



فصلنامه علمی ((دفاع هوافضایی))

دوره ۲، شماره ۱، خرداد ۱۴۰۲



مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد ساختار آنتن آرایه برپایه تأخیر واقعی زمان به کمک فیبر تحت پدیده ناپایداری مدولاسیون

اسماعیل زارع زاده^۱، علی شیرپای^۲، سید معین علوی^۳

۱- استادیار برق فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران، ایران

۲- استادیار فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد برق دانشگاه امیرکبیر

چکیده

به کارگیری پالس‌های پهن باند در ساختارهای برپایه آرایه‌های آنتنی جابه‌جایی فاز به دلیل پدیده لوچی بیم با مشکل مواجه می‌شود. به عنوان روش جایگزین، از ساختارهای برپایه تأخیر واقعی زمان فن‌آوری میکروویو فوتونیک بهره برده می‌شود که پهنای باند قابل استفاده را افزایش می‌دهد. اما به کارگیری فن‌آوری میکروویو فوتونیک معمول و شرایط مرتبط با مدولاتور آن، خود موجب محدودیت پهنای باند و سطح پالس می‌شود. در این مقاله با کارگیری گونه ویژه‌ای از فیبرهای نوری تحت پدیده فیزیکی ناپایداری مدولاسیون که موجب افزایش سطح توان پالس و پهنای باند می‌شود، عملکرد یک ساختار تأخیر واقعی زمان بهبود داده شده است. در واقع بهبود عملکرد یک مدولاتور با تک لیزر (سیگنال حامل) به حالت شانه فرکانسی تعمیم داده شده است. پدیده ناپایداری مدولاسیون یک پدیده فیزیکی است که از کنش بین پاشندگی و غیرخطی بودن نشأت می‌گیرد و موجب نوع خاصی از تقویت باند کناری لیزر بدون نیاز به پمپ خارجی می‌شود.

اطلاعات مقاله

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰

کلمات کلیدی:

آنتن‌های آرایه، تأخیر واقعی زمان، مدولاتور میکروویو فوتونیک، فیبر نوری، ناپایداری مدولاسیون

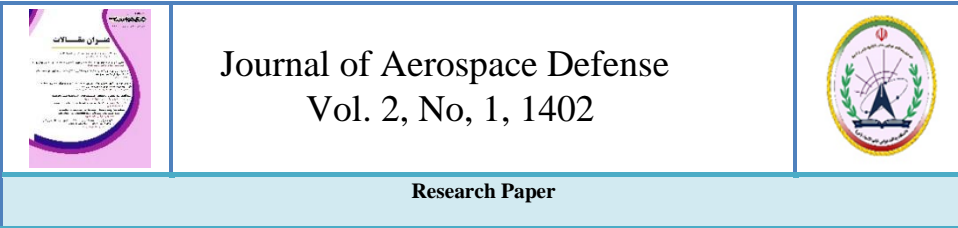
نویسنده مسئول:

اسماعیل زارع زاده

ایمیل:

zarezadeh1399@gmail.com

استناد به مقاله: اسماعیل زارع زاده، علی شیرپای، سید معین علوی. بهبود عملکرد ساختار آنتن آرایه برپایه تأخیر واقعی زمان به کمک فیبر تحت پدیده ناپایداری مدولاسیون. مجله علمی پژوهشی دفاع هوافضایی دوره ۲، شماره ۱، خرداد ۱۴۰۲.



Improving the performance of array antenna structure based on real time delay with the help of fiber under modulation instability phenomenon

asmael zarezade¹, ali shirpaei², seyed moein alavi³

1 -assistant professor of electrical physics,khatam al anbia air defense university

2- assistant professor of electrical physics,khatam al anbia air defense university

3- senior electrical expert of amir kabir university

Article Informatio

Accepted: 1402-03-16

Received: 1401-09-20

Keywords:

Threat factors, radar systems, future wars, passive defense, innovation

Corresponding

author:

asmael zarezade

Email:

zarezadeh1399@gmail.com

Abstract

The advancement of technology and the use of modern and intelligent weapons has led to the creation of a more complex and destructive nature of weapons in possible future wars and has made it more necessary to pay serious attention to the application of passive defense measures against the threat factors of sensitive and vital centers, which in the research The present study, which is of an applied-developmental type and is carried out by a mixed method, the main issue, "what are the passive defense measures against the threat factors of radar systems in future wars" is considered and based on the studies and interviews conducted with experts, the number of 15/15A threat has been identified in the field of radar detection systems in future wars and using new methods from the 14/14 principles of passive defense (camouflage and invisibility; concealment using natural effects; deception and initiative; coverage in all fields; miniaturization; blinding of information systems; choosing the optimal scale of dispersal; strengthening, fortifications and security; positioning of systems deployment; defense crisis management; dispersion in the distribution of radar stations; selection of safe areas; parallelization of systems and information protection) in order to improve the immunity of radar systems against these threats.

HOW TO CITE: asmael zarezade . Improving the performance of array antenna structure based on real time delay with the help of fiber under modulation instability phenomenon. Journal of Aerospace Defense, Vol. 2, No. 1, 1402.

۱. مقدمه

آنتن‌های آرایه فازی، نوع خاصی از آرایش آنتنی هستند که در آن چند آنتن معمولاً یکسان، در یک یا دو سو در فضا، پشت هم تکرار می‌شوند و با کمک کنترل فاز جریان الکتریکی تحریکی آنتن‌ها، راستای بیم اصلی آنتن را می‌توان تغییر داد. این نوع از آنتن‌ها در کاربردهای راداری به دلیل سرعت بالای تغییر جهت بیم (تشخیصی)، توانایی تشخیص و رهگیری همزمان چند هدف به کمک تخصیص چند پهنای باند که به واقع مهم ترین برتری این گونه آنتن‌هاست، سطح مقطع راداری مؤثر کم و قابلیت برنامه‌ریزی‌های متفاوت روی آن، گزینه مناسبی برای این نوع کارکردهاست [۴-۱]. امروزه آنتن‌های آرایه‌ای بر پایه پویش الکترونیکی برای کاربردهای راداری و همچنین سامانه‌های رادویی بسیار فراگیر شده است. در کنار همه این برتری‌ها باید به مشکلات آن مانند پیچیدگی پیاده‌سازی و هزینه‌های بالاتر پیاده‌سازی آن توجه داشت [۵-۴]. در کنار چالش‌های گفته شده، چالش اصلی آنتن آرایه فازی در کاربردهای آتی مخابراتی، دشواری یا حتی ناتوانی به کارگیری آن برای کاربردهای جدید و مدرن نیازمند سیگنال‌های پهن باند است. به دلیل طراحی ویژه فرکانس خاص در آرایه فازی، برای ساختارهای پهن باند ساختار آرایه فازی دچار چالش کوچکی بیم شده و از جهت مشخص شده منحرف می‌شود [۶-۷]. در رادارها و تصویربرداری‌های نوین، افزایش پهنای باند سیگنال ارسالی می‌تواند وضوح و دقت اهداف ردیابی شده را به طور چشمگیری افزایش داده و در کاربردهای بر پایه قانون داپلر، عملکرد رادار را کاملاً بهبود دهد [۵]. یکی از روش‌های چیرگی بر این چالش، به کارگیری رادارهای مبتنی بر آنتن‌های تأخیر واقعی زمان (true time delay) است. در این روش، آنتن‌های آرایه‌ای کناری تحت تحریک دو سیگنال با تأخیر زمانی ثابت قرار می‌گیرند [۸]. این روش با وجود دستیابی به پهنای باند گسترده، نسبت به آرایه فازی پیچیده‌تر است و هنوز در اواسط مسیر تکنولوژی بوده و برای کاربردهای دقیقتر، نیازمند طراحی‌ها و ابتکارات جدیدتر و قابل پیاده‌سازی تر است. برای پیاده‌سازی تأخیر واقعی زمان دو روش کلی الکتریکی و نوری وجود دارد. روش الکتریکی به دلیل تلف زیاد، پهنای باند کم و همچنین مشکلات رایج مربوط به ابزارآلات میکروویوی تنها در بعضی کاربردهای خاص به کار برده می‌شود. در روش نوری، به کمک ابزار و تکنولوژی میکروویو فوتونیک که یکی از اصلی‌ترین تکنولوژی‌های تحقق ساختارهای پهن باند در فناوری‌های آینده است و بردن سیگنال میکروویو به حوزه نوری، تأخیرات زمانی ثابت پیاده‌سازی می‌شود [۳]. از جمله مزایای میکروویو فوتونیک علاوه بر پهنای باند بالا، تلف فوق‌العاده کمتر، سرعت بالای ارسال و دریافت اطلاعات است. اما در خود این فن-آوری، مدولاتورهایی که سیگنال الکتریکی را به حوزه نور می‌برند، موجب محدودیت پهنای باند و سطح سیگنال می‌شوند [۹-۱۱]. در تکنولوژی میکروویو فوتونیک برای پیاده‌سازی آرایه تأخیر زمان روش‌های مختلفی مانند به کارگیری فیبر نوری با پاشندگی پایین با طول‌های متفاوت، ترکیب فیبرهای نوری پاشنده و کم پاشنده ویژه برای هر آنتن، به کارگیری شانه و فرکانسی و یک فیبر پاشنده تنها و ... را می‌توان نام برد [۱۵-۱۲]. روش آخر با وجود اضافه شدن پیچیدگی تکنولوژی شانه فرکانسی، نسبت به

