



بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

تخمین طیف پرتو فوتونی انواع مختلف شتابدهنده‌های درمانی بر مبنای داده‌های عبوری

ناصر رسول‌پور، علیرضا کمالی‌اصل*، حمیدرضا همتی، میررشید حسینی‌اقدام
(دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه پرتوپزشکی)

چکیده:

یک معادله‌ی انتگرالی می‌تواند بیانگر ارتباط بین طیف پرتو خروجی از شتابدهنده و شدت آن باشد. در راستای حل این معادله، برای انرژی 6MeV شتابدهنده‌ی زیرمنس و انرژی 18MeV شتابدهنده‌ی واریان، بر اساس داده‌های عبوری خالی از نویز و نیز داده‌های حاوی نویز گوسی افزوده شده، تخمین طیف با استفاده از الگوریتم بیشینه‌سازی امید ریاضی (EM) صورت گرفت. اختلاف نسبی میانگین انرژی برای داده‌های خالی از نویز، در انرژی 18MeV ، $2/51$ درصد و در انرژی 6MeV ، $1/61$ درصد حاصل شد. با افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR)، میانگین و واریانس اختلاف نسبی مقادیر داده‌های عبوری طیف تخمینی از داده‌های عبوری ایده‌آل افزایش یافت.

کلید واژه: تخمین طیف، طیف انرژی شتابدهنده، داده‌های عبوری، بازسازی طیف، شتابدهنده مگاولتاژ

مقدمه

انواع مختلفی از شتابدهنده‌های درمانی مگاولتاژ به عنوان منابع پرتو ایکس در طراحی درمان استفاده می‌شوند. آگاهی از توزیع طیف فوتونی گسیل شده توسط این شتابدهنده‌ها جهت انجام محاسبات دقیق دزسنجی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. چنانچه داده‌های عبوری با دقت مطلوب در دسترس باشد، می‌توان توسط محاسبات و الگوریتم‌های ریاضی طیف گسیلی را با دقت بسیار بالا تخمین زد و جهت محاسبات دقیق پیش‌بینی توزیع دز و بهینه‌سازی طرح درمان استفاده نمود.

سیلبرستین برای اولین بار بازسازی توزیع طیف بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده را پیشنهاد نمود [۱]. مسئله بازسازی طیف از روی داده‌های عبوری در زمره مسائل بدوضع قرار دارد. تا دهه هشتاد استفاده از تکنیک لاپلاس، حداقل کردن مربعات خطا و نیز الگوریتم‌های ابداعی مختلف برای حل این مسائل رواج یافت. در دهه هشتاد، روش پایدارساز تجزیه به مقادیر تکین (SVD) در ارتباط با مسئله تخمین طیف به کار گرفته شد [۲]. واگنر در سال ۱۹۹۹ الگوریتم ابداعی خودش را در گستره انرژی‌های 25keV تا 18MeV اعمال نمود و نتایج قابل قبولی به دست آورد [۳] که در سال‌های اخیر توسعه داده شده‌اند [۴-۵]. ایده استفاده از الگوریتم EM در حل مسئله بدوضع بازسازی طیف به سال ۲۰۰۵ و کارهای سیدکی برمی‌گردد [۶]. سیدکی با مقایسه الگوریتم EM و روش SVD کارایی الگوریتم



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

EM را اثبات نمود. پس از او، این الگوریتم در کاربردهای مختلف نظیر CT اسکن [۷] و شتاب‌دهنده [۸] به کار گرفته شد.

روش کار

الف) مسئله‌ی بازسازی طیف

یک معادله‌ی انتگرالی می‌تواند توصیف‌کننده‌ی تضعیف طیف چندفام (polychromatic) باشد. داده‌های تضعیف یا عبوری از فانتومی با ضخامت T و مپ تضعیف $\mu(E, x)$ توسط رابطه زیر توصیف می‌شوند:

(۱)

که $W(E)$ طیف مجموعه چشمه و آشکارساز، E_{max} بیشینه انرژی فوتون در طیف و I_{poly} شدت باریکه چندفام خروجی است. با گسسته سازی معادله‌ی انتگرالی (۱)، می‌توان داده‌های عبوری را توسط یک سیستم معادلات ماتریسی خطی به صورت زیر توصیف کرد:

(۲)

که در این معادله یک ماتریس $m \times 1$ حاوی داده‌های عبوری اندازه‌گیری شده (t_m) ، m تعداد کل اندازه‌گیری‌ها، n تعداد بین‌های (bins) نمونه‌برداری از طیف اصلی است که بسته به پهنای بین مورد نیاز (رزولوشن انرژی) تعیین می‌شود. ماتریس C_n مجهول رابطه بالا، یک طیف نمونه‌گیری شده از طیف اصلی است. ماتریس A_{mn} نیز یک ماتریس محاسباتی است که با توجه به ثابت‌های تضعیف خطی و ضخامت فانتوم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۳)

همان‌طور که گفته شد C_n مجهول و بیانگر طیف مجموعه چشمه و آشکارساز است. هدف روش‌های تخمین طیف، ارائه راه‌حلی برای تعیین C_n از روی مجموعه‌ای از داده‌های تضعیف است.

