

مروری بر انواع منابع نویز در لینک‌های مخابرات نوری

ابراهیم مرتاضی و محمد کاظم مروج فرشی

انواع نویز در ادوات نیمه‌هادی، نویزهای موجود در تک‌تک قطعات نوری مرور می‌شود. برخی از این قطعات نویز چشم‌گیری دارند و کارایی سیستم به ویژه سیستم‌های جدید با نرخ بیت بالا و طول‌موج‌های بلندتر را محدود می‌سازند.

نویسندگان مقاله حاضر و دیگر همکاران، آنالیز نویز شدت، شامل نویز شدت نسبی^۱ (RIN)، نویز تفکیک مد و نویز پرش مد و همچنین نویز فاز برای لیزرهای نیمه‌هادی فابری پرو^۲ (FP) و لیزرها با فیدبک توزیع‌شده^۳ (DFB) را قبلاً از طریق مراجع [۱] تا [۱۱] ارائه کرده‌اند. در این مراجع، علاوه بر تحلیل و اندازه‌گیری، مدل‌سازی مداری نویز برای لیزرهای نیمه‌هادی تک‌مد و چندمد مخابراتی انجام شده‌است. در مراجع [۱۲] تا [۳۰] نیز برخی از انواع نویزهای موجود در لیزرهای نیمه‌هادی با روش‌های گوناگون تجزیه و تحلیل شده‌است.

از جمله نویزهای موجود در ادوات نیمه‌هادی نویز حرارتی^۴ است که در دمای متناهی یافت می‌شود. دیگر نویز موجود در سیستم‌ها، نویز انفجاری^۵ است که به واسطه خرابی در اتصالات به وجود می‌آید. نویزی که در اثر عبور جریان از یک شبکه نیمه‌هادی نامنظم به وجود می‌آید، نویز اضافی^۶ نام دارد. هنگامیکه حامل‌ها به صورت کاملاً تصادفی، با غلبه بر سد پتانسیل، از یک پیوند عبور کنند، نویز ضربه‌ای^۷ ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که اغلب نویزها از توزیع گوسی یا نرمال تبعیت می‌کنند.

تقویت‌کننده فیبری آلانید به اریبوم^۸ (EDFA) و تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی^۹ (SOA) که کاربرد زیادتری در سیستم‌های نوری دارند نیز با نویز گسیل خودبه‌خودی تقویت‌شده^{۱۰} (ASE) باعث اختلال در سیستم‌های نوری می‌شوند. در مراجع [۳۱] تا [۳۵] نویز در تقویت‌کننده‌های EDFA بررسی شده‌است. مراجع [۳۶] تا [۴۶] نیز نویز تقویت‌کننده‌های SOA را در دو نوع SOA فابری پرو و SOA موج رونده بررسی و گزارش کرده‌اند.

دو نوع آشکارساز نوری PIN و نوری بهمنی^{۱۱} (APD) دارای نویزهایی نظیر نویز جریان تاریک^{۱۲}، نویز ضربه‌ای و حرارتی‌اند. در مراجع [۴۷] تا [۵۰] بررسی و آنالیز نویز آشکارسازهای نوری گزارش شده‌است.

مفاهیم کلی مربوط به نویز و قطعات مختلف لینک‌های نوری در مراجع [۵۱] تا [۵۳] بررسی و ارائه شده‌است.

نویسندگان مقاله و دیگر همکاران، علاوه بر کارهای قبلی آنالیز نویز مربوط به مدلاسیون در لینک نوری و همچنین نویز فیبر نوری را در مراجع [۵۴] و [۵۵] ارائه و بالاخره برای سیستم‌های نوری مدل جدیدی

چکیده: در این مقاله نویزهای مطرح در یک لینک مخابرات نوری و منابع آن‌ها مرور می‌شود. مهمترین عوامل تولید کننده نویز در چنین لینکی عبارتند از لیزرهای نیمه‌هادی، تقویت‌کننده‌ها و آشکارسازهای نوری.

ابتدا، به مرور نویزهای شدت نسبی و فاز در لیزرهای نیمه‌هادی می‌پردازیم. آنگاه نشان می‌دهیم، نویز شدت نسبی در فرکانس‌های کم، ناچیز است و در نزدیکی فرکانس نوسانات میرایی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. این نویز که به ازای فرکانسی معین در جریان آستانه بیشینه است، با افزایش جریان تزریقی کاهش می‌یابد. نویز فاز که با پهنای خط لیزر ارتباط دارد، در فرکانس‌های کمتر از فرکانس نوسانات میرایی ثابت است و در فرکانس نوسانات میرایی به مقدار بیشینه می‌رسد. در لیزرهای نیمه‌هادی، نویز شدت و فاز، هر دو با افزایش توان نور خروجی، کاهش می‌یابند.

سپس، نویز گسیل خودبه‌خودی تقویت شده (ASE) در تقویت‌کننده‌های نوری فیبری آلانید به اریبوم (EDFA) را بررسی می‌کنیم. آنگاه نشان می‌دهیم، درحالی‌که نویز ASE با افزایش توان پمپ افزایش می‌یابد، به ازای مقادیر مختلف توان پمپ، با افزایش توان سیگنال ورودی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش توان پمپ باعث کاهش عدد نویز برحسب طول موج سیگنال ورودی می‌شود.

در ادامه، به مرور بر نحوه محاسبه عدد نویز (NF) در یک تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی (SOA) پرداخته آثار ضخامت و طول کاواک و همچنین ضریب بازتاب آینه‌های ورودی و خروجی را بر اندازه اعداد نویز در تقویت‌کننده‌های نوع فابری پرو (FP) و همچنین نوع موج رونده (TWA) بررسی می‌کنیم.

سپس، منابع نویز در یک آشکارساز نوری را بررسی و مدار معادل الکتریکی آن را با در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نویز (SNR) و نرخ خطای بیت (BER) آن ارائه می‌کنیم.

بعد، نویز مدی در فیبرهای نوری چند مد بررسی می‌شود.

در پایان، هم‌شنوایی به عنوان مهمترین عامل محدود کننده در مالتی‌پلکسرها / دی‌مالتی‌پلکسرها نوری موجود در سیستم‌های چند طول موجی بررسی خواهد شد.

کلید واژه: آشکارساز نوری، تقویت‌کننده نوری، عدد نویز، فیبر، لیزر نیمه‌هادی، مالتی‌پلکسر / دی‌مالتی‌پلکسر، نرخ خطای بیت، نسبت سیگنال به نویز، نویز.

۱- مقدمه

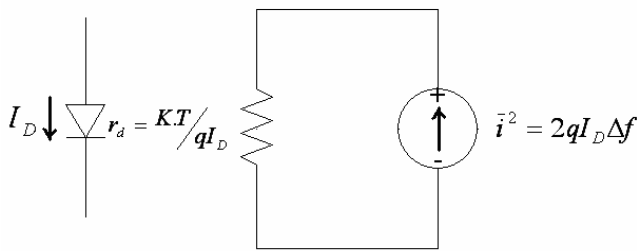
نویز سیگنال که دارای دامنه و فاز کاملاً تصادفی است، به طور کلی، عامل ناخواسته‌ای است که با سیگنال اصلی تداخل می‌کند و کارایی سیستم را محدود می‌سازد. نویز حاضر در یک سیستم ناشی از نویزهایی است که تک‌تک اجزاء تشکیل دهنده آن سیستم ایجاد می‌کنند. لذا، باتوجه به اینکه سیستم‌های نوری از قطعات مختلفی نظیر لیزرهای نیمه‌هادی، آشکارسازها، تقویت‌کننده‌ها، فیبرهای نوری، تبدیل‌کننده‌های طول موج، فیلترها و مالتی‌پلکسرها تشکیل شده‌اند، پس از معرفی مختصر

این مقاله در تاریخ ۴ آبان ماه ۱۳۸۳ دریافت و در تاریخ ۱۵ شهریور ماه ۱۳۸۴ بازنگری شد.

ابراهیم مرتاضی، Ecole Polytechnique، Polygrams Research Center، University of Montreal، Montreal، Canada، H3T 1J4

محمد کاظم مروج فرشی، گروه الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، تهران (email: farshi_k@modares.ac.ir).

1. Relative Intensity Noise
2. Fabry Perrot
3. Distributed Feedback
4. Thermal Noise
5. Popcorn Noise
6. Excess Noise
7. Shot Noise
8. Erbium Doped Fiber Amplifier
9. Semiconductor Optical Amplifier
10. Amplified Spontaneous Emission
11. Avalanche Photodiode
12. Dark Current Noise



شکل ۲: اثر نویز ضربه‌ای در مدار معادل سیگنال کوچک دیود.

نامیده می‌شود و معادل ۱۷۴ dBm- است.

شکل ۱ مدار معادل نویز حرارتی را نمایش می‌دهد که در آن، یک مقاومت بدون نویز با یک منبع ولتاژ سری شده‌است.

۲-۲ نویز ضربه‌ای

نویز ضربه‌ای همیشه با عبور جریان مستقیم از یک قطعه همراه است. جریان مستقیم خارج شده از یک دیود که ثابت به نظر می‌آید، در واقع از تعدادی پالس‌های جریان تصادفی تشکیل شده‌است. نوسان‌های موجود در جریان دیود نویز ضربه‌ای نام دارد و برحسب تغییرات حول اندازه میانگین جریان I_D معین می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\bar{i}^2 = 2qI_D \Delta f \quad (2)$$

که در آن، q بار الکترون است.

اثر نویز ضربه‌ای در مدار معادل سیگنال کوچک فرکانس پایین یک دیود، مطابق شکل ۲، توسط یک مولد جریان به طور موازی با دیود در نظر گرفته می‌شود. چون این نویز، فاز تصادفی دارد و صرفاً برحسب میانگین مربعات تعریف می‌شود، علامتی نیز ندارد و بنابراین جهت منبع جریان مدل شده در شکل اهمیتی ندارد و تنها برای نمایش مولد منبع جریان به کار رفته‌است.

۳-۲ نرخ خطای بیت

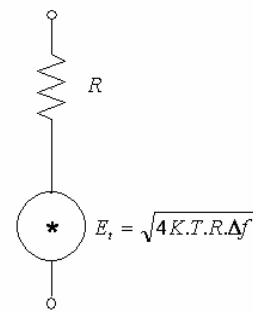
با این که، نویز ضربه‌ای در اندازه‌گیری نرخ خطای بیت (BER) موثر است، اما وقتی بیت ارسالی صفر است این نویز تاثیری نخواهد داشت. نرخ خطای بیت را می‌توان توسط رفتار منابع نویز گوسی بررسی کرد. بنابراین، اندازه آستانه BER با مکمل تابع خطای گوسی به صورت زیر رابطه دارد

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_1 - I_0}{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_0)} \right) \quad (3)$$

که I_1 و I_0 به ترتیب میانگین جریان‌های فوتونی تولید شده توسط بیت‌های صفر و یک و σ_1 و σ_0 نیز به ترتیب واریانس بیت‌های متناظرند. نرخ خطای بیت را همچنین می‌توان برحسب ولتاژهای صفر و یک یعنی، V_1 و V_0 ، نوشت

$$BER = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{|V_1 - D|}{\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|V_0 - D|}{\sigma_0} \right) \right] \quad (4)$$

که در آن D ولتاژ آستانه برای تشخیص صفر و یک بودن است.



شکل ۱: مدار معادل نویز حرارتی به صورت یک منبع ولتاژ و یک مقاومت بدون نویز.

همراه با نویز آن‌ها در مرجع [۵۶] منتشر کرده‌اند.

در نتیجه، با تجربیاتی که از انتشار و ارائه کارهای قبلی [۱] تا [۱۱] و [۵۴] تا [۵۶] حاصل شده‌است، و همچنین کمبود نوشتارهایی از این قبیل به زبان فارسی، نویسندگان بر آن شدند تا مقاله مروری حاضر را برای رفع نیازهای پژوهشگران مشتاق در این زمینه گردآوری و ارائه سازند.

در بخش ۲ این مقاله، مفاهیم اساسی در نویز و درحقیقت عوامل واسطه برای برقراری ارتباط نویز میان قطعات مختلف بررسی شده و سپس نویز لینک محاسبه می‌شود. در این بخش، نویز حرارتی، نویز ضربه‌ای، نرخ خطای بیت، فاکتور Q ، نسبت سیگنال به نویز و روابط بین آن‌ها آورده شده‌است. در بخش ۳ نویز در قطعات مهم یک لینک نوری بیان شده‌است. این بخش شامل لیزرهای نیمه‌هادی، تقویت‌کننده‌ها، آشکارسازها و دیگر قطعات نوری است. بخش آخر به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲-۲ مفاهیم اساسی نویز

هریک از قطعات نوری نویز خاص خود را دارند که به گونه‌ای خاص تعریف می‌شوند. برای برقراری ارتباط میان نویز قطعات مختلف و در نهایت محاسبه نویز کل سیستم باید از مفاهیم مشترک در تعریف نویز هر قطعه استفاده کرد.

نرخ خطای بیت، فاکتور Q ، نسبت سیگنال به نویز (SNR) و عدد نویز (NF) از جمله پارامترهای مطرح در یک سیستم نوری‌اند و از طریق آن‌ها می‌توان کارایی کل سیستم را بررسی کرد. این پارامترها، علاوه بر نویز خاص قطعه محاسبه شده و در نهایت نویز کل سیستم بر اساس آن‌ها سنجیده می‌شود. با توجه به لزوم استفاده از پارامترهای مشترک، در این قسمت به بررسی برخی از نویزها و پارامترهای اساسی لینک نوری می‌پردازیم.

