Research Paper

Technical Design of Microwave Optical Oscillators in Radar Systems[1]

Ali Mahmoudloo [2]

Received: 2022.05.27
Revised: 2022.07.24
Accepted: 2022.09.28

Abstract

The emerging new concepts and technologies based on microwave photonics have led to an ever-increasing interest in developing innovative radar systems with a net gain in functionality, bandwidth/resolution, size, mass, complexity, and cost when compared with traditional implementations. This paper describes the techniques developed in the last few years in microwave photonics that might revolutionize the way to design multifunction radar systems. Here, the emphasis is on the recent advances in optoelectronic oscillators, arbitrary waveform generation, photonic mixing, phase coding, filtering, beamforming, analog-to-digital conversion, and stable radio-frequency signal transfer. Challenges in the implementation of these components and subsystems for meeting the technical requirements of the multifunction radar applications are discussed.

Keywords: *Optical Oscillator, Microwave Modulators, Photonics Processing, Optoelectronic Oscillator.*

[1] DOI: 10.22051/ijap.2022.40521.1283
[2] Assistant Professor, Department of Basic Science, Farhangian University, Tehran. Iran. Email: a.mahmoodlou@cfu.ac.ir

مقالهٔ پژوهشی

طراحی فنی نوسانگرهای نوری ریزموج در سامانه‌های راداری[1]

علی محمودلو[2]

فصلنامهٔ علمی فیزیک کاربردی ایران
دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه الزهرا
سال دوازدهم، پیاپی ۳۱، زمستان ۱۴۰۱
صص ۷۶ - ۸۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶

چکیده:

مفاهیم و فناوری‌های نوظهور مبتنی بر فوتونیک ریزموج منجر به علاقه روزافزون به توسعه سامانه‌های راداری نوآورانه با سود خالص در عملکرد، پهنای باند/ رزولیشن، اندازه، جرم، پیچیدگی و هزینه در مقایسه با پیاده‌سازی‌های سنتی شده است. در کار حاضر، روش‌های توسعه یافته در چند سال اخیر در فوتونیک ریزموج که ممکن است روش طراحی سامانه‌های رادار چند منظوره را دگرگون سازند، بیان می‌شود. پیشرفت‌های اخیر شامل نوسانگرهای نوری، تولید شکل موج دلخواه، ترکیبات فوتونیکی، کدگذاری فاز، فیلتر کردن، شکل‌دهی پرتو، تبدیل آنالوگ به دیجیتال و انتقال سیگنال بسامد رادیویی پایدار است. در نهایت، چالش‌های پیاده‌سازی این اجزا و زیر سامانه‌ها برای برآوردن نیازهای فنی کاربردهای رادار چند منظوره مورد بحث قرار می‌گیرند.

واژگان کلیدی: *نوسانگر نوری، مدوله ساز ریزموج، پردازش فوتونیکی، نوسانگر الکترونیک نوری.*

---

[1] DOI: 10.22051/ijap.2022.40521.1283

[2] استادیار، گروه علوم پایه، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. Email: a.mahmoodlou@cfu.ac.ir

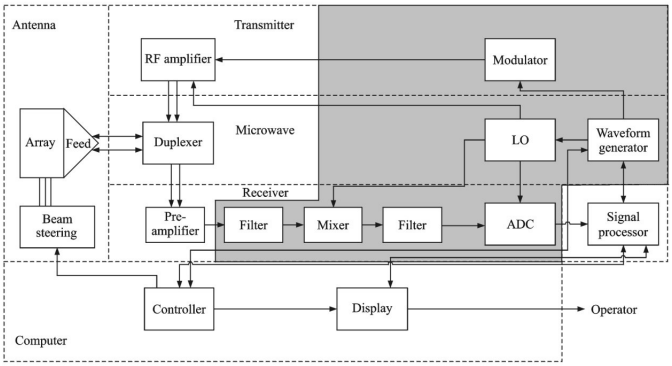
۱. مقدمه

از رادارها استفاده‌های نوظهور بسیار متفاوتی چون هدایت ترافیک هوایی، رادارهای نجومی، رادارهای دریایی برای مکان‌یابی مکان‌های دیدنی، کشتی‌ها، سامانه‌های ضد برخورد هواپیما وخودرو، نظارت بر فضای بیرونی و سامانه‌های قرار ملاقات، نظارت بر بارش‌های هواشناسی، سامانه‌های ارتفاع سنجی و هدایت پرواز، رادارهای دقیق برای مشاهدات زمین‌شناسی و سامانه‌های نظامی برای جستجوی گسترده، ردیابی هدف و هدایت آتش می‌شود [۱]. در یک طرح ممکن است چندین مورد از عملکردهای بالا مورد نیاز باشد. با این حال، به دلیل نیازهای متفاوت نوار بسامد، پهنای نوار، شکل موج و روش پردازش سیگنال، بیشتر این توابع تنها با استفاده از یک سامانه الکترومغناطیسی جداگانه امکان اجرا دارند. این امر مشکلات زیادی از جمله افزایش وزن و اندازه، افزایش انسداد آنتن، تداخل الکترومغناطیسی، افزایش سطح مقطع رادار و مسائل مربوط به تعمیر و نگهداری را به همراه دارد. چرا که هر سامانه با مجموعه ویژه خود از قطعات یدکی، اپراتورها و اجزا امکان تعمیر دارد [۲].

