مطالعه کارایی لیزر های آبشارکوانتومی در فرایند تولید اعداد تصادفی تحت اثر پسخوراند نوری متداول و پسخوراند نوری مزدوج فازی

خسرو مبهوتی، اکبر جعفری و یوسف مهدی زاده

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

چکیده –در این مقاله کارایی استفاده از خروجی لیزر آبشار کوانتومی در حضور پسخوراند نوری در فرایند تولید اعداد تصادفی بررسی شده است. بدین منظور از خروجی لیزر آبشار کوانتومی به عنوان مولد سیگنال نمونه‌بردار از خروجی لیزرهای نیمه رسانای آشوبناک استفاده شد. بررسی‌ها در دو حالت حضور پسخوراند نوری متداول و پسخوراند مزدوج فازی صورت گرفت و حالت مطلوب انتخاب شد. نتایج بدست آمده از شبیه سازی و حل عددی معادلات نشان می‌دهد که نرخ تولید اعداد تصادفی سریع تر از حالتی است که از لیزرهای دیودی مرسوم استفاده می‌شود.

کلید واژه- اعداد تصادفی، پسخوراند نوری، دوپایداری نوری، لیزر های نیمه‌رسانای آبشار کوانتومی، نمونه‌برداری نوری

Study of the Performance of quantum cascade lasers in the process of random number generating, under influence of conventional optical feedback and Phase conjugate feedback

Khosro Mabhouti, Akbar Jafari and Yousef Mehdizadeh

Physics Department, Faculty of Sciences, Urmia University

Abstract- In this paper, the Performance of quantum cascade laser, subjected to optical feedback, in the process of random number generating is investigated. For this purpose, the output of the quantum cascade laser was used as a sampler signal generator from the output of chaotic semiconductor lasers. Investigations were done in two situations; conventional optical feedback and Phase conjugated feedback; and the optimal mode was selected. The obtained results show that the generation rate of random numbers is faster than that used by conventional laser diode.

Keywords: Random Numbers, Optical Feedback, Optical Bistability, Optical Sampling, Quantum Cascade Laser

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

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

۱- مقدمه

تولید اعداد تصادفی یکی از مدرن‌ترین روش‌های رمزنگاری است که برای تامین امنیت حریم خصوصی و ذخیره سازی اطلاعات بکار می‌رود [1].

به طور کلی دو روش برای تولید اعداد تصادفی وجود دارد، روش‌های مبتنی بر پردازش‌های نرم‌افزاری و روش‌های مبتنی بر پدیده‌های فیزیکی. در گذشته امکان تولید اعداد شبه تصادفی با سرعت‌های بالا تا چندین گیگا بیت برثانیه، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های قطعی وجود داشت. این نوع اعداد تصادفی مشکل آسیب‌پذیر بودن را داشتند. بعدها تولید اعداد تصادفی فیزیکی باتوجه به ماهیت غیر قابل پیش بینی بودن فرایندهای فیزیکی پیشنهاد شد. برای مثال نویزهای تصادفی می‌توانند به عنوان منابع بی‌نظمی در تولید اعداد تصادفی فیزیکی بکار روند. اما این سیستم ها نرخ بیت‌های خیلی پایینی دارند [۲].

درسال‌های اخیر لیزرهای آشوبناک توجه بسیاری را در این زمینه به خود جلب کرده‌اند[3]. اولین تولیدکننده اعداد تصادفی آزمایشگاهی ساخته شده، دارای نرخ بیت ۱/۷ گیگابیت برثانیه بود [۴]. در کار دیگری، یک تولید کننده اعداد تصادفی تمام اپتیکی پیشنهاد شد. این مولد اعداد تصادفی بر مبنای لیزرهای آشوبناک کار می‌کرد و در آن تمام فرایندهای پردازش سیگنال در یک دامنه اپتیکی انجام می‌شد [۵]. درکارهای قبلی که در زمینه تولید اعداد تصادفی انجام شده است تاثیر سیگنال نمونه بردار در افزایش نرخ تولید اعداد باینری بررسی نشده است.

در این مقاله، امکان استفاده از خروجی‌های لیزرهای نیمه رسانای آبشار کوانتومی با پسخوراند نوری به عنوان نمونه بردار اپتیکی، در تولید اعداد باینری بررسی می‌شود. این بررسی‌ها در دو حالت، لیزر آبشار کوانتومی با پسخوراند نوری حاصل از آینه خارجی رایج و پسخوراند حاصل از آینه مزدوج فازی صورت می‌گیرد. خروجی‌های لیزر در هردو وضعیت، با استفاده از نمودارهای تحول زمانی شدت خروجی لیزر و طیف فرکانسی این خروجی ها، مقایسه شده و لیزر مناسب انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از مدل هویبرچتس [6] خروجی‌های این لیزرها به اعداد باینری تبدیل شده و نتیجه حاصله با نتایج حاصل از یک روش تولید اعداد تصادفی مشابه در زمینه کاربرد لیزرهای نیمه رسانا مقایسه می‌گردد.

