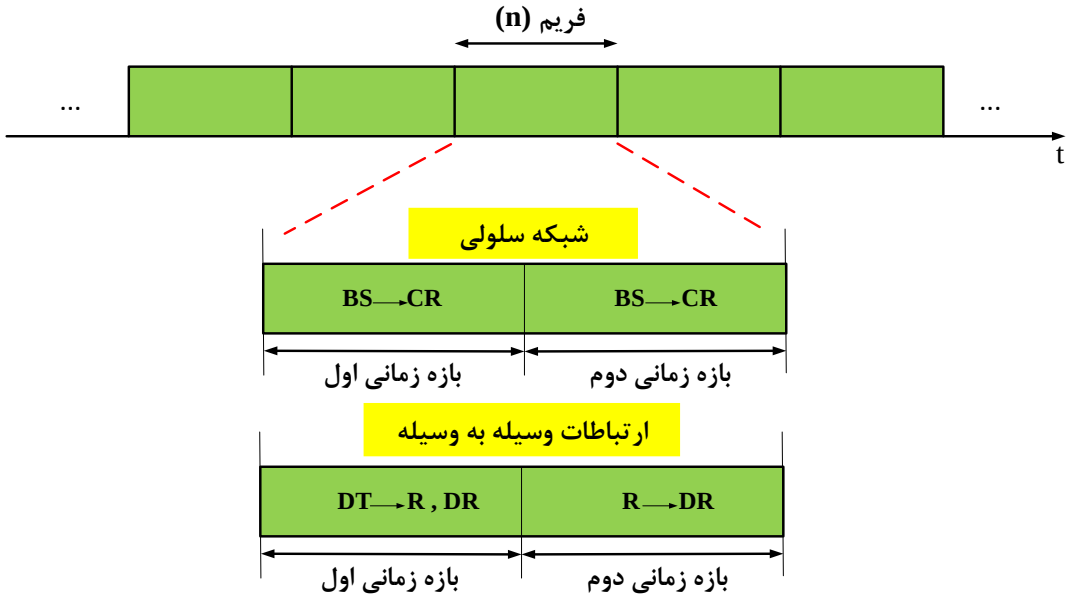
یک مدل سیستمی شامل ارتباطات وسیله به وسیله که به‌صورت زمینه‌ای در شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌کند را در نظر می‌گیریم که به دلیل استفاده از طیف فرکانسی مشترک، دارای تداخل متقابل بر یکدیگر هستند. شبکه سلولی شامل ایستگاه پایه و گیرنده شبکه سلولی و ارتباطات وسیله به وسیله شامل فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله است. ارسال سیگنال از ایستگاه پایه به گیرنده شبکه سلولی تنها از طریق کانال مستقیم و ارسال سیگنال از فرستنده به گیرنده وسیله به وسیله علاوه بر کانال مستقیم از طریق یک رله صورت می‌گیرد. همچنین همانند فصل قبل فرض می‌کنیم ایستگاه پایه، گیرنده سلولی، فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله و رله هرکدام مجهز به یک آنتن هستند.

از آنجایی که رله یکی از کاربران شبکه است که به ارسال سیگنال کمک می‌کند، ممکن است این کاربر اجازه دسترسی به سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله را نداشته باشد. در این صورت رله به‌صورت یک شنودگر در شبکه عمل می‌کند که به آن رله غیرقابل اطمینان گویند. بنابراین، در این مدل سیستمی فرض می‌کنیم رله غیرقابل اطمینان است و اجازه دیکد کردن سیگنال دریافتی از فرستنده وسیله به وسیله را ندارد. درنتیجه، از رله تقویت و ارسال جهت ارسال اطلاعات استفاده می‌کنیم. مدل سیستمی مشارکتی پیشنهادی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است که در آن BS، CR، DT، DR و R به ترتیب بیانگر ایستگاه پایه، گیرنده شبکه سلولی، فرستنده وسیله به وسیله، گیرنده وسیله به وسیله و رله تقویت و ارسال هستند.



شکل ۴-۱: مدل سیستمی مشارکتی پیشنهادی با استفاده از رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان

فرآیند ارسال سیگنال در طرح مشارکتی پیشنهادی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است که در آن هر فریم ارسال سیگنال به دو بازه زمانی تقسیم می‌شود. در شبکه سلولی، در هر دو بازه زمانی اطلاعات از ایستگاه پایه به گیرنده شبکه سلولی ارسال می‌شود. در ارتباطات وسیله به وسیله، در بازه زمانی اول فرستنده وسیله به وسیله اطلاعات را ارسال می‌کند و گیرنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان آن را دریافت می‌کنند. در بازه زمانی دوم، رله غیرقابل اطمینان سیگنال دریافتی از فرستنده وسیله به وسیله را تقویت و به گیرنده وسیله به وسیله ارسال می‌کند. همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، در این پایان‌نامه فرض می‌کنیم فرستنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم و در زمان ارسال سیگنال توسط رله غیرقابل اطمینان هیچ‌گونه اطلاعاتی را ارسال نمی‌کند.



شکل ۴-۲: فرآیند ارسال سیگنال در طرح مشارکتی پیشنهادی

به‌دلیل دریافت سیگنال از طریق کانال مستقیم و رله و ایجاد چندگانگی در گیرنده وسیله به وسیله، در این فصل فرض می‌کنیم گیرنده وسیله به وسیله از طرح‌های انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برای سیگنال‌های دریافت شده در طول دو بازه زمانی استفاده می‌کند که در ادامه هرکدام از این دو طرح را معرفی می‌کنیم.

۴-۳- پارامترهای شبکه

مانند فصل قبل، فرض می‌کنیم کانال‌ها مستقل و دارای توزیع یکسان بوده و $h_{a\to b}$ بیانگر ضریب کانال بین گره‌های $a\in\{\mathrm{BS},\mathrm{DT},\mathrm{R}\}$ و $b\in\{\mathrm{CR},\mathrm{DR},\mathrm{R}\}$ است. همچنین در این فصل نیز فرض می‌کنیم تمام کانال‌ها دارای محوشوندگی رایلی هستند. در این صورت ضرایب کانال‌ها دارای توزیع نمایی با پارامتر $\sigma^2_{a\to b}$ است و به‌صورت رابطه (۳-۲) تعیین می‌شوند که در طول هر فریم ثابت می‌مانند و به‌صورت مستقل از یک فریم به فریم دیگر تغییر می‌کنند.

در شبکه سلولی، در بازه‌های زمانی اول و دوم ایستگاه پایه به ترتیب سمبل x_C^1 و x_C^2 را با توان ثابت P_{BS} به گیرنده شبکه سلولی ارسال می‌کند و در ارتباطات وسیله به وسیله، در بازه زمانی اول فرستنده

وسیله به وسیله سمبل x_D را با توان ثابت P_{DT} و در بازه زمانی دوم رله غیرقابل اطمینان سمبل x_{R} را با توان ثابت P_{R} ارسال می‌کند.

بنابراین، سیگنال‌های دریافتی در گیرنده شبکه سلولی، در دو بازه زمانی برابر است با:

$$y_{\mathrm{CR}}^{1} = \sqrt{P_{\mathrm{BS}}}h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}x_{\mathrm{C}}^{1} + \sqrt{P_{\mathrm{DT}}}h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}}x_{D} + n_{\mathrm{CR}}^{1} \qquad (۱-۴)$$

$$y_{\mathrm{CR}}^{2} = \sqrt{P_{\mathrm{BS}}}h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}x_{\mathrm{C}}^{2} + \sqrt{P_{\mathrm{R}}}h_{\mathrm{R}\to\mathrm{CR}}x_{\mathrm{R}} + n_{\mathrm{CR}}^{2} \qquad (۲-۴)$$

که در آن همانند فصل قبل، n_{CR}^{1} و n_{CR}^{2} به‌ترتیب بیانگر نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده شبکه سلولی در بازه زمانی اول و دوم، با میانگین صفر و چگالی طیفی توان N_0 و دارای توزیع به‌صورت $n_{\mathrm{CR}}^{1} \sim CN(0,N_0)$ و $n_{\mathrm{CR}}^{2} \sim CN(0,N_0)$ هستند. نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده شبکه سلولی به ترتیب در بازه‌های زمانی اول و دوم به‌صورت زیر است:

$$\gamma_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{1} = \frac{P_{\mathrm{BS}} \mid h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}}{N_0 + P_{\mathrm{DT}} \mid h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}} \qquad (۳-۴)$$

$$\gamma_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{2} = \frac{P_{\mathrm{BS}} \mid h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}}{N_0 + P_{\mathrm{R}} \mid h_{\mathrm{R}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}} \qquad (۴-۴)$$

بنابراین، ظرفیت کانال بین ایستگاه پایه و گیرنده شبکه سلولی به ترتیب در بازه‌های زمانی اول و دوم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{1} = \log_2\left(1 + \frac{P_{\mathrm{BS}} \mid h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}}{N_0 + P_{\mathrm{DT}} \mid h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}}\right) \qquad (۵-۴)$$

$$C_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}^{2} = \log_2\left(1 + \frac{P_{\mathrm{BS}} \mid h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}}{N_0 + P_{\mathrm{R}} \mid h_{\mathrm{R}\to\mathrm{CR}} \mid^{2}}\right) \qquad (۶-۴)$$

در ارتباطات وسیله به وسیله همان‌طور که بیان شد، در بازه زمانی اول فرستنده وسیله به وسیله سمبل x_D را با توان ثابت P_{DT} ارسال و گیرنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان آن را دریافت می‌کنند. سیگنال‌های دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله و رله در بازه زمانی اول برابر است با:

$$y_{\mathrm{DR}}^{1} = \sqrt{P_{\mathrm{DT}}} h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}} x_D + \sqrt{P_{\mathrm{BS}}} h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}} x_C^{1} + n_{\mathrm{DR}}^{1} \qquad (۷-۴)$$

$$y_{\mathrm{R}}^{1} = \sqrt{P_{\mathrm{DT}}} h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}} x_D + \sqrt{P_{\mathrm{BS}}} h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{R}} x_C^{1} + n_{\mathrm{R}} \qquad (۸-۴)$$

که در آن n_{DR}^{1} و n_{R} به ترتیب بیانگر نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان در بازه زمانی اول با میانگین صفر و چگالی طیفی توان N_0 و دارای توزیع به‌صورت $n_{\mathrm{DR}}^{1} \sim CN(0, N_0)$ و $n_{\mathrm{R}} \sim CN(0, N_0)$ هستند. نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله و رله در بازه زمانی اول به‌صورت زیر است:

$$\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}^{1} = \frac{P_{\mathrm{DT}} \left| h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}} \right|^2}{N_0 + P_{\mathrm{BS}} \left| h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}} \right|^2} \qquad (۹-۴)$$

$$\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}^{1} = \frac{P_{\mathrm{DT}} \left| h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}} \right|^2}{N_0 + P_{\mathrm{BS}} \left| h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{R}} \right|^2} \qquad (۱۰-۴)$$

بنابراین در ارتباطات وسیله به وسیله، ظرفیت کانال بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله و فرستنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان در بازه زمانی اول به ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}^{1} = \frac{1}{2}\log_2\left(1 + \frac{P_{\mathrm{DT}} \left| h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}} \right|^2}{N_0 + P_{\mathrm{BS}} \left| h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}} \right|^2}\right) \qquad (۱۱-۴)$$

$$C_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}^{1} = \frac{1}{2}\log_2\left(1 + \frac{P_{\mathrm{DT}} \left| h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}} \right|^2}{N_0 + P_{\mathrm{BS}} \left| h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{R}} \right|^2}\right) \qquad (۱۲-۴)$$

که در آن ضریب $\frac{1}{2}$ به این دلیل است که در ارتباطات مشارکتی از طریق رله، هر فریم ارسال سیگنال شامل دو بازه زمانی است و در ارسال سیگنال از فرستنده وسیله به وسیله به گیرنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان، یک بازه زمانی طی می‌شود.

در بازه زمانی دوم، رله غیرقابل اطمینان سیگنال دریافتی از فرستنده وسیله به وسیله را با بهره[1] $G=\sqrt{\frac{1}{P_{DT}|h_{DT\to R}|^2+P_{BS}|h_{BS\to R}|^2+1}}$ تقویت می‌کند و سمبل $x_R=Gy_R^1$ را با توان ثابت P_R ارسال و گیرنده وسیله به وسیله آن را دریافت می‌کند. سیگنال دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم برابر است با:

$$y_{DR}^2=\sqrt{P_R}h_{R\to DR}x_R+\sqrt{P_{BS}}h_{BS\to DR}x_C^2+n_{DR}^2 \qquad (۱۳-۴)$$

که در آن n_{DR}^2 بیانگر نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم با میانگین صفر و چگالی طیفی توان N_0 و دارای توزیع به‌صورت $n_{DR}^2 \sim CN(0,N_0)$ است. بنابراین، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله در بازه زمانی دوم به‌صورت زیر است:

$$\gamma_{R\to DR}^2=\frac{P_R|h_{R\to DR}|^2}{N_0+P_{BS}|h_{BS\to DR}|^2} \qquad (۱۴-۴)$$

با توجه به رابطه (۲-۱۴)، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله از طریق کانال رله تقویت و ارسال در طول دو بازه زمانی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{DTRDR}=\frac{\gamma_{DT\to R}^1\gamma_{R\to DR}^2}{1+\gamma_{DT\to R}^1+\gamma_{R\to DR}^2} \qquad (۱۵-۴)$$

به دلیل در نظر گرفتن اثرات توأم تداخل، کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله، ارتباطات مشارکتی و مسائل امنیتی در حضور رله غیرقابل اطمینان در مدل سیستمی پیشنهادی این

[1] Gain

فصل، روابط نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در شبکه و درنتیجه انجام محاسبات احتمال قطع امنیتی با استفاده از رابطه (۴-۱۵) چالش‌برانگیز است. با توجه به مطالعات انجام شده، جهت بررسی عملکرد شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم با استفاده از رله تقویت و ارسال، از نامساوی زیر استفاده می‌شود [۶۶]:

$$\frac{s_1 s_2}{s_1 + s_2 + 1} < \frac{s_1 s_2}{s_1 + s_2} < \min[s_1, s_2] \qquad (۱۶-۴)$$

بنابراین با استفاده از نامساوی فوق، مقدار حد بالا[1] رابطه (۴-۱۵) برابر است با [۶۶-۶۸]:

$$\gamma_{\mathrm{DTRDR}} \le \min(\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}, \gamma^2_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}) \qquad (۱۷-۴)$$

مقدار حد بالای نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله از طریق رله تقویت و ارسال در عبارت فوق را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\hat{\gamma}_{\mathrm{DTRDR}} = \min(\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}, \gamma^2_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}) \qquad (۱۸-۴)$$

با توجه به ارسال یک سیگنال مشترک در طول دو بازه زمانی از طریق کانال مستقیم و کانال رله و به دلیل ایجاد چندگانگی در گیرنده وسیله به وسیله، در این فصل دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله را پیشنهاد می‌کنیم. بنابراین، ظرفیت دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله در طول دو بازه زمانی که در آن ارسال اطلاعات از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله و کانال رله تقویت و ارسال R انجام می‌شود، به ترتیب با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برابر است با:

$$C^{\mathrm{DTDR}}_{\mathrm{R,SC}} = \frac{1}{2}\log_2\left(1+\gamma^{\mathrm{SC}}_{\mathrm{e2e}}\right) \qquad (۱۹-۴)$$

[1] Upper bound

$$C_{\mathrm{R,SSC}}^{\mathrm{DTDR}} = \frac{1}{2}\log_2\left(1+\gamma_{\mathrm{e2e}}^{\mathrm{SSC}}\right) \qquad (۲۰-۴)$$

که در آن ضریب $\frac{1}{2}$ به دلیل ارسال یک سیگنال مشترک در طول دو بازه زمانی و $\gamma_{\mathrm{e2e}}^{\mathrm{SC}}$ و $\gamma_{\mathrm{e2e}}^{\mathrm{SSC}}$ به ترتیب بیانگر نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله در طول دو بازه زمانی با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار است که روابط مربوط به آن در ادامه بیان می‌شوند.

اکنون با در اختیار داشتن روابط مربوط به نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده‌ها و ظرفیت تمامی کانال‌های موجود در شبکه، احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک پیشنهادی در این فصل را محاسبه می‌کنیم.

۴-۴- احتمالات قطع ارتباط در شبکه سلولی

همانند مطالب بیان شده در بخش ۳-۴، در این فصل نیز با توجه به در نظر گرفتن حالت استفاده مجدد در ارتباطات وسیله به وسیله، فرستنده‌ها در ارتباطات وسیله به وسیله سیگنال خود را بر روی طیف شبکه سلولی ارسال می‌کنند که در این صورت تداخل متقابل در شبکه ایجاد می‌گردد و کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، جهت تضمین کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی، از عملکرد قطع استفاده می‌کنیم و توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان را به‌گونه‌ای محدود می‌کنیم که احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی از یک مقدار آستانه تعیین شده بیشتر نگردد.

