

# کارایی سنجی شبکه‌های مبتنی بر فمتوسل با استفاده از فن آوری فراپهن باند

نعیمه محمد علیزاده بافقی<sup>۱</sup> زلفا زینل پور یزدی<sup>۲</sup> جمشید ابویی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد- یزد- ایران

[f.alizadeh69@yahoo.com](mailto:f.alizadeh69@yahoo.com)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد- یزد- ایران

[zeinalpour@yazd.ac.ir](mailto:zeinalpour@yazd.ac.ir)

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد- یزد- ایران

[abouei@yazd.ac.ir](mailto:abouei@yazd.ac.ir)

چکیده: شبکه‌های فمتوسل یکی از راه‌کارهای جدید در زمینه مخابرات سلولی می‌باشند که به منظور افزایش ظرفیت و کیفیت سرویس به وجود آمده‌اند. پیدایش این شبکه‌ها در مخابرات سلولی علی‌رغم تمام مزایایی که داشته، چالش‌های خاص خود را نیز به همراه داشته، که یکی از مهم‌ترین آن‌ها بحث تداخل است. در این مقاله با استفاده از فن آوری فراپهن باند به عنوان راهکاری موثر در راستای کاهش پدیده تداخل سعی در بهبود کارایی کاربران در این شبکه‌ها داریم. فن آوری فراپهن باند از پالس‌های ضربه‌سان استفاده می‌کند. استفاده از این پالس‌ها انرژی سیگنال را روی پهنای باند بسیار گسترده‌ای توزیع کرده و سطح چگالی طیف توان بسیار پایینی را نتیجه می‌دهد. لذا سیستم‌های مبتنی بر فن آوری مذکور روی سیستم‌های باند باریکی که در محدوده فرکانسی بسیار گسترده‌ای این فن آوری قرار دارند کمترین تداخل را ایجاد می‌کند. همچنین سیستم‌های باند باریک مجاور، تداخل بسیار ناچیزی روی سیستم‌های فراپهن باند ایجاد می‌کند. در نتیجه به نظر می‌رسد با به کارگیری این نوع ارسال در شبکه‌های فمتوسل، کاربران فمتوسل و ماکروسل می‌توانند بدون ایجاد تداخل قابل ملاحظه‌ای بر روی یکدیگر به فعالیت پردازند. در این مقاله به منظور سنجش کارایی استفاده از این تکنیک، به محاسبه احتمال خاموشی کاربر ماکروسل که از ایستگاه پایه‌ی فمتوسل‌های مجاورش سیگنال تداخل دریافت می‌کند و همچنین احتمال خاموشی کاربر فمتوسل که در مجاورت کاربران ماکروسل قرار دارد و از آن‌ها سیگنال تداخل دریافت می‌کند می‌پردازیم.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های دو لایه‌ای فمتوسل، کاهش تداخل، احتمال خاموشی، فن آوری فراپهن باند

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۷/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۴/۲

نام نویسنده‌ی مسئول: زلفا زینل پور یزدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - یزد- دانشگاه یزد- دانشکده‌ی مهندسی برق

دنباله‌ی شبه تصادفی، زمان ارسال را معین می‌کند. به این صورت که زمان ارسال یک بیت به چپ‌های کوچکی تقسیم می‌شود، سپس در هر فرستنده یک (یا تعدادی) پالس با دوره‌ی زمانی کمتر یا مساوی دوره‌ی زمانی یک چپ، در چپ (یا چپ‌هایی) که توسط دنباله‌ی شبه تصادفی مخصوص به آن کاربر معین شده‌اند، ارسال می‌شود. البته مانند [۲] نمی‌توان فرض کرد که کاربران ماکروسل از این تکنیک بهره می‌برند چرا که سیگنال‌های فرابهن باند، توان و برد کمی دارند و برای کاربران ماکروسل که عموماً فاصله زیادی تا ایستگاه خود دارند مناسب نمی‌باشند. اما برای فمتوسل‌ها که در محیط‌های داخلی هستند و برد کوتاهی دارند استفاده از این سیگنال‌ها می‌تواند موثر باشد، چرا که می‌دانیم عموماً سیگنال‌های UWB روی سیگنال‌های باند باریک مجاور (کاربران ماکروسل) تداخل ضعیفی ایجاد می‌کنند. از طرفی سیگنال‌های باند باریک روی سیگنال‌های مجاور (کاربران فمتوسل) تداخل ناچیزی به وجود می‌آورند. در [۱۱] تاثیر این تداخل‌ها در شبکه‌های تک لایه با تعداد کاربران خیلی زیاد (بی نهایت) ارزیابی گردیده است. فرض تعداد کاربران بی نهایت امکان استفاده از توزیع پایدار را در محاسبات مربوط به تداخل فراهم می‌آورد که در واقعیت و در شبکه‌های چند لایه با تعداد کاربران محدود در هر لایه فرض قابل قبولی نمی‌باشد. در این مقاله به بررسی تاثیر این تداخل‌ها با فرض تعداد کاربران محدود و محاسبه احتمال خاموشی در شبکه‌های دو لایه می‌پردازیم. فرض می‌کنیم که فمتوسل‌ها برای ارتباط با کاربران خود از سیگنال‌های فرابهن باند استفاده می‌کنند، در حالی که ماکروسل و کاربرانش همچنان از سیگنال‌های باند باریک بهره می‌برند. در جهت کاهش تداخل سیگنال‌های باند باریک بر روی سیگنال‌های فرابهن باند روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۲ و ۱۳]. اما در این مقاله با فرض عدم استفاده از این تکنیک‌ها و وجود تداخل به آنالیز شبکه می‌پردازیم.

لازم به توضیح است که سیاست‌های دسترسی در شبکه‌های چند لایه به صورت دسترسی بسته، دسترسی باز و دسترسی هایبرید می‌باشد. در حالت دسترسی بسته فمتوسل فقط به کاربران رجیستر شده آن فمتوسل سرویس دهی می‌کند ولی در حالت دسترسی باز به هر مشترکی که تحت پوشش ایستگاه پایه قرار بگیرد سرویس دهی می‌شود. دسترسی هایبرید ترکیبی از دو روش باز و بسته می‌باشد به این صورت که مشترکین رجیستر نشده فقط برای استفاده محدودی از منابع مجاز هستند تا به ایستگاه پایه متصل شوند. در این مقاله سیاست دسترسی را به صورت بسته در نظر می‌گیریم.

در ادامه این مقاله در بخش ۲ به معرفی مدل سیستم می‌پردازیم. در بخش ۳ بر روی آنالیز احتمال خاموشی متمرکز می‌شویم. در بخش ۴ نتایج عددی و شبیه‌سازی و نهایتاً در بخش ۵ نتیجه‌گیری را ارائه خواهیم نمود.

شبکه‌های فمتوسل شامل ایستگاه‌های پایه‌ی کوچک با توان کم و برد کوتاه هستند که باعث افزایش ظرفیت و بهبود پوشش داخلی در شبکه‌های ماکروسل می‌شوند [۱]. بزرگترین چالشی که یک شبکه فمتوسل با آن مواجه است مشکل تداخل در این شبکه‌ها است. تداخل فمتوسل - ماکروسل از جنس تداخل‌های بین لایه‌ای می‌باشد و در صورتی به وجود می‌آید که ایستگاه پایه فمتوسل (FAP) و ماکروسل از منابع مشترک استفاده کنند. در حالت فراسو وقتی کاربر ماکروسل از ایستگاه پایه خود دور است، برای ارسال سیگنال به ایستگاه پایه باید با توان بیشتری به ارسال پردازد تا سیگنال با کیفیت قابل قبولی دریافت شود. این توان ارسال باعث تداخل زیاد روی کاربران فمتوسل مجاور آن می‌شود. در ارتباطات فراسو وضعیت متفاوت است.

هنگامی که کاربر ماکروسل از ایستگاه پایه دور است، سیگنال ضعیفی از ایستگاه پایه به آن می‌رسد و در صورتی که کاربر در مجاورت یک فمتوسل باشد، توان ارسال آن فمتوسل می‌تواند تداخلی مخرب روی کاربر ماکروسل ایجاد کند. از جمله روش‌هایی که تاکنون محققین جهت مقابله با تداخل در این شبکه‌ها پیشنهاد داده‌اند تصادفی کردن تداخل با روش‌های پرش فرکانسی/زمانی [۲ و ۳]، کاهش تداخل با استفاده از روش کنترل توان [۴]، استفاده از روش‌های مشارکتی و تئوری بازی [۵]، روش شکل‌دهی پرتو [۶] و همچنین استفاده از روش رادیوشناختی [۷ و ۸] است. هدف ما نیز در این مقاله آن است که با استفاده از فن‌آوری فرابهن باند، تداخل را در این شبکه‌ها کاهش دهیم.