۲- تئوری و مدل

۲-۱ معادلات نرخ لیزر نیمه رسانا

برای محاسبه تحول زمانی خروجی های لیزر آبشار کوانتومی لازم است که معادلات نرخ این لیزرها معرفی گردند. این معادلات در حضور پسخوراند حاصل از آینه خاجی متداول به صورت زیر خواهند بود: [3]

$$\frac{dE(t)}{dt}=\frac{1}{2}(1+i\alpha)\left[N_p g(N_2-N_1)-\frac{1}{\tau_p}\right]E + \eta' \exp(-i\Omega_0\theta)E(t-\theta) \quad (۲-۱)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt}=\frac{I}{q}-(\frac{1}{\tau_{32}}+\frac{1}{\tau_{31}})N_2(t) - g(N_2-N_1)|E|^2 \quad (۲-۲)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt}=\frac{N_2(t)}{\tau_{32}}-\frac{N_2(t)}{\tau_3}+g(N_2-N_1)|E|^2 \quad (۲-۳)$$

در معادلات فوق، E میدان الکتریکی، N_2 و N_1 به ترتیب جمعیت تراز های سوم و دوم بوده و I_{in} جریان تزریقی به تراز سوم می‌باشد. q بار الکترون و g ضریب بهره است. زمان پراکندگی فوتون بین ترازهای سوم و دوم، و بین ترازهای سوم و اول، بین ترازهای دوم و اول به ترتیب با τ_{32}، τ_{31} و τ_{21} نشان داده می‌شوند. τ_p طول عمر فوتون، α ضریب پهن شدگی موثر است. η' شدت پسخوراند، θ تاخیر پسخوراند و $\Omega_0\theta$ فاز پسخوراند می‌باشد. ثابت‌های عددی مورد استفاده در این مقاله مقادیر مورد استفاده در مرجع [9] می باشند. در حالتی که از آینه مزدوج فازی استفاده می‌کنیم، معادله (۲-۱) به صورت زیر اصلاح می‌گردد [3]:

$$\frac{dE(t)}{dt}=\frac{1}{2}(1+i\alpha)\left[N_p g(N_2-N_1)-\frac{1}{\tau_p}\right]E + \eta' \exp(-i2\delta(t-\frac{\tau}{2})+i\Omega_0\theta)E(t-\theta) \quad (۲-۴)$$

که در آن $(-i2\delta(t-\frac{\tau}{2})+i\Omega_0\theta)$ فاز پسخوراند می‌باشد. δ نامیزانی فرکانسی و τ تاخیر زمانی درون آینه است. در این مقاله برای δ مقدار صفر در نظر گرفته شده است. برای پردازش سیگنال نیاز است که داده‌ها به حوزه فرکانسی منتقل گردند. بدین منظور از تبدیل فوریه [1] استفاده می نماییم [7]. بدین ترتیب اگر سیگنال $x(n)$

[1] Fourier Transform

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

باشد، تبدیل فوریه آن به صورت زیر خواهد بود:

$$X(k)=\sum_{n}^{N-1}x(n)e^{\frac{-i2\pi nk}{N}} \qquad (۲-۵)$$

$$k=0,1,2,...N-1$$

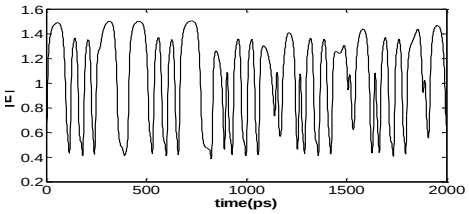
بزرگی $X(k)$ را طیف $x(n)$ گویند. مقادیر k با فرکانس سیگنال خروجی از لیزر متناظر است: $f_k=\frac{kF_s}{N}$. N طول سیگنال نمونه‌برداری شده است. در این محاسبات $N=5091$ و $F_s=6.9THz$ در نظر گرفته شده است.

