

مقدمه :

مطالعات انتشار نور در محیط هایی با سرعت گروه کاهش یافته به قرن نوزدهم بر می گردد که لورنتس و همکارانش بر روی تئوری کلاسیکی پاشندگی امواج الکترو مغناطیسی کار می کردند. در سال 1940 انتشار موج کند ($v_g < c$) مشاهده شد و بصورت گسترده در میکروویو بکار گرفته شد [1]. سامرفیلد و بریلون تئوری انتشار نور در محیط هایی با پاشندگی غیرعادی را بیان کردند. سرانجام در سال 1999 نور کند با سرعت گروه 10m/s به روش EIT تولید شد. دیری نپایید که دانشمندان توانستند نور را متوقف و ذخیره کرده، سپس مجددا انتشار دهند [2]. پدیده کنترل سرعت نور به علت پتانسیل کاربردی بالای آن، هنوز هم یک موضوع جالب است که بسیاری از دانشمندان در حال تحقیق در این حوزه می باشند.

در دهه های اخیر مخابرات نوری بطور چشمگیری پیشرفت نموده است. با اختراع EDFA و سیستم های WDM، ظرفیت انتقال داده به 40Gbit/sec رسیده است که ترافیک زیادی در اتصالات بوجود می آورد. همچنین تقاضای روز افزون پهنای باند از طرف سرویس های اینترنت، استفاده از شبکه های تمام نوری را ضروری می سازد، زیرا ادوات الکترونیکی قابلیت ارتقاء برای فراهم نمودن چنین نرخ انتقال داده ای را ندارند. لذا بایستی سوئیچ ها و روترها نوری باشند تا از تبدیلات فوتون به الکترون و بر عکس که سرعت را کاهش داده و تلف را افزایش می دهند و در نتیجه محدودیت در مقدار پهنای باند به وجود می آورند، جلوگیری شود. به علاوه شبکه های تمام نوری به طور قابل ملاحظه ای مصرف انرژی را کاهش می دهند. اگر پردازش سیگنال به صورت نوری انجام شود مشکلی در ایجاد شبکه های تمام نوری نخواهیم داشت. از آنجایی که نور با سرعت بالایی که دارد، قابل پردازش نیست، باید برای دستیابی به اهداف ذکر شده، سرعت نور را کاهش داد و به اصطلاح نور کند تولید نمود.

در این پایان نامه به شبیه سازی نور کند و تأخیرات حاصل از آن می پردازیم. بدین منظور از روش پراکندگی بریلون القایی استفاده می کنیم که یکی از روش های تولید نور کند سازگار با شبکه های

مخابراتی فعلی است. قابل ذکر است کاهش سرعتی که با این روش بوجود می آید نسبت به برخی روش های دیگر کوچکتر است اما بعلت مزایای آن، امروزه بیش از سایر روش ها مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل اول این پایان نامه نور کند معرفی شده و روش های تولید و کاربرد های آن بررسی می شود. سپس در فصل دوم اساس روش پراکندگی بریلوئن القایی بیان می شود. برای استفاده از چنین نوری در سیستم های مخابراتی به بهینه سازی سیستم تولید نور کند نیاز است که در فصل سوم این روش های بهینه سازی بیان می شوند.

نور کند دارای کاربردهای فراوانی است که مهمترین آن استفاده از خطوط تأخیر نور کند در ایجاد بافرهای تمام نوری است. این بافرها دستیابی به شبکه های تمام نوری را ممکن می سازد. لذا در ادامه کاربردهای نور کند و بطور خاص بافر نور کند توضیح داده خواهد شد.

مقدمه ای بر نرم افزارهای استفاده شده در این پایان نامه به همراه توضیح چگونگی ارتباط آنها با یکدیگر در فصل 5 آمده است. در پایان، در فصل 6 نتایج بدست آمده از شبیه سازی نور کند بررسی شده است. در این شبیه سازی پالس گاؤسین نوری با پهنای $30ns$ با سیستم تولید نور کند طبیعی با توان پمپ $8mw$ و طول فیبر $10km$ به میزان $30ns$ با فاکتور پهن شدگی برابر با 1.767 و $\Delta T_{frac} = 1$ تأخیر یافته است. این پالس در سیستم تولید نور کند بهبود یافته با روش برهم نهی بهره پهن باند با دو تلف طبیعی، با همین توان پمپ و طول فیبر بدون هیچگونه تخریبی به میزان $64ns$ تأخیر یافته است. این میزان تأخیر معادل ظرفیت ذخیره سازی 2.133 برای بافر یا همان $\Delta T_{frac} = 2.133$ و فاکتور پهن شدگی برابر با 1.005 می باشد. بافر طراحی شده تا نرخ بیت $100MHz$ قادر به حفظ شکل داده در خروجی می باشد.

فصل اول: نور کند

نور کند به کاهش سرعت انتشار نور در محیط هایی که پاشندگی مواد و پاشندگی موجبر آن ها به طور مناسبی طراحی شده است، اشاره دارد. این پاشندگی های مصنوعی باعث تغییر بزرگ در سرعت گروه نور به ازای تغییر کوچکی در فرکانس نور می شود لذا مؤلفه های فرکانسی مختلف پالس با سرعت های مختلفی حرکت خواهند کرد که باعث تأخیر در پالس می شود. این تأخیر که تولید آن یکی از اهداف نور کند است بوسیله برخی متریک ها قابل ارزیابی است.