شکل (۱) طرحی از یک سامانه راداری معمولی را نشان می‌دهد که شامل نوسانگرهای محلی[1] ، ژنراتورهای موجی، مدوه سازها، فیلترها، میکسرها، تقویت کننده‌ها، آنتن‌ها، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال[2] ، پردازنده‌های سیگنال، رایانه‌ها و منابع تغذیه می‌باشد. اگر بیشتر این اجزا در رادارها با عملکردهای مختلف (بیشتر در باندهای بسامدی متفاوت) وجود داشته باشد، طراحی رادار چند منظوره با کاهش حجم، وزن، قدرت، هزینه و تقاضا برای اپراتورهای انسانی امکان‌پذیر خواهد بود [۳]. با این حال، برای فناوری‌های الکترونیکی پیشرفته مشکل‌ساز است که اجزای ریزموج را در باندهای بسامدی متعدد بدون تضعیف عملکرد، به کار گیرند. افزون بر این، کالیبراسیون سامانه یک مسئله حیاتی می‌باشد چراکه سامانه‌های الکتریکی همواره تلفات سامانه‌ای، تغییر فاز و ضرایب انعکاس متفاوت در باندهای بسامدی مختلف دارند. برای حل این مشکلات، بسیاری از فناوری‌های ریزموج، از میکسرهای چند بانده، گیرنده، فرستنده گیرنده تا آشکارسازها و آنتن‌ها وجود دارد [۴]. اگرچه همه آن‌ها در هزینه، اندازه، پیچیدگی، تداخل الکترومغناطیسی یا مصرف برق نیز افزایش قابل توجهی پیدا کرده‌اند. در این میان مفاهیم و فناوری‌های نوین مبتنی بر فوتونیک ریزموج منجر به توسعه سامانه‌های راداری جدید شده است که از دیدگاه عملکرد ، پهنای باند، قابلیت وضوح، اندازه، جرم، پیچیدگی و هزینه برتری یافته‌اند.

[1] Local oscillators (Los)
[2] Analog to digital converters (ADC)

از سوی دیگر، فوتونیک ریزموج، که فرصت‌های جدیدی را برای متحول کردن اجزا و سامانه‌های مایکروویو به ارمغان آورده است، در ۳۰ سال گذشته به طور قابل‌توجهی از نظر دامنه و بلوغ فنی تکامل یافته است [۵]. فوتونیک ریزموج یک دانش بین رشته‌ای است که برهمکنش بین امواج ریزموج وامواج نوری برای تولید، پردازش، هدایت، توزیع و اندازه‌گیری ریزموج‌ها، امواج میلی‌متری با بسامد تراهرتز را مورد مطالعه قرار می‌دهد. دانش فوتونیک ریزموج به دلیل داشتن پهنای نواری وسیع، تلفات کم، وزن سبک، پاسخ بسامدی صاف و ایمنی در برابر تداخل الکترومغناطیسی بیان شده به دست فناوری‌های فوتونیکی، از اهمیت به سزایی برخوردار است. همچنین، فوتونیک ریزموج امکان اجرای نوآورانه رادار قابل تنظیم نوارهای چندگانه را با ارزش افزوده قابل توجهی فراهم کرده است.



شکل ۱ طرح سامانه رادار موضعی [۲].

در اوایل دهه ۱۹۹۰، تلاش‌های قابل‌توجهی برای بکارگیری فناوری‌های فوتونیک ریزموج در سامانه‌های رادار انجام شده است که شامل آزمایش‌هایی برای ساخت رادار با آرایه فازی بر اساس تأخیر زمانی فوتونیکی و پیشنهاداتی برای ساخت بسامد رادیویی فوتونیکی است [۶]. در سال ۲۰۰۹، شورای پژوهش‌های اروپا پروژه ای به عنوان "رادار تمام دیجیتال مبتنی بر فوتونیک[1] " طراحی کرد که به مطالعه، طراحی و پیاده‌سازی نمایشگر رادار گیرنده تمام دیجیتال مبتنی بر فناوری فوتونیک و همچنین برای تولید سیگنال و پردازش سیگنال دریافتی پرداخته است. رادار فوتونیک در یک آزمایش میدانی در بندر لیورنو ایتالیا ساخته و نشان داده شد. بر اساس PHODIR، پروژه دیگری

