

بررسی نقش گسیل خودبخودی تقویت‌شده در اورمدولاسیون تقویت‌کننده‌های فیبر نوری با آلایش اریوم (EDFA)

حسین سریری^۱، فریبرز پرندین^۲، محمدمهدی کارخانه‌چی^۳

۱- عضو هیأت علمی گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلام آباد غرب، hosein.sariri@gmail.com

۲- عضو هیأت علمی گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلام آباد غرب، Fpaer2001@yahoo.com

۳- عضو هیأت علمی گروه برق دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی، mkarkhanechi@gmail.com

چکیده

در این مقاله نقش گسیل خودبخودی تقویت‌شده در مدولاسیون دامنه فرکانس پایین (\sim KHz) یک سیگنال دیجیتال نوری (overmodulation) در سیستم‌های شامل تقویت‌کننده‌های فیبر نوری با آلایش اریوم (EDFAs)، مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله به بررسی اندیس مدولاسیون تابع تبدیل پمپ - سیگنال و سیگنال - سیگنال در EDFAs پرداخته است. در مدل‌های دینامیکی که تا کنون برای اورمدولاسیون EDFAs ارائه شده است، از گسیل خودبخودی تقویت‌شده صرف نظر شده است. که در مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله، به این پدیده توجه شده، و مدلی تحلیلی جهت بررسی آن ارائه شده است. و در انتها نتایج دو شبیه‌سازی، که یکی مربوط به حالتی است که در آن از ASE صرف نظر شده است و دیگری مربوط به حالتی است که ASE در نظر گرفته شده است، با هم مقایسه شده است و از آن نتیجه‌گیری شده است.

واژه‌های کلیدی

اورمدولاسیون، تقویت‌کننده‌های فیبر نوری با آلایش اریوم (EDFAs)، گسیل خودبخودی تقویت‌شده (ASE).

۱- مقدمه

تکرارکننده‌هایی که در زیر اقیانوس قرار می‌گیرند، بسیار مفید هستند. دوم این که EDFAs نسبت به نرخ بیت و فرمت‌های مختلف مدولاسیون انعطاف‌پذیر بوده، و مهم‌تر از آن از سیستم انتقال مبتنی بر DWDM را پشتیبانی می‌کند.

در حقیقت استفاده از سیستم‌های WDM بعد از سال ۱۹۹۵ انقلابی در زمینه مخابرات فیبر نوری ایجاد کرد [۱]، [۲]. اغلب مدل‌های استاندارد ارائه شده برای EDFAs به صورت استاتیک است، که این مدل‌ها برای مطالعه مدولاسیون بهره، که یک اثر دینامیک است، مناسب نیستند. به همین خاطر باید از مدل‌های دینامیک استفاده کرد. در سال ۲۰۰۲، نوواک و موسل [۳]، با توسعه دادن مفهوم اغتشاش ارائه‌شده توسط فریمن (۱۹۹۳)، و استفاده از روش‌های ارائه‌شده توسط بونونی (۱۹۹۸)، و نیز استفاده از معادلات متغیر با زمان برای بهره که توسط Sun و همکارانش (۱۹۹۶)، ارائه شده بود، توانستند مدلی دینامیک برای بررسی آثار

استفاده از اورمدولاسیون در تقویت‌کننده‌های فیبر نوری با آلایش اریوم (EDFAs)، راه‌کاری جالب را برای پیاده‌سازی و کنترل شبکه‌های مخابراتی نوری شامل DWDM فراهم آورده است. در سیستم‌های مخابرات نوری مسافت بالا، تقویت سیگنال‌های نوری به کمک تقویت‌کننده‌های فیبر نوری با آلایش اریوم، نسبت به تکرارکننده‌های الکترونیکی، مزایای بیشتری دارد. اول این که تکرارکننده این قابلیت را پیدا می‌کند که برای نرخ بیت (bit rate) سیگنال خط انتقال، پیکربندی شود. این ویژگی زمانی ارزش پیدا می‌کند که نرخ بیت سیگنال از ۱ Tb/s فراتر می‌رود. که در این سرعت تکرارکننده‌های الکترونیکی، نیاز به مدارهای الکترونیکی با سرعت بالا دارند. که این امر باعث افزایش در قیمت ساخت‌افزار و توان مصرفی خواهد شد. به همین خاطر تقویت‌کننده‌های نوری به‌ویژه در مورد تکرارکننده‌هایی که دارای قابلیت دسترسی مشکل و محدودیت توان هستند، مانند

برحسب فوتون برثانیه است که از طریق فرمول $\bar{P} = P_{h\nu}$ به میلی‌وات مرتبط می‌شود.

