



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه مهندسی برق- الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- الکترونیک

عنوان

نور کند و تند با استفاده از فرآیندهای غیرخطی در تقویت کننده های نوری

نیمه هادی

اساتید راهنما

دکتر علی رستمی

دکتر رضا یدی پور

استاد مشاور

دکتر ضیاءالدین دائی کوزه کنانی

پژوهشگر

علیرضا لطفیان

شهریور ۱۳۹۰



نام خانوادگی دانشجو: لطفیان	نام: علیرضا
عنوان پایان نامه: نور کند و تند با استفاده از فرآیندهای غیرخطی در تقویت کننده های نوری نیمه هادی	
اساتید راهنما: دکتر علی رستمی ، دکتر رضا یدی پور استاد مشاور: دکتر ضیاءالدین دائی کوزه کنانی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق گروه: الکترونیک دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۰/ ۶/۳۱ تعداد صفحه: ۱۱۶	
کلید واژه‌ها: نور کند، نور تند، تقویت کننده های نوری نیمه هادی، نقاط کوانتومی، قابلیت تنظیم	
<p>چکیده : توانایی کنترل سرعت نور، بسته به اینکه سرعت گروه کاهش یا افزایش پیدا کند، با عنوان نور کند یا تند اطلاق می شود و اخیراً توجه بسیاری را به خود معطوف کرده است. این کنترل بی نظیر کاربردهای درخور توجهی در بسیاری از زمینه های علمی از جمله دانش غیرخطی، RF فوتونیک و شبکه های تمام نوری دارد. از کاربردهای مستقیم تجهیزات نور کند و تند، در زمینه مخابرات می باشد. یک چالش بزرگ که در تکنولوژی اطلاعات امروزه نیز وجود دارد، ذخیره سازی سیگنال های نوری، مستقیماً در حوزه نور است. از آنجا که در شبکه های امروزی سیگنال های نوری برای مسیریابی، سوئیچینگ، و پردازش باید به سیگنال های الکتریکی تبدیل شوند، تاخیرهای بزرگ و گره های ترافیکی در این شبکه ها وجود دارند. همچنین حفظ اطلاعات در حوزه نوری در طی پروسه ی مسیر یابی موجب کاهش چشمگیر توان، پیچیدگی، و ساینز مسیریاب ها خواهد شد. بدین منظور می توان از یک خط تاخیر نوری قابل کنترل، به عنوان یک بافر نوری استفاده کرد، که عمل ذخیره سازی در آن متناسب با تغییرپذیری سرعت گروه انجام می گیرد. می توان گفت بافرینگ، بزرگ ترین مساله در تحقق بخشیدن به شبکه های تمام نوری پرسرعت می باشد، که با توانایی کنترل سرعت نور دست یافتنی است. تجهیزات نور کند و تند در حوزه کاربردهای RF فوتونیک، می توانند به عنوان المان های تاخیر زمانی صحیح (TTD)، برای کنترل آنتن های آرایه فازی و نیز در فیلترهای تنظیم پذیر مورد استفاده قرار گیرند. از کاربردهای بدیع دیگر، می توان از اپتیک غیرخطی، پردازش سیگنال تمام نوری و پردازش اطلاعات کوانتوم نام برد. روش های متعددی برای تغییر سرعت گروه نوری وجود دارد. سرعت گروهی کند یا تند می تواند از پاشندگی ماده یا موجبر و یا هر دو نتیجه شود. طرح هایی که بر پایه سیستم های نیمه هادی برای تحقق نور کند و تند هستند، مزیت سرعت بسیار بالا و کنترل الکتریکی را دارند. علاوه بر این حجم کمتری دارند، برای کار در دمای اتاق مناسب اند و به راحتی قابل فشرده سازی با دیگر زیرسیستم های نوری اند.</p> <p>در این کار فرآیندهای مختلف برای تحقق نور کند و تند بررسی می شود و فرآیند CPO در تقویت کننده های نوری نیمه هادی (SOA) به عنوان روش مناسب برای کنترل سرعت نور استفاده خواهد شد. QD-SOA به عنوان محیط کنترل سرعت نور انتخاب و طراحی می شود. در ادامه مدل تئوری و روابط لازم برای محاسبات پارامترهای مختلف ارائه می گردد. سیگنال نوری در عبور از SOA، در اثر فرآیند غیرخطی CPO، با یک تغییر در ضریب شکست مواجه می گردد که قابل کنترل است. بنابراین سرعت گروه می تواند به صورت الکتریکی با کنترل جریان اعمالی به وسیله، یا به صورت نوری، با کنترل توان یا فرکانس میدان نوری کنترل، کنترل شود. در ادامه میدان نوری سومی برای کنترل بیشتر وارد می شود و روابط و معادلات جدید ارزیابی می شوند.</p>	