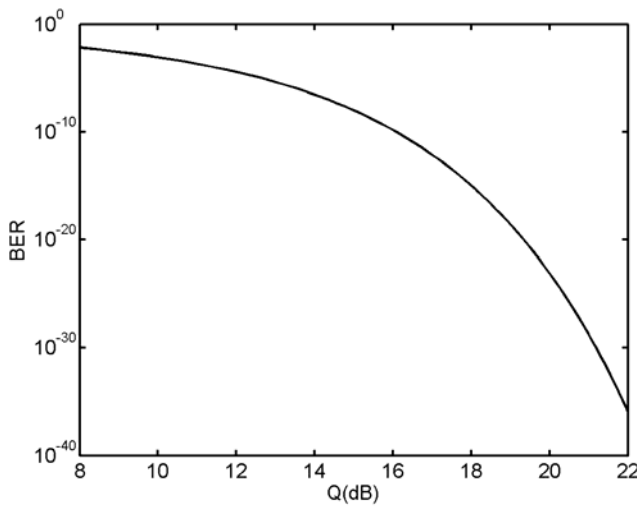
۱-۲ نویز حرارتی

در مقاومت‌های معمولی، نویز حرارتی از حرکت تصادفی الکترون‌ها در اثر گرما ناشی می‌شود. بنابراین، این نویز با دما ارتباط دارد. اگر توان قابل دسترس را با N_{tot} نمایش دهیم، رابطه آن با دما به صورت زیر در می‌آید:

$$N_{tot} = K.T.\Delta f \quad (1)$$

که در آن $k = 1.38 \times 10^{-23}$ w.s/K ثابت بولتزمن، Δf پهنای باند و T دما برحسب درجه کلوین است. حداقل نویزی که با آن سیستم می‌تواند در دمای اتاق ($T = 290K$) به ازای $\Delta f = 1\text{Hz}$ کار کند، کف نویز^۲

1. Signal to Noise Ratio
2. Noise Figure
3. Noise floor



شکل ۴: نرخ خطای بیت (BER) برحسب فاکتور Q .

تخمین زد:

$$BER \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q} \quad (10)$$

شکل ۴ اندازه BER را برحسب فاکتور Q نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش فاکتور Q ، اندازه BER کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه به ازاء $Q=6$ (۱۵.۶ dB)، خواهیم داشت $BER = 10^{-9}$.

۲-۵ نسبت سیگنال به نویز (SNR)

نسبت سیگنال به نویز یکی دیگر از پارامترهای مهم در سیستم‌های الکتریکی و نوری است. نسبت سیگنال به نویز الکتریکی (SNR_E) از رابطه زیر تبعیت می‌کند

$$SNR_E = \frac{S_E}{N_E} = \frac{v^2/R}{\sigma_v^2/R} = \frac{v^2}{\sigma_v^2} = \frac{i^2 R}{\sigma_i^2 R} = \frac{i^2}{\sigma_i^2} \quad (11)$$

که در آن σ_i^2 و σ_v^2 به ترتیب واریانس جریان و ولتاژ سیگنال است. به طور مشابه برای سیگنال به نویز نوری (SNR_O) داریم

$$SNR_O = \frac{S_O}{N_O} = \frac{|E|^2/\eta}{\sigma_O^2/\eta} = \frac{|E|^2}{\sigma_O^2}; \quad \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (12)$$

که در آن، E میدان الکتریکی، ϵ ضریب دی‌الکتریک، μ قابلیت نفوذ و η امپدانس فیبر نوری است. از آنجا که $|E|^2 \propto I_S(\nu)$ و $\sigma_O^2 \propto N_{tot}(\nu)$ در نتیجه رابطه (۸) را می‌توان به صورت $Q^2 = SNR/4$ نوشت. یا به عبارت دیگر نتیجه می‌گیریم

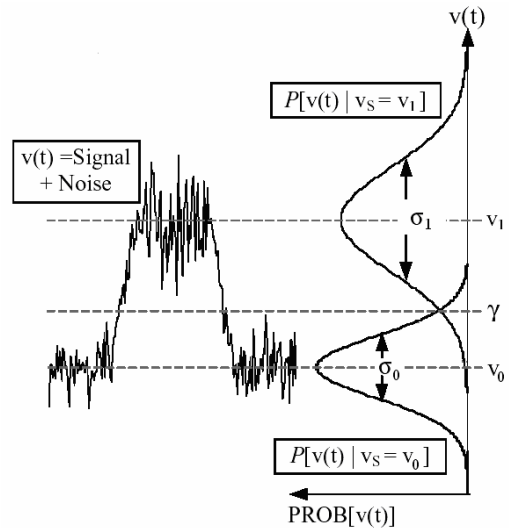
$$SNR_O = 4Q^2 \quad (13)$$

مطابق روابط (۱۰) (۱۲)، به ازای نرخ خطای بیت $BER = 10^{-9}$ ، برحسب dB خواهیم داشت $Q = 15.6$ dB و $SNR = 21.6$ dB. اگر در روابط پیشین به جای SNR، از میانگین آن استفاده کنیم، برای میانگین جریان خواهیم داشت

$$I_S(\text{avg}) = [I_S(\nu) + I_S(\nu^*)]/2 \quad (14)$$

و در نتیجه

$$SNR_{\text{avg}} = \frac{\text{average signal}}{\text{average noise}} = \frac{2I_S^2(\text{avg})}{N_{tot}} \quad (15)$$



شکل ۳: احتمال خطا در محاسبه فاکتور Q ، $v(t)$ و به ترتیب ولتاژ سیگنال همراه با نویز و سطح ولتاژ آستانه است.

۲-۴ فاکتور Q

فاکتور Q پارامتر مهم دیگری در محاسبه نویز لینک نوری است، و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$Q = \frac{I_S(\nu) - I_S(\nu^*)}{\sqrt{N_{tot}(\nu) + N_{tot}(\nu^*)}} \quad (5)$$

که در آن $N_{tot}(\nu)$ و $N_{tot}(\nu^*)$ توان کل نویز مرتبط با نویزهای ضربه‌ای، حرارتی و خودبه‌خودی، به ترتیب، برای بیت‌های صفر و یک، و $I_S(\nu)$ و $I_S(\nu^*)$ به ترتیب جریان خروجی تقویت‌کننده برای بیت‌های صفر و یک است. این دو جریان از روابط زیر تبعیت می‌کنند.

$$I_S(\nu) = eGP_{in} \nu r / [h\nu(r+1)] \quad (6)$$

$$I_S(\nu^*) = eGP_{in} \nu^* / [h\nu(r+1)] \quad (7)$$

که در آن‌ها، P_{in} توان متوسط سیگنال، r نسبت تمایز، G بهره و $h\nu$ انرژی فوتون است. در حالت ایده‌آل نسبت تمایز برابر بینهایت و در نتیجه $I_S(\nu^*) = 0$ خواهد شد.

در صورت برابر بودن یکی از دو پارامتر واریانس $\{\sigma_1 = \sigma_2\}$ یا توان کل نویز $\{N_{tot}(\nu) = N_{tot}(\nu^*)\}$ برای دو بیت صفر و یک، رابطه (۵) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$Q = \frac{I_S(\nu)}{2\sigma_1} = \frac{I_S(\nu)}{2\sqrt{N_{tot}(\nu)}} \quad (8)$$

فاکتور Q را می‌توان برحسب ولتاژ بیت‌های صفر و یک (V_1 و V_0) نیز نوشت:

$$Q = \frac{|V_1 - V_0|}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (9)$$

برای بیان دقیق‌تر فاکتور Q احتمال خطای محاسبه آن در شکل ۳ نمایش داده شده است [۵۰]. در این شکل، $v(t)$ بیانگر ولتاژ سیگنال به همراه نویز است که با جریان سیگنال اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز مرتبط است و γ بیانگر سطح ولتاژ آستانه است.

نرخ خطای بیت را با در نظر گرفتن رابطه (۳)، می‌توان به صورت زیر

دریافت نموده و پس از آشکارسازی و تقویت، عوامل مخرب آن را توسط فیلتر نوری حذف می‌کند.

در سیستم‌های جدید، علاوه بر قطعات عنوان شده، استفاده از قطعات دیگری نیز اجتناب ناپذیر است. از جمله مهمترین این قطعات، استفاده از تقویت‌کننده در طول مسیر است. افت توان ناشی از عبور سیگنال از فیبر، استفاده از تقویت‌کننده را در فواصل طولانی ضروری می‌سازد. مالتی‌پلکس‌های نوری نیز در سیستم‌های جدید برای ترکیب طول‌موج‌های مختلف و ارسال آن بر روی یک فیبر به کار می‌روند.

تمامی قطعات مورد استفاده در سیستم‌های نوری می‌توانند عامل تولید کننده نویز باشند که برخی از این قطعات، نسبت به بقیه، نویز بیشتری دارند. از مهمترین قطعات تولید کننده نویز در سیستم‌های نوری می‌توان به آشکارساز، تقویت کننده و لیزر نیمه‌هادی اشاره کرد. در ادامه انواع نویز در قطعات مختلف یک لینک نوری بر اساس اولویت آن‌ها بررسی می‌شود.

۳-۱ لیزرهای نیمه‌هادی

در این قسمت به بررسی انواع نویز در لیزرهای نیمه‌هادی که شامل نویز شدت و فاز است، می‌پردازیم. نویز شدت معمولاً با نویز شدت نسبی بیان می‌شود. درحالی‌که اثر نویز فاز یا فرکانس در پهنای خط لیزر مشاهده می‌شود.

به طور کلی، نویز لیزرهای نیمه‌هادی در نزدیکی جریان آستانه به بیشترین مقدار خود می‌رسد و با افزایش جریان تزریقی، مقدار آن کاهش می‌یابد. این مسئله هم در مورد نویز شدت و هم نویز فاز صادق است. همچنین اگر طیف این نویزها را در نظر بگیریم، در فرکانس نوسانات میرایی به بیشترین مقدار خود می‌رسد، با این تفاوت که بعد از فرکانس نوسانات میرایی، نویز شدت کاهش شدیدی می‌یابد، درحالی‌که نویز فاز ثابت خواهد ماند.

نوساناتی که به واسطه گسیل خودبه‌خودی و تولید و ترکیب حامل‌ها در لیزرهای نیمه‌هادی به وجود می‌آیند، با اضافه نمودن منابع نویز لنجین به طرف دوم معادلات نرخ در نظر گرفته می‌شوند. معادلات نرخ چند مُد با در نظر گرفتن منابع نویز لنجین به ترتیب برای حامل‌ها، فوتون‌ها و فاز میدان الکتریکی، به صورت ذیل نوشته می‌شوند [۳].

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_e N - \sum_j G_j P_j + F_N(t) \quad (23\text{-الف})$$

$$\frac{dP_k}{dt} = (G_k - \gamma) P_k - R_{sp} + F_{P_k}(t) \quad (23\text{-ب})$$

$$\frac{d\phi_k}{dt} = -(\omega_k - \omega_{th}) + \frac{1}{\nu} \beta_c (G_k - \gamma) + F_{\phi_k}(t) \quad (23\text{-ج})$$

که I جریان تزریقی، G_j بهره در مُد j ام، γ_e و γ معکوس طول عمر حامل‌ها و فوتون‌ها، R_{sp} ضریب گسیل خودبه‌خودی، β_c ضریب افزایشی پهنای خط و ω_{th} مقدار آستانه ضریب مُد است. F_N ، F_{P_k} و F_{ϕ_k} منابع نویز لنجین مربوط به حامل‌ها، فوتون‌ها و فاز میدان الکتریکی درحالی‌که $k, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ است.

پس از بررسی معادلات نرخ لنجین، اینک به بررسی نویز شدت و فاز می‌پردازیم.

به ازای نسبت تمایز بینهایت، داریم

$$Q^2 = \frac{I_S^2(\text{avg})}{N_{tot}} = \frac{\text{SNR}_{\text{avg}}}{2} \quad (16)$$

در این صورت به ازای $\text{BER} = 10^{-9}$ ، $\text{SNR}_{\text{avg}} = 18.6$ dB خواهد شد که در مقایسه با SNR برای بیت یک تنها به اندازه 3 dB کاهش دارد. علاوه بر روابط بیان شده برای فاکتور Q ، می‌توان رابطه آن را با نسبت سیگنال به نویز نوری نیز محاسبه کرد. بار دیگر با فرض $r = \infty$ نتیجه می‌گیریم

$$Q = \frac{I_S(1)}{\sqrt{N_{tot}(1)} + \sqrt{N_{tot}(0)}} = \frac{2I_S(\text{avg})}{\sqrt{N_{tot}(1)} + \sqrt{N_{tot}(0)}} \quad (17)$$

با چشم‌پوشی از نویزهای حرارتی و ضربه‌ای در مقابل نویزهای تقویت کننده، خواهیم داشت

$$Q = \frac{I_S(\text{avg})}{\left[\frac{B_e}{B_0} I_S(\text{avg}) I_S + \frac{B_e}{B_0} I_{sp}^2 \right]^{1/2} + \left(\frac{B_e}{B_0} I_{sp}^2 \right)^{1/2}} \quad (18)$$

که در آن B_0 و B_e به ترتیب پهنای باند الکتریکی و نوری است. نسبت سیگنال به نویز نوری برابر است با نسبت جریان‌های فوتونی تولید شده توسط سیگنال به نویز. بنابراین، نتیجه می‌گیریم،

$$\text{SNR}_O = \frac{I_S(\text{avg})}{I_{sp}} \quad (19)$$

در نتیجه می‌رسیم به

$$Q = \left(\frac{B_0}{B_e} \right)^{1/2} \frac{2 \text{SNR}_O}{(2 \text{SNR}_O + 1)^{1/2} + 1} \quad (20)$$

۲-۶ عدد نویز

عدد نویز (NF) پارامتر مهم دیگری است که در بررسی نویز یک سیستم اهمیت ویژه‌ای دارد. طبق تعریف عدد نویز عبارت است از نسبت چگالی طیفی توان نویز خروجی به چگالی طیفی توان نویز ورودی و با NF نمایش داده می‌شود. برای سیستمی با توان نویز N_a و توان نویز ورودی N_{in} ، عدد نویز به صورت زیر نوشته می‌شود