در فیبرهای مدرن می‌توان از پاشندگی و سایر تلفات تا حد بسیار زیادی چشم‌پوشی کرد. با این فرض، معادلات مکانی [۴]، به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial P_S(z,t)}{\partial z} = P_S \Gamma_S (\sigma_{21} n_2 - \sigma_{12} n_1)$$

$$\frac{\partial P_P^\pm(z,t)}{\partial z} = \pm P_P^\pm \Gamma_P (\sigma_{13} n_3)$$

$$\frac{\partial P_{ASE}^\pm(z,t)}{\partial z} = \pm P_{ASE}^\pm \Gamma_S (\sigma_{21} n_2 - \sigma_{12} n_1)$$

$$\pm 2\sigma_{21} \Gamma_S h\nu_S \Delta\nu n_2.$$
(۲)

معادلات (۱) و (۲)، معادلات پایه توصیف‌کننده یک EDFA است.

۳- مدل دینامیک

برای رسیدن به یک مدل دینامیک، ابتدا باید معادله (۲) را در (۱) قرار داد و سپس به منظور برداشتن وابستگی مکانی، نسبت به متغیر Z انتگرال گیری کرد [۵].

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_2 A) = -\frac{\partial P_S}{\partial z} - \frac{\partial P_P^+}{\partial z} - \frac{n_2 A}{\tau}$$

$$-\frac{\partial P_{ASE}^+}{\partial z} + 2\sigma_{21} \Gamma_S h\nu_S n_2 \Delta\nu.$$
(۳)

در معادله (۳)، ما تنها سیگنال پمپ و ASE که دارای جهت انتشار یکسانی با سیگنال تحت تقویت بودند را در نظر گرفتیم. در ادامه با انتگرال گیری نسبت به Z خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial t} N_2 = P_S(0,t) - P_S(L,t) + P_P^+(0,t)$$

$$- P_P^+(L,t) - \frac{N_2}{\tau} + P_{ASE}^+(0,t)$$

$$- P_{ASE}^+(L,t) + 2\sigma_{21} \Gamma_S h\nu_S \Delta\nu \frac{N_2}{A}$$
(۴)

با این روش می‌توان به یک معادله برای N_2 (فراوانی کل یون‌های برانگیخته)، که تغییرات دینامیک خروجی پمپ و سیگنال تقویت‌کننده EDFA را مشخص می‌کند، دست یافت. در معادله (۴)، $PS(0,t)$ و $Pp(0,t)$ بیان‌کننده مقادیر وابسته به زمان توان پمپ و سیگنال ورودی است.

مقدار توان لحظه‌ای خروجی پمپ و سیگنال که در معادله (۴) به ترتیب با $PS(L,t)$ و $Pp(L,t)$ نشان داده شده است، تابعی از N_2 است. که با استفاده از معادله (۲)، و استفاده از تساوی $N_1 = pLA$ ، N_2 ، که در آن p چگالی یون‌های اربوم است، خواهیم داشت:

ناشی از تغییرات جزئی ایجادشده در مشخصه توان ارسالی به خط انتقال، ارائه کند. اما در مدل آنها از نقش گسیل خودبخودی تقویت‌شده چشم‌پوشی شده بود. چرا که در عمل، اشباع تقویت‌کننده، به خاطر رقابت بین سیگنال و ASE برای دسترسی به توان بیشتر از تقویت‌کننده، تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

ما در این مقاله با وارد کردن اثر ASE به مدل نواک، توانسته‌ایم، اولاً مدل تحلیلی جامع‌تری ارائه کنیم. و ثانیاً پس از شبیه‌سازی به نتایج مهمی درباره‌ی تأثیر ASE، بر اورمدولاسیون پمپ و سیگنال در EDFAs برسیم.

۲- مفاهیم پایه

ما از سیستم ۳ لایه‌ای [۴] برای مدل‌سازی استفاده کرده‌ایم. در سیستم ۳ لایه‌ای، لایه‌ها به صورت: الف- لایه پایه با چگالی فراوانی n_1 ؛ ب - لایه متناظر با فرکانس سیگنال (metastable) با چگالی فراوانی n_2 و ج - لایه پمپ با چگالی فراوانی n_3 متناظر با فرکانس پمپینگ. در عمل، انتقال از لایه ۳ به ۲ بسیار محتمل‌تر از انتقال از ۳ به ۱ و نیز گسیل خودبخودی از ۲ به ۱ است. همین مساله باعث می‌شود که در حالت ماندگار، انتقال از لایه ۱ به ۳، به صورت انتقال از ۱ به ۲ فرض شود.

