# مروری بر انواع منابع نویز در لینکهای مخابرات نوری

ابراهيم مرتاضي و محمد كاظم مروج فرشي

*چکیده:* در این مقاله نویزهای مطرح در یک لینک مخابرات نوری و منابع آنها مرور می شود. مهمترین عوامل تولید کننده نویز در چنین لینکی عبارتند از لیزرهای نیمههادی، تقویت کنندهها 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، هردو با افزایش توان نور خروجی، کاهش مییابند.

سپس، نویز گسیل خودبهخودی تقویت شده (ASE) در تقویت کنندههای نوری فیبری آلائیده به اربیوم (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. ازطرف دیگر افزایش توان پمپ باعث کاهش عدد نویز برحسب طولموج 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 باز تاب آینههای ورودی و خروجی را بر اندازه اعداد نویز در تقویت کنندههای 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 آنرا با درنظرگرفتن نسبت سیگنال به نویز (SNR) و نرخ خطای بیت (BER) آن ارائه میکنیم.

بعد، نویز مُدی در فیبرهای نوری چند مُد بررسی میشود.

در پایان، همشنوایی به عنوان مهترین عامل محدود کننده در مالتیپلکسرها / دیمالتیپلکسرهای نوری موجود در سیستمهای چند طولموجی 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 طورکلی، عامل ناخواستهای است که با سیگنال اصلی تداخل میکند و کارآیی 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 مالتی پلکسرها تشکیل شدهاند، پس از معرفی مختصر

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

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

محمدکاظم مروج فرشی، گروه الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی ۱۴۳–۱۴۱۱۵، تهران (email: farshi\_k@modares.ac.ir).

انواع نویز در ادوات نیمههادی، نویزهای موجود در تکتک قطعات نوری مرور میشود. برخی از این قطعات نویز چشم گیری دارند و کارآیی سیستم به ویژه سیستمهای جدید با نرخ بیت بالا و طول موجهای بلندتر را محدود می سازند.

نویسندگان مقاله حاضر و دیگر همکاران، آنالیز نویز شدت، شامل نویز شدت نسبی<sup>(</sup> (RIN)، نویز تفکیک مد و نویز پرش مد و همچنین نویز فاز برای لیزرهای نیمههادی فابریپرو<sup>۲</sup> (FP) و لیزرها با فیدبک توزیع شده<sup>۳</sup> (DFB) را قبلاً از طریق مراجع [۱۱] ارائه کردهاند. در این مراجع، علاوه بر تحلیل و اندازه گیری، مدل سازی 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<sup><sup>3</sup></sup> است که در دمای متناهی یافت میشود. دیگر نویز موجود در سیستمها، نویز انفجاری<sup>6</sup> 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<sup>2</sup> نام دارد. هنگامیکه حاملها به صورت کاملاً تصادفی، با غلبه بر سد پتانسیل، از یک پیوند عبور کنند، نویز ضربهای<sup>4</sup> ایجاد میشود. لازم به ذکر است که اغلب نویزها از توزیع گوسی یا نرمال تبعیت میکنند.

تقویت کننده فیبری آلائیده با اربیوم<sup>\*</sup> (EDFA) و تقویت کننده نوری نیمههادی<sup>4</sup> (SOA) که کاربرد زیادتری در سیستمهای نوری دارند نیز با نویز گسیل خودبه خودی تقویت شده<sup>۱۰</sup> (ASE) باعث اختلال در سیستمهای نوری می شوند. در مراجع [۳۳] تا [۳۵] نویز در تقویت کنندههای EDFA بررسی شدهاست. مراجع [۳۶] تا [۴۶] نیز نویز تقویت کنندههای SOA را در دو نوع SOA فابری پرو و SOA موج رونده بررسی و گزارش کردهاند.

دو نوع آشکارساز نوری PIN و نوری بهمنی'' (APD) دارای نویزهایی نظیر نویز جریان تاریک''، 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 برکارهای 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

- 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

<sup>1.</sup> Relative Intensity Noise



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

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

درنتیجه، 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، تقویت کنندهها، آشکارسازها و دیگر قطعات نوری است. بخش آخر به نتیجه گیری اختصاص یافته است.

## 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<sup>۱</sup> (SNR) و عدد نویز<sup>۲</sup> (NF) از جمله پارامترهای مطرح در یک سیستم نوری اند و از طریق آنها میتوان کارآیی 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 می پردازیم.

## ۲-۱ 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<sub>tot</sub> نمایش دهیم، رابطه آن با دما به صورت زیر در میآید:

$$N_{tot} = K.T.\Delta f \tag{1}$$

که در آن  $M = 1.38 \times 10^{-23} \text{ w.s/K}$  ثابت بولتزمن،  $f \neq \Delta f$  پهنای باند و T دما برحسب درجه کلوین است. حداقل نویزی که با آن سیستم میتواند  $T = 1 + \Delta f = 1 + \Delta f$  کار کند، کف نویز



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

نامیده می شود 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 *D* معین میشود و از رابطه زیر به دست میآید

$$\overline{i}^{\mathsf{Y}} = \mathsf{Y}qI_D\Delta f \tag{Y}$$

که در آن، q بار الکترون است.

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

# ۲-۳ نرخ خطای بیت

با این که، نویز ضربهای در اندازه گیری نرخ خطای بیت (BER)<sup>\*</sup> موثر است، اما وقتی بیت ارسالی صفر است این نویز تاثیری نخواهد داشت.

نرخ خطای بیت را می توان توسط رفتار منابع نویز گوسی بررسی کرد. بنابراین، اندازه آستانه BER با مکمل تابع خطای گوسی به صورت زیر رابطه دارد

$$BER = \frac{\gamma}{\gamma} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_{\gamma} - I_{\cdot}}{\sqrt{\gamma} (\sigma_{\gamma} + \sigma_{\cdot})}\right)$$
(7)

که  $I_{1}$  و  $I_{1}$  به ترتیب میانگین جریانهای فوتونی تولید شده توسط بیتهای صفر و یک و  $\sigma_{1}$  و  $\sigma_{1}$  نیز به ترتیب واریانس بیتهای متاظرند. نرخ خطای بیت را همچنین میتوان برحسب ولتاژهای صفر و یک یعنی،  $V_{1}$  و  $V_{1}$ ، نوشت

$$BER = \frac{1}{r} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{|V_{1} - D|}{\sigma_{1}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{|V_{.} - D|}{\sigma_{.}}\right) \right]$$
(\*)

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

<sup>1.</sup> Signal to Noise Ratio

<sup>2.</sup> Noise Figure

<sup>3.</sup> Noise floor

<sup>4.</sup> Bit Error Rate



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

#### Q فاكتور Q

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

$$Q = \frac{I_S(\mathbf{v}) - I_S(\mathbf{v})}{\sqrt{N_{tot}(\mathbf{v})} + \sqrt{N_{tot}(\mathbf{v})}}$$
( $\boldsymbol{\delta}$ )

که در آن (۰)  $N_{tot}$  و (۱)  $N_{tot}$  توان کل نویز مرتبط با نویزهای ضربهای، حرارتی و خودبه خودی، به ترتیب، برای بیتهای صفر و یک، و (۰)  $I_s$  و (۱)  $I_s$  به ترتیب جریان خروجی تقویت کننده برای بیتهای صفر و یک است. این دو جریان از روابط زیر تبعیت می کنند.