ب) الگوریتم EM

الگوریتم بیشینه‌سازی امیدریاضی (Expectation Maximization) یک روش تکرارشونده است که به دنبال یافتن برآوردی با بیشترین درست‌نمایی برای پارامترهای یک توزیع پارامتری است. به منظور حل معادله ماتریسی رابطه (۲) در این تحقیق از الگوریتم کارآمد EM استفاده شده است. بر اساس این الگوریتم می‌توان از رابطه‌ی بازگشتی زیر برای بازسازی طیف مجهول بر اساس یک حدس اولیه دلخواه استفاده کرد [۶]:

(۴)



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

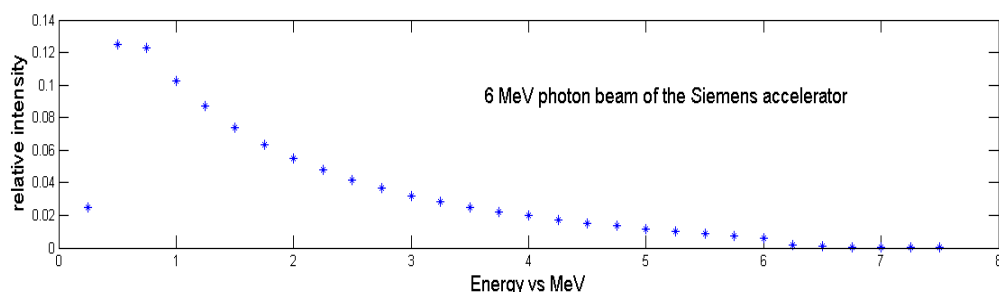
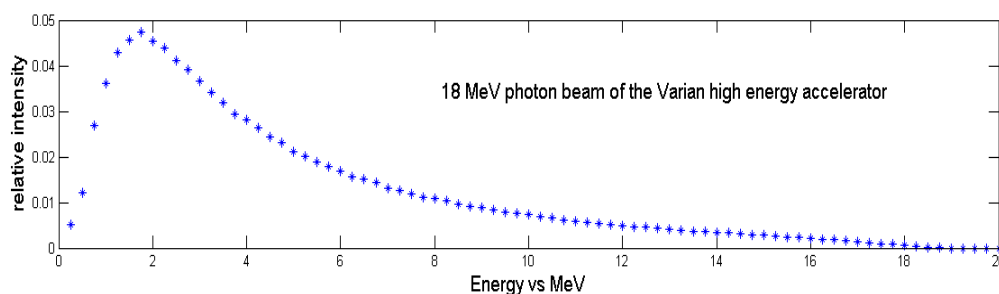
۱۷ و ۱۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

چنانچه مقادیر اولیه غیرمنفی استفاده شود، غیرمنفی بودن مقادیر محاسبه شده برای طیف به صورت خودکار تضمین می‌شود در این پژوهش از یک حدس اولیه سینوسی یکسان در هر دو حالت استفاده شده است.

ج) شبیه‌سازی

در مورد طیف فوتونی شتاب‌دهنده زمینس ۶ MeV و شتاب‌دهنده واریان ۱۸ MeV و بر اساس توزیع طیف‌های واقعی محاسبه شده در کد محاسباتی BEAM Monte-Carlo توسط شیخ-باقری و روگرس [۹]، عملکرد روش-EM در تخمین طیف باریکه مگاولتاژ ارزیابی شده است. داده‌های عبوری توسط نرم‌افزار مطلب محاسبه شدند. برای داده‌های عبوری ایده‌آل یا خالی از نویز و نیز داده‌های عبوری حاوی نویز گوسی افزوده شده با نسبت‌های سیگنال به نویز مختلف، عملکرد الگوریتم EM ارزیابی شده است. پیاده‌سازی الگوریتم در نرم‌افزار مطلب انجام شد.

شکل (۱) طیف پرتو فوتونی شتاب‌دهنده‌های واریان ۱۸ MeV و زمینس ۶ MeV را نشان می‌دهد. این طیف‌های اولیه از مرجع [۹] اقتباس شده‌اند.