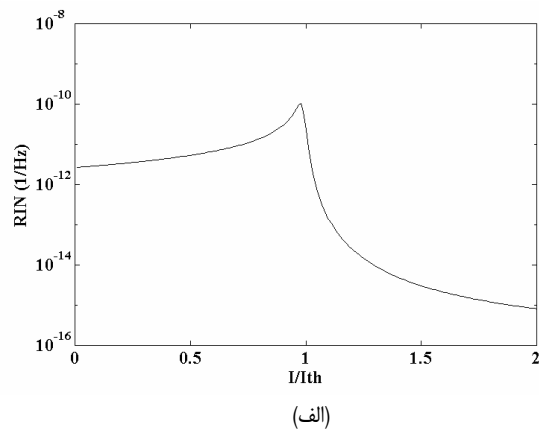
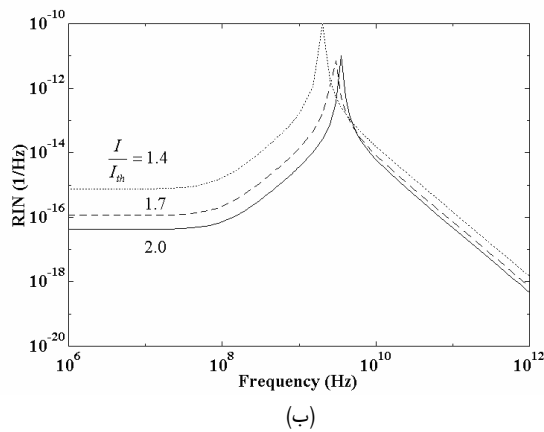
$$\text{NF} = \frac{N_a + N_{in}}{N_{in}} = 1 + \frac{N_a}{N_{in}} \quad (21)$$

توان نویز کل در یک سیستم می‌تواند به صورت $N_{out} = |H(f)|^2 (N_{in} + N_a)$ بیان شود. با ضرب کردن صورت و مخرج رابطه (21) در توان سیگنال ورودی، نتیجه می‌گیریم

$$\text{NF} = \frac{S_{in} N_{out}}{S_{in} |H(f)|^2 N_{in}} = \frac{S_{in}}{S_{out}} \cdot \frac{N_{out}}{N_{in}} = \frac{\text{SNR}_{in}}{\text{SNR}_{out}} \quad (22)$$

۳- نویز در قطعات مختلف سیستم‌های نوری

یک سیستم نوری حداقل شامل فرستنده، فیبر و گیرنده نوری است. در فرستنده نوری که غالباً از لیزرهای نیمه‌هادی استفاده می‌شود، نور تولید شده توسط لیزر مُدوله و ارسال می‌شود. فیبر نوری برای انتقال سیگنال محیط مناسبی است و همراه با توسعه فناوری از عوامل مخرب سیگنال در آن نیز کاسته می‌شود. گیرنده نوری که معمولاً شامل آشکارساز، تقویت کننده و فیلتر نوری است، سیگنال موجود بر روی نور را



شکل ۵: نویز شدت نسبی برحسب (الف) فرکانس و (ب) جریان تزریقی برای یک لیزر نیمه‌هادی از جنس InGaAsP با طول موج $1.3 \mu\text{m}$.

بیشینه می‌رسد.

با گرفتن تبدیل فوریه معکوس از نویز شدت نسبی، تابع خود همبستگی به دست می‌آید و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$C_{PP}(\tau) = \frac{\langle \delta P(t) \delta P(t + \tau) \rangle}{\bar{P}^2} \quad (27)$$

تبدیل فوریه معکوس رابطه (۲۷) به صورت زیر است

$$C_{PP}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{RIN}(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega \quad (28)$$

$$C_{PP}(\tau) = \frac{R_{sp} \exp(-\Gamma_R \tau)}{\Gamma_R \bar{P}} \times \text{Re} \left(\frac{\Gamma_e^\gamma + (\Omega_R + i\Gamma_R)^\gamma}{\Omega_R (\Omega_R + i\Gamma_R)} \exp(i\Gamma_R \tau) \right) \quad (29)$$

که

$$\Gamma_e^\gamma = \Gamma_N^\gamma + G_N^\gamma \bar{P}^\gamma \left(1 + \gamma_e \bar{N} / R_{sp} \bar{P} \right) - \gamma \Gamma_N G_N \bar{P} \quad (30)$$

تابع خود همبستگی شدت، در نتیجه نوسانات میرایی، با τ نوسان می‌کند و هنگامی که τ با زمان میرایی Γ_R^{-1} قابل مقایسه باشد، صفر می‌شود. $C_{PP}(0)$ کمیتی است که از نظر کاربردی حائز اهمیت است و با واریانس نوسانات شدت ارتباط دارد.

نسبت سیگنال به نویز لیزر به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\text{SNR} = \frac{1}{C_{PP}(0)} = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{RIN}(\omega) d\omega \right)^{-1/2} \quad (31)$$

با جایگذاری $C_{PP}(0)$ از رابطه (۲۹) داریم

$$\text{SNR} = \left(\frac{\Gamma_R \bar{P}}{R_{sp}} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{\Gamma_e^\gamma}{\Omega_R^\gamma + \Gamma_R^\gamma} \right)^{-1/2} \quad (32)$$

رابطه (۳۲) نشان می‌دهد که SNR به نرخ گسیل خودبه‌خودی، R_{sp} ، وابسته است و با افزایش آن کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود، نرخ کاهش نوسانات میرایی، Γ_R ، نیز در تعیین SNR نقش مهمی ایفا می‌کند.

تغییرات نسبت سیگنال به نویز، SNR، برحسب جریان تزریقی در شکل ۶ رسم شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش جریان تزریقی لیزر، SNR نیز افزایش می‌یابد.

۱-۳-۱) نویز شدت نسبی و نسبت سیگنال به نویز

نویز شدت به واسطه نوسانات توان خروجی حول مقدار حالت پایدارش به وجود می‌آید و معمولاً با نویز شدت نسبی بیان می‌گردد. نوسان جمعیت الکترون‌ها و فوتون‌ها حول مقادیر حالت پایدار به صورت زیر نوشته می‌شود [۵]

$$N(t) = \bar{N} + \delta N(t) \quad (24\text{-الف})$$

$$P(t) = \bar{P} + \delta P(t) \quad (24\text{-ب})$$

که $\delta P(t)$ و $\delta N(t)$ اندازه نوسان جمعیت الکترون‌ها و فوتون‌ها است.

با فرض رابطه خطی برای بهره داریم

$$G = A(N - N_o) \quad (24\text{-ج})$$

که A شیب بهره و N_o شفافیت الکترون برای مد طولی است.

با در نظر گرفتن روابط (۲) و (۳) در معادلات نرخ تک مد مربوط به الکترون‌ها و فوتون‌ها و با چشم‌پوشی از مقادیر کوچک، مشتق زمانی نوسانات به صورت زیر نوشته می‌شوند

$$\frac{d \delta N(t)}{dt} = -[\gamma_e + A\bar{P}] \delta N(t) - \bar{G} \delta P(t) + F_N(t) \quad (25\text{-الف})$$

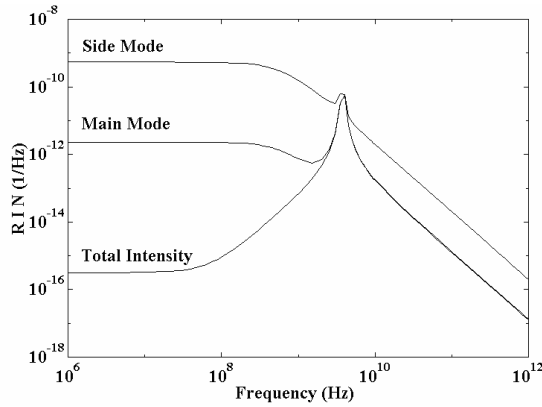
$$\frac{d \delta P(t)}{dt} = A\bar{P} \delta N(t) - \frac{R_{sp}}{\bar{P}} \delta P(t) + F_P(t) \quad (25\text{-ب})$$

برای یافتن تغییرات حامل‌ها و فوتون‌ها می‌توان دستگاه معادلات (۲۵) را به حوزه فرکانس برد و از تحلیل فوریه کمک گرفت. بنابراین نویز شدت نسبی با رابطه زیر تعریف می‌شود [۳۰]

$$\text{RIN} = \frac{\gamma R_{sp}}{\bar{P}} \times \frac{\left[(\Gamma_N^\gamma + \omega^\gamma) + G_N^\gamma \bar{P}^\gamma \left(1 + \gamma_e \bar{N} / R_{sp} \bar{P} \right) - \gamma \Gamma_N G_N \bar{P} \right]}{\left[(\Omega_R - \omega)^\gamma + \Gamma_R^\gamma \right] \left[(\Omega_R + \omega)^\gamma + \Gamma_R^\gamma \right]} \quad (26)$$

شکل ۵ نمودار طیف RIN را برحسب فرکانس به ازای جریان‌های تزریقی مختلف و همچنین برحسب جریان تزریقی برای یک لیزر InGaAsP با طول موج $1.3 \mu\text{m}$ نمایش می‌دهد.

از شکل ۵-الف برمی‌آید، نویز در فرکانس‌های پایین نسبتاً کم و در نزدیکی فرکانس نوسانات میرایی به طور چشم‌گیری افزایش یافته به مقدار بیشینه می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود، نویز شدت نسبی با افزایش جریان تزریقی کاهش می‌یابد. در شکل ۵-ب مشاهده می‌کنیم، برای یک فرکانس معین، نویز شدت نسبی در جریان آستانه به مقدار



شکل ۷: نویز شدت نسبی مُد اصلی، مُد جانبی و شدت نسبی کل برای یک لیزر نیمه‌هادی با دو مُد جانبی.

رابطه (۳۵) نشان می‌دهد که علاوه بر نویز لنجوبین مربوط به فاز میدان الکتریکی، تغییرات حامل‌ها و فوتون‌ها که به نوبه خود با منابع نویز مربوط به حامل‌ها و فوتون‌ها در ارتباطاند نیز در نویز فاز نقش دارند.

برای لیزرهای نیمه‌هادی تک مُد، می‌توان از عبارت شامل $\delta\tilde{P}(\omega)$ در رابطه (۳۶) چشم‌پوشی کرد و با در نظر گرفتن تقریب‌های لازم، چگالی طیفی نویز فاز را برحسب فرکانس نوسانات میرایی بیان نمود. در اینصورت:

$$S_{\phi}(\omega) \cong \frac{R_{sp}}{2P} \left(1 + \frac{\beta_c^2 \Omega_R^2}{\left[(\Omega_R^2 - \omega^2)^2 + (\gamma \omega \Gamma_R)^2 \right]} \right) \quad (36)$$

در لیزرهای نیمه‌هادی چند مُد نویز فاز هر مُد به صورت زیر تعریف می‌شود:

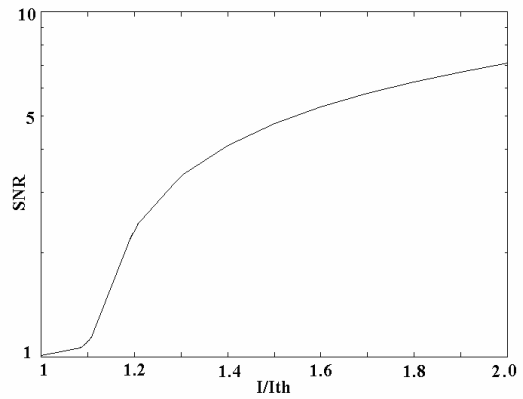
$$S_{\phi_k}(\omega) = \left\langle \left| \omega \delta\tilde{\phi}_k(\omega) \right|^2 \right\rangle \quad (37)$$

در شکل ۸-الف نویز فاز یک لیزر نیمه‌هادی تک مُد با در نظر گرفتن توان‌های خروجی مختلف رسم شده‌است. در این شکل مشاهده می‌شود که نویز فاز در فرکانس‌های زیر فرکانس نوسانات میرایی ثابت است و به ازای فرکانس نوسانات میرایی به مقدار بیشینه می‌رسد. با افزایش توان خروجی، نویز فاز، همانند نویز شدت، کاهش می‌یابد.

در لیزرهای نیمه‌هادی چند مُد می‌توان نویز فاز را برای هر مُد به طور جداگانه در نظر گرفت. در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود که در مُدهای جانبی با دور شدن از مُد اصلی نویز فاز افزایش می‌یابد و این مسئله می‌تواند به واسطه کاهش توان در مُدهای جانبی باشد. رفتار نویز فاز در مُدهای جانبی در مقایسه با مُد اصلی نیز همانند نویز شدت است [۱۳].

پهنای خط لیزر در سیستم‌های نوری اهمیت ویژه‌ای دارد. به عنوان نمونه در سیستم‌های چند طول‌موجی باید از لیزرهایی استفاده کرد که کمترین پهنای خط یا به عبارتی کمترین نویز فاز را داشته باشند. در سال‌های اخیر لیزرهایی ساخته شده‌اند که نه تنها در یک مُد طولی یگانه کار می‌کنند، بلکه طول‌موج آن‌ها روی گستره طول‌موج به کاررفته در سیستم‌های DWDM تنظیم شدنی است، و در عین حال پهنای خط باریکی دارند.

به عنوان نتیجه‌گیری باید گفت، لیزرهای نیمه‌هادی دارای دو نوع نویز شدت و فازند. نویز شدت نسبی در فرکانس‌های پایین، نسبتاً کم است و در نزدیکی فرکانس نوسانات میرایی به طور چشم‌گیری افزایش یافته به مقدار بیشینه می‌رسد. همچنین نویز شدت نسبی با افزایش جریان تزریقی



شکل ۶: تغییرات نسبت سیگنال به نویز برحسب جریان تزریقی.