$$I_{S}(\mathbf{v}) = eGP_{in} \, \mathbf{v} \, r \, / [h \, v(r+\mathbf{v})] \tag{2}$$

$$I_{S}(\cdot) = eGP_{in} \forall / [h\nu(r+\nu)]$$
(Y)

hv که در آنها،  $p_{in}$  توان متوسط سیگنال، r نسبت تمایز<sup>'</sup>، G بهره و hv انرژی فوتون است. در حالت ایدهآل نسبت تمایز برابر بینهایت و درنتیجه  $I_s(\cdot) = \cdot$ 

در صورت برابر بودن یکی از دو پارامتر واریانس  $\{\sigma_{n} = \sigma_{.}\}$  یا توان کل نویز  $\{N_{tot}(\cdot) = N_{tot}(\cdot)\}$  برای دو بیت صفر و یک، رابطه (۵) به صورت زیر ساده می شود.

$$Q = \frac{I_{S}(\mathbf{y})}{\mathbf{y}\sigma_{\mathbf{y}}} = \frac{I_{S}(\mathbf{y})}{\mathbf{y}\sqrt{N_{tot}(\mathbf{y})}} \tag{A}$$

 $(V_{1} \ e \ V_{2})$  فاکتور Q را می توان برحسب ولتاژ بیتهای صفر و یک ( $V_{1} \ e \ V_{2}$ ) نیز نوشت:

$$Q = \frac{|V_{\gamma} - V_{\cdot}|}{\sigma_{\gamma} - \sigma_{\cdot}} \tag{9}$$

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

نرخ خطای بیت را با درنظر گرفتن رابطه (۳)، می توان به صورت زیر



.Q شكل \*: نرخ خطاى بيت (BER) برحسب فاكتور Q.

تخمين زد:

BER 
$$\approx \frac{1}{\sqrt{\pi \pi}} \frac{\exp(-Q^{\tau}/\tau)}{Q}$$
 (1.)

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 (BER - ۱۵.۶ م) ۶=Q، خواهیم داشت ۲۰۰ = BER.

## 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<sub>E</sub>) از رابطه زیر تبعیت می کند

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{E}} = \frac{S_{E}}{N_{E}} = \frac{v^{\mathsf{r}}/R}{\sigma_{v}^{\mathsf{r}}/R} = \frac{v^{\mathsf{r}}}{\sigma_{v}^{\mathsf{r}}} = \frac{i^{\mathsf{r}}R}{\sigma_{i}^{\mathsf{r}}R} = \frac{i^{\mathsf{r}}}{\sigma_{i}^{\mathsf{r}}} \tag{11}$$

که در آن  $\sigma_i^{r}$  و  $\sigma_v^{r}$  به ترتیب واریانس جریان و ولتاژ سیگنال است. به طور مشابه برای سیگنال به نویز نوری (SNR\_0) داریم

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{O}} = \frac{S_{\mathrm{O}}}{N_{\mathrm{O}}} = \frac{\left|\vec{E}\right|^{\mathrm{v}}/\eta}{\sigma_{\mathrm{O}}^{\mathrm{v}}/\eta} = \frac{\left|\vec{E}\right|^{\mathrm{v}}}{\sigma_{\mathrm{O}}^{\mathrm{v}}}; \qquad \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \qquad (17)$$

که در آن، E میدان الکتریکی،  $\mathfrak{F}$  ضریب دی الکتریک،  $\mathfrak{p}$  قابلیت نفوذ و  $\mathfrak{n}$ ,  $\sigma_{\mathrm{O}}^{\mathrm{v}} \propto N_{\mathrm{tot}} = \left| \vec{E} \right|^{\mathrm{v}} \propto I_{S}^{\mathrm{v}}$  (۱) مپدانس فیبر نوری است. از آنجا که (۱)  $\left| \vec{E} \right|^{\mathrm{v}} \propto I_{S}^{\mathrm{v}}$  (۱) و  $(\Lambda)$  نوشت. یا به درنتیجه رابطه (۸) را می توان به صورت  $\mathcal{P}^{\mathrm{v}} = \mathrm{SNR}/\mathfrak{r}$  نوشت. یا به عبارت دیگر نتیجه می گیریم

$$SNR_{O} = fQ^{r}$$
 (17)

مطابق روابط (۱۰) (۱۲)، به ازای نرخ خطای بیت <sup>۹۰</sup> EER، اگر در برحسب Bb خواهیم داشت Q=۱۵.۶ dB و SNR = ۲۱.۶ dB. اگر در روابط پیشین به جای SNR، از میانگین آن استفاده کنیم، برای میانگین جریان خواهیم داشت

$$I_{S} (\operatorname{avg}) = [I_{S} (\mathbf{i}) + I_{S} (\mathbf{i})]/\mathbf{r}$$
(14)

و در نتيجه

$$SNR_{avg} = \frac{average \ signal}{average \ noise} = \frac{rI_S^r(avg)}{N_{tot}}$$
(10)

به ازای نسبت تمایز بینهایت، داریم

$$Q^{r} = \frac{I_{S}^{r}(\text{avg})}{N_{tot}} = \frac{\text{SNR}_{\text{avg}}}{r}$$
(18)

در اینصورت به ازای  $^{-1}$  SNR  $_{avg}$ =۱۸.۶ dB  $_{0}$  BER = ۱۰<sup>-3</sup> خواهد شد که در مقایسه با SNR برای بیت یک تنها به اندازه ۳ dB کاهش دارد. علاوه بر روابط بیانشده برای فاکتور Q، میتوان رابطه آن را با نسبت سیگنال به نویز نوری نیز محاسبه کرد. بار دیگر با فرض  $\infty = r$  نتیجه میگیریم

$$Q = \frac{I_{S}(v)}{\sqrt{N_{tot}(v)} + \sqrt{N_{tot}(v)}} = \frac{vI_{S}(\text{avg})}{\sqrt{N_{tot}(v)} + \sqrt{N_{tot}(v)}} \quad (vY)$$

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

$$Q = \frac{I_{S} \text{ (avg)}}{\left[ \frac{\mathcal{B}_{e}}{B_{o}} I_{S} \text{ (avg)} I_{S} + \frac{B_{e}}{B_{o}} I_{sp}^{\intercal} \right]^{1/\Upsilon}} + \left( \frac{B_{e}}{B_{o}} I_{sp}^{\intercal} \right)^{1/\Upsilon}$$
(1A)

که در آن  $B_e$  و  $B_o$  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 می گیریم،

$$SNR_{O} = \frac{I_{S} \text{ (avg)}}{I_{sp}} \tag{19}$$

در نتیجه میرسیم به

$$Q = \left(\frac{B_{o}}{B_{e}}\right)^{1/\tau} \frac{r \operatorname{SNR}_{O}}{\left(r \operatorname{SNR}_{O} + 1\right)^{1/\tau} + 1}$$
(\tag{\tag{T}})

#### ۲-۲ 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 می شود. برای سیستمی با توان نویز  $N_a$  و توان نویز ورودی  $N_{\rm in}$  عدد نویز به صورت زیر نوشته می شود

$$NF = \frac{N_a + N_{in}}{N_{in}} = v + \frac{N_a}{N_{in}}$$
(YV)

توان نویز کل در یک سیستم میتواند به صورت  $N_{out} = \left| H\left(f \right) \right|^{r} (N_{in} + N_{a})$  بیان شود. با ضرب کردن صورت و مخرج رابطه (۲۱) در توان سیگنال ورودی، نتیجه می گیریم

$$NF = \frac{S_{in}N_{out}}{S_{in}\left|H\left(f\right)\right|^{Y}N_{in}} = \frac{S_{in}}{S_{out}} \cdot \frac{N_{out}}{N_{in}} = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$
(YY)

#### 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

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 تقویت کننده در طول مسیر است. افت توان ناشی از عبور سیگنال از فیبر، استفاده از تقویت کننده را در فواصل طولانی ضروری می سازد. مالتی پلکسرهای نوری نیز در سیستمهای جدید برای ترکیب طول موجهای مختلف و ارسال آن بر روی یک فیبر به کار می روند.