تقدیر و تشکر

از اساتید راهنمای محترم، دکتر علی رستمی و دکتر رضا یدی پور که در مراحل مختلف دوره کارشناسی ارشد و راهنمایی پایان نامه، زحمات زیادی را تقبل فرمودند کمال تشکر را دارم. از استاد مشاورم آقای دکتر ضیاءالدین دائی کوزه کنانی به پاس راهنمایی های بی دریغشان در طول دو دوره تحصیلی، صمیمانه قدردانی می نمایم.

از آقای دکتر رسولی و مهندس باغبان که با کمک های موثر خود در انجام تحقیقات این پایان نامه اینجانب را یاری نمودند، کمال تشکر را دارم.

از پدر بزرگوار و مادر مهربانم به پاس عنایات و الطافشان تشکر ویژه می نمایم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
I	فهرست شکل ها
VII	فهرست کلمات اختصاری
IX.....	واژه نامه
	فصل اول : مقدمه
۲	۱-۱. تعریف نور کند و نور تند
۲	۲-۱. نگاهی بر کاربردها
۶	۳-۱. اصول پایه نور کند و تند
	فصل دوم : بررسی منابع
۱۱	۱-۲. مقدمه
۱۳	۲-۲. نور کند با استفاده از پراکندگی رامان برانگیخته (SRS)
۱۵.....	۳-۲. نور کند با استفاده از پراکندگی برلیون برانگیخته (SBS)
۱۹	۴-۲. نوسانات جمعیت وابسته (CPO)
۲۲	۵-۲. شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT)
۲۳	۶-۲. نور کند و تند بر پایه FWM در تقویت کننده های نوری نیمه هادی
۲۶.....	۷-۲. نور کند و تند در فیبرهای نوری
۲۶	۱-۷-۲. ضرورت نودهای نوری برای شبکه
۲۷	۲-۷-۲. بافرهای نوری

۲۸ ۱-۲-۷-۲. تعریف یک بافر تمام نوری.....

۲۸..... ۲-۲-۷-۲. حافظه بافر نوری با استفاده از خطوط تاخیر نور کند.....

۳۱ ۸-۲. نور کند در کریستال های فوتونیکی.....

فصل سوم : مواد و روش ها

۳۵ ۱-۳. مقدمه.....

۳۵ ۲-۳. محیط کنترل سرعت نور: بررسی تقویت کننده ی نوری نیمه هادی، SOA.....

۴۱ ۱-۲-۳. تقویت کننده نوری نیمه هادی بالک (Bulk-SOA).....

۵۲ ۲-۲-۳. تقویت کننده ی نوری نیمه هادی چاه کوانتمی (QW-SOA).....

۵۴ ۳-۲-۳. تقویت کننده ی نوری نیمه هادی نقاط کوانتمی (QD-SOA).....

۵۷ ۴-۲-۳. مقایسه تقویت کننده های نوری نیمه هادی Bulk، QW و QD.....

۶۳ ۳-۳. تشریح فیزیکی فرآیند CPO.....

۶۵ ۴-۳. معادلات نرخ QD-SOA.....

۶۸ ۵-۳. روش های حل معادلات QD-SOA.....

۶۹ ۱-۵-۳. روش عددی تفاضلات محدود برای حل معادلات نرخ QD-SOA.....

۷۴ ۲-۵-۳. روش مدار معادل برای حل معادلات نرخ QD-SOA.....

۷۷ ۶-۳. آنالیز CPO به کمک المان های ماتریس چگالی.....

۸۲ ۷-۳. مدل QD.....

۸۴ ۸-۳. محاسبات CPO.....

۸۷ ۹-۳. معادلات نرخ توسعه یافته.....