تحت این مفروضات، $n_3 \approx 0$ خواهد شد. معادلات نرخ که بیانگر اثر توان پمپ (P_P)، سیگنال (P_S) و ASE (P_{ASE}) بر چگالی فراوانی لایه‌های مختلف است، برای این سیستم ۳ لایه به ۱ معادله زیر کاهش می‌یابد:

$$\frac{\partial n_2(z,t)}{\partial t} = \frac{\Gamma_S \sigma_{12}}{h\nu_S A} (P_S + P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-) n_1$$

$$- \frac{\Gamma_S \sigma_{21}}{h\nu_S A} (P_S + P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-) n_2$$

$$- \frac{n_2}{\tau} - \frac{\Gamma_P \sigma_{13}}{h\nu_P A} (P_P^+ + P_P^-) n_2$$
(۱)

در معادله (۱)، A سطح مقطع مؤثر هسته، σ_{12} بیانگر سطح مقطع جذب فوتون که باعث گذار از لایه ۱ به ۲ می‌شود، σ_{21} بیانگر سطح مقطع گسیل فوتون بر اثر گذار از لایه ۲ به ۱، σ_{13} بیانگر سطح مقطع جذب فوتون که باعث گذار از لایه ۱ به ۳ می‌شود، Γ ها بیانگر میزان هم‌پوشانی پمپ و سیگنال با هسته فیبر است. همچنین ν_S فرکانس متناظر با طول موج سیگنال و ν_P فرکانس متناظر با طول موج پمپینگ است. بالانویس مثبت بیانگر موافق بودن، و منفی بیانگر مخالف بودن جهت انتشار پمپ و ASE با جهت انتشار سیگنال است. مقادیر توان سیگنال و پمپ و ASE

$$N_2(t) = N_2^0(1 + \delta \cos(\omega t + \varphi)) \quad (9)$$

با استفاده از روش استفاده شده در [۳]، معادلات دامنه و فاز اندیس مدولاسیون خروجی برای تابع تبدیل پمپ-سیگنال به صورت زیر خواهد بود:

$$\tan \theta_P = -\frac{\omega}{\omega_{eff}} \quad (10)$$

$$m'_P = \frac{m_P B_S [P_P^0(0) - P_P^0(L)]}{\sqrt{\omega^2 + \omega_{eff}^2}}$$

که در آن ω_{eff} از رابطه (۱۱) بدست می‌آید:

$$\omega_{eff} = P_S^0(L) + P_P^0(L) + \frac{1}{\tau} + 2n_{sp} \Delta u G B_S - 2\Delta u \frac{\beta_S}{\rho A} \quad (11)$$

همچنین برای تابع تبدیل سیگنال-سیگنال داریم:

$$m'_S = \frac{m_S \sqrt{\omega^2 + (\omega_{eff} + K)^2}}{\sqrt{\omega^2 + \omega_{eff}^2}} \quad (12)$$

$$K = B_S [P_S^0(0) - P_S^0(L)]$$

$$\tan \theta_S = -\frac{\omega}{\omega_{eff} + \frac{\omega^2}{K}}$$

معادلات (۱۰) و (۱۲) دامنه و فاز اندیس مدولاسیون سیگنال خروجی را برای نوسان سینوسی جزئی در توان متوسط پمپ و سیگنال ورودی مشخص می‌کند.

۵- نتایج شبیه سازی

در این قسمت ما به مقایسه نتایج دو شبیه سازی مختلف می‌پردازیم. که در اولی از اثر ASE صرف نظر شده است، ولی در دومی برای نخستین بار ASE وارد شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی به صورت پاسخ اندیس مدولاسیون خروجی به اورمدولاسیون پمپ و سیگنال ورودی است. طول موج پمپینگ ۹۸۰nm در نظر گرفته شده است. یکی از مهم ترین پارامترهای یک EDFA میزان جذب و گسیل در واحد طول است، که به ترتیب با α و β نمایش داده می‌شود. که مقدار آنها $\alpha_P = \Gamma_P \sigma_{13} \rho$ ، $\alpha_S = \Gamma_S \sigma_{12} \rho$ و $\beta_S = \Gamma_S \sigma_{21} \rho$ است. توان متوسط سیگنال ورودی ۵۷/۸ mW و اندیس مدولاسیون ورودی برای پمپ و سیگنال ۵٪ در نظر گرفته شده است. سایر مقادیر در جدول (۱) آورده شده است.