همان‌طور که اشاره شد برای جلوگیری از ایجاد تداخل بین لایه‌ای در شبکه‌های فمتوسل می‌توان از فن‌آوری پرش زمانی استفاده نمود که با به کار بردن TH-CDMA<sup>۲</sup> اجرا می‌گردد. در این روش از کل طیف فرکانسی در کل زمان استفاده نمی‌شود بلکه زمان به قسمت‌هایی تقسیم می‌شود و هر کاربر در یک بازه‌ی زمانی به ارسال اطلاعات می‌پردازد. در واقع این روش یک حالت خاص TDD است. در TDD کل زمان به فریم‌های کوچکتر تقسیم می‌شود و هر کدام از فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در فریم مشخصی به ارسال و دریافت اطلاعات می‌پردازند، در حالی که در TH-CDMA دریافت و ارسال اطلاعات با تخصیص کد به صورت تصادفی از فریم‌ها صورت می‌پذیرد. در [۲] از روش پرش زمانی در فمتوسل‌ها و ماکروسل‌ها استفاده شده و نشان داده شده است که با استفاده از این روش تا چه حد می‌توان کارایی شبکه را بهبود داد. مبنای کار دسته شناخته شده‌ی سیگنال‌های UWB<sup>۳</sup> که در سال‌های اخیر به دلیل پیچیدگی کم، توان پایین و هزینه کم محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند، نیز همین تکنیک می‌باشد [۹]. اساس کار سیگنال‌های UWB مبتنی بر IR<sup>۴</sup> ارسال ضربه‌هایی با دوره‌ی زمانی کمتر از یک نانو ثانیه و استفاده از تکنیک پرش زمانی است [۱۰]. در این روش همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد

## ۲- مدل سیستم

در شکل ۱ مدل سیستم در حالت فراسو را مشاهده می‌کنید. لینک UWB مابین ایستگاه پایه فمتوسل که در فاصله  $a$  از مبدا قرار گرفته و کاربر فمتوسل که در فاصله  $R_u$  از آن قرار دارد فرض می‌شود. هدف ما تعیین اثر تداخل کاربران ماکروسل با سیگنال باند باریک و تعداد محدود بر روی لینک UWB است. توجه کنید که در این مقاله از تداخل فمتوسل بر روی فمتوسل به دلیل ماهیت توان و برد کم سیگنال‌های فرایه‌ن باند صرف نظر می‌شود.

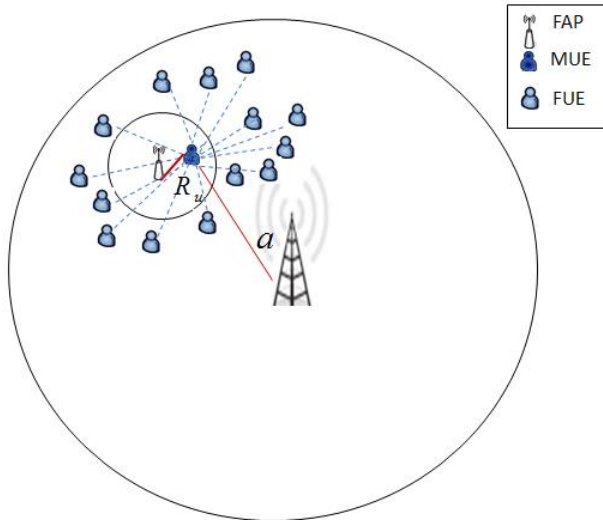
شکل (۲) مدل سیستم در حالت فراسو را نشان می‌دهد. در این مدل ایستگاه پایه ماکروسل (MBS<sup>۵</sup>) در مبدا دایره و کاربر ماکروسل در فاصله  $a$  از مبدا قرار گرفته است. هدف ما در این حالت تعیین اثر تداخل ایستگاه‌های پایه فمتوسل با سیگنال فرایه‌ن باند و تعداد محدود بر روی کاربر ماکروسل با سیگنال باند باریک است.

## ۱-۲- توزیع ایستگاه‌های پایه

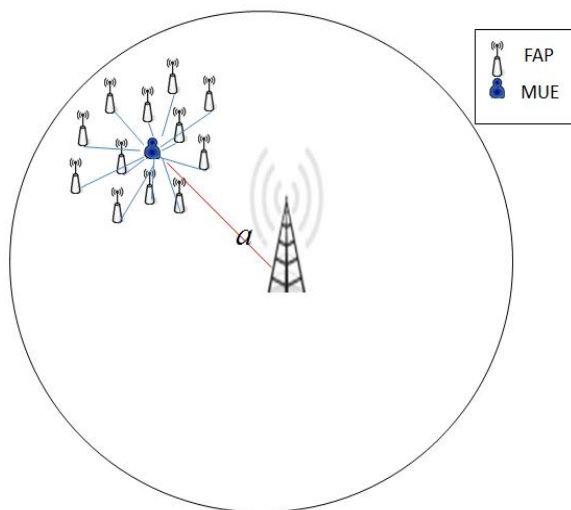
به منظور تحلیل دقیق‌تر و عملی‌تر شبکه، توزیع کاربران ماکروسل و ایستگاه‌های پایه فمتوسل را مطابق فرآیند نقطه‌ای پواسون فرض کرده‌ایم. می‌دانیم برای توزیع پواسون، احتمال این‌که  $k$  نقطه با چگالی  $\lambda$  در ناحیه‌ای به مساحت  $A$  توزیع شده باشند برابر است با [15]:

$$P\{k \in R\} = \frac{(\lambda A)^k}{k!} e^{-\lambda A} \quad k \geq 0. \quad (1)$$

در مدل مورد بررسی ایستگاه پایه ماکروسل در مرکز دایره‌ای به شعاع  $R_c$  قرار دارد. مجموعه ایستگاه‌های پایه فمتوسل که از سیگنال‌های فرایه‌ن باند استفاده می‌کنند با چگالی  $\lambda_f$  با فرآیند نقطه‌ای پواسون<sup>۶</sup> توزیع شده‌اند. همچنین کاربران ماکروسل که از سیگنال‌های باند باریک استفاده می‌کنند با چگالی  $\lambda_m$  به صورت مستقل از هم توزیع شده‌اند. لازم به ذکر است گرچه آنالیز این مقاله بر روی حالتی که یک MBS در مبدا دایره‌ای به شعاع  $R$  قرار دارد، متمرکز است و در واقعیت چندین MBS وجود دارد؛ اما با فرض استفاده MBS ها از یکی از روش‌های متداول تقسیم فرکانسی، تعامد بین کاربران سلول‌های مجاور به وجود آمده و آنالیز به حالت در نظر گرفته در این مقاله منجر می‌شود. همچنین با توجه به مباحث بیان شده در [۱۶] حالت توزیع تصادفی MBS ها، با کنترل شعاع  $R$  می‌توان ارزیابی خوبی از تاثیر چگالی MBS ها در کارایی شبکه داشت.