در این فصل نور کند معرفی می شود و متریک های رایج در این حوزه و روش های تولید آن بیان می گردد [3].

1-1 اصول نور کند

1-1-1 سرعت نور

فوتون ها در محیط مادی، می توانند توسط اتم ها جذب و دوباره منتشر شوند. اگر این فرایند خطی باشد بعد از انتشار مجدد تنها شیفت فاز داریم و فرکانس ثابت می ماند. یک فوتون در هر محیطی با سرعت مشخصی حرکت می کند. این سرعت در خلاء تقریباً معادل $c \approx 3 \times 10^8$ است. سرعت فاز، سرعتی است که یک نقطه با فاز ثابت از موج، با آن سرعت منتشر می شود. اگر میدان الکتریکی موهومی یک موج تک فام با معادله زیر توصیف شود:

$$E(z, t) = \frac{1}{2} (E_0 e^{j(k(w)z - wt)} + c.c) \quad (1-1)$$

و $n(w) = k_0 \times n(w)$ ، ثابت انتشار موج در محیطی با ضریب شکست وابسته به فرکانس $n(w)$ و k_0 ثابت انتشار خلاء است. E_0 دامنه موج، t زمان، $w = 2\pi f$ فرکانس زاویه ای، z فاصله و $c.c$ بخش مزدوج موهومی معادله ی موج است. در این صورت فاز موج می شود:

$$\varphi(z, t) = k(w)z - wt \quad (2-1)$$

و سرعت فاز برابر است با :

$$v_{ph} = \frac{dz}{dt} = \frac{w}{k(w)} = \frac{c}{n(w)} \quad (3-1)$$

معادله ی (2-1) رابطه ی پاشندگی است که نشان می دهد سرعت فاز در ماده، به ضریب شکست وابسته به فرکانس آن ماده بستگی دارد. برای مثال سرعت فاز نور با طول موج مخابراتی رایج، در سیلیکای خالص $2c/3$ است. چنانچه نور تک فام نباشد، فرکانس های مختلف آن با سرعت فاز مختلفی حرکت خواهند کرد. در نتیجه نور خروجی شکل اولیه خود را از دست می دهد. در اغلب مواد با کاهش فرکانس، $n(w)$ نیز کاهش می یابد و لذا v_{ph} افزایش می یابد. به این پدیده پاشندگی

نرمال می گویند. عکس این پدیده، پاشندگی غیر عادی نام v_{ph} دارد و در بیشتر موارد در محدوده ی طول موجی نزدیک به طول موج تشدید ماده اتفاق می افتد.

بسته ی موجی که شامل چند فرکانس است، مثل یک پالس، در نهایت با سرعت گروه حرکت می کند. اگر دو موج با قطبش و دامنه ی یکسان اما فرکانس کمی متفاوت داشته باشیم، فاز آنها بصورت زیر است:

$$j_1 = (k + \Delta k)z - (w + \Delta w) \quad (4-1)$$

$$j_2 = (k - \Delta k)z - (w - \Delta w)t$$

بر هم نهی این دو موج، موج زیر را به وجود می آورد:

$$E_s(z, t) = E_1(z, t) + E_2(z, t) = 2E_0 \cos \cos(kz - wt) \cos \cos(\Delta kz - \Delta wt) \quad (5-1)$$

فاکتور $\cos(kz - wt)$ حامل پالس با سرعت فاز $\frac{w}{k}$ است و $\cos(\Delta kz - \Delta wt)$ مدولاسیون موج و یا

پوش پالس است که با سرعت گروه یعنی $v_g = \frac{\Delta \omega}{\Delta k} = \frac{dw}{dk}$ حرکت می کند. با جایگزینی معادله

ی (2-1) در معادله ی سرعت گروه خواهیم داشت

$$v_g = \frac{c}{n(w_0) + w_0 \frac{dn(w)}{dw}} = \frac{c}{n_g} \quad (6-1)$$

که در آن w_0 فرکانس مرکزی پالس است. چنانکه می بینیم سرعت گروه نه تنها به ضریب شکست وابسته به فرکانس، بلکه به شیب ضریب شکست بر حسب فرکانس نیز بستگی دارد.

در فیبر های نوری که محیط های پاشنده ای هستند، نیز تغییر سرعت گروه پالس به شیب

وابسته است و چون شیب ها به فرکانس وابسته اند سرعت گروه پالس ها نیز به فرکانس

وابسته می شوند. این تغییر سرعت گروه، پاشندگی سرعت گروه GVD نام دارد و عبارت است از:

$$GVD = \frac{d}{d\omega} (v_g^{-1}) = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn(\omega)}{d\omega} + \frac{d^2 n(\omega)}{d\omega^2} \right) \quad (7-1)$$

سرعت گروه نرمالیزه شده $(\frac{Vg}{c})$ برحسب $\frac{dn(\omega)}{d\omega}$ در شکل 1-1 الف) آمده است. در قسمت

پاشندگی نرمال که $\frac{dn(\omega)}{d\omega} > 0$ است سرعت گروه کاهش می یابد و کمتر از سرعت فاز است که این

ناحیه، ناحیه ی نور کند است. اگر $\frac{dn(\omega)}{d\omega} < 0$ (ناحیه پاشندگی غیر عادی)، v_g افزایش می یابد و

تولید نور سریع می کند که در این قسمت v_g می تواند بزرگتر از c باشد. در صورتی که $\frac{dn(\omega)}{d\omega} < 0$

و $\left| \frac{dn(\omega)}{d\omega} \right| > n(\omega_0)$ ، پالس در خلاف جهت منتشر می شود ($v_g < 0$).