$$\frac{P_P(L,t)}{P_P(0,t)} = \exp\{B_P N_2 - C_P\} \quad (5)$$

$$\frac{P_S(L,t)}{P_S(0,t)} = \exp\{B_S N_2 - C_S\}$$

که در آن B و C از معادله (۶) و به صورت زیر بدست می‌آید:

$$B_P = \Gamma_S \frac{\sigma_{13}}{A}, B_S = \Gamma_S \frac{\sigma_{12} + \sigma_{21}}{A} \quad (6)$$

$$C_P = \Gamma_P \sigma_{13} \rho L, C_S = \Gamma_S \sigma_{12} \rho L$$

با جاگذاری رابطه (۵) در (۴)، به معادله زیر خواهیم رسید:

$$\frac{\partial}{\partial t} N_2 = P_S(0,t) \left[1 - \exp(B_S N_2 - C_S) \right] + P_P^+(0,t) \left[1 - \exp(B_P N_2 - C_P) \right] - \frac{N_2}{\tau} - 2h\nu_s n_{sp} \Delta u (G-1) + 2h\nu_s \frac{\beta_S}{\rho A} \Delta u N_2. \quad (7)$$

معادله (۷) یک معادله کلیدی برای بررسی آثار دینامیک بهره در EDFAs است [۶]. در معادله (۷)، G بهره تقویت کننده، β_S میزان گسیل در واحد طول، Δu و ν متناظر با طول موج هستند که توان ASE حول آن شکل می‌گیرد. h ثابت پلانک و n_{sp} فاکتور جمعیت معکوس است که بدون واحد است [۷]. در یک EDFA، هنگامی که پمپینگ در طول موج ۹۸۰ nm باشد، جمعیت معکوس به طور کامل می‌تواند شکل بگیرد. که در این حالت $\beta p = 0$ و $n_{sp} = 1$ خواهد بود.

۴- اورمدولاسیون سیگنال و پمپ

برای بررسی اثر مدولاسیون، ما یک آشفتگی سینوسی در معادلات پمپ و سیگنال ایجاد می‌کنیم. اکنون اورمدولاسیون را به صورت یک تغییر سینوسی وابسته به زمان در توان پمپ و سیگنال [۳] و به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

$$P_{P,S}(0,t) = P_{P,S}^0(0)(1 + m_{P,S} \cos \omega t) \quad (8)$$

که در آن ρ نمایانگر توان متوسط سیگنال یا پمپ در ورودی تقویت کننده ($z=0$) و $m_{P,S}$ اندیس مدولاسیون ورودی است. فرکانس اورمدولاسیون (~KHz) در مقایسه با نرخ دیتا (~Gb/s) کوچک در نظر گرفته می‌شود. پس می‌توان آن را به صورت یک مدولاسیون آنالوگ اعمال شده بر توان متوسط در نظر گرفت. پس می‌توان اورمدولاسیون EDFAs را با حل معادله (۷) و با در نظر گرفتن ورودی‌های وابسته به زمان به فرم رابطه (۸) بررسی کرد. در ادامه $N_2(t)$ را به صورت تغییرات سینوسی حول مقدار متوسط (مدوله نشده) N_2^0 ، که خود از حل حالت ماندگار بدست می‌آید، و به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

جدول ۱- مقادیر آزمایش برای شبیه‌سازی

| | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| $\tau = 10.5ms$ | $\alpha p = 3.31dB / m$ |
| $L = 10.5m$ | $\alpha s = 4.19dB / m$ |
| $r = 1.2 \times 10^{-6} m$ | $\beta s = 4.04dB / m$ |
| $\Delta\nu = 3100GHz(25nm)$ | $\rho = 6.3 \times 10^{24} m^{-3}$ |

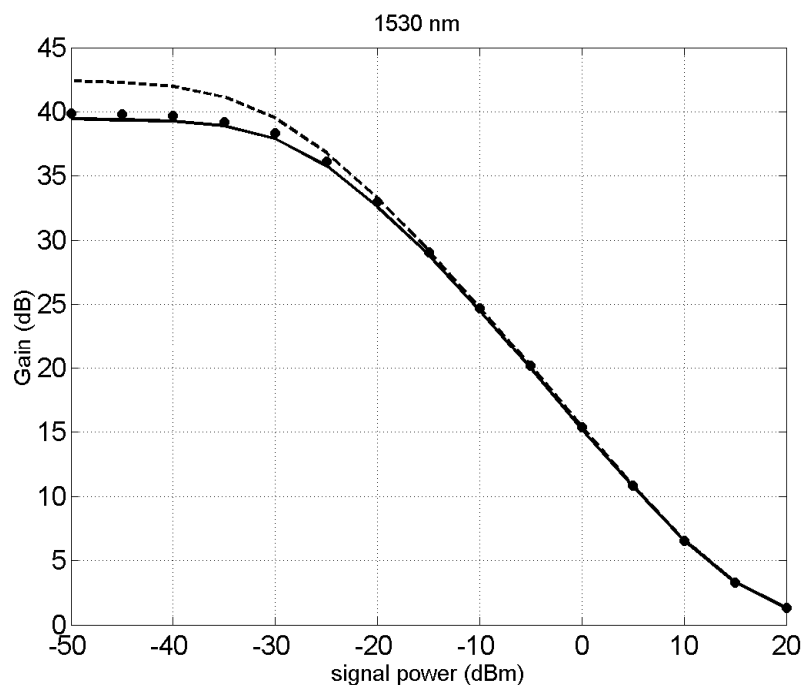
در جدول (۱)، r شعاع مؤثر هسته فیبر نوری و τ نرخ گسیل خودبخودی است. پهنای باند نویز هم برابر با $3100GHz$ در نظر گرفته شده است که معادل با طول موج $25nm$ با طول موج مرکزی $1530nm$ است. همچنین برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