بقیه روش‌ها سادگی بیشتری داشته و حجم بسیار کمتری را می‌طلبد. این روش برپایه اعمال تأخیرات زمانی متفاوت برای طیف‌های فرکانسی متفاوت در یک فیبر با پاشندگی بالا، پیاده سازی می‌شود. در این روش شانه فرکانسی ایجاد شده، از یک مدولاتور دامنه می‌گذرد که موجب می‌شود تا سیگنال مایکروویو بر روی هر کدام از شانه‌ها سوار شود [۶]. در بین مدولاتورها، مدولاتورهای دامنه الکترواپتیکی به دلیل برتری‌های آن مانند دقت و پهنای باند، تقریباً معمول‌ترین گزینه در کاربردهای مایکروویو فوتونیک است. یکی از چالش‌های اصلی مدولاتور دامنه الکترواپتیکی، نیاز به ولتاژ نصف موج بالا با افزایش فرکانس باند کناری است که در ساختار بر پایه شانه فرکانسی، با توجه به نیاز به ساختار الکترونیک برای تولید سیگنال مایکروویو [۱۷ و ۱۶] و این نکته در ساختارهای الکترونیک که دقیقاً عکس الکترواپتیک عمل کرده و با افزایش فرکانس، ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد، مشکل ایجاد می‌کند [۱۷]. به همین منظور روش‌های متفاوتی برای غلبه بر ولتاژ نصف موج بالا در پهنای باند گسترده مانند افزایش تطابق بین سرعت مایکروویو و نور [۱۹-۱۸]، افزایش ضریب الکترواپتیکی ماده مورد استفاده [۲۰]، به کارگیری مدولاتور برپایه تشدید [۲۱] و توزیع تحریک مایکروویو متغیر با زمان و مکان [۲۲] نام برد. در همه این روش‌ها علاوه بر افزایش قابل توجه پیچیدگی، مشکلاتی دیگر نیز وجود دارد. مثلاً در روش اول، تنها پهنای باند ساختار به دلیل بهبود زمان گذر ($\tau = \frac{1}{RC}$) کمی افزایش یافته و ولتاژ نصف موج آن تغییری نمی‌کند. در روش دوم که روش تحقیقاتی بوده و وارد فاز عملیاتی به صورت گسترده نشده است، روی ولتاژ نصف موج مؤثر مورد نیاز تأثیر گذاشته و آن را کاهش می‌دهد ولی پهنای باند به اندازه محسوسی افزایش پیدا نمی‌کند (تلف الکترودهای وابسته به فرکانس تغییر نمی‌کند) [۲۰]. در روش سوم، تشدید موجب تناوب و اعوجاج در پاسخ الکترواپتیکی باند کناری شده و همچنین در عین افزایش عمق مدولاسیون، به دلیل دست نخوردن طول الکتروود و افزایش طول مؤثر الکتروود پلاسمونیک پهنای باند تفاوت چشمگیری نخواهد داشت [۲۱]. در روش آخر، با کمک توزیع دلخواه زمانی-مکانی تحریک مایکروویو که نیازمند یک منبع جداگانه برای تحریک المان‌های متغیر باز زمان است، پاسخ باند کناری و سیگنال مایکروویو بهره یافته و عمق مدولاسیون و پهنای باند افزایش می‌یابد اما این روش پیچیدگی دو چندان داشته (نیازمند منبع جداگانه برای المان‌های متغیر با زمان است)، هنوز به صورت تجاری در نیامده و معمولاً برای فرکانس‌های محدود قابلیت پیاده‌سازی دارد. همچنین این روش به خاطر غیرهم‌پاسخ بودن ساختار، بهره ایجاد شده نسبت به فرکانس حامل تقارن ندارد [۲۲]. در این مطالعه با به کارگیری پدیده فیزیکی ناپایداری مدولاسیون در فیبر نوری ویژه غیرخطی و پاشنده، بدون افزودن به پیچیدگی مدولاتور و تنها با استفاده از مدولاتورهای موجود در بازار، پهنای باند و ولتاژ نصف موج مدولاسیون را به طور همزمان بهبود داده شده است و یک نوع تقویت کننده+فیلتر همزمان بدون نیاز به پمپ جداگانه (خود اتکا) ایجاد شده است که با توجه به مطالعات اخیر این گونه بهبود دهنده پارامترهای مدولاتور پهن باند بدون افزودن پیچیدگی مدولاتور و

به کارگیری تقویت کننده دیده نشده است. لذا با به کارگیری فیبر نوری غیرخطی و پاشنده خاص، در یک ساختار تأخیر واقعی زمان علاوه بر پیاده سازی تأخیرات ثابت متداول، انتظار بهبود ولتاژ نصف موج و پهنای باند کناری مدولاسیون و همچنین تقویت مناسب و گزینش شده پالس راداری- تصویربرداری است. در ادامه مقاله از سه بخش تشکیل شده است. در بخش اول پدیده ناپایداری مدولاسیون در فیبر نوری و همچنین ارائه روابط و نتایج آن بررسی می‌شود. در بخش دوم، نتیجه به کارگیری فیبر نوری پاشنده و غیرخطی خاص تحت تأثیر پدیده ناپایداری مدولاسیون و غیر آن را با یکدیگر مقایسه و مرور می‌شود. در بخش آخر، نتیجه به کارگیری فیبر نوری غیرخطی پاشنده ویژه تحت پدیده ناپایداری مدولاسیون را برای ارسال اطلاعات و پالس راداری از طریق آنتن‌های آرایه ای بررسی می‌شود.

۲. ناپایداری مدولاسیون

به پدیده‌ای که در آن یک محیط انتقال موج غیر خطی، یک حالت پایدار با باندهای کناری ضعیف را به خاطر کنش بین اثرات پاشندگی و غیرخطی مدوله کرده و یک ناپایداری (افزایش سطح توان بدون اضافه شدن توان مستقل) از خود بروز دهد، ناپایداری مدولاسیون گفته می‌شود. این پدیده در حوزه‌های متفاوتی مانند فیزیک پلاسما، دینامیک سیالات و نور غیر خطی خود را نشان داده و کاربرد دارد [۲۵-۲۳]. در فیبر نوری غیرخطی، عدد موج انتشار مد در یک فیبر تک مده (β)، که به فرکانس کاری وابسته است، را می‌توان حول و حوش فرکانس کاری ω_0 بسط تیلور داد:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 + \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1)$$

که در آن:

$$\beta_m = \left. \frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (2)$$

و $n(\omega)$ ضریب شکست وابسته به فرکانس مؤثر فیبر برای مد انتشاری و β_2 نشان دهنده اندازه پاشندگی در پوش شکل موج و مایه گسترش شکل زمانی پالس است. در ادامه با شروع از معادله موج در یک فیبر با پارامترهای غیرخطی و به کارگیری تقریب تغییرات آرام و معادله (۱) برای انتشار موج در فیبر، در حالتی که عرض پالس زمانی از یک پیکوتانیه بزرگتر باشد که به معنای پهنای باند کمتر از تقریباً یک تراهرتز است، می‌توان معادله انتشار پوش موج در فیبر غیرخطی را به صورت:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\alpha}{2} A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (3)$$

نوشت که در آن A پوش پالس، γ ضریب غیرخطی فیبر و α ضریب تلف یا جذب فیبر است. در حالت بدون تلف جواب لیزر موج پیوسته برای معادله فوق یک سالیتون بوده و بدون تغییر شکل و تنها با انباشت فاز، به صورت:

$$A = \sqrt{P_0} e^{i\gamma P_0 z} \quad (4)$$

از فیبر می‌گذرد. اما اگر معادله (۳) را که در آن هردو پارامتر پاشندگی و غیرخطی تأثیرگذار است، در حالت اعمال انحراف کوچکی از توان لیزر موج پیوسته به صورت:

$$A = (\sqrt{P_0} + a)e^{i\gamma P_0 z} \quad (5)$$

حل کنیم، به یک معادله دوم برای انحراف می‌رسیم که در آن شرایطی برای انحراف که بتواند در طول فیبر انتشار یابد را دریابیم که با حل آن می‌توان به فرم بسته موج گونه‌ای برای انحراف به صورت:

$$a = a_1 e^{i(Kz - \Omega t)} + a_2 e^{-i(Kz - \Omega t)} \quad (6)$$

رسید که در آن K و Ω به ترتیب عدد موج انتشار و فرکانس جمله انحراف از لیزرند. توجه شود که در واقع این فرکانس، فرکانس باند کناری طیف اصلی لیزر است. با جایگذاری (۶) در معادله انحراف، برای دستیابی به یک پاسخ غیر بدیهی برای ضرایب انتشار به رابطه:

$$K = \pm \frac{1}{2} |\beta_2 \Omega| \left[\Omega^2 + \text{sgn}(\beta_2) \Omega_c^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

که در آن:

$$\Omega_c^2 = \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2|} = \frac{4}{|\beta_2| L_{NL}} \quad (8)$$

است، می‌رسیم. توجه شود که در ساختار فیبر غیرخطی، براساس معادلات ملاک اصلی اثر غیر خطی، طول غیر خطی فیبر است که برابر عکس ضرب ضریب غیرخطی فیبر در توان بیشینه لیزر موج پیوسته است.