فصل چهارم : نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۰

مراجع ۹۲

فهرست شکل ها

صفحه

- شکل ۱-۱. شماتیک سیستم آنتن آرایه فازی برای هدایت بیم RF در جهت مطلوب. ۳
- شکل ۱-۲. فیلترهای RF باند باریک و قابل تنظیم برای حذف نویز در یک فرکانس خاص. ۴
- شکل ۱-۳. تشریح بافرینگ نوری با استفاده از نور کند و تند. ۵
- شکل ۱-۲. (a) دیاگرام سطح انرژی. (b) چیدمان آزمایشگاهی برای انتشار نور کند با استفاده از هیدروژن جامد. ۱۳
- شکل ۲-۲. تاخیرهای پیک پالس میدان پروب به صورت تابعی از شدت لیزر کوپلینگ برای دیتیونینگ رامان $\delta/2\pi = -50\text{MHz}$ تاخیر گروه برای مد نرمال کند با خط چین مشخص شده است. ۱۴
- شکل ۲-۳. مشخصه بهره SBS برای پهنای باندهای مختلف طیف توان پمپ (a) قسمت حقیقی، (b) قسمت موهومی $g(\omega)$ به صورت تابعی از فرکانس دیتیونینگ از فرکانس پمپ. ۱۸
- شکل ۲-۴. تاخیر نسبی SBS به صورت تابعی از پهنای خط رزونانس SBS. ۱۹
- شکل ۲-۵. نمودار پیشرفت پالس به صورت تابعی از فرکانس مدولاسیون برای یک فیبر نوری دوپینگ شده با اریوم، برای سیستم CPO. ۲۱
- شکل ۲-۶. طیف جذب پروب EIT. در سمت چپ تصویر سیستم EIT سه ترازه

- ۲۲ دیده می شود.
- ۲۴ شکل ۲-۷. ساختار آزمایشگاهی برای تحقق نور کند در SOA با استفاده از FWM.
- ۲۴ شکل ۲-۸. تاخیر به صورت تابعی از دیتیونینگ برای سه سناریوی مختلف.
- ۲۵ شکل ۲-۹. نمودار زمانی سیگنال پروب مدوله شده.
- ۲۵ شکل ۲-۱۰. نمودار تاخیر برای توان های مختلف پمپ.
- شکل ۲-۱۱. تاخیر زمانی به صورت تابعی از بایاس SOA برای دیتیونینگ
- ۲۶ ثابت ۷,۵GHz - .
- شکل ۲-۱۲. ساختار یک نود در شبکه OE: تبدیل نوری به الکتریکی، PP:
- پردازشگر بسته ، TM: اداره کننده ی ترافیک، FI: واسطه ساختار، OE: تبدیل
- ۲۷ الکتریکی به نوری.
- ۲۸ شکل ۲-۱۳. تعریف بافر تمام نوری
- ۲۹ شکل ۲-۱۴. طرح حافظه بافر نوری
- شکل ۲-۱۵. بافرهای نوری واحد (a) خط تاخیر متغییر. (b) حلقه تاخیر.
- (c) خط تاخیر شطرنجی. خطوط نازک بیانگر مسیرهای نوری اند و پیکان های
- ۳۰ عرض سیگنال های کنترلی را نشان می دهند.
- ۳۰ شکل ۲-۱۶. بافرهای (a) سری و (b) موازی.
- ۳۲ شکل ۲-۱۷. (تصویر SEM¹) PCCW ساخته شده.
- شکل ۲-۱۸. طیف شدت عبور، زمان تاخیر (خطوط خاکستری) و

¹ Surface Electron Microscopy

- ۳۳ ضریب گروه (قرمز). $2r_2 = 0.345\mu\text{m}$ (a) و $2r_2 = 0.367\mu\text{m}$ (b).
- شکل ۲-۱۹. پاس نوری عبوری. A,B,C طول موج های مشخص شده
- ۳۳ در شکل ۲-۱۸ می باشند.
- ۳۶ شکل ۳-۱. تراشه یک SOA.
- شکل ۳-۲. ساختار باند انرژی یک نیمه هادی با باند گپ مستقیم. در واقع اندازه حرکت یک بردار سه بعدی فضایی است. فقط حامل های اقلیت در باند های ظرفیت و هدایت نشان داده شده است.
- ۳۷ شکل ۳-۳. (a) ترکیب لایه های پوششی و ناحیه فعال، (b) دیاگرام انرژی لایه های پوششی و ناحیه فعال، (c) ضریب شکست لایه های پوششی و ناحیه فعال و (d) چگالی نور در ناحیه فعال.
- ۳۸ شکل ۳-۴. فرآیند های نشر تحریک شده و خود به خودی و جذب تحریک شده در یک سیستم دو ترازی.
- ۳۹ شکل ۳-۵. نشر تحریک شده در ناحیه فعال SOA.
- ۴۰ شکل ۳-۶. (a) شماتیک و (b) ساختار یک تقویت کننده ی نوری نیمه هادی بالک.
- ۴۲ شکل ۳-۷. سیر تکامل توزیع چگالی حامل های آزاد در باند هدایت تحریک شده با یک پالس نوری با پهنای پیکوثانیه.
- ۴۵ شکل ۳-۸. دینامیک گین و تغییرات فاز برای پالس ورودی با پهنای ۴۰ ps.
- ۵۰ شکل ۳-۹. تغییرات زمانی گین به ازای ورودی گوسین با پهنای ۲۰۰ ps. شکل راست: دینامیک گین در حالت بین بانندی و شکل چپ: دینامیک گین در حالت

