

بهینه‌سازی طیفی هارمونیک‌های بالا برای تولید تک‌پالس‌های آتوتانیه توسط الگوریتم ژنتیک

سمیه نسیمی فر و علی نوید

دانشگاه بناب، دانشکده علوم پایه، گروه فوتونیک

چکیده - روشی موثر برای افزایش طیف هارمونیک‌های بالا و تولید تک پالس‌های آتوتانیه با استفاده از لیزر فمتوتانیه با طول موج ۸۰۰ نانومتر ارائه شده است. در این روش از الگوریتم ژنتیک برای کنترل بهینه استفاده شده و قیود مسئله به شیوه مناسبی در آن وارد شده‌اند. اندرکنش لیزر با اتم هلیم یونیده در مدل یک بعدی برای توصیف روش بهینه‌سازی انتخاب شده است. همچنین نشان داده شده است که با انتخاب تابع ارزش مناسب تولید طیف هارمونیک‌ها به میزان زیادی بهبود یافته به نحو موثری منجر به تولید تک پالس آتوتانیه پر شدت می‌شود.

کلیدواژه- الگوریتم ژنتیک، پالس‌های آتوتانیه، کنترل بهینه، لیزرهای فمتوتانیه

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر با ظهور پالس‌های آتوتانیه مشاهده مستقیم دینامیک اتمی و مولکولی امکان‌پذیر شده است. بویژه تولید پالس‌های بسیار کوتاه آتوتانیه مجزا مورد توجه زیادی در علم آتوتانیه قرار گرفته است. روش مناسب تولید پالس‌های آتوتانیه استفاده از برهنه‌ی یک نوار طیفی بسیار پهن می‌باشد [۱]. اخیراً کوتاه‌ترین پالس تولید شده در آزمایشگاه با دوام زمانی ۶۷ آتوتانیه، گزارش شده است [۲]. طیف هارمونیک‌های تولید شده با افت سریع شدت هارمونیک‌های پایین همراه است و سپس ناحیه وسیعی با شدت یکسان (فلات مانند) وجود دارد. بعد از فرکانس خاصی، به نام فرکانس قطع، شدت هارمونیک‌ها سریعاً و به شدت کاهش می‌یابد. برای ناحیه بعد از فرکانس قطع طیف گسلی هارمونیک‌ها دیده نمی‌شود. مشخصات طیف گسلی را می‌توان توسط مدل سه مرحله‌ای نیمه‌کلاسیکی درک کرد [۳]. همچنین نشان داده شده است که برای یک اتم موقعیت فرکانس قطع در نزدیکی $(I_p + 3.17U_p)/\hbar$ قرار گرفته است که در آن I_p انرژی پتانسیل یونیزاسیون اتم و U_p پتانسیل پوندرماتیو لیزر است. بر اساس مدل سه مرحله‌ای ابتدا الکترون از سد پتانسیل تغییر یافته پتانسیل کولنی و پتانسیل برهمکنش میدان لیزر ایجاد شده تونل زنی می‌کند. سپس شتاب یافته و انرژی جنبشی اضافی دریافت کرده و در نهایت با برخورد دوباره با یون مادر گیر افتاده و فوتون‌های پر انرژی گسیل می‌کند.

نظریه کنترل بهینه [۴] به طور گسترده برای کنترل فرایندهای اتمی و مولکولی مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. با اندرکنش پالس‌های شکل یافته با یک سیستم اتمی یا مولکولی رویای کنترل محصولات خروجی به حقیقت پیوسته است. در این روش‌ها مستقیماً از تغییر شکل پالس به صورت تابعی از زمان و از فرایندهای تکرار برای به رسیدن به جواب مناسب استفاده می‌شود. در این مقاله تولید پالس‌های آتوتانیه در اندرکنش اتم هلیم یونیده با لیزر فمتوتانیه در حضور قیود مناسب با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف ما در اینجا دستیابی به تک پالس‌های آتوتانیه در اندرکنش پالس فمتوتانیه با یون هلیم با استفاده از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک است. نشان داده شده است که می‌توان با انتخاب تابع ارزش مناسب در این روش به تک پالس‌هایی با شدت مناسب دست یافت.