۵-۱- تأثیر ASE و عمق اشباع بر روی اندیس مدولاسیون خروجی

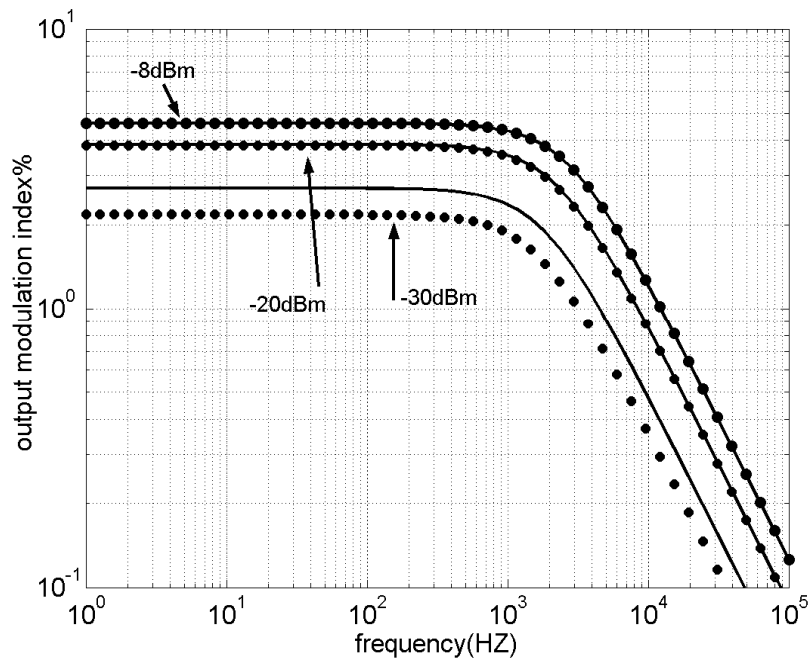
سطح فشردگی (compression level) به صورت تفاوت بین بهره سیگنال کوچک و بهره در چند سطح مشخص از توان سیگنال ورودی، تعریف می‌شود [۳]. در شکل ۱ منحنی بهره در مقابل تغییرات توان سیگنال ورودی به EDFA در طول موج $1530nm$ رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، در سطوح فشردگی بالا، در نظر گرفتن یا نگرفتن ASE تأثیری در نتایج نداشته است. اما در سطوح پایین، در نظر نگرفتن ASE در

شبیه‌سازی (منحنی خط چین)، باعث کاهش $2dB$ در نتایج می‌شود. اما در نظر گرفتن ASE (منحنی ساده)، باعث شده است تا نتایج با منحنی بدست آمده از نرم‌افزار OASIX (منحنی نقطه‌ای) [۳]، برابری کند. در بخش دیگری از شبیه‌سازی، به بررسی ۳ سطح توان متوسط سیگنال ورودی، بر اندیس مدولاسیون خروجی، در طول موج $1530nm$ پرداخته‌ایم. این ۳ سطح به ترتیب -20 ، -30 و -40 دسی بل (با سطوح فشردگی 1 ، 6 و 16 دسی بل) هستند. دامنه پاسخ فرکانسی اندیس مدولاسیون خروجی به اورمدولاسیون پمپ در شکل ۲ و فاز آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴ و ۵، این مقادیر به‌ازای اورمدولاسیون سیگنال ورودی، رسم شده است