سرعت گروه های مختلف باعث اختلاف در زمان رسیدن پالس بعد از طی مسافت L می شود. تأخیر

زمانی محیط، t_{del} ، اختلاف تأخیر گروه و تأخیر فاز تعریف می شود

$$t_{del} = t_g - t_{ph} = t_{ph} - \frac{L}{v_{ph}} = \frac{L\omega_0}{c} \frac{dn(\omega)}{d\omega} \quad (8-1)$$

در قسمت ب شکل 1-1، تأخیر پالس برحسب $\frac{dn(\omega)}{d\omega}$ آمده است. چنانچه مشاهده می شود در

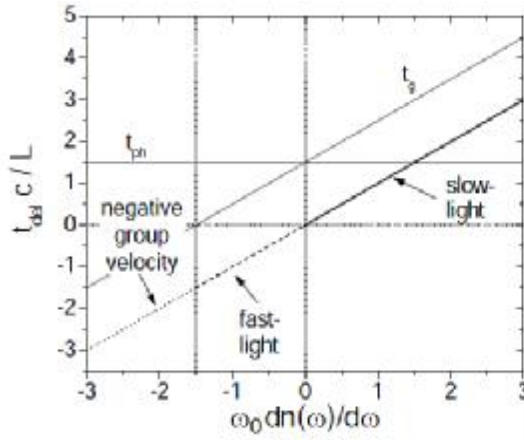
محیط غیر پاشنده، $\frac{dn(\omega)}{d\omega} = 0$ ، پالس با سرعت فاز حرکت می کند و $t_{del} = 0$. در محیط پاشنده

نرمال، تأخیر گروه بزرگتر از تأخیر فاز است و ایجاد تأخیر مثبت می کند. در محیط پاشنده غیر

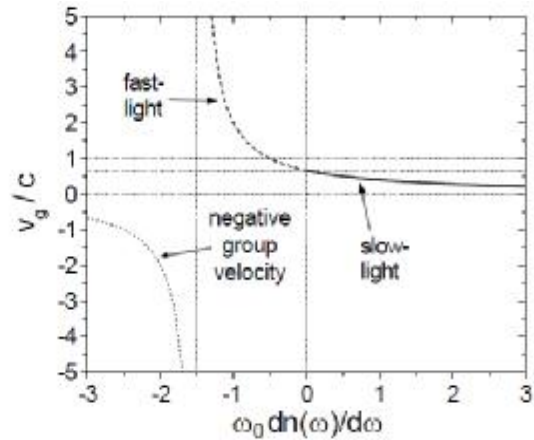
عادی، تأخیر گروه کوچکتر از تأخیر فاز است و ایجاد تأخیر منفی می کند. در نتیجه می توان با

طراحی محیط هایی که $\frac{dn}{d\omega}$ بزرگی داشته باشند، سرعت گروه و در نتیجه تأخیر را کنترل نموده و نور

کند یا نور سریع تولید کرده و یا حتی نور را متوقف نمود.



ب- تأخیر پالس



الف- سرعت گروه

شکل 1-1 سرعت گروه و تأخیر پالس بر حسب $\omega_0 \frac{dn(\omega)}{d\omega}$ ، برای $n(\omega_0) = 1.5$ [3].

دانشمندان سرعت داده را همان v_g می پنداشتند، لذا در آغاز معرفی نور سریع به علت تناقض آن با رابطه علیت انیشتین، بسیاری امکان وجود نور سریع را انکار کردند. مطالعات سامرفیلد و بریلوئن نشان داد که این دو سرعت تنها در محیط های غیر جاذب یکسان هستند اما در کل سرعت گروه همان سرعت داده نیست. همچنین آنها عدم تناقض آن با رابطه علیت انیشتین را ثابت کردند [3].

2-1-1- ضریب شکست و روابط کرامرز- کرونینگ

تغییر سرعت نور، بعلت نوسانات ذرات ماده است که این نوسانات به ضریب شکست که یکی از خصوصیات ماده است، بستگی دارد. چنانچه از الکترومغناطیس می دانیم، ضریب شکست برابر است با:

$$n(\omega) = \sqrt{\epsilon_r(\omega) \mu_r(\omega)}; \epsilon_r(\omega) = 1 + x(\omega) \quad (9-1)$$

e_r گذردهی الکتریکی نسبی، m_r تراوایی مغناطیسی نسبی و $x(w)$ پذیرفتاری الکتریکی است و به فرکانس وابسته می باشند. در محیط های پاشنده $m_r(w) \approx 1$ و ضریب شکست، گذردهی و پذیرفتاری الکتریکی کمیت های موهومی هستند. گذردهی نسبی موهومی برابر است با:

$$e_r^{\mathbb{E}}(w) \approx n^{\mathbb{E}}(w)^2 = (n'(w) + jn''(w))^2 = n'^2(w) - n''^2(w) + 2jn'(w)n''(w) \quad (10-1)$$