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، می پردازیم. نویز شدت معمولاً با نویز شدت نسبی بیان می شود. درحالیکه اثر نویز فاز یا فرکانس در پهنای خط لیزر مشاهده می شود.

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 درنظر 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 تابت خواهد ماند.

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

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_e N - \sum_j G_j P_j + F_N(t)$$
 (۳۳) (۳۳)

$$\frac{dP_k}{dt} = (G_k - \gamma)P_k - R_{sp} + F_{P_k}(t) \qquad (-\tau\tau)$$

$$\frac{d\varphi_k}{dt} = -(\omega_k - \omega_{th}) + \frac{\gamma}{\gamma}\beta_c (G_k - \gamma) + F_{\varphi_k}(t) \qquad (77)$$

که I جریان تزریقی،  $G_j$  بهره در مُد i ام،  $\gamma_e$  و  $\gamma$  معکوس طول عمر حاملها و فوتونها،  $R_{sp}$  نریب گسیل خودبهخودی،  $\beta_c$  ضریب افزایشی پهنای خط و  $\omega_{th}$  مقدار آستانه ضریب مُد است.  $F_N$  و  $F_{\rho k}$  ،  $F_N$  منابع نویز لنجوین مربوط به حاملها، فوتونها و فاز میدان الکتریکی درحالیکه  $r, \pm 1, \pm 1, \dots, x$  است.

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



شکل ۵: نویز شدت نسبی برحسب (الف) فرکانس و (ب) جریان تزریقی برای یک لیزر نیمههادی از جنس InGaAsP با طول موج μm.

#### 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]

$$N(t) = \overline{N} + \delta N(t)$$
 (1) (14)

$$P(t) = \overline{P} + \delta P(t) \qquad (-\Upsilon F)$$

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

با فرض رابطه خطی برای بهره داریم  
$$G = A(N - N_o)$$
 (۲۴)

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

با درنظر گرفتن روابط (۲) و (۳) در معادلات نرخ تک مُد مربوط به الکترونها و فوتونها و با جشم پوشی از مقادیر کوچک، مشتق زمانی نوسانات به صورت زیر نوشته می شوند

$$\frac{d \,\delta N\left(t\right)}{dt} = -\left[\gamma_e + A\overline{P}\right]\delta N\left(t\right) - \overline{G}\,\delta P\left(t\right) + F_N\left(t\right)\left(\frac{d \,\delta P\left(t\right)}{dt}\right)$$
$$\frac{d \,\delta P\left(t\right)}{dt} = A\overline{P}\,\delta N\left(t\right) - \frac{R_{sp}}{\overline{P}}\,\delta P\left(t\right) + F_P\left(t\right) \qquad \left(-\Upsilon\Delta\right)$$

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]

$$RIN = \frac{\mathbf{Y}R_{sp}}{\overline{P}} \times \frac{\left[\left(\Gamma_{N}^{\mathsf{v}} + \omega^{\mathsf{v}}\right) + G_{N}^{\mathsf{v}}\overline{P}^{\mathsf{v}}\left(\mathbf{v} + \gamma_{e}\overline{N}/R_{sp}\overline{P}\right) - \mathbf{Y}\Gamma_{N}G_{N}\overline{P}\right]}{\left[\left(\Omega_{R} - \omega\right)^{\mathsf{v}} + \Gamma_{R}^{\mathsf{v}}\right]\left[\left(\Omega_{R} + \omega\right)^{\mathsf{v}} + \Gamma_{R}^{\mathsf{v}}\right]}$$
(YF)

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 ۲/۳ سایش میدهد.

از شکل ۵-الف برمی آید، نویز در فرکانسهای پایین نسبتاً کم و در نزدیکی فرکانس نوسانات میرایی به طور چشم گیری افزایش یافته به مقدار بیشینه میرسد. همچنین مشاهده می شود، نویز شدت نسبی با افزایش جریان تزریقی کاهش می یابد. در شکل ۵-ب مشاهده می کنیم، برای یک فرکانس معین، نویز شدت نسبی در جریان آستانه به مقدار

بیشینه میرسد.

با گرفتن تبدیل فوریه معکوس از نویز شدت نسبی، تابع خود  
ممبستگی به دست میآید و به صورت زیر تعریف میشود
$$\langle \delta P(t) \delta P(t+ au) 
angle$$

$$C_{PP}(\tau) = \frac{\langle \delta P(t) \delta P(t+\tau) \rangle}{\overline{P}^{\gamma}} \tag{YV}$$

تبدیل فوریه معکوس رابطه (۲۷) به صورت زیر است

$$C_{PP}(\tau) = \frac{1}{\gamma \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{RIN}(\omega) \exp(i \,\omega \tau) d\,\omega \qquad (\Upsilon \lambda)$$

$$C_{PP}(\tau) = \frac{R_{sp} \exp(-\Gamma_R \tau)}{\Gamma_R \overline{P}}$$

$$\times \operatorname{Re} \left( \frac{\Gamma_e^{\tau} + (\Omega_R + i\Gamma_R)^{\tau}}{\Omega_R (\Omega_R + i\Gamma_R)} \exp(i\Gamma_R \tau) \right) \quad \text{(Y9)}$$

$$\Gamma_{r}^{\tau} = \Gamma_{r}^{\tau} + G_{r}^{\tau} \overline{P}^{\tau} (\gamma + \gamma \overline{N}/R - \overline{P}) - \gamma \Gamma_{r} G_{r} \overline{P} \quad (\gamma \cdot)$$

$$\Gamma_{e}^{\mathsf{r}} = \Gamma_{N}^{\mathsf{r}} + G_{N}^{\mathsf{r}} \overline{P}^{\mathsf{r}} \left( 1 + \gamma_{e} \overline{N} / R_{sp} \overline{P} \right) - \mathsf{r} \Gamma_{N} G_{N} \overline{P} \qquad (\mathfrak{r} \cdot)$$

تابع خود همبستگی شدت، در نتیجه نوسانات میرایی، با  $\tau$  نوسان می کند و هنگامی که  $\tau$  با زمان میرایی  $\Gamma_R^{-1}$  قابل مقایسه باشد، صفر می شود. (0)  $C_{pp}$  کمیتی است که از نظر کاربردی حائز اهمیت است و با واریانس نوسانات شدت ارتباط دارد.

$$SNR = \frac{1}{C_{PP}(o)} = \left(\frac{1}{r\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} RIN(\omega) d\omega\right)^{-\infty}$$
(71)

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

$$SNR = \left(\frac{\Upsilon \Gamma_R \overline{P}}{R_{sp}}\right)^{1/\Upsilon} \left(1 + \frac{\Gamma_e^{\Upsilon}}{\Omega_R^{\Upsilon} + \Gamma_R^{\Upsilon}}\right)^{-1/\Upsilon}$$
(\Upsilon\Upsilon)

رابطه (۳۲) نشان میدهد که SNR به نرخ گسیل خودبهخودی،  $R_{sp}$ ، وابسته است و با افزایش آن کاهش می ابد. همچنین مشاهده می شود، نرخ کاهش نوسانات میرایی،  $\Gamma_R$ ، نیز در تعیین SNR نقش مهمی ایفا می کند.