در حالت پاشندگی سرعت گروه عادی ($\beta_2 > 0$) عدد موج حقیقی بوده و جمله انحراف یک مد انتشاری با دامنه ثابت و فاز متغیر خواهد بود. اما در حالت پاشندگی سرعت گروه غیرعادی ($\beta_2 < 0$) و زمانیکه $\Omega_c^2 < \Omega^2$ ، عدد موج موهومی بوده و موجب افزایش دامنه انحراف در طی مسیر می‌شود. برای دستیابی به بهره «توان» در واحد طول کیلومتر، می‌توان نوشت:

$$g(\Omega) = 2\text{Im}(K) = |\beta_2 \Omega| \sqrt{(\Omega^2 - \Omega_c^2)^2} \quad (9)$$

که بیشینه آن در فرکانس:

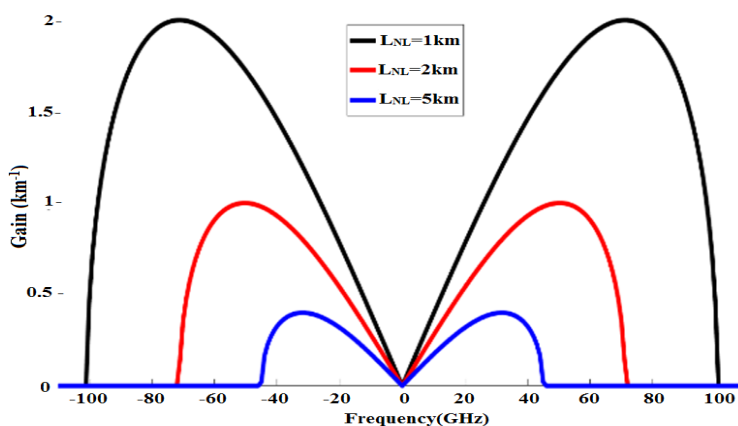
$$\Omega_{\max} = \pm \frac{\Omega_c}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2\gamma P_0}}{\sqrt{|\beta_2|}} \quad (10)$$

رخ می‌دهد که اندازه توان در آن برابر:

$$g_{\max} = 2\gamma P_0 = \frac{2}{L_{NL}} \quad (11)$$

خواهد بود که نشان می‌دهد بیشینه توان در واحد طول کیلومتر به پاشندگی بستگی نداشته تنها به طول غیرخطی بستگی دارد. شکل (۱) بهره توان در واحد طول کیلومتر را برای اندازه پاشندگی سرعت

$\beta_2 = -10 \frac{\text{ps}^2}{\text{km}}$ و طول‌های غیرخطی $L_{NL} = 1, 2, 5 \text{ km}$ نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمودار بهره ناپایداری مدولاسیون فیبر غیرخطی با پاشندگی سرعت گروه $\beta_2 = -10 \frac{\text{ps}^2}{\text{km}}$ و طول های غیر

$$L_{NL} = 1, 2, 5 \text{ km} \text{ خطی}$$

حال اگر انحراف از لیزر را به عنوان یک مدولاسیون بر روی موج لیزر در نظر گرفته شود، همانطور که از شکل پیداست، فیبر غیرخطی تحت ناپایداری مدولاسیون بسته به طراحی، یک بازه طیفی ویژه باند کناری مدوله شده را به طور همزمان تقویت کرده و فیلتری با تیزی مناسب نیز خواهد بود. این تقویت-فیلتر نیز تنها به کمک موج حامل لیزر صورت گرفته و نیازی به پمپ مجزا ندارد. این تقویت-فیلتر در فیبری به طول واحد غیرخطی ($L = L_{NL}$) برابر با ۸.۶۸ دسیبل ($10 \log(\exp(2)) = 8.68 \text{ dB}$) خواهد بود. نکته مهم و اساسی در این مورد این است که علاوه بر این موارد، فیبر تقویت کننده خود می تواند به عنوان محیط لینک و جابه جاگر سیگنال عمل کند. تقویت صورت گرفته توسط فیبر می تواند موجب نیاز به سطح ولتاژ نصف موج کمتری شده، عملکرد مدولاتور را به طور قابل توجه بهبود بخشد.

۱-۲ ناپایداری مدولاسیون و مدولاتور عملی

همانطور که بیان شد، یکی از چالش های اصلی مدولاتورهای عملی ماخ-ژندر بر پایه تحریک خط انتقال، بده بستان بین ولتاژ نصف موج و پهنای باند است [۱۷]. با وجود اینکه در مدارات الکترونیکی تولیدگر موج مدرن با افزایش پهنای باند، ولتاژ خروجی نیز به طور خطی کاهش می یابد اما به عکس در مدولاتورها با افزایش پهنای باند و فرکانس مرکز، ولتاژ نصف موج مورد نیاز افزایش (با توجه به رابطه $V_{\pi} L = \text{const.}$ که در آن L طول بازوی تحت اثر الکترواپتیک است. می توان نشان داد که با کاهش ولتاژ نصف موج طول بازو افزایش می یابد که موجب تلف پلاسمونیک الکترودهای تحریک افزایش یافته و پهنای باند کاهش می یابد. همچنین توجه شود که در حالت ولتاژ نصف موج ثابت، با افزایش فرکانس باند کناری، عمق مدولاسیون نیز کاهش می یابد که به دلیل افزایش تلف پلاسمونیک

با افزایش فرکانس است) می‌یابد. نشان داده شده است که در حالت ثابت نگه داشتن ولتاژ نصف موج، به کمک فیبر نوری تحت پدیده ناپایداری مدولاسیون می‌توان پهنای باند را به طور چشمگیری افزایش داد. همچنین برای طیف حول فرکانس بیشینه بهره، با افزایش عمق مدولاسیون (که در واقع معادل افزایش اندازه ضریب الکترواپتیک (r_{33}) است) می‌توان ولتاژ نصف موج مورد نیاز را به صورت:

$$V_{\pi,eff}(\omega_{rf}) = V_{\pi}(\omega_{rf}) \cdot G_{MI}^{1/2}(\omega_{rf}) \quad (12)$$

کاهش داد. توجه شود که این تقویت، وابسته به طول فیبر بوده و با افزایش طول فیبر، افزایش می‌یابد. معادله (۱۲) نشان می‌دهد که با ضریب جذر بهره توان در هر فرکانس باند کناری (ω_{rf})، می‌توان ولتاژ نصف موج مورد نیاز را به همان نسبت کاهش داد.

به همین منظور در کاربردهای راداری و فرستنده-گیرنده، با تقویت پالس قرارگرفته در باند کناری مدولاسیون، علاوه بر بهبود عملکرد مدولاتور با کاهش ولتاژ نصف موج، سیگنال ضعیف دریافتی را نیز می‌توان قابل شناسایی تر کرد. توجه شود که این تقویت پالس خوداتکا بوده و با طراحی ویژه توسط فیبری ویژه صورت می‌گیرد و نیازی به تقویت کننده یا پمپ جداگانه نیست و فیبر ویژه از توان لیزر حامل بهره گرفته و پالس را تقویت می‌کند. در کنار این موارد، در ساختارهای میکروویو فوتونیکي نرخ سیگنال به نویز به عکس توان دو ولتاژ نصف موج بستگی داشته که با توجه به کاهش آن، این نرخ با نسبت خوبی افزایش یافته و ظرفیت کانال را افزایش می‌دهد. برای پالس‌های با پهنای باند متفاوت نیازمند طراحی ویژه فیبر است.

در ادامه ابتدا در بخش سوم به بررسی و مقایسه پاسخ دو فیبر نوری ۱- با طراحی ویژه و ۲- ساده و متداول در بازار به نور مدوله شده با پالسی مشخص می‌شود و روابط قبلی راستی آزمایی می‌شود. در بخش چهارم و اصلی مقاله، این توانایی بهبود عملکرد و تقویت پالس مدوله شده بر روی لیزر موج پیوسته را به کمک یک شانه فرکانسی، به یک ساختار پیاده‌سازی تأخیرات واقعی زمان با دقت خوبی تعمیم داده می‌شود. با توجه به معادله (۳) به دلیل خطی بودن معادله، این تعمیم به راحتی قابل انجام است اما باید توجه شود که در ساده سازی‌های صورت گرفته برای رسیدن به فرم نهایی معادله پوش موج، از بعضی هارمونیک‌های غیرخطی با دامنه کم چشم پوشی شده است که می‌تواند در پاسخ نهایی یک ساختار با شدت غیرخطی بالا اختلال ایجاد کند. در حالت تک لیزر این چشم پوشی‌ها به دلیل کار در طیف مشخص، عدم نیاز به طیف دیگر هارمونیک‌ها و به کارگیری فیلتر، مشکلی ایجاد نمی‌کند. اما در حالت شانه فرکانسی، این هارمونیک‌ها می‌تواند بر روی پالس دیگر شانه‌ها تأثیر کمی بگذارد که با افزایش طول غیرخطی، این تأثیرات موج خرابی کمی بر روی پردازش اطلاعات از پالس‌ها شود. بنابراین

در این تعمیم، به دلیل اینکه در طول‌های غیرخطی گسترده ($\frac{L}{L_{NL}} \gg 1$) احتمال به هم ریختگی پاسخ ساختار به دلیل اضافه شدن طیف‌های فرکانسی و تداخل این فرکانس‌ها وجود دارد، تنها در طول‌های کمتر از ۴، ۵ برابر طول غیرخطی می‌توان با آسودگی بیشتر روابط تک لیزر را به شانه فرکانسی تعمیم داد. نتایج نیز نشان‌دهنده درستی این تعمیم است.