[1] Photonics-based fully digital radar system (PHODIR)

به نام "طراحی رادار مبتنی بر فوتونیک پیش صنعتی[1] " به تازگی راه‌اندازی شده است که هدف آن رسیدگی به پژوهش‌های کاربردهای ویژه برای امنیت فرودگاه است. همچنین، در برنامه چارچوب هفتم اروپا برای استفاده نسل‌های بعدی، در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۲ تا اکتبر ۲۰۱۵ پیش‌بینی شد که فناوری‌های فوتونی مورد نیاز در سامانه‌های آنتن آرایه‌ای توسعه داده شود [۷].

در این مقاله، فناوری توسعه‌یافته در چند سال گذشته در فوتونیک ریزموج که روش طراحی سامانه‌های راداری نوین را تغییر خواهد داد، بررسی می‌شود. پیشرفت‌های کنونی در نوسانگرهای نوری، تولید شکل موج دلخواه، ترکیبات فوتونیک، کدگذاری فاز، فیلتر کردن، شکل‌دهی پرتو، تبدیل آنالوگ به دیجیتال و انتقال سیگنال با بسامد رادیویی پایدار شرح داده شده است. همچنین چالش‌های پیاده‌سازی این اجزا و زیر سامانه‌ها برای برآورده کردن نیازهای صنعت راداری مورد بررسی قرار گرفته است.

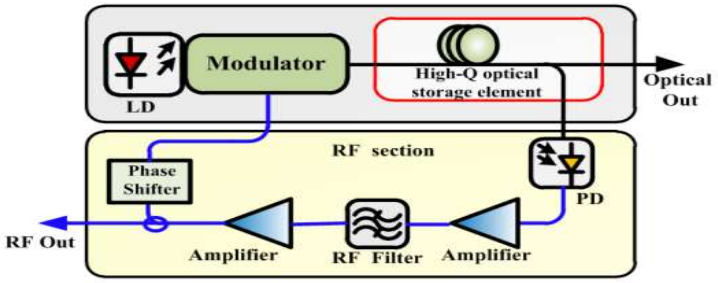
۲. طراحی فوتونیکی و مدل‌سازی

توان یک رادار پیشرفته برای شناسایی سیگنال‌های کم ارزش در محیط شلوغ و نوفه مزاحم به کیفیت سیگنال ارسالی، گیرنده و پردازش داده‌ها بستگی دارد. به عنوان مهم‌ترین بخش در رادارهای نوین (همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است)، ژنراتور ریزموج نه تنها کیفیت سیگنال با بسامد رادیویی فرستنده و سیگنال بسامد متوسط[2] گیرنده را تعیین می‌کند، بلکه به عنوان یک اپراتور زمان نیز عمل می‌کند. همچنین ژنراتور ریزموج برای پیمانه‌های پردازش سیگنال، که به عنوان مثال تاخیر سیگنال برای استخراج اطلاعات محدود را اندازه گیری می‌کند، ابزار استانداردی به شمار می‌رود. در سامانه‌های راداری پیشرفته، نوفه فاز منبع ریزموج یکی از عوامل کلیدی محدود کننده عملکرد است. به دلیل نوفه فاز، اهداف عادی با بازتاب‌های ناخواسته قوی از بین می‌روند، حتی اگر بازتاب از هدف دارای تغییر ناشی از پدیده دوپلر باشد. سطح کاذب یکی دیگر از پارامترهای کلیدی منبع ریزموج است که باید در سامانه‌های رادار به دقت در نظر گرفته شود، چرا که بدون حذف فیزیکی، احتمال هشدار نادرست به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در دو دهه گذشته، نوسانگرهای الکترونیک نوری به دلیل توانایی تولید سیگنال ریزموج با نوفه فاز بسیار کم در کاربردهای راداری توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند.

[1] PRE-industrial Photonic-based Radar design (PREPARE)

[2] Intermediate Frequency (IF)

شکل(۲) طرحواره یک نوسانگر الکترونیک نوری معمولی را نشان می‌دهد که شامل یک حلقه بازخورد شامل تعدیل‌کننده شدت، عنصر ذخیره نوری با بهره بالا (چون طول فیبر)، آشکارساز نوری[1]، تقویت‌کننده الکتریکی فیلتر نوار گذر[2] و تغییر دهنده فاز الکتریکی می‌باشد. هنگامی که یک موج نوری به صورت موج پیوسته[3] به مدوله‌ساز تزریق می‌شود، نوسانگر الکترونیک نوری در یکی از حالت‌های ویژه خود شروع به نوسان می‌کند که با استفاده از بسامد مرکزی تقویت‌کننده الکتریکی فیلتر نوار گذر مشخص می‌شود. اگر بهره خالص حلقه از واحد بیشتر باشد، فاصله بین دو حالت ویژه همسایه با طول حلقه مشخص می‌شود.