- داخل باندى. ۵۱
- شکل ۳-۱۰. (a) ساختار MQW-SOA، (b) ساختار دیاگرام باند انرژی تک چاه کوانتومی و (c) ساختار دیاگرام باند انرژی چند چاه کوانتومی. ۵۴
- شکل ۳-۱۱. نقاط کوانتومی خود شکل گیرنده. ۵۵
- شکل ۳-۱۲. (a) ساختار QD-SOA و (b) دیاگرام باند انرژی در حالت بایاس مستقیم یک QD-SOA با یک لایه QD. ۵۷
- شکل ۳-۱۳. چگالی حالت ها به ازای تراز های انرژی برای تقویت کننده با ماده Bulk (a)، QW (b) و QD (c). ۵۸
- شکل ۳-۱۴. زمانی بازیابی گین برای تقویت کننده Bulk (بریده) و QD (توپر). ۵۹
- شکل ۳-۱۵. نمونه ای از منحنی گین اشباع برای انواع مختلف تقویت کننده. تعریف نقطه اشباع و گین سیگنال کوچک در شکل نشان داده شده است. چگالی جریان برای Bulk: 10 kA/cm^2 ، QW: 4 kA/cm^2 و QD: 2 kA/cm^2 است. در هر سه طول تقویت کننده 0.5 mm است. ۶۰
- شکل ۳-۱۶. توان خروجی اشباع در برابر چگالی جریان برای انواع تقویت کننده ها. طول SOA در هر سه تقویت کننده برابر 0.25 mm است. ۶۱
- شکل ۳-۱۷. توان اشباع 3 dB انواع تقویت کننده ها در برابر افزایش طول. ۶۲
- شکل ۳-۱۸. گین سیگنال کوچک تقویت کننده های مختلف در برابر طول تقویت کننده. چگالی جریان بکار رفته: 1 kA/cm^2 برای QD-SOA، 2 kA/cm^2 برای QW-SOA، 10 kA/cm^2 برای Bulk-SOA. ۶۳

- شکل ۳-۱۹. (a) سیستم دو ترازه در حضور پمپ و پروب (سیگنال). (b) اشباع جذب
- ۶۴ برای پروب در حضور پمپ قوی و حفره ایجاد شده در اثر نوسان جمعیت.
- شکل ۳-۲۰. بازیابی گین تقویت کننده محاسبه شده (خط ممتد) و اندازه گیری شده (نقاط). تصویر داخل شده نتایج محاسبه شده و اندازه گیری شده ی گین
- ۶۶ اشباع را نشان می دهد.
- شکل ۳-۲۱. تغییر احتمال پر بودن تراز های QD-SOA پس از تزریق یک پالس
- ۶۷ نوری با پهنای 150 fs برای مقادیر جریان های مختلف تزریقی.
- شکل ۳-۲۲. گسسته سازی طول و زمان پارامترهای مورد نیاز محاسبات عددی
- ۷۰ تفاضلات محدود در QD-SOA.
- شکل ۳-۲۳. تغییرات زمانی احتمال اشغال بودن GS، ES و WL بوسیله حل
- ۷۲ عددی تفاضلات محدود.
- شکل ۳-۲۴. احتمال پر شدن تراز ها GS و توان نرمالیزه ی سیگنال نوری در
- ۷۳ طول QD-SOA.
- شکل ۳-۲۵. تقویت سیگنال ورودی گوسین در یک تقویت کننده QD-SOA
- ۷۳ بصورت تابعی از طول تقویت کننده و زمان.
- شکل ۳-۲۶. (a) مدل زیر مدار SPICE برای تعیین توان خروجی.
- (b) - (d) زیرمدارات معادل برای اندازه گیری v_1 ، v_2 و v_3 در نتیجه بایاس
- ۷۶ جریان و پالس ورودی V_{s_in} .
- شکل ۳-۲۷. دیاگرام باند QD با سطوح انرژی ماکزیمم تعریف شده برای باند