۳. بررسی و مرور عملکرد فیبر در ناپایداری مدولاسیون

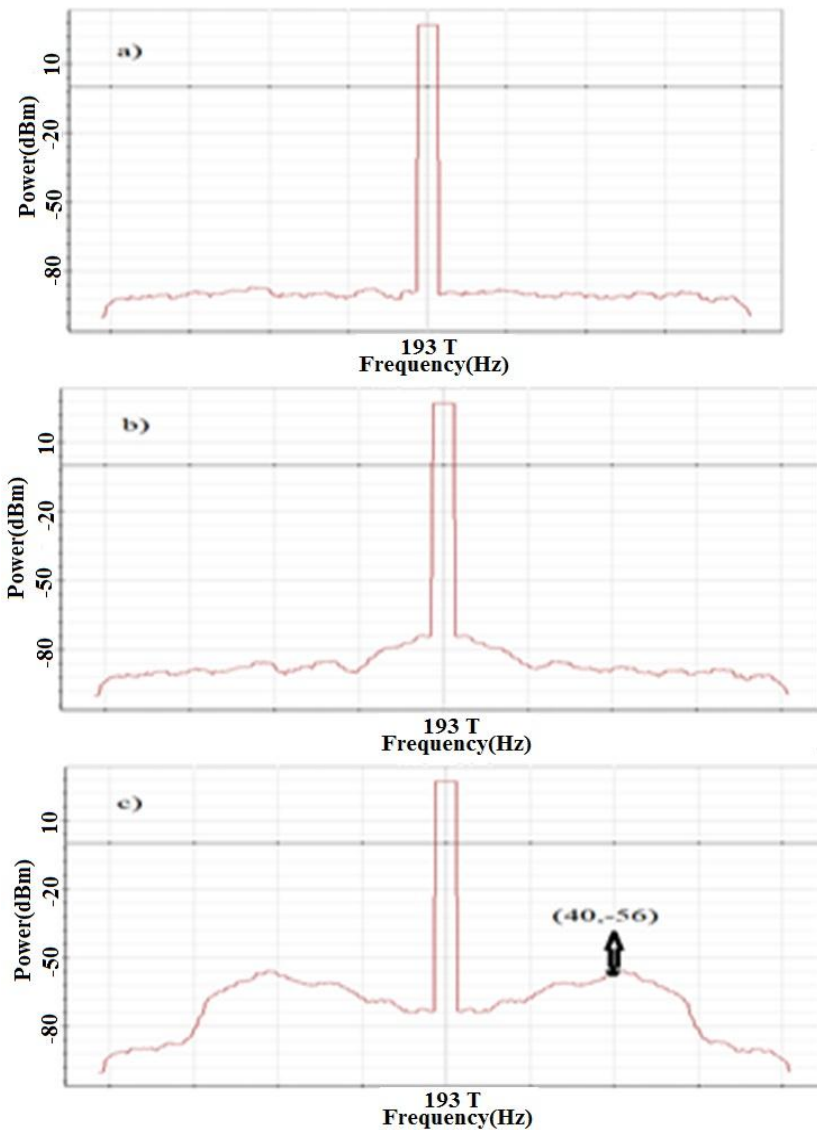
در این بخش تنها به صورت گذرا برای تدقیق مسئله، عملکرد و پاسخ دو فیبر ساده و تحت ناپایداری مدولاسیون بررسی می‌شود. در ابتدا پاسخ طیفی باند کناری دو فیبر را بررسی کرده و در انتها نیز پاسخ فیبرها به یک پالس گوسی مرور می‌شود. فیبری با اندازه پارامتر پاشندگی سرعت گروه $|\beta_2| = 20 \frac{\text{ps}^2}{\text{km}}$ و طول واحد غیرخطی ۱.۵ کیلومتر را در نظر بگیرید. در فیبر اول پاشندگی عادی بوده و پدیده ناپایداری مدولاسیون نداشته و انحراف از لیزر در نظر بدون بهره از فیبر عبور می‌کند اما در فیبر دوم پاشندگی غیرعادی بوده و پدیده فیزیکی ناپایداری مدولاسیون در آن جاری است. در اینجا برای طول ۴ برابر طول واحد غیرخطی در فیبر با پاشندگی غیرعادی:

$$10 \log(\exp(2(\frac{4L_{NL}}{L_{NL}}))) \approx 34 \text{dBm} \quad (13)$$

بهره را در فرکانس:

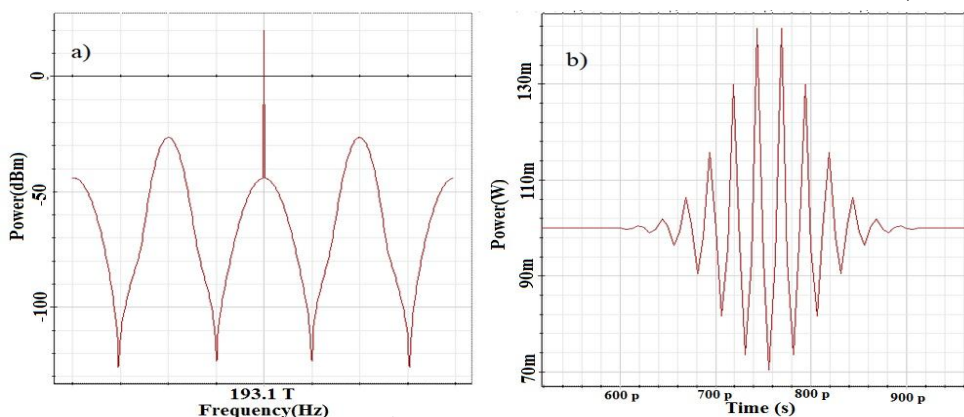
$$f_{\max} = (\frac{1}{2\pi}) \sqrt{\frac{2P_0\gamma}{\beta_2}} \approx 40 \text{GHz} \quad (14)$$

انتظار داریم. شکل (۲) پاسخ فیبرهای موردنظر به ورودی لیزر موج پیوسته دارای نویز کمابیش سفید در باند کناری آن را نشان می‌دهد. پاسخ‌ها، نشان از راستی روابط به دست آمده دارند. شکل (۲) نشان می‌دهد که در حالت فیبر ساده، باند کناری لیزر تقریباً دست نخورده (البته در حالت تلف صفر $\alpha = 0$) باقی می‌ماند اما در حالت فیبر ویژه با ناپایداری مدولاسیون، در نویز باند کناری تقویت قابل ملاحظه ۳۴ دسیبل را (حدوداً ۳۰۰۰ برابر) در پهنای باند قابل قبول دارد.

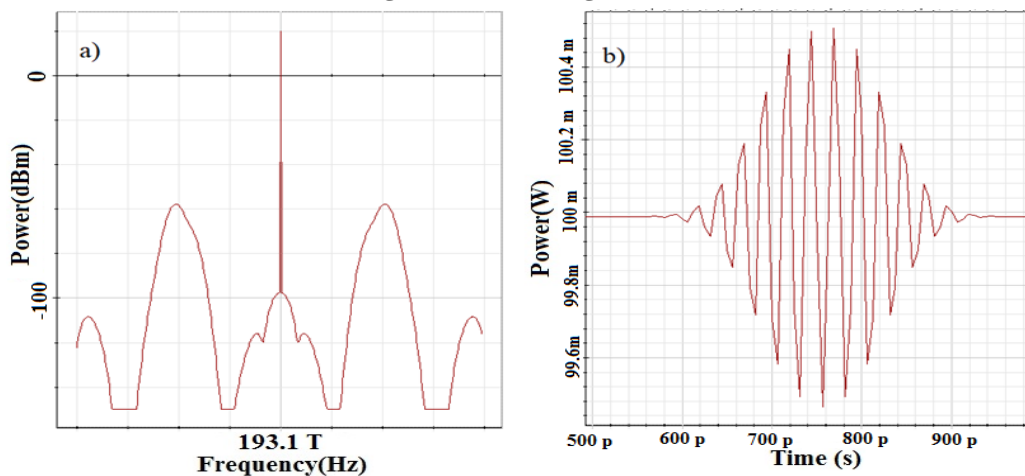


شکل ۲: پاسخ فیبرهای با اندازه پاشندگی سرعت گروه $20 \frac{ps^2}{km}$ و طول واحد غیرخطی ۱.۵ کیلومتر و طول ۶ کیلومتر به ورودی الف) لیزر با باند کناری شبه نویز سفید در دو حالت ب) فیبر ساده و پ) فیبر تحت ناپایداری مدولاسیون. در حالت پ همانطور که انتظار هست در فرکانس کناری ۴۰ گیگاهرتز، ۳۴ میلی دسیبل تقویت دارد. در ادامه پاسخ دو فیبر را برای ورودی پالس راداری (گوئی) بررسی می‌شود. در شکل (۳)، پاسخ فیبرهای ساده و تحت ناپایداری مدولاسیون شکل (۲) را برای ورودی پالس گوئی با پهنای باند ۶ گیگاهرتز نشان می‌دهد. در شکل (۴) کمی اعوجاج در پاسخ طیفی پالس مشاهده می‌شود. همچنین پالس زمانی در شکل (۴) کیش آمده است. با افزایش پهنای باند پالس، این اعوجاج بیشتر شده که به

طور نمونه در پهنای باند ۸ گیگاهرتز اعوجاج به گونه‌ای خواهد بود که حتی شکل پالس زمانی از دست رفته، بسیار کِش می‌آید و دارای بیشتر از یک بیشینه می‌شود که برای کاربردهای راداری به هیچ وجه مناسب نیست. در حالیکه در شکل (۵) مشاهده می‌شود که پاسخ طیفی باند کناری حدود ۳۴ دسیبل، طبق انتظار تقویت داشته، پاسخ طیفی به همان شکل گوسی باقی مانده است. برای نمونه پاسخ زمانی دو فیبر به ورودی پالس با پهنای باند ۴۲ گیگاهرتز در شکل (۶) با یکدیگر مقایسه می‌شود. شکل گویای خرابی پالس در فیبر عادی و ساده هست به گونه‌ای تقریباً برای کاربرد تصویربرداری بلااستفاده می‌باشد. اما در فیبر ویژه، علاوه بر بهره‌گیری قابل توجه پالس زمانی در حدود ۳۴ دسیبل، شکل پالس زمانی تقریباً دست نخورده باقی می‌ماند که نشان‌دهنده پهنای باند مناسب آن برای کاربردهای راداری با دقت بالا است.