شکل (۱): شماتیک مدل سیستم و تداخل دریافتی کاربر فمتوسل در حالت فراسو



شکل (۲): شماتیک مدل سیستم و تداخل دریافتی کاربر ماکرو در حالت فراسو

## ۲-۲- مدل سیگنال و کانال UWB

در حالت فراسو سیگنال منتقل شده از کاربر فمتوسل به ایستگاه پایه فمتوسل با ارتباط UWB برابر است با [۸]:

$$s_u(t) = \sqrt{E_b} \sum_i b(t - iT_b; d_i), \quad d_i \in \{0, 1\} \quad (2)$$

که در آن  $b(t, d_i)$  شکل موج با انرژی واحد برای انتقال  $i$  امین اطلاعات بیت  $d_i$ ،  $E_b$  انرژی بیت منتقل شده و  $T_b$  دوره بیت است. به طور خاص  $b(t, 1)$  و  $b(t, 0)$  شکل موج‌های طیف گسترده‌ای هستند که به ترتیب برای انتقال بیت ۱ و ۰ بکار می‌رود و همچنین فرض می‌کنیم که داده‌های  $d_i$  دارای توزیع *i.i.d* با احتمال یکسان

هستند. پاسخ ضربه کانال UWB را به صورت زیر در نظر می گیریم [23]:

$$h_u(t) = \sum_{k=1}^L h_k \delta(t - t_k) \quad (3)$$

که در آن  $k = 1, 2, \dots, L, h_k = \alpha_k e^{j\theta_k}$  متغیرهای تصادفی وابسته به مسیرهای داخل خوشه های توصیف شده هستند،  $t_k$  تاخیر  $k$  امین مسیر و  $\alpha_k$  دامنه محوشدگی با توزیع ناگامی<sup>۷</sup> را نشان می دهد و  $\theta_k$  برابر با  $0$  یا  $\pi$ ، با احتمال یکسان می باشد. همچنین

توان پراکندگی را نرمالیزه می کنیم یعنی  $\sum_{k=1}^L \Omega_k = 1$  که

$\Omega_k = E\{h_k^2\}$  است. تلفات مسیر<sup>۸</sup> بین فرستنده و گیرنده UWB به صورت  $L_u = \frac{K}{R_u^V}$  در نظر گرفته می شود [۱۹]. پارامتر  $V$  وابسته به

محیط، در محدوده ۲ (برای داخل ساختمان) تا ۴ (برای محیط های بیرونی) تقریب زده می شود. برای در نظر گرفتن اثر سایه افکنی<sup>۹</sup> مدل log normal را در نظر می گیریم که با توجه به آن تابع چگالی توان سیگنال دریافتی برابر است با [۱۱]:

$$f_S(s) = \frac{1}{s\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \ln^2\left(\frac{s}{\mu}\right)\right] \quad s \geq 0 \quad (4)$$

که در آن  $\mu$  متوسط  $S$  است. متغیر تصادفی log normal با متوسط  $\mu$  و واریانس  $\sigma$  را می توان به صورت  $S = \mu e^{\sigma G}$  نوشت که در آن  $G \sim N(0, 1)$  است. فرض می کنیم سیگنال UWB تحت تاثیر پارامتر سایه افکنی  $\sigma_u$  است. تحت این مدل پاسخ ضربه کلی کانال فرایهین باند برابر است با [۱۵]:

$$\tilde{h}_u(t) = L_u \cdot e^{\sigma_u G_u} \cdot h_u(t) \quad (5)$$

که متوسط پارامتر سایه افکنی برابر با  $\mu = L_u$  می باشد. در حالت فروسو تداخل های فرایهین باند ایجاد شده بر روی کاربر ماکروسول به صورت زیر می باشد [۱۵]:

$$I_i(t) = \sum_n a_{i,n} p_i(t - nT_U - D_i) \quad (6)$$

که  $a_{i,n}$  امین شکل سمبل متداخل با انرژی است.  $T_U$  دوره سمبل می باشد و  $D_i$  تاخیر تصادفی بین تداخل ها با توزیع یکنواخت  $D_i \sim U(0, T_U)$  است.

برای در نظر گرفتن اثر محوشدگی در گره های متداخل UWB کانال چندمسیره فرکانس گزین طبق معادله (۳) در نظر می گیریم. تحت این مدل پاسخ ضربه ی کلی  $i$  امین تداخل فرایهین باند با گیرنده باند باریک با در نظر گرفتن تلفات مسیر و اثر سایه افکنی برابر است با [۱۹]:

$$\tilde{h}_i(t) = \frac{k_U}{R_i^{V_U}} \cdot e^{\sigma_U G_i} \cdot h_i(t) \quad (7)$$

که در آن  $\{R_i\}_{i=1}^N$  موقعیت متداخل های فرایهین باند است.

## ۲-۳- مدل سیگنال و کانال باند باریک

در حالت فراسو سیگنال های تداخل کننده باند باریک را با تک تون های سینوسی تقریب می زنیم. سیگنال تداخلی باند باریک از  $n$  امین کاربر ماکروسول به صورت زیر مدل می گردد:

$$s_n(t) = \sqrt{2I} \cos(2\pi f_I(t - \tau_n)) \quad (8)$$

که در آن  $n = 1, 2, \dots, N, \tau_n$  زمان تاخیر با توزیع *i.i.d* است. برای در نظر گرفتن اثر محوشدگی در گره های تداخل کننده باند باریک، کانال رایلی<sup>۱۰</sup> فرکانس تخت در نظر گرفته می شود. اثر محوشدگی سیگنال های دریافتی از  $n$  تداخل به وسیله فاز تصادفی  $\phi_n$  با توزیع یکنواخت در بازه  $[0, 2\pi]$ ، به همراه ضریب  $\alpha_n$  که دارای توزیع رایلی است مدل می گردد. تلفات مسیر در بین تداخل های باند باریک و گیرنده UWB به صورت  $L_n = \frac{K}{R_n^V}$  با یک ثابت  $K$  مدل می شود، که

$\{r_n\}_{n=1}^N$  موقعیت کاربران ماکروسول است که در طراحی شبکه ناشناخته هستند و در فاصله های تصادفی به صورت یکنواخت قرار گرفته اند. اثر سایه افکنی را با متغیر تصادفی log normal با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_n$  مدل می کنیم. با فرض این که اثر سایه افکنی و محوشدگی برای تداخل های مختلف باند باریک مستقل هستند، پاسخ ضربه کلی کانال بین متداخل  $n$  ام و گیرنده UWB (ایستگاه پایه فمتوسول) برابر است با [۱۷]:

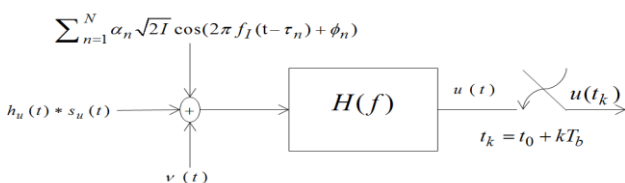
$$\tilde{h}_n(t) = L_n \cdot e^{\sigma_n G_n} \cdot \alpha_n e^{j\phi_n} \cdot \delta(t) \quad (9)$$

که در آن  $\delta(\cdot)$  تابع دلتای دیراک است و مقدار متوسط اثر سایه افکنی را با  $\mu = L_n$  تقریب می زنیم.

در حالت فروسو سیگنال باند باریک مطلوب با مدولاسیون B-PSK در نظر گرفته شده، و به صورت زیر است [۱۷]:

$$s_N(t) = c_0 \sqrt{2g(t)} \cos(2\pi f_c t + \theta_0) \quad (10)$$

که  $g(t)$  شکل پالس با انرژی واحد است که شرایط نایکوئیست را دارا می باشد.  $c_0$  و  $\theta_0$  به ترتیب دامنه و فاز سمبل ارسالی مورد نظر



شکل (۳): مدل سیستم با تداخل باند باریک و نویز تجمعی

### ۳- آنالیز احتمال خاموشی برای کاربر فمتوسل در حالت فراسو

ابتدا به بررسی SINR برای کاربر فمتوسل در حالت فراسو می‌پردازیم. برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز و تداخل لازم است توان سیگنال ارسالی و واریانس ترم نویز و تداخل محاسبه گردد.

در این حالت گیرنده بهینه شامل یک فیلتر منطبق است که بر اختلاف  $v(t) = r_b(t, 0) - r_b(t, 1)$  منطبق شده است. فرض می‌کنیم که پالس‌ها شرایط ناپیوستگی را برآورد می‌کنند و تداخل بین سمبلی بسیار ناچیز است و همزمان‌سازی را به صورت کامل در نظر می‌گیریم. خروجی فیلتر منطبق با نمونه‌برداری مناسب و در نظر گرفتن اثر سایه افکنی و تلفات مسیر بدین صورت است [۱۷]:

$$u(t_0) = \frac{e^{\sigma_u G_u}}{R_u^v} s_0 + \zeta + n_0 \quad (13)$$

که  $s_0$  سیگنال مطلوب بوده و برابر است با:

$$s_0 = \sqrt{E_b} \int_{-\infty}^{t_0} r_b(t; d_0) v(t) dt; \quad (14)$$

$n_0$  نویز سفید گوسی با میانگین صفر و واریانس و ترم تداخل برابر

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{N_0}{2}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt \quad (16)$$

$$\zeta = \sqrt{2I} \frac{e^{\sigma_n G_n}}{r_n^v} \alpha_n |H(f_I)| \cos \phi_n \quad (15)$$