در این حالت، فرض می‌کنیم ایستگاه پایه اطلاعاتش را با نرخ ثابت R^P به گیرنده شبکه سلولی ارسال می‌کند. همانند مطالب بیان شده در فصل قبل، از آنجایی که شنودگر قادر به کشف سیگنال‌های ارسالی توسط فرستنده شبکه سلولی نیست، زمانی ارتباط در شبکه سلولی قطع می‌شود که ظرفیت

کانال بین ایستگاه پایه و گیرنده شبکه سلولی از نرخ ثابت R^P کمتر گردد. بنابراین، در این فصل نیز احتمال قطع ارتباط در شبکه سلولی در حضور تداخل ناشی از ارتباطات وسیله به وسیله در بازه‌های زمانی اول و دوم به‌صورت روابط (۳-۲۷) و (۳-۲۸) در قضیه ۳-۱ محاسبه می‌شود.

بعلاوه، جهت تضمین کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان را به‌گونه‌ای محدود می‌کنیم که احتمالات قطع ارتباط در شبکه سلولی از مقدار آستانه $\overline{P}_{\text{out}}^{C}$ بیشتر نگردد. بنابراین، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان همانند روابط (۳-۳۷) و (۳-۳۸) محاسبه می‌گردند.

۴-۵- احتمالات قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله

در این فصل فرض می‌کنیم اطلاعات کانال‌های اصلی شبکه در اختیار فرستنده‌های شبکه قرار دارد و اطلاعات کانال شنودگر در دسترس نیست. با توجه به مطالب بیان شده در فصل ۲، در این حالت احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله بر اساس مفهوم ظرفیت امنیتی بیان می‌گردد. بنابراین، از آنجایی که رله غیرقابل اطمینان است و در ارتباطات وسیله به وسیله به عنوان شنودگر عمل می‌کند، جهت محاسبه احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله از مفهوم ظرفیت امنیتی استفاده می‌کنیم. منظور از ظرفیت امنیتی، ظرفیت قابل دسترس کانال بین فرستنده و گیرنده موردنظر منهای ظرفیت کانال شنودگر است. بنابراین، ظرفیت امنیتی طرح مشارکتی بیان شده بوسیله رله غیرقابل اطمینان در طرح انتخاب لینک X برابر است با [۶۹]:

$$C_{\text{sec}}^{X} = C_{\text{R},X}^{\text{DTDR}} - C_{\text{DT}\to\text{R}}^{1} \qquad (۴-۲۱)$$

که در آن $X = \{\text{SC},\text{SSC}\}$ است. با توجه به روابط (۴-۱۲)، (۴-۱۹) و (۴-۲۰) داریم:

$$C_{\text{sec}}^{X} = \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{1+\gamma_{\text{e2e}}^{X}}{1+\gamma_{\text{DT}\to\text{R}}^{1}}\right) \qquad (۴-۲۲)$$

هنگامی که ظرفیت کانال بین فرستنده و شنودگر از ظرفیت کانال بین فرستنده و گیرنده موردنظر بیشتر شود، ظرفیت امنیتی شبکه صفر می‌گردد. بنابراین می‌توان نوشت [۴۶]:

$$C_{\text{sec}}^{X} = \max\left(0, \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{1+\gamma_{\text{e2e}}^{X}}{1+\gamma_{\text{DT}\to\text{R}}^{1}}\right)\right) \qquad (۲۳-۴)$$

قطع ارتباط امنیتی زمانی در ارتباطات وسیله به وسیله رخ می‌دهد که ظرفیت امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله از نرخ امنیتی آن کمتر باشد. بنابراین، با استفاده از عبارت حد بالای بیان شده رابطه (۱۸-۴) در رابطه (۲۲-۴)، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک X برابر است با:

$$P_{\text{out}}^{X} = \Pr(C_{\text{sec}}^{X} < R^{S}) \qquad (۲۴-۴)$$

که در آن R^{S} بیانگر مقدار نرخ امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله به طرح انتخاب لینک در گیرنده وسیله به وسیله بستگی دارد که در این بخش دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را معرفی و سپس احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را در این دو طرح به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه می‌کنیم.

۴-۵-۱- طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی

همان‌طور که در فصل ۲ اشاره شد، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در طول دو بازه زمانی ارسال، برابر با بیشترین نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی از طریق کانال مستقیم و کانال رله در طول دو بازه زمانی است. بنابراین، نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در طول دو بازه زمانی برابر است با [۱]:

$$\gamma_{\mathrm{e2e}}^{\mathrm{SC}} = \max(\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}^{1}, \hat{\gamma}_{\mathrm{DTRDR}}) \qquad (۲۵-۴)$$

که در آن مقدار $\hat{\gamma}_{\mathrm{DTRDR}}$ مطابق با رابطه (۴-۱۸) تعیین می‌شود. جهت محاسبه احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی، رابطه ظرفیت امنیتی (۴-۲۲) را در رابطه (۴-۲۴) جایگذاری می‌کنیم. بنابراین می‌توان نوشت:

$$P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{SC}} = \Pr\left(\frac{1+\gamma_{\mathrm{e2e}}^{\mathrm{SC}}}{1+\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}^{1}} < \Gamma\right) \qquad (۲۶-۴)$$

که در آن $\Gamma = 2^{2R^{S}}$ است. با استفاده از محاسبات آماری داریم:

$$P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{SC}} = \int_{0}^{\infty} F_{\gamma_{\mathrm{e2e}}^{\mathrm{SC}}(y)}(\Gamma + \Gamma y - 1)\, f_{\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}^{1}}(y)\, dy \qquad (۲۷-۴)$$

بر اساس رابطه (۴-۲۵) و با توجه به اینکه تابع توزیع تجمعی ماکزیمم دو متغیر تصادفی مستقل برابر با حاصل‌ضرب تابع توزیع تجمعی هرکدام از آن متغیرهای تصادفی است داریم [۶۳]:

$$F_{\gamma_{\mathrm{e2e}}^{\mathrm{SC}}(y)}(\gamma) = \Pr\left(\max(\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}^{1}, \hat{\gamma}_{\mathrm{DTRDR}}(y)) < \gamma\right) = F_{\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}^{1}}(\gamma) F_{\hat{\gamma}_{\mathrm{DTRDR}}(y)}(\gamma) \qquad (۲۸-۴)$$

همان‌طور که بیان شد، مقدار $\hat{\gamma}_{\mathrm{DTRDR}}$ مطابق با رابطه (۴-۱۸) تعیین می‌شود و تابعی از مینیمم دو متغیر تصادفی $\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}^{1}$ و $\gamma_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}^{2}$ است و با توجه به اینکه مقدار $\gamma_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}^{1}$ در رابطه (۴-۲۷) برابر با مقدار ثابت y است، جهت محاسبه این تابع توزیع تجمعی از لم زیر استفاده می‌کنیم.

لم ۴-۱: تابع توزیع تجمعی مینیمم مقدار ثابت a و متغیر تصادفی X برابر است با [۶۳]:

$$\Pr(\min(a, X) < \gamma) = \begin{cases} F_X(\gamma) & \text{if} \quad a \geq \gamma \\ 1 & \text{if} \quad a < \gamma \end{cases} \qquad (۲۹-۴)$$

بنابراین، با استفاده از رابطه (۴-۱۸) و لم ۴-۱ داریم:

$$F_{\hat{\gamma}_{\mathrm{DTRDR}}(y)}(\gamma)=\Pr(\min(y,\gamma^{2}_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}})<\gamma)=\begin{cases}F_{\gamma^{2}_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}}(\gamma) & \text{if} \quad y\geq\gamma\\ 1 & \text{if} \quad y<\gamma\end{cases} \tag{۳۰-۴}$$

با جایگذاری رابطه فوق در رابطه (۴-۲۸) می‌توان نوشت:

$$F_{\gamma^{\mathrm{SC}}_{\mathrm{e2e}}(y)}(\gamma)=\begin{cases}F_{\gamma^{1}_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(\gamma)F_{\gamma^{2}_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}}(\gamma) & \text{if} \quad y\geq\gamma\\ F_{\gamma^{1}_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(\gamma) & \text{if} \quad y<\gamma\end{cases} \tag{۳۱-۴}$$

روابط توابع توزیع تجمعی $\gamma^{1}_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}$، $\gamma^{1}_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}$ و $\gamma^{2}_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}$ با استفاده از روابط (۴-۹)، (۴-۱۰) و (۴-۱۴) و مشابه با محاسبات انجام شده در قضیه ۳-۲ به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_{\gamma^{1}_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(\gamma)=1-\frac{\Psi_{1}}{\Psi_{1}+\gamma}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}\gamma} \tag{۳۲-۴}$$

$$F_{\gamma^{1}_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}}(\gamma)=1-\frac{\Psi_{2\mathrm{R}}}{\Psi_{2\mathrm{R}}+\gamma}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}\gamma} \tag{۳۳-۴}$$

$$F_{\gamma^{2}_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}}(\gamma)=1-\frac{\Psi_{3\mathrm{R}}}{\Psi_{3\mathrm{R}}+\gamma}e^{-\Psi_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}\gamma} \tag{۳۴-۴}$$

که در آن $\Psi_{1}=\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}}{\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}$، $\Psi_{2\mathrm{R}}=\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{R}}}{\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}}$، و $\Psi_{3\mathrm{R}}=\frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}}{\Psi_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}}$ است. با جایگذاری روابط (۴-۳۲) و (۴-۳۴) در رابطه (۴-۳۱)، رابطه تابع توزیع تجمعی نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله در طول دو بازه زمانی از طریق طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی به‌صورت زیر نتیجه می‌گردد:

$$F_{\gamma^{\mathrm{SC}}_{\mathrm{e2e}}}(\gamma)=\begin{cases}\left(1-\frac{\Psi_{1}}{\Psi_{1}+\gamma}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}\gamma}\right)\left(1-\frac{\Psi_{3\mathrm{R}}}{\Psi_{3\mathrm{R}}+\gamma}e^{-\Psi_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}\gamma}\right) & \text{if} \quad y\geq\gamma\\ \left(1-\frac{\Psi_{1}}{\Psi_{1}+\gamma}e^{-\Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}\gamma}\right) & \text{if} \quad y<\gamma\end{cases} \tag{۳۵-۴}$$

همچنین با استفاده از رابطه (۴-۳۳) و رابطه بین تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی داریم [۶۳]:

$$f_{\gamma^1_{DT\to R}}(y)=\frac{d}{dy}F_{\gamma^1_{DT\to R}}(y)=\frac{d}{dy}\left(1-\frac{\Psi_{2R}}{\Psi_{2R}+y}e^{-\Psi_{DT\to R}y}\right)$$
$$=\frac{\Psi_{2R}e^{-\Psi_{DT\to R}y}}{(y+\Psi_{2R})^2}+\frac{\Psi_{DT\to R}\Psi_{2R}e^{-\Psi_{DT\to R}y}}{y+\Psi_{2R}} \qquad (۳۶-۴)$$

با جایگذاری روابط (۴-۳۵) و (۴-۳۶) در رابطه (۴-۲۷) و با استفاده از روابط انتگرالی زیر [۷۰]:

$$\int_0^\infty \frac{e^{-\mu x}}{x+B}dx=-e^{B\mu}Ei(-\mu B) \qquad (۳۷-۴)$$

$$\int_0^\infty \frac{e^{-px}}{(A+x)^2}dx=pe^{Ap}Ei(-Ap)+\frac{1}{A} \qquad (۳۸-۴)$$

$$E_1(z)=-Ei(-z) \qquad (۳۹-۴)$$

که در آن $Ei(z)=\int_z^\infty \frac{e^{-x}}{x}dx$ تابع انتگرال نمایی[1] است [۷۰]، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده وسیله به وسیله، به‌صورت عبارت بسته زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{out}^{SC}=1-I_1-I_2-I_3-I_4+I_5+I_6 \qquad (۴۰-۴)$$

که در آن:

$$I_1=\frac{\beta_1}{(\Psi_{2R}-\Psi_1')^2}e^{\Psi_1'\beta_2}E_1(\Psi_1'\beta_2)+\frac{-\beta_1}{(\Psi_1'-\Psi_{2R})^2}e^{\Psi_{2R}\beta_2}E_1(\Psi_{2R}\beta_2)$$
$$+\frac{\beta_1}{\Psi_1'-\Psi_{2R}}\left[\frac{1}{\Psi_{2R}}-\beta_2 e^{\Psi_{2R}\beta_2}E_1(\Psi_{2R}\beta_2)\right] \qquad (۴۱-۴)$$

[1] Exponential integral function

$$I_2 = \frac{\beta_3}{\Psi_{2R} - \Psi_1'} e^{\Psi_1' \beta_2} E_1(\Psi_1' \beta_2) + \frac{\beta_3}{\Psi_1' - \Psi_{2R}} e^{\Psi_{2R} \beta_2} E_1(\Psi_{2R} \beta_2) \quad (۴۲-۴)$$

$$I_3 = \frac{\beta_4}{(\Psi_{2R} - \Psi_{3R}')^2} e^{\Psi_{3R}' \beta_5} E_1(\Psi_{3R}' \beta_5) + \frac{-\beta_4}{(\Psi_{3R}' - \Psi_{2R})^2} e^{\Psi_{2R} \beta_5} E_1(\Psi_{2R} \beta_5) + \frac{\beta_4}{\Psi_{3R}' - \Psi_{2R}} \left[\frac{1}{\Psi_{2R}} - \beta_5 e^{\Psi_{2R} \beta_5} E_1(\Psi_{2R} \beta_5) \right] \quad (۴۳-۴)$$

$$I_4 = \frac{\beta_6}{\Psi_{2R} - \Psi_{3R}'} e^{\Psi_{3R}' \beta_5} E_1(\Psi_{3R}' \beta_5) + \frac{\beta_6}{\Psi_{3R}' - \Psi_{2R}} e^{\Psi_{2R} \beta_5} E_1(\Psi_{2R} \beta_5) \quad (۴۴-۴)$$

$$I_5 = \frac{\beta_7}{(\Psi_{3R}' - \Psi_1')(\Psi_{2R} - \Psi_1')^2} e^{\Psi_1' \beta_8} E_1(\Psi_1' \beta_8) + \frac{\beta_7}{(\Psi_1' - \Psi_{3R}')(\Psi_{2R} - \Psi_{3R}')^2} e^{\Psi_{3R}' \beta_8} E_1(\Psi_{3R}' \beta_8) + \frac{-\beta_7 (\Psi_1' + \Psi_{3R}' - 2\Psi_{2R})}{(\Psi_1' - \Psi_{2R})^2 (\Psi_{3R}' - \Psi_{2R})^2} e^{\Psi_{2R} \beta_8} E_1(\Psi_{2R} \beta_8) + \frac{\beta_7}{(\Psi_1' - \Psi_{2R})(\Psi_{3R}' - \Psi_{2R})} \left[\frac{1}{\Psi_{2R}} - \beta_8 e^{\Psi_{2R} \beta_8} E_1(\Psi_{2R} \beta_8) \right] \quad (۴۵-۴)$$

$$I_6 = \frac{\beta_9}{(\Psi_{3R}' - \Psi_1')(\Psi_{2R} - \Psi_1')} e^{\Psi_1' \beta_8} E_1(\Psi_1' \beta_8) + \frac{\beta_9}{(\Psi_1' - \Psi_{3R}')(\Psi_{2R} - \Psi_{3R}')} e^{\Psi_{3R}' \beta_8} E_1(\Psi_{3R}' \beta_8) + \frac{\beta_9}{(\Psi_1' - \Psi_{2R})(\Psi_{3R}' - \Psi_{2R})} e^{\Psi_{2R} \beta_8} E_1(\Psi_{2R} \beta_8) \quad (۴۶-۴)$$

که در آن $\Psi_1' = \frac{\Psi_1 + (\Gamma - 1)}{\Gamma}$، $\Psi_{2R}' = \frac{\Psi_{2R} + (\Gamma - 1)}{\Gamma}$، $\Psi_{3R}' = \frac{\Psi_{3R} + (\Gamma - 1)}{\Gamma}$، $\beta_1 = \frac{\Psi_1 \Psi_{2R}}{\Gamma} e^{-\Psi_{DT \to DR}(\Gamma - 1)}$،

$\beta_2 = \Psi_{DT \to DR} \Gamma + \Psi_{DT \to R}$، $\beta_3 = \frac{\Psi_1 \Psi_{BS \to R}}{\Gamma} e^{-\Psi_{DT \to DR}(\Gamma - 1)}$، $\beta_4 = \frac{\Psi_{2R} \Psi_{3R}}{\Gamma} e^{-\Psi_{R \to DR}(\Gamma - 1)}$،

$\beta_5 = \Psi_{R \to DR} \Gamma + \Psi_{DT \to R}$، $\beta_6 = \frac{\Psi_3 \Psi_{R \to}}{\Gamma} e^{-\Psi_{R \to} \Psi_{S_D}}$، $\beta_7 = \frac{\Psi_1 \Psi_{2R} \Psi_{3R}}{\Gamma^2} e^{-(\Psi_{DT \to DR} + \Psi_{R \to DR})(\Gamma - 1)}$،

$\beta_8 = (\Psi_{DT \to DR} + \Psi_{R \to DR}) \Gamma + \Psi_{DT \to R}$، و $\beta_9 = \frac{\Psi_1 \Psi_{3R} \Psi_{BS \to R}}{\Gamma^2} e^{-(\Psi_{DT \to DR} + \Psi_{R \to DR})(\Gamma - 1)}$ است.