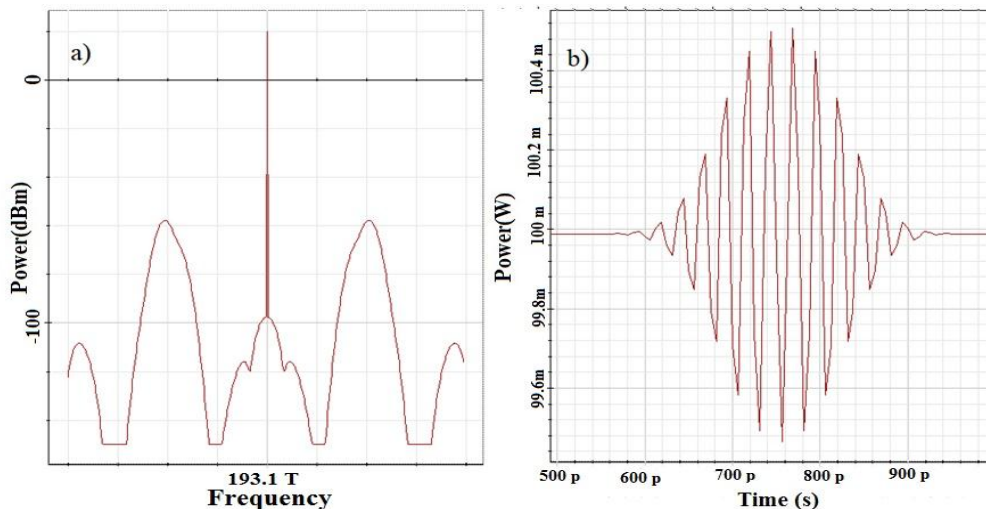


شکل ۳: ورودی پالس گوسی با پهنای باند ۶ گیگاهرتز در فرکانس مرکز ۴۰ گیگاهرتز مدوله شده بر روی لیزر حامل (الف) نمایش طیفی و (ب) نمایش پالس زمانی

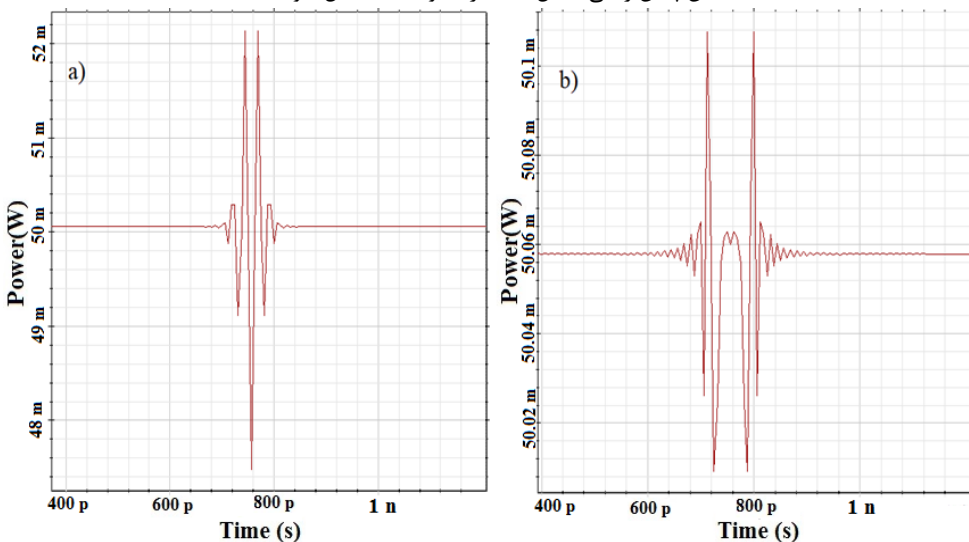


شکل ۴: پاسخ فیبر عادی و ساده شکل (۲) ب به ورودی پالسی شکل (۳) به دو صورت الف) نمایش طیفی و ب) نمایش

پالس زمانی. شکل نمایانگر کمی اعوجاج در پاسخ طیفی و همچنین کاهش دامنه پالس زمانی است



شکل ۵: پاسخ فیبر تحت ناپایداری مدولاسیون شکل (۲) پ به ورودی پالسی شکل (۳) به دو صورت الف) نمایش طیفی و ب) نمایش پالس زمانی. شکل نمایانگر حدود ۳۴ دسیبل تقویت است.

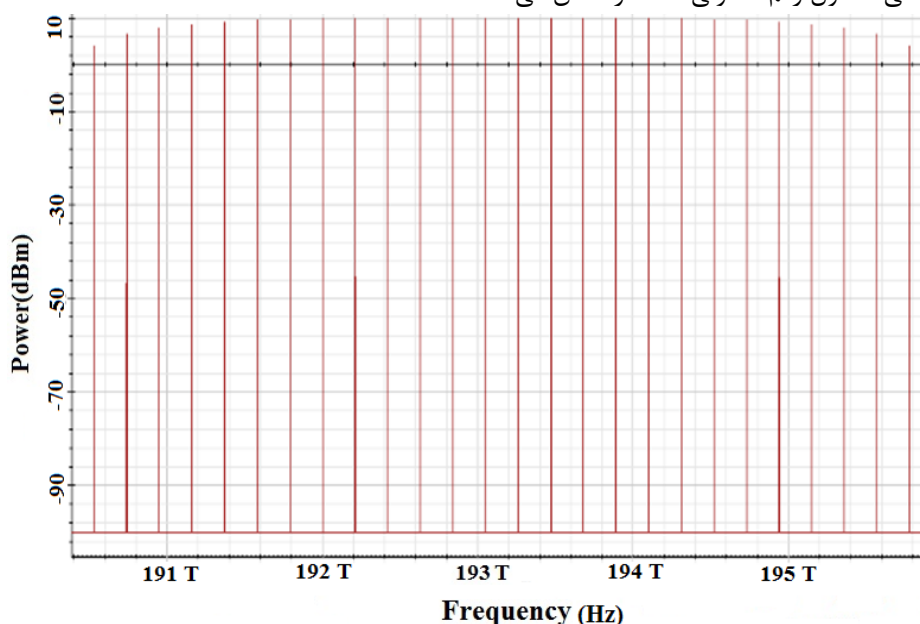


شکل ۶: مقایسه پاسخ پالس زمانی دو فیبر الف) ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون و ب) ساده و شکل (۲) به پالس ورودی با پهنای باند ۴۲ گیگاهرتز. خرابی و اعوجاج این پالس پهن باند در فیبر عادی مشهود است.

۴. پیاده‌سازی تأخیر واقعی زمان

در این بخش عملکرد دو فیبر نوری پاشنده و غیرخطی با اندازه پارامترهای یکسان اما با علامت پاشندگی ضد هم به عنوان ابزار محوری برای پیاده سازی تأخیر واقعی زمان در یک ساختار شانه فرکانسی مقایسه و بررسی می‌شود. در این نوع ساختارها، تفاوت فرکانس پالس‌هایی که بر روی هر شانه

فرکانسی مدوله می‌شود، در یک فیبر با پاشندگی مناسب موجب اختلاف زمانی بین پالس‌ها می‌شود. این اختلاف زمانی (تأخیر بین پالس‌ها) به اندازه پاشندگی، طول فیبر و اختلاف فرکانس طیف پالس‌ها بستگی دارد. در اولین مثال، فیبرهایی با اندازه پاشندگی سرعت گروه $20 \frac{\text{ps}^2}{\text{km}}$ و $|\beta_2|$ طول غیرخطی $L_{NL} = 7.65 \text{ km}$ را در نظر می‌گیریم. فیبرهایی با چنین مشخصات، در بازار وجود داشته و برای طول غیرخطی مشخص شده، ضریب غیرخطی فیبر $\gamma = 13.07 (\text{W.km})^{-1}$ و بیشینه توان لیزر موج پیوسته $P_0 = 10 \text{ mW}$ را می‌تواند داشته باشد. شکل (۷) شانه فرکانسی ورودی به فیبر نوری غیرخطی ساده و تحت پدیده ناپایداری مدولاسیون با فاصله طیفی بین شانه‌ها ۲۰۰ گیگاهرتز که برای شانه‌های فرکانسی معمول رقم معقولی است، را نشان می‌دهد.