شکل ۲ نوسانگر الکترونیک نوری [۳].

عملکرد نوفه فاز یک نوسانگر الکترونیک نوری با ضریب بهره حلقه رابطه مستقیم دارد. به صورت کلی، هرچه فیبر در نوسانگر الکترونیک نوری طولانی‌تر باشد، نوفه فاز کمتر می‌شود [۸]. اگرچه نوفه سوسوزدن تقویت‌کننده‌ها، نوفه شدت نسبی لیزر، نوفه شات در آشکارساز نوری و نوفه وارد شده با استفاده از بازتاب نوری با یک نوفه پایه به نام "نوفه پایه" در طیف، نوفه فاز ایجاد می‌کند. تلاش‌های قابل توجهی برای کاهش نوفه پایه انجام شده است که با استفاده از تقویت کننده‌هایی با نوفه سوسو زدن کمتر و فیلترهای با بهره بالا، عملکرد نوفه فاز بهبود یافته است. در این میان با اجرای فیبر نوری، فناوری حذف حامل برای کاهش نوفه نوسانگر الکترونیک نوری با حلقه سه‌گانه (منبع لیزر، مدوله ساز شدت و آشکارساز نوری) اجرا می‌شود. در این روش حجم نوسانگر الکترونیک نوری می‌تواند با ذخیره دو سامانه و مدارهای مجتمع مربوطه کوچک شود. در این حالت، فاز نوفه

[1] Photodetector (PD)
[2] Electrical Band Pass Filter (EBPF)
[3] Continuous-Wave (CW)

تولید شده با سیگنال ۹.۹۴۵ گیگاهرتز، ۱۰۱.۳۱ dBc/Hz است که نشان دهنده عملکرد قابل قبول نوسانگر الکترونیک نوری فشرده است [۹].

برای سامانه راداری، ویژگی‌های سیگنال منتشر شده با استفاده از آنتن‌ها چون توان، شکل موج زمانی، و پهنای نوار طیفی، محدوده تشخیص، وضوح و توانایی پادتداخل تعیین می‌شود. در سامانه‌های راداری نوین، شکلی از امواج پیچیده قابل برنامه‌ریزی و متنوع برای افزایش وضوح و برآوردن نیازهای سوئیچ زنی سریع مورد نیاز است. از این رو، فناوری تولید شکل موج دلخواه روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می کند. در مرحله کنونی، متداول‌ترین تولید شکل موج دلخواه الکتریکی مورد استفاده در یک سامانه راداری با استفاده از سنتز بسامد دیجیتال مستقیم[1] تحقق می‌یابد. فناوری سنتز بسامد دیجیتال مستقیم انعطاف‌پذیری زیادی را برای تولید شکل موج قابل تغییر نشان می‌دهد، اگرچه پهنای نوار عملیاتی محدودی که اغلب کمتر از چند گیگاهرتز است، سبب اتلاف بهره می گردد. از آنجایی که سامانه‌های رادار به سمت کار در بسامد بالا و پهنای نوار بزرگ در حال تکامل هستند، ژنراتورهای شکل موج دلخواه نوری به یک راه‌حل امیدوارکننده تبدیل می‌شوند. چرا که می توانند شکل موج‌های بسامد بالا و پهنای نوار بزرگ را از راه فناوری‌های نوری تولید و سیگنال نوری را به شکل امواج دلخواه الکتریکی تبدیل کنند.

ژنراتورهای دارای شکل موج دلخواه نوری را می‌توان با شکل‌دهی طیف نوری با استفاده از نقشه‌برداری بسامد وابسته به زمان[2] تحقق بخشید. شکل (۳) اساس این روش را نشان می‌دهد. این سامانه بیشتر از منبع لیزر پالسی، شکل دهنده طیفی نوری ، جزء پاشنده(DE) و آشکارساز نوری تشکیل شده است. طیف منبع لیزر پالسی با استفاده از شکل‌دهنده طیفی نوری بازسازی می‌شود وسپس، نقشه برداری بسامد وابسته به زمان در جزء پاشنده انجام می‌شود، که می‌تواند فیبر نوری پاشنده یا توری براگ فیبری بصورت جیک باشد. از دیدگاه ریاضی، پاسخ ضربه‌ای جز پاشنده به صورت زیر است [۱۰].