در لیزرهای نیمه‌هادی چند مُد، نویز شدت نسبی برای تک تک مُدها، RIN_k ، و برای توان کل، RIN_{tot} ، به صورت زیر تعریف می‌شود

$$RIN_k(\omega) = \frac{\delta\tilde{P}_k^2(\omega)}{\bar{P}_k^2} \quad (33-الف)$$

$$RIN_{tot}(\omega) = \frac{S_P(\omega)}{\bar{P}^2} = \left(\sum_j \delta\tilde{P}_j(\omega) \right)^2 / \sum_j \bar{P}_j^2 \quad (33-ب)$$

در این روابط، \bar{P} جمعیت کل فوتون‌ها، $S_P(\omega)$ طیف نویز فوتون، $\delta\tilde{P}_j(\omega)$ و \bar{P}_j ، به ترتیب تغییرات جمعیت و جمعیت فوتون‌ها در مُد j ام است.

در شکل ۷ نویز شدت نسبی مُد اصلی، مُد جانبی و شدت نسبی کل، برای یک لیزر نیمه‌هادی با دو مُد جانبی رسم شده‌است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در لیزر نیمه‌هادی با دو مُد جانبی، نویز شدت کل در فرکانس‌های پایین مقدار کمی دارد و به ازای فرکانس نوسانات میرایی به مقدار بیشینه می‌رسد. سپس در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس نوسانات میرایی به شدت کاهش می‌یابد. نویز شدت نسبی مُد اصلی و مُدهای کناری به طور چشم‌گیری از نویز شدت کل بزرگترند. به علت کاهش فوتون‌ها در مُدهای جانبی نسبت به مُد اصلی، نویز شدت نسبی در مُدهای جانبی نسبت به مُد اصلی بیشتر است.

۱-۳-۲ نویز فاز و پهنای خط لیزر

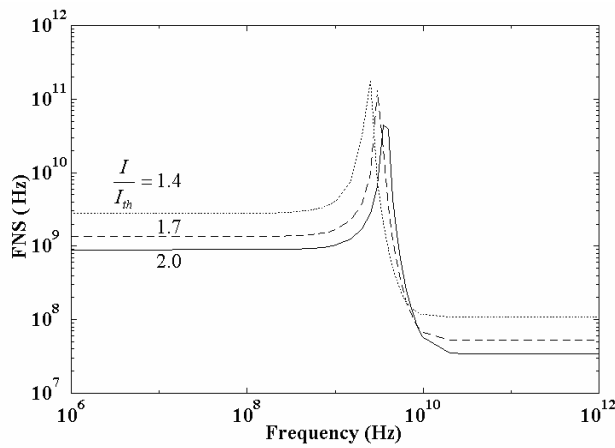
نویز فاز نیز همانند نویز شدت از نوسانات کوانتومی مربوط به فرآیند لیزش به وجود می‌آید. تغییرات فاز باعث جابه‌جایی در فرکانس، $\delta\omega_L = \delta\phi$ می‌شود. نویز فاز یا فرکانس در کارایی سیستم‌های مخابراتی همدوس اهمیت ویژه‌ای دارد و پهنای خط در لیزرها، نمودی از نویز فاز است [۱۲].

با در نظر گرفتن تغییرات فاز در معادله نرخ مربوط به فاز میدان الکتریکی، داریم

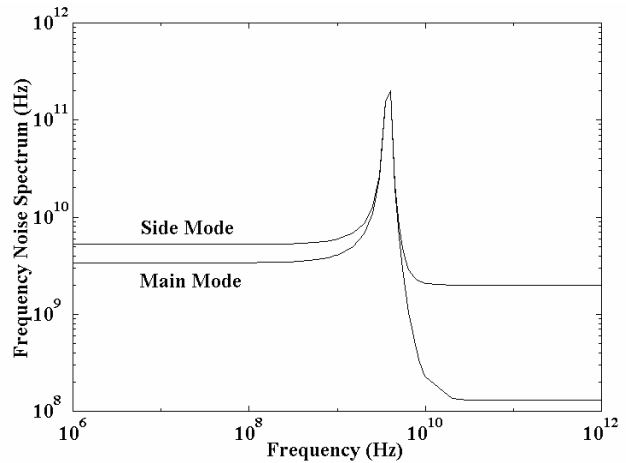
$$\frac{d\delta\phi_k(t)}{dt} = \frac{1}{2} A \beta_c \delta N(t) - \frac{1}{2} \beta_c \beta_{lk} \sum_j \delta P_j(t) + F_{\phi_k}(t) \quad (34)$$

مشابه نویز شدت، داریم

$$\delta\tilde{\phi}_k(\omega) = \frac{1}{i\omega} \left[\frac{1}{2} A \beta_c \delta\tilde{N}(\omega) - \frac{1}{2} \beta_c \beta_{lk} \sum_j \delta\tilde{P}_j(\omega) \right] + \frac{\tilde{F}_{\phi_k}(\omega)}{i\omega} \quad (35)$$



(ب)



(الف)

شکل ۸: طیف نویز فاز یک لیزر نیمه‌هادی، (الف) تک مُد به ازای جریان‌های تزریقی مختلف و (ب) چند مُد با در نظر گرفتن دو مُد جانبی.

ایجاد نویز در تقویت‌کننده‌های نوری به علت تحریک خودبه‌خودی یون‌ها صورت می‌گیرد. از آنجا که طول عمر یون‌های تحریک شده در ترازهایی که در آن قرار دارند کم است، بنابراین برخی از این یون‌ها به طور خودبه‌خودی به ترازهایی پایین‌تر گذار می‌کنند و باعث گسیل فوتون ناخواسته می‌شوند. این فوتون‌ها با فوتون‌های گسیل برانگیخته توسط نور ورودی هم‌دوس نیستند. فوتون‌های ناخواسته تولید شده در طول فیبر تقویت شده و بنابراین نویز زمینه یا گسیل خودبه‌خودی تقویت شده را به وجود می‌آورند.

تعداد فوتون‌هایی که، در حجم dV در جهت مثبت محور z توسط گسیل خودبه‌خودی تولید شده‌اند و فرکانسی میان ν و $\nu + \delta\nu$ دارند برابرند با

$$dn(\nu) = A_{\nu} g(\nu) \delta\nu \frac{\Delta\Omega}{4\pi} dV \int_s N_{\nu}(r, \theta) \bar{\psi}_s(r, \theta) r dr d\theta \quad (38)$$

که در آن $A_{\nu} = 1/\tau$ تابع شکل خط، $g(\nu) = \lambda_s n^2 \tau \sigma_e(\nu) / \lambda_s^2$ نرخ گسیل خودبه‌خودی، n ضریب شکست محیط، $\Delta\Omega = \lambda_s^2 / n^2 \pi \omega_s^2$ کسر گسیل خودبه‌خودی جذب‌شده توسط فیبر، و ω_s شعاع توان مُد انتقال یافته به فیبر است. در نتیجه، $dV = \pi \omega_s^2 dz$ توان گسیل خودبه‌خودی از رابطه $dP_{SE} = h\nu dn(\nu)$ به دست می‌آید و نرخ تولید توان گسیل خودبه‌خودی در پهنای باند $\delta\nu$ برابر است با

$$\frac{dP_{SE}}{dz} = \nu P_e \sigma_e(\nu) \int_s N_{\nu}(r, \theta) \bar{\psi}_s(r, \theta) r dr d\theta \quad (39)$$

که $P_e = h\nu \delta\nu$ توان نویز خودبه‌خودی یک فوتون است و ضریب ۲ به علت در نظر گرفتن هر دو مُد قطبش انتقالی در فیبر است.

حال معادلات نرخ را بر اساس توزیع توان سیگنال و پمپ و توان اشباع به دست می‌آوریم. توان اشباع، توانی است که در آن بهره تقویت به نصف کاهش پیدا می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$P_{sat}(\nu_s) = \frac{h\nu_s \pi \omega_s^2}{\sigma_a(\nu_s) [1 + \eta(\nu_s)] \tau} \quad (40)$$

که در آن $\nu_s = c/\lambda_s$ فرکانس سیگنال اصلی و $\eta_s = \eta(\lambda_s)$ است. با تعریف مقادیر به‌نجار شده $p = P_s/P_{sat}$ ، $q = P_p/P_{sat}$ و $p_s = P_s/P_{sat}$ ، نرخ تغییرات توان سیگنال به همراه نویز و نرخ تغییرات توان پمپ به صورت رابطه‌های (۴۱) و (۴۲) به دست می‌آید [۳۱]

کاهش یافته و به ازای یک فرکانس معین در جریان آستانه به مقدار بیشینه می‌رسد.

نویز فاز که با پهنای خط لیزر ارتباط دارد، در فرکانس‌های کم‌تر از فرکانس نوسانات میرایی ثابت است. در حوالی فرکانس نوسانات میرایی به شدت افزایش یافته به مقدار بیشینه می‌رسد. نویز فاز نیز همانند نویز شدت، با افزایش توان نور خروجی، کاهش می‌یابد.

۳-۲ تقویت‌کننده‌های نوری

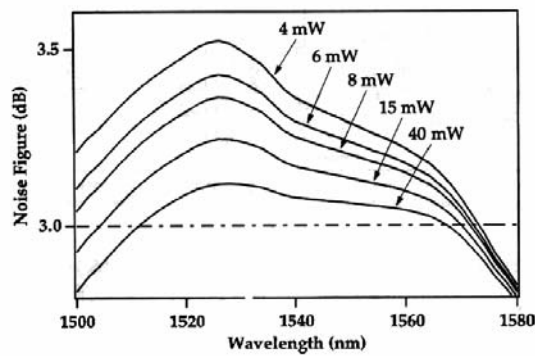
تقویت‌کننده‌های نوری در سیستم‌های مخابراتی عمل تقویت سیگنال را انجام می‌دهند. این تقویت می‌تواند در نقاط مختلف یک لینک نوری صورت گیرد. بر این اساس تقویت‌کننده‌ها به سه دسته تقویت‌کننده‌های توان، تقویت‌کننده‌های خط و پیش تقویت‌کننده‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین تقویت‌کننده‌های به کار رفته در سیستم‌های نوری شامل دو دسته اصلی تقویت‌کننده‌های EDFA و SOA اند.

نویز در تقویت‌کننده‌ها از جنبه‌های مختلف حائز اهمیت است. در تقویت‌کننده‌های توان و پیش تقویت‌کننده‌ها که در فرستنده‌ها و گیرنده‌ها به کار می‌روند، نویز تقویت‌کننده SOA به نویز مربوط به لیزر نیمه‌هادی و نویز آشکارساز اضافه شده در نرخ انتقال سیستم محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. در تقویت‌کننده‌های خط نیز که در مسیر نوری به کار می‌روند، نویز ASE در EDFA به همراه دیگر نویزهای تولید شده از قطعات نوری، کارایی سیستم را محدود می‌سازد.

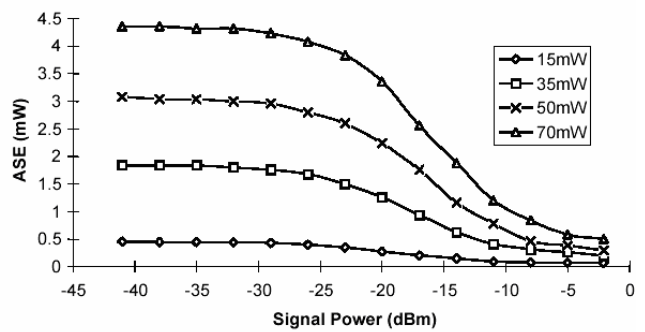
در این قسمت به مرور نویز در دو نوع اصلی تقویت‌کننده‌های EDFA و SOA می‌پردازیم.

۳-۲-۱ تقویت‌کننده فیبری آلاییده به اربیم

تقویت‌کننده فیبری EDFA، فیبر کوتاهی است که اربیم به آن افزوده شده‌است. یون‌های اربیم در اثر وارد شدن فوتون‌ها از لیزر پمپ به حالت‌های برانگیخته با ترازهای مختلف انرژی می‌روند. در این حالت وقتی سیگنال اصلی به EDFA می‌رسد، تابش برانگیخته گسیل می‌شود و یون‌ها به حالت‌هایی با انرژی کمتر باز می‌گردند. مقدار انرژی از دست رفته در بازگشت یون به حالت‌های پایین‌تر، فرکانس نور گسیل شده را تعیین می‌کند. به همراه گسیل برانگیخته در EDFA، گسیل خودبه‌خودی نیز صورت می‌گیرد. این گسیل خودبه‌خودی در طول EDFA تقویت شده و عامل اصلی نویز ASE در تقویت‌کننده می‌باشد [۳۴] و [۳۵].



شکل ۱۰: عدد نویز EDFA برحسب طول موج برای توان‌های پمپ مختلف با توان سیگنال -۴۰ dBm و طول فیبر هشت متر [۳۳].



شکل ۹: نویز ASE تقویت‌کننده EDFA برحسب توان سیگنال ورودی به ازای توان‌های مختلف پمپ [۳۱].

$$\frac{dp}{dz} = \rho \cdot \sigma_a(v_s) \cdot \frac{2}{\omega_s^2} \int_s \frac{\rho(r)}{\rho_s} \psi_s(r) \left\{ \frac{\eta_s \left[q\psi_p(r) + \frac{1}{1+\eta_s} p\psi_s(r) \right] [p + \tau p] - \left[1 + \frac{\eta_s}{1+\eta_s} p\psi_s(r) \right] p}{1 + q\psi_p(r) + p\psi_s(r)} \right\} r dr \quad (41)$$

$$\frac{dq}{dz} = -q \rho \cdot \sigma_a(v_p) \cdot \frac{2}{\omega_p^2} \int_s \frac{\rho(r)}{\rho_s} \psi_p(r) \left\{ \frac{1 + \frac{\eta_s}{1+\eta_s} p\psi_s(r)}{1 + q\psi_p(r) + p\psi_s(r)} \right\} r dr \quad (42)$$

$$\frac{dn}{dt} = P - R - \sum_m \Gamma G_m N_{p,m} + F_e(t) \quad (43)$$

$$\frac{dN_{p,m}}{dt} = -\frac{N_{p,m}}{\tau_p} + \Gamma G_m N_{p,m} + \Gamma E_{cv,m} + P_{in,m} + F_{p,m}(t) \quad (44)$$

که در آن‌ها، n چگالی حامل‌ها، P نرخ پمپ در اثر جریان تزریقی، R نرخ ترکیب حامل‌ها، Γ ضریب محدودیت، $N_{p,m}$ تعداد فوتون‌ها در مد m ام، τ_p طول عمر فوتون‌ها، $P_{in,m}$ نرخ تزریق فوتون‌های سیگنال مد m ام و $F_e(t)$ و $F_{p,m}(t)$ منابع نویز لنجین‌اند.