که وابسته به تبدیل فوریه ضربه فیلتر منطبق است. برای تحلیل مساله، تابع تبدیل فوریه فیلتر منطبق را می‌توان به دو عبارت تقسیم کرد [۱۴]:

$$|H(f)| = |H_o(f)| \cdot |H_u(f)| \quad (16)$$

که  $H_o(f) = F\{b(t; 0) - b(t; 1)\}$  و  $H_u(f)$  تبدیل فوریه ضربه ضربه کانال است. توجه داشته باشید که معادله (۱۶) به دو عامل بستگی دارد اول وابسته به شکل موج مورد استفاده و دوم بستگی به پاسخ ضربه کانال برای سیگنال مورد نظر است. با جایگذاری سیگنال دریافتی  $r_b(t; d_0)$  و شکل موج فیلتر منطبق  $v(t)$  در معادله (۱۴)،  $s_0$  برابر است با  $s_0 = \sqrt{E_b} (1 - \rho) \alpha_u^2$  که  $\rho = \sum_{k=1}^L h_k^2$  و  $\alpha_u^2$  ضریب همبستگی بین دو شکل موج  $b(t, 0)$  و  $b(t, 1)$  است. توان نویز در خروجی گیرنده همبستگی سنج برابر است با:  $\sigma_z^2 = N_0 (1 - \rho) \alpha_u^2$ . با توجه به معادله (۱۵) عبارت تداخل، برابر است با مجموع متغیرهای گوسی  $i.i.d$  (تا زمانی که  $\alpha_n$  ها متغیر تصادفی  $i.i.d$  با توزیع رایلی و  $\phi_n$  ها فاز تصادفی با توزیع یکنواخت در

می‌باشد و  $f_c$  فرکانس حامل سیگنال باند باریک است. اثر محو شدگی در لینک  $^{(1)}NB$  کانال را رایلی فرکانس تخت در نظر می‌گیریم. فاکتور  $\alpha_0$  دارای توزیع رایلی با توان نرمالیزه شده است  $E\{\alpha_0^2\} = 1$ . با فرض این که اثر سایه افکنی و محوشدگی برای تداخل‌های مختلف باند باریک مستقل هستند، پاسخ ضربه کانال NB برابر است با [۱۴]:

$$\tilde{h}_N(t) = \frac{k_N}{a^{v_N}} \alpha_0 e^{\sigma_N G_0} \cdot \delta(t) \quad (11)$$

### ۲-۴- سیگنال دریافتی

بلوک دیاگرام شبکه فمتوسل در حضور تداخل کاربران ماکروسل و نویز جمعی، در حالت فراسو در شکل (۳) نشان داده شده است.

سیگنال دریافتی  $r(t)$  در ایستگاه پایه فمتوسل شامل سه بخش، یکی سیگنال UWB مورد نظر و مطلوب از سمت کاربر فمتوسل، بخش دیگر حاصل  $N$  تداخل باند باریک که  $N$  نشان دهنده تعداد کاربران ماکروسل است و همچنین بخش آخر نویز سفید گوسی است. جهت ساده‌سازی عبارت و بدون از دست دادن کلیات مساله، عبارت  $E_b \cdot K^2$  را با عبارت  $E_b$  بیان می‌کنیم که  $E_b$  متوسط انرژی دریافتی در هر بیت را نشان می‌دهد و به طور مشابه، می‌توان عبارت  $I \cdot K^2$  را با عبارت  $I$  تحلیل کنیم، که  $I$  متوسط انرژی دریافتی از تداخل‌های باند باریک در فواصل  $r_n$  از گیرنده UWB است. عبارت ریاضی سیگنال دریافتی از کانولوشن (۲) و (۶) با پاسخ ضربه کانال (۵) و (۷) بدست می‌آید و برابر است با [۱۷]:

$$r(t) = \sqrt{E_b} \frac{e^{\sigma_u G_u}}{R_u^v} \sum_i r_b(t - iT_b; d_i) + \sum_{n=1}^N \sqrt{2I} \frac{e^{\sigma_n G_n}}{r_n^v} \alpha_n \cos(2\pi f_i(t - \tau_n) + \phi_n) + z(t) \quad (12)$$

$z(t)$  نویز سفید گوسی جمعی AWGN با چگالی طیف توان  $\frac{N_0}{2}$  و  $r_b(t; d_i)$  پاسخ کانال UWB به شکل موج انتقال شده  $r_b(t; d_i) = h_u(t) * b(t; d_i)$  است.

در حالت فراسو مجموع سیگنال‌های دریافتی در گیرنده باند باریک (کاربر ماکروسل) برابر با  $z(t) = d(t) + y(t) + n(t)$  است [۱۷]، که  $d(t) = s_N(t) * h_N(t)$  سیگنال مطلوب باند باریک برای انتقال سمبل مورد نظر است.  $y(t) = \sum_{i=1}^N I_i(t) * h_i(t)$  مجموع تداخل‌های فرایه‌ن باند و  $n(t)$  نویز سفید گوسی با چگالی  $\frac{N_0}{2}$  است که از  $y(t)$  مستقل است.

که در آن منظور از  $\Im$  بخش موهومی است. با استفاده از قضیه [25] خواهیم داشت:

$$P_{OUT} = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{\substack{n=1 \\ n \text{ odd}}}^N \frac{\Im\{e^{-jn\omega_0} \phi_A(n\omega_0)\}}{n} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (20)$$

که در آن  $\phi_A$  تابع مشخصه تداخل بوده که در پیوست الف محاسبه شده است. با توجه به نتایج این پیوست، احتمال خاموشی کاربر فمتوسل با ارسال‌های UWB در حالت فراسو برابر خواهند بود با:

$$P_{OUT} = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{\substack{n=1 \\ n \text{ odd}}}^N \frac{\Im\{e^{-jn\omega_0} e^{-\lambda \pi R_c^2 (\sec^2 \sigma_c^2 \sigma_n^2) (\frac{1 - (R_c - a)^{(2-2\nu)}}{R_c^2} + a \sum \sigma_j g(ar_j + R_c))}}{n} \quad (21)$$

که در آن  $g = \frac{2r \arccos\left(\frac{-R_c^2 + a^2 + r^2}{2ar}\right)}{\pi R_c^2} r^{-2\nu}$  و  $r_j$  ریشه  $j$ ام

چند جمله‌ای لژندر  $P_n'$  از درجه  $N$  که وزن‌های متناظر با آن  $\varpi_j = \frac{2}{(1-r_j^2)[P_n']^2}$  است، می‌باشد [25]. برای بدست آوردن

متوسط احتمال خاموشی می‌توان از رابطه بدست آمده نسبت به متغیر  $a$  میانگین‌گیری نمود. از آن جاییکه کاربران فمتوسل به طور یکنواخت در محدوده  $[0, R_c]$  قرار گرفته‌اند. تابع چگالی احتمال موقعیت کاربر برابر است با:

$$f_a(a) = \frac{2\pi a}{\pi R_c^2} = \frac{2a}{R_c^2} \quad (22)$$

#### ۴- آنالیز احتمال خاموشی کاربر ماکروسل در حالت فرسو

در حالت فرسو دمدولاسیون در گیرنده باند باریک بر روی سیگنال  $z(t)$  با استفاده از گیرنده بهینه انجام می‌شود. پایه‌های اورتونرمال که توصیف کننده فضای شکل موج‌های خروجی مدولاتور است برابر است با مجموعه‌های  $\{\psi_1(t) = -\sqrt{2}g(t)\sin(2\pi f_c t)\}$  و  $\{\psi_2(t) = \sqrt{2}g(t)\cos(2\pi f_c t)\}$  [15]. با تصویر کردن  $z(t)$  بر روی شکل موج‌های خروجی مدولاتور، خروجی گیرنده بهینه برابر است با  $Z_k = \int_{-\infty}^{\infty} z(t)\psi_k(t)dt$ ,  $k=1,2$  که می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم [18]:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{k_N \alpha_0 e^{\sigma_N G_0}}{a^{\nu_N}} c_0 \cos(\theta_0) + Y_1 + N_1 \\ Z_2 &= \frac{k_N \alpha_0 e^{\sigma_N G_0}}{a^{\nu_N}} c_0 \sin(\theta_0) + Y_2 + N_2 \end{aligned} \quad (23)$$

بازه‌ی  $[0, 2\pi)$  باشد). در این صورت  $\alpha_n \cos \phi_n$  دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_c^2 = I |H(f_I)|^2 A$  است که

$$A = \sum_{n=1}^N \frac{e^{2\sigma_n G_n}}{r_n^{2\nu}}$$

و پارامتر  $\nu$  عبارت  $A$  به متغیرهای  $\{r_n\}_{n=1}^N$  و  $\{G_n\}_{n=1}^N$  وابسته است. در [17] تعداد کاربران متداخل کننده را بی نهایت در نظر گرفته و در نتیجه متغیر  $A$  با توزیع پایدار مدل کرده که در واقعیت با توجه به تعداد محدود کاربران هرلایه فرض معقولی نمی‌باشد و لذا در ادامه با فرض تعداد محدود ولی تصادفی  $N$  برای کاربران ماکروسل کار را ادامه می‌دهیم.