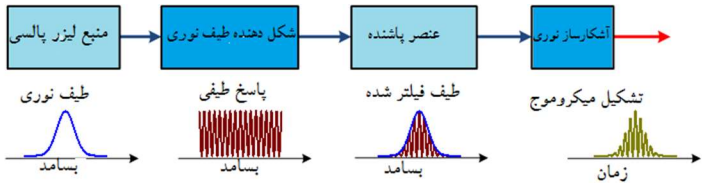
$$\exp\left(\mathrm{j}\frac{\pi}{2\ddot{\Phi}}t^2\right) \qquad (۱)$$

که در این رابطه $\ddot{\Phi}$ پاشندگی مرتبه دوم جزء پاشنده است. اگر پهنای زمانی Δt_0^2 پالس ورودی $a_{\mathrm{in}}(t)$ به اندازه کافی کوچک باشد، به صورتی که $|\Delta t_0^2| \ll |2\pi\ddot{\Phi}|$، سیگنال خروجی بعد از جز پاشنده به صورت زیر است:

[1] Direct Digital Frequency Synthesis (DDS)
[2] Frequency-To-Time Mapping (FTTM)

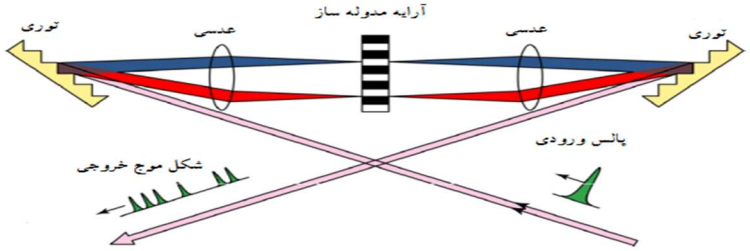
$$I(t) = \Re|a_{\text{out}}(t)|^2 = C^2\Re|F[a_{\text{in}}(t)]|^2_{\omega=t/\ddot{\Phi}} \quad (۲)$$

در این رابطه C پارامتر ثابت و F بیانگر تبدیل فوریه و R پاسخ آشکارساز نوری است. همانطور که از معادله (۲) مشاهده می‌شود، سیگنال الکتریکی تولید شده مقیاسی از طیف توان نوری ورودی است. در نتیجه، با طراحی شکل‌دهنده طیفی نوری با تابع انتقال توان دلخواه، می‌توان شکل موج دلخواه را تولید کرد.



شکل ۳ طرحواره تولید شکل موج بر اساس شکل‌دهی طیفی نوری ونقشه برداری بسامد وابسته به زمان.

جزء کلیدی در یک ژنراتور شکل موج دلخواه نوری، بر اساس شکل‌دهی طیفی و نقشه برداری بسامد وابسته به زمان، شکل‌دهنده طیف نوری است که می‌تواند بر اساس اپتیک فضای آزاد یا فیبر نوری پیاده‌سازی شود. شکل(۴) ساختار شکل‌دهنده طیفی نور معمولی را نشان می‌دهد، که در آن پالس نوری ورودی ابتدا به کمک یک بازدارنده توری به صورت فضایی پراکنده می‌شود و قبل از اینکه نور پراکنده با استفاده از توری دیگری ترکیب شود، از یک آرایه مدوله ساز نور فضایی[1] برای اجرای شکل‌دهی طیفی نوری استفاده می‌شود. برتری استفاده از مدوله‌ساز نور فضایی برای شکل‌دهی طیفی این است که پاسخ طیفی یک مدوله ساز نور فضایی را می‌توان در زمان حقیقی به روزرسانی نموده و شکل موج دلخواه را ایجاد کرد.



شکل ۴ طرحواره شکل‌دهنده طیفی نوری بر اساس نور در فضای آزاد.

[1] Spatial Light Modulator (SLM)