که قسمت حقیقی آن منجر به ضریب شکست و قسمت موهومی آن، منجر به جذب می شود. همانطور که می بینیم ضریب شکست و جذب هر دو وابسته به فرکانس هستند. به علاوه هر دو کمیت مستقیماً با هم مرتبطند و از روی یکی می توان دیگری را بدست آورد. رابطه ای که این دو را به یک دیگر مرتبط می کند رابطه ی کرامرز-کرونیگ نام دارد و عبارت است از:

$$n(w) = 1 + \frac{c}{p} \int_0^{\infty} \frac{a(w')}{w'^2 - w^2} dw' \quad (11-1)$$

$$a(w) = -\frac{4w^2}{pc} \int_0^{\infty} \frac{n(w') - 1}{w'^2 - w^2} dw' \quad (12-1)$$

3-1-1 متریک های نور کند

برای ارزیابی میزان تأخیر و راندمان نور کند نیاز به برخی متریک ها داریم که در اینجا به معرفی آنها می پردازیم. ضریب شکست و سرعت گروه که اساس تأخیر زمانی هستند، همانطور که گفتیم با رابطه ی $v_g = \frac{c}{n_g}$ به هم مربوط می شوند. در عمل برای محاسبه ی n_g و سرعت گروه، زمان انتشار پالس را در محیطی به طول L اندازه گیری می کنند که در واقع همان t_g است و برابر است با $t_g = \frac{L}{v_g} = \frac{Ln_g}{c}$. در موجبری که اثری از نور کند یا سریع نباشد، همان تأخیر زمانی مطلق، ΔT ، است و با اثر نور کند یا سریع روی آن، این تأخیر زمانی تغییر می کند. در این صورت تاخیر زمانی،

اختلاف تأخیر گروه جدید (با حضور اثر نور کند یا سریع) و تأخیر گروه نرمال تعریف می شود و می توان آن را از اختلاف زمانی بین پیک پالس خروجی تأخیر یافته و پیک پالس خروجی مرجع اندازه گیری کرد. در ذیل به توضیح متریک های مهم بررسی نور کند، می پردازیم.

فاکتور کاهش¹:

میزان تغییر سرعت گروه با این فاکتور بیان می شود که عبارت است از:

$$S = \frac{c}{v_g} \equiv n_g \quad \text{or} \quad S = \frac{v_{ph}}{v_g} = \frac{n_g}{n(w)} \quad (13-1)$$

لذا S نسبت ضریب شکست گروه به ضریب شکست ماده، $n(w)$ ، است.

تأخیر زمانی موثر و کسری²:

تأخیر زمانی کسری، ΔT_{frac} ، نسبت زمان تأخیر مطلق (ΔT) به پهنای FWHM (t_{in}) یک تک پالس ورودی می باشد. در حالیکه (ΔT) موثر، ΔT_{frac} ، نسبت زمان تأخیر مطلق (ΔT) به پهنای FWHM پالس خروجی (t_{out})، است.

$$\Delta T_{frac} = \frac{\Delta T}{t_{in}} \quad (14-1)$$

$$\Delta T_{eff} = \frac{\Delta T}{t_{out}} \quad (15-1)$$

ΔT به تنهایی میزان پهن شدن و کافی بودن تأخیر را برای پالس های مختلف نشان نمی دهد، لذا بیشتر از دو متریک ΔT_{frac} و ΔT_{eff} استفاده می شود. مثلاً $\Delta T = 10ns$ برای پالس به پهنای 1ps بزرگ بوده و برای پالس به پهنای 1ms ناکافی می باشد. به علاوه ΔT_{frac} را می توان برای پیش -

¹ - Slow down factor

² - Effective Delay , Fractional Delay

بینی ذخیره ی تئوریک³ یا ظرفیت تأخیر در بیت⁴ استفاده کرد. زمانی که پالس در حین عبور از محیط نور کند دچار پهن شدگی شود ΔT_{eff} ، کوچکتر از ΔT_{frac} خواهد شد.

فاکتور پهن شدگی:

فاکتور پهن شدگی، B، میزان فشردگی یا پهن شدگی پالس را در عبور از محیط نور کند بیان می کند و برابر است با:

$$B = \frac{t_{out}}{t_{in}} = \frac{\Delta T_{frac}}{\Delta T_{eff}} \quad (16-1)$$

مقدار B معمولا بین 1 و 2 است ($1 < B < 2$) که حالت $B = 1$ ، حالت بهینه است. اگر $B > 2$ ، آن گاه داده به علت تداخل های intersymbolic از بین می رود.