با توجه به متغیر بودن موقعیت کاربران ماکروسل و اثر سایه‌افکنی و با فرض مشخص بودن پاسخ ضربه کانال کاربر فمتوسل مطلوب، نسبت سیگنال به نویز و تداخل SINR برابر است با:

$$SINR = \frac{e^{2\sigma_u G_u} \{\alpha_u^2\}^2 E_b (1-\rho)^2}{N_0 (1-\rho) \alpha_u^2 + I |H_0(f_I)|^2 \cdot |H_u(f_I)|^2 A} \quad (17)$$

که در رابطه (17) صورت توان سیگنال مطلوب ارسال شده و عبارت سمت چپ در مخرج واریانس نویز و عبارت سمت راست مخرج واریانس تداخل می‌باشد.

هدف ما بررسی احتمال خاموشی در حالت فراسو برای کاربر فمتوسلی است که ایستگاه پایه آن در فاصله  $a$  از مرکز شبکه قرار گرفته است. باید توجه داشت که در نهایت با در نظر گرفتن این نکته که فمتوسل‌ها به صورت یکنواخت پخش شده‌اند می‌توان نسبت به  $a$  متوسط‌گیری نمود.

کاربر فمتوسل زمانی خاموش است که SINR آن به سطح مطلوب دست نیافته باشد. در نتیجه احتمال خاموشی برابر است با عبارت تداخل می‌توان احتمال خاموشی را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$P_{OUT} = pr\left\{A > \frac{e^{2\sigma_u G_u} \{\alpha_u^2\}^2 E_b (1-\rho)^2 - th \cdot N_0 (1-\rho) \alpha_u^2}{th \cdot I |H_0(f_I)|^2 \cdot |H_u(f_I)|^2}\right\} \triangleq \chi \quad (18)$$

اکنون می‌توان برای محاسبه احتمال خاموشی از قضیه ارائه شده در [22] استفاده کرد. این قضیه بیان می‌دارد که اگر  $x$  یک متغیر تصادفی حقیقی پیوسته با تابع مشخصه  $\phi_X(\omega)$  و تابع توزیع تجمعی  $F_X(x)$  باشد آن‌گاه:

$$F_X(x; T, N) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{\substack{n=1 \\ n \text{ odd}}}^N \frac{\Im\{e^{-jn\omega_0} \phi_X(n\omega_0)\}}{n} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (19)$$

که  $Y_1$  و  $Y_2$  برابرند با :

$$Y_k = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \psi_k(t) dt = \sum_{i=1}^N \frac{k_U e^{\sigma_U G_i}}{R_i^{2\nu_U}} X_i^{(k)}, \quad k=1,2 \quad (24)$$

و

$$X_i^{(k)} = \sum_n a_{i,n} \int_{-\infty}^{\infty} \kappa_i(t - \tilde{D}_{i,n}) \psi_k(t) dt, \quad (25)$$

که  $\kappa_i(t) = p_i(t) * \tilde{h}_i(t)$  و  $\tilde{D}_{i,n} = nT_U + D_i$  است. با استفاده از قضیه پارسوال می‌توانیم عبارت بالا را به فرم زیر ساده کنیم:

$$X_i = \sum_n a_{i,n} \sqrt{2} |P_i(f_c)| |H_i(f_c)| g(\tilde{D}_{i,n}) e^{j\phi_{i,n}} \quad (26)$$

که  $\phi_{i,n} = \arg\{P_i(f_c)\} + \arg\{H_i(f_c)\} - 2\pi f_c \tilde{D}_{i,n}$  است. در نتیجه در حالت باند پایه خروجی گیرنده باند باریک برابر است با:

$$Z = \frac{k_N \alpha_0 e^{\sigma_N G_0}}{a^{2\nu_N}} c_0 e^{j\theta_0} + Y + N \quad (27)$$

که

$$Y = \sum_{i=1}^N \frac{k_U e^{\sigma_U G_i} X_i}{R_i^{2\nu_U}} \quad (28)$$

و  $N \sim N(0, N_0)$  است. با توجه به مطالب بیان شده توان سیگنال ارسالی نسبت سیگنال به نویز و تداخل در حالت فروسو برابر است با:

$$SINR = \frac{\frac{k_N^2 \alpha_0^2 e^{2\sigma_N G_0} E_N}{\alpha^{2\nu_N}}}{\sum_{i=1}^N \frac{k_U^2 e^{2\sigma_U G_i}}{R_i^{2\nu_U}} X_i^2 + N_0} \quad (29)$$

که در آن  $E_N = E\{c_0^2\}$  متوسط انرژی سمبل منتقل شده از لینک NB است. در این بخش هدف ما بررسی احتمال خاموشی کاربر ماکروسل در حالت فروسو، که در مجاور تداخل‌های فمتوسل قرار گرفته است می‌باشد. در این حالت کاربر ماکروسل زمانی خاموش است که SINR آن به سطح مطلوب دست نیافته باشد. اکنون می‌توان احتمال خاموشی کاربر ماکروسل که تحت تاثیر تداخل فراپهن باند از فمتوسل‌های مجاور قرار گرفته است را به دست آورد. با تعریف  $B \triangleq \sum_{i=1}^N \frac{k_U^2 e^{2\sigma_U G_i}}{R_i^{2\nu_U}} X_i^2$  و با استفاده از قضیه ذکر شده در [25] احتمال خاموشی برابر است با:

$$P_{OUT} = pr\{B < \frac{k_N^2 \alpha_0^2 e^{2\sigma_N G_0} E_N - th N_0}{\alpha^{2\nu_N}} \triangleq \gamma\} \quad (30)$$

$$= \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Im\{e^{-jn\alpha_0 \gamma} \phi_B(n\omega_0)\}}{n} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

که در آن  $\phi_B(s)$  تابع مشخصه متغیر تصادفی  $B$  است که جزئیات محاسبه آن در پیوست ب آورده شده است. به دلیل این که رابطه

بدست آمده به روش تحلیلی قابل محاسبه نیست از رابطه QOR تعمیم یافته برای محاسبه انتگرال‌ها می‌توان استفاده نمود. با جایگذاری تابع مشخصه در معادله (30) احتمال خاموشی کاربر ماکرو به دست می‌آید و برای متوسط احتمال خاموشی می‌توان از متغیر  $a$  (فاصله کاربر ماکرو از میداء) با تابع چگالی احتمال بیان شده در رابطه (22) میانگین‌گیری نمود.

## ۵- نتایج عددی

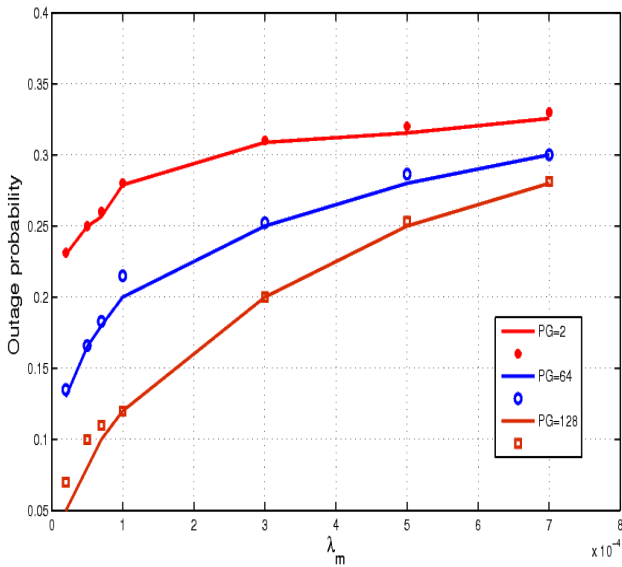
در این قسمت نتایج بدست آمده از بخش قبل را با در نظر گرفتن مدولاسیون PAM به صورت عددی ارزیابی می‌کنیم. شکل موج ارسالی بر طبق قانون FCC از انواع شکل موج‌های نامیرا می‌تواند انتخاب گردد [24]. از این میان در این مقاله مشتق پنجم پالس گوسی به عنوان پالس ارسالی برای شبیه‌سازی و ارزیابی عددی انتخاب شده است. در کانال UWB دامنه سیگنال‌های دریافتی در داخل هر خوشه دارای توزیع ناکاگامی می‌باشد. کانال UWB برای محیط‌های مسکونی و بر حسب LOS بودن فرستنده و گیرنده، با پارامترهایی که در جدول ۱ بیان شده است، شبیه‌سازی می‌گردد. در تمامی شکل‌ها منحنی‌های رسم شده با خطوط پر حاصل از نتایج تحلیلی بدست آمده در مقاله و نقاط مشخص شده با سمبول‌ها بیانگر مقادیر حاصل از شبیه‌سازی سناریوی مربوطه می‌باشد.