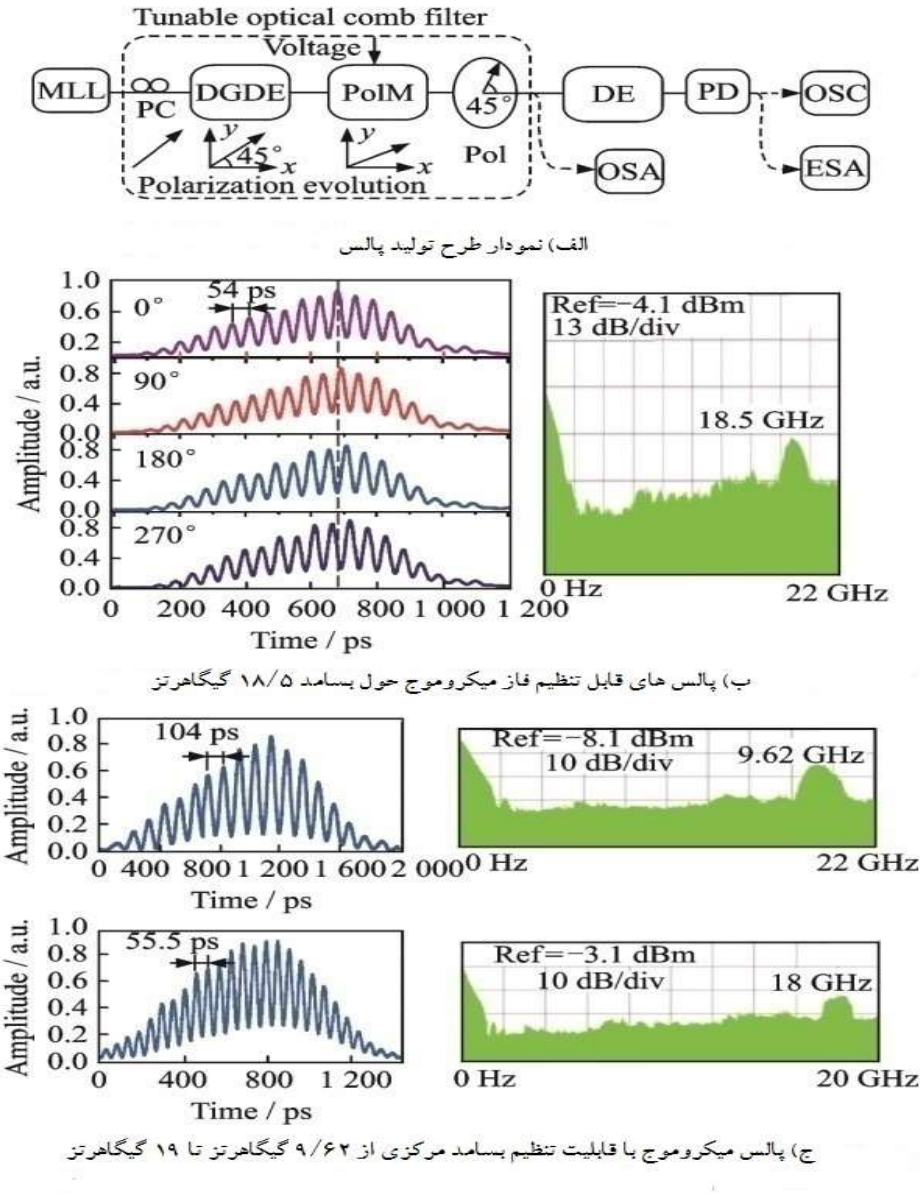
شکل دهنده طیفی مبتنی بر فضای آزاد نوری، حجم بزرگ و تلفات بالایی دارد. افزون بر این، جفت‌شدگی بین فیبر و فضای آزاد مسئله را پیچیده‌تر می‌کند. از طرفی می‌توان سامانه شکل‌دهنده طیفی را بر اساس عملکرد فیبر نوری پیاده‌سازی کرد. سامانه شکل‌دهنده طیفی فیبر نوری دارای برتری‌هایی چون؛ حجم کوچکتر، تلفات کمتر و سازگاری بهتر با سایر اجزای فیبر نوری می‌باشد. برای مثال، در شکل(۵ – الف) طرحی برای تولید شکل موج ریزموج پالسی قابل تنظیم بسامد و فاز بر اساس شکل‌دهی طیفی و نقشه‌برداری بسامد وابسته به زمان در تمام فیبرهای نوری نشان داده شده است. سامانه شکل‌دهنده طیفی نوری با استفاده از فیلتر شانه نوری قابل تنظیم است که از یک عنصر تاخیر گروهی جزئی[1] و یک قطبیده کننده تشکیل شده است. با عبور یک پالس نوری کوتاه از فیلتر شانه‌ای قابل تنظیم و جز پاشنده، سیگنال ریزموج پالسی پس از تبدیل نوری به موج الکتریکی تولید می‌شود. فاز سیگنال ریزموج تولید شده را می‌توان به صورت مداوم با تنظیم ولتاژ اعمال شده تنظیم کرد که در شکل(۵-ب) نشان داده شده است. در این سامانه، به دلیل پهنای نواری بزرگ، مدوله‌سازی فاز سیگنال ریزموج تا ده‌ها گیگاهرتز قابل دستیابی است. همچنین در این سامانه بسامد سیگنال ریزموج را می‌توان با تغییر عنصر تاخیر گروهی جزئی و یا پراکندگی جز پاشنده تنظیم نمود که در شکل(۵- ج) نشان داده شده است.