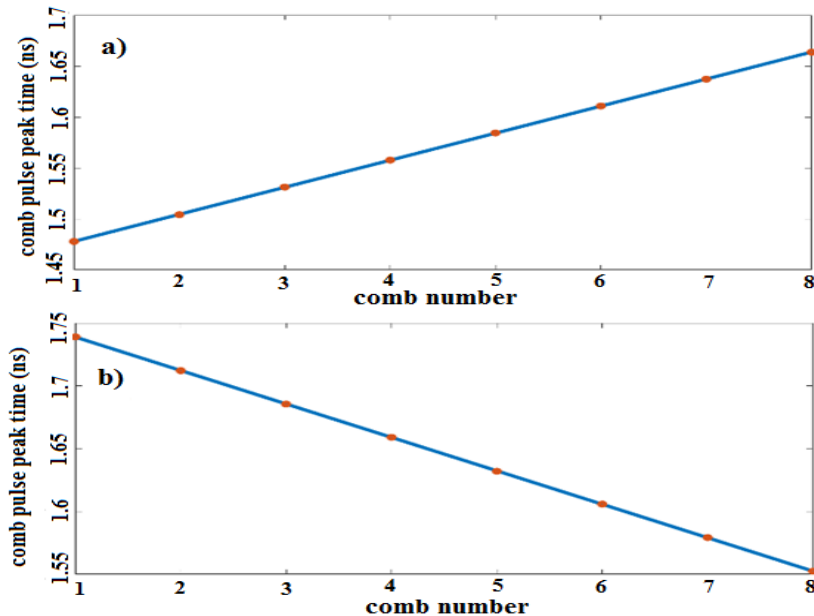
شکل ۷: شانه فرکانسی با فاصله طیفی بین شانه‌های ۲۰۰ گیگاهرتز که ۸ شانه مرکزی آن توان لیزری در حدود ۱۰ میلی‌وات دارند و به فیبرهای مورد بررسی وارد می‌شود.

شکل (۸) زمان خیز پالس‌های زمانی مربوط به شماره شانه مربوطه را برای پاسخ فیبرهای مورد نظر با ورودی شکل (۷) با طول یک کیلومتر را نشان می‌دهد. نمودار برازش پاسخ این دو فیبر نشان می‌دهد که در هر دو نمونه، اختلاف زمانی بین پالس‌های دو شانه فرکانسی کناری ثابت مانده، چه فیبر ساده و چه فیبر ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون به یک صورت وابسته به اندازه پاشندگی بوده که نشان‌دهنده آن است که پاسخ این دو فیبر به یک اندازه برای کاربردهای تأخیر واقعی زمان کاربرد دارند. برای کارکردهای تأخیر واقعی زمان راداری، که در آن آنتن‌های آرایه‌ای با پالس‌های دارای اختلاف زمانی ثابت نسبت به یکدیگر تحریک می‌شوند، زاویه مورد پوشش توسط آنتن‌ها را که وابسته به اختلاف زمان

بین دو آنتن کناری و هندسه آرایش آنتن‌هاست، در حالت قرارگیری با فاصله ثابت (d) آنتن‌ها در یک راستا را می‌توان به صورت [۳]

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\tau \cdot c}{d}\right) \quad (15)$$

به دست آورد که در آن زاویه نسبت به خط عمود بر راستای قرارگیری آنتن‌ها مشخص می‌شود.

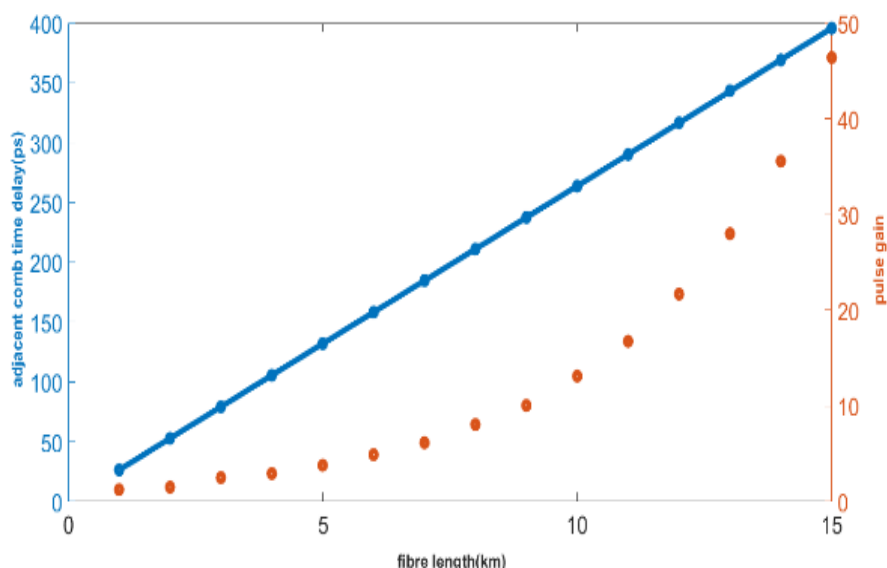


شکل ۸: نمودار زمان خیز پالس‌های زمانی مربوط به خروجی هر شانه فرکانسی (شکل (۲) در حالت فیبر الف) ساده و عادی و (ب) ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون. در هر دو تصویر، نمودار برازش تقریباً کاملاً بر روی نقاط قرار گرفته و اندازه شیب هر دو برازش برابر و مساوی با ۲۶.۶ پیکوثانیه بر هر شماره است. هر دو این فیبرها برای کاربرد تأخیر واقعی زمان مناسب است.

در این گونه رادارها برای پایش کامل فضا نیازمند دستیابی به یک طیف اختلاف زمانی ثابت بین دو آنتن هستیم. با توجه به ثابت ماندن گونه فیبر (پاشندگی) به کمک تغییر فاصله فرکانسی بین شانه‌ها و یا تغییر طول فیبر، اختلاف زمانی را می‌توان تغییر داد (EMBED Equation.DSMT4). در روش اول با کمک یک فیلتر بین شانه‌های فرکانسی گزینش انجام می‌دهیم. اما در اینجا با توجه به سادگی و کاربرد بیشتر روش دوم برای پیاده سازی، روش دوم را بررسی می‌کنیم.

شکل (۹) اندازه اختلاف زمانی ثابت برای طول‌های متفاوت در فیبر ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون را در کنار میزان تقویت پالس در هر طول را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار است با افزایش اختلاف زمانی، بهره پالس نیز افزایش یافته که موجب بهبود عملکرد مدولاتور و سامانه و شناسایی راحت‌تر

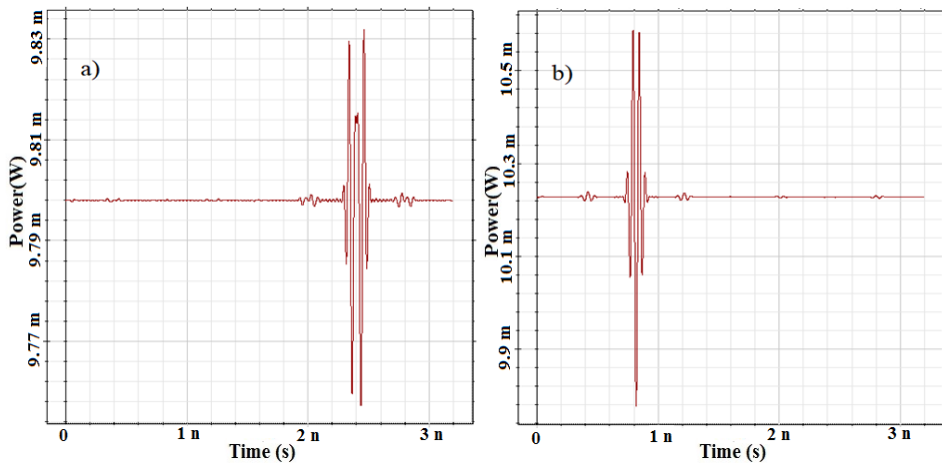
سیگنال دریافتی با وجود دست نخوردن و حتی کاهش اندازه ولتاژ نصف موج می‌شود. اندازه بهره در شکل نمایانگر درستی تعمیم انجام شده با تقریب خوبی است. توجه شود که با وجود افزایش طول فیبر و در نتیجه اثر غیرخطی فیبر، شکل پالس گووسی تقریباً دست نخورده باقی می‌ماند. اما در حالت فیبر ساده و عادی، با افزایش طول فیبر شکل پالس گووسی به سرعت تغییر کرده به گونه‌ای که شکل اولیه را تقریباً از دست داده به طوریکه برای کاربرد راداری بلااستفاده می‌شود. شکل (۱۰) پاسخ پالس زمانی دو فیبر نوری با طول ۱۰ کیلومتر به ورودی شانه فرکانسی شکل (۷) مدوله شده با پالس به پهنای باند ۱۰ گیگاهرتز در فرکانس مرکز ۱۸ گیگاهرتز برای شانه فرکانسی شماره ۷ را با یکدیگر مقایسه می‌کند. از شکل پیداست که در فیبر ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون علاوه بر تقویت مناسب پالس زمانی، شکل و فاز اولیه پالس را حفظ می‌شود اما در فیبر عادی و ساده، علاوه بر کمی کاهش دامنه پالس، شکل پالس نیز به گونه‌ای تغییر کرده که برای کاربرد تصویربرداری تقریباً بلااستفاده شده است.