حاصل ضرب تأخیر و پهنای باند، حاصلضرب نرخ داده و تأخیر:

این دو حاصل ضرب، پارامترهای بارزشی هستند که مقدار تأخیر را با پهنای باند پالس یا نرخ داده آن، ترکیب می کنند.

$$DBP = \Delta T \Delta f \quad (17-1)$$

Δf همان پهنای باند FWHM پالس است و از نرخ داده بدست می آید. در اغلب سیستم های نور کند، تأخیر زمانی بزرگ با نرخ داده کوچک همراه است و یا به عبارت دیگر پالس با نرخ داده بزرگ، تأخیر کوچکی حس می کند. یعنی ΔT_{frac} کوچک می شود. در صورتی که تک پالس مربعی استفاده

شود، $t_{in} = \frac{1}{\Delta f}$ و در صورتی که تک پالس گاؤسین استفاده شود، $t_{in} = \frac{0.441}{\Delta f}$. در نتیجه DBP به

ترتیب برای پالس مربعی و گاؤسین می شود $DBP = \Delta T_{frac}$ و $DBP = 0.441 \Delta T_{frac}$.

³ - theoretic storage

⁴ - Delay capacity in [bit]

حاصل ضرب تأخیر در فاکتور Q^5 :

فاکتور Q کمیتی است که میزان تخریب داده را بعد از انتقال می‌سنجد و مستقیماً به نسبت سیگنال به نویز (SNR)، نرخ خطای بیت (BER) و میزان باز بودن دیاگرام چشمی⁶ مربوط است. با افزایش تخریب، مقدار Q کاهش می‌یابد. حاصل ضرب تأخیر در فاکتور Q ، به یافتن نقطه بهینه کمک می‌کند. بعنوان مثال، اگر حاصل ضرب تأخیر در فاکتور Q ، تابعی از نسبت پهنای باند سیگنال، Δf ، (یا نرخ داده) به پهنای باند تشدید، در نظر گرفته شود، $(\frac{\Delta f}{\Delta w})$ ، می‌توان با تنظیم این دو پهنای باند، نقطه ی بهینه ای را یافت که تأخیر در آن زیاد و تخریب تا حد ممکن، کم باشد. اگر $\Delta f = \Delta w$ تقریباً هیچ تخریبی نداریم و تأخیر نیز قابل صرف نظر است و اگر $\Delta w > \Delta f$ تأخیر بسیار بزرگی همراه با تخریب زیاد سیگنال داریم.

BER و Eye Opening:

در انتقال داده دیجیتال، BER کمیت مهمی است که با بازی دیاگرام چشمی قابل تغییر است. برای انتقال بدون خطا، باید $BER \leq 10^{-6}$ باشد. در برخی سیستم‌ها به مقادیر کمتر از 10^{-9} یا 10^{-12} هم احتیاج داریم.

2-1 روش‌های تولید نور کند

تا کنون روش‌ها، مکانیزم‌ها و مواد مختلفی برای تولید تأخیر یا تسریع در سیگنال‌های نوری پیشنهاد شده است. سه روش کلی همه آنها عبارتست از:

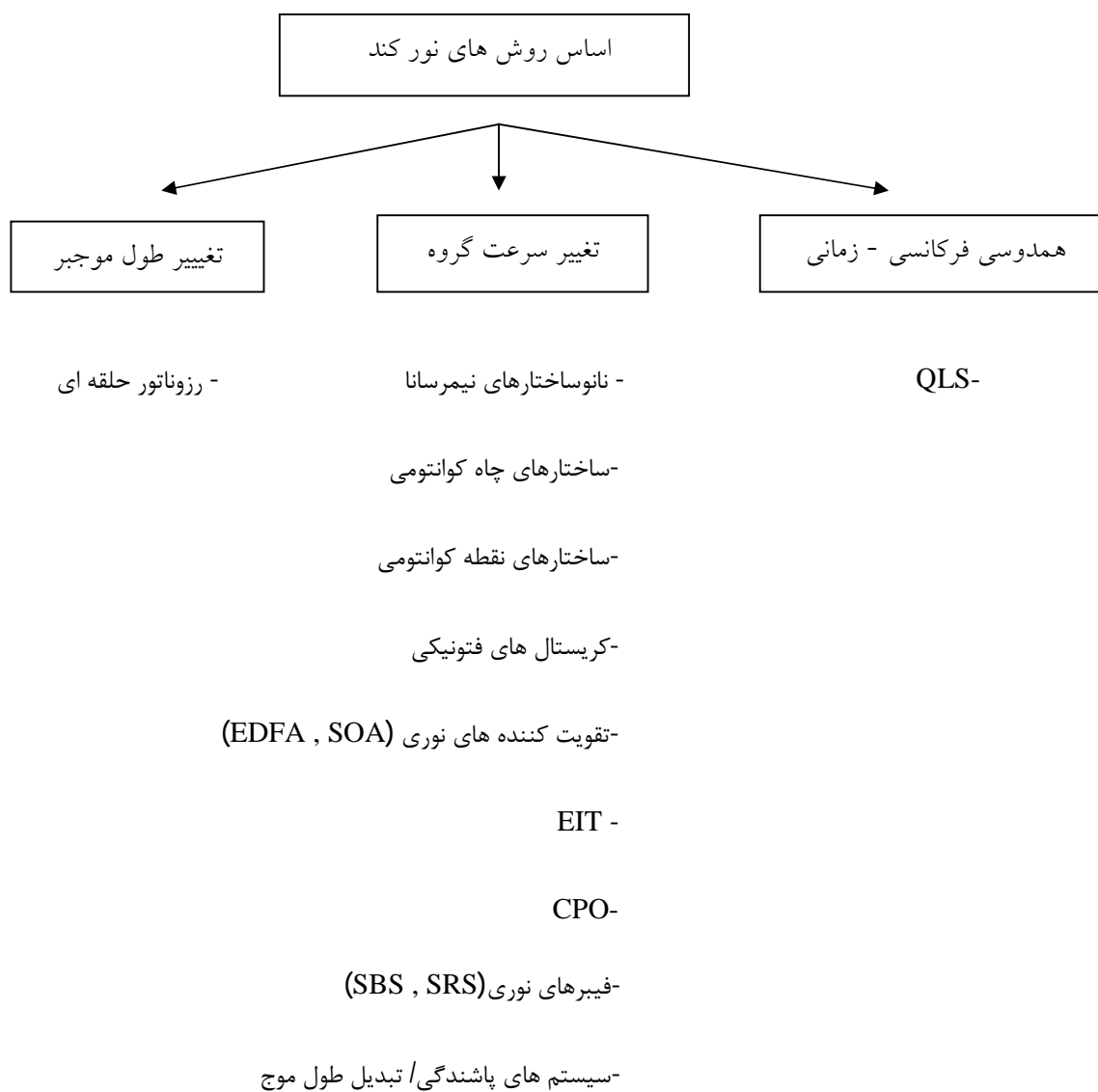
- 1- روش‌هایی که مبتنی بر تغییر طول فیزیکی موجبر یا تشدید کننده هستند.
- 2- روش‌هایی که بر پایه تغییر سرعت گروه پالس می‌باشند.