۲- مدل نظری

تولید هارمونیک‌های بالا و پالس‌های آتوتانیه را می‌توان با حل معادله شرودینگر وابسته به زمان مورد مطالعه قرار داد. معادله شرودینگر اتم He^+ در مدل

یک بعدی در سیستم واحد اتمی می‌تواند به صورت

$$i \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = \left[-\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) - \varepsilon_L(t)x \right] \psi(x,t) \quad (1)$$

نوشته شود [۶]، که در آن $V(x) = -2/\sqrt{x^2 + 0.5}$ انرژی پتانسیل برهمکنش الکترون با هسته و $\varepsilon_L(t)$ میدان الکتریکی لیزر به صورت

$$\varepsilon_L(t) = E_0 \sin^2(\pi t/T) \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

می‌باشد. در معادله فوق E_0 بیشینه دامنه میدان الکتریکی، $T = 20 \text{ fs}$ پهنای زمانی پوش پالس و $\omega_0 = 0.0587 \text{ a.u.}$ فرکانس زاویه‌ای میدان الکتریکی لیزر است.

معادله شرودینگر وابسته به زمان با استفاده از روش جدا سازی عملگری حل می‌شود. بعد از به دست آمدن تحول زمانی تابع موج $\psi(x,t)$ ، وابستگی زمانی شتاب دو قطبی با استفاده از قضیه اهرنست به صورت

$$R(t) = -\langle \psi(x,t) | \frac{\partial V}{\partial x} - E(t) | \psi(x,t) \rangle \quad (3)$$

محاسبه می‌شود. طیف گسلی میدان الکتریکی از تبدیل فوریه $R(t)$ محاسبه می‌شود و برای رسیدن به شکل مطلوب برای پالس آتوتانیه از فیلتر فرکانس گاوسی شکل

$$f_{\omega c}(\omega) = \exp[-\alpha(\omega - \omega_c)^2] \quad (4)$$

با فرکانس مرکزی ω_c استفاده می‌شود، که در آن $\alpha = -0.004 \text{ a.u.}$ در نظر گرفته شده است. در نهایت میدان گسلی از اتم از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_a(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) f_{\omega c}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

۳- استفاده از الگوریتم ژنتیک

فرایند بهینه سازی الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی اتفاقی است که بر اساس پدیده انتخاب طبیعت و اصول ژنتیک بنا شده است. هدف ما در این مقاله پیدا کردن حالت اولیه خاصی برای سیستم است به نحوی که در اثر اندرکنش با میدان لیزر تک پالس آتوتانیه را تولید کند. بدین منظور حالت اولیه سیستم را ترکیبی خطی از پنج ویژه حالت آن به صورت

$$\psi_0 = \sum_{i=0}^{i=4} c_i \varphi_i \quad (6)$$

$$5.6 \times 10^{13} \text{ Wcm}^{-2} < I_0 < 10^{15} \text{ Wcm}^{-2} \text{ باشد.}$$

برای انجام بهینه سازی تابع ارزش (۸) را به ازای $\beta=1$ و $\beta=1.01$ در نظر می‌گیریم. در این صورت طبق تعریف، توابع ارزش

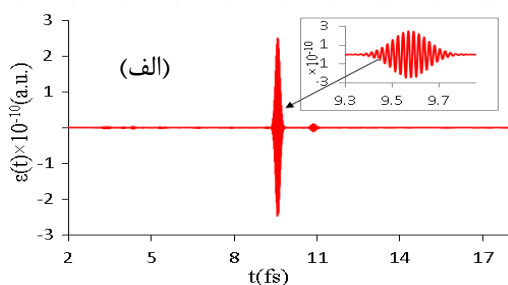
$$J_1 \equiv I_1 / I_t, J_2 \equiv I_1^{1.01} / I_t \quad (11)$$

را در بهینه سازی خود استفاده می‌کنیم. از تابع ارزش J_1 در برخی از مراجع استفاده شده است. ولی تابع ارزش J_2 را برای اولین بار در اینجا معرفی می‌کنیم. تفاوت دو تابع فوق این است که تابع ارزش J_2 وزن بیشتری برای I_1 در مقایسه با I_t می‌دهد. البته توابع ارزش با β مختلف نیز مورد امتحان قرار گرفتند، که در بین آنها $\beta=1.01$ نتایج جالب توجه به همراه داشت.

نتایج بهینه سازی عددی با جمعیت ۵ عضوی انجام شده و پس از طی ۱۵۰ نسل در الگوریتم بهینه سازی ژنتیک به دست آمده‌اند.