بنابراین، در این بخش احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در حضور رله غیرقابل اطمینان را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه کردیم.

۴-۵-۲- طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار

در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار، در ابتدا گیرنده وسیله به وسیله یکی از کانال‌های مستقیم یا کانال رله را انتخاب می‌کند و نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده در طول دو بازه زمانی ارسال برابر با نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در آن کانال می‌گردد و تا زمانی که نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل آن کانال از مقدار آستانه γ_T بیشتر باشد، گیرنده وسیله به وسیله از همان کانال استفاده و به‌محض اینکه نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل این کانال از مقدار آستانه γ_T کمتر شود، گیرنده وسیله به وسیله به کانال دیگر سوییچ می‌کند. بنابراین در این حالت، بین کانال‌های مستقیم و کانال رله لزوماً کانالی با بیشترین نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله انتخاب نمی‌گردد.

رابطه تابع توزیع تجمعی نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل دریافتی در گیرنده وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار در طول دو بازه زمانی ارسال برابر است با [۱]:

$$F_{\gamma_{e2e}^{SSC}}(\gamma)=\begin{cases}F_{\gamma^1_{DT\to DR}}(\gamma_T)F_{\hat{\gamma}_{DTRDR}}(\gamma) & \text{if } \gamma<\gamma_T\\ \Pr(\gamma_T\le\gamma^1_{DT\to DR}\le\gamma)+F_{\gamma^1_{DT\to DR}}(\gamma_T)F_{\hat{\gamma}_{DTRDR}}(\gamma) & \text{if } \gamma\ge\gamma_T\end{cases} \quad (۴۷-۴)$$

که در آن مقدار $\hat{\gamma}_{DTRDR}$ مطابق با رابطه (۴-۱۸) تعیین می‌شود و γ_T بیانگر مقدار آستانه در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار است. مشابه رابطه (۴-۲۷)، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله، به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{\text{out}}^{\text{SSC}} = \int_0^{\infty} F_{\gamma_{\text{e2e}}^{\text{SSC}}(y)}(\Gamma + \Gamma y - 1) f_{\gamma_{\text{DT}\to\text{R}}^1}(y) dy \qquad (۴۸-۴)$$

با جایگذاری رابطه (۴-۴۷) در رابطه فوق داریم:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^{\text{SSC}} &= \int_0^{\tau} F_{\gamma_{\text{DT}\to\text{DR}}^1}(\gamma_T) F_{\hat{\gamma}_{\text{DTRDR}}(y)}(\Gamma + \Gamma y - 1) f_{\gamma_{\text{DT}\to\text{R}}^1}(y) dy \\ &+ \int_{\tau}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \Pr\left(\gamma_T \le \gamma_{\text{DT}\to\text{DR}}^1 \le (\Gamma + \Gamma y - 1)\right) \\ + F_{\gamma_{\text{DT}\to\text{DR}}^1}(\gamma_T) F_{\hat{\gamma}_{\text{DTRDR}}(y)}(\Gamma + \Gamma y - 1) \end{array} \right] f_{\gamma_{\text{DT}\to\text{R}}^1}(y) dy \end{aligned} \qquad (۴۹-۴)$$

که در آن $\tau = \dfrac{\gamma_T - \Gamma + 1}{\Gamma}$ است. با قرار دادن رابطه (۴-۳۴) در رابطه (۴-۳۰) و جایگذاری روابط (۴-۳۰)، (۴-۳۲) و (۴-۳۶) در رابطه فوق و استفاده از رابطه (۴-۳۷) و روابط انتگرالی زیر [۷۰]:

$$\int_u^{\infty} \frac{e^{-\mu x}}{(x+B)^n} dx = e^{-u\mu} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(k-1)!(-\mu)^{n-k-1}}{(n-1)!(u+B)^k} - \frac{(-\mu)^{n-1}}{(n-1)!} e^{B\mu} Ei\left[-(u+B)\mu\right] \qquad (۵۰-۴)$$

$$\int_u^{v} \frac{e^{-\mu x}}{x+A} dx = e^{A\mu} \left\{ Ei\left[-(A+v)\mu\right] - Ei\left[-(A+u)\mu\right] \right\} \qquad (۵۱-۴)$$

احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله، به‌صورت عبارت بسته زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{\text{out}}^{\text{SSC}} = \left(1 - \frac{\Psi_1}{\Psi_1 + \gamma_T} e^{-\Psi_{\text{DT}\to\text{DR}}\gamma_T}\right)(1 - \Theta_1 - \Theta_2) + \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_1 + \gamma_T} e^{-\Psi_{\text{DT}\to\text{DR}}\gamma_T}\right)(\Theta_3) - \Theta_4 - \Theta_5 \qquad (۵۲-۴)$$

که در آن داریم:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{\beta_4}{(\Psi_{2\text{R}} - \Psi_{3\text{R}}')^2} e^{\Psi_{3\text{R}}'\beta_5} E_1(\Psi_{3\text{R}}'\beta_5) + \frac{-\beta_4}{(\Psi_{3\text{R}}' - \Psi_{2\text{R}})^2} e^{\Psi_{2\text{R}}\beta_5} E_1(\Psi_{2\text{R}}\beta_5) \\ &+ \frac{\beta_4}{\Psi_{3\text{R}}' - \Psi_{2\text{R}}} \left[\frac{1}{\Psi_{2\text{R}}} - \beta_5 e^{\Psi_{2\text{R}}\beta_5} E_1(\Psi_{2\text{R}}\beta_5) \right] \end{aligned} \qquad (۵۳-۴)$$

$$\Theta_2 = \frac{\beta_6}{\Psi_{2R} - \Psi'_{3R}} e^{\Psi'_{3R}\beta_5} E_1\left(\Psi'_{3R}\beta_5\right) + \frac{\beta_6}{\Psi'_{3R} - \Psi_{2R}} e^{\Psi_{2R}\beta_5} E_1\left(\Psi_{2R}\beta_5\right) \quad (۵۴-۴)$$

$$\Theta_3 = \frac{\Psi_{2R}}{\tau + \Psi_{2R}} e^{-\tau\Psi_{DT\to R}} \quad (۵۵-۴)$$

$$\Theta_4 = \frac{\beta_1}{(\Psi_{2R} - \Psi'_1)^2} e^{\Psi'_1\beta_2} E_1\left((\Psi'_1 + \tau)\beta_2\right) - \frac{\beta_1}{(\Psi'_1 - \Psi_{2R})^2} e^{\Psi_{2R}\beta_2} E_1\left((\Psi_{2R} + \tau)\beta_2\right) + \frac{\beta_1}{\Psi'_1 - \Psi_{2R}}\left[\frac{e^{-\tau\beta_2}}{\tau + \Psi_{2R}} - \beta_2 e^{\Psi_{2R}\beta_2} E_1\left((\Psi_{2R} + \tau)\beta_2\right)\right] \quad (۵۶-۴)$$

$$\Theta_5 = \frac{\beta_3}{\Psi_{2R} - \Psi'_1} e^{\Psi'_1\beta_2} E_1\left((\Psi'_1 + \tau)\beta_2\right) + \frac{\beta_3}{\Psi'_1 - \Psi_{2R}} e^{\Psi_{2R}\beta_2} E_1\left((\Psi_{2R} + \tau)\beta_2\right) \quad (۵۷-۴)$$

بنابراین، در این بخش احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار در حضور رله غیرقابل اطمینان را به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه کردیم.

۴-۶- بازده امنیتی

همان‌طور که در فصل قبل بیان شد، بازده امنیتی یکی از معیارهای امنیتی شبکه است که بر مبنای احتمال قطع امنیتی تعریف می‌گردد. بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حضور رله غیرقابل اطمینان در طرح انتخاب لینک X برابر است با:

$$\tau_{\text{secrecy}}^{X} = \frac{R^S}{2}(1 - P_{\text{out}}^{X}) \quad (۵۸-۴)$$

که در آن ضریب $\frac{1}{2}$ به این دلیل است که در ارتباطات مشارکتی، یک سیگنال در طول دو بازه زمانی ارسال می‌شود. بنابراین، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از دو طرح انتخاب لینک

ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله، با جایگذاری روابط (۴-۴۰) و (۴-۵۲) در رابطه فوق محاسبه می‌شود.

۴-۷- احتمال ظرفیت امنیتی غیرصفر

هنگامی که ظرفیت کانال بین فرستنده و شنودگر از ظرفیت کانال بین فرستنده و گیرنده موردنظر بیشتر باشد، ظرفیت امنیتی شبکه صفر می‌گردد. با استفاده از روابط (۴-۲۱) و (۴-۲۴)، عبارت احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر در طرح انتخاب لینک X به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۵۱]:

$$\Pr(C_{\text{sec}}^{X} > 0) = \Pr(C_{\text{R},X}^{\text{DTDR}} > C_{\text{DT}\to\text{R}}^{1}) = 1 - P_{\text{out}}^{X}(R^{S} = 0) \qquad (۵۹\text{-}۴)$$

بنابراین، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر به‌عنوان تابعی از احتمال قطع امنیتی شبکه به ازای نرخ امنیتی صفر بیان می‌شود. احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله، با جایگذاری روابط (۴-۴۰) و (۴-۵۲) در رابطه فوق محاسبه می‌گردد.

۴-۸- آنالیزهای مجانبی احتمال قطع امنیتی

از آنجایی که عبارات احتمال قطع امنیتی فرم بسته محاسبه شده تا حدی پیچیده است، در این بخش عملکرد قطع امنیتی شبکه در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله را به‌صورت مجانبی بررسی می‌کنیم. در حالت کلی، رفتار مجانبی احتمال قطع امنیتی زمانی مطالعه می‌شود که نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه $\delta_{\text{BS}} = \frac{P_{\text{BS}}}{N_0}$ به سمت بی‌نهایت میل کند. همان‌طور که در بخش ۳-۴ اشاره شد، به‌منظور حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی باید توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله طبق روابط (۳-۳۵) و (۳-۳۶) محدود شود. با توجه به این روابط مشاهده می‌شود که با افزایش توان ارسالی ایستگاه پایه، توان ارسالی توسط

فرستنده وسیله به وسیله و رله‌ها افزایش می‌یابد. زمانی که توان ارسالی توسط ایستگاه پایه به سمت بی‌نهایت میل کند، احتمال قطع امنیتی به سمت یک عدد ثابت غیر صفر میل می‌کند و کف احتمال قطع امنیتی[1] اتفاق می‌افتد که این مقدار حد پایین[2] احتمال قطع امنیتی را ایجاد می‌کند. این امر به این دلیل است که زمانی که توان ارسالی ایستگاه پایه بالا است، تداخل از ایستگاه پایه فاکتور تعیین‌کننده در احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله است. بنابراین در نواحی با توان ایستگاه پایه بالا، عملکرد قطع امنیتی از طریق افزایش توان ارسالی بهبود نمی‌یابد.

جهت انجام آنالیزهای مجانبی احتمال قطع امنیتی، توان ارسالی توسط ایستگاه پایه، فرستنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان را به‌منظور برقراری روابط (۳-۳۷) و (۳-۳۸) به سمت بی‌نهایت میل می‌دهیم. به همین دلیل در محاسبات، توان ارسالی فرستنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان را مطابق با روابط (۳-۳۷) و (۳-۳۸) با توان ارسالی ایستگاه پایه جایگذاری و سپس نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه $\delta_{\mathrm{BS}}=\frac{P_{\mathrm{BS}}}{N_0}\to\infty$ را به سمت بینهایت میل می‌دهیم.

لم ۴-۲: با استفاده از سری مکلورن[3] توابع نمایی داریم [۷۰]:

$$e^{x}=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{x^{k}}{k!}\overset{x<<1}{\approx}1+x \qquad (۶۰-۴)$$

هنگامی‌که δ_{BS} به سمت بینهایت میل می‌کند، با استفاده از لم ۴-۲ در روابط (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله غیرقابل اطمینان در بینهایت به‌صورت زیر تقریب زده می‌شوند:

$$P_{\mathrm{DT},\infty}\approx\frac{P_{\mathrm{BS}}\sigma^{2}_{\mathrm{DT}\to\mathrm{CR}}}{\sigma^{2}_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}\left[\frac{\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}}}{1-\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}}}\right] \qquad (۶۱-۴)$$

[1] Secrecy outage probability floor
[2] Lower bound
[3] Maclaurin series

$$P_{\mathrm{R},\infty} \approx \frac{P_{\mathrm{BS}}\sigma^2_{\mathrm{R}\to\mathrm{CR}}}{\sigma^2_{\mathrm{BS}\to\mathrm{CR}}\vartheta}\left[\frac{\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}}}{1-\bar{P}^{\mathrm{C}}_{\mathrm{out}}}\right] \quad (۶۲\text{-}۴)$$

در این بخش، روابط مجانبی احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله را به‌صورت عباراتی بسته محاسبه می‌کنیم.

۴-۸-۱- طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی

جهت انجام آنالیزهای مجانبی احتمال قطع امنیتی در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی، تمامی روابط موجود در بخش ۴-۵-۱ را در حالتی که δ_{BS} به سمت بینهایت میل می‌کند، بررسی می‌کنیم. زمانی که δ_{BS} به سمت بینهایت میل می‌کند، رابطه (۴-۹) به‌صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}} = \frac{P_{\mathrm{DT}}\,|h_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}|^2}{N_0 + P_{\mathrm{BS}}\,|h_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}|^2} = \frac{X}{1+Y} \simeq \frac{X}{Y} \quad (۶۳\text{-}۴)$$

با استفاده از تقریب فوق، مقدار مجانبی تابع توزیع تجمعی $F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(\gamma)$ در رابطه (۴-۳۲)، مشابه با آنچه در قضیه ۳-۲ بیان شد برابر است با:

$$F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}}(\gamma) \simeq 1 - \frac{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}}}{\Psi_{\mathrm{BS}\to\mathrm{DR}} + \Psi_{\mathrm{DT}\to\mathrm{DR}}\gamma} \simeq 1 - \frac{\Psi_1}{\Psi_1 + \gamma} \quad (۶۴\text{-}۴)$$

به‌طور مشابه، مقدار مجانبی روابط تابع توزیع تجمعی (۴-۳۳) و (۴-۳۴) به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_{\gamma^1_{\mathrm{DT}\to\mathrm{R}}}(\gamma) \simeq 1 - \frac{\Psi_{2\mathrm{R}}}{\Psi_{2\mathrm{R}} + \gamma} \quad (۶۵\text{-}۴)$$

$$F_{\gamma^2_{\mathrm{R}\to\mathrm{DR}}}(\gamma) \simeq 1 - \frac{\Psi_{3\mathrm{R}}}{\Psi_{3\mathrm{R}} + \gamma} \quad (۶۶\text{-}۴)$$

بنابراین، بر اساس روابط فوق و مشابه محاسبات انجام شده در بخش ۴-۵-۱ و همچنین با استفاده از رابطه انتگرالی زیر:

$$\int_0^{\infty} \frac{\alpha_1}{(y+\alpha_2)(y+\alpha_3)^2} dy = \frac{\alpha_1}{(\alpha_2-\alpha_3)^2}\left[\frac{\alpha_2-\alpha_3}{\alpha_3} - \ln(\frac{\alpha_2}{\alpha_3})\right] \quad (۶۷-۴)$$

مقدار مجانبی احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده وسیله به وسیله، به‌صورت عبارت بسته زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{\text{out},\infty}^{\text{SC}} = 1-\phi_1-\phi_2+\phi_3+\phi_4 \quad (۶۸-۴)$$

که در آن داریم:

$$\phi_1 = \frac{\vartheta_1}{(\Psi_1^{'}-\Psi_{2R})^2}\left[\frac{\Psi_1^{'}-\Psi_{2R}}{\Psi_{2R}} - \ln(\frac{\Psi_1^{'}}{\Psi_{2R}})\right] \quad (۶۹-۴)$$

$$\phi_2 = \frac{\vartheta_2}{(\Psi_{3R}^{'}-\Psi_{2R})^2}\left[\frac{\Psi_{3R}^{'}-\Psi_{2R}}{\Psi_{2R}} - \ln(\frac{\Psi_{3R}^{'}}{\Psi_{2R}})\right] \quad (۷۰-۴)$$

$$\phi_3 = \frac{\vartheta_3}{(\Psi_1^{'}-\Psi_{2R})^2}\left[\frac{\Psi_1^{'}-\Psi_{2R}}{\Psi_{2R}} - \ln(\frac{\Psi_1^{'}}{\Psi_{2R}})\right] \quad (۷۱-۴)$$

$$\phi_4 = \frac{-\vartheta_3}{(\Psi_{3R}^{'}-\Psi_{2R})^2}\left[\frac{\Psi_{3R}^{'}-\Psi_{2R}}{\Psi_{2R}} - \ln(\frac{\Psi_{3R}^{'}}{\Psi_{2R}})\right] \quad (۷۲-۴)$$

که در آن $\vartheta_1 = \frac{\Psi_1\Psi_{2R}}{\Gamma}$، $\vartheta_2 = \frac{\Psi_{2R}\Psi_{3R}}{\Gamma}$، و $\vartheta_3 = \frac{\Psi_1\Psi_{2R}\Psi_{3R}}{\Gamma^2(\Psi_{3R}^{'}-\Psi_1^{'})}$ است.