کارایی روش فراپهن باند را در مدل شبکه دولایه بررسی می‌کنیم. در شکل ۴ احتمال خاموشی کاربر فمتوسل بر حسب افزایش توان ارسالی در بهره‌های پردازشی متفاوت رسم شده‌اند. از جمله  $PG^2=1$  که نشان‌دهنده حالتی است که از روش فراپهن باند استفاده نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهند استفاده از این روش احتمال خاموشی را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. علاوه بر آن، می‌توان با افزایش بهره‌ی پردازش احتمال خاموشی را کاهش داد و موجب بهبود کارایی شبکه‌های مبتنی بر فمتوسل شد. تطابق نتایج تئوری و شبیه‌سازی نیز بیانگر صحت نتایج تحلیلی و فرضیات گرفته شده برای انجام تحلیل می‌باشد.

شکل ۵ احتمال خاموشی کاربر فمتوسل را بر حسب افزایش چگالی کاربران ماکروسل و در بهره‌های پردازش مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه احتمال خاموشی افزایش می‌یابد که می‌توان با افزایش بهره پردازش جبران نمود و به احتمال خاموشی مطلوبی رسید.

در حالت فروسو نیز نتایج به دست آمده از قسمت قبل را با سیستم PAM ارزیابی می‌کنیم. جدول ۲ پارامترهای به کار گرفته شده در شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.

برای بررسی کارایی روش فراپهن باند احتمال خاموشی کاربر ماکروسل به ازای افزایش توان ارسالی ایستگاه‌های پایه در بهره‌های پردازشی مختلف در شکل ۶ رسم شده است. از حالتی که  $PG=1$  می‌توان به عنوان حالتی که از سیگنال‌های فراپهن باند استفاده نشده، یاد نمود.



شکل (۵): احتمال خاموشی کاربر فمتوسل بر حسب افزایش چگالی کاربران ماکروسول و در بهره‌های پردازش مختلف

جدول (۲): مقادیر پارامترهای شبکه فروسو

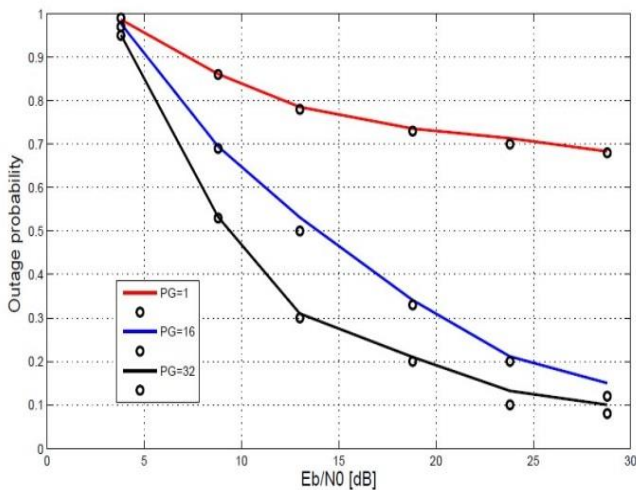
سطح آستانه	$th = 10^{-4}$
فاصله ماکرو از مرکز ناحیه	$a = 400 \text{ m}$
توان اثر سایه افکنی کانال فرابهن باند	$\sigma_U = 1[\text{dB}]$
توان اثر سایه افکنی کانال باند باریک	$\sigma_N = 1[\text{dB}]$

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش بهره پردازش احتمال خاموشی کاهش می‌یابد. در این حالت نیز نتایج تئوری و شبیه‌سازی تطابق خوبی دارند.

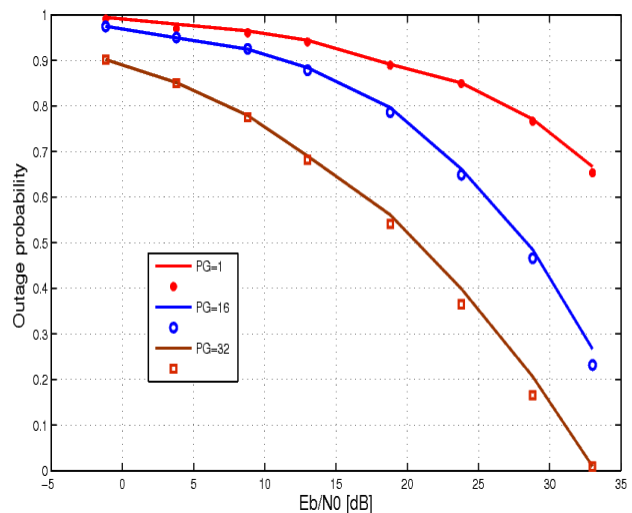
در شکل ۷ احتمال خاموشی کاربر ماکروسول بر حسب افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه فمتوسل و در بهره‌های پردازش مختلف مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه احتمال خاموشی افزایش می‌یابد ولی می‌توان با افزایش بهره پردازش به احتمال خاموشی مطلوب رسید.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای شبکه فراسو و کانال UWB

دوره پالس	$\tau_w = 0.192 \text{ ns}$
طول هر فریم	$T_f = 50 \text{ ns}$
دوره هر چیپ	$T_c = 1.5 \text{ ns}$
تعداد پالس‌های مورد نیاز برای ارسال بیت داده	$N_s = 16$
توان تضعیف مسیر	$\nu = 2$
سطح آستانه	$th = 10^{-2}$
شعاع ناحیه	$R_c = 500 \text{ m}$
چگالی کاربران ماکروسول	$\lambda = 7.6e-5$
فاصله فمتو از مرکز ناحیه	$a = 400 \text{ m}$
توان اثر سایه افکنی کانال فرابهن باند	$\sigma_u = 3[\text{dB}]$
توان اثر سایه افکنی کانال باند باریک	$\sigma_n = 8[\text{dB}]$

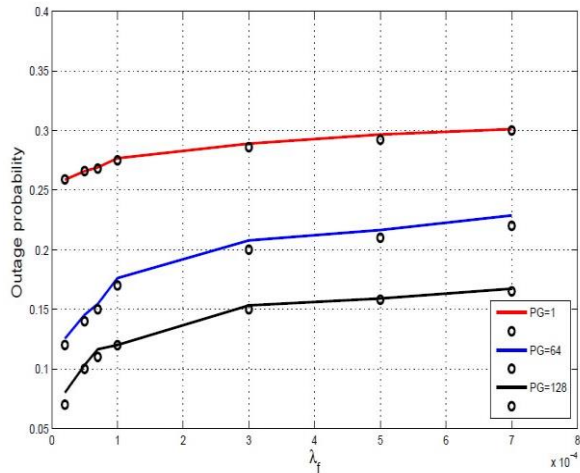


شکل (۶): احتمال خاموشی کاربر ماکروسول در بهره‌های پردازش مختلف بر حسب افزایش توان



شکل (۴): احتمال خاموشی کاربر فمتوسل در بهره‌های پردازش مختلف بر اساس افزایش توان





شکل (۷): احتمال خاموشی کاربر ماکروسل بر حسب چگالی ایستگاه-های پایه فمتوسل و در بهره‌های پردازش مختلف

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی کارایی تکنیک فرایه‌ن باند در شبکه‌های سلولی ناهمگن پرداختیم. همان‌طور که بیان شد، در این شبکه‌ها، تداخل یکی از معضلات اساسی به‌شمار می‌رود که با توجه به ویژگی‌های تکنیک فرایه‌ن باند پیشنهاد شد که ایستگاه‌های پایه فمتوسل که برد محدودتری دارند جهت ارتباط با کاربران خود از این تکنیک بهره ببرند.