⁵ - Q-Delay Product(QDP)

⁶ - eye diagram opening

3- روش هایی که بر اساس همدوسی فرکانس - زمانی سیگنال ها هستند.

مثال هایی از این سه دسته کلی در شکل 1-2 آمده است.



شکل 1-2 دسته بندی روش های تولید نور کند طبق اساس آن ها [3].

در روش اول، زمان رسیدن پالس ها با تغییر طول فیزیکی موجبر و یا تغییر تعداد چرخه های پالس درون رزوناتور تغییر می کند. اما این روش قادر است تنها چند برابر زمان یک بیت⁷ تأخیر ایجاد کند. همچنین نمی تواند تاخیرات پیوسته تولید کند.

در روش دوم، بر خلاف روش اول که سرعت گروه ثابت دارد، سرعت گروه تغییر می کند. این روش طبق رابطه 1-6 با روش ها یا موادی انجام می پذیرد که تشدید یا پاشندگی شارپ تولید کنند، مثل پراکندگی بریلوئن القایی، سیستم هایی که با تبدیل طول موج شکل های مختلف پاشندگی را ایجاد می کنند و سایر روش های گفته شده در شکل 1-2.

روش سوم تکنیک جدیدی به نام ذخیره شبه نور (QLS) را در بر دارد. و فایده مهم آن این است که پالس های نوری می توانند برای مدت مشخصی بدون هیچگونه تخریبی ذخیره شوند.

در این پروژه از دسته دوم و از زیر روش SBS که در فیبرهای نوری رخ می دهد، استفاده می شود. یکی از فواید مهم استفاده از فیبرهای نوری به عنوان محیط نور کند، این است که آن ها به آسانی در سیستم های مخابرات نوری موجود قرار می گیرند و وجود انواع مختلف فیبر، کاربردهای متنوعی را ممکن می سازد. فایده مهم دیگر این است که در فیبرها نور کند و سریع در دمای اتاق و در محدوده فرکانسی بزرگی تولید می شوند که این فرکانس ها شامل فرکانس های مخابراتی نیز می شوند.

برای دستیابی به نور کند یا سریع در فیبرها، دو فرایند پراکندگی بریلوئن القایی (SBS) و پراکندگی رامان القایی (SRS) از اهمیت ویژه ای برخوردارند. در این روش ها، تغییر سرعت گروه بر اساس تشدیدهای مصنوعی ایجاد شده در این محیط انجام می پذیرد. چون SBS و SRS توسط موج پمپ القا می شوند، می توانند در تمام محدوده گذردهی فیبر، رخ دهند.

اغلب روش های شکل 1-2 در دماهای خیلی پایین یا در طول موج های نامناسب برای مخابرات کار می کنند و یا سیستم تولید آنها بسیار پیچیده است. در این میان اثر SBS از اهمیت ویژه ای

⁷-Bit Time

برخوردار است. زیرا در دمای اتاق کار می کند، برای تولید تأخیر بزرگ توان کمی مصرف می کند و از اجزای استاندارد مخابراتی استفاده می کند، در انواع فیبرها و در تمام محدوده شفافیت (گذردهی فرکانسی) آنها اتفاق می افتد، قادر به تأخیر سرعت گروه بزرگ و پیوسته است. و از همه مهمتر خود فیبر بعنوان محیط نور کند استفاده می شود که باعث می شود به آسانی به سیستم های مخابرات و پردازش اطلاعات نوری موجود، لینک شود. البته مشکلاتی نیز دارد که می توان با روش هایی آنها را کاهش داد یا از بین برد. لذا در این پایان نامه به بررسی تولید نور کند با روش SBS می پردازیم.