ضریب گسیل برانگیخته G_m در روابط (۴۳) و (۴۴) برابر است با

$$G_m = E_{cv,m} - E_{vc,m} \quad (45)$$

که در رابطه فوق $E_{cv,m}$ و $E_{vc,m}$ به ترتیب احتمال گسیل برانگیخته و جذب مربوط به مد m ام است.

برای محاسبه توان نویز، تغییرات سیگنال کوچک $\delta n(t)$ و $\delta N_{p,m}(t)$ را حول مقادیر ثابت \bar{n} و $\bar{N}_{p,m}$ در نظر می‌گیریم

$$\frac{d}{dt} \delta n(t) = \left(-\frac{\partial \bar{R}}{\partial \bar{n}} \sum_m \frac{\partial \bar{G}}{\partial \bar{n}} - \Gamma \bar{N}_{p,m} \right) \delta n(t) - \sum_m \Gamma \bar{G}_m \delta N_{p,m}(t) + F_e(t) \quad (46)$$

$$\frac{d}{dt} \delta N_{p,m}(t) = \Gamma (\bar{N}_{p,m} \frac{\partial \bar{G}_m}{\partial \bar{n}} + \frac{\partial \bar{E}_{cv,m}}{\partial \bar{n}}) \delta n(t) + \left(\Gamma \bar{G}_m - \frac{1}{\tau_p} \right) \delta N_{p,m}(t) + F_{p,m}(t) \quad (47)$$

تبدیل فوریه منابع نویز لنجین در روابط (۴۶) و (۴۷) به صورت روابط (۴۸) تا (۵۰) نوشته می‌شود

در روابط (۴۱) و (۴۲) $\rho(r)$ توزیع چگالی اربیم در طول فیبر و ρ_s حداکثر چگالی اربیم است و انتگرال‌ها میان صفر تا شعاع مغزی فیبر، a محاسبه می‌شوند. با حل دو معادله (۴۱) و (۴۲) به طور همزمان می‌توان توان سیگنال به همراه نویز و توان پمپ را به عنوان تابعی از طول فیبر یا طول موج سیگنال در دو طول موج پمپ به دست آورد. همچنین نویز حاصل از عبارت p در معادله (۴۱) را می‌توان در حالت‌هایی که سیگنال وجود ندارد و در دو طول موج پمپ به دست آورد.

شکل ۹ نویز ASE تقویت‌کننده EDFA را بر حسب توان سیگنال ورودی به ازای توان‌های مختلف پمپ نشان می‌دهد. در این شکل، با افزایش توان سیگنال ورودی، ASE در تمامی توان‌های پمپ کاهش می‌یابد و توان‌های پمپ بزرگتر، نویز ASE بیشتری دارند [۳۲].

شکل ۱۰ عدد نویز یک تقویت‌کننده EDFA را برحسب طول موج سیگنال ورودی در توان سیگنال ورودی -۴۰ dBm برای توان‌های پمپ ۴، ۶، ۸، ۱۵ و ۳۰ mW و طول فیبر ۸ متر نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، با افزایش توان پمپ در تمامی طول‌موج‌های سیگنال ورودی، نویز تقویت‌کننده کم می‌شود [۳۳].

۳-۲-۲ تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی

منبع اصلی نویز تولیدشده در SOA نیز نظیر EDFA، گسیل خودبه‌خودی است [۳۶]. طبیعت تصادفی گسیل خودبه‌خودی باعث نوساناتی در چگالی حامل‌ها می‌شود. نوسانات حامل‌ها نیز باعث به وجود آمدن نوساناتی در بهره شده و چگالی فوتون‌ها و دامنه و فاز سیگنال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین آنالیز SE در SOA برای بررسی نویز قطعه ضروری است.

یکی از روش‌های آنالیز نویز در SOA، استفاده از معادلات نرخ است. معادلات نرخ چند مد SOA به صورت روابط (۴۳) و (۴۴) نوشته می‌شوند:

تزریق ثابت حامل‌ها رسم شده است، نشان می‌دهد که عدد نویز با افزایش طول کاواک در نقطه‌ای به مقدار کمینه می‌رسد و پس از آن دوباره افزایش می‌یابد.

به عنوان نتیجه‌گیری درباره نویز تقویت‌کننده‌ها می‌توان گفت که در تقویت‌کننده فیبری EDFA، با افزایش توان سیگنال ورودی، ASE در تمامی توان‌های پمپ کاهش می‌یابد و به ازای توان‌های پمپ بزرگتر، نویز ASE بیشتری است. با افزایش توان پمپ در تمامی طول موج‌های سیگنال ورودی، نویز تقویت‌کننده EDFA کم می‌شود.

همچنین در تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی با کاواک ضخیم و کوتاه و اگر ضریب بازتاب آینه ورودی از خروجی بیشتر باشد، نویز کمتری دارد. درحالی‌که هرگاه تزریق حامل‌ها ثابت باشد، برای TWA طول و ضخامت کاواک بر اندازه تأثیری نویز ندارد. علاوه بر آن برای تزریق ثابت حامل‌ها، عدد نویز با افزایش طول کاواک در نقطه‌ای به مقدار کمینه می‌رسد و پس از آن دوباره افزایش می‌یابد.

۳-۳ آشکارسازهای نوری

تمامی گیرنده‌های نوری از یک سنسور نوری و یک دمودلاتور تشکیل شده‌اند. سنسور نوری سیگنال نوری را به الکتریکی تبدیل کرده و دمودلاتور اطلاعات موجود در سیگنال الکتریکی را استخراج می‌کند. هرگاه سیگنال نوری شکل موج ساده‌ای داشته باشد، به دمودلاتور نیازی نخواهد بود و سنسور نوری به عنوان آشکارساز نوری به کار می‌رود. در ادامه، نویز دو نوع آشکارساز نوری PIN و APD بررسی و مرور می‌شود.

۳-۳-۱ آشکارساز PIN

عمل آشکارسازی در یک دیود نوری PIN بسیار ساده انجام می‌شود. فوتون وارد شده در ناحیه I جذب می‌شود و یک زوج الکترون-حفره تولید می‌کند. ولتاژ اعمالی به قطعه الکترون‌های تولیدشده را به قسمت انتهایی PIN که دارای اتصال اهمی است می‌رساند. جریان نوری دیود نوری PIN از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_{ph} = \frac{\eta P \lambda q}{hc} \quad (53)$$

که q بار الکترون، c سرعت نور، P توان نور ورودی برحسب وات و η بازده کوانتومی قطعه است. به عنوان نمونه، توان نوری 200 nW در طول موج $0.9 \mu\text{m}$ با بازده کوانتومی 60% یک جریان نوری 87/1 nA تولید می‌کند.

از آنجا که فوتودیود PIN هیچ‌گونه تقویتی بر روی جریان تولیدی انجام نمی‌دهد بنابراین بعد از آشکارسازی نور توسط دیود، باید از تقویت‌کننده استفاده کرد. این عمل معمولاً با تبدیل جریان به ولتاژ توسط یک مقاومت انجام می‌شود. برای در نظر گرفتن نویز دیود نوری PIN، باید اثر متقابل بین فوتودیود و تقویت‌کننده نیز در نظر گرفته شود.

استفاده از مدار معادل فوتودیود، آنالیز نویز این قطعه را آسان‌تر می‌کند. برای این کار می‌توان نویزهای موجود را به صورت منابع جریان در نظر گرفت. در شکل ۱۲ مدار معادل یک فوتودیود به همراه تقویت‌کننده نشان داده شده است [۴۷]. ماهیت اتفاقی تولید فوتوالکترون‌ها و در نهایت ایجاد جریان نوری، باعث به وجود آمدن نویز کوانتومی می‌شود. میانگین مربع جریان نویز کوانتومی طبق رابطه زیر به دست می‌آید

$$\langle i_Q^2 \rangle = \eta q I_{ph} B \quad (54)$$

که در آن B پهنای باند آشکارسازی است و اندازه نوعی آن 5 MHz است.

$$\begin{aligned} \langle F_e^2(\omega) \rangle &= \langle F_e(\omega) F_e^*(\omega) \rangle \\ &= P + \bar{R} + \sum_m \left[\Gamma \bar{E}_{cv,m} \bar{N}_{p,m} \right. \\ &\quad \left. + \Gamma (\bar{E}_{cv,m} \bar{N}_{p,m} + \Gamma (\bar{E}_{cv,m} - \bar{G}_m) \bar{N}_{p,m}) \right] \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \langle F_{p,m}^2(\omega) \rangle &= \langle F_{p,m}(\omega) F_{p,m}^*(\omega) \rangle \\ &= \frac{\bar{N}_{p,m}}{\tau_p} + \Gamma \bar{E}_{cv,m} (1 + \bar{N}_{p,m}) \\ &\quad + \Gamma (\bar{E}_{cv,m} - \bar{G}_m) \bar{N}_{p,m} + P_{in,m} \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \langle F_{p,m}(\omega) F_{p,m}^*(\omega) \rangle &= -\Gamma [\bar{E}_{cv,m} (1 + \bar{N}_{p,m}) \\ &\quad + (\bar{E}_{cv,m} - \bar{G}_m) \bar{N}_{p,m}] \end{aligned} \quad (50)$$

با گرفتن تبدیل فوریه از روابط (۴۶) و (۴۷)، مربع میانگین نوسانات فوتون‌ها، $\langle \delta N_{p,m}^2(\omega) \rangle = \langle \delta N_{p,m}(\omega) \delta N_{p,m}^*(\omega) \rangle$ به دست می‌آید. توان نویز دریافت شده توسط آشکارساز به طیف نوسانات تعداد کل فوتون‌ها، $\langle \delta N_p^2(\omega) \rangle$ بستگی دارد. $\langle \delta N_p^2(\omega) \rangle$ شامل دو قسمت $\langle \delta N_{p,m}(\omega) \delta N_{p,m}^*(\omega) \rangle$ و $\langle \delta N_{p,k}(\omega) \delta N_{p,\ell}^*(\omega) \rangle$ است. اولی بیانگر خودهمبستگی نوسانات فوتون‌ها در مد m ام، و دومی بیانگر همبستگی متقابل بین مد k ام و ℓ ام است:

$$\langle \delta N_p^2 \rangle = \text{Re} \left[\sum_k \sum_l \langle \delta N_{p,k}(\omega) \delta N_{p,l}^*(\omega) \rangle \right] \quad (51)$$

توان نویز در آشکارسازی با مقاومت بار R_L و پهنای باند B_0 ، برابر است با:

$$P(\omega) = \frac{\langle \delta N_p^2(\omega) \rangle}{\tau_{p\tau}} R_L B_0 \eta_D^2 e^2 \quad (52)$$

که η_D بازده کوانتومی آشکارساز و τ_p طول عمر فوتون ناشی از تلفات آینه خروجی است.

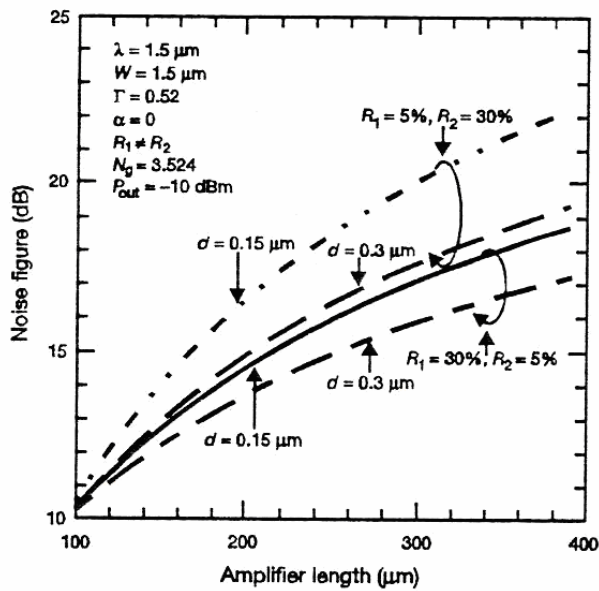
در شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-د عدد نویز برحسب پارامترهای ساختاری تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی نشان داده شده است [۳۷].

در شکل ۱۱-الف بازتاب آینه‌های ورودی و خروجی برابر است و توان خروجی برابر 10 dBm- است. در یک تقویت‌کننده موج رونده (TWA) که ضرایب بازتاب دیواره‌های آن صفر است، ضخامت لایه فعال بر روی عدد نویز تأثیری ندارد، درحالی‌که با افزایش طول و ضخامت کاواک، عدد نویز تقویت‌کننده فابری پرو افزایش می‌یابد. بنابراین کاواک کوتاه و ضخیم دارای نویز کمتری است.