- ۸۲ هدایت، ظرفیت و WL.
- ۸۳ شکل ۳-۲۸. ساختار QD طراحی شده. (a) برش طولی، (b) برش عرضی
- ۸۳ شکل ۳-۲۹. دیاگرام باندها حاصل شده برای QD
- شکل ۳-۳۰. ضریب شکست (منحنی بالا)، جذب (منحنی وسط) و ضریب گروه (پایین)
- ۸۴ بر حسب انرژی فوتون. مشخصه‌ها دقیقاً با تشریح فیزیکی فرآیند سازگاری دارند.
- شکل ۳-۳۱. طیف جذب قابل تنظیم با جریان ورودی SOA برای سیگنال،
- ۸۵ با افزایش جریان بایاس مقدار جذب بیشتر افت می‌کند. بر حسب انرژی فوتون (meV).
- شکل ۳-۳۲. ضریب گروه قابل کنترل به صورت الکتریکی بر حسب انرژی فوتون (meV).
- شکل ۳-۳۳. حصول نور کند (a) و تند (b) با تغییر جریان بایاس و در نتیجه تغییر
- ۸۶ ناحیه کار SOA. در نمودار کوچک هر دوی نور کند و تند دیده می‌شوند.
- ۸۷ شکل ۳-۳۴. طرح شماتیک فرآیندهای دینامیکی.
- ۸۹ شکل ۳-۳۵. طیف ضریب گروه بر حسب انرژی فوتون.
- ۹۱ شکل ۴-۱. مبدل آنالوگ به دیجیتال نوری بر پایه نور تند.

فهرست کلمات اختصاری

Semiconductor Optical Amplifier	SOA
Stimulated Raman Scattering	SRS
Stimulated brillouin Scattering	SBS
Electromagnetically Induced Transparency	EIT
Coherent Population Oscillation	CPO
Quantum Dot	QD
Quantum Well	QW
Radio Frequency	RF
True Time Delay	TTD
Spectral Hole Burning	SHB
Carrier Heating	CH
Carrier Cooling	CC
Four Wave Mixing	FWM
Continuous Wave	CW
Distributed Feedback	DFB
Optical-Electrical(conversion)	OE
Electrical-Optical(conversion)	EO
Packet Processor	PP
Traffic Manager	TM

Fabric Interface	FI
Random Access Memory	RAM
First In First Out	FIFO
Photonic Crystal Waveguide	PCW
Photonic Crystal Coupled Waveguide	PCCW
Group Velocity Distortion	GVD
Anti Reflection Coating	ARC
Two Photon Absorption	TPA
Linewidth Enhancement Factor	LEF
Amplified Stimulated Emission	ASE
Molecular Beam Epitaxy	MBE
Wetting Layer	WL
Ground State	GS
Excited State	ES
Surface Electron Microscopy	SEM

واژه نامه

Collision	تصادم
Broadening	پهن شدگی
Coherent	وابسته
Quantum Dots	نقاط کوانتومی
Broadband	باند وسیع
Buffering	ذخیره سازی
Data packet	بسته ی داده
Squinting	لوچی
Carrier	حامل
Splitter	جداساز
Travelling waves	موج های رونده
Smooth function	تابعی با تغییرات ملایم
Routing	مسیردهی
Network nodes	گره های شبکه
Dispersion	پاشندگی
Group index	ضریب شکست گروه
Distortion	انحراف
Interference	تداخل