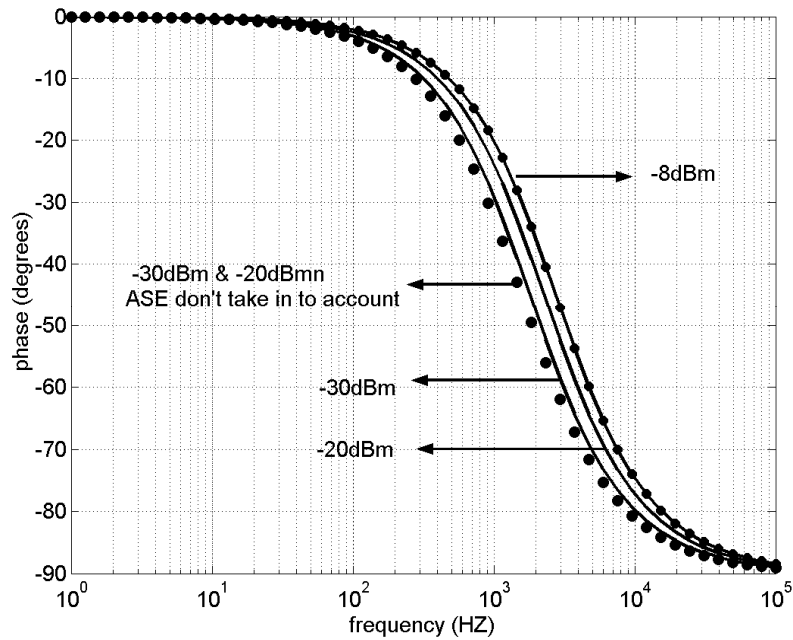
همان‌طور که در شکل‌های ۲ تا ۵، دیده می‌شود، اگر سطح متوسط توان سیگنال ورودی کم باشد (سطح فشردگی پایین)، برای مثال $-30dBm$ ، ASE باعث افزایش دامنه اندیس مدولاسیون خروجی، و کاهش فاز آن شده است. در حالی که اگر سطح متوسط توان سیگنال ورودی افزایش یابد (سطح فشردگی بالا باشد)، برای مثال $-4dBm$ ، در نظر گرفتن یا نگرفتن ASE تأثیری بر نتیجه نهایی نخواهد داشت.



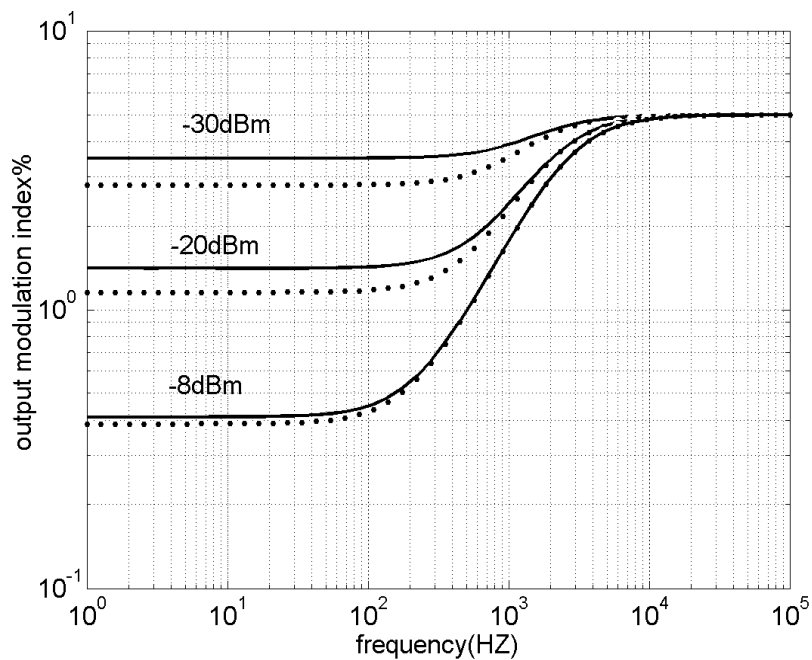
شکل ۱- منحنی بهره تقویت‌کننده به‌ازای تغییر در سطح متوسط توان سیگنال ورودی. منحنی خط چین، ساده و نقطه‌ای به ترتیب مربوط به حالت چشم‌پوشی از ASE، در نظر گرفتن ASE و نتایج به‌دست‌آمده از OASIX [۳]، می‌باشد.