۲-۲ بررسی نتایج

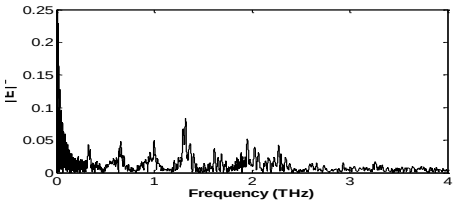
۲-۲-۱ استفاده از پسخوراند متداول

با استفاده از معادلادت نرخ (۲-۱) تا (۲-۳) می‌توان نمودار تحول زمانی شدت خروجی لیزرهای آبشار کوانتومی تحت اثر پسخوراند نوری متداول را ترسیم نمود (شکل ۱-الف). نمودار حاصله، نشان دهنده مولفه‌های مختلف با پهناهای متفاوتی می‌باشد که این مشخصات با ویژگی های سیگنال نمونه بردار آیده‌آل سازگار نیست. زیرا یک سیگنال نمونه بردار ایده‌آل باید پایدار بوده و دارای فرکانس بالایی جهت بالابردن نرخ نمونه برداری باشد[8]. لذا برای برای بررسی دقیق‌تر با استفاده از معادله (۲-۵) طیف فرکانسی سیگنال خروجی لیزر آبشار کوانتومی تحت اثر پسخوراند نوری متداول را رسم می نماییم (شکل۱-ب).

الف)



ب)



شکل ۱: نمودار شدت خروجی لیزر آبشار کوانتومی تحت اثر پسخوراند نوری متداول الف) تحول زمانی ب) تحول فرکانسی برای $\eta'=0.01$ و $\Omega.\theta=0$.

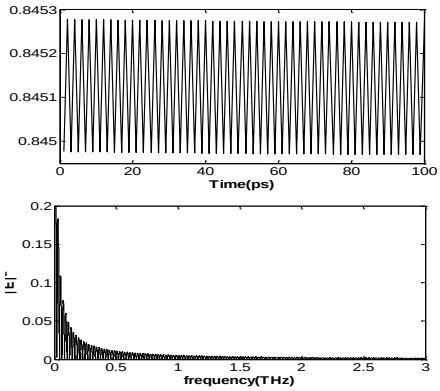
با توجه به شکل ۱_ب مشاهده می‌شود که پیک اصلی طیف فرکانسی که درمحدوده $1.25THz$ قرار دارد، تک مولفه ای نمی باشد. بنابراین لیزر آبشار کوانتومی تحت اثر پسخوراند متداول علی رغم داشتن فرکانس بالا انتخاب مناسبی برای استفاده به عنوان سیگنال نمونه بردار نیست.

۲-۲-۲ استفاده از پسخوراند مزدوج فازی

در وضعیت استفاده از پسخوراند مزدوج فازی با بهره گیری از معالات نرخ مربوطه (معادلات ۲-۲ تا ۲-۴) و همچنین معادله (۲-۵) نمودارهای تحول زمانی و طیف فرکانسی را برای لیزر آبشار کوانتومی تحت شرایط مورد نظر بدست می آوریم (شکل ۲).

الف

ب



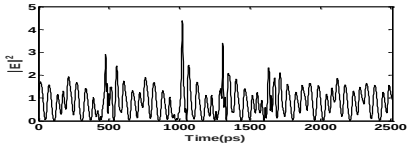
شکل ۲: نمودار شدت خروجی لیزر آبشار کوانتومی در حضور پسخوراند نوری حاصل از آینه مزدوج فازی الف) تحول زمانی ب) تحول فرکانسی برای $\eta'=0.01$ و $\Omega.\theta=0$.

همانطور که در شکل (۲) دیده می شود. خروجی لیزر آبشار کوانتومی تحت اثر پسخوراند مزدوج فازی پایدار بوده و دارای فرکانس بالایی می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که این نوع پسخوراند برای لیزرهای کوانتوم آبشاری می‌توانند انتخاب مناسبی برای امر نمونه برداری از سیگنال‌های رایج در تولید اعداد تصادفی فیزیکی باشد.

۲-۳ استخراج اعداد باینری

داده‌های باینری همان نمایش اعداد در مبنای دو می باشد (۰ و ۱) که اساس کار مخابرات دیجیتال و فیبر نوری را تشکیل می‌دهد [8]. برای بررسی عملکرد لیزر کوانتوم آبشاری در حضور پسخوراند مزدوج فازی، خروجی لیزر را به عنوان سیگنال نمونه برداری کننده از خروجی یک لیزر نیمه رسانای آشوبناک (شکل ۳) بکار بردیم. سپس خروجی نمونه برداری شده را با استفاده از مدل هویبرچتس به اعداد باینری تبدیل کردیم.