مقدار مجانبی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی محاسبه شده در رابطه فوق، به سمت یک عدد ثابت غیر صفر میل می‌کند که اصطلاحاً کف احتمال قطع امنیتی نامیده می‌شود.

۴-۸-۲- طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار

جهت انجام آنالیزهای مجانبی احتمال قطع امنیتی در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار، تمامی روابط موجود در بخش ۴-۵-۲ را در حالتی که δ_{BS} به سمت بینهایت میل می‌کند، بررسی می‌کنیم. در این صورت، با استفاده از روابط تابع توزیع تجمعی (۴-۶۴)، (۴-۶۵) و (۴-۶۶) و همچنین مشابه محاسبات انجام شده در بخش ۴-۵-۲ و استفاده از رابطه انتگرالی (۴-۶۷)، مقدار مجانبی احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله، به‌صورت عبارت بسته زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{\mathrm{out},\infty}^{\mathrm{SSC}} = (1-\frac{\Psi_1}{\Psi_1+\gamma_T}) + (\frac{\Psi_1}{\Psi_1+\gamma_T})(\frac{\Psi_{2\mathrm{R}}}{\Psi_{2\mathrm{R}}+\tau}) - \Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4 + \Omega_5 \qquad (۴-۷۳)$$

که در آن داریم:

$$\Omega_1 = \frac{\xi_1}{(\Psi_{3\mathrm{R}}^{'} - \Psi_{2\mathrm{R}})^2}\left[\frac{\Psi_{3\mathrm{R}}^{'} - \Psi_{2\mathrm{R}}}{\Psi_{2\mathrm{R}}} - \ln(\frac{\Psi_{3\mathrm{R}}^{'}}{\Psi_{2\mathrm{R}}})\right] \qquad (۴-۷۴)$$

$$\Omega_2 = \frac{\vartheta_1}{(\Psi_1^{'} - \Psi_{2\mathrm{R}})^2}\left[\frac{\Psi_1^{'} - \Psi_{2\mathrm{R}}}{\Psi_{2\mathrm{R}}} - \ln(\frac{\Psi_1^{'}}{\Psi_{2\mathrm{R}}})\right] \qquad (۴-۷۵)$$

$$\Omega_3 = \frac{\vartheta_1}{(\Psi_{2\mathrm{R}} - \Psi_1^{'})^2}\left[\ln(\Psi_1^{'}+\tau) - \ln(\Psi_1^{'})\right] \qquad (۴-۷۶)$$

$$\Omega_4 = \frac{\vartheta_1}{(\Psi_1^{'} - \Psi_{2\mathrm{R}})^2}\left[\ln(\Psi_{2\mathrm{R}}+\tau) - \ln(\Psi_{2\mathrm{R}})\right] \qquad (۴-۷۷)$$

$$\Omega_5 = \frac{\vartheta_1}{\Psi_1^{'} - \Psi_{2\mathrm{R}}}\left[\frac{1}{\Psi_{2\mathrm{R}}} - \frac{1}{\Psi_{2\mathrm{R}}+\tau}\right] \qquad (۴-۷۸)$$

که در روابط فوق $\xi_1 = (1-\frac{\Psi_1}{\Psi_1+\gamma_T})(\frac{\Psi_{2\mathrm{R}}\Psi_{3\mathrm{R}}}{\Gamma})$ است.

بنابراین، مقدار مجانبی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار محاسبه شده در رابطه فوق، به سمت مقدار کف احتمال قطع امنیتی خود که یک عدد غیر صفر است میل می‌کند.

۴-۹- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله را در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار مقایسه و اثر تغییرات پارامترهای گوناگون شبکه را بر عملکرد قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله بررسی می‌کنیم. همچنین، بدیهی است که در این فصل تنها می‌توانیم عملکرد قطع امنیتی شبکه را در حالت مشارکتی بررسی کنیم زیرا از آنجایی که در این مدل سیستمی رله تقویت و ارسال به‌عنوان شنودگر در شبکه عمل می‌کند، محاسبه احتمال قطع امنیتی در حالت غیر مشارکتی که در آن رله و درنتیجه شنودگر در شبکه حضور ندارد امکان‌پذیر نخواهد بود.

۴-۹-۱- بررسی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

در این شبیه‌سازی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه $\delta_{\mathrm{BS}} = \frac{P_{\mathrm{BS}}}{N_0}$ بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۳ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$\sigma^2_{\mathrm{BS-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-DR}} = 1, \sigma^2_{\mathrm{BS-DR}} = \sigma^2_{\mathrm{R-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-CR}} = 2, \sigma^2_{\mathrm{BS-R}} = 1.5, \sigma^2_{\mathrm{R-DR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-R}} = 0.7,$$
$$\overline{P}^{C}_{\mathrm{out}} = 0.1, \gamma_T = 2.5, R^P = 0.8\mathrm{bpcu}, R^S = 0.1\mathrm{bpcu}$$

همان‌طور که در شـــکل ۴-۳ مشـــاهده می‌شـــود، با توجه به مقدار Λ^+ در روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، یک نقطه سـد برای نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه وجود دارد که اگر نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه از مقدار سد کمتر باشد (یعنی $\gamma_{\text{cutoff}} = 8\text{dB}$)، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسـیله به وسیله مساوی با یک است و هیچ‌گونه ارسال اطلاعاتی در ارتباطات وسیله به وسیله انجام نمی‌گردد.

همچنین، با استفاده از عبارت Λ^+ در روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸) مشاهده می‌شود که مقدار سـد نسـبت سـیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه به عوامل مختلفی نظیر مقدار آستانه احتمال قطع شبکه سلولی، نرخ داده و ضریب کانال ایستگاه پایه به گیرنده شبکه سلولی بستگی دارد. بنابراین، می‌توان این مقدار سـد را از طریق بهبود عملکرد احتمال قطع شـبکه سـلولی با استفاده از روش‌های ارسـال پیشـرفته برای ارتباطات سـلولی نظیر ارسـال از طریق چندین فرسـتنده و چندین گیرنده[1] و چندگانگی مشارکتی کاهش داد.

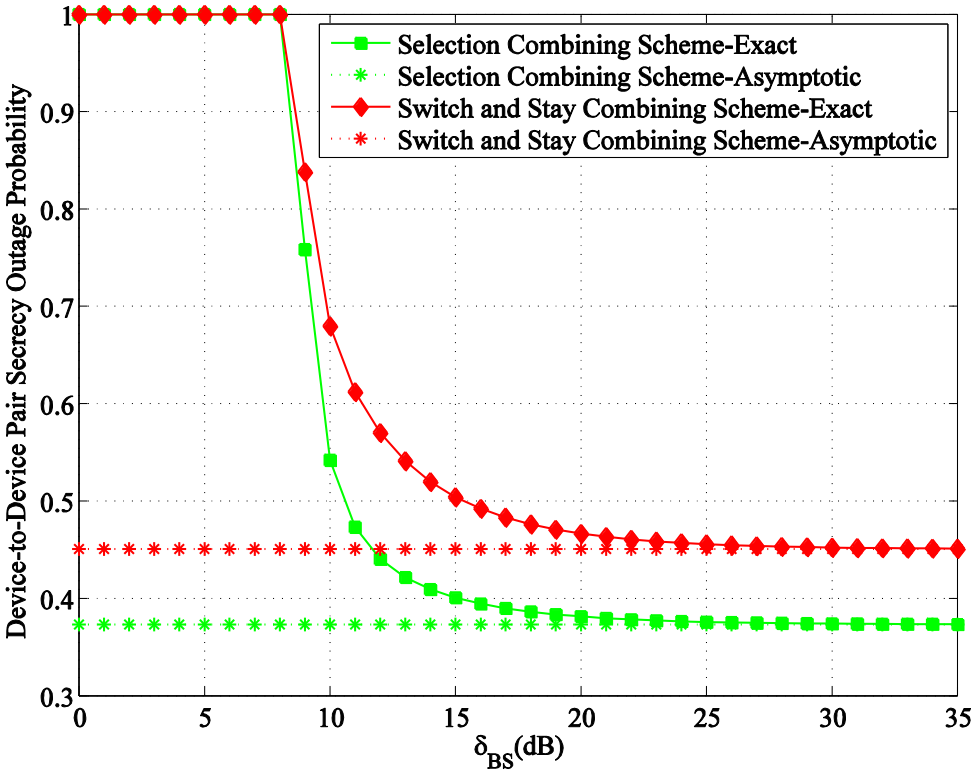
همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو حالت انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار کاهش می‌یابد و در مقادیر زیاد نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه به مقدار مجانبی میل می‌کند. این امر به این دلیل است که زمانی که ایستگاه پایه توان ارسالی‌اش را افزایش می‌دهد، با توجه به روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، فرستنده و رله غیرقابل اطمینان در ارتباطات وسیله به وسیله می‌توانند به همان نسبت با توان بیشتری سیگنال‌های خود را ارسال نمایند و بنابراین احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج شـبیه‌سازی در شکل ۴-۳ مشاهده می‌شود که احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسـیله به وسـیله در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح ترکیب سوییچ و استقرار کمتر است. این امر به این دلیل اسـت که در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی همواره کانالی با بیشترین نسبت

[1] Multiple input multiple output (MIMO)

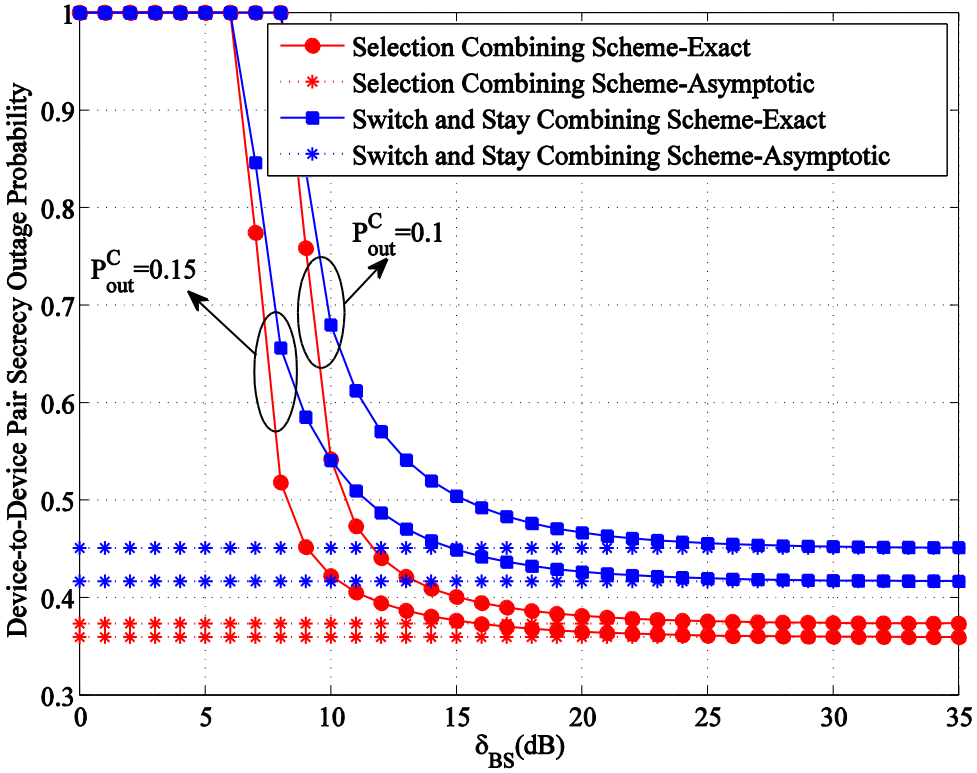
سـیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده انتخاب می‌شـود اما در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و اسـتقرار، گیرنده یک کانال را انتخاب می‌کند و تا وقتی‌که نسـبت سـیگنال به نویز بعلاوه تداخل آن کانال از مقدار آسـتانه تعیین‌شده کمتر نگردد به کانال دیگر سوییچ نمی‌کند و از این‌رو، در این حالت لزوماً کانالی با بیشـترین نسـبت سـیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده انتخاب نمی‌گردد. بنابراین، نسـبت سـیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسـیله به وسـیله با اسـتفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی همواره بزرگ‌تر یا مساوی طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار است. به همین دلیل، در حالت استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسـیله به وسیله بیشتر از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی است. بنابراین با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله نسبت به طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار کاهش و امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.

بـا توجه به مطالب بیان شـــده در بخش آنالیزهای مجانبی احتمال قطع امنیتی، همان‌طور که در شـکل ۴-۳ مشاهده می‌شود، مقدار کف احتمال قطع امنیتی در نواحی نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایسـتگاه پایه بالا اتفاق می‌افتد. این امر به این دلیل است که زمانی که نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه بالا است، تداخل ناشی از ارسال‌های شبکه سلولی فاکتور تعیین‌کننده جهت ایجاد کردن قطع ارتباطات وسـیله به وسیله است. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی، کف احتمال قطع امنیتی در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح انتخاب لینک ترکیب سـوییچ و اسـتقرار کمتر است که این امر بیانگر بهبود عملکرد امنیتی شـبکه در حضـور رله غیرقابل اطمینان با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده وسیله به وسیله است.



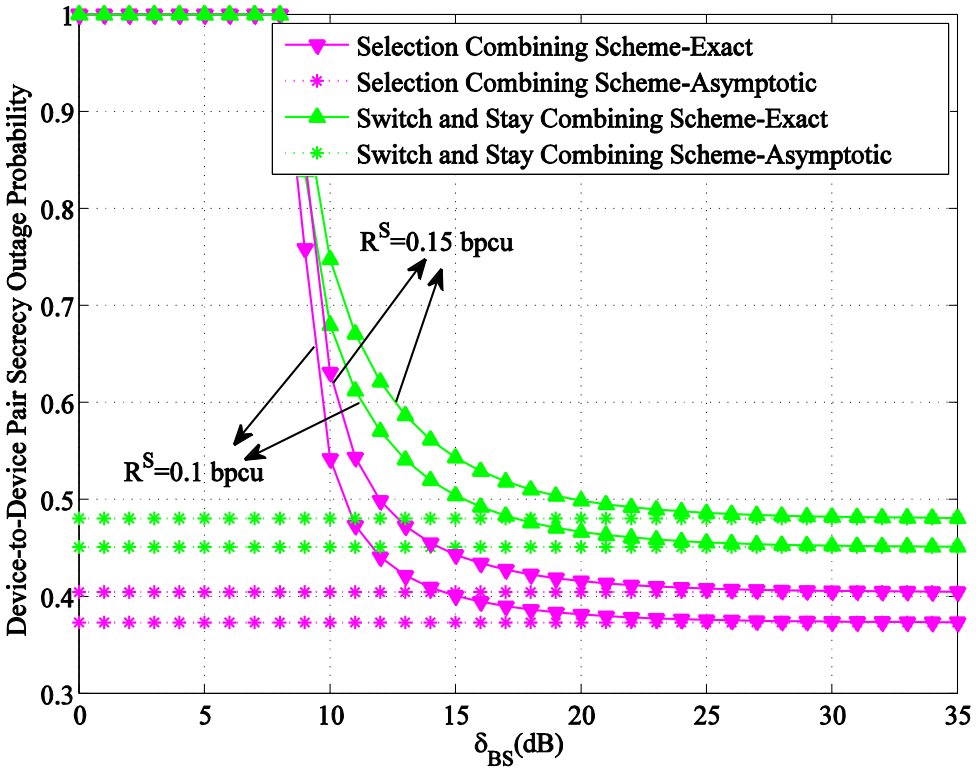
شکل ۴-۳: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

در شکل ۴-۴، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله به ازای تغییر مقدار آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه بررسی شده است. همان‌طور که در این شبیه‌سازی مشاهده می‌شود با افزایش آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی، با توجه به مقدار Λ^{+} در روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، نقطه سد نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۴: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار به ازای تغییر مقدار آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

در شکل ۴-۵، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله به ازای تغییر مقدار نرخ امنیتی شبکه برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش نرخ امنیتی شبکه، احتمال قطع در ارتباطات وسیله به وسیله افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۵: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار به ازای تغییر مقدار نرخ امنیتی شبکه برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