شکل ۱: طیف پرتو فوتونی شتاب‌دهنده‌های واریان ۱۸ MeV و زمینس ۶ MeV [۹]

پارامترهای زیر برای ارزیابی نتایج استفاده شدند:



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

RMED: بیانگر اختلاف نسبی میانگین انرژی (Relative Mean Energy Difference) طیف از طیف مبنا است و از رابطه زیر حاصل می‌شود:

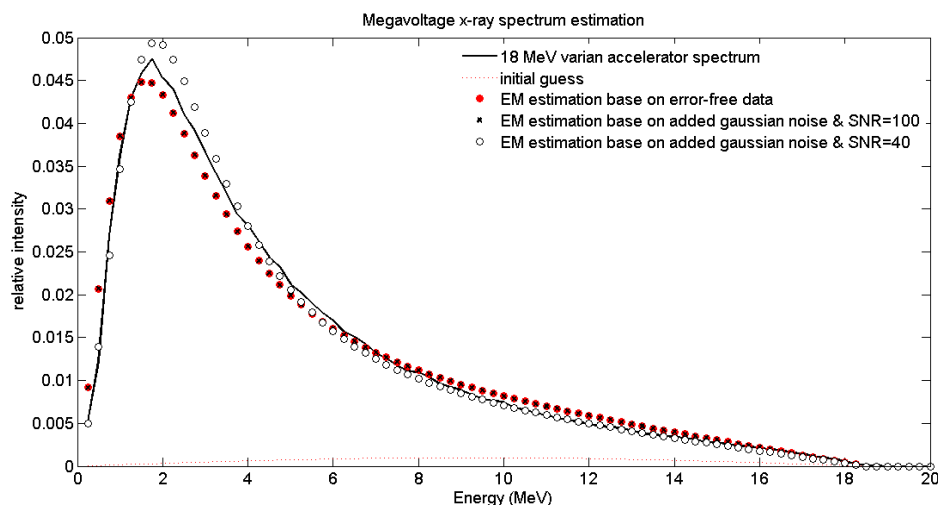
(۵)

که در این رابطه ME_{base} میانگین انرژی طیف مبنا است و $ME_{estimated}$ بیانگر میانگین انرژی طیف تخمینی است. اختلافات نسبی نیز در این پژوهش به صورت زیر حاصل شده‌اند:

(۶)

نتایج و بحث

شکل (۲) عملکرد الگوریتم EM در تخمین طیف پرتو فوتونی شتاب‌دهنده‌های ۱۸ MeV واریان و ۶ MeV زیمنس، در حالت‌های وجود و عدم وجود نویز گوسی اضافه شده با SNR معین را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که الگوریتم در صورت وجود نویز در داده‌های عبوری نیز قادر به تخمین مناسب طیف است. اثرات نویز در انرژی‌های بالا، بیشتر است به طوری که نویز با SNR برابر ۴۰ dB کیفیت طیف تخمینی را در انرژی ۱۸ MeV به شدت کاهش داده است (شکل ۲). لذا تعیین رویکرد مناسب برای اندازه‌گیری داده‌های عبوری با دقت بالا، در این انرژی‌ها حائز اهمیت‌تر است.

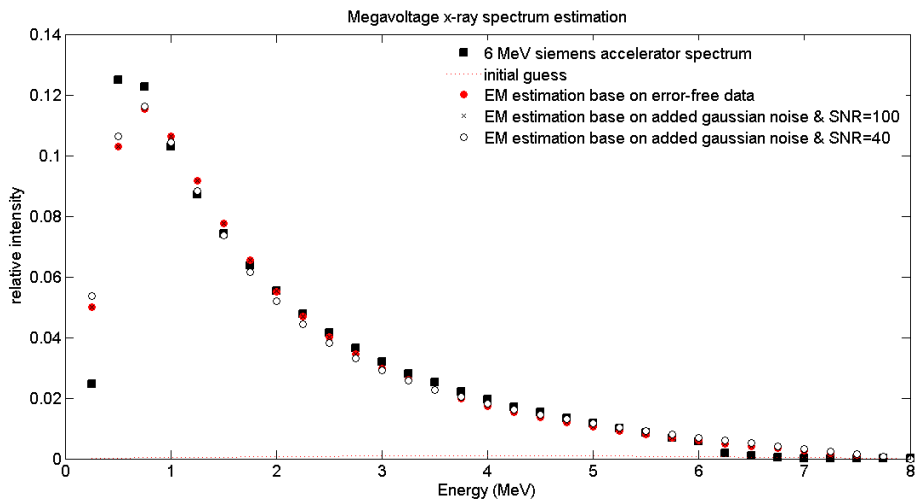


الف



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



ب

شکل ۲: تخمین طیف پرتو فوتونی انواع مختلف شتاب‌دهنده‌های مگاولتاژ، الف) Varian 18 MeV، ب) Siemens 6