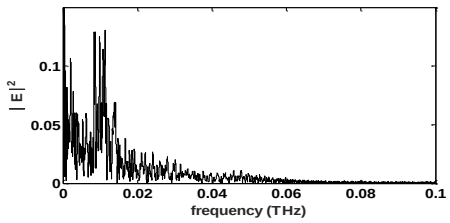
الف)



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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

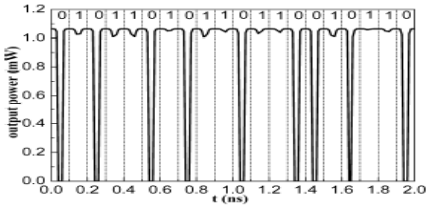
ب)



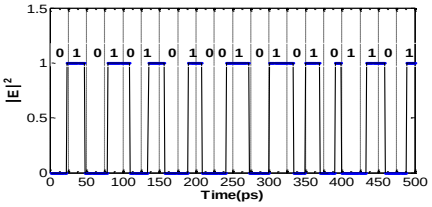
شکل ۳: خروجی لیزر آشوبناک با پهنای پالس فوق پهن الف) شدت بر حسب زمان ب) شدت بر حسب فرکانس. برای فاز پسخوراند π و شدت پسخوراند ۰.۰۴۵۵.

برای مقایسه درستی نتیجه بدست آمده، در شکل (۴) نتایج حاصل از شبیه سازی‌ها و حل عددی معادلات را (شکل ۴-ب) با نتایج مستخرج از عملکرد یک نمونه بردار نیمه رسانای مرسوم قفل مدی [5]، مقایسه می نماییم (شکل ۴-الف). همانطور که مشاهده می‌شود در شکل (۴-الف) مجموعا ۲۰ عدد در بازه زمانی ۲ نانو ثانیه تولید شده است. این در حالی است که همان تعداد عدد توسط لیزرهای کوانتوم آبشاری در حضور پسخوراند مزدوج فازی در بازه زمانی ۰,۵ نانو ثانیه تولید می‌گردد. این موضوع نشان دهنده بالاتر بودن سرعت تولید اعداد تصادفی در روش پیشنهادی این مقاله است.

الف



ب



شکل۴: مقایسه داده های های حاصل از کار ما با داده های حاصل از روش های رایج قبلی الف) داده های باینری حاصل از خروجی آشوبناک با نمونه برداری توسط لیزر مد قفل شده [5] ب) داده های باینری بدست آمده در این مطالعه.

۳- نتیجه‌گیری

در این کار نرخ تولید اعداد باینری در استفاده از خروجی‌های لیزر آبشار کوانتومی با پسخوراند نوری در دو وضعیت، تحت اثر پسخوراند متداول و تحث اثر پسخوراند مزدوج فازی مورد بررسی قرارگرفت. عمل نمونه‌برداری با استفاده از یک فرایند نمونه برداری تمام اپتیکی انجام می گیرد[8]. همچنین تبدیل پالس‌های خروجی به اعداد باینری با بهره‌گیری از یک مقایسه‌گر تمام اپتیکی برپایه روشن- خاموش[۲]که توسط هویبرچتس پیشنهاد شده – بود، صورت گرفت [6]. نتایج نشان داد که نوع پسخوراند اپتیکی مورد استفاده در عملکرد لیزر نیز دارای اهمیت می باشد (شکل ۱ و۲). در مقایسه پسخوراندهای اپتیکی در نظر گرفته شده در این مقاله، تاثیر پسخوراند مزدوج فازی نسبت به پسخوراند متداول در کاواک خارجی لیزر مطلوب تر می باشد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که لیزر آبشار کوانتومی تحث اثر پسخوراند مزدوج فازی می تواند موجب بالا رفتن نرخ بیت تولید کننده‌های تمام اپتیکی گردد و این لیزر ها جایگزین مناسبی برای لیزرهای دیودی معمول در فرآیند تولید اعداد تصادفی هستند.

مراجع

[1] J.D .Hart, et al; “Recommendations and illustrations for the evaluation of photonic random number generators” APL Photonics **9 (**2017) p. 090901.

[2] L. Zhang et al;”640-Gbit/s fast physical random number generation using a broadband chaotic semiconductor laser” Scientific Reports **8** (2017).

[3] J.Ohtsubo; “*Semiconductor lasers: stability, instability and chaos*”; Fourth ed. Vol. ۱۱۱ (۲۰۱۷).

[4] A.Uchida, et al.; “Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers” Nature Photonics**2** (2008).

[5] P.Li, C. Wang, and J.-Z. Zhang; “All-optical fast random number generator” Optics express **18** (2010).

[6] K. Huybrechts; “Numerical and experimental study of the switching times and energies of DFB-laser based All-optical flip-flops”, International Conference on Photonics in Switching, Pisa, Italy, (2009) 15–19.

[7] S R Taghizade; “Digital Signal Processing” (2000).

[8] S.Kumar and M.J. Deen; “Fiber optic communications: fundamentals and applications”; (2014).

[9] G.Friart et al; “Analytical stability boundaries for quantum cascade lasers subject to optical feedback. Physical Review E,93 (2016).

[۲] Flip-flop

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]