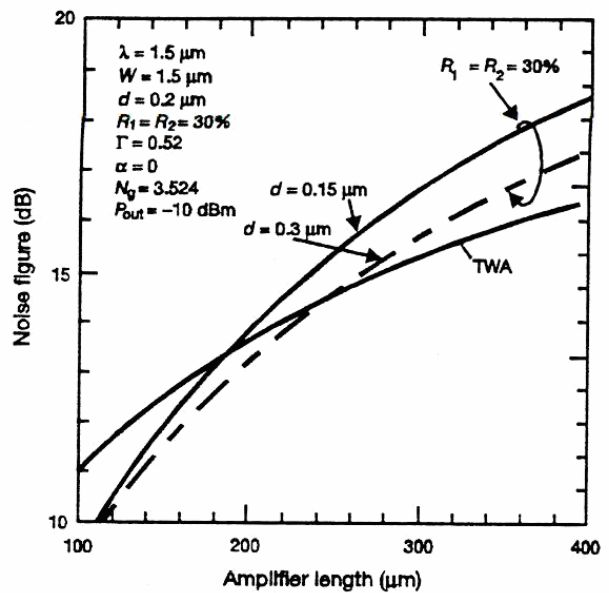
در شکل ۱۱-ب عدد نویز برحسب طول کاواک برای تقویت‌کننده‌هایی با ضرایب بازتاب متفاوت دیواره‌های ورودی و خروجی نشان داده شده است. هنگامیکه بازتاب آینه ورودی از خروجی بیشتر باشد، نویز تقویت‌کننده کمتر از حالت عکس آن است. بنابراین تقویت‌کننده‌ای با کاواک ضخیم و کوتاه و دارای ضریب بازتاب آینه ورودی بیشتر از خروجی، دارای نویز کمتری است.

شکل ۱۱-ج که با شکل ۱۱-الف قابل مقایسه است، مشاهده می‌شود، هنگامی که تزریق حامل‌ها ثابت باشد برای TWA طول و ضخامت کاواک بر اندازه نویز تأثیری ندارد.

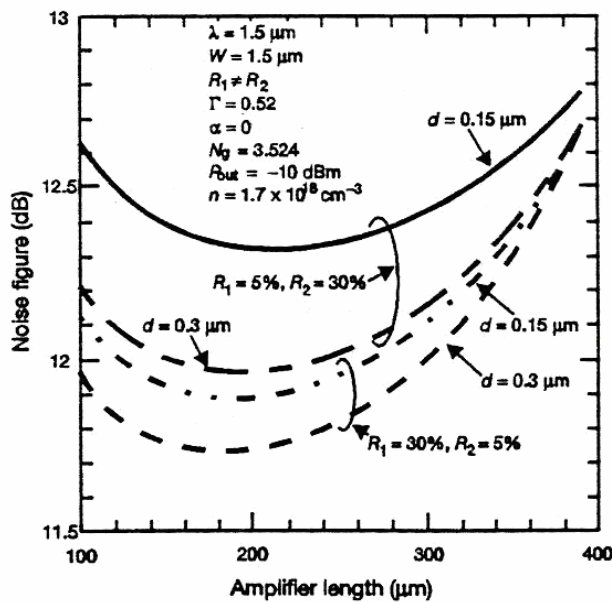
شکل ۱۱-د که برای ساختاری مشابه شکل ۱۱-الف اما به ازای



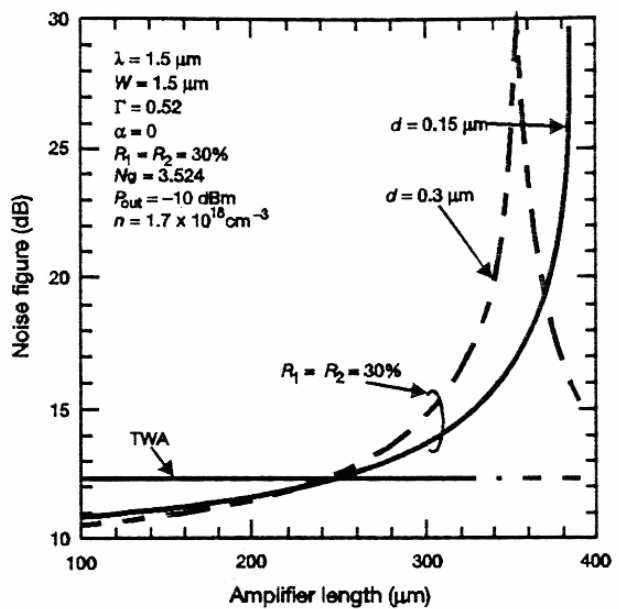
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱: عدد نویز برحسب پارامترهای ساختاری تقویت کننده نوری نیمه هادی، (الف) بازتاب آینه‌های ورودی و خروجی برابر، (ب) ضرایب بازتاب دیواره‌های ورودی و خروجی، متفاوت، (ج) بازتاب آینه‌های ورودی و خروجی برابر و تزریق حامل‌ها ثابت و (د) ضرایب بازتاب دیواره‌های ورودی و خروجی متفاوت و تزریق حامل‌ها ثابت [۳۷].

نویز ضربه‌ای کل که ناشی از مجموع جریان‌های تصادفی I_{ph} ، I_D و I_B است، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۸]

$$\langle i_s^2 \rangle = 2q(I_{ph} + I_B + I_D)B \quad (56)$$

علاوه بر نویز ضربه‌ای، نویز حرارتی نیز دارای نقش مهمی در نویز کل سیستم است. این نویز به علت تولید حامل در اثر جنبش حرارتی و در حضور نور تولید می‌شود. جریان نویز حرارتی ناشی از مقاومت‌های موجود در آشکارساز به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_{eq}} \quad (57)$$

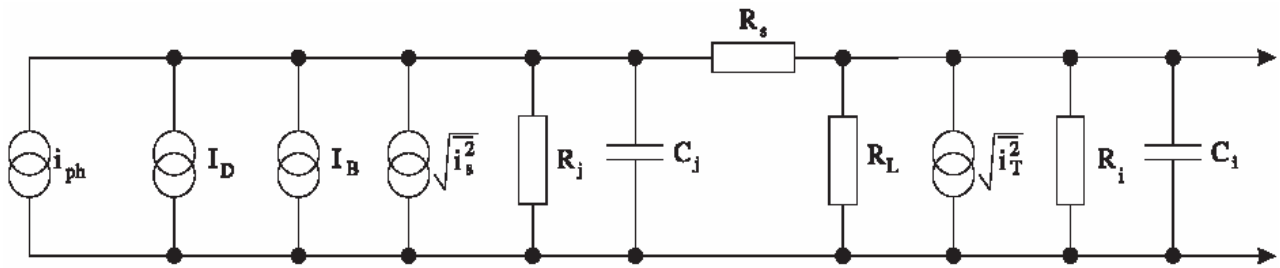
که در آن R_{eq} مقاومت معادل است و از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_i} \quad (58)$$

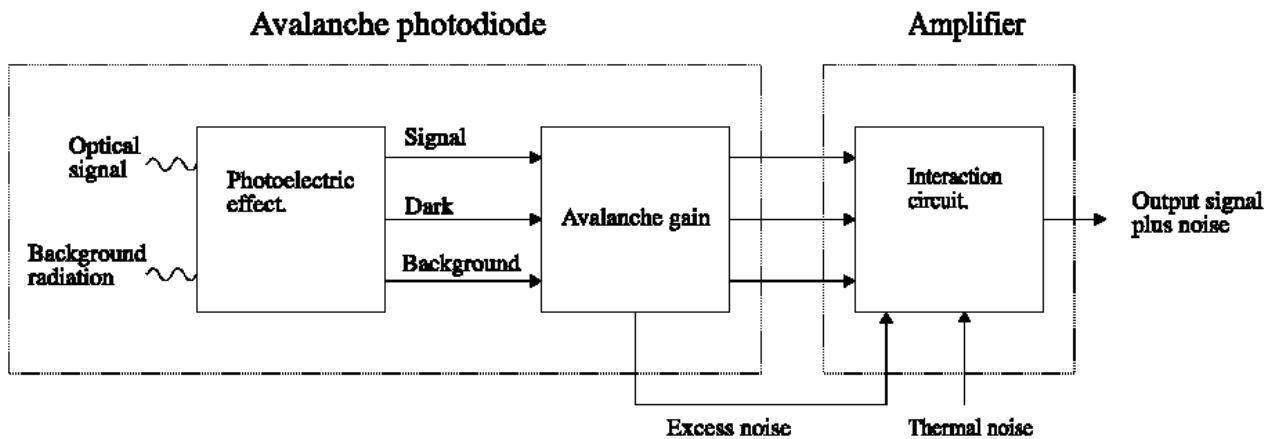
وقتی که هیچ نوری به آشکارساز نمی‌تابد، زوج الکترون-حفره تولید شده به صورت تصادفی جریانی در آشکارساز تولید می‌کنند که جریان تاریک نامیده می‌شود. این جریان تاریک با اندازه گاف انرژی ماده دیود نوری رابطه معکوس دارد. لذا، از سه ماده Si ، Ge ، و $GaAs$ ، ماده $GaAs$ بیشترین کمترین جریان تاریک را خواهد داشت. این جریان به عواملی نظیر نقایص سطحی و ولتاژ بایاس بستگی دارد و مقدار میانگین مربع آن به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\langle i_D^2 \rangle = 2qI_D B \quad (55)$$

در شکل ۱۲ نویزهای جریان تاریک، I_D و جریان تابش زمینه، I_B هر یک به طور جداگانه به همراه جریان نوری دیود، i_{ph} ، به عنوان یک منبع جریان آورده شده‌اند. در این شکل، مقاومت پیوند با R_j ، خازن پیوند با C_j و مقاومت اتصال با R_s نشان داده شده‌است. R_L مقاومت بار، و R_i و C_i مقاومت و خازن ورودی تقویت کننده بعدی‌اند.



شکل ۱۲ مدار معادل فوتودیود به همراه نویز آن و تقویت کننده.



شکل ۱۳ اثر متقابل دو قسمت گیرنده نوری شامل APD و تقویت کننده.

ضریب M برای APD در رابطه ظاهر می‌شود:

$$I_{ph} = \frac{M\eta P_0 \lambda q}{hc} \quad (61)$$

آنالیز نویز در APD نسبت به PIN دارای پیچیدگی بیشتری است. در واقع فرایند تکثیر APD باعث می‌شود که نویز بیشتری به سیستم اعمال شود. به خاطر وجود بهره ذاتی در یک APD به کارگیری تقویت کننده پس از آن لزومی ندارد. اثر متقابل یک APD و یک تقویت کننده در یک گیرنده نوری در شکل ۱۳ نشان داده شده است [۴۷]. شکل ۱۳ در مقایسه با شکل ۱۲ یک نویز اضافی دارد که اثر همان بهره بهمنی APD است [۴۹] و [۵۰].

برای محاسبه rms جریان نوری در APD داریم

$$i_{ph} = \frac{M \eta q m \lambda P}{hc \sqrt{2}} \quad (62)$$

که در آن M بهره APD، η بازده کوانتومی، m ضریب مدولاسیون شدت منبع نور مدوله شده، λ طول موج برحسب متر، P توان متوسط منبع نور برحسب وات، h ثابت پلانک و c سرعت نور است. میانگین مجذور جریان نویز ضربه‌ای بعد از تکثیر شدن برابر است با:

$$\langle i_s^2 \rangle = 2q(I_{ph} + I_B + I_D) \langle M^2 \rangle B \quad (63)$$

یا

$$\langle i_s^2 \rangle = 2q(I_{ph} + I_B + I_D) M^2 F(M) B \quad (64)$$

که در آن $\langle M^2 \rangle$ اندازه میانگین مربع بهره داخلی و $F(M) = \langle M^2 \rangle / M^2$ ضریب نویز است.

با در نظر گرفتن نویز حرارتی APD مشابه نویز حرارتی PIN، برای نسبت سیگنال به نویز APD داریم

که در آن R_i و R_j نسبت به R_L چشم‌پوشیدنی است.

با در نظر گرفتن نویز ضربه‌ای و نویز حرارتی، می‌توان نسبت سیگنال به نویز آشکارساز PIN را محاسبه نمود. با توجه به موارد فوق، نسبت سیگنال به نویز برابر است با [۴۸]

$$\begin{aligned} SNR_{PIN} &= \frac{i_{ph}^2}{\langle i_s^2 \rangle + \langle i_T^2 \rangle} \\ &= \frac{(mq\eta P \lambda / \sqrt{2} hc)^2}{2q(I_{ph} + I_B + I_D) B + 4kTB/R_{eq}} \end{aligned} \quad (59)$$

که در آن، m ضریب مدولاسیون است.

۳-۳-۲ آشکارساز APD

اعمال ولتاژ بایاس معکوس بزرگ در یک دیود نوری APD باعث می‌شود که میدان الکتریکی ایجاد شده به مقدار زیادی افزایش یابد و تکثیر بهمنی اتفاق بیافتد (حدود ۲۰۰ kV/cm برای Si). حامل‌های تولید شده در ناحیه تهی تحت تأثیر این میدان الکتریکی بزرگ شتاب پیدا می‌کنند و در اثر برخورد با اتم‌های شبکه، زوج الکترون-حفره‌های زیادی تولید کنند و بنابراین عمل تکثیر حامل رخ می‌دهد.

تعداد برخوردهای یونیزه کننده که توسط حفره صورت می‌گیرد با α_h ، تعداد برخوردهای یونیزه کننده توسط الکترون‌ها با α_e و نسبت آن‌ها با ضریب $K \equiv \alpha_h / \alpha_e$ نشان داده می‌شود.

با در نظر گرفتن W به عنوان پهنای ناحیه تهی، بهره یا ضریب تکثیر دیود نوری بهمنی عبارت است از

$$M = \frac{(1-K)e^{\alpha_e W (1-K)}}{1 - Ke^{\alpha_e W (1-K)}} \quad (60)$$

محاسبه جریان نوری APD همانند PIN است. با این تفاوت که

۳-۴ نويز در ديگر قطعات نوري

در بخش‌های قبل به بررسی نويز در برخی از قطعات خاص از قبيل آشکارساز، تقويت‌کننده و ليزر نیمه‌هادی که از مهم‌ترین منابع نويز در یک لينک نوری‌اند پرداختيم. در این قسمت نويز ديگر قطعات به کار رفته در یک لينک نوری را که نقش کم‌رنگ‌تری در نويز کل لينک دارند مرور خواهيم کرد. ابتدا نويز مُدی^۱ در فيبرهای نوری و سپس نويز در مالتی‌پلکسرها / دی‌مالتی‌پلکسرها را بررسی و مرور می‌کنيم. مبدل‌های طول موج از ديگر قطعات به کار رفته در یک سيستم نوری‌اند. در ساختار این مبدل‌ها از تقويت‌کننده نوری نیمه‌هادی استفاده می‌شود. لذا نويز این مبدل‌ها از نوع نويز ASE است، که قبلاً بررسی شده‌است.