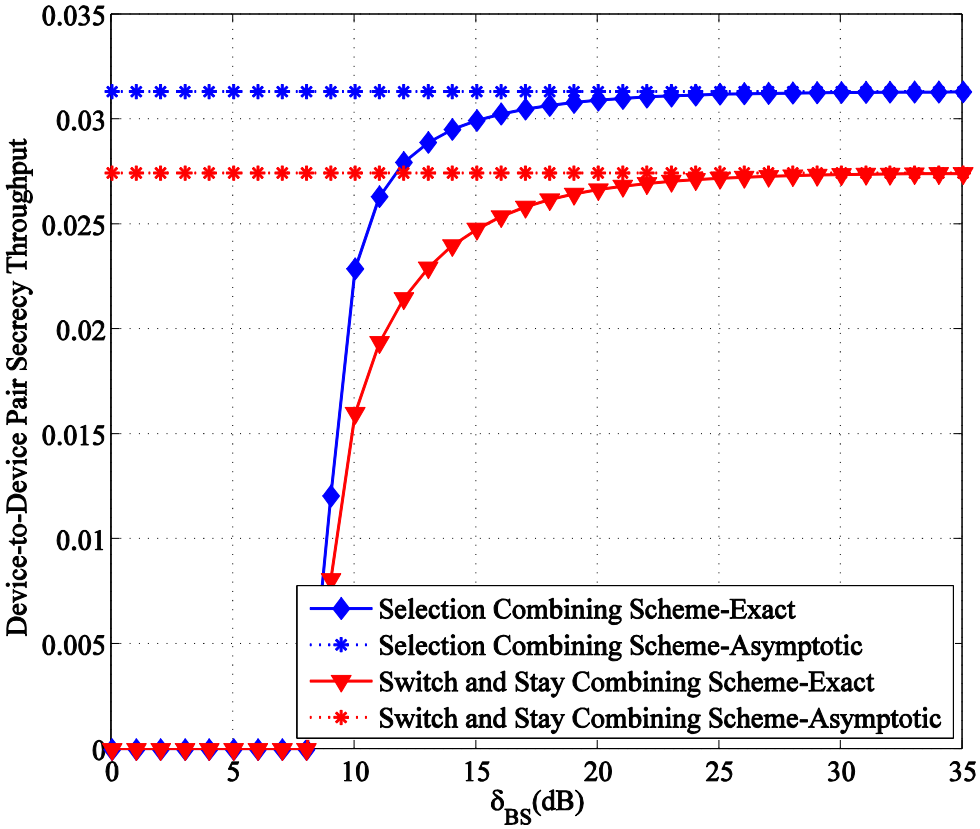
۴-۹-۲- بررسی بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

در این شبیه‌سازی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه مشابه با شبیه‌سازی قبلی تنظیم شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار افزایش می‌یابد و در مقادیر زیاد نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه به مقدار مجانبی میل

می‌کند. این امر به این دلیل است که با توجه به رابطه (۴-۵۸)، عبارت بازده امنیتی در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار تابعی از عبارت $1-P_{\text{out}}^{X}$ است. همان‌طور که در بخش ۴-۹-۱ بیان شد، با افزایش توان ارسالی ایستگاه پایه، با توجه به روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، فرستنده و رله غیرقابل اطمینان در ارتباطات وسیله به وسیله می‌توانند توان ارسالی خود را افزایش دهند و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار کاهش و درنتیجه مقدار بازده امنیتی افزایش می‌یابد.

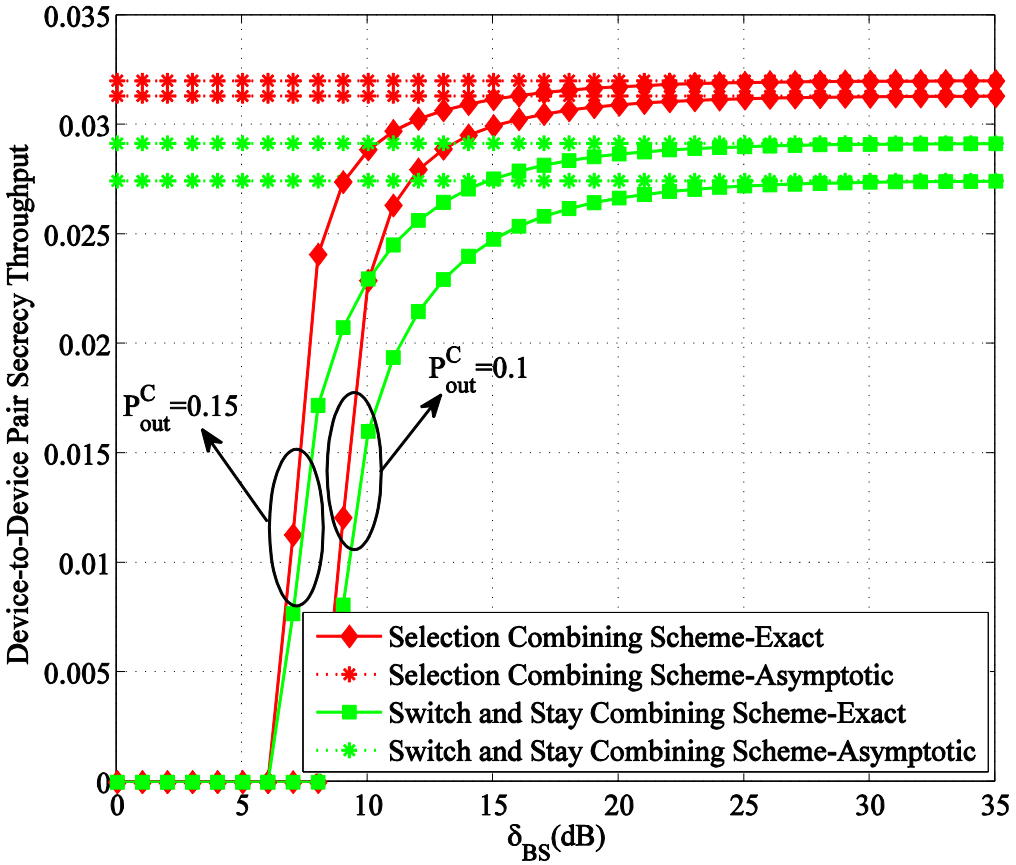
همچنین همان‌طور که در شکل ۴-۶ مشاهده می‌شود، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح ترکیب سوییچ و استقرار بیشتر است. بنابراین با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده، امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۶: مقایسه بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

در شکل ۴-۷، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله به ازای تغییر مقدار آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه بررسی شده است.

همان‌طور که بیان شد، با افزایش آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی، با توجه به مقدار Λ^+ در روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، نقطه سد نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه کاهش می‌یابد.



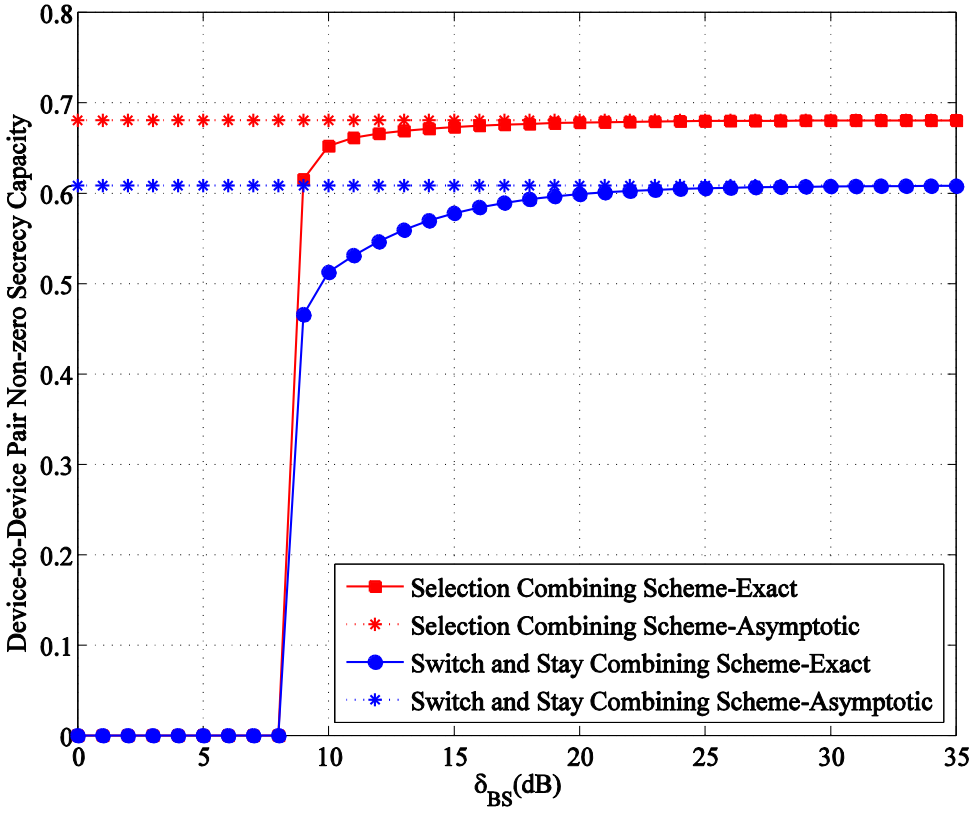
شکل ۴-۷: مقایسه بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار به ازای تغییر مقدار آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

۴-۹-۳- بررسی احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

در این شبیه‌سازی، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۸ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه مشابه با شبیه‌سازی بخش ۴-۹-۱ تنظیم شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار افزایش می‌یابد و در مقادیر زیاد نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه به مقدار مجانبی میل می‌کند. همان‌طور که در بخش ۴-۹-۱ بیان شد، این امر به این دلیل است که با افزایش توان ارسالی ایستگاه پایه، با توجه به روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، فرستنده و رله غیرقابل اطمینان در ارتباطات وسیله به وسیله می‌توانند توان ارسالی خود را افزایش دهند و بنابراین احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر در ارتباطات وسیله به وسیله افزایش می‌یابد.

همچنین همان‌طور که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح ترکیب سوییچ و استقرار بیشتر است. بنابراین با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده، امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۸: مقایسه احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برحسب نسبت سیگنال به نویز ارسالی ایستگاه پایه

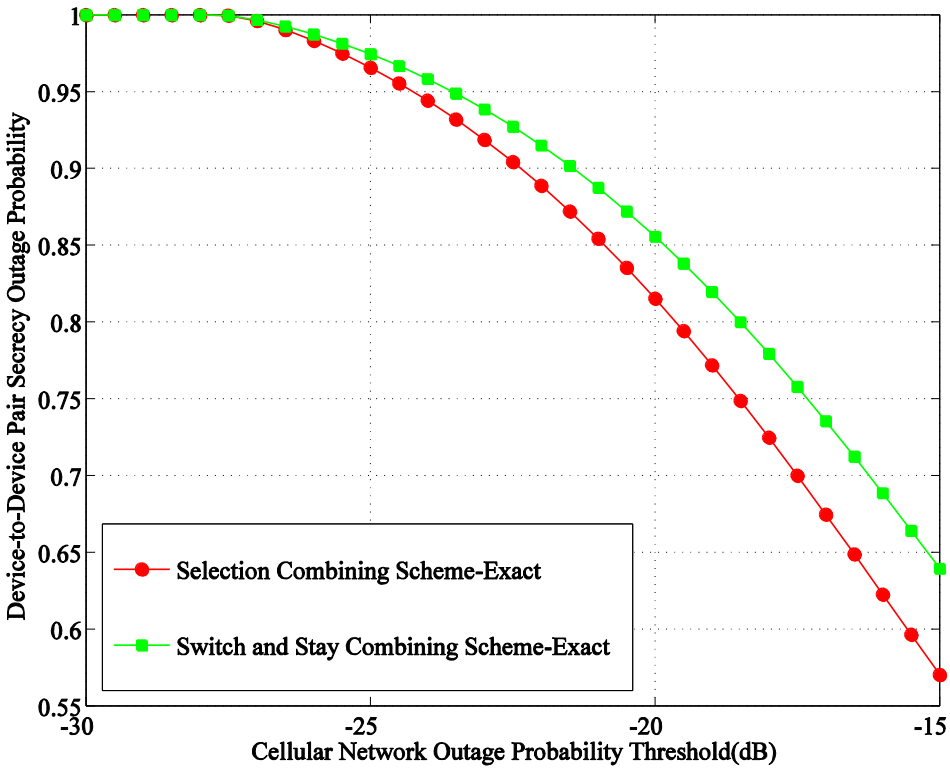
۴-۹-۴- بررسی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی

در این شبیه‌سازی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۹ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$\sigma^2_{\text{BS-CR}} = \sigma^2_{\text{DT-DR}} = 1, \sigma^2_{\text{BS-DR}} = \sigma^2_{\text{R-CR}} = \sigma^2_{\text{DT-CR}} = 2, \sigma^2_{\text{BS-R}} = 0.4, \sigma^2_{\text{R-DR}} = \sigma^2_{\text{DT-R}} = 0.5,$$
$$\delta_{\text{BS}} = 25\,\text{dB}, \gamma_T = 2.5, R^P = 0.6\,\text{bpcu}, R^S = 0.4\,\text{bpcu}$$

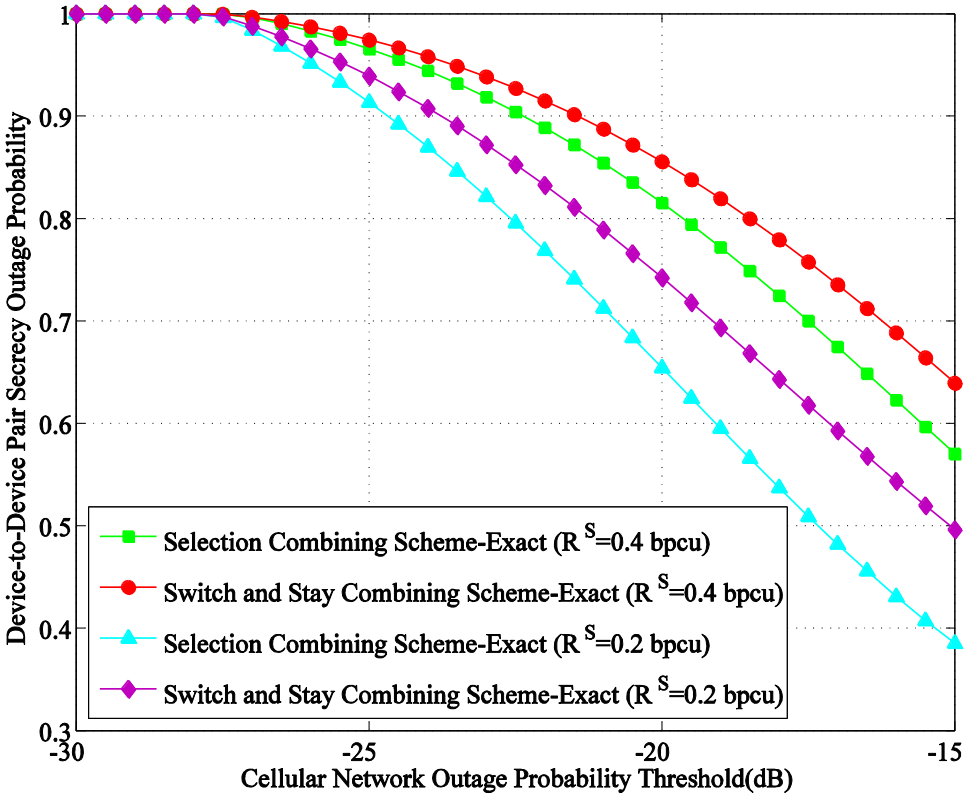
با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۴-۴ و همان‌طور که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود، یک مقدار سد برای مقدار آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی وجود دارد که اگر مقدار آستانه احتمال قطع در

شبکه سلولی از این مقدار کمتر باشد، هیچ‌گونه ارسال اطلاعاتی در ارتباطات وسیله به وسیله انجام نمی‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود، با افزایش آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با توجه به روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، زمانی که آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی افزایش یابد، فرستنده و رله غیرقابل اطمینان در ارتباطات وسیله به وسیله می‌توانند سیگنال‌های خود را با توان بیشتری ارسال نمایند و بنابراین احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح ترکیب سوییچ و استقرار کمتر است. بنابراین با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله نسبت به طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار کاهش و امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۹: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی

در شکل ۴-۱۰، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله به ازای تغییر مقدار نرخ امنیتی شبکه برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با کاهش نرخ امنیتی شبکه، مقدار احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۰: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار به ازای تغییر مقدار نرخ امنیتی شبکه برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی

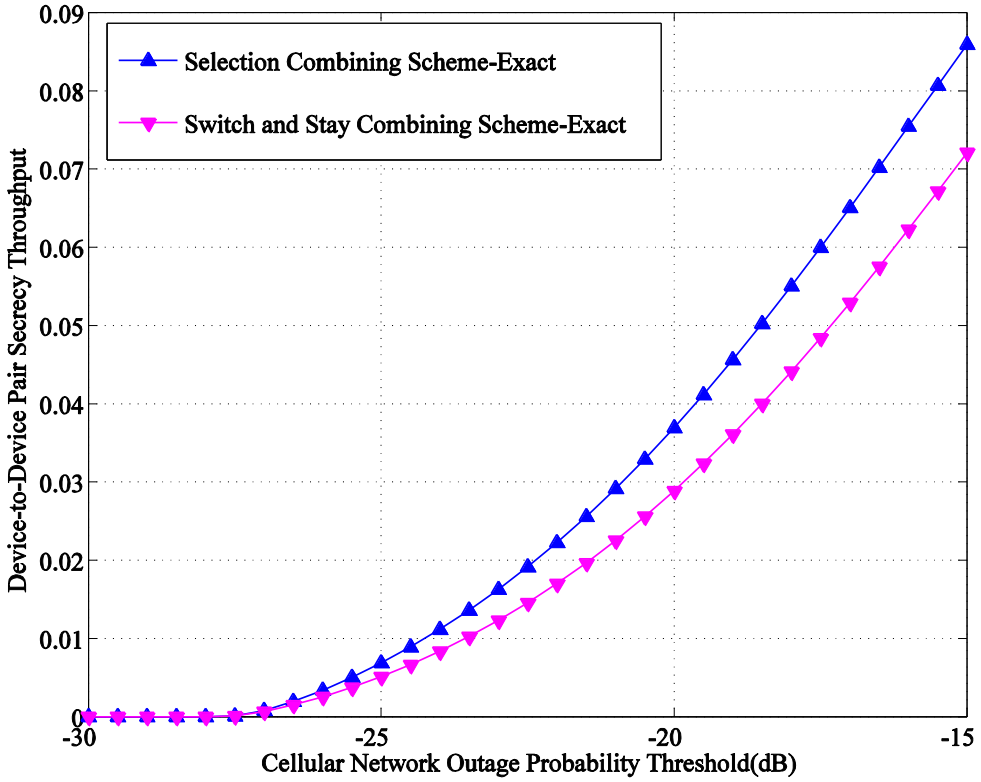
۴-۹-۵- بررسی بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی

در این شبیه‌سازی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی بررسی می‌کنیم.

نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه مشابه با شبیه‌سازی قبلی تنظیم شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با توجه به رابطه (۴-۵۸)، عبارت بازده امنیتی در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار تابعی از عبارت $1-P_{\text{out}}^{X}$ است. همان‌طور که در شبیه‌سازی قبلی بیان شد، با توجه به روابط محدودیت توان (۳-۳۷) و (۳-۳۸)، با افزایش آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی، فرستنده و رله غیرقابل اطمینان در ارتباطات وسیله به وسیله می‌توانند سیگنال‌های خود را با توان بیشتری ارسال نمایند و در نتیجه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار کاهش و درنتیجه مقدار بازده امنیتی افزایش می‌یابد.

همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بازده امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح ترکیب سوییچ و استقرار بیشتر است و با استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده، امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۱: مقایسه بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برحسب آستانه احتمال قطع در شبکه سلولی

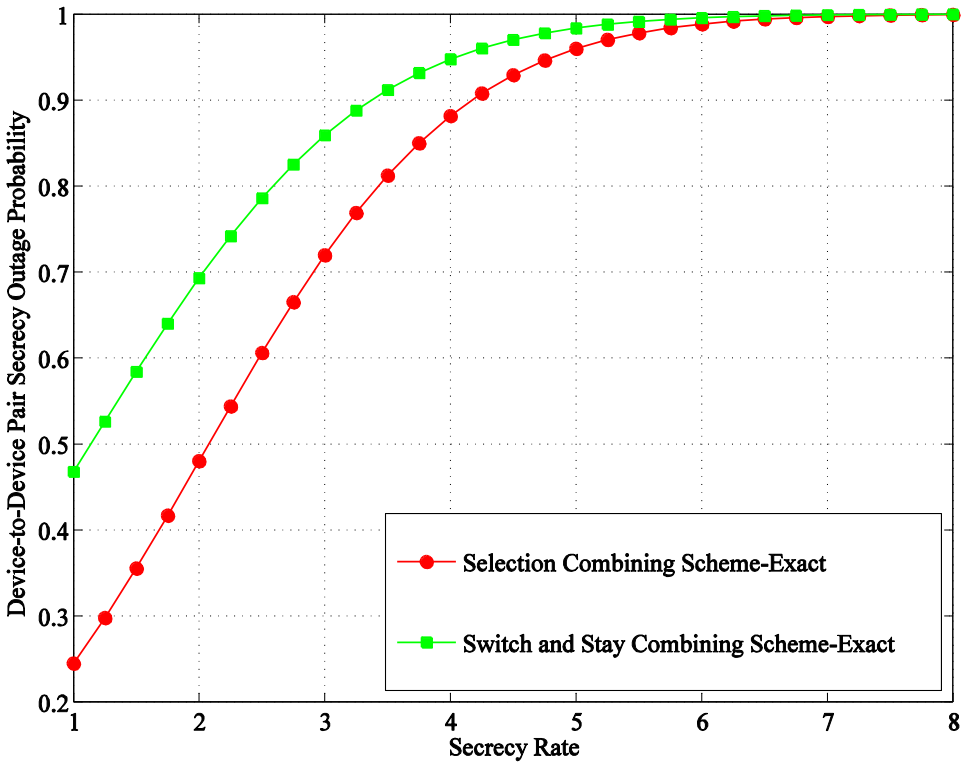
۴-۹-۶- بررسی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نرخ امنیتی

در این شبیه‌سازی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب نرخ امنیتی شبکه بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$\sigma^2_{\mathrm{BS-CR}}=\sigma^2_{\mathrm{DT-DR}}=1,\sigma^2_{\mathrm{BS-DR}}=\sigma^2_{\mathrm{DT-CR}}=\sigma^2_{\mathrm{R-CR}}=4,\sigma^2_{\mathrm{BS-R}}=0.4,\sigma^2_{\mathrm{R-DR}}=\sigma^2_{\mathrm{DT-R}}=0.5,$$
$$\delta_{\mathrm{BS}}=25\,\mathrm{dB},\gamma_T=0.5,\overline{P}^{C}_{\mathrm{out}}=0.99,R^P=0.1\mathrm{bpcu}$$

همان‌طور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ امنیتی شبکه، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار افزایش می‌یابد.

همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح ترکیب سوییچ و استقرار کمتر است و بنابراین با استفاده از این طرح، امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۲: مقایسه احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برحسب نرخ امنیتی شبکه

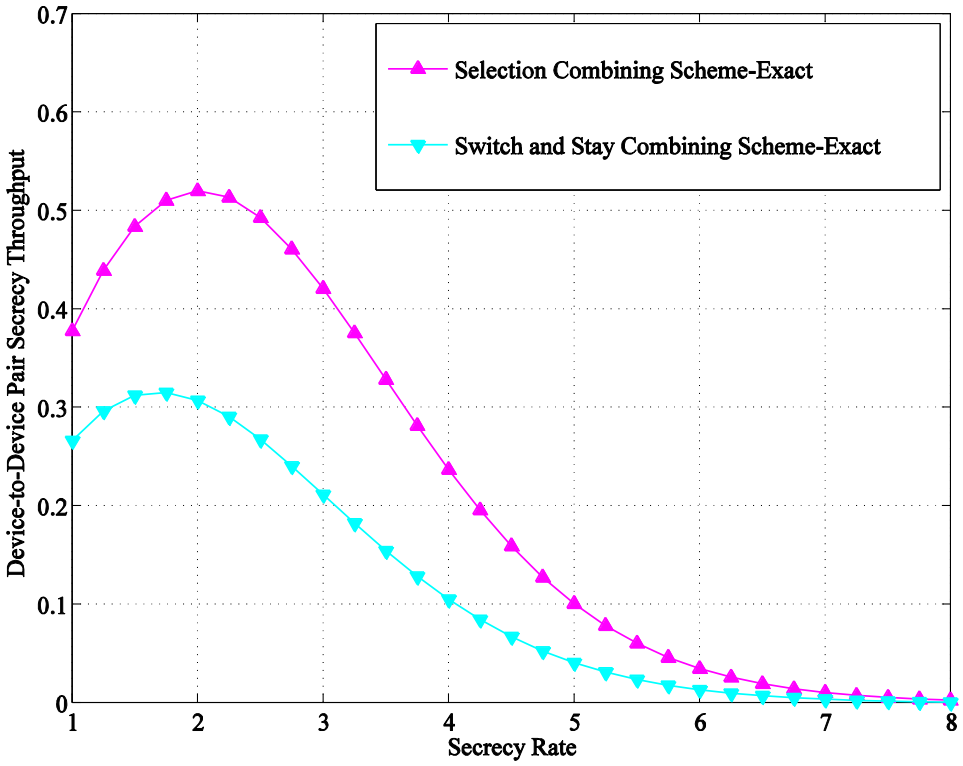
۴-۹-۷- بررسی بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله برحسب نرخ امنیتی

در این شبیه‌سازی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب نرخ امنیتی شبکه بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه مشابه با شبیه‌سازی قبلی تنظیم شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش نرخ امنیتی شبکه، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در هر دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با توجه به رابطه (۴-۵۸)، عبارت بازده امنیتی ارتباطات

وسیله به وسیله تابعی از حاصل‌ضرب دو عبارت است که با افزایش R^S، عبارت اول (R^S) افزایش و عبارت دوم ($1-P_{\text{out}}^X$) کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش نرخ امنیتی R^S در شکل ۴-۱۳، عبارت بازده امنیتی از مقدار صفر تا یک مقداری افزایش و از آن به بعد تا مقدار صفر کاهش می‌یابد.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بازده امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی از طرح ترکیب سوییچ و استقرار بیشتر است و بنابراین با استفاده از این طرح، امنیت شبکه در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۳: مقایسه بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار برحسب نرخ امنیتی شبکه

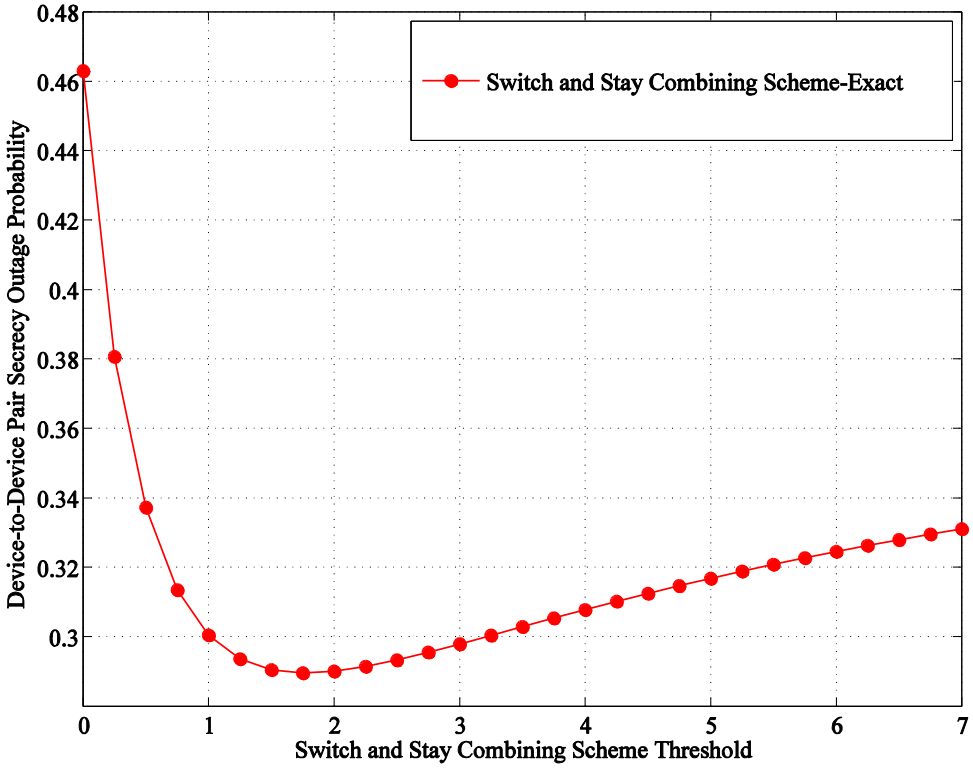
۴-۹-۸- بررسی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار برحسب مقدار آستانه γ_T

در این شبیه‌سازی، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب مقدار آستانه γ_T بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$\sigma^2_{\mathrm{BS-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-DR}} = 1, \sigma^2_{\mathrm{BS-DR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-CR}} = \sigma^2_{\mathrm{R-CR}} = 4, \sigma^2_{\mathrm{BS-R}} = 1.5, \sigma^2_{\mathrm{R-DR}} = \sigma^2_{\mathrm{DT-R}} = 0.7,$$
$$\overline{P}^{C}_{\mathrm{out}} = 0.1, R^P = 1\mathrm{bpcu}, R^S = 0.1\mathrm{bpcu}, \delta_{\mathrm{BS}} = 25\mathrm{dB}$$

همان‌طور که در شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار آستانه γ_T در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله تا مقدار $\gamma_T = 1.5$ کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با توجه به رابطه (۴-۴۷)، در صورتی که در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار مقدار γ برابر با مقدار γ_T گردد، رابطه تابع توزیع تجمعی آن مشابه با رابطه تابع توزیع تجمعی در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی می‌شود. از آنجایی که در طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی همواره مسیری با بیشترین نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل در گیرنده وسیله به وسیله انتخاب می‌شود، در مقایسه با طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار احتمال قطع امنیتی کاهش و درنتیجه امنیت ارسال اطلاعات در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.

بنابراین، در صورتی که مقدار γ در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار برابر با مقدار آستانه γ_T گردد، عملکرد این طرح مشابه با طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی می‌شود و مقدار احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله با استفاده از این طرح به کمترین مقدار خود می‌رسد.



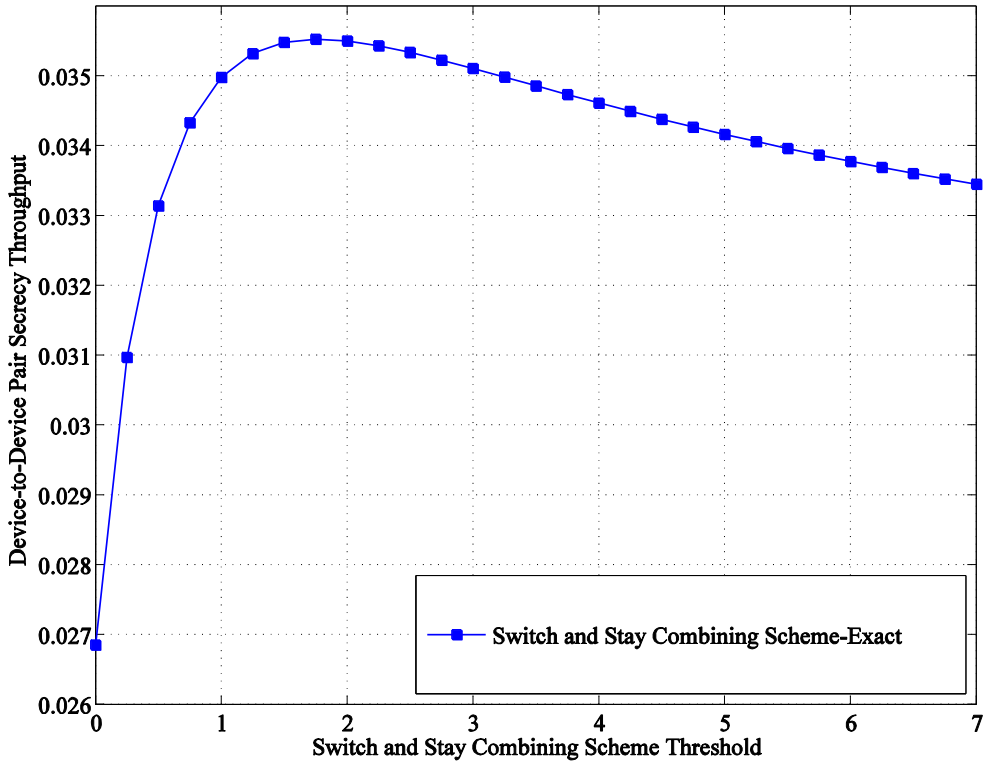
شکل ۴-۱۴: احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار برحسب مقدار آستانه γ_T

۴-۹-۹- بررسی بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار برحسب مقدار آستانه γ_T

در این شبیه‌سازی، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار را برحسب مقدار آستانه γ_T بررسی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است که در آن پارامترهای شبکه مشابه با شبیه‌سازی قبلی تنظیم شده‌اند.