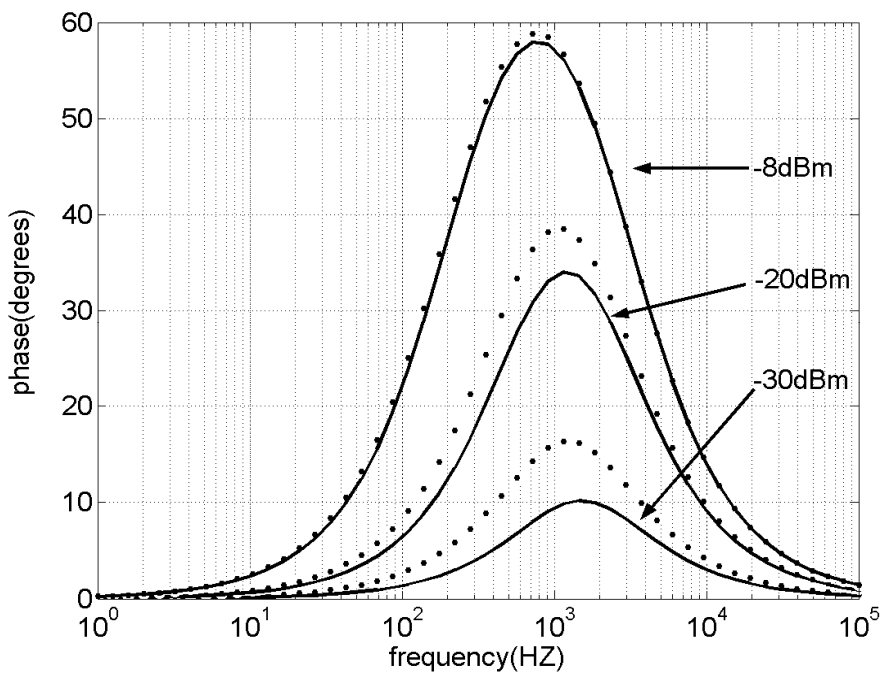
شکل ۲- حساسیت دامنه اندیس مدولاسیون خروجی به اورمدولاسیون پمپ، به ازای ۳ سطح مختلف از سیگنال ورودی.



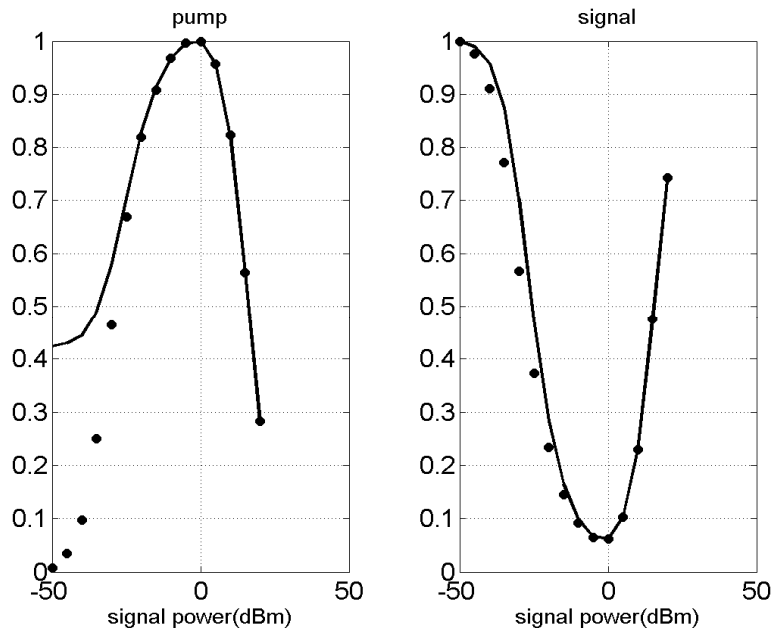
شکل ۳- حساسیت فاز اندیس مدولاسیون خروجی به اورمدولاسیون پمپ، به ازای ۳ سطح مختلف از سیگنال ورودی.



شکل ۴- حساسیت دامنه اندیس مدولاسیون خروجی به اورمدولاسیون سیگنال، به ازای ۳ سطح مختلف از سیگنال ورودی.



شکل ۵- حساسیت فاز اندیس مدولاسیون خروجی به اورمدولاسیون سیگنال، به ازای ۳ سطح مختلف از سیگنال ورودی.

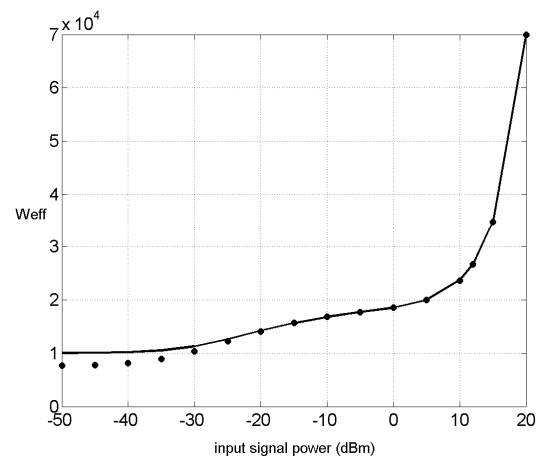


شکل ۶- مقدار نرمالیزه شده دامنه اندیس مدولاسیون خروجی به ازای اورمدولاسیون پمپ (شکل - الف) و اورمدولاسیون سیگنال (شکل - ب).