با محاسبه احتمال خاموشی کاربران فمتوسل در اثر تداخل با سیگنال ارسالی از کاربران ماکروسلی که از ایستگاه پایه خود دور است و برای ارتباط در حالت فراسو باید سیگنال با توان زیادی ارسال کند و احتمال خاموشی کاربران ماکروسل که به علت دور بودن از ایستگاه پایه خود در ارتباطات فراسو سیگنال ضعیفی دریافت می‌کند و توان ارسالی سیگنال‌های فمتوسل‌های مجاور می‌تواند تداخل مخربی روی کاربر ماکروسل ایجاد کند ( دو سناریوی آسیب پذیر) میزان کارایی این روش مورد آنالیز و بررسی قرار گرفت. همچنین درستی نتایج تحلیلی بدست آمده با شبیه‌سازی تایید گردید.

## پیوست الف

به دلیل این‌که تعداد کاربران ماکروسل متداخل دارای توزیع پواسون است، تابع مشخصه عبارت  $A$  را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \phi_A(s) &= E\left\{e^{-s \sum_{n=1}^N \frac{e^{2\sigma_n G_n}}{r_n^{2\nu}}}\right\} \\ &= \sum E\left\{\left(e^{-s \frac{e^{2\sigma_n G_n}}{r_n^{2\nu}}}\right)^n\right\} \cdot \frac{(\lambda \pi R_c^2)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda \pi R_c^2} \\ &= e^{-\lambda \pi R_c^2 (1-s)} \end{aligned} \quad (الف)$$

که در آن  $x \triangleq E\left\{e^{-s \frac{e^{2\sigma_n G_n}}{r_n^{2\nu}}}\right\}$  به متغیر گوسی  $G_n$  با میانگین صفر و واریانس یک و متغیر  $r$  (فاصله کاربران ماکروسل از کاربر فمتوسل مورد نظر) وابسته است که تابع توزیع آن برابر است با [18]:

$$f_r(r) = \begin{cases} \frac{2r}{R_c^2} & 0 \leq r \leq R_c + a \\ \frac{2r \arccos\left(\frac{-R_c^2 + a^2 + r^2}{2ar}\right)}{\pi R_c^2} & R_c - a \leq r \leq R_c + a \end{cases} \quad (الف)$$

ابتدا از  $x$  نسبت به متغیر  $G_n$  متوسط‌گیری کرده که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\begin{aligned} E\left\{e^{-s \frac{e^{2\sigma_n G_n}}{r_n^{2\nu}}}\right\} &= E_r\left\{E_G\left\{e^{-s \frac{e^{2\sigma_n G_n}}{r_n^{2\nu}}}\right\} \mid r\right\} \\ &= E_r\left\{1 - sr^{-2\nu} E_G\left\{e^{2\sigma_n G_n} \mid r\right\}\right\} \\ &= 1 - se^{-2\sigma_n^2 a^2} E_r\left\{r^{-2\nu}\right\} \end{aligned} \quad (۳)$$

گام بعدی محاسبه متوسط  $r^{-2\nu}$  می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} E_r\{r^{-2\nu}\} &= \int_0^{R_c-a} \frac{2r}{R_c^2} r^{-2\nu} dr + \int_{R_c-a}^{R_c+a} \frac{2r \arccos\left(\frac{-R_c^2 + a^2 + r^2}{2ar}\right)}{\pi R_c^2} r^{-2\nu} dr \\ &= \frac{1}{R_c^2} \frac{(R_c - a)^{(2-2\nu)}}{1-\nu} + \int_{R_c-a}^{R_c+a} \frac{2r \arccos\left(\frac{-R_c^2 + a^2 + r^2}{2ar}\right)}{\pi R_c^2} r^{-2\nu} dr. \end{aligned} \quad (۴)$$

به دلیل این‌که رابطه بدست آمده به روش تحلیلی قابل محاسبه نیست از رابطه  $QQR^{[3]}$  تعمیم یافته برای محاسبه انتگرال‌ها می‌توان استفاده نمود. این روش انتگرال‌گیری در [۲۱] بیان شده‌است پس از ساده‌سازی تابع مشخصه  $\phi_A(s)$  برابر است با:

$$\phi_A(s) = e^{-\lambda \pi R_c^2 (se^{-2\sigma_n^2 a^2} \left(\frac{r}{R_c}\right)^{2-2\nu} \frac{(R_c - a)^{2-2\nu}}{1-\nu} + a \sum_{j \neq n} g_j (ar + R_c))} \quad (۵)$$

که  $g = \frac{2r \arccos\left(\frac{-R_c^2 + a^2 + r^2}{2ar}\right)}{\pi R_c^2} r^{-2\nu}$  و  $r_j$  ریشه  $j$ ام

چندجمله‌ای لژندر  $P_n'$  از درجه  $N$  که وزن‌های متناظر با آن  $\varpi_j = \frac{2}{(1-r_j^2)[P_n']^2}$  است، می‌باشد [24].

## پیوست ب

به دلیل این‌که تعداد فمتوهای متداخل دارای توزیع پواسون است تابع مشخصه ترم  $B$  را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

تحلیل کانال فرایه‌ن باند، توان پراکندگی را نرمالیزه کردیم بنابراین  
 $E\{X_i^2\} = m$  و لذا تابع مشخصه  $\phi_B(s)$  برابر است با:

$$\phi_B(s) = e^{-\lambda\pi R_c^2 (sk_u^2 me^{-2\sigma_G^2 \sigma_u^2} (\frac{r(R_c-a)^{2-2\nu}}{R_c^2} - \frac{1}{1-\nu} + a\sum \omega_j g(ar+R_c))} \quad (5b)$$

## مراجع

- [1] S. Xiao, X. Zhou, Y. Yuan-Wu, G. Ye Li and Wei Guo, "Robust Resource Allocation in Full-Duplex-Enabled OFDMA Femtocell Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 10, pp. 6382-6394, Oct. 2017.
- [2] B. Banitalebi and Z. Zeinalpour-Yazdi, "Downlink Performance of Two-Tier Networks with Time-Hopping Modulation," IET Communications, vol.9, no. 8, pp. 1035 - 1043, May. 2015.
- [3] Q. Deng, Zh. Li, J. Chen, F. Zeng, H. Wang, L. Zhou and Y. Choi "Dynamic Spectrum Sharing for Hybrid Access in OFDMA-Based Cognitive Femtocell Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.67, no. 11, pp. 10830-10840, 2018.
- [4] T. Mao, G. Feng, L. Liang, Sh. Qin, B. Wu., "Distributed Energy-Efficient Power Control for Macro-Femto Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no.2, pp.718-731, Feb. 2016.
- [5] M. Shafiei, Z. Zeinalpour-Yazdi and R. Ramezani, "Coverage Improvement in Femtocell Networks via Efficient Utility Pricing," IET Communications, vol. 10, no. 16, pp. 2215 - 2221, Oct. 2016.
- [6] دکتر جواد زراعتکارمقدم، حمید فرخی، دکتر ناصر ندا، مدیریت تداخل در شبکه‌های رادبوشناختگر با استفاده از شکل‌دهی پرتو همکارانه تحت اطلاعات غیر دقیق کانال، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران - دوره چهاردهم - شماره دوم - ۹۶.
- [7] S.M.Cheng, W. C. Ao, F. M. Tseng and K. C. Chen, "Design and Analysis of Downlink Spectrum Sharing in Two-Tier Cognitive Femto Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 5, pp. 2194-2207, Jun. 2012.
- [8] M. Hasani-Baferani, J. Abouei and Z. Zeinalpour-Yazdi, "Interference Alignment in Overlay Cognitive Radio Femtocell Networks," IET Communications, vol.10, no.11, pp. 1401-1410, Jul. 2016.
- [9] Sadough. Mahmood. E. Jaffrot. Duhamé, Performance Evaluation of MB-OFDM based UWB System  
 مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران - دوره چهاردهم - شماره یک - ۱۳۸۶
- [۱۰] سجاد علیزاده، حسین خالقی بیزکی، مجید اخوت، بهبود کارایی سیستم UWB مبتنی بر TiR در شرایط تخمینگر غیر ایده آل کانال، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران - سال یازدهم - شماره اول - بهار و تابستان ۹۳.
- [11] M. J. Sannella, Constraint Satisfaction and Debugging for Interactive User Interfaces, Ph.D. Thesis, University of Washington, Seattle, WA, 1994.
- [12] K. Kikuta and A. Hirose, "Narrowband Interference Mitigation in Angle-Frequency Direct Product Domain in UWB Receivers", 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp.502-503, Jan.2016.
- [13] H. Xiong, "An Efficient Narrowband Interference Suppression Approach in Ultra-Wideband Receiver",

$$\begin{aligned} \phi_B(s) &= E\{e^{-s\sum_{i=1}^N \frac{k_U^2 e^{2\sigma_U G_i} X_i^2}{R_i^{2\nu}}}\} \\ &= \sum E\{(e^{-s\frac{k_U^2 e^{2\sigma_U G_i} X_i^2}{R_i^{2\nu}}})^n\} \cdot \frac{(\lambda\pi R_c^2)^i}{i!} \cdot e^{-\lambda\pi R_c^2} \\ &= e^{-\lambda\pi R_c^2 (1-\bar{x})} \end{aligned} \quad (1b)$$