شکل ۹: شانه اختلاف زمانی پالس تحریک آنتن‌های کناری برای طول‌های ۱ تا ۱۵ کیلومتر از فیبر نوری ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون که با ورودی شکل (۷) تغذیه می‌شود. شکل نمایانگر افزایش خطی اختلاف زمانی با افزایش طول فیبر است که پیش‌بینی پذیری آنرا افزایش می‌دهد. همچنین شکل نشان دهنده تقویت فزاینده پالس تصویربرداری با افزایش طول فیبر است. برای طول ۱۵ کیلومتر که بدترین حالت آن است ما انتظار $e^{3.92} = 50$ بهره داریم که با تقریب خوبی ($\pm 6\%$) در اینجا محقق شده است.

در اینجا تنها تا ۱۵ کیلومتر پاسخ فیبر ویژه را بررسی می‌شود که دلیل آن ایجاد تصویرهای کوچکتر از پالس اصلی در فواصل زمانی مشخص نسبت به پالس اصلی به دلیل پاسخ پاشندگی هارمونیک‌های ایجاد شده توسط غیرخطی است. این مسئله به تغییر پاشندگی مؤثر فیبر برای فرکانس‌های مختلف نیز بستگی دارد [۲۴]. هرچه طول فیبر افزایش یابد بر دامنه این تصاویر تنها به دلیل اثر غیرخطی (و نه

ناپایداری مدولاسیون) افزوده می‌شود. بنابراین افزایش طول را تا جایی ادامه می‌دهیم که دامنه پالس- تصویر تا ۷۰ درصد دامنه پالس زمانی ورودی برسد تا از ایجاد اختلال و خطا در عملکرد تصویربرداری جلوگیری شود. این تصاویر در شکل (۱۰) نمایان است که در آن تصاویر پالس در فیبر ویژه هم شکل پالس اولیه است اما در فیبر عادی دارای اعوجاج بسیار است. توجه شود که یکی از دلایل اصلی اعوجاج کم در فیبر ویژه، مسئله شبه سالیتون بودن پالس ورودی برای فیبر ویژه است.



شکل ۱۰: بررسی پاسخ پالس زمانی دو فیبر عادی و ساده و (ب) ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون با طول ۱۰ کیلومتر به ورودی شکل (۷) مدوله شده با پالس گووسی به پهنای باند ۱۰ گیگاهرتز در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز در شانه فرکانسی شماره ۷. شکل نمایانگر تقویت پالس در فیبر ویژه در عین حفظ شکل و فاز اولیه پالس است.

در این بخش تنها مثالی از یک ساختار پیاده‌سازی تأخیر واقعی زمان را بررسی می‌شود. اما در عمل برای ساختارهای متفاوت با پارامترهای نوری متفاوت (مانند پهنای باند پالس، فرکانس کاری، خصایص فیبر، توان لیزر، مشخصات شانه فرکانسی و ...) نیازمند طراحی ویژه هست که با توجه به ویژگی غیرخطی بودن ساختار پیشنهادی نیازمند در نظرگیری ملاحظاتی هستیم.

در اینجا طراحی سامانه مقید به پارامترهای فیبر، شانه فرکانسی و منابع لیزری اند. طول غیر خطی و اندازه پاشندگی دو پارامتر اصلی و محدودکننده فیبر است^۱. این دو پارامتر، محل و پهنای باند پالس مورد استفاده را مشخص می‌کنند. پارامتر بعدی محدود کننده، فاصله فرکانسی بین شانه‌ها است. در سامانه پیشنهادی، اندازه کوچکترین واحد تاخیر وابسته به اندازه پاشندگی، طول فیبر و FSR است. هرچه اندازه این پارامترها کمتر باشد، اندازه تاخیر واحد کمتر شده و در نتیجه طبق رابطه (۱۵) تعداد گام‌های زاویه‌ای مورد پایش توسط سامانه راداری یا تصویربرداری بیشتر و این گام‌ها کوتاه‌تر می‌شوند

توجه شود که توان لیزر (بسته به منبع لیزر) و ضریب غیر خطی نیز به طور غیرمستقیم در روابط تاثیر گذارند اما طول^۱ غیرخطی، طراحی اصلی فیبر نوری را تشکیل می‌دهد

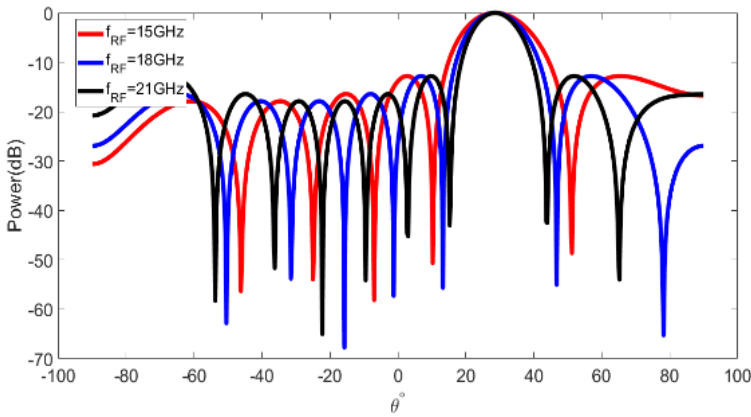
که در دقت زاویه‌ای رادار تصویربرداری مؤثر است. از طرف دیگر هرچه طول غیرخطی مؤثر فیبر بیشتر باشد، بهره سامانه بیشتر شده و سطح پالس بالاتر می‌آید. بنابراین اولین چالش، بده بستان بین بهره و اندازه کوچکترین تأخیر واقعی زمان است که با افزایش یکی، دیگری افزایش می‌یابد و بسته به شرایط سامانه راداری-تصویربرداری، وزنه را در طراحی به سمت یکی از این دو می‌توان سنگین کرد. همچنین با توجه به کاهش پهنای باند پاسخ بسته به محل بیشینه بهره، با کاهش فرکانس بیشینه، بیشترین پهنای باند مجاز قابل استفاده نیز کاهش می‌یابد که برای کاربردهای نیازمند پهنای باند گسترده مناسب نیست. فرکانس بیشینه بهره در پدیده ناپایداری مدولاسیون، به عکس ضرب پاشندگی در طول غیرخطی بستگی دارد. از طرفی با کاهش اندازه پاشندگی، علاوه بر کاهش تأخیر زمان، فرکانس مکان بیشینه بهره ناپایداری مدولاسیون افزایش می‌یابد که خود موجب افزایش پهنای باند پالس می‌شود. همچنین این افزایش فرکانس، موجب نزدیکی بیشتر شانه‌های فرکانسی به پالس راداری می‌شود. در نگاه اول به نظر نمی‌آید که این مسئله موجب خرابی کارکرد سامانه شود. اما با توجه ماهیت غیرخطی سامانه، نزدیکی پالس به شانه فرکانسی بعدی، موجب کنش توان بیشتر بین این دو شده و اعوجاج و خرابی بیشتر پالس در طول‌های کوتاه‌تر می‌شود و موجب ناهمسانی پالس‌های زمانی از منظر توان و دامنه می‌شود که موجب به هم ریختگی پاسخ آنتن‌های آرایه‌ای می‌شود. بنابراین با افزایش فرکانس مکان بیشینه بهره، FSR نیز باید مورد بازبینی و بازطراحی قرار گیرد و بزرگتر خواهد شد که خود موجب کاهش تأخیر واقعی زمان می‌شود.

ویژگی‌های نوری غیرخطی فیبر تنها وابسته به طول غیرخطی هستند. بنابراین با توجه به اینکه توان لیزر باید به اندازه تعداد شانه‌ها در سامانه اعمال شود در حالیکه تنها نیاز به یک فیبر پاشنده ویژه تحت ناپایداری مدولاسیون هست، می‌توان با افزایش اندازه ضریب غیر خطی فیبر جبران‌ساز، اندازه توان لیزر را برای مصارف عملی کاهش داد بدون آنکه در پاسخ سامانه تأثیر به‌سزایی گذارده شود. با این کار، پیاده‌سازی سامانه ساده‌تر خواهد شد.