روش دیگر اساس کار ژنراتورهای شکل موج دلخواه نوری، شکل دادن به پالس فوریه بر اساس شانه بسامد نوری[2] است. با دستکاری شانه بسامد نوری به دلیل داشتن دامنه و فاز مربوط به تبدیل فوریه شکل موج پالس هدف، شکل موج هدف را می‌توان در حوزه زمان به دست آورد. دشواریهای کلیدی ژنراتورهای شکل موج دلخواه نوری، شکل‌دهی پالس فوریه، تولید شانه بسامد نوری نوار پهن و دستکاری دامنه و فاز شانه بسامد نوری است. لیزر حالت قفل شده می‌تواند شانه بسامد نوری با فاصله خطوط شانه‌ای که همان فاصله زمانی بین پالس‌های کوتاه همسایه در حوزه زمانی است، ایجاد کند [۱۱].

شاخص مسطح شانه بسامد نوری به دست آمده می‌تواند کمتر از ۱ دسی بل در طیف توان باشد. برای به فرجام رساندن اساس شکل‌دهی پالس فوریه بر اساس شانه بسامد نوری تولید شده، یک پردازنده نوری که بتواند دامنه و فاز شانه را دستکاری کند، ضروری است. اگرچه پردازنده‌های

[1] Differential Group Delay (DGD)
[2] Optical Frequency Comb (OFC)

نوری تجاری می‌توانند این کار را انجام دهندکه کمابیش همان چیزی است که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل۵ نمودار تولید پالس و نتایج تجربی [۱۰].

در طرح ژنراتورهای شکل موج دلخواه نوری که بر اساس شکل‌دهی پالس فوریه می‌باشد، شانه بسامد نوری با تعدیل موج پیوسته از راه یک مدوله ساز الکتروجذبی و دو مدوله ساز فاز الکترواپتیک آبشاری تولید می‌شود که دارای فاصله خط شانه‌ای ۴۰ گیگاهرتز، پهنای نواری ۳ دسی بلِ ۳.۸ نانومتر و سیگنال نوری می‌باشد. این تولید با استفاده از یک پردازنده نوری قابل برنامه‌ریزی تجاری (Finisar Waveshaper-4000S) با وضوح طیفی ۱ گیگاهرتز، شکل‌دهی پالس فوریه با طراحی توابع انتقال پردازنده نوری اجرا می‌شود [۱۳و۱۲].

۳. بحث و نتیجه‌گیری

از معروف‌ترین رادارهای مرسوم، رادارهای کوانتومی هستند که بسیار کارآمدتر عمل می‌کنند و از درهم‌تنیدگی کوانتومی برای افزایش حساسیت‌شان و شناسایی انعکاس‌های نواحی بسیار پر سروصدا و دارای سیگنال کوچک، استفاده می‌کنند.

رادار کوانتومی توسعه داده شده توسط شبیر برزنجه و همکارانش[1]، در نواحی با فوتون پایین، دارای عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با رادارهای معمولی است و چنین ویژگی غیرتهاجمی برای کارکردهای زیست‌پزشکی دارای طیف کوتاه دارای اهمیت بسزایی است. در درازمدت، می‌توان از این رادار برای شناسایی حضور نارسایی‌ها در نمونه‌های زیستی یا بافت‌های انسانی به شیوه‌ای کاملا غیرتهاجمی بهره برد و برتری‌های ویژه‌ای که از سامانه راداری مبتنی بر فوتونیک در این مقاله اشاره شده است را دارا نمی باشد.

در این مقاله ثابت شده است که فناوری‌های فوتونیک از دیدگاه پهنای نواری، اندازه، جرم و پیچیدگی عملکرد نسبت به همتایان الکتریکی خود از جمله رادارهای معمولی و رادارهای مبتنی بر نظریه کوانتومی برتری مشخصی دارند. با وجود فعالیت‌های پژوهشی فشرده‌ای که در طول سه دهه گذشته انجام شده است، در رادارهای چند منظوره فوتونیکی با کارایی بالا توانایی پیشرفت‌های قابل توجهی وجود دارد . چندین پیشرفت که در آینده انتظار می‌روند به شرح زیر مورد بحث قرار می‌گیرد:

۱- سازگاری زیر سامانه‌های فوتونی ریزموج مختلف باید برای یکپارچه کردن چندین توابع فوتونی ریزموج در یک ساختار مناسب بهبود یابد و نوسانگرهای فوتونیکی

[1] Shabir Barzanjeh

ریزموج، ژنراتورهای شکل موج دلخواه، میکسرها، رمزگذارهای فاز، فیلترها، شکل‌دهنده‌های پرتو، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال بر اساس منابع لیزری متفاوت (چون منابع لیزری با موج پیوسته، قابل تنظیم، شانه‌ای و پالسی)، طرح‌های مدوله‌سازی (از قبیل فاز) اجرا شوند.