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





شکل ۶۰ تغییرات نسبت سیگنال به نویز برحسب جریان تزریقی.

در لیزرهای نیمههادی چند مُد، نویز شدت نسبی برای تک تک مُدها، RIN<sub>1</sub> و برای توان کل، RIN<sub>tot</sub> ، به صورت زیر تعریف میشود

$$\operatorname{RIN}_{k}(\omega) = \frac{\delta \tilde{P}_{k}^{\mathsf{r}}(\omega)}{\bar{P}_{k}^{\mathsf{r}}} \tag{(27)}$$

$$\operatorname{RIN}_{\operatorname{tot}}(\omega) = \frac{S_P(\omega)}{\overline{P}^{\,\mathrm{Y}}} = \left(\sum_j \delta \tilde{P}_j(\omega)\right)^{\mathrm{Y}} / \sum_j \overline{P}_j^{\,\mathrm{Y}} \quad (-\mathrm{YY})$$

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

در شکل ۷ نویز شدت نسبی مد اصلی، مد جانبی و شدت نسبی کل، برای یک لیزر نیمههادی با دو مد جانبی رسم شدهاست. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، در لیزر نیمه هادی با دو مد جانبی، نویز شدت کل در فرکانس های پایین مقدار کمی دارد و به ازای فرکانس نوسانات میرایی به مقدار بیشینه می رسد. سپس در فرکانس های بالاتر از فرکانس نوسانات میرایی به شدت کاهش می یابد. نویز شدت نسبی مد اصلی و مُدهای کناری به طور چشم گیری از نویز شدت کل بزرگترند. به علت کاهش فوتون ها در مُدهای جانبی نسبت به مد اصلی، نویز شدت نسبی در مُدهای جانبی نسبت به مد اصلی، نویز شدت

۱–۳–۲ نویز فاز و پهنای خط لیزر

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

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

$$\frac{d \,\delta\varphi_{k}\left(t\right)}{dt} = \frac{1}{\gamma} A \,\beta_{c} \,\delta N\left(t\right) -\frac{1}{\gamma} \,\beta_{c} \,\beta_{lk} \sum_{j} \delta P_{j}\left(t\right) + F_{\varphi_{k}}\left(t\right)$$
(7%)

مشابه نویز شدت، داریم

$$\delta \tilde{\varphi}_{k}(\omega) = \frac{1}{i\omega} \left[ \frac{1}{Y} A \beta_{c} \delta \tilde{N}(\omega) - \frac{1}{Y} \beta_{c} \beta_{lk} \sum_{j} \delta \tilde{P}_{j}(\omega) \right]$$

$$+ \frac{\tilde{F}_{\varphi_{k}}(\omega)}{i\omega}$$
(Y\Delta)

www.SID.ir



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 علاوهبر نویز لنجوین 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 ( $\varpi$ ) $\delta P(\omega)$  در رابطه ( $\pi$ ) چشمپوشی کرد و با درنظر گرفتن تقریبهای لازم، چگالی طیفی نویز فاز را برحسب فرکانس نوسانات میرایی بیان نمود. در اینصورت:

$$S_{\phi}(\omega) \cong \frac{R_{sp}}{\overline{\gamma P}} \left( \gamma + \frac{\beta_c^{\gamma} \Omega_R^{\epsilon}}{\left[ \left( \Omega_R^{\gamma} - \omega^{\gamma} \right)^{\gamma} + \left( \gamma \omega \Gamma_R \right)^{\gamma} \right]} \right)$$
(77)

در لیـزرهای نیمههادی چند مُد نویز فاز هر مُد به صورت زیر تعریف شود:

$$S_{\phi_{k}}(\omega) = \left\langle \left| \omega \delta \tilde{\phi}_{k}(\omega) \right|^{r} \right\rangle \tag{(YY)}$$

در شکل ۸-الف نویز فاز یک لیزر نیمههادی تک مد با درنظر گرفتن توانهای خروجی مختلف رسم شدهاست. در این شکل مشاهده می شود که نویز فاز در فرکانس های زیر فرکانس نوسانات میرایی ثابت است و به ازای فرکانس نوسانات میرایی به مقدار بیشینه می رسد. با افزایش توان نور خروجی، نویز فاز، همانند نویز شدت، کاهش می یابد.

در لیزرهای نیمههادی چند مُد می توان نویز فاز را برای هر مُد به طور جداگانه درنظر گرفت. در شکل ۸–ب مشاهده می شود که در مُدهای جانبی با دور شدن از مُد اصلی نویز فاز افزایش می یابد و این مسئله می تواند 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 می کنند، 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 فازاند. 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 ۸: طیف نویز فاز یک لیزر نیمههادی، (الف) تک مد به ازای جریانهای تزریقی مختلف و (ب) چند مد با درنظر گرفتن دو مد جانبی.

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

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.

## ۲-۳ تقویت کننده های نوری

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

نویز در تقویت کنندهها از جنبههای مختلف حائز اهمیت است. در تقویت کنندههای توان و پیش تقویت کنندهها که در فرستندهها و گیرندهها به کار میروند، نویز تقویت کننده SOA به نویز مربوط به لیزر نیمههادی و نویز آشکارساز اضافه شده در نرخ انتقال سیستم محدودیت هایی ایجاد می کند. در تقویت کنندههای خط نیز که در مسیر نوری به کار می وند، نویز ASE در EDFA به همراه دیگر نویزهای تولید شده از قطعات نوری، کارآیی سیستم را محدود می سازد.

در این قسمت به مرور نویز در دو نوع اصلی تقویت کنندههای EDFA و SOA می پردازیم.

#### ۳–۲–۱ تقویت کننده فیبری اُلائیده به اربیوم

تقویت کننده فیبری EDFA فیبر کوتاهی است که اربیوم به آن افزوده شدهاست. یونهای اربیوم 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 پایین تر، فرکانس نور گسیل شده را تعیین میکند. به همراه گسیل برانگیخته در EDFA، گسیل خودبهخودی نیز صورت میگیرد. این گسیل خودبهخودی در طول ASE تقویت شده و عامل اصلی نویز ASE در تقویت کننده میباشد [۳۴] و [۳۵].

ایجاد نویز در تقویت کنندههای نوری به علت تحریک خودبهخودی یونها صورت می گیرد. 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 پایین تر گذار می کنند و باعث گسیل فوتون ناخواسته می شوند. 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 می آورند.