نتیجه گیری

این فصل با یادآوری مفهوم سرعت های فاز و گروه، ضریب شکست و روابط آنها شروع شده است. در ادامه متریک های ارزیابی نور کند معرفی شد. پارامتر مهم $\frac{dn(w)}{d\omega}$ در رابطه

$$v_g = \frac{c}{n(w_0) + w_0 \frac{dn(w)}{dw}}$$

کلیدی است برای باز کردن گره عدم پردازش سیگنال در حوزه نوری که

دستیابی به نور کند را ممکن می سازد. در نتیجه می توان با طراحی خصوصیات برخی مواد به تغییر بزرگ ضریب شکست با تغییر کوچکی در فرکانس، رسید. این کار با روشهای مختلفی انجام می شود که در این میان روش پراکندگی بریلوئن القایی بدلیل امکان تزویج آسانش به سیستم های مخابرات کنونی، تولید تاخیر زیاد با مصرف توان کم و عملکرد در تمام فرکانس ها، بیش از سایر روشها مورد استقبال است. لذا در ادامه به بررسی این روش می پردازیم.

فصل دوم- تئوری نور کند به روش پراکندگی بریلوئن

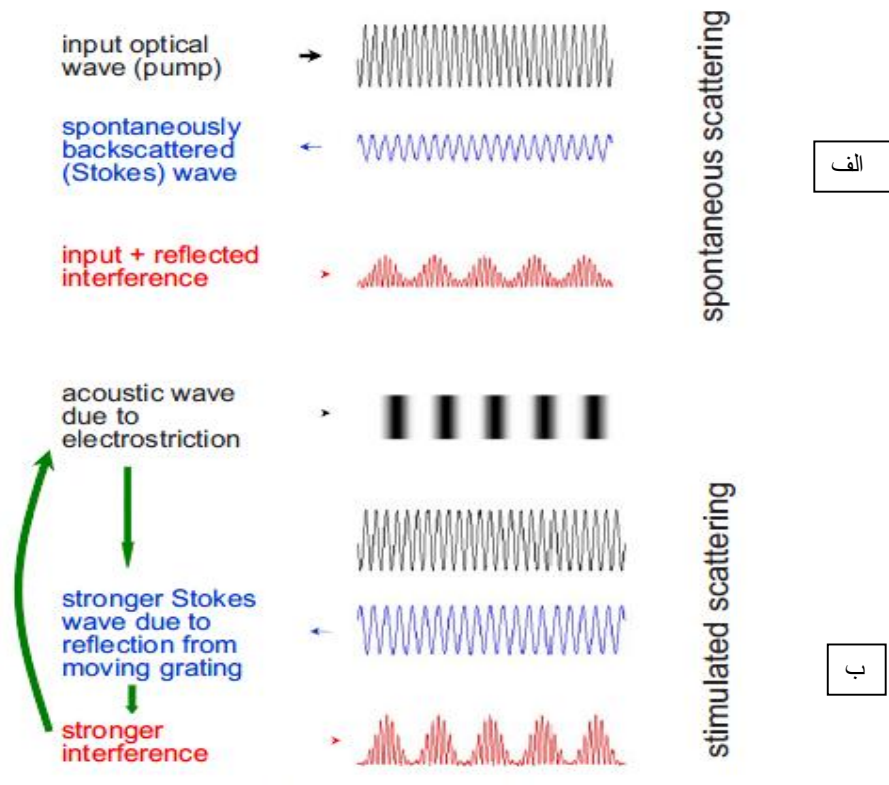
القایی

بدلیل زحمات ارزنده بریلوئن در قرن نوزدهم، برای بررسی و تحلیل برهم کنش نور با صوت، پراکندگی نور بوسیله ارتعاشات صوتی، پراکندگی بریلوئن نام گرفت. از آنجایی که پراکندگی بریلوئن در توان پمپ خیلی پایین رخ می دهد در اغلب شبکه های مخابراتی مانع از انتقال داده نوری با توان بالا می شود در نتیجه طراحان شبکه های مخابرات نوری سعی می کنند آن را حذف کنند. اما در دهه های اخیر با کاربردهای جالبی که برای این اثر غیر خطی پیشنهاد و بکار برده شده است، بسیار مورد توجه می باشد. از جمله این کاربردها استفاده در تولید نور کند، نور سریع، تقویت کننده های فیبری، لیزرهای فیبری، فیلترهای تنظیم پذیر نوری و سنسورهای فیبر نوری می باشد.

نخستین بار در سال 2002 پروفیسور Boyd تولید نور کند در فیبر را پیش بینی کرد و در سال 2005، Song و همکارانش بصورت تجربی نور کند را در محیط فیبر تولید کردند. در این فصل ابتدا اصول پراکندگی بریلوئن القایی توضیح داده می شود که شامل چگونگی ایجاد و خصوصیات آن از قبیل آستانه، پهنای باند و طیف می باشد. سپس روابط ریاضی و چیدمان تجربی ادوات برای تولید نور کند با روش SBS بیان می شود. در نهایت به مزایا و معایب نور کند تولید شده می پردازیم.