پارامترهای بهینه شده با تابع ارزش J_1 برابر با $c_0 = .0669$ ، $\omega_c = 148.68\omega_0$ ، $I_0 = 5.5 \times 10^{14} \text{ Wcm}^{-2}$ و با $c_4 = .952$ ، $c_3 = -.025$ ، $c_2 = -.269$ ، $c_1 = .1275$ تابع ارزش J_2 برابر با $I_0 = 6.4 \times 10^{14} \text{ Wcm}^{-2}$ ، $\omega_c = 137.02\omega_0$ ، $c_0 = .7311$ ، $c_1 = .09703$ ، $c_2 = -.2016$ ، $c_3 = -.171$ ، $c_4 = -.6215$ به دست آمده‌اند.

در شکل ۱ (الف) تحول زمانی تک پالس آتوتانیه بهینه شده با تابع ارزش J_1 ، نشان داده است. با توجه به شکل ۱ (الف) پهنای زمانی پالس (تمام پهنای در نصف بیشینه میدان الکتریکی) در حدود 150 as و بیشینه میدان الکتریکی آن $2.5 \times 10^{-10} \text{ a.u.}$ می‌باشد. در شکل ۱ (ب) تحول زمانی پالس آتوتانیه حاصل از بهینه سازی با تابع ارزش J_2 رسم شده است. در این شکل نیز پهنای زمانی پالس حاصل در حدود 150 as آتوتانیه ولی بیشینه میدان الکتریکی 10^{-4} a.u. است. شکل ۲ شدت طیفی پالس آتوتانیه شکل ۱ (الف) و ۱ (ب) را برحسب مرتبه هارمونیک‌ها نشان می‌دهد.



در نظر می‌گیریم، که در آن ضرایب c_i ثابت‌هایی هستند، که با قید

$$\sum_{i=0}^{i=4} |c_i|^2 = 1 \quad (7)$$

از طریق بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به دست خواهند آمد. علاوه بر این دامنه میدان الکتریکی E_0 و فرکانس زاویه‌ای مرکزی فیلتر ω_c را به مجموعه پارامترهایی که باید بهینه شوند اضافه می‌کنیم. بدین منظور تابع ارزش الگوریتم ژنتیک را به صورت

$$J \equiv I_1^\beta / I_t \quad (8)$$

در نظر می‌گیریم، در معادله (۸) β عددی ثابت بوده و پارامترهای I_1 و I_t متناسب با انرژی عبوری پالس از واحد سطح در مدت زمان‌های مختلف، طبق روابط

$$I_1 \equiv \int_{t_c - \tau}^{t_c + \tau} |\varepsilon(t)|^2 dt, I_t \equiv \int_0^T |\varepsilon(t)|^2 dt \quad (9)$$

تعریف می‌شوند، که در آن $\tau = 5 \text{ a.u.}$ در نظر گرفته شده است. بهینه سازی الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از اعضای اتفاقی، که اصطلاحاً جمعیت نامیده می‌شوند، شروع می‌شود و هر عضو جمعیت توسط هفت پارامتر $c_i (0, \dots, 4)$ ، E_0 و ω_c مشخص می‌شود.

۴- محاسبات عددی و بحث

تابع موج $\psi(t)$ بر اساس روش جداسازی عملگری و با استفاده از تبدیل سریع فوریه محاسبه شده است. برای احتراز از بازتاب‌های ناخواسته تابع موج از دیواره‌های مرزی، از پتانسیل موهومی مناسب استفاده شده است. محدوده حل عددی از $R = -400 \text{ a.u.}$ تا $R = 400 \text{ a.u.}$ ، با فاصله گسسته‌سازی $\Delta R = 0.1 \text{ a.u.}$ و تعداد کل نقاط 2^{13} در نظر گرفته شده است.

محدودیت (۷) در بهینه سازی برای پارامترها با معرفی پارامترهای جدید به صورت:

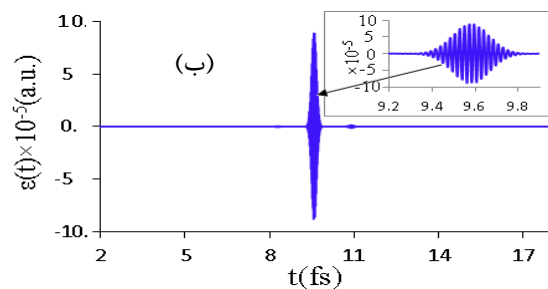
$$\begin{cases} c_0 = \cos a_1 \cos a_2 \\ c_1 = \cos a_1 \sin a_2 \\ c_2 = \sin a_1 \cos a_3 \cos a_4 \\ c_3 = \sin a_1 \cos a_3 \sin a_4 \\ c_4 = \sin a_1 \sin a_3 \end{cases} \quad (10)$$