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

$$dn(v) = A_{\gamma,g}(v)\delta v \frac{\Delta\Omega}{\mathfrak{r}_{\pi}} dV \int_{s} N_{\gamma}(r,\theta)\overline{\psi}_{s}(r,\theta) r dr d\theta \quad (\Upsilon A)$$

که در آن  $A_{r_1} = 1/\tau$  (v) جا  $a_{r_1} = 1/\tau$  شکل خط،  $r_1 = 1/\tau$  نرخ  $\Delta \alpha = \lambda_s^r / n^r \pi \omega_s^r$  شکل خط،  $\Delta \Omega = \lambda_s^r / n^r \pi \omega_s^r$  گسیل خودبه خودی، n ضریب شکست محیط،  $\Delta \Omega / r \pi$  کسر گسیل خودبه خودی جذب شده توسط فیبر، و  $\omega_s$  شعاع  $\Delta \Omega / r \pi$  توان مُد انتقال یافته به فیبراست. درنتیجه،  $dV = \pi \omega_s^r dz$ 

توان گسیل خودبهخودی از رابطه  $dP_{SE} = hvdn(v)$  به دست می آید و نرخ تولید توان گسیل خودبهخودی در پهنای باند  $\delta v$  برابر است با

$$\frac{dP_{SE}}{dz} = rP_{\cdot}\sigma_{e}(v)\int_{s}N_{r}(r,\theta)\overline{\psi}_{s}(r,\theta)rdrd\,\theta \qquad (rq)$$

که P<sub>.</sub> = hvδv توان نویز خودبهخودی یک فوتون است و ضریب ۲ به علت درنظر 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 می آوریم. توان اشباع، توانی است که در آن بهره تقویت به نصف کاهش پیدا می کند و به صورت زیر تعریف می شود

$$P_{sat}(v_s) = \frac{hv_s \pi \omega_s^{\mathsf{Y}}}{\sigma_a(v_s)[\mathsf{Y} + \eta(v_s)]\tau} \tag{$\mathbf{f}$.}$$

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



شکل۹: نویز ASE تقویتکننده EDFA برحسب توان سیگنال ورودی به ازای توانهای مختلف پمپ [۳۱].



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

$$\frac{dp}{dz} = \rho_{\cdot}\sigma_{a}(v_{s})\frac{\tau}{\omega_{s}^{\tau}}\int_{s}\frac{\rho(r)}{\rho_{\cdot}}\psi_{s}(r)\left\{\frac{\eta_{s}\left[q\psi_{p}(r)+\frac{1}{1+\eta_{s}}p\psi_{s}(r)\right]\left[p+\tau p_{\cdot}\right]-\left[1+\frac{\eta_{s}}{1+\eta_{s}}p\psi_{s}(r)\right]p}{1+q\psi_{p}(r)+p\psi_{s}(r)}\right\}rdr$$

$$\frac{dq}{dz} = -q\rho_{\cdot}\sigma_{a}(v_{p})\frac{\tau}{\omega_{p}^{\tau}}\int_{s}\frac{\rho(r)}{\rho_{\cdot}}\psi_{p}(r)\left\{\frac{1+\frac{\eta_{s}}{1+\eta_{s}}p\psi_{s}(r)}{1+q\psi_{p}(r)+p\psi_{s}(r)}\right\}rdr$$
(f1)

در روابط (۴۱) و (۴۲) (r) توزیع چگالی اِربیوم در طول فیپر و (P,r) در روابط (۴۱) اِربیوم است و انتگرالها میان صفر تا شعاع مغزی فیبر، a محاکثر چگالی اِربیوم است و انتگرالها میان صفر تا شعاع مغزی فیبر، a محاسبه می شوند. با حل دو معادله (۴۱) و (۴۲) به طور همزمان می توان 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 می توان در حالتهایی که سیگنال و 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 تقویت کننده EDFA را برحسب طول موج سیگنال ورودی در توان سیگنال ورودی HodBM-۰۶- برای توانهای پمپ ۴، ۶۰ ۸ ۵۸ و WT ۴۰ و طول فیبر ۸ متر نشان میدهد. همانطور که از این شکل مشخص است، با افزایش توان پمپ در تمامی طول موجهای سیگنال ورودی، نویز تقویت کننده کم می شود [۳۳].

۳–۲–۲ تقویت کننده نوری نیمههادی

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

یکی از روش های آنالیز نویز در SOA، استفاده از معادلات نرخ است. معادلات نرخ چند مُد SOA به صورت روابط (۴۳)و (۴۴) نوشته می شوند:

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

$$\frac{dN_{p,m}}{dt} = -\frac{N_{p,m}}{\tau_p} + \Gamma G_m N_{p,m}$$

$$+ \Gamma E_{cv,m} + P_{in,m} + F_{p,m}(t)$$
(ff)

که در آنها، n چگالی حاملها، P نرخ پمپ در اثر جریان تزریقی، R نرخ m ترکیب حاملها، T ضریب محدودیت،  $N_{p,m}$  تعداد فوتونها در مُد m ام،  $\tau_p$  طول عمر فوتونها،  $P_{in,m}$  نرخ تزریق فوتونهای سیگنال مُد  $\pi_p$  ام و  $\tau_p$  و (t) و  $F_{p,m}(t)$  منابع نویز لنجویناند.

ضریب گسیل برانگیخته 
$$G_m$$
 در روابط (۴۳) و (۴۴) برابر است با $G_m = E_{cv,m} - E_{vc,m}$  (۴۵)

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

برای محاسبه توان نویز، تغییرات سیگنال کوچک 
$$\delta n(t)$$
 و  $\delta n(t)$  محاسبه توان نویز،  $\overline{N}_{p,m}$  در نظر می گیریم  $\delta N_{p,m}(t)$ 

$$\frac{d}{dt}\delta n(t) = \left(-\frac{\partial \overline{R}}{\partial \overline{n}}\sum_{m}\frac{\partial \overline{G}}{\partial \overline{n}} - \Gamma \overline{N}_{p,m}\right)\delta n(t) - \sum_{m}\Gamma \overline{G}_{m}\partial N_{p,m}(t) + F_{e}(t)$$
(49)

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

تبدیل فوریه منابع نویز لنجوین در روابط (۴۶) و (۴۷) به صورت روابط (۴۸) تا (۵۰) نوشته می شود

$$\begin{split} \left\langle F_{e}^{2}(\omega) \right\rangle &= \left\langle F_{e}(\omega) F_{e}^{*}(\omega) \right\rangle \\ &= P + \overline{R} + \sum_{m} \left[ \Gamma \overline{E}_{cv,m} \overline{N}_{p,m} \qquad (\mbox{f} \wedge) \right. \\ &+ \Gamma \left( \overline{E}_{cv,m} \overline{N}_{p,m} + \Gamma (\overline{E}_{cv,m} - \overline{G}_{m}) \overline{N}_{p,m} \right) \right] \\ \left\langle F_{p,m}^{2}(\omega) \right\rangle &= \left\langle F_{p,m}(\omega) F_{p,m}^{*}(\omega) \right\rangle \\ &= \frac{\overline{N}_{p,m}}{\tau_{p}} + \Gamma \overline{E}_{cv,m} (1 + \overline{N}_{p,m}) \qquad (\mbox{f} \wedge) \\ &+ \Gamma (\overline{E}_{cv,m} - \overline{G}_{m}) \overline{N}_{p,m} + P_{in,m} \\ \left\langle F_{p,m}(\omega) F_{p,m}^{*}(\omega) \right\rangle &= -\Gamma [\overline{E}_{cv,m} (1 + \overline{N}_{p,m}) \\ &+ (\overline{E}_{cv,m} - \overline{G}_{m}) \overline{N}_{p,m} ] \end{split}$$

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

$$\left\langle \delta N_{p}^{\mathsf{r}} \right\rangle = \operatorname{Re}\left[\sum_{k} \sum_{l} \left\langle \delta N_{p,k}\left(\omega\right) \cdot \delta N_{p,l}^{*}\left(\omega\right) \right\rangle \right] \qquad (\Delta \mathsf{N})$$

 $m{B}_0$  توان نویز در آشکارسازی با مقاومت بار  $R_L$  و پهنای باند برابراست با:

$$P_{.}(\omega) = \frac{\left\langle \delta N_{p}^{\mathsf{r}}(\omega) \right\rangle}{\tau_{p\mathfrak{r}}^{\mathsf{r}}} R_{L} B_{0} \eta_{D}^{\mathsf{r}} e^{\mathsf{r}} \qquad (\Delta \mathsf{r})$$

که  $\eta_D$  بازده کوانتمی آشکارساز و  $\tau_p$  طول عمر فوتون ناشی از تلفات آینه خروجی است.

در شکلهای ۱۱ –الف تا ۱۱–د عدد نویز برحسب پارامترهای ساختاری تقویت کننده نوری نیمههادی نشان داده شدهاست [۳۷].

در شکل ۱۱ – الف بازتاب آینههای ورودی و خروجی برابر است و توان خروجی برابر dBm ۱۰– است. در یک تقویت کننده موج رونده' (TWA) که ضرایب بازتاب دیوارههای آن صفر است، ضخامت لایه فعال بر روی عدد نویز تاثیری ندارد، درحالیکه با افزایش طول و ضخامت کاواک، عدد نویز تقویت کننده فابری پرو افزایش می ابد. بنابراین کاواک کوتاه و ضخیم دارای نویز کمتری است.

در شکل ۱۱ – ب عدد نویز برحسب طول کاواک برای تقویت کننده هایی با ضرایب بازتاب متفاوت دیواره های ورودی و خروجی نشان داده شده است. هنگامیکه بازتاب آینه ورودی از خروجی بیشتر باشد، نویز تقویت کننده کمتر از حالت عکس آن است. بنابراین تقویت کننده ای 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 می شود، هنگامی که تزریق حامل ها ثابت باشد برای TWA طول و ضخامت کاواک بر اندازه نویز تاثیری ندارد.

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

1. Traveling Wave Amplifiers

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 نتیجه گیری درباره نویز تقویت کنندهها می توان گفت که در تقویت کننده فیبری EDFA، با افزایش توان سیگنال ورودی، ASE در تمامی توان های پمپ کاهش می یابد و به ازای توان های پمپ بزرگتر، نویز ASE بیشتری است. با افزایش توان پمپ در تمامی طول موجهای سیگنال ورودی، نویز تقویت کننده EDFA کم می شود.

همچنین در تقویت کننده 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 تاثیری 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 دمُدلاتور اطلاعات موجود در سیگنال الکتریکی را استخراج میکند. هرگاه سیگنال نوری شکل موج سادهای داشته باشد، به دمُدلاتور نیازی نخواهد بود و سنسور نوری به عنوان آشکارساز نوری به کار میرود. در ادامه، نویز دو نوع آشکارساز نوری PIN بررسی و مرور می شود.

# PIN آشکار ساز PIN

عمل أشكارسازی در یک دیود نوری PIN بسیار ساده انجام می شود. فوتون وارد شده در ناحیه I جذب می شود و یک زوج الکترون – حفره تولید می کند. ولتاژ اعمالی به قطعه الکترون های تولید شده را به قسمت انتهایی PIN که دارای اتصال اهمی است می رساند.

جریان نوری دیود نوری PIN از رابطه زیر به دست میآید:

$$I_{ph} = \frac{\eta P_{.} \lambda q}{hc} \tag{(ar)}$$

که p بار الکترون، c سرعت نور، P توان نور ورودی برحسب وات و  $\eta$  بازده کوانتمی قطعه است. به عنوان نمونه، توان نوری NW 200 در ۸۷/۱ ملول موج  $\mu$ m بازده کوانتمی ۶۰% یک جریان نوری AV/۱ nA تولید می کند.

از آنجا که فوتودیود PIN هیچ گونه تقویتی بر روی جریان تولیدی انجام نمی دهد بنابراین بعد از آشکارسازی نور توسط دیود، باید از تقویت کننده استفاده کرد. این عمل معمولاً با تبدیل جریان به ولتاژ توسط یک مقاومت انجام می شود. برای درنظر گرفتن نویز دیود نوری PIN، باید اثر متقابل بین فوتودیود و تقویت کننده نیز درنظر گرفته شود.

استفاده از مدار معادل فوتودیود، آنالیز نویز این قطعه را آسان تر می کند. برای این کار می توان نویزهای موجود را به صورت منابع جریان درنظر گرفت. در شکل ۱۲ مدار معادل یک فوتودیود به همراه تقویت کننده نشان داده شدهاست [۴۷]. ماهیت اتفاقی تولید فوتوالکترونها و در نهایت ایجاد جریان نوری، باعث به وجود آمدن نویز کوانتمی می شود. میانگین مربع جریان نویز کوانتمی طبق رابطه زیر به دست می آید

$$<\!i_Q^{\,\rm r}>={\rm r} q I_{\,ph} B \qquad (\Delta {\rm F})$$

که در آن B پهنای باند آشکارسازی است و اندازه نوعی آن MHz ۵ است.



شکل ۱۱: عدد نویز برحسب پارامترهای ساختاری تقویتکننده نوری نیمههادی، (الف) بازتاب آینههای ورودی وخروجی برابر، (ب) ضرایب بازتاب دیوارههای ورودی و خروجی، متفاوت ، (ج) بازتاب آینههای ورودی وخروجی برابر و تزریق حاملها ثابت و (د) ضرایب بازتاب دیوارههای ورودی و خروجی متفاوت و تزریق حامل ها ثابت ۱۳۷].

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 GB، و GaAs، ماده GB بیشترین و GaAs 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

$$\langle i_D^{\gamma} \rangle = \gamma q I_D B \tag{(aa)}$$

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  $R_i$  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 بعدی اند.

$$I_B$$
 او  $I_D$   $i_{ph}$  کل که نامی از مجموع جزیان های تصادفی  $I_D$   $i_{ph}$   $i_{ph}$  کل که نامی از مجموع جزیان های تصادفی  $I_{ph}$   $I_D$   $I_D$ 

:.1

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 می شود. جریان نویز حرارتی ناشی از مقاومتهای موجود در آشکارساز به صورت زیر محاسبه می شود

$$< i_T^{\,\rm Y} >= \frac{\epsilon k T B}{R_{eq}} \tag{\Delta Y}$$

که در آن  $R_{eq}$  مقاومت معادل است و از رابطه زیربه دست میآید $\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$ 

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_i} \tag{(\Delta\Lambda)}$$

www.SID.ir



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



شکل۱۳ اثر متقابل دو قسمت گیرنده نوری شامل APD و تقویت کننده.