با توجه به شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار آستانه γ_T، بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار تا مقدار $\gamma_T=1.5$ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با توجه به رابطه (۴-۵۸)، عبارت بازده امنیتی در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار تابعی از عبارت $1-P_{\text{out}}^{\text{SSC}}$ است. همان‌طور که در شبیه‌سازی قبلی بیان

شد، با افزایش مقدار آستانه γ_T در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار، مقدار احتمال قطع امنیتی تا مقدار γ_T =1.5 کاهش و سپس افزایش می‌یابد و درنتیجه مقدار بازده امنیتی تا این مقدار افزایش و سپس کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۵: بازده امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در طرح انتخاب لینک ترکیب سوییچ و استقرار برحسب مقدار آستانه γ_T

۴-۱۰- نتیجه‌گیری

در این فصل، انتخاب لینک بر اساس طرح‌های ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار را در ارتباطات وسیله به وسیله‌ای که علاوه بر کانال مستقیم با استفاده از یک رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان به‌صورت زمینه‌ای در شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌کند، مطالعه کردیم. همانند فصل قبل، به‌منظور حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی، در این فصل نیز توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان را به‌گونه‌ای محدود کردیم که احتمال قطع در شبکه سلولی از یک مقدار آستانه بیشتر نگردد. همچنین، عملکرد ارتباطات وسیله به وسیله در حضور

رله غیرقابل اطمینان بر اساس طرح‌های انتخاب لینک پیشنهاد شده در گیرنده وسیله به وسیله را به‌صورت احتمال قطع امنیتی مطالعه و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را برای هرکدام از دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه کردیم. بعلاوه، رابطه بازده امنیتی، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر و مقدار مجانبی احتمال قطع امنیتی شبکه در توان‌های ارسالی بالا به‌صورت یک عبارت بسته بیان شده است.

در پایان این فصل، عملکرد قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حالت استفاده از دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله را برحسب تغییرات پارامترهای گوناگون شبکه شبیه‌سازی کردیم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که در حالت استفاده از طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی در گیرنده نسبت به حالت استفاده از طرح ترکیب سوییچ و استقرار، احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله کمتر می‌گردد و درنتیجه امنیت ارسال اطلاعات در حضور رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای ادامه کار در آینده

۵-۱- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پایان‌نامه، بررسی عملکرد امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله که به‌صورت زمینه‌ای در شبکه سلولی ارسال اطلاعات می‌کند در حضور شنودگر در شبکه است که در آن جهت حفظ امنیت ارسال اطلاعات در برابر شنودگر و گسترش محدوده ارتباطات وسیله به وسیله علاوه بر ارسال اطلاعات از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده وسیله به وسیله، ارسال اطلاعات از طریق طرح مشارکتی را پیشنهاد کردیم. همچنین، جهت حفظ کیفیت سرویس کاربران شبکه سلولی، توان ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله و رله را محدود کردیم. در حالت کلی دو مدل سیستمی مجزا در این پایان‌نامه پیشنهاد شده است. به دلیل در نظر گرفتن اثرات توأم تداخل و مسائل امنیتی در دو مدل سیستمی پیشنهادی در این پایان‌نامه و همچنین به دلیل استفاده از ارتباطات مشارکتی و دریافت سیگنال از طریق کانال مستقیم و رله و وجود چندگانگی در ارتباطات وسیله به وسیله، محاسبه روابط مربوط به توابع توزیع و توابع چگالی احتمال پارامترهای شبکه و درنتیجه محاسبه احتمال قطع امنیتی شبکه چالش‌برانگیز است که در این پایان‌نامه با استفاده از روش‌هایی توانستیم احتمال قطع امنیتی ارتباط در شبکه را به‌صورت عباراتی بسته محاسبه کنیم.

در مدل سیستمی اول، فرض کردیم یک شنودگر در شبکه حضور دارد که قادر به کشف سیگنال‌های ارسالی در ارتباطات وسیله به وسیله است و جهت افزایش امنیت ارسال اطلاعات در ارتباطات وسیله به وسیله، علاوه بر ارسال اطلاعات از طریق کانال مستقیم بین فرستنده و گیرنده، ارسال مشارکتی با استفاده از چندین رله دیکد و ارسال را پیشنهاد کردیم. از آنجایی که سیگنال ارسالی توسط فرستنده وسیله به وسیله در طول دو بازه زمانی و از طریق دو کانال مستقیم و رله ارسال می‌گردد، به دلیل ایجاد چندگانگی در گیرنده وسیله به وسیله و شنودگر، در این مدل سیستمی فرض کردیم گیرنده و شنودگر از طرح انتخاب لینک ترکیب حداکثر نسبت استفاده می‌کنند. همچنین طرح انتخاب رله بر اساس ضریب کانال رله تا گیرنده را پیشنهاد و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله را در این طرح

به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه و درنهایت عبارت بازده امنیتی را بر اساس احتمال قطع امنیتی شبکه بیان کردیم. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده کاهش احتمال قطع امنیتی در ارتباطات وسیله به وسیله در طرح مشارکتی پیشنهادی نسبت به طرح غیر مشارکتی است و بنابراین با استفاده از طرح انتخاب رله پیشنهادی امنیت ارسال اطلاعات در برابر شنودگر افزایش می‌یابد.

در مدل سیستمی دوم، فرض کردیم ارسال اطلاعات بین فرستنده و گیرنده در ارتباطات وسیله به وسیله علاوه بر کانال مستقیم از طریق یک رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان که به‌صورت شنودگر در شبکه عمل می‌کند، انجام می‌شود. به دلیل دریافت سیگنال از طریق دو کانال مستقیم و رله در گیرنده وسیله به وسیله و ایجاد چندگانگی در آن، دو طرح انتخاب لینک ترکیب انتخابی و ترکیب سوییچ و استقرار در گیرنده وسیله به وسیله را پیشنهاد و احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در حضور رله غیرقابل اطمینان را در این دو طرح پیشنهادی به‌صورت یک عبارت بسته محاسبه کردیم. درنهایت عبارت بازده امنیتی، احتمال ظرفیت امنیتی غیر صفر و مقادیر مجانبی احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله در مقادیر توان ارسالی بالا بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با استفاده از طرح انتخاب لینک پیشنهادی ترکیب انتخابی در گیرنده، احتمال قطع امنیتی ارتباطات وسیله به وسیله نسبت به طرح ترکیب سوییچ و استقرار کاهش و درنتیجه با استفاده از این طرح، امنیت ارسال اطلاعات در مقابل رله غیرقابل اطمینان افزایش می‌یابد.

۵-۲- پیشنهاد برای ادامه کار در آینده

جهت ادامه تحقیق در زمینه این پایان‌نامه، پیشنهاد می‌کنیم که هر یک از دو مدل سیستمی پیشنهادی در این پایان‌نامه در حالت‌های زیر توسعه داده شود و در این صورت می‌توانیم از راهکارهای محاسباتی ارائه شده در این پایان‌نامه جهت حل این مسائل جدید بهره ببریم:

- استفاده از چندین آنتن در فرستنده و گیرنده شبکه

- حضور چندین شنودگر در شبکه
- استفاده از ارتباطات مشارکتی در ارتباطات سلولی
- استفاده از رله دو جهته[1]
- برقراری ارتباط مشارکتی از طریق چندین رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان
- ارسال نویز توسط رله جهت گمراه کردن شنودگر
- ارسال نویز توسط گیرنده جهت گمراه کردن رله غیرقابل اطمینان
- حضور پارازیت دهنده[2] در شبکه

در این پایان‌نامه فرض کردیم ضرایب کانال‌ها در دسترس نیست و فرستنده‌های شبکه ارسال اطلاعات خود را با نرخ داده و توان ارسالی ثابتی انجام می‌دهند که در این حالت عملکرد شبکه را بر اساس احتمال قطع امنیتی بررسی کردیم. برای ادامه این تحقیق در آینده، پیشنهاد می‌شود مدل‌های سیستمی ارائه شده در این پایان‌نامه، در حالتی که ضرایب کانال‌های شبکه در دسترس هستند بررسی گردد و نرخ داده و توان‌های ارسالی شبکه جهت بهینه‌سازی عملکرد کیفیت سرویس کاربران شبکه به‌صورت متغیر با زمان تخصیص داده شوند که این مسئله تخصیص منابع به‌صورت روابط بهینه‌سازی مطرح می‌گردد.

[1] Two-way relay
[2] Jammer

فهرست مراجع

[1] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, 1st ed. Cambridge University Press, 2005.

[2] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.

[3] J. S. Gans, S. P. King, and J. Wright, **"**Handbook of telecommunications economics,**"** vol. 2, ed. North Holland, 2006, pp. 243-244.

[4] M. N. Tehrani, M. Uysal, and H. Yanikomeroglu, **"**Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions,**"** *IEEE Communications Magazine,* vol. 52, no. 5, pp. 86-92, May 2014.

[5] J. Qiao, X. Shen, J. W. Mark, Q. Shen, Y. He, and L. Lei, **"**Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks,**"** *IEEE Communications Magazine,* vol. 53, no. 1, pp. 209-215, January 2015.

[6] K. Doppler, M. Rinne, C.Wijting, C. B. Ribeiro, and K. Hugl, **"**Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks,**"** *IEEE Communications Magazine,* vol. 47, no. 12, pp. 42-49, December 2009.

[7] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, G. Li, G. Feng, and S. Li, **"**Device-to-device communications underlaying cellular networks,**"** *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 8, pp. 3541-3551, August 2013.

[8] D. Zhu, J. Wang, A. Swindlehurst, and C. Zhao, **"**Downlink resource reuse for device-to-device communications underlaying cellular networks,**"** *IEEE Signal Processing Letters,* vol. 21, no. 5, pp. 531-534, May 2014.

[9] P. Phunchongharn, E. Hossain, and D. I. Kim, **"**Resource allocation for device-to-device communications underlaying LTE-advanced networks,**"** *IEEE Wireless Communications,* vol. 20, no. 4, pp. 91-100, August 2013.

[10] M. Chiang, P. Hande, T. Lan, and C. W. Tan, **"**Power control in wireless cellular networks,**"** *Foundations and Trends in Networking sample,* vol. 2, pp. 381-533, 2008.

[11] Y. Sun, W. Trappe, and K. J. R. Liu, *Network-aware Security for Group Communications*, Springer, 2007.

[12] Y. Liang, H. V. Poor, and L. Ying, **"**Wireless broadcast networks: reliability, security, and stability,**"** in *IEEE Information Theory and Applications Workshop,* Feburary 2008, pp. 249-255.

[13] C. E. Shannon, **"**Communication theory of secrecy systems,**"** *Bell Systems Tech. Journal,* vol. 28, pp. 656-715, October 1949.

[14] A. D. Wyner, **"**The wire-tap channel,**"** *The Bell System Technical Journal,* vol. 54, no. 8, pp. 1355-1387, October 1975.

[15] S. K. Leung-Yan-Cheong and M. E. Hellman, **"**The gaussian wiretap channel,**"** *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. 24, no. 4, pp. 451-456, July 1978.

[16] I. Csiszar and J. Korner, **"**Broadcast channel with confidential messages,**"** *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. 24, no. 3, pp. 339-348, May 1978.

[17] M. Dohler and Y. Li, *Cooperative Communications: Hardware, Channel and PHY. Hoboken,* Wiley Publishing, 2010.

[18] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, **"**Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior,**"** *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, December 2004.

[19] S. Ikki and M. H. Ahmed, **"**Performance analysis of adaptive decode-and-forward cooperative diversity networks with best-relay selection,**"** *IEEE Transactions on Communications,* vol. 58, no. 1, pp. 68-72, January 2010.

[20] L. Lai and H. E. Gamal, **"**The relay-eavesdropper channel: cooperation for secrecy,**"** *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. 54, no. 9, pp. 4005-4019, September 2008.

[21] E. C. V. d. Meulen, **"***Three-terminal Communication Channels,***"** *Advanced Applied Probability,* vol. 3, pp. 120-154, 1971.

[22] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, G. Miklos, *and Z. Turanyi,* **"**Design aspects of network assisted device-to-device communications,**"** *IEEE Communications Magazine,* vol. 50, no. 3, pp. 170-177, March 2012.

[23] G. Yu, L. Xu, D. Feng, R. Yin, G. Y. Li, and Y. Jiang, **"**Joint mode selection and resource allocation for device-to-device communications,**"** *IEEE Transactions on Communications,* vol. 62, no. 11, pp. 3814-3824, November 2014.

[24] P. K. Gopala, L. Lai, and H. El-Gamal, **"**On the secrecy capacity of fading channels,**"** *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. 54, no. 10, pp. 4687-4698, October 2008.

[25] J. Barros and M. Rodrigues, "Secrecy capacity of wireless channels," in *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, July 2006, pp. 356-360.

[26] M. Bloch and J. Barros, *Physical Layer Security: From Information Theory to Security Engineering*, Cambridge University Press, 2011.

[27] X. Tang, R. Liu, and P. Spasojevic, "On the achievable secrecy throughput of block fading channels with no channel state information at transmitter," in *41st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, March 2007, pp. 917-922.

[28] X. Tang, R. Liu, P. Spasojevic, and H. Poor, "On the throughput of secure hybrid-ARQ protocols for gaussian block-fading channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 4, pp. 1575-1591, April 2009.

[29] E. Biglieri, J. Proakis, and S. Shamai, "Fading channels: informationtheoretic and communications aspects," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 6, pp. 2619-2692, October 1998.

[30] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over rayleigh-fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, November 2003.

[31] M. K. Simon and M. S. Alouini, *Digital communication over fading channels*, A Wiley-Interscience Publication, 2000.

[32] Z. Dai, J. Liu, and C. Wang, "QoS-based device-to-device communication schemes in heterogeneous wireless networks," *IET Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 335-341, 2015.

[33] Y. Cheng, Y. Gu, and X. Lin, "Combined power control and link selection in device-to-device enabled cellular systems," *IET Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 1221-1230, August 2013.

[34] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, J. Wu, and T. Sato, "Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in device-to-device (D2D) communications," *IEEE Wireless Communicaions Letters*, vol. 3, no. 5, pp. 485-488, October 2014.

[35] M. Peng, Y. Li, T. Q. S. Quek, and C. Wang, "Device-to-device underlaid cellular networks under rician fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 8, pp. 4247-4259, August 2014.

[36] Y. Chen, S. He, F. Hou, Z. Shi, and X. Chen, **"**Optimal user-centric relay assisted device-to-device communications: an auction approach,**"** *IET Communications,* vol. 9, no. 3,pp. 386-395, 2015.

[37] G. Zhang, K. Yang, P. Liu, and J. Wei, **"**Power allocation for full-duplex relaying based D2D communication underlaying cellular networks,**"** *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* 2015.

[38] L. Wei, R. Q. Hu, Y. Qian, and G. Wu, **"**Energy-efficiency and spectrum-efficiency of multi-hop device-to-device communications underlaying cellular networks,**"** *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* 2015.

[39] Y. Zhao, Y. Li, X. Chen, and N. Ge, **"**Joint optimization of resource allocation and relay selection for network coding aided device-to-device communications,**"** *IEEE Communicaions Letters,* vol. 19, no. 5, pp. 807-810, May 2015.

[40] T. Kim and M. Dong, **"**An iterative approach to joint relay selection and resource allocation for D2D communications,**"** *IEEE Wireless Communicaions Letters,* vol. 3, no. 6, pp. 625-628, December 2014.

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

[42] S. Majhi, S. S. Kalamkar, and A. Banerjee, **"**Secondary outage analysis of amplify-and-forward cognitive relays with direct link and primary interference,**"** in *Twenty First National Conference on Communications (NCC),* 2015, pp. 1-6.

[43] F. R. V. Guimares, D. B. d. Costa, T. A. Tsiftsis, C. C. Cavalcante, and G. K. Karagiannidis, **"**Multiuser and multirelay cognitive radio networks under spectrum-sharing constraints,**"** *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* vol. 63, no. 1, pp. 433-439, January 2014.

[44] F. R. V. Guimares, D. B. d. Costa, M. Benjillali, T. A. Tsiftsis, and G. K. Karagiannidis, **"**Cooperative spectrum sharing systems with relay selection in the presence of multiple primary receivers,**"** *IET Communications,* vol. 8, no. 4, pp. 546-553, 2014.

[45] G. Brante, H. Alves, R. D. Souza, and M. L. aho, **"**Secrecy analysis of transmit antenna selection cooperative schemes with no channel state information at the transmitter,**"** *IEEE Transactions on Communications,* vol. 63, no. 4, pp. 1330-1342, April 2015.

[46] I. Krikidis, **"**Opportunistic relay selection for cooperative networks with secrecy constraints,**"** *IET Communications*, vol. 4, no. 15, pp. 1787- 1791, October 2010.

[47] V. N. Q. Bao, N. Linh-Trung, and M. e. Debbah, **"**Relay selection schemes for dual-hop networks under security constraints with multiple eavesdroppers,**"** *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 12, pp. 6076-6085, December 2013.

[48] S. Yan, M. Peng, W. Wang, L. Dong, and M. Ahmed, **"**Relay self-selection for secure cooperative in amplify-and-forward networks,**"** in *7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, August 2012, pp. 581-585.

[49] Y. Zou, X. Wang, and W. Shen, **"**Optimal relay selection for physical-layer security in cooperative wireless networks,**"** *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 10, pp. 2099-2111, October 2013.

[50] M. Ju, K. S. Hwang, and M. S. Alouini, **"**Relay selection of nonregenerative secure relay networks,**"** in *IEEE InternationaI Conference on Communications (ICC)*, Jun 2014, pp. 5018 -5022.

[51] F. S. Al-Qahtani, C. Zhong, and H. Alnuweiri, **"**Opportunistic relay selection for secrecy enhancement in cooperative networks,**"** *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 5, pp. 1756-1770, May 2015.