۳-۴-۱ فيبرهای نوری

فيبر نوری بستر انتقال سيگنال در یک لينک نوری را تشكيل می‌دهد. به طور کلی، فيبرهای نوری به دو دسته تک‌مُد و چندمُد تقسيم می‌شوند. علاوه بر نويز فيبر تضعيف، پاشندگی و آثار غيرخطی نیز از عوامل محدود مخرب و محدود کننده سيگنال نوری‌اند.

در فيبرهای چندمُد که معمولاً در فواصل کوتاه به کار می‌روند، نويز مُدی مهم‌ترین نويز موجود است. برخلاف اغلب نويزهایی که از بیرون به سيستم تزریق می‌شوند، نويز مُدی در داخل خود سيستم به وجود می‌آید. نويز مُدی در سيستم‌های نوری معمولاً در فاصله ۱۰۰ متری فرستنده اتفاق می‌افتد [۵۲]. این نويز در دو مرحله شامل کوپل شدن مُد و سپس تلفات انتخاب مُد پديدار می‌شود.

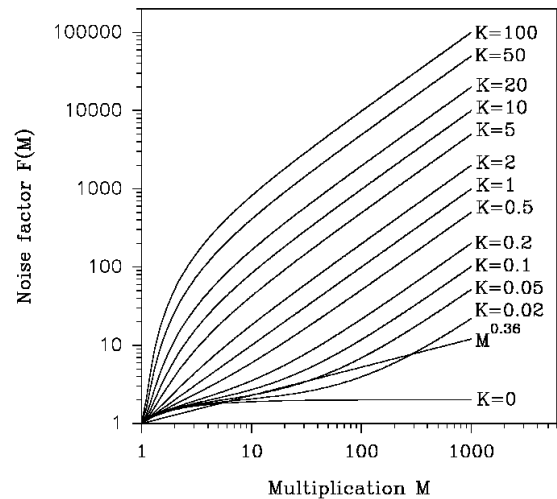
هنگامی که ليزری با مُدهای پایدار و پهنای خط باریک به یک فيبر چند مُد کوپل شود، نور عبوری از فيبر شامل چندین مُد هم‌دوس خواهد بود. اما پس از طی مسافتی کوتاه، مُدها به خاطر طی کردن مسافت‌های نوری متفاوت هریک فاز متفاوتی را خواهند داشت، و با اینکه فرکانس آن‌ها ثابت می‌ماند ولی ديگر هم‌دوس نیستند.

هنگامی که مُدها کوپل می‌شوند، اختلاف فاز مُدها روی توان کل اثر خواهد گذاشت. به طور مثال اگر دو مُد با توان برابر اما اختلاف فاز متناهی باهم کوپل شوند، توان کل کاهش خواهد یافت. به طوری که اگر اختلاف فاز ۱۸۰ درجه باشد دو مد هنگام کوپل شدن اثر هم‌ديگر را خنثی می‌کنند و در نتیجه توان کل صفر خواهد شد. به طور کلی، در طول مسیر انتقال، در اثر کوپل شدن مُدها، توان آن‌ها به طور تصادفی کم و زیاد می‌شود و تغييرات نامنظمی در توان مُدها به وجود خواهد آمد.

علاوه بر کوپل شدن مُدها، تلفات انتخاب مُد نیز در فيبر حائز اهمیت است. تغييرات نامنظم در مسیر انتقال مانند تلفات توان در اثر حذف شدن برخی از مُدها در هنگام عبور از اتصالات به عنوان نويز تلفات انتخاب مُد در فيبر است مطرح است. شکل ۱۵ چهار حالت مختلف را در حضور اتصال نامطلوب میان دو فيبر نشان می‌دهد [۵۲].

در حالت ۱ که توان نور بیشتر در قسمت پایین فيبر است، پس از عبور از اتصال، قسمتی از توان نور (حدود ۲۰٪) حذف می‌شود. در حالت‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۱۰٪، ۴۰٪ و ۲۰٪ از توان نور پس از عبور از اتصال حذف می‌شود.

به طور کلی، تغييرات توان در طول مسیر در درون فيبر نويز مُدی نام یافته‌است. برای کاهش این نوع نويز می‌توان از فيبرهایی با سطح مقطع بزرگتر و همچنین از اتصالات مطلوب میان فيبرها استفاده کرد.



شکل ۱۴: ضريب نويز برحسب بهره M به ازای مقادير مختلف K [۴۷].

$$\text{SNR}_{\text{APD}} = \frac{i_{ph}^2}{\langle i_z^2 \rangle + \langle i_T^2 \rangle} \quad (65)$$

$$= \frac{(mqn P \lambda / \sqrt{hc})^2 M^2}{\gamma q (I_{ph} + I_B + I_D) F(M) M^2 B + 4kTB / R_{eq} M^2}$$

با مقایسه معادله (۶۵) با معادله (۵۹)، درمی‌یابيم بهره APD باعث می‌شود نسبت سيگنال به نويز در آن افزایش یابد. از آنجائیکه $F(M)$ در APD همیشه بزرگتر از واحد است، بنابراین فرایند تکثیر خود باعث تولید نويز می‌شود. با افزایش بهره، افزایش می‌یابد.

با توجه به وابستگی نسبت سيگنال به نويز و توان معادل نويز به ضريب نويز $F(M)$ ، به بررسی تفصیلی $F(M)$ می‌پردازيم. ضريب نويز به ضريب يونيزاسيون الکترون‌ها و حفره‌ها و همچنین بهره APD بستگی دارد. برای تکثیر الکترون در یک APD از جنس Si، ضريب نويز $F(M)$ از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۴۹]

$$F(M) = KM + (\alpha - 1/M)(1 - K) \quad (66)$$

به ازای $K=1$ ضريب نويز با بهره برابر می‌شود. به ازای $K=0$ (یا $\alpha_n = 0$)، و برای بهره‌های بزرگ $F(M) = 2$ خواهد شد.

در یک APD از جنس Ge حفره تزریق می‌شود، ضريب نويز به صورت زیر است

$$F(M) = KM + (\alpha - 1/M)(1 - K') \quad (67)$$

که در آن $K' = 1/K$ است.

در شکل ۱۴ ضريب نويز برحسب بهره M و به ازای مقادير مختلف K رسم شده‌است [۴۷]. $F(M)$ در این شکل به صورت زیر تقریب زده می‌شود

$$F(M) \approx M^\chi \quad (68)$$

و $0.2 < \chi < 1$ شاخص نويز اضافی^۱ نامیده می‌شود. در این شکل $\chi = 0.36$ در نظر گرفته شده‌است.

به طور کلی، به خاطر پدیده تکثیر می‌توان گفت که نويز آشکارساز APD از نويز ديود نوری PIN بیشتر است.

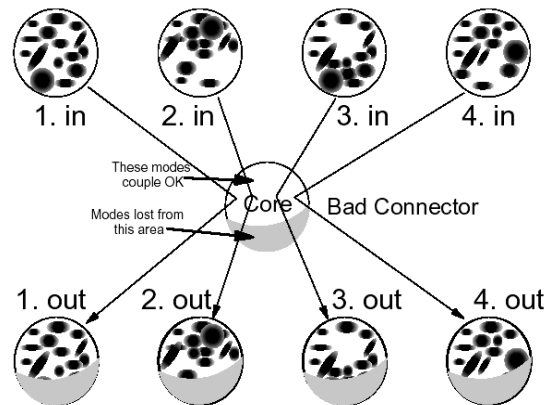
نشان داده شد، در تقویت‌کننده فیبری EDFA، با افزایش توان سیگنال ورودی، نویز ASE در تمامی توان‌های پمپ کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده شد، هرچه توان پمپ بزرگتر باشد، نویز ASE بیشتر خواهد بود و با افزایش توان پمپ در تمامی طول‌موج‌های سیگنال ورودی، نویز تقویت‌کننده EDFA کم می‌شود. در تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی، تقویت‌کننده‌هایی با کاواک ضخیم و کوتاه و ضریب بازتاب آینه ورودی بیشتر از خروجی، نویز کمتری دارند. هرگاه تزریق حامل‌ها ثابت باشد، برای TWA طول و ضخامت کاواک بر اندازه نویز تأثیری ندارد، درحالی‌که، با افزایش طول کاواک عدد نویز در نقطه‌ای به مقدار کمینه می‌رسد و پس از آن دوباره افزایش می‌یابد.

در لیزرهای نیمه‌هادی دو نوع رایج نویز، نویز شدت و نویز فاز است. نویز شدت معمولاً با نویز شدت نسبی، RIN، بیان می‌شود. اندازه RIN در فرکانس‌های پایین، نسبتاً کم است و در نزدیکی فرکانس نوسانات میرایی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین نویز شدت نسبی با افزایش جریان تزریقی کاهش یافته و به ازای فرکانس مشخص در جریان آستانه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. نویز فاز که با پهنای خط لیزر ارتباط دارد، در فرکانس‌های کمتر از فرکانس نوسانات میرایی تخت است و بیشترین مقدار خود را در فرکانس نوسانات میرایی دارد. هر دو نوع نویز شدت و فاز لیزرهای نیمه‌هادی، با افزایش توان نور خروجی، کاهش می‌یابد.

نویز قطعاتی نظیر فیبرها و مالتی‌پلکسرها نیز مرور شد. مهمترین نویز در فیبرهای چند مد نویز مدی است. از جمله نویزهای موجود در مالتی‌پلکسرها / دی‌مالتی‌پلکسرها هم‌شنوایی است، که مهمترین عامل محدودکننده در سیستم‌های چندطول‌موجی است. در بررسی و محاسبه نویز یک لینک می‌توان ابتدا نویز تک تک قطعات نوری موثر در تولید نویز را محاسبه کرد و سپس پارامترهای مشترکی نظیر BER، SNR و فاکتور Q را محاسبه کرد. در نهایت با وارد کردن اثر نویز قطعه قبلی در قطعه مورد بررسی و رسیدن به آخرین قطعه لینک که آشکارساز است، نویز کل لینک به دست می‌آید.

مراجع

- [۱] ابراهیم مرتاظی، وحید احمدی و محمد کاظم مروج فرشی، "مدل‌سازی مداری و اندازه‌گیری نویز در لیزرهای نیمه‌هادی،" *مجله علمی-پژوهشی دانشگاه تبریز*، شماره ۳۱، صص. ۸۳-۷۷، تابستان ۱۳۸۲.
- [۲] وحید احمدی، ابراهیم مرتاظی، محمدکاظم مروج فرشی، و عباس ظریفکار، "اندازه‌گیری و آنالیز نویز شدت و فاز در لیزرهای مخابراتی چند مد،" *مجله علمی-پژوهشی امیرکبیر*، شماره ۵۳، صص. ۲۴۹-۲۵۸، زمستان ۱۳۸۱.
- [۳] ابراهیم مرتاظی، اندازه‌گیری و تحلیل مشخصه‌های نویز لیزرهای مخابراتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تابستان ۱۳۸۰.
- [۴] عباس ظریفکار، مدل‌سازی و شبیه‌سازی نویز در لیزرهای نیمه‌هادی، رساله دکتری، گروه الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تابستان ۱۳۸۰.
- [5] E. Mortazy, V. Ahmadi, and M. K. Moravvej-Farshi, "An Integrated equivalent circuit model for relative intensity noise and frequency noise spectrum of a multimode semiconductor laser," *IEEE, J. Quantum Electron*, vol. 38, no. 10, pp. 1366-1371, Oct. 2002.
- [6] E. Mortazy, V. Ahmadi, and M. K. Moravvej-Farshi, "Circuit modeling and measurement of noise for a semiconductor laser diode," in *Proc 10th Iranian Conf. on Electrical Engineering, ICEE2002*, vol. 1, pp. 568-575, Tabriz, Iran, May 2002.
- [7] E. Mortazy, V. Ahmadi, M. K. Moravvej-Farshi, and A. Zarifkar, "Mode partition, mode hopping and phase noise in a two-mode semiconductor laser," in *Proc Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL'2003, IEEE/LEOS proceedings*, vol. 1, pp. 245-247, Alushta, Ukraine, Sep. 2003.



شکل ۱۵: نویز مدی ناشی از حضور اتصال نامطلوب میان دو فیبر [۵۲].

۳-۴-۲ مالتی‌پلکسر / دی‌مالتی‌پلکسرها

مالتی‌پلکسرها / دی‌مالتی‌پلکسرها به کار رفته در سیستم‌های چند طول‌موجی، به طور کلی دارای یکی از چهار ساختار متداول گریتینگ موجبرهای آرایه‌ای، گریتینگ فیبری براگ، فیلترهای لایه نازک^۲ و گریتینگ پراش^۴ اند.

با وجود این‌که اغلب مالتی‌پلکسرها ساختار فیلتری دارند، ولی معمولاً نمی‌توان آن‌ها را به عنوان منابع نویز سیستم در نظر گرفت. تنها در صورتیکه پهنای باند فیلتر بسیار باریک و یا فرکانس مرکزی آن به طور دقیق تنظیم نشده باشد، حضور مالتی‌پلکسر باعث ایجاد نویز در سیگنال می‌شود.

برعکس مالتی‌پلکسرها، دی‌مالتی‌پلکسرها منابع نویزاند. این بدین سبب است که فیلترهای به کار رفته در ساختار دی‌مالتی‌پلکسرها، غالباً کامل نیستند. در نتیجه، بر روی کانال‌های مجاور در سیستم‌های چند کانالی هم‌شنوایی ایجاد خواهند کرد. همچنین تخت نبودن مشخصه این فیلترها در سیستم‌های چند کانالی نویز ایجاد خواهد کرد.