که در آن  $R_i$  و  $R_j$  نسبت به  $R_L$  چشم پوشیدنی است.

با درنظر 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]

$$SNR_{PIN} = \frac{i_{ph}^{r}}{\left(\langle i_{z}^{r} \rangle + \langle i_{T}^{r} \rangle\right)}$$
$$= \frac{\left(mqnP_{\lambda}/\sqrt{r}hc\right)^{r}}{rq\left(I_{ph} + I_{B} + I_{D}\right)B + rkTB/R_{eq}}$$
(29)

اعمال ولتاژ بایاس معکوس بزرگ در یک دیود نوری APD باعث می شود 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 می کنند و در اثر برخورد با اتمهای شبکه، زوج الکترون – حفرههای زیادی تولید کنند و بنابراین عمل تکثیر حامل رخ می دهد.

 $\alpha_h$  تعداد برخوردهای یونیزه کننده که توسط حفره صورت می گیرد با  $\pi_h$  تعداد برخوردهای یونیزه کننده توسط الکترونها با  $\alpha_e$  و نسبت آنها با ضریب  $K \equiv \alpha_h / \alpha_e$ 

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

$$M = \frac{(V-K)e^{\alpha_e W(V-K)}}{V-Ke^{\alpha_e W(V-K)}}$$
(\$.)

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

بریب *M* برای APD در رابطه ظاهر میشود:  

$$I_{ph} = \frac{M\eta P_0 \lambda q}{hc}$$
 (۶۱)

آنالیز نویز در APD نسبت به PIN دارای پیچیدگی بیشتری است. درواقع فرایند تکثیر APD باعث می شود 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 شدهاست [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

$$i_{ph} = \frac{M \eta qm \lambda P}{hc \sqrt{\tau}}$$
(57)

که در آن M بهره مPD،  $\eta$  بازده کوانتمی، m ضریب مُدلاسیون شدت منبع نور مُدوله شده،  $\lambda$  طول موج برحسب متر، P توان متوسط منبع نور برحسب وات، h ثابت پلانگ و c سرعت نور است. میانگین مجذور جریان نویز ضربهای بعد از تکثیرشدن برابر است با:

$$<\!i_{s}^{\,\mathsf{t}}>=\mathsf{t}q\left(I_{ph}+I_{B}+I_{D}\right)<\!M^{\,\mathsf{t}}>B \tag{FT}$$

يا

$$\langle i_{s}^{\mathsf{Y}} \rangle = \mathsf{Y}q(I_{ph} + I_{B} + I_{D})M^{\mathsf{Y}}F(M)B$$
(FY)

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

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



$$SNR_{APD} = \frac{i_{ph}^{r}}{\left(\langle i_{z}^{r} \rangle + \langle i_{T}^{r} \rangle\right)}$$
$$= \frac{\left(mqnP_{\cdot}\lambda/\sqrt{r}hc\right)^{r}M^{r}}{rq\left(I_{ph} + I_{B} + I_{D}\right)F(M)M^{r}B + rkTB/R_{eq}M^{r}}$$
(\$\$\varepsilon)

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

با توجه به وابستگی نسبت سیگنال به نویز و توان معادل نویز به ضریب نویز (M)، به بررسی تفصیلی (M) می پردازیم. ضریب نویز به ضریب یونیزاسیون الکترونها و حفرهها و همچنین بهره APD بستگی دارد. برای تکثیر الکترون در یک APD از جنس Si، ضریب نویز (M) از رابطه زیر تبعیت می کند [۴۹]

$$F(M) = KM + (\tau - \gamma/M)(\gamma - K)$$
(59)

به ازای K= ضریب نویز با بهره برابر می شود. به ازای K= (یا  $(\alpha_h = \cdot$ 

در یک APD از جنس Ge حفره تزریق می شود، ضریب نویز به صورت زیر است

$$F(M) = K'M + (r - \frac{1}{M})(1 - K')$$
 (5Y)

که در آن *K'* = ۱/*K* است.

K در شکل ۱۴ ضریب نویز برحسب بهره M و به ازای مقادیر مختلف K رسم شدهاست [۴۷]. F(M) در این شکل به صورت زیر تقریب زده می شود

$$F(M) \approx M^{\chi} \tag{$$\mathcal{F}$A}$$

و  $\chi > \chi > 0.5$  شاخص نویـز اضـافی<sup>(</sup> نامیده میشود. در این شکل  $\chi = 0.36$  درنظر گرفته شدهاست. به طور کلی، به خاطر پدیده تکثیر میتوان گفت که نویز آشکارساز APD از نویز دیود نوری PIN بیشتر است.

#### ۲-۲ نویز در دیگر قطعات نوری

در بخشهای قبل به بررسی نویز در برخی از قطعات خاص از قبیل آشکارساز، تقویت کننده و لیزر نیمههادی که از مهمترین منابع نویز در یک لینک نوریاند پرداختیم. در این قسمت نویز دیگر قطعات به کار رفته در یک لینک نوری را که نقش کمرنگ تری در نویز کل لینک دارند مرور خواهیم کرد. ابتدا نویز مُدی<sup>۲</sup> در فیبرهای نوری و سپس نویز در مالتی پلکسرها / دیمالتی پلکسرها را بررسی و مرور می کنیم. مبدل های طول موج از دیگر قطعات به کار رفته در یک سیستم نوریاند. در ساختار این مبدل ها از تقویت کننده نوری نیمههادی استفاده می شود. لذا نویز این مبدل ها از نوع نویز ASE است، که قبلاً بررسی شدهاست.

۳–۴–۱ فیبرهای نوری

فیبر نوری بستر انتقال سیگنال در یک لینک نوری را تشکیل میدهد. به طور کلی، فیبرهای نوری به دو دسته تکمد و چندمد تقسیم می شوند.

علاوهبر نویز فیبر تضعیف، پاشندگی و آثار غیرخطی نیز از عوامل محدود مخرب و محدود کننده سیگنال نوریاند.

در فیبرهای چندمد که معمولاً در فواصل کوتاه به کار میروند، نویز مدی مهمترین نویز موجود است. برخلاف اغلب نویزهایی که از بیرون به سیستم تزریق میشوند، نویز مدی در داخل خود سیستم به وجود میآید. نویز مدی در سیستمهای نوری معمولاً در فاصله ۱۰۰ متری فرستنده اتفاق میافتد [۵۲]. این نویز در دو مرحله شامل کوپل شدن مد و سپس تلفات انتخاب مد پدیدار میشود.

هنگامی که لیزری با مُدهای پایدار و پهنای خط باریک به یک فیبر چند مُد کوپل شود، نور عبوری از فیبر 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 اَنها ثابت می ماند ولی دیگر همدوس نیستند.

هنگامی که مُدُها کوپل می شوند، اختلاف فاز مدها 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 همدیگر را خنثی می کنند و درنتیجه توان کل صفر خواهد شد. به طور کلی، در طول مسیر انتقال، در اثر کوپل شدن مدها ، توان آنها به طور تصادفی کم و زیاد می شود و تغییرات نامنظمی در توان مُدها به وجود خواهذ آمد.

