



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## شبیه‌سازی ترکیب چهارموج معکوس در تارهای نوری و تأثیر پارامترهای مختلف بر طیف بهره‌ی سیگنال خروجی

حسن پاکارزاده، شمیم تorkian، محمدجواد کریمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

[pakarzadeh@sutech.ac.ir](mailto:pakarzadeh@sutech.ac.ir)

چکیده - در این مقاله، یک اثر خودکنشی غیرخطی جدید به نام تقویت خود پارامتری شبیه‌سازی می‌شود که خود را به صورت باریک شدن طیف نوری در تار با پاشندگی عادی نشان می‌دهد و منجر به انتشار بسیار پایدار با توزیع طیفی مشخص می‌شود. نتایج حاصل از باریک شدن به علت ترکیب چهارموج معکوس، شبیه به تقویت پارامتری مؤثر بخش مرکزی طیف با توزیع مجدد انرژی از کناره‌های طیف است. ما با استفاده از حل تحلیلی، فرآیند ترکیب چهارموج معکوس را شبیه‌سازی و تأثیر عوامل مختلف مانند طول تار، پهنای طیفی اولیه و توان ورودی را بر طیف بهره‌ی سیگنال خروجی بررسی می‌کنیم.

کلیدواژه- اثر خودکنشی، تارنوری، ترکیب چهارموج معکوس، تقویت خودپارامتری.

## Simulation of inverse four-wave mixing in optical fibers and impact of different parameters on the output signal gain spectrum

H. Pakarzadeh, S. Torkian, M. J. Karimi

Department of physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

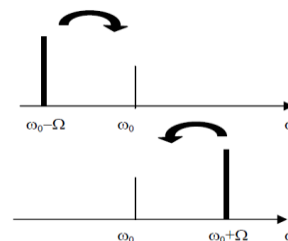
Abstract- In this paper, a new nonlinear self-action effect called self-parametric amplification is simulated which manifests itself as an optical spectrum narrowing in normal dispersion fiber and leading to a very stable propagation with a distinctive spectral distribution. The narrowing results from inverse four-wave mixing resembling an effective parametric amplification of the central part of the spectrum by energy transfer from the spectral tails. Using an analytical solution, we simulate the inverse four-wave mixing process and examine the impact of different parameters such as fiber length, the initial spectrum width and input power on the output signal gain spectrum.

Keywords: Self-action effect, optical fiber, inverse four-wave mixing, self-parametric amplification.

## مقدمه

ترکیب چهارموج یا ترکیب چهار فوتون یک فرآیند غیرخطی است که از اثر غیرخطی مرتبه سوم ناشی می‌شود. منشأ ترکیب چهارموج مربوط به پاسخ غیرخطی الکترون‌های مقید ماده به میدان الکترومغناطیسی است [۱]. یک نوع شناخته‌شده از ترکیب امواج پارامتری در اپتیک خطی به صورت معادله‌ی ترکیب دو فوتون از فرکانس مرکزی پمپ در فرکانس  $(\omega_0 + \Omega) + (\omega_0 - \Omega) \rightarrow 2\omega_0$  خواهد بود. این برهم‌کنش حاصل ترکیب دو فوتون از فرکانس مرکزی پمپ در فرکانس  $\omega_0$  با جفت امواج به بالا تبدیل‌شده (آنتی استوکس) و به پایین تبدیل‌شده (استوکس) با فرکانس‌های  $(\omega_0 + \Omega)$  و  $(\omega_0 - \Omega)$  است. ترکیب چهارموج زمانی به وجود می‌آید که چهارموج برهم‌کنش‌کننده شرایط جور شدگی فاز را ارضا کنند به صورتی که روند تبادل انرژی بین امواج در طول انتشار در محیط غیرخطی را تضمین کند. اگرچه، روند ترکیب چهارموج تبهگن است. یعنی، دو فوتون پمپ یکسان نابود می‌شوند و یک جفت فوتون به بالا تبدیل‌شده (آنتی استوکس) و به پایین تبدیل‌شده (استوکس) را تولید می‌کنند. انتقال انرژی یک‌جانبه این سؤال را ایجاد می‌کند که آیا روند معکوس ترکیب چهارموج معمول در محیط غیرخطی امکان‌پذیر است؟ همان‌طور که در شکل (۱) مشخص شده است، روند معکوس باید تبهگن باشد و روابط انتقال انرژی را مانند معادله‌ی (۱) ارضا کند [۲].

$$(\omega_0 + \Omega) + (\omega_0 - \Omega) \rightarrow 2\omega_0 \quad (1)$$



شکل ۱: طرحواره‌ای از فرآیند ترکیب چهارموج معکوس. [۲]

در این مقاله، با استفاده از حل تحلیلی، فرآیند ترکیب چهارموج معکوس را شبیه‌سازی و تأثیر عوامل مختلف مانند طول تار، پهنای طیفی اولیه و توان ورودی را بر طیف بهره‌ی سیگنال خروجی بررسی می‌کنیم.

## مبانی نظری و نتایج شبیه‌سازی

ترکیب چهارموج معکوس در تارهای نوری با پاشندگی عادی تحت شرایط خاصی رخ می‌دهد. برای شبیه‌سازی این فرآیند لیزر ورودی را لیزر تار رامان در نظر می‌گیریم که خروجی این لیزر یک طیف دو قله‌ای بافاصله‌ی  $0.2 - 1$  نانومتر است. این نور لیزر باید از طول مشخصی از تار با پاشندگی عادی عبور کند تا فرآیند IFWM رخ دهد. آزمایش تجربی نشان‌دهنده‌ی این فرآیند در منبع [۳] به صورت کامل شرح داده شده است. برای مشاهده‌ی این فرآیند در تار نوری به کمک شبیه‌سازی از دوتار مختلف<sup>۱</sup> LEAF با ناحیه‌ی پاشندگی عادی و  $28^2$ -SMF با ناحیه‌ی پاشندگی غیرعادی استفاده می‌کنیم. با استفاده از حل تحلیلی نتیجه می‌گیریم که خروجی لیزر رامان (با طیف دو قله‌ای) وقتی به تار LEAF می‌رسد، شبیه تقویت‌کننده‌های پارامتری نوری دو پمپ<sup>۳</sup> OPA عمل می‌کند که با دو پمپ از لحاظ طیفی جدا شده‌اند؛ اما در این مورد "پمپ‌ها" و "سیگنال‌ها"ی متفاوت وجود ندارد در عوض، میدان ورودی خود را با توزیع مجدد انرژی از طول‌موج‌های محیطی (پمپ) به ناحیه‌ی مرکزی (سیگنال) منتشر می‌کند. این پمپ‌های مؤثر با فرکانس‌های  $\omega_1$  و  $\omega_2$  در ورودی تار در نظر گرفته می‌شوند. چنین پمپ‌های مؤثری سیگنال و آیدلر را با فرکانس‌های  $\omega_3$  و  $\omega_4$  تقویت خواهند کرد. به صورتی که  $\omega_2 > \omega_1$  و  $\omega_4 > \omega_3$  در نظر گرفته شده است. در این تحلیل کیفی، ابتدا مورد پمپ تخلیه نشده در نظر گرفته می‌شود به صورتی که سیگنال و آیدلر در مقایسه با پمپ‌ها بسیار کوچک هستند  $P_3 \ll P_1 + P_2 = P_0$ . بهره‌ی غیراشباع عبور سیگنال برای سیگنال  $G_3$ ، به صورت زیر نوشته می‌شود:

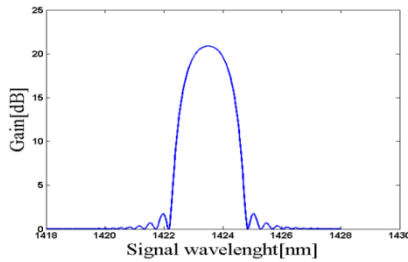
$$G_3 = \frac{P_3(L)}{P_3(0)} = 1 + \left[ \frac{\gamma P_0}{g} \sinh(gL) \right]^2 \quad (2)$$

<sup>1</sup> Large effective area fiber

<sup>2</sup> Single mode fiber

<sup>3</sup> Optical parametric amplifier

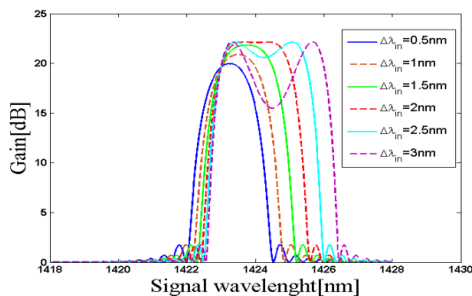
$\beta_2$	$4.3 ps^2 km^{-1}$	ثابت پاشندگی مرتبه دوم
$\alpha$	$0.25 dB / km$	افت تار
$\gamma$	$2.16 [W.km]^{-1}$	ضریب غیرخطی
$\lambda_1$	$1423 nm$	طول موج ورودی
$\lambda_2$	$1424 nm$	طول موج ورودی



شکل ۲: نمایی از طیف بهره پس از انتشار در طول ۱۰۰۰ متر از تار LEAF.

#### الف) تأثیر پهنای طیف ورودی بر طیف بهره

با بررسی پهنای طیف ورودی در شکل ۳، می‌توان دریافت که اگر پهنای طیف اولیه کمتر از ۲ نانومتر باشد، باریک شدن طیف نهایی یعنی اثر ترکیب چهارموج معکوس، رخ می‌دهد. درحالی‌که با افزایش پهنای طیف اولیه، بیش از ۲ نانومتر، پهن شدن طیفی یعنی اثر ترکیب چهارموج معمول خواهیم داشت. این اثر هم در محیط‌های با افت و هم در محیط‌های بدون افت قابل مشاهده است.



شکل ۳: تغییرات طیف بهره در اثر تغییر پهنای طیف ورودی در بازه‌ی طول‌موج‌های مختلف سیگنال به ازای طول ۱۰۰۰ متر.

$$P_0 = 1.5 W \text{ و } \beta_2 = 4.3 ps^2 km^{-1}, \lambda_1 = 1423 nm, \lambda_2 = 1424 nm$$

#### ب) تأثیر توان ورودی بر طیف بهره

طبق معادله‌ی (۲) توان ورودی که برابر با مجموع توان‌های امواج پمپ  $P_0 = P_1 + P_2$  است با بهره‌ی سیگنال ارتباط

بهره‌ی آیدلر به صورت  $G_4 = G_3 - 1$  و  $g$  ضریب بهره‌ی پارامتری نامیده می‌شود که با استفاده از معادله‌ی  $g^2 = r^2 - \left(\frac{k}{2}\right)^2$  محاسبه می‌گردد. در این معادله  $r = \gamma P_0$  و  $\gamma$  ضریب غیرخطی است. هنگامی که  $k = \Delta\beta_1 + \Delta\beta_{NL} = 0$  باشد، ضریب بهره به بیشینه مقدار خود می‌رسد.  $k$  ثابت انتشار کل و

$\Delta\beta = \beta(\omega_3) + \beta(\omega_4) - \beta(\omega_1) - \beta(\omega_2)$  عدم جورشدگی ثابت انتشار،  $\Delta\beta_{NL} = \gamma P_0$  بخش غیرخطی بردار موج عدم جور شدگی،  $\Delta\omega_p = \omega_1 - \omega_c = \omega_c - \omega_2$  و  $\Delta\omega_s = \omega_3 - \omega_c$  تعریف می‌شوند. برای فهم اثر پاشندگی، می‌توان ثابت انتشار عدم جور شدگی را در سری توانی استاندارد به لحاظ  $\Delta\omega_s$  و  $\Delta\omega_p$  طبق معادله‌ی (۳) بسط داد:

$$\Delta\beta = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{\beta_{2m}}{(2m)} \right) \left[ (\Delta\omega_s)^{2m} - (\Delta\omega_p)^{2m} \right] \quad (3)$$

$\beta_{2m}$  مشتقات زوج از  $\beta$  در فرکانس مرکزی  $\omega_c$  است. با توجه به اینکه  $\beta_4 \ll \beta_2$  است، داریم:

$$\Delta\beta \approx \beta_2 \left[ (\Delta\omega_s)^2 - (\Delta\omega_p)^2 \right] \quad (4)$$

بنابراین شکل طیف بهره و مکان بیشینه‌ی بهره در ناحیه‌ی طیفی با استفاده از شرایط جور شدگی فاز به دقت می‌آید:  $[3] - [6]$ :

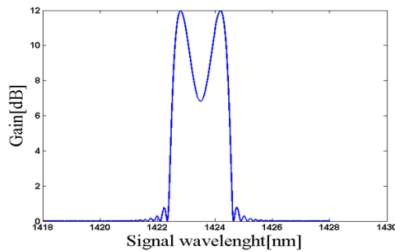
$$k = 0 \Rightarrow \left[ (\Delta\omega_s)^2 - (\Delta\omega_p)^2 \right] = \frac{-\gamma P_0}{\beta_2} \quad (5)$$

با استفاده از پارامترهای جدول ۱، شکل ۲ طیف بهره‌ی خروجی به ازای طول‌موج‌های ورودی به LEAF که در ناحیه‌ی پاشندگی عادی قرار دارد را نشان می‌دهد. در این حالت اثر ترکیب چهارموج معکوس رخ می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی طیف بهره تار LEAF [۳].

پارامتر	مقدار	ثابت‌ها
طول تار	$1 km$	$L$
طول موج پاشندگی صفر	$1490 nm$	$\lambda_0$
توان‌های ورودی	$0.75 W$	$P_1, P_2$

شکل ۶ نشان داده شده است پهنای طیف خروجی تحت فرآیند FWM افزایش می‌یابد و بهره‌ی طیف نهایی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل ۶: طیف پس از انتشار سیگنال در طول تار SMF-28.

$$L = 1000m, \beta_2 = -10.18 ps^2 km^{-1}, \gamma = 1.37 [W.km]^{-1}$$

$$P_0 = 1.5W$$

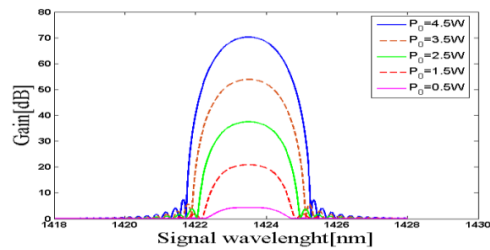
### نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیند IFWM با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر آن شبیه‌سازی شد و تاثیر عوامل مختلف بر طیف بهره خروجی بررسی گردید. می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند IFWM طیف نوری را باریک خواهد کرد و جفت فوتون‌های سیگنال و آیدلر را با فرکانس‌هایی در مرکز دو پمپ ورودی تولید می‌کند. فرآیند IFWM فقط زمانی ایجاد می‌شود که پهنای طیف ورودی کمتر از  $1/5$  نانومتر باشد. هم‌چنین افزایش طول تار نوری و توان ورودی باعث افزایش بهره‌ی طیف خروجی می‌گردد.

### مراجع

- [1] R. H. Stolen, "The early years of fiber nonlinear optics," J. Lightw. Technol., Vol. 26, PP. 1021-1031, 2008.
- [2] T. Sylvestre, "Parametric frequency fusion by inverse four-wave mixing," Opt. Commun., Vol. 33, PP. 3-7, 2016.
- [3] S. K. Turitsyn, A. E. Bednyakova, M. P. Fedoruk, S. B. Papernyi, and W. R. L. Clements, "Inverse four-wave mixing and self-parametric amplification in optical fibre," Nat. Photonics, Vol. 9, PP. 608-614, 2015.
- [4] S. Papernyi, V. Ivanov, and W. Clements, "Role of correlated photon pairs in the spectrum compression in optical fibers with normal dispersion," in 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, PP. 1-2, 2017.
- [5] G.-P. Agrawal, Nonlinear fiber optics, San Diego, Calif., PP. 397-406, 2013.
- [6] J. Toulouse, "Optical nonlinearities in fibers: review, recent examples, systems applications," J. Lightw. Technol., Vol. 23, PP. 3625-3641, 2005.

مستقیم دارد؛ بنابراین با ثابت در نظر گرفتن سایر عوامل و تغییر مقدار توان اولیه از  $0.5$  تا  $4/5$  وات، همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش مقدار توان ورودی، بهره‌ی سیگنال افزایش می‌یابد و به ازای توان  $4/5$  وات در این محدوده، به بیشینه مقدار بهره‌ی بیش از  $70$  دسی‌بل می‌رسد.

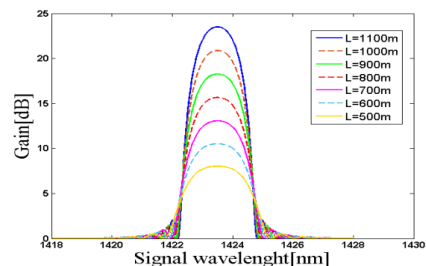


شکل ۴: تغییرات طیف بهره در اثر تغییر توان ورودی در بازه‌ی طول‌موج‌های

مختلف سیگنال به ازای  $\Delta\lambda_s = 1nm$  و  $L = 1km$  و  $P_0 = 1.5W$ .

### ج) اثر طول تار نوری بر طیف بهره تار LEAF

طول تار در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی اصلی برابر با  $1000$  متر است. چنان‌که در شکل ۵ آمده است، با ثابت در نظر گرفتن بقیه‌ی عوامل مؤثر در طیف بهره، طول تار را از  $500$  تا  $1100$  متر در بازه‌ی طول‌موج‌های سیگنال متفاوت، تغییر می‌دهیم. هر چه طول تار افزایش یابد، بیشینه‌ی بهره نیز بیش‌تر خواهد شد و در تار به طول  $1100$  متر، بهره به بیشینه مقدار خود در این بازه یعنی  $23/97$  دسی‌بل می‌رسد. نتایج به‌دست‌آمده مطابق با معادله‌ی تحلیلی (۲) است که در آن بهره‌ی سیگنال با طول تار ارتباط مستقیم دارد.



شکل ۵: تغییرات طیف بهره در اثر تغییر طول تار نوری به ازای  $\Delta\lambda_s = 1nm$

و  $P_0 = 1.5W$ .

تار نوری SMF-28 با توجه به طول‌موج‌های پمپ  $\lambda_1 = 1423nm$  و  $\lambda_2 = 1424nm$  و  $\lambda_0 = 1310nm$  در ناحیه‌ی پاشندگی غیرعادی قرار می‌گیرد. در نتیجه، همان‌طور که در