[52] T. T. Duy and V. N. Q. Bao, **"**Relay selection for secured communication in interference-limited networks,**"** in *The first NAFOSTED Conference on Information and Computer Science*, 2015.

[53] T. T. Duy, T. Q. Duong, T. L. Thanh, and V. N. Q. Bao, **"**Secrecy performance analysis with relay selection methods under impact of co-channel interference,**"** *IET Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 1427-1435, 2015.

[54] X. He and A. Yener, **"**Cooperation with an untrusted relay: A secrecy perspective,**"** *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 8, pp. 3807-3827, August 2010.

[55] X. He and A. Yener, **"**End-to-end secure multi-Hop communication with untrusted relays,**"** *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 1-11, January 2013.

[56] X. He and A. Yener, "Strong secrecy and reliable byzantine detection in the presence of an untrusted relay," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 59, no. 1, pp. 177-192, January 2013.

[57] M. Ju and D.-H. Kim, "Performance of untrusted amplify-and-forward relaying," in *4th International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation (ISMS)*, January 2013, pp. 575-577.

[58] M. Ju, D. H. Kim, and K. S. Hwang, "Opportunistic transmission of nonregenerative network with untrusted relay," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 6, pp. 2703-2709, June 2015.

[59] J. Huang, A. Mukherjee, and A. L. Swindlehurst, "Secure communication via an untrusted non-regenerative relay in fading channels," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 10, pp. 2536-2550, May 2013.

[60] J. Hu and N. C. Beaulieu, "Performance analysis of decode-and-forward relaying with selection combining," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 6, pp. 489-491, June 2007.

[61] D. S. Michalopoulos and G. K. Karagiannidis, "Distributed switch-and-stay combining (DSSC) with a single decode-and-forward relay," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 408-410, May 2007.

[62] J. G. Proakis, *Digital communications*, 4th ed. Mc Graw Hill, 2000.

[63] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 4th ed. McGraw-Hill, 2002.

[64] L. Musavian, S. Aissa, and S. Lambotharan, "Effective capacity for interference and delay constrained cognitive radio relay channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, pp. 1698-1707, May 2010.

[65] A. Bletsas, H. Shin, and M. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 9, pp. 3450-3460, September 2007.

[66] P. A. Anghel and M. Kaveh, "Exact symbol error probability of a cooperative network in a rayleigh-fading environment," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 1416-1421, September 2004.

[67] L. Fan, X. Lei, T. Q. Duong, M. Elkashlan, and G. K. Karagiannidis, "Secure multiuser communications in multiple amplify-and-forward relay networks,"

IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 9, pp. 3299-3310, September 2014.

[68] A. Jindal, C. Kundu, and R. Bose, **"**Secrecy outage of dual-hop AF relay system with relay selection without eavesdropper's CSI,**"** *IEEE Communications Letters,* vol. 18, no. 10, pp. 1759 - 1762, October 2014.

[69] X. He and A. Yener, **"**Cooperation with an untrusted relay: A secrecy perspective,**"** *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 8, pp. 3807-3827, August 2010.

[70] I. S. Gradshteyxn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 6th ed. Academic Press, 2000.

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

اتلاف فضای آزاد	Free-space loss
احتمالات قطع	Outage probability
احتمال قطع امنیتی	Secrecy outage probability
آرایه آنتن	Antenna array
ارتباط بی‌سیم	Wireless communication
ارتباط مستقیم	Direct transmission
ارتباطات مشارکتی	Cooperative communications
ارتباطات وسیله به وسیله	Device-to-Device communications
آستانه	Threshold
اطلاعات لحظه‌ای	Instantaneous information
اطلاعات کانال	Channel side information
افت مسیر	Path loss
امنیت	Security
آنالوگ	Analoge
آنالیزهای مجانبی	Asymptotic analysis
انتخاب رله	Relay selection
انتخاب رله توزیع شده	Distributed relay selection
انتخاب رله متمرکز	Centralized relay selection
انتخاب لینک	Link selection
انتخاب حالت	Mode selection

Base station	ایستگاه پایه
Encode	اینکد
Secrecy throughput	بازده امنیتی
Time slot	بازه زمانی
Degraded	بدتر
Gain	بهره
Reuse gain	بهره استفاده مجدد
Hop gain	بهره جهش
Proximity gain	بهره نزدیکی
Optimal	بهینه
Jammer	پارازیت دهنده
Broadcast	پخشی
Coverage	پوشش
Bandwith	پهنای باند
Exponential integral function	تابع انتگرال نمایی
Utility function	تابع بهره
Delay	تأخیر
Timer	تایمر
Information theory	تئوری اطلاعات
Channel assignment	تخصیص کانال
Resource allocation	تخصیص منابع
Estimation	تخمین

Interference	تداخل
Mutual interference	تداخل متقابل
Data traffic	ترافیک داده
Threshold combining	ترکیب آستانه‌ای
Selection combining	ترکیب انتخابی
Diversity combining	ترکیب چندگانگی
Maximum ratio combining	ترکیب حداکثر نسبت
Switch and stay combining	ترکیب سوییچ و استقرار
Spectrum sharing	تسهیم طیف
Amplify and forward	تقویت و ارسال
Cumulative distribution functions	توابع توزیع تجمعی
Probability density functions	توابع چگالی احتمال
Path loss exponent	توان افت مسیر
Exponential distribution	توزیع نمایی
Path loss constant	ثابت افت مسیر
Power spectral density	چگالی طیفی توان
Diversity	چندگانگی
Space diversity	چندگانگی فضایی
Cooperative diversity	چندگانگی مشارکتی
Multiple antenna	چندین آنتن
Multiple input multiple output	چندین فرستنده و چندین گیرنده
Mode	حالت

Reuse mode	حالت استفاده مجدد
Dedicated mode	حالت تخصیص داده شده
Cellular mode	حالت سلولی
Upper bound	حد بالا
Lower bound	حد پایین
Power peak	حداکثر توان
Radio access	دسترسی رادیویی
Digital	دیجیتال
Decode and forward	دیکد و ارسال
Decoding	دیکد کردن
Dynamic	دینامیک
Cognitive radio	رادیو شناختی
Relay	رله
Untrusted amplify and forward relay	رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان
Two-way relay	رله دو جهته
Cryptographic	رمزنگاری
Underlay	زمینه‌ای
Suboptimal	زیر بهینه
Non empty subset	زیرمجموعه غیر تهی
Fading	محوشوندگی
Cutoff	سد
Maclaurin series	سری مکلورن

Cell	سلول
Single cell	سلول منفرد
Switch	سوییچ
Personal communication systems	سیستم‌های مخابرات فردی
Shannon	شانون
Primary network	شبکه اولیه
Secondary network	شبکه ثانویه
Ad hoc networks	شبکه‌های ادهاک
Wireless sensor networks	شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم
Cellular networks	شبکه‌های سلولی
Eavesdropper	شنودگر
Channel coefficients	ضرایب کانال‌ها
Relay selection scheme	طرح انتخاب رله
Wavelength	طول‌موج
Spectrum	طیف
Capacity	ظرفیت
Secrecy capacity	ظرفیت امن
Non-zero secrecy capacity	ظرفیت امنیتی غیرصفر
Shannon capacity	ظرفیت شانون
Closed form expression	عبارت بسته
Union operator	عملگر اجتماع
Intersection operator	عملگر اشتراک

Passive	غیرفعال
Uplink	فراسو
Transmitter	فرستنده
Carrier frequency	فرکانس حامل
Downlink	فروسو
Rician fading	محوشوندگی رایسی
Rayleigh fading	محوشوندگی رایلی
Total probability law	قانون احتمالات کل
Binomial expansion theorem	قضیه بسط دوجمله‌ای
Non cooperation	غیر مشارکتی
Reference distance	فاصله مرجع
Frame	فریم
Sample space	فضای نمونه
Reliability	قابلیت اطمینان
Secrecy outage	قطع در ارسال امن
Reliability outage	قطع در ارسال قابل اطمینان
Spectrum efficienty	کارایی طیف
Cellular user	کاربر سلولی
Device-to-Device users	کاربران ارتباطات وسیله به وسیله
Channel	کانال
Wiretap channel	کانال استراق سمع کننده
Broadcast channel	کانال پخشی

Relay-eavesdropper channel	کانال رله-شنودگر
Direct channel	کانال مستقیم
Convolution	کانولوشن
Wiretap code	کد استراق سمع کردن
Secrecy outage probability floor	کف احتمال قطع امنیتی
Codeword	کلمه کد
Power control	کنترل توان
Quality of service	کیفیت سرویس
Gaussian	گوسی
Guglielmo marconi	گولیلمو مارکنی
Receiever	گیرنده
Data link	لینک داده
Feedback link	لینک فیدبک
Random variable	متغیر تصادفی
Decoding set	مجموعه دیکدکنندگان
Empty set	مجموعه تهی
Simplified path loss model	مدل افت مسیر ساده شده
System model	مدل سیستمی
Optimization problem	مسئله بهینه‌سازی
Cooperative	مشارکتی
Complement	مکمل
Expectation value	مقدار مورد انتظار

Channel fading component	مؤلفه محوشوندگی کانال
Equivocation rate	نرخ ابهام
Secrecy rate	نرخ امنیتی
Bit rate	نرخ بیت
Data rate	نرخ داده
Signal to noise ratio	نسبت سیگنال به نویز
Signal-to-interference-and-noise ratio	نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل
Additive white Gaussian noise	نویز سفید گوسی جمع شونده

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

Additive white Gaussian noise	نویز سفید گوسی جمع شونده
Ad hoc networks	شبکه‌های ادهاک
Amplify and forward	تقویت و ارسال
Analoge	آنالوگ
Antenna array	آرایه آنتن
Asymptotic analysis	آنالیزهای مجانبی
Bandwith	پهنای باند
Base station	ایستگاه پایه
Binomial expansion theorem	قضیه بسط دوجمله‌ای
Bit rate	نرخ بیت
Broadcast	پخشی
Broadcast channel	کانال پخشی
Capacity	ظرفیت
Carrier frequency	فرکانس حامل
Cell	سلول
Cellular mode	حالت سلولی
Cellular networks	شبکه‌های سلولی
Cellular user	کاربر سلولی
Centralized relay selection	انتخاب رله متمرکز
Channel	کانال

Channel assignment	تخصیص کانال
Channel coefficients	ضرایب کانال‌ها
Channel fading component	مؤلفه محوشوندگی کانال
Channel side information	اطلاعات کانال
Closed form expression	عبارت بسته
Codeword	کلمه کد
Cognitive radio	رادیو شناختی
Complement	مکمل
Convolution	کانولوشن
Cooperative	مشارکتی
Cooperative communications	ارتباطات مشارکتی
Cooperative diversity	چندگانگی مشارکتی
Coverage	پوشش
Cryptographic	رمزنگاری
Cumulative distribution functions	توابع توزیع تجمعی
Cutoff	سد
Data link	لینک داده
Data rate	نرخ داده
Data traffic	ترافیک داده
Decode and forward	دیکد و ارسال
Decoding	دیکد کردن
Decoding set	مجموعه دیکدکنندگان

Dedicated mode	حالت تخصیص داده شده
Degraded	بدتر
Delay	تأخیر
Device-to-Device communications	ارتباطات وسیله به وسیله
Device-to-Device users	کاربران ارتباطات وسیله به وسیله
Downlink	فروسو
Digital	دیجیتال
Direct channel	کانال مستقیم
Direct transmission	ارتباط مستقیم
Distributed relay selection	انتخاب رله توزیع شده
Diversity	چندگانگی
Diversity combining	ترکیب چندگانگی
Dynamic	دینامیک
Eavesdropper	شنودگر
Empty set	مجموعه تهی
Encode	اینکد
Equivocation rate	نرخ ابهام
Estimation	تخمین
Exponential distribution	توزیع نمایی
Exponential integral function	تابع انتگرال نمایی
Expectation value	مقدار مورد انتظار
Fading	محوشوندگی

Feedback link	لینک فیدبک
Frame	فریم
Free- space loss	اتلاف فضای آزاد
Gain	بهره
Gaussian	گوسی
Guglielmo marconi	گولیلمو مارکنی
Hop gain	بهره جهش
Information theory	تئوری اطلاعات
Interference	تداخل
Intersection operator	عملگر اشتراک
Instantaneous information	اطلاعات لحظه‌ای
Jammer	پارازیت دهنده
Link selection	انتخاب لینک
Lower bound	حد پایین
Maclaurin series	سری مکلورن
Maximum ratio combining	ترکیب حداکثر نسبت
Mode	حالت
Mode selection	انتخاب حالت
Multiple antenna	چندین آنتن
Multiple input multiple output	چندین فرستنده و چندین گیرنده
Mutual interference	تداخل متقابل
Non cooperation	غیر مشارکتی

Non empty subset	زیرمجموعه غیر تهی
Non-zero secrecy capacity	ظرفیت امنیتی غیرصفر
Optimal	بهینه
Optimization problem	مسئله بهینه‌سازی
Outage probability	احتمالات قطع
Passive	غیرفعال
Path loss	افت مسیر
Path loss constant	ثابت افت مسیر
Path loss exponent	توان افت مسیر
Personal communication systems	سیستم‌های مخابرات فردی
Power control	کنترل توان
Power peak	حداکثر توان
Power spectral density	چگالی طیفی توان
Primary network	شبکه اولیه
Probability density functions	توابع چگالی احتمال
Proximity gain	بهره نزدیکی
Quality of service	کیفیت سرویس
Radio access	دسترسی رادیویی
Random variable	متغیر تصادفی
Rayleigh fading	محوشوندگی رایلی
Reliability	قابلیت اطمینان
Reliability Outage	قطع در ارسال قابل‌اطمینان

Receiever	گیرنده
Reference distance	فاصله مرجع
Relay	رله
Relay-eavesdropper channel	کانال رله-شنودگر
Relay selection	انتخاب رله
Relay selection scheme	طرح انتخاب رله
Resource allocation	تخصیص منابع
Reuse gain	بهره استفاده مجدد
Reuse mode	حالت استفاده مجدد
Rician fading	محوشوندگی رایسی
Sample space	فضای نمونه
Secondary network	شبکه ثانویه
Secrecy capacity	ظرفیت امن
Secrecy outage	قطع در ارسال امن
Secrecy outage probability	احتمال قطع امنیتی
Secrecy outage probability floor	کف احتمال قطع امنیتی
Secrecy rate	نرخ امنیتی
Secrecy throughput	بازده امنیتی
Security	امنیت
Selection combining	ترکیب انتخابی
Shannon	شانون
Shannon capacity	ظرفیت شانون

Signal to noise ratio	نسبت سیگنال به نویز
Signal-to-interference-and-noise ratio	نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل
Simplified path loss model	مدل افت مسیر ساده شده
Single cell	سلول منفرد
Space diversity	چندگانگی فضایی
Spectrum	طیف
Spectrum efficienty	کارایی طیف
Spectrum sharing	تسهیم طیف
Suboptimal	زیر بهینه
Switch	سوییچ
Switch and stay combining	ترکیب سوییچ و استقرار
System model	مدل سیستمی
Threshold	آستانه
Threshold combining	ترکیب آستانه‌ای
Time slot	بازه زمانی
Timer	تایمر
Total probability law	قانون احتمالات کل
Transmitter	فرستنده
Two-way relay	رله دو جهته
Underlay	زمینه‌ای
Union operator	عملگر اجتماع
Untrusted amplify and forward relay	رله تقویت و ارسال غیرقابل اطمینان

Upper bound	حد بالا
Uplink	فراسو
Utility function	تابع بهره
Wavelength	طول‌موج
Wireless communication	ارتباط بی‌سیم
Wireless sensor networks	شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم
Wiretap channel	کانال استراق سمع کننده
Wiretap code	کد استراق سمع کردن

Abstract

In this thesis a cooperative scheme for secure device to device (D2D) communications underlaying cellular networks is proposed. In our scheme the cellular base station (BS) wants to transmit its information to cellular user (CU). Meanwhile, two devices want to communicate using the same spectrum used by cellular network. We consider two different system model in our thesis. In first system model, device to device users communicate directly with the help of some decode-and-forward (DF) relay nodes. In addition there exists a malicious user which wants to eavesdrop on information transmission of D2D pair. In seconde system model, device to device users communicate directly with the help of an untrusted amplify and forward (AF) relay node. We consider the signals received from both the direct link and relay link for both system models. In two system model, the transmit power of the transmitter of D2D pair and the relays is limited such that the outage performance of cellular network is satisfied. We study the performance of two proposed system model, which is measured based on the secrecy outage probability, and obtain the closed form expression for the secrecy outage probability. Finally, the performance of the two proposed system model is evaluated using simulations.

Keywords: Device to Device (D2D) communications, Physical (PHY) layer security, Eavesdropper, Cooperative communication, Relay selection, Decode and forward (DF) relay, Untrusted amplify and forward (AF) relay, Link selection, Secrecy outage probability.

University of shahrood

Faculty of electrical engineering and robotics

Master Thesis

Relay Selection for Secure Device-to-Device Communications

Sonia Naderi

Supervisor:

Dr. Mohammadreza Javan

September 2015