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

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

به طورکلی، تغییرات توان در طول مسیر در درون فیبر نویز مُدی نام یافتهاست. برای کاهش این نوع نویز می توان از فیبرهایی با سطح مقطع بزرگتر و همچنین از اتصالات مطلوب میان فیبرها استفاده کرد.



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

۳–۴–۲ مالتیپلکسر / دیمالتیپلکسرها

مالتی پلکسرها / دی مالتی پلکسرهای به کار رفته در سیستمهای چند طول موجی، به طور کلی دارای یکی از چهار ساختار متداول گریتینگ موجبرهای آرایهای'، گریتینگ فیبری براگ'، فیلترهای لایه نازک<sup>۳</sup> و گریتینگ پراش<sup>\*</sup> اند.

با وجود این که اغلب مالتی پلکسرها ساختار فیلتری دارند، ولی معمولاً نمی توان آنها را به عنوان منابع نویز سیستم درنظر گرفت. تنها در صورتیکه پهنای باند فیلتر بسیار باریک و یا فرکانس مرکزی آن به طور دقیق تنظیم نشده باشد، حضور مالتی پلکسر باعث ایجاد نویز در سیگنال می شود.

برعکس مالتی پلکسرها، دی مالتی پلکسرها منابع نویزاند. این بدین سبب است که فیلترهای به کار رفته در ساختار دی مالتی پلکسرها، غالبا کامل نیستند. در نتیجه، بر روی کانالهای مجاور در سیستمهای چند کانالی هم شنوایی ایجاد خواهند کرد. همچنین تخت نبودن مشخصه این فیلترها در سیستمهای چند کانالی نویز ایجاد خواهد کرد.

به طور کلی، مهم ترین عامل نویز در مالتی پلکسرها / دی مالتی پلکسرها عامل هم شنوایی است. هم شنوایی در سیستمهای چند طول موجی شامل هم شنوایی میان کانالهای مجاور، هم شنوایی میان کانالهای ناهم جوار و هم شنوایی کل است. هم شنوایی میان دوکانال مجاور برابر است با مقدار انرژی نفوذی از یک کانال به کانال مجاور. هم شنوایی میان دو کانال ناهم جوار برابراست با مقدار انرژی نفوذی از یک کانال به کانال ناهم جوار است. هم شنوایی کل برابراست با کمترین مقدار نسبت توان یک کانال به توانی که در تمامی کانالهای دیگر در باند عبور نفوذ می کند.

# ٤- نتيجه گيري

در این مقاله انواع نویز در یک لینک نوری بررسی و مرور شدهاست. مهمترین عوامل تولید کننده نویز در لینکهای نوری شامل آشکارسازهای نوری، تقویت کنندههای نوری و لیزرهای نیمههادی اند.

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 تقویت کنندههای 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)

نشان داده شد، در تقویت کننده 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 طول موجهای سیگنال ورودی، نویز تقویت کننده ADFA کم میشود. در تقویت کننده نوری نیمههادی، تقویت کنندههایی 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 تاثیری ندارد، درحالیکه، با افزایش طول کاواک عدد نویز در نقطهای به مقدار کمینه میرسد و پس از آن دوباره افزایش میابد.

در لیزرهای نیمههادی دو نوع رایج نویز، نویز شدت و نویز فاز است. نویز شدت معمولاً با نویز شدت نسبی، RIN، بیان می شود. اندازه RIN در فرکانسهای پایین، نسبتاً کم است و در نزدیکی فرکانس نوسانات میرایی به بیشترین مقدار خود می رسد. همچنین نویز شدت نسبی با افزایش جریان تزریقی کاهش یافته و به ازای فرکانس مشخص در جریان آستانه به بیشترین مقدار خود می رسد. 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 می یابد.

نویز قطعاتی نظیر فیبرها و مالتیپلکسرها نیز مرور شد. مهمترین نویز در فیبرهای چند مُد نویز مُدی 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، BER 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 مرتاضی، وحید احمدی و محمد کاظم مروج فرشی، "مُدلسازی مداری و اندازه گیری نویز در لیزرهای نیمه هادی، " مجله علمی-پژوهشی دانشگاه تبریز، شماره ۳۱، صص. ۸۳–۷۷، تابستان ۱۳۸۲.
  - [۲] وحید احمدی، ابراهیم مرتاضی، محمدکاظم مروج فرشی، و عباس ظریفکار، "اندازه گیری و آنالیز نویز شدت و فاز در لیزرهای مخابراتی چند مُد،" *مجله* علمی-پژوهشی /میر کبیر، شماره ۵۳، ص.ص. ۲۴۹-۲۵۸، زمستان ۱۳۸۱.
- [۳] ابراهیم مرتاضی، *اندازه گیری و تحلیل مشخصه های نویز لیزرهای مخابراتی،* پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تابستان ۱۳۸۰.
- [۴] عباس ظریفکار، *مدل سازی و شبیه سازی نویز در لیزرهای نیمه هادی*، 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.

- [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 Wily & 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 Wily & 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. Ghafori-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. Ghafori-Shiraz, Fundamentals of Laser Diode Amplifiers, John Wily & 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 partion 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<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>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 twomode 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 singlelongitudinal-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 modehopping 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 درسال ۱۳۵۵ از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۵۷ از دانشگاه کالیفرنیای جنوبی (USC) و سپس کارشناسی ارشد و دکتری الکترونیک را به ترتیب در سال ۱۳۵۹ از دانشگاه کالیفرنیا در سانتاباربارا (UCSB) و در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه نیوساوث ویلز (UNSW) استرالیا اخذ کردهاست. نامبرده پس از مراجعت به ایران بهعنوان استادیار گروه الکترونیک در دانشگاه تربیت مدرس مشغول شد. او بهترتیب در سالهای ۱۳۷۴ و ۱۳۸۰ به مراتب دانشیاری و استادی ارتقاع یافت. محمدکاظم مروج فرشی در اردیبهشت ۱۳۸۱، توسط وزارت علوم تحقيقات وفناورى، به عنوان يكى از اساتيد نمونه كشور انتخاب و معرفی شد. نامبرده تاکنون ۵ جلد کتاب در زمینههای الکترونیک نیمههادی و لیزر ترجمه كرده است كه همكى توسط مؤسسه انتشارات علمى دانشگاه صنعتى شريف 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 ودکتری الکترونیک راهنمایی کرده است. حاصل کار تحقیقاتی او چاپ و ارائه بیش از ۸۰ مقاله در مجلات و کنفرانس های معتبر بین المللی و داخلی است. نامبره یکی از اعضای مؤسس انجمن اپتيک و فوتونيک ايران بودهاست و اينک عضو هيئت مديره انجمن مذکور است. وی همچنین عضو ارشد مؤسسه IEEE آمریکا است. زمینههای تحقیقاتی مورد علاقه محمد کاظم مروج فرشی شامل افزاره های نوین میکرو و نانو الکترونیک، افزاره های فوتونیک و نانو فوتونیک و همچنین انتشار سالیتون های 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. Dambrine, 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 بهترتیب 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 دکترای مهندسی برق دانشگاه پلی تکنیک مونترال کانادا به تحصیل اشتغال دارد. زمینههای تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده عبارت است از: ادوات نوری، لیزرهای نیمههادی، نویز در سیسنمهای نوری، مدارهای مجتمع نیمههادی و آشکارسازهای موج رونده.