به طور کلی، مهم‌ترین عامل نویز در مالتی‌پلکسرها / دی‌مالتی‌پلکسرها عامل هم‌شنوایی است. هم‌شنوایی در سیستم‌های چند طول‌موجی شامل هم‌شنوایی میان کانال‌های مجاور، هم‌شنوایی میان کانال‌های ناهم‌جوار و هم‌شنوایی کل است. هم‌شنوایی میان دوکانال مجاور برابر است با مقدار انرژی نفوذی از یک کانال به کانال مجاور. هم‌شنوایی میان دو کانال ناهم‌جوار برابر است با مقدار انرژی نفوذی از یک کانال به کانال ناهم‌جوار است. هم‌شنوایی کل برابر است با کمترین مقدار نسبت توان یک کانال به توانی که در تمامی کانال‌های دیگر در باند عبور نفوذ می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع نویز در یک لینک نوری بررسی و مرور شده‌است. مهمترین عوامل تولید کننده نویز در لینک‌های نوری شامل آشکارسازهای نوری، تقویت‌کننده‌های نوری و لیزرهای نیمه‌هادی‌اند.

برای آشکارسازهای نوری PIN و APD، نویز جریان تاریک، نویز ضربه‌ای، نویز حرارتی، نسبت سیگنال به نویز و مدار معادل الکتریکی محاسبه و ارائه شد. ملاحظه شد که نویز آشکارساز APD به علت پدیده تکثیر از نویز فوتودیود PIN بیشتر است.

نویز تقویت‌کننده‌های نوری EDFA و SOA بررسی و مرور شد.

1. Arrayed Wave Guide Gratings (AWG)
2. Fiber Bragg Gratings (FBG)
3. Thin Film Filters (TFF)
4. Diffraction Gratings (DG)

- [28] K. Kikuchi, "Effect of 1/f type noise on semiconductor laser linewidth residual in high-power limit," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 4, pp. 684-688, Apr. 1989.
- [29] Y. Yamamoto, T. Mukai, and S. Saito, "Quantum phase noise and linewidth of a semiconductor laser," *Electronic Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 327-329, May 1981.
- [30] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, 2nd ed., New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [31] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [32] W. Johnstone, B. Culshaw, D. Walsh, D. Moodie, and I. Mauchline, "Student laboratory experiments on erbium doped fiber amplifiers and lasers," *SPIE Proceeding in Optics and Photonics*, vol. 3831, pp. 259-267, Cancun, Mexico, Jul. 1999.
- [33] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, Academic Press, 1999.
- [34] S. Shimada, *Optical Amplifiers and Their Applications*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [35] J. H. Franz and V. K. Jain, *Optical Communications*, Alpha Science International Ltd., 2000.
- [36] C. Y. J. Chu and H. Ghafari-Shiraz, "Equivalent circuit theory of spontaneous emission power in semiconductor laser optical amplifiers," *J. Lightwave Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 760-767, May 1994.
- [37] H. Ghafari-Shiraz, *Fundamentals of Laser Diode Amplifiers*, John Wiley & Sons Ltd., 1996.
- [38] S. M. K. Thiyagarajan and A. F. J. Levi, "Noise in voltage-biased scaled semiconductor laser diodes," *Solid-State Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 33-39, Jan. 1999.
- [39] K. Sato and H. Toba, "Reduction of mode partition noise by using semiconductor optical amplifier," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 328-333, Mar./Apr. 2001.
- [40] A. A. M. Saleh, "Nonlinear models of traveling-wave optical amplifier," *Electronics Letters*, vol. 24, no. 14, pp. 835-837, Jul. 1988.
- [41] L. Thylen, M. Gustavsson, T. K. Gustafson, I. Kim, and A. Karlsson, "Calculation of photon and current fluctuations in traveling-wave semiconductor laser amplifier," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 27, no. 6, pp. 1251-1258, Jun. 1991.
- [42] D. Marcuse, "Computer model of an injection laser amplifier," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 1, pp. 63-73, Jan. 1983.
- [43] G. Morthier and B. Moeyersoon, "Intensity noise and linewidth of laser diodes with integrated semiconductor optical amplifier," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 1644-1646, Dec. 2002.
- [44] E. S. Bjorlin and J. E. Bowers, "Noise figure of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers," *IEEE Journal Quantum Electronics*, vol. 38, no. 1, pp. 61-66, Jan. 2002.
- [45] W. Rideout, E. Eichen, J. Schlafer, J. Lacourse, and E. Meland, "Relative intensity noise in semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 1, no. 12, pp. 438-440, Dec. 1989.
- [46] M. A. Summerfield and R. S. Tucker, "Noise figure and conversion efficiency of four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers," *Electronics Letters*, vol. 31, no. 14, pp. 1159-1160, Jul. 1995.
- [47] __, Fast Semiconductor Detectors, www.medphys.ucl.ac.uk/research/borg/homepages/davek/phd/chapter3.pdf, 2002.
- [48] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications*, Oxford University Press Inc., 1993.
- [49] R. C. Woods, "Noise effects in avalanche photodiodes," *IEEE Trans. on Education*, vol. 43, no. 3, pp. 321-323, Aug. 2000.
- [50] B. K. Ng, J. P. R. David, R. C. Tozer, M. Hopkinson, G. Hill, and G. J. Rees, "Excess noise characteristics of Al_{0.8}Ga_{0.2}As avalanche photodiodes," *IEEE Photon. Technology. Letters*, vol. 14, no. 4, pp. 522-524, Apr. 2002.
- [51] -, *Optical Signal-to-Noise Ratio and the Q-Factor in Fiber-Optic Communication Systems*, Application Note, MAXIM High
- [8] E. Mortazy, F. Shahshahani, V. Ahmadi, A. H. Tehranchi and M. K. Moravvej-Farshi, "The Effect of spatial hole burning on relative intensity noise in DFB laser diodes," in *Proc Australasian Conference on Optics, Lasers, & Spectroscopy, ACOLS 2003*, p. 159, Melbourne, Australia, Dec. 2003.
- [9] E. Mortazy, F. Shahshahani, V. Ahmadi, A. H. Tehranchi, and M. K. Moravvej-Farshi, "The effect of grating structure on relative intensity noise in DFB laser diode," in *Proc. SPIE, Fluctuations and Noise in Photonics and Quantum Optics II*, vol. 5468, pp. 154-164, Spain, May 2004.
- [10] V. Ahmadi, F. Shahshahani, and E. Mortazy, "Analysis of RIN in DFB semiconductor laser diodes using three rate equations model," in *Proc Int. Symposium on Telecommunications, IST2003*, pp. 215-218, Isfahan, Iran, Aug. 2003.
- [11] A. Zarifkar, A. Falahatpisheh, M. K. Moravvej-Farshi, and E. Mortazy, "Semiconductor laser noise analysis including spatial variations in the lateral direction," in *Proc Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL'2003, IEEE/LEOS proceedings*, vol. 1, pp. 242-244, Alushta, Ukraine, Sep. 2003.
- [12] Y. Yamamoto, "AM and FM quantum noise in semiconductor lasers-Part I: theoretical analysis," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 1, pp. 34-46, Jan. 1983.
- [13] Y. C. Tseng and J. C. S. Woo, "Phase noise characteristics associated with low-frequency noise in submicron SOI MOSFET feedback oscillator for RF IC's," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 54-56, Jan. 1999.
- [14] F. Shahshahani, V. Ahmadi, and K. Mirabbaszadeh, "Concave tapered grating of DFB laser at high power operation for reduced spatial hole-burning effect," *Elsevier J. of Materials Science and Engineering B*, vol. 96, no. 1, pp. 1-7, Oct. 2002.
- [15] C. H. Henry and R. F. Kazarinov, "Quantum noise in photonics," *Reviews of Modern Physics*, vol. 68, no. 3, pp. 801-853, Jul. 1996.
- [16] C. Harder, J. Katz, S. Margalit, J. Shacham, and A. Yariv, "Noise equivalent circuit of a semiconductor laser diode," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 333-337, Mar. 1982.
- [17] T. T. Bich-Ha and J. Mollier, "Noise equivalent circuit of a two-mode semiconductor laser with the contribution of both the linear and the nonlinear gain," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 304-308, Apr. 1997.
- [18] T. K. Yee, "Analysis of the intensity noise of nearly single-longitudinal-mode semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 275-285, Feb. 1986.
- [19] W. Strefer, A. Hardy, D. R. Scifres, and R. D. Burnham, "Analysis of diode laser properties-Part II," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 6, pp. 991-1001, Jun. 1983.
- [20] Y. Z. Shan and B. X. Du, "A theoretical analysis on transmission characteristics of semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 4, pp. 601-609, Apr. 1982.
- [21] M. Ohtsu and Y. Teramachi, "Analyses of mode partition and mode hopping in semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 1, pp. 31-38, Jan. 1989.
- [22] M. P. van Exter, M. B. Willemsen, and J. P. Woerdman, "Effect of mode-partition noise on intensity squeezing in a two-mode laser," *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, vol. 1, no. 6, pp. 637-645, Dec. 1999.
- [23] K. Ogawa, "Analysis of mode partition noise in laser transmission systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 5, pp. 849-855, May 1982.
- [24] T. B. Anderson and B. R. Clarke, "Modeling Mode Partition Noise in Nearly Single-Mode Intensity Modulated lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 1, pp. 3-13, Jan. 1993.
- [25] M. R. Alalusi and R. B. Darling, "Effects of nonlinear gain on mode-hopping in semiconductor laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 7, pp. 1181-1192, Jul. 1995.
- [26] M. F. S. Ferreira, J. R. F. Rocha, and J. L. Pinto, "Analysis of the frequency noise of tunable multisection DBR lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 833-841, Apr. 1992.
- [27] K. P. Ho, "Spectral density of cross-phase modulation induced phase noise," *Optics Communications*, vol. 169, no. 1-6, pp. 63-68, Oct. 1999.

محمد کاظم مروج فرشی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد فیزیک را به ترتیب در سال ۱۳۵۵ از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۵۷ از دانشگاه کالیفرنیا جنوبی (USC) و سپس کارشناسی ارشد و دکتری الکترونیک را به ترتیب در سال ۱۳۵۹ از دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا (UCSB) و در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه نیوساوت ویلز (UNSW) استرالیا اخذ کرده است. نامبرده پس از مراجعت به ایران به عنوان استادیار گروه الکترونیک در دانشگاه تربیت مدرس مشغول شد. او به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۸۰ به مراتب دانشیاری و استادی ارتقا یافت. محمد کاظم مروج فرشی در اردیبهشت ۱۳۸۱، توسط وزارت علوم تحقیقات و فناوری، به عنوان یکی از اساتید نمونه کشور انتخاب و معرفی شد. نامبرده تاکنون ۵ جلد کتاب در زمینه‌های الکترونیک نیمه‌هادی و لیزر ترجمه کرده است که همگی توسط مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف منتشر شده‌اند. آخرین کتاب او تحت عنوان «الکترونیک لیزر» در بیست و دومین دوره کتاب سال جمهوری اسلامی ایران به عنوان کتاب سال مهندسی برق برگزیده شده است. نامبرده تاکنون پایان‌نامه‌های متعددی را در دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری الکترونیک راهنمایی کرده است. حاصل کار تحقیقاتی او چاپ و ارائه بیش از ۸۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی و داخلی است. نامبره یکی از اعضای مؤسس انجمن اپتیک و فوتونیک ایران بوده است و اینک عضو هیئت مدیره انجمن مذکور است. وی همچنین عضو ارشد مؤسسه IEEE آمریکا است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه محمد کاظم مروج فرشی شامل افزاره‌های نوین میکرو و نانو الکترونیک، افزاره‌های فوتونیک و نانو فوتونیک و همچنین انتشار سالیون‌های مکانی و زمانی در محیط‌های غیرخطی و ناهمگن است.

Frequency/Fiber Communications Group, <http://pdfserv.maximic.com/arpdf/AppNotes/4hfan902.pdf>, 2002.

- [52] H. J. R. Dutton, *Understanding Optical Communications*, IBM Corporation, 1998.
- [53] A. Cappy, F. Danneville, G. Dambriane, and B. Tamen, "Noise analysis in devices under nonlinear operation," *Solid-State Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 21-26, Jan. 1999.
- [54] A. H. Tehranchi, N. Granpayeh, and E. Mortazy, "Modulation instability in optical fibers in the presence of higher order effects," in *Proc Australasian Conference on Optics, Lasers, & Spectroscopy, ACOLS 2003*, p. 79, Melbourne, Australia, Dec. 2003.
- [55] A. H. Tehranchi, N. Granpayeh, and E. Mortazy, "The effects of noise amplification and soliton generation in anomalous dispersion regime of optical fibers," in *Proc. SPIE, Fluctuations and Noise in Photonics and Quantum Optics II*, vol. 5468, pp. 85-92, Spain, May 2004.
- [56] E. Mortazy and M. K. Moravvej-Farshi, "A New model for optical communication systems," *Journal Optical Fiber Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 69-80, Jan. 2005.

ابراهیم مرتاضی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۰ از دانشگاه مازندران و دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است. از سال ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۴ نامبرده به عنوان کارشناس ارشد گروه نوری در مرکز تحقیقات مخابرات ایران به کار مشغول بوده است. و در سال ۱۳۸۳ موفق به کسب عنوان محقق نمونه ایران از طرف وزارت علوم شد. ابراهیم مرتاضی از ابتدای سال ۲۰۰۵ میلادی در دوره دکتری مهندسی برق دانشگاه پلی تکنیک مونترال کانادا به تحصیل اشتغال دارد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده عبارت است از: ادوات نوری، لیزرهای نیمه‌هادی، نوبز در سیستم‌های نوری، مدارهای مجتمع نیمه‌هادی و آشکارسازهای موج رونده.

Archive of SID