خود به خود برآورده می‌شود. بنابراین با پارامترهای جدید $(a_i (i=0, \dots, 4))$ ، E_0 و ω_c کار می‌کنیم. از نظر ریاضی تابع هدف $J = J(a_1, a_2, a_3, a_4, E_0, \omega_c)$ تابعی از شش پارامتر جدید خواهد بود. فرض می‌کنیم که شدت پالس در محدوده

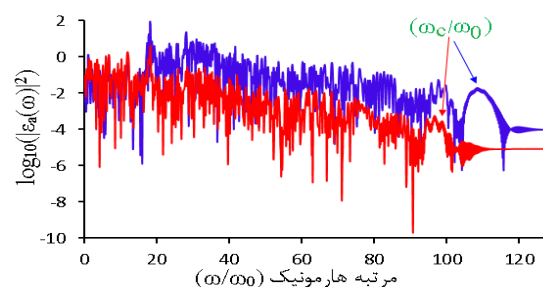
پالس بهینه شده با $J_1 = I_1 / I_t$ است.

مراجع

- [1] J. J. Carrera, X. M. Tong, S.-I. Chu, "Creation and control of a single coherent attosecond xuv pulse by few-cycle intense laser pulses", *Phys. Rev. A*, Vol. 74, No. 2, pp. 023404(1-7), 2006.
- [2] K. Zhao, Q. Zhang, M. Chini, Y. Wu, X. Wang, Z. Chang, "Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch", *Opt. Lett.*, Vol. 37, No. 18, pp. 3891-3893, 2012.
- [3] P. B. Corkum, "Plasma Perspective on Strong-Field Multiphoton Ionization", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 71, No. 13, pp. 1994-1997, 1993.
- [4] C. Brif, R. Chakrabarti, H. Rabitz, "Control of quantum phenomena: past, present and future", *New Journal of Physics*, Vol. 12, No. 7, pp. 075008(1-68), 2010.
- [5] K. Krieger, A. Castro, E. K. U. Gross, "Optimization schemes for selective molecular cleavage with tailored ultrashort laser pulses", *Chemical Physics*, Vol. 391, No.1, pp. 50-61, 2011.
- [6] Z. Zhai, X.-s. Liu, "Extension of the high-order harmonics and an isolated sub-100 as pulse generation in a two-colour laser field", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, Vol. 41, No. 12, pp. 125602(1-6), 2008.



شکل ۱: تغییرات زمانی پالس آتوثانیه بهینه شده، که با تابع ارزش J_1 (شکل الف) و J_2 (شکل ب) توسط الگوریتم ژنتیک به دست آمده است.



شکل ۲: شدت طیفی هارمونیک‌های تولید شده با تابع هدف J_1 (نمودار قرمز رنگ) و تابع هدف J_2 (نمودار آبی رنگ).

دوام زمانی پالس به دست آمده از تابع ارزش J_2 تقریباً برابر دوام زمانی پالس به دست آمده از تابع ارزش J_1 بوده، ولی شدت میدان الکتریکی پالس آتوثانیه تولید شده با J_2 بسیار بزرگتر از شدت میدان الکتریکی دست آمده از تابع ارزش J_1 است. فرکانس زاویه‌ای قطع شدن هارمونیک‌ها (ω_c) در شکل ۲ نشان داده شده است. طبق شکل فوق بیشینه هارمونیک (ω_c/ω_0) برای نمودار قرمز و آبی به ترتیب برابر 97 و 110 می باشد. طبق شکل فوق شدت طیفی و همچنین ناحیه طیفی هارمونیک‌های تولید شده در نمودار آبی رنگ بیشتر از شدت و ناحیه طیفی نمودار قرمز رنگ است. بنابراین بهینه سازی با تابع هدف J_2 به نتایج بسیار جالب توجهی منجر شده است.

۵- نتیجه گیری

به طور خلاصه نشان داده‌ایم که با انتخاب تابع ارزش مناسب در بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک می‌توان به تک پالس‌های آتوثانیه با شدت مناسب دست یافت. نتایج محاسبات نشان می‌دهند که تولید هارمونیک‌های بالا با انتخاب تابع ارزش $J_2 = I_1^{1.01} / I_t$ بهبود می‌یابد، طوری که بخش فلات مانند هارمونیک‌های بالای تولید شده افزایش می‌یابد. پالس بهینه شده علاوه بر یکتا بودن دارای شدت پنج مرتبه مقداری بیشتر از شدت