۴-۱ بررسی عملکرد تابشی آنتن‌های آرایه‌ای تأخیر واقعی زمان تحت فیبر ویژه

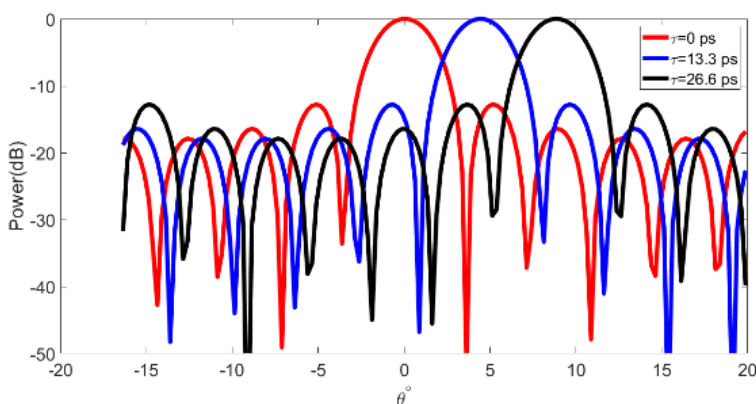
در این بخش با توجه به نتایج بخش ۴، عملکرد تابشی آنتن‌های آرایه‌ای تأخیر زمان را بررسی می‌شود. همانطور که شرح داده شد، برای دستیابی به راستای بیم متفاوت، نیاز به دگرگون‌سازی اندازه تأخیر زمان است. روش‌های مختلفی برای این هدف پیشنهاد شده که روش به کارگیری کلید برای انتخاب میناهای ۲ از طول واحد L فیبر یکی از برترین و ساده‌ترین روش‌هاست. در این روش با ترکیب کلیدها و طول‌های مضرب دو از طول واحد (به عنوان مثال برای طول واحد L و طول‌های $L, 2L, 4L, 8L, 16L$) می‌توان به برنامه‌ریز ساختار (مدارات منطقی و پردازنده) توانایی پیاده‌سازی طول‌های پیوسته تا $L = 31L$ را داد. روش دیگر نیز می‌تواند به کارگیری یک چرخه فیبری با کلید هماهنگ باشد که در آن کلید متناسب با زمان چرخش نور در حلقه عمل کرده و برای پیاده‌سازی طول‌های

مختلف، می‌تواند بارهای چرخش را تنظیم کند. در این روش‌ها با تنظیم کلید می‌توان طول مؤثر فیبر و در نتیجه اندازه تأخیر زمان تحریک دو آنتن کناری و در انتها زاویه پویس آنتن‌ها را تغییر داد. با فرض طول واحد $L = 0.5\text{km}$ ، (واحد تأخیرات واقعی زمان 13.3 پیکو ثانیه می‌باشد) الگوی تشعشی تعداد ۸ آنتن آرایه‌ای تأخیر واقعی زمان با به کارگیری ساختار پیشنهادی را بررسی می‌شود. در ابتدا مسئله لوچی بیم برای یک ساختار با پالس ۶ گیگاهرتزی در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز را بررسی می‌شود. شکل (۱۱) الگوی تشعشع آنتن‌ها [۳] را برای ۳ فرکانس ابتدا، وسط و انتهای پالس نشان می‌دهد. دیده می‌شود که هر سه فرکانس مهم در یک راستا منتشر می‌شود که نشان دهنده عدم لوچی بیم در این ساختار پیشنهادی است.



شکل ۱۱: الگوی تشعشی آنتن‌های آرایه‌ای با تحریک تأخیر واقعی زمان برای ۳ فرکانس مختلف. فاصله بین آنتن‌ها برابر با نصف طول موج در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز است.

در شکل (۱۲) حساسیت راستای بیم آنتن‌های آرایه‌ای ساختار پیشنهادی به تغییرات اندازه تأخیر (به تبع تغییر طول) را نشان می‌دهد. فاصله بین آنتن‌ها برابر با $d = \frac{\lambda_{rf}(18\text{GHz})}{2}$ می‌باشد. برای کوچک سازی گام‌های بین راستای بیم‌ها، با توجه به رابطه (۱۵) می‌توان اندازه فاصله بین آنتن‌ها را افزایش داد که با توجه به این افزایش، تناوب الگوی تشعشی نیز تغییر کرده که باید مورد توجه قرار بگیرد.



شکل ۱۲: الگوی تشعشی آنتن آرایه‌ای برپایه تأخیر زمان پیشنهادی برای تأخیرات $\tau = 0, 13.3, 26.6$ ps ($L=0, 0.5, 1$ km) و فاصله بین آنتن‌های شکل (۱۱)

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به کمک نوع خاصی از فیبرهای نوری تحت پدیده ناپایداری مدولاسیون، تأخیرات واقعی زمان بر پایه به کارگیری پاشندگی فیبر و شانه فرکانسی بررسی شده است. نشان داده شد که این فیبرها نسبت به فیبرهای ساده از جهت پهنای باند قابل دستیابی در کاربردهای رادار-تصویربرداری مبتنی بر پالس بسیار عملکرد بهتری داشته و شکل و فاز پالس اولیه را بهتر حفظ می‌کند. علاوه بر این، فیبرهای مورد بررسی علاوه بر ایجاد تأخیر واقعی زمان، سطح سیگنال پالسی را بدون به کارگیری موج پمپ جانبی و بدون بهره‌دهی به سیگنال حامل، به اندازه بسیار خوبی افزایش داده به گونه‌ای که برای کاربردهای تصویربرداری می‌تواند قابلیت شناسایی و تشخیص پالس برگشتی را بسیار افزایش دهد. اندازه و عملکرد این ناپایداری مدولاسیون با کمک پاسخ تک لیزر فیبر ویژه با تقریب بسیار خوبی قابل تعمیم است. این تقویت خود اتکای پالس، همچنین موجب نیاز به ولتاژ نصف موج کوچکتری در ساختارهای مدولاتور می‌شود که خود برای کاربردهای آتی پهن باند بسیار مناسب است. در انتها نیز پاسخ آنتنی ساختار بررسی شد که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول آن در کاربردهای رادار-تصویربرداری بود. با این توصیفات، ساختار پیشنهادی در حوزه پیاده‌سازی تأخیر واقعی زمان نسبت به ساختارهای قبلی بر مبنای فیبرهای ساده و عادی عملکرد بسیار بهتر و مناسب‌تری را دارد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تشکر و قدردانی

از تمامی دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه پدافند هوایی خاتم النبیه(ص) که در این پژوهش به عنوان نمونه پژوهش حضور داشتند، تشکر و قدردانی مینمایم.

۶. مراجع

- [1] C. Balanis, *Antenna Theory, Analysis, and Design*, 4thed. New York: Wiley, 2016.
- [2] Stutzman, Warren L., and Gary A. Thiele. *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] Longbrake, Matt. "True time-delay beamsteering for radar." In *2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, pp. 246-249. IEEE, 2012.
- [4] A. W. Rihaczek, *Principles of High-Resolution Radar*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1969.
- [5] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2001.
- [6] X. Xue et al., "Microcomb-based true-time-delay network for microwave beamforming with arbitrary beam pattern control," *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, no. 12, pp. 2312–2321, Jun. 15, 2018.
- [7] X. W. Ye, F. Z. Zhang, and S. L. Pan, "Optical true time delay unit for multi-beamforming," *Opt. Express*, vol. 23, no. 8, pp. 10002–10008, Apr. 20, 2015.
- [8] X. Y. Xu et al. "Photonic microwave true time delays for phased array antennas using a 49 GHz FSR integrated optical micro-comb source," *Photon. Res.*, vol. 6, no. 5, pp. 1–6, May 2018.
- [9] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 319–330, June 2007.
- [10] J. Capmany, J. Mora, I. Gasulla, and J. Sancho, "Microwave photonic signal processing," *J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 571–586, 2013.
- [11] R. A. Minasian, "Photonic signal processing of microwave signals," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 2, pp. 832–846, Feb. 2006.
- [12] S. K. Garakoui, "Wideband RF beamforming: Architectures, time-delays and CMOS implementations," *Universiteit Twente, Enschede, The Netherlands, Tech. Rep.*, 2015. doi: 10.3990/1.9789036539012.

- [13] F. M. Soares, "Photonic integrated true-time-delay beamformers in InP technology," Ph.D. dissertation, Eindhoven Univ. Technol., Eindhoven, The Netherlands, 2006.
- [14] J. Capmany, B. Ortega, and D. Pastor, "A tutorial on microwave photonic filters," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 201–229, Jan. 2006.
- [15] R. Rotman, M. Tur, and L. Yaron, "True Time Delay in Phased Arrays", IEEE Proc., vol. 104, no. 3, pp. 504-518, Mar. 2016.
- [16] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. New York: Wiley, 1991.
- [17] C. H. Cox III, E. I. Ackerman, G. E. Betts, and J. L. Prince, "Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 54, no. 2, pp. 906–920, Feb. 2006.
- [18] W. B. Bridges, F. T. Sheehy, and J. H. Schaffner, "Velocity-matched electro-optic modulator," SPIE, San Jose, CA, vol. 1371, pp. 68-77, Sept. 17-18, IY90
- [19] R. Alferness, S. Korotky and E. Marcatili, "Velocity-matching techniques for integrated optic traveling wave switch/modulators," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 20, no. 3, pp. 301-309, March 1984.
- [20] J. Y. Wu, J. L. Liu, T. T. Zhou, S. H. Bo, L. Qiu, Z. Zhen and X. H. Liu, "Enhanced electro-optic coefficient (r_{33}) in nonlinear optical chromospheres with novel donor structure," in *Rsc Advances*, vol. 2, no. 1, pp. 1416-1423, 2012.
- [21] J.-L. Gheorma and R. M. Osgood, "Fundamental limitations of optical resonator based high-speed EO modulators," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 795–797, Jun. 2002.
- [22] S. Qin and Y. E. Wang, "Parametric conversion with distributedly modulated capacitors (DMC) for low-noise and non-reciprocal RF front-ends," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Seattle, WA, Jun. 2013.
- [23] G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. 6th ed. New York: Academic, 2019.
- [24] F.Kh.Abdollaev, "Modulational instability of electromagnetic waves in inhomogeneous and in discrete media," in *Progress in Optics*, vol. 44, E.Wolf. Amsterdam: elsevier, 2002.
- [25] J. M. Dudley, F. Dias, M. Erkintalo, and G. Genty, "Instabilities, breathers and rogue waves in optics," *Nature Photonics*, vol. 8, pp. 755-764, 2014.