که در آن  $\bar{x} \triangleq E\{e^{-s\frac{k_U^2 e^{2\sigma_U G_i} X_i^2}{R_i^{2\nu}}}\}$  به متغیر گوسی  $G_i$  با میانگین صفر و واریانس یک، متغیر تصادفی  $X_i$  و متغیر  $R_i$  (فاصله فمتوها از کاربر ماکروسل) وابسته است. ابتدا از  $\bar{x}$  نسبت به متغیر  $G_i$  متوسط‌گیری کرده و سپس نسبت به متغیر  $R_i$  متوسط‌گیری می‌کنیم.

$$\begin{aligned} E\{e^{-s\frac{k_U^2 e^{2\sigma_U G_i} X_i^2}{R_i^{2\nu}}}\} &= E_{X_i}\{E_r\{E_G\{1 - \frac{sk_U^2}{R_i^{2\nu}} e^{2\sigma_U G_i} X_i^2 \mid r, X_i\}\}\} \\ &= E_{X_i}\{E_r\{1 - sk_U^2 R_i^{-2\nu} X_i^2 e^{-2\sigma_U^2 \sigma_G^2} \mid r, X_i\}\} \\ &= E_{X_i}\{1 - sk_U^2 X_i^2 e^{-2\sigma_U^2 \sigma_G^2} E_r\{R_i^{-2\nu}\}\} \end{aligned} \quad (2b)$$

گام بعدی محاسبه متوسط  $E_r\{R_i^{-2\nu}\}$  می‌باشد که همانند این رابطه در پیوست ۱ محاسبه شد، روابط بدست آمده به روش تحلیلی قابل محاسبه نیست بنابراین از رابطه GQR تعمیم یافته برای محاسبه انتگرال‌ها استفاده می‌کنیم.

$$\begin{aligned} E\{e^{-s\frac{k_U^2 e^{2\sigma_U G_i} X_i^2}{R_i^{2\nu}}}\} &= 1 - sk_U^2 E_{X_i}\{X_i^2\} e^{-2\sigma_U^2 \sigma_G^2} \frac{r(R_c-a)^{(2-2\nu)}}{R_c^2} \frac{1}{1-\nu} \\ &\quad + a\sum \omega_j g(ar+R_c). \end{aligned} \quad (3b)$$

که  $g$  و  $\omega_j$  در پیوست الف معرفی شده‌اند. در آخر برای محاسبه  $E\{X_i^2\}$  ابتدا  $X_i$  را ساده می‌کنیم.

$$\begin{aligned} X_i &= \sum_{l=1}^L h_{i,l} a_{i,n} \int_{-\infty}^{+\infty} p_i(t - \tilde{D}_{i,n} - t_{i,l}) \sqrt{2} g(t) \cos(2\pi f_c t) dt \\ &= \sum_{l=1}^L h_{i,l} \Gamma_l \end{aligned} \quad (4b)$$

که  $\Gamma_l = a_{i,n} \int_0^{T_g} p_i(t - \tilde{D}_{i,n} - t_{i,l}) \sqrt{2} \cos(2\pi f_c t) dt$  پاسخ ضربه  $l$  امین خوشه در  $i$  امین مسیر است به دلیل این‌که شکل موج  $g(t)$  با افزایش  $t$  به سمت صفر میل می‌کند حدود انتگرال‌گیری محدود می‌شود ( $T_g$  عرض پالس  $g(t)$ ). با توجه به این‌که پاسخ ضربه خوشه‌ها از هم مستقل هستند عبارت  $E\{X_i^2\} = E\{\sum_{l=1}^L h_{i,l} \Gamma_l \sum_{k=1}^L h_{k,l} \Gamma_k^*\}$  که  $k=l$  باشد جواب دارد در غیر این‌صورت صفر است. بنابراین  $E\{X_i^2\} = |\Gamma|^2 E_{h_{i,l}}\{\sum_{l=1}^L |h_{i,l}|^2\}$  است با توجه به این‌که  $h_{i,l}$  دارای توزیع ناکاگامی  $h_{i,l} \sim Nakagami(m, \Omega_i)$  است،  $h_{i,l}^2$  دارای توزیع  $|\Gamma|^2 = E\{\Gamma_l^2\} = m$  می‌باشد که  $h_{i,l}^2 \sim Gamma(k=m, \theta = \Omega_i/m)$  و لذا پس از ساده‌سازی داریم  $E\{X_i^2\} = m \sum_{l=1}^L \Omega_i$  و چون در ابتدای

- 
- <sup>8</sup> Path Loss
  - <sup>9</sup> Shadowing
  - <sup>10</sup> Rayleigh
  - <sup>11</sup> Narrow-band
  - <sup>12</sup> Processing Gain
  - <sup>13</sup> Gaussian quadrature rule

- IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 9, pp.2741-2748, Mar.2017
- [14] Z. Zeinalpour-Yazdi, Sh. Jalali, "Outage Analysis of Uplink Two-Tier Networks," IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 9, Sept. 2014.
  - [15] H. Shao, N. Beaulieu, "Direct Sequence and Time-Hopping Sequence Designs for Narrowband Interference Mitigation in Impulse Radio UWB Systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 7, Jul. 2011.
  - [16] M. Effros, A. Goldsmith, and Y. Liang, "Generalizing Capacity: New Definitions and Capacity Theorems for Composite Channels," IEEE Transactions on Communications, vol. 56, no. 7, pp. 3069-3087, Jul. 2011.
  - [17] Z. Win, C. Pinto, A. Giorgetti and M.Chiani, "Error Performance of Ultrawideband Systems in a Poisson Field of Narrowband Interferers," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 4, April 2006.
  - [18] C. Pinto, Ch. Chong, A. Giorgetti, M. Chiani and Z. Win, "Narrowband Communication in a Poisson Field of Ultrawideband Interferers," IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Sept. 2006.
  - [19] M. Ghavami, L.B. Michael, R. Kohno, 'UWB communications' John Wiley & Sons Ltd., NY, USA, 2006
  - [20] P. Pinto, Ch. Chong, A. Giorgetti, M. Chiani and Z. Win "Narrowband Communication in a Poisson Field of Ultrawideband Interferers," IEEE International Conference on Ultra-Wideband, pp. 387 - 392, Sept. 2006.
  - [21] A. Giorgetti, M. Chiani and Z. Win "The effect of narrowband interference on wideband wireless communication systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 53, no. 12, pp.2139-2149, Dec. 2005.
  - [22] S. Sadough, A. Mahmood, E. Jaffrot and P. Duhamel "Performance evaluation of MB-OFDM based UWB system," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 4, no. 1, 2007.
  - [23] Object. Y.N. Kovvali, "Theory and Applications of Gaussian Quadrature Methods," journal on Synthesis lectures on Algorithms and Software in Engineering, vol.3, pp. 1-65, 2011.
  - [24] M. Abramowitz and I. A. Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, Courier Corporation, 1964..
  - [25] Z. Zeinalpour-Yazdi, M. Nasiri-Kenari and B.Aazhang, "Bit error Probability Analysis of UWB Communications with a Relay Node", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 2, pp.802-813, Feb.2010.

## زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Femtocell
  - <sup>2</sup> Time Hopping Code Division Multiple Access
  - <sup>3</sup> Ultra Wide Band
  - <sup>4</sup> Impulse Radio
  - <sup>5</sup> Macrocell Base Station
  - <sup>6</sup> Poisson Point Process
  - <sup>7</sup> Nakagami