MeV

پارامترهای کمی مختلفی برای ارزیابی دقت طیف‌های تخمینی در جدول (۱) ذکر شده‌اند. با افزایش مشارکت نویز گوسی (کاهش SNR)، میانگین و واریانس خطا افزایش می‌یابد. در نتیجه از کیفیت طیف تخمینی کاسته می‌شود. عدم وجود پیک‌های مشخصه در طیف گسیلی شتاب‌دهنده و صفر شدن مقادیر ابتدایی و انتهایی طیف، به‌کارگیری حدس‌های اولیه منطقی‌تر و کارآمدتر را ساده‌تر می‌کند.

جدول ۱: ارزیابی اثرات وجود و عدم وجود نویز گوسی بر روی عملکرد الگوریتم EM

الف) میانگین اختلاف نسبی مقادیر داده‌های عبوری مورد انتظار روش EM از مقادیر ایده‌آل به صورت درصدی
 ب) واریانس اختلاف نسبی مقادیر داده‌های عبوری مورد انتظار روش EM از مقادیر ایده‌آل به صورت درصدی

RMED %	میانگین انرژی طیف (MeV)	ب	الف		
-	۴/۸۸۰۳	-	-	طیف واقعی	
-۲/۵۱۰۰	۵/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۴۷	۰/۳۵۶	تخمین EM	شتاب‌دهنده
-۲/۵۱۴۰	۵/۰۰۳	۰/۰۰۲۴۷	۰/۳۵۶	تخمین EM با SNR=100	۱۸ MeV واریان
۲/۳۵۶۴	۴/۷۶۵۳	۰/۰۷۷۴۰	۱/۶۴۳	تخمین EM با SNR=40	
-	۱/۹۱۰۰	-	-	طیف واقعی	



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

-۱/۶۸۰۶	۱/۹۴۲۱	۰/۰۰۴۸۸	۰/۴۲۹۹	تخمین EM	شتاب دهنده
-۱/۶۸۰۶	۱/۹۴۲۱	۰/۰۰۴۹۲	۰/۴۳۰۴	تخمین EM با SNR=100	
-۳/۷۵۹۲	۱/۹۸۱۸	۰/۱۴۲۷۰	۱/۹۳۷۸	تخمین EM با SNR=40	۶MeV زیمنس

نتیجه گیری

بر اساس یافته‌های این تحقیق، با توجه به قابلیت، عملکرد و دقت الگوریتم EM در مقادیر متفاوت نویز، نتایج این روش می‌تواند در کاربردهای مختلف نظیر محاسبات توزیع دز، بهینه کردن طراحی درمان و نیز کالیبراسیون‌های متداول شتاب‌دهنده‌های درمانی مورد استفاده واقع شود.

مراجع

- [1] L. Silberstein, "Determination of the spectral composition of x-ray radiation from filtration data", J. Opt. Soc. Am., 22, 265-280, 1932.
- [2] Tominaga, S., A singular-value decomposition approach to X-ray spectral estimation from attenuation data. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1986. 243(2): p. 530-538.
- [3] Waggner, R.G., et al., X-ray spectra estimation using attenuation measurements from 25 kVp to 18 MV. Medical physics, 1999. 26(7): p. 1269-1278.
- [4] Iwasaki, A., et al., Characteristic features of a high-energy x-ray spectra estimation method based on the Waggner iterative perturbation principle. Medical physics, 2006. 33(11): p. 4056-4063.
- [5] Iwasaki, A., et al., Reconsideration of the Iwasaki-Waggner iterative perturbation method for reconstructing high-energy X-ray spectra. Radiological physics and technology, 2012. 5(2): p. 248-269.
- [6] Emil Y. Sidky, Lifeng Yu, Xiaochuan Pan, Yu Zou and Michael Vannier, "A robust method of x-ray source spectrum estimation from transmission measurements: Demonstrated on computer simulated, scatter-free transmission data", J. Appl. Phys., 97, 124701, 2005.
- [7] Duan, X., et al., CT scanner x-ray spectrum estimation from transmission measurements. Medical physics, 2011. 38(2): p. 993-997.
- [8] Manciu, M., et al., Robust megavoltage x-ray spectra estimation from transmission measurements. Journal of X-ray Science and Technology, 2009. 17(1): p. 85-99.
- [9] Sheikh-Bagheri, D. and D. Rogers, Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code. Medical physics, 2002. 29(3): p. 391-402.