فصل اول

مقدمه

۱-۱. نور کند و نور تند

توانایی کنترل سرعت نور که با عنوان نور کند یا تند مطرح می شود، اخیراً توجه زیادی را به خود معطوف کرده است. عبارت "نور کند"^۱ به کاهش سرعت نور، و عبارت "نور تند"^۲ به سرعتی بالاتر از سرعت نور (C)، اشاره دارد. باید به این نکته توجه کرد که تمییز تفاوت دو سرعت متداول فازی و گروهی برای نور مهم و ضروری است. انتشار یک موج نوری در یک محیط را می توان به صورت نوسان میدان های الکتریکی و مغناطیسی عمود بر جهت انتشار توصیف کرد، درست شبیه به سیم گیتار که به سمت بالا و پایین حرکت می کند در حالی که موج به صورت افقی منتشر می شود. سرعت فاز یک نور تک رنگ، به سرعت مکان هندسی سطوح با فاز ثابت اشاره دارد. در حالی که یک پالس نوری ترکیبی از چند مولفه ی فرکانسی بوده، و بنابراین انتشار آن با استفاده از سرعت گروه توصیف می شود، که معرف سرعتی است که پوش شدت نور با آن سرعت در محیط حرکت می کند. با حصول توانایی کنترل سرعت فاز^۳ و گروه^۴ به کاربردهای ضروری و مهمی می توان دست یافت.

۲-۱. نگاهی بر کاربردها

به نظر می رسد در آستانه تحولات بزرگی برای رویارویی و ساخت سیستم های مخابراتی، پردازشی و کنترلی قرار داریم. RF فوتونیک از زمینه های جدیدی است که از پیشرفت های حاصله در فوتونیک و ماکروویو برای حصول اعمال و وظایف پیچیده ای بهره می گیرد [۱]. به صورت متداول، اطلاعات RF روی یک موج نور که به عنوان موج حامل^۵ است قرار می گیرد، پردازش سیگنال مطلوب به جای حوزه الکترونیکی در حوزه ی نوری انجام می شود و در نهایت

¹ Slow light

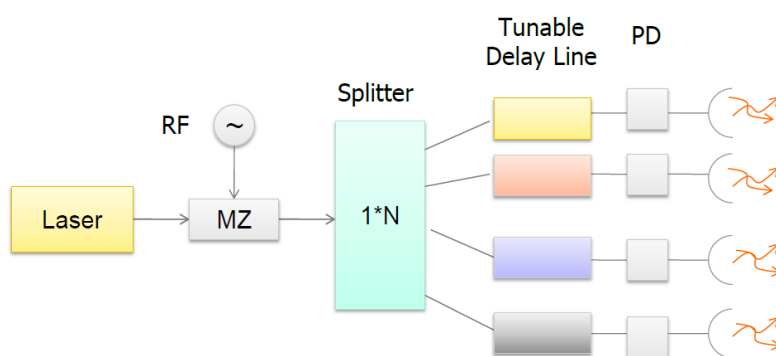
² Fast light

³ Phase velocity

⁴ Group velocity

⁵ carrier

سیگنال نوری با استفاده از آشکارساز نوری دوباره به موج RF برگردانده می شود. توانایی کنترل سرعت فاز یک موج RF، در بسیاری از کاربردهای این زمینه، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در اینجا دو مورد از این کاربردها را به اختصار بررسی می کنیم: آنتن های آرایه فازی^۱ و فیلترهای قابل تنظیم RF^۲ [۲]. در یک سیستم آنتن آرایه فازی، هدایت بیم در جهت های مختلف از طریق تغییر فاز RF المان های آنتن صورت می گیرد. در چنین سیستم هایی مثل راداری که هدایت بیم آن به صورت پالسی کنترل می شود، از یک تغییر فاز RF ثابت برای تمام مولفه های فرکانسی استفاده می شود که باعث بروز مشکلی به نام squinting می گردد. برای رفع این مشکل باید از شیفت فازی بهره برد که با تغییر فرکانس به صورت خطی تغییر می کند. بنابراین از این شرط با عنوان تاخیر زمانی صحیح (TTD)^۳ ذکر می شود. طرح های نور کند و تند می توانند به سادگی این تاخیر های زمانی صحیح را تامین کنند.



شکل ۱-۱. شماتیک سیستم آنتن آرایه فازی برای هدایت بیم RF در جهت مطلوب. سیگنال RF قبل از تجزیه شدن به N شاخه بر روی یک نور تک رنگ سوار می شود. فاز سیگنال عبوری هر یک از شاخه ها با یک خط تاخیر قابل تنظیم کنترل می شود. خطوط تاخیر قابل تنظیم بر پایه طرح نور کند، می توانند برای حصول تاخیرهای زمانی صحیح مورد استفاده قرار گیرند و به این ترتیب مشکل squinting حل خواهد شد.

شماتیک یک سیستم آنتن آرایه فازی که از طرح نور کند برای حصول تاخیر زمانی صحیح بهره می گیرد در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در این طرح سیگنال RF بر روی یک لیزر به

¹ Phased array antennas

² Tunable RF filters

³ True Time Delay