1-2 پراکندگی بریلوئن

یک محیط الکتروستریکتیو⁸ در نظر بگیرید که به علت حرکت براونی مولکول هایش، نویز آکوستیکی در آن ایجاد شده است. بخشی از نوری که از این محیط عبور می کند (در اینجا موج پمپ نامیده می شود) توسط این نویز آکوستیکی به عقب پراکنده می شود که این پدیده پراکندگی بریلوئن خودبخودی نام دارد. این نور پراکنده شده موسوم به موج استوکس، در خلاف جهت موج پمپ انتشار می یابد و با آن تداخل می کند. بنابراین بعلاوه الکتروستریکشن، یک موج آکوستیکی تولید می شود و



شکل 1-2 مکانیزم پراکندگی نور در الف) پراکندگی بریلوئن خودبخودی ب) پراکندگی بریلوئن

القایی [5].

⁸ -الکتروستریکشن یکی از خواص مواد دی الکتريک است و به معنی تغییر موقعیت اتمهای ماده و یا تغییر چگالی ماده در حضور میدان الکتريکی می باشد.

دوباره پراکندگی بریلوئن را القا می کند (شکل 2-1). این موج آکوستیکی در عمل مانند یک توری براگ است. از آنجایی که انرژی موج آکوستیکی در برابر موج نوری قابل نظر است، در فرایند پراکندگی بریلوئن القایی انرژی از موج پمپ به موج استوکس انتقال می یابد [4].

در نتیجه پراکندگی بریلوئن القایی چیزی نیست جز تقویت نوری موج استوکسی که در محیط الکتروستریکتیو و در حضور موج پمپ، انتشار می یابد. این پدیده را می توان در تقویت کننده های نوری فیبری و لیزرهای فیبری باریک باند بکار گرفت.

چون موج پمپ نسبت به موج آکوستیکی دارای سرعت است، طبق اثر دوپلر، فرکانس موج استوکس تغییر می یابد که این تغییر در فرکانس را شیفت فرکانسی بریلوئن می گویند. از نقطه نظر پایستگی انرژی و تکانه در این پدیده که بطور کلاسیکی برهم کنش سه موج است، بایستی فرکانس استوکس برابر اختلاف فرکانس پمپ و شیفت بریلوئن باشد، یعنی:

$$f_s = f_p - f_a \quad (1-2)$$

که f_a فرکانس موج آکوستیکی است و مقدار شیفت بریلوئن را دارد که برابر است با:

$$f_a = f_B = \frac{2v_a n}{I_p} \quad (2-2)$$

همچنین در صورتیکه انرژی پمپ افزایش یابد، یعنی انرژی از پروب به پمپ منتقل شود، جذب آنتی استوکس داریم. جذب در فرکانس $f_p + f_a$ رخ می دهد و منجر به تولید نور سریع می شود. در این پایان نامه تنها نور کند بررسی می شود. در رابطه 2-2، v_a سرعت صوت در محیط، n ضریب شکست محیط و I_p طول موج پمپ است، در طول موج $I_p = 1550 \text{ nm}$ ، برای محیط از جنس سیلیکای گداخته⁹، این متغیرها دارای مقادیر $v_a = 5.96 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ و $n = 1.44$ هستند و در نتیجه $f_B \approx 11 \text{ GHz}$. همچنین f_B به پارامترهای دیگری مثل نوع فیبر، غلظت هسته فیبر، استرس

⁹ - fused silica

مکانیکی فیبر و یا دمای پیرامون بستگی دارد. برای مثال در فیبر تک مد استاندارد (SSMF)، تغییر

$$f_B \text{ بر حسب دما و استرس مکانیکی بترتیب } 1.36 \frac{MHz}{C^0} \text{ و } \left(\frac{MHz}{\%elongation} \right) 594.1 \text{ است [3].}$$

2-1-1 آستانه بریلوئن و ضریب بهره بریلوئن

پراکندگی بریلوئن القایی در آستانه توان پمپ کوچک اتفاق می افتد. برای آستانه بریلوئن بر

حسب کاربرد تعاریف مختلفی موجود است که عبارتند از توان پمپ نوری ورودی بطوریکه:

1- برابر با توان استوکس باشد.

2- موج استوکس با توان برابر با توان پمپ فرستاده شده، تولید کند.

3- توان استوکس شروع به افزایش کند یا توان پمپ فرستاده شده شروع به کاهش کند.

4- توان استوکس برابر با 1% توان پمپ ورودی باشد.

5- توان استوکس برابر با توان ریلی پراکنده شده باشد.

در این پایان نامه از تعریف سوم استفاده شده است. شکل 2-2 (الف) آستانه بریلوئن را برای یک فیبر

استاندارد تک مد با طول 5km نشان می دهد. طبق شکل، فعالیت SBS در آستانه بریلوئن حدودا

برابر با 14.8 dBm شروع می شود. بیشتر از این مقدار، توان موج استوکس پراکنده شده افزایش می

یابد در حالیکه توان پمپ انتقال یافته به اشباع می رسد.

آستانه بریلوئن از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P_p^{th} = 19 \frac{k_B A_{eff}}{g_{B \max} L_{eff}} \quad (3-2)$$

K_B فاکتور قطبش است و مقدار آن به اختلاف قطبش دو موج پمپ و پروب بستگی دارد. برای بر هم

کنش بهینه باید قطبش هر دو موج استوکس و پمپ یکسان باشد یعنی $K_B = 1$. اما در فیبر SSMF

این مقدار برابر با 2 است. طول مؤثر نیز برابر است با: