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 ترکیان، محمدجواد کریمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

pakarzadeh@sutech.ac.ir

چکیده - در این مقاله، یک اثر خودکنشی غیرخطی جدید به نام تقویت خود پارامتری شبیه‌سازی می‌شود که خود را به‌صورت 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.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

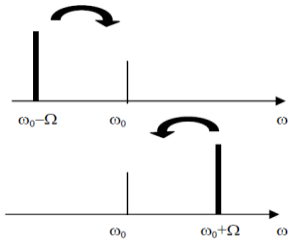
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

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 به‌صورت معادله‌ی $2\omega_0 \to (\omega_0+\Omega)+(\omega_0-\Omega)$ خواهد بود. این برهم‌کنش حاصل ترکیب دو فوتون از فرکانس مرکزی پمپ در فرکانس ω_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 برهم‌کنش کننده 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) مشخص‌شده است، روند معکوس باید تبهگن باشد و روابط انتقال انرژی را مانند معادله‌ی (۱) ارضا کند [۲].

$$(\omega_0+\Omega)+(\omega_0-\Omega)\to 2\omega_0 \qquad (۱)$$



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

دراین 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 ۰/۲ -۱ 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] به‌صورت کامل شرح داده‌شده است. برای مشاهده‌ی این فرآیند در تار نوری به کمک شبیه‌سازی از دوتار مختلف LEAF[1] با ناحیه‌ی پاشندگی عادی و SMF- 28[2] 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 OPA[3] عمل می‌کند که با دو پمپ ازلحاظ طیفی جداشده‌اند؛ 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 ω_1 و ω_2 در ورودی تار در نظر گرفته می‌شوند. چنین پمپ‌های مؤثری سیگنال و آیدلر را با فرکانس‌های ω_3 و ω_4 تقویت خواهند کرد. به صورتی که $\omega_2>\omega_1$ و $\omega_4>\omega_3$ در نظر گرفته‌شده 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 $P_1+P_2=P_0$ و P_3 . بهره‌ی غیراشباع عبور سیگنال برای سیگنال G_3، به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G_3=\frac{P_3(L)}{P_3(0)}=1+\left[\frac{\gamma P_0}{g}\sinh(gL)\right]^2 \qquad (۲)$$

[1] Large effective area fiber
[2] Single mode fiber
[3] Optical parametric amplifier

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

بهره‌ی آیدلر به‌صورت $G_4 = G_3 - 1$ و g ضریب بهره‌ی پارامتری نامیده می‌شود که با استفاده از معادله‌ی $g^2 = r^2 - \left(\frac{k}{2}\right)^2$ محاسبه می گردد. در این معادله $r = \gamma P_0$ و γ ضریب غیرخطی است. هنگامی‌که $k = \Delta\beta_l + \Delta\beta_{Nl} = 0$ باشد، ضریب بهره به بیشینه مقدار خود می‌رسد. k ثابت انتشار کل و $\Delta\beta = \beta(\omega_3) + \beta(\omega_4) - \beta(\omega_1) - \beta(\omega_2)$ عدم‌جورشدگی ثابت انتشار ، $\Delta\beta_{NL} = \gamma P_0$ بخش غیرخطی بردار موج عدم جور شدگی، $\Delta\omega_s = \omega_3 - \omega_c$ و $\Delta\omega_p = \omega_1 - \omega_c = \omega_c - \omega_2$ 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:

$$\Delta\beta = 2\sum_{m=1}^{\infty}\left(\beta_{2m}/(2m)\right)\left[(\Delta\omega_s)^{2m} - (\Delta\omega_p)^{2m}\right] \qquad (۳)$$

β_{2m} مشتقات زوج از β در فرکانس مرکزی ω_c است. با توجه به اینکه β_4 β_2 است، داریم:

$$\Delta\beta \approx \beta_2\left[(\Delta\omega_s)^2 - (\Delta\omega_p)^2\right] \qquad (۴)$$

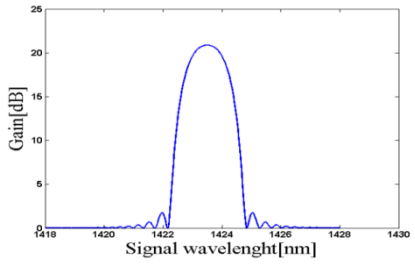
بنابراین شکل طیف بهره و مکان بیشینه‌ی بهره در ناحیه‌ی طیفی با استفاده از شرایط جور شدگی فاز به‌دقت می‌آید [۳]-[۶]:

$$k = 0 \Rightarrow \left[(\Delta\omega_s)^2 - (\Delta\omega_p)^2\right] = \frac{-\gamma P_0}{\beta_2} \qquad (۵)$$

با استفاده از پارامترهای جدول ۱، شکل۲ 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.

جدول۱: پارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی طیف بهره تار LEAF [۳] .

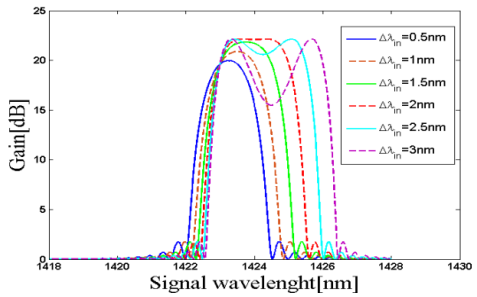
پارامتر	مقدار	ثابت‌ها
طول تار	$1km$	L
طول‌موج پاشندگی صفر	$1490nm$	λ_0
توان‌های ورودی	$0.75W$	p_1, p_2
ثابت پاشندگی مرتبه دوم	$4.3ps^2km^{-1}$	β_2
افت تار	$0.25dB/km$	α
ضریب غیرخطی	$2.16[W.km]^{-1}$	γ
طول‌موج ورودی	$1423nm$	λ_1
طول‌موج ورودی	$1424nm$	λ_2



شکل۲: 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 از۲ نانومتر، پهن‌شدگی طیفی یعنی اثر ترکیب چهارموج معمول خواهیم داشت. این اثر هم در محیط‌های با افت و هم در محیط‌های بدون افت قابل‌مشاهده است.



شکل۳: تغییرات طیف بهره در اثر تغییر پهنای طیف ورودی در بازه‌ی طول‌موج‌های مختلف سیگنال به ازای طول ۱۰۰۰متر.

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

.

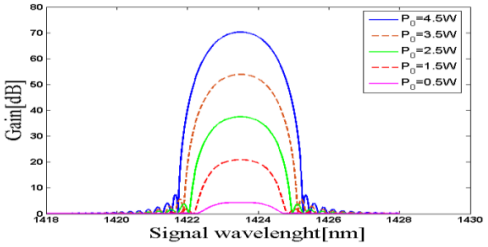
ب) تأثیر توان ورودی بر طیف بهره

طبق معادله‌ی (۲) توان ورودی که برابر با مجموع توان‌های امواج پمپ $p_0 = p_1 + p_2$ است با بهره‌ی سیگنال ارتباط

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

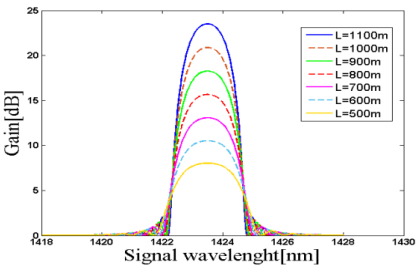
مستقیم دارد ؛ بنابراین با ثابت در نظر گرفتن سایر عوامل و تغییر مقدار توان اولیه از ۰/۵ تا ۴/۵ وات، همان‌طور که در شکل۴ مشاهده می‌شود، به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش مقدار توان ورودی، بهره‌ی سیگنال افزایش می‌یابد و به ازای توان ۴/۵ وات در این محدوده، به بیشینه مقدار بهره‌ی بیش از ۷۰ دسی‌بل می‌رسد.



شکل۴: تغییرات طیف بهره در اثر تغییر توان ورودی در بازه‌ی طول‌موج‌های مختلف سیگنال به ازای $\Delta\lambda_{in} = 1nm$ ، $L = 1km$ و $p_0 = 1.5W$.

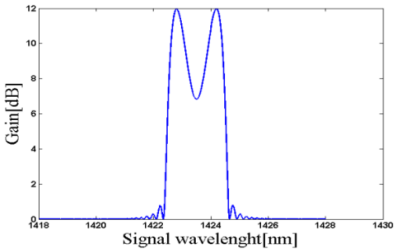
ج) اثر طول تار نوری بر طیف بهره تار LEAF

طول تار در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی اصلی برابر با ۱۰۰۰ متر است. چنان‌که در شکل ۵ آمده است، با ثابت در نظر گرفتن بقیه‌ی عوامل مؤثر در طیف بهره، طول تار را از ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ 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 ۱۱۰۰ متر، بهره به بیشینه مقدار خود در این بازه یعنی ۲۳/۹۷ دسی‌بل می‌رسد. نتایج به‌دست‌آمده مطابق با معادله‌ی تحلیلی (۲) است که در آن بهره‌ی سیگنال با طول تار ارتباط مستقیم دارد.



شکل۵: تغییرات طیف بهره در اثر تغییر طول تار نوری به ازای $\Delta\lambda_{in} = 1nm$ 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. درنتیجه، همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است پهنای طیف خروجی تحت فرآیند FWM افزایش می‌یابد و بهره‌ی طیف نهایی به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.



شکل۶: طیف پس از انتشار سیگنال در طول تار SMF-28، $L = 1000m$ ، $\beta_2 = -10.18\,ps^2\,km^{-1}$ ، $\gamma = 1.37\,[W.km]^{-1}$ و $P_0 = 1.5W$.

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 ۱/۵ 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.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]