۲- مدوله‌سازی(مدوله‌سازی شدت، مدوله‌سازی قطبش، و مدوله‌سازی الکترواپتیک موازی یا آبشاری) و روش‌های تشخیص (تشخیص مستقیم، تشخیص منسجم و تشخیص متعادل) ممکن است بر انجام شدن برخی دیگر از توابع فوتونی ریزموج تأثیر بگذارد. روش افزودن توانایی تونل‌سازی یا پیکربندی دوباره به برخی از زیر سامانه‌های فوتونی ریزموج ممکن است عملکرد سایر فناوری‌های فوتونیکی ریزموج را نیزکاهش دهد.

۳- تلاش‌های پی‌درپی باید به بهبود عملکرد سامانه‌های و زیر سامانه‌ها اختصاص داده شود و همزمان هزینه‌ها را کاهش دهد. رادارهای نوین به شدت به پهنای نواری زیاد، حساسیت بالا و دامنه دینامیکی زیاد سامانه‌های با بسامد رادیویی نیاز دارند. در حالی که فناوری‌های فوتونیکی ریزموج از نظر پهنای باند عملکرد برتری دارند و حساسیت به دلیل نوفه بالای تبدیل الکتریکی به نوری یا نوری به الکتریکی، دامنه دینامیکی به دلیل غیرخطی بودن و کم بودن کمابیش پایین است.

۴- سامانه‌های فوتونیک ریزموج باید شامل آنتن‌ها، تقویت‌کننده‌های با بسامد رادیویی و دیگر سامانه‌ها یا مدل‌های الکترونیکی باشند. اگرچه کمابیش هیچ‌کدام از آن‌ها به صورت ویژه برای کاربردهای فوتونیکی ریزموج طراحی نشده‌اند که این امر سبب ایجاد محدودیت پتانسیل فوتونیک ریزموج می‌شود و برای حل این مشکل طراحی ترکیبی سامانه الکتریکی و نوری مورد نیاز است.

۵- بیشتر سامانه‌های فوتونیکی ریزموج بر اساس اجزای نوری یا الکتریکی گسسته ساخته می‌شوند که حجیم، پیچیده، ناپایدار و مصرف‌کننده انرژی هستند. مدار مجتمع فوتونیک یک راه حل امیدوارکننده برای این محدودیت است که پیشرفت‌های قابل‌توجهی در چند سال گذشته به دست آمده است. با این حال، بسیاری از عملکردهای فوتونیکی ریزموج هنوز بر روی یک تراشه نشان داده نشده‌اند. از این رو، تلاش‌های بیشتری برای فشرده‌سازی سامانه فوتونیکی ریزموج، سبک، ارزان، قابل اعتماد و کم مصرف مورد نیاز است.

منابع

[1] Saddik G.N., Singh R.S., Brown E.R., Ultra-wideband multifunctional communications/radar system, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55, 1431- 137, 2007.

[2] Hu S., Xiong Y.Z., Wang L., modulator-based photonic microwave phase shifter, *Optics Letters*, 38, 766-773, 2013

[3] Khilo A, Spector S.J., Grein M.E., Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter. *Optics Express*, 20, 4454-4469, 2012

[4] Taylor H.F., An electrooptic analog-to-digital converter. *Proceedings of the IEEE*, 63, 1524- 1525, 2015

[5] Li W., Zhang H., Wu Q., All-optical analog-to-digital conversion based on polarization-differential interference and phase modulation, *IEEE Photonics Technology Letters*, 19, 625- 627, 2017

[6] Chen Y., Chi H., Zheng S, Differentially encoded photonic analog-to-digital conversion based on phase modulation and interferometric demodulation, *IEEE Photonics Technology Letters*, 23, 1890-1897, 2011

[7] Wang Y., Zhang H., Wu Q., Improvement of photonic ADC based on phase-shifted optical quantization by using additional modulators, *IEEE Photonics Technology Letters*, 24, 566- 574, 2012

[8] Holman K.W., Hudson D.D., Ye J., Remote transfer of a high-stability and ultralow-jitter timing signal, *Optics Letters*, 30, 1225- 1233, 2005

[9] Wu Z., Dai Y., Yin F., Stable radio frequency phase delivery by rapid and endless post error cancellation, *Optics Letters*, 38, 1098- 1100, 2013

[10] Strozzi T., Luckman A., Murray T., Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions* , 11, 2384-2395, 2019

[11] Eldhuset K., Andersen P., ERS tandem InSAR processing for DEM generation, glacier motion estimation and coherence analysis on Svalbard, *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1415- 1437, 2019

[12] Nanakar H., Hosseni-Moradi S.A., Nazirzadeh M., Application of quantum technology in radars, *IJRSM*, 8,67-77, 2020

[13] Khaksar H., Almasi S.A., Goharpor A.A., Comparison of Accident Severity and Frequency Index Method in Identifying Hotspot Segments of Intercity Road Network, *Journal of Radar and Optical Remote Sensing*, 12, 71-83, 2021

© 2022 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).