ورودی، ASE باعث افزایش در مقدار نرمالیزه خروجی تا حد ۰.۴ می‌شود. که این افزایش در شکل ۶-ب، تا این اندازه محسوس نیست. اما در هر ۲ منحنی شکل ۶، با افزایش سطح متوسط سیگنال ورودی، هر ۲ منحنی (نقطه‌ای و ساده) بر روی هم منطبق می‌شود. آخرین نکته‌ای که از شکل ۶، بدست می‌آید، رخ دادن نقاط عطف هر ۲ منحنی الف و ب، به‌ازای یک ورودی یکسان است. که این پدیده بیانگر معکوس بودن سیر تغییرات ۲ منحنی است. در شکل پایانی صفحه قبل، (شکل ۷)، نمودار تغییرات فرکانس گوشه ω_{eff} ، معادله (۱۱)، برحسب تغییر در سیگنال ورودی رسم شده است [۸]. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، ASE باعث افزایش در مقدار فرکانس گوشه در سطوح پایین توان سیگنال ورودی می‌شود. ولی با افزایش سطح فشردگی بهره، تأثیر ASE نا چیز می‌شود. نکته دیگر که از شکل ۷ بدست می‌آید این است که به‌طور کلی با افزایش سیگنال ورودی، در هر دو حالت، فرکانس گوشه روندی افزایشی خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا یک مدل تحلیلی برای بررسی تأثیر گسیل خودبخودی تقویت‌شده (ASE) بر اورمدولاسیون پمپ و سیگنال ورودی در تقویت‌کننده‌های فیبر نوری با آلایش اربیموم (EDFAs) بر اساس تکمیل مدل‌های قبلی [۳] و [۴]، ارائه شده است. در مدل



شکل ۷- منحنی تغییرات فرکانس گوشه (ω_{eff}) برحسب تغییر در میزان توان متوسط سیگنال ورودی.

در ادامه شبیه‌سازی برای بررسی دقیق‌تر تأثیر ASE بر فشردگی بهره، منحنی‌های دامنه اندیس مدولاسیون خروجی را در فرکانس $\omega=0$ ، رسم می‌کنیم. که این نمودارها در شکل ۶، و به‌صورت اندیس مدولاسیون خروجی، برای اورمدولاسیون پمپ و سیگنال، برحسب توان متوسط سیگنال ورودی رسم شده است. در این شکل مقادیر دامنه اندیس مدولاسیون خروجی به بیشینه مقدار خود نرمالیزه شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۶- الف، دیده می‌شود، به‌ازای مقادیر کوچک

ارائه شده در این مقاله به علت این که اثر ASE در نظر گرفته شده است، لذا هم در سطوح پایین فشردگی بهره و هم بالا، با OASIX مطابقت کامل دارد. در حالی که در آخرین مدل ارائه شده [۳]، در سطوح پایین سیگنال ورودی این مطابقت بدست نیامده است. همچنین مشخص شد که ASE در مقادیر کمتر توان متوسط سیگنال ورودی، باعث افزایش دامنه اندیس مدولاسیون خروجی در هر دو حالت اورمدولاسیون پمپ و سیگنال ورودی و کاهش فاز اندیس مدولاسیون خروجی می‌گردد. اما در سطوح بالای فشردگی بهره (به‌زای مقادیر بالای سیگنال ورودی) ASE تأثیر چندانی بر اندیس مدولاسیون خروجی نخواهد داشت.

۷- مراجع

- [1] M. Murakami, T. Imai, and M. Aoyama; "A remote supervisory system based on subcarrier overmodulation for submarine optical amplifiers systems", *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 671-677, May 1996.
- [2] Agrawal, G. P, *Fiber-Optic Communication Systems* 3rd Ed, John Wiley, Sydney, 2002.
- [3] S. Novak and A. Moesle; "Analytic model for gain modulation in EDFAs", *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, pp. 975-985, June 2002.
- [4] C. Giles, and Emmanuel Desurvire; "Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, No. 2, FEBRUARY 1991.
- [5] A. Bononi and L. A. Rusch; "Doped-fiber amplifier dynamics: A system perspective", *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, pp. 945-956, May 1998.
- [6] M. M. Karkhanechi and H. Sariri; "Effect of ASE on the Gain Modulation in EDFAs", *International Conference on Transparent Optical Network, (ICTON-MW'07)*, 978-1-4244-1639-4/07/25.00 ©2007 IEEE.
- [7] P. C. Becker, N.A. Olsson, and J.R. Simpson; **Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology**. San Diego: Academic Press, 1999.
- [8] J. Freeman and J. Conradi; "Gain modulation response of erbium-doped fiber amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 224-226, Feb. 1993.