



CS06RA886

## AUTOMATIZOVANA NEDESTRUKTIVNA ANALIZA NUKLEARNOG OTPADA POMOĆU EMISIONE KOMPJUTERIZOVANE TOMOGRAFIJE

P. Marinković, V. Ljubenov<sup>1</sup>

Elektrotehnički fakultet, Beograd

<sup>1</sup> Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd

### SADRŽAJ

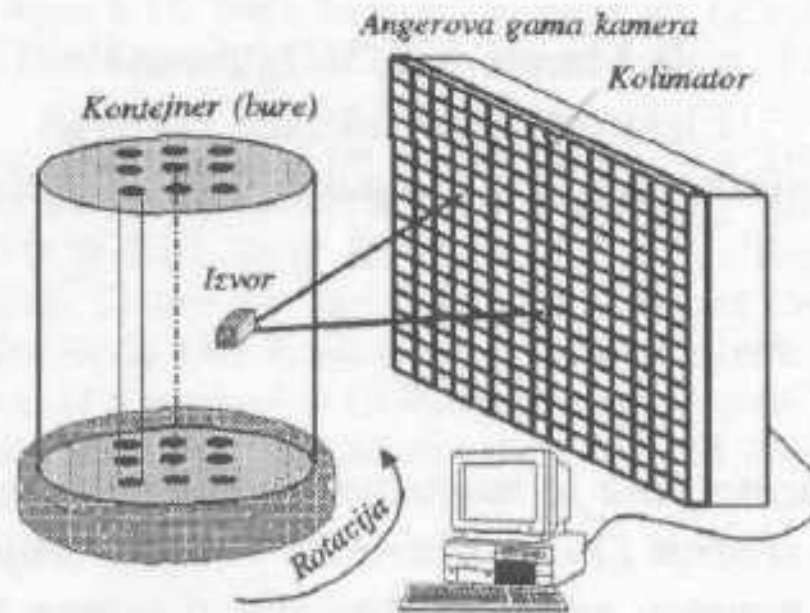
*U ovom radu razmatrana je mogućnost korišćenja automatizovane nedestruktivne analize nuklearnog otpada srednje i niske aktivnosti i transuranijskog otpada, smeštenog u kontejnerima (buradima), pomoću emisione kompjuterizovane tomografije (ECT). Posebna pažnja posvećena je korekciji na atenuaciju, rasejanje, kvantni šum i zamućenje sa dubinom. Konstatovano je da su iterativni algoritmi za rekonstrukciju slike najbolje rešenje jer omogućavaju sve ove korekcije jednovremeno.*

### UVOD

Automatizovanu nedestruktivnu analizu nuklearnog otpada srednje i niske aktivnosti i transuranijskog otpada, smeštenog u kontejnerima (buradima), moguće je realizovati pomoću transmisiona i emisiona tomografije [1]. Transmisioni sistemi (koji se nazivaju kompjuterizovanom tomografijom - CT) obično koriste eksterno visoko energetska X-zračenja, prilagođeno energiji gama zračenja radionuklida u buretu. Oni daju vrlo preciznu trodimenzionalnu - 3D sliku unutrašnjosti buradi (sa prostornom rezolucijom reda 2 mm), a za detekciju transmitovanog zračenja koriste ansamble većeg broja malih individualnih detektora X-zračenja. Međutim, CT uređaji ne mogu dati informaciju da li su detektovani materijali u buradima radioaktivni ili ne, već samo energetska zavisnu atenuacionu mapu. Informaciju o prisustvu i raspodeli radioaktivnog materijala pruža emisiona kompjuterizovana tomografija. Pasivna ECT, bazirana na Angerovoj kameri sa NaI(Tl) kristalom [2], predstavlja prihvatljivo tehničko rešenje u slučaju buradi u kojima je radioaktivni materijal zaliven u smolu, beton, staklo ili se nalazi u metalnoj ili čeličnoj matrici, kao i u slučaju ostalih načina čuvanja radioaktivnog otpada u buradima [3]. Ovom tehnikom moguća je pouzdana kvantitativna analiza zatvorenih buradi (bez potrebe njihovog otvaranja, što može biti potencijalno opasno), sa visokom tačnošću i po prihvatljivoj ceni koštanja.

Prednosti emisiona tomografije su mogućnost identifikacije i lokalizacije (u trodimenzionalnom prostoru) radioaktivnih izvora koji su distribuirani neuniformno ili uniformno unutar nehomogene matrice i mogućnost detektovanja radioaktivnosti nižeg nivoa nego što je to moguće uraditi konvencionalnim gama skenerima. Druga prednost je jednostavna i brza kalibracija sistema, kao i mogućnost utvrđivanja o kom se izvoru radi čim

se identifikuje. Sistem može biti i mobilan, pa se može dovesti do lokacije gde se čuva radioaktivni otpad. ECT sa Angerovom gama kamerom koristi NaI(Tl) scintilator visoke kvantne efikasnosti velike aktivne površine, kolimator prilagođen visokim energijama gama fotona emitovanih iz radioaktivnog otpada i široki energetski prozor jednokalanog amplitudskog analizatora (kako bi se uhvatili fotoni različitih energija). Postoje sistemi sa jednom ili dve kamere, sve u zavisnosti od veličine bureta. Za vreme akvizicije podataka najčešće samo bure mora da rotira u cilju snimanja potrebnog broja projekcija iz kojih se rekonstruišu slike slojeva ili direktno 3D slika. Slike slojeva su rezolucije od 32 x 32 do 128 x 128 piksela, a debljina sloja približno odgovara rezoluciji slike sloja.



Slika 1. Eksperimentalna aparatura za snimanje kontejnera sa nuklearnim otpadom Angerovom gama kamerom

## TEORIJA

ECT snima inherentnu emisiju gama zračenja radioaktivnog otpadnog materijala smeštenog u buradima iz više projekcija formirajući sinogram na osnovu koga se tomografskim metodama rekonstrukcije slike (baziranih na inverznoj Radonovoj transformaciji) dolazi do slike slojeva unutar objekta snimanja. Ako se za ceo postupak koristi Angerova gama kamera moguće je u relativno kratkom vremenskom intervalu (u kome bure sa radioaktivnim otpadom treba da rotira oko aksijalne ose) dobiti jednovremeno slike više transferzalnih slojeva, a na osnovu njih i 3D volumetrijske podatke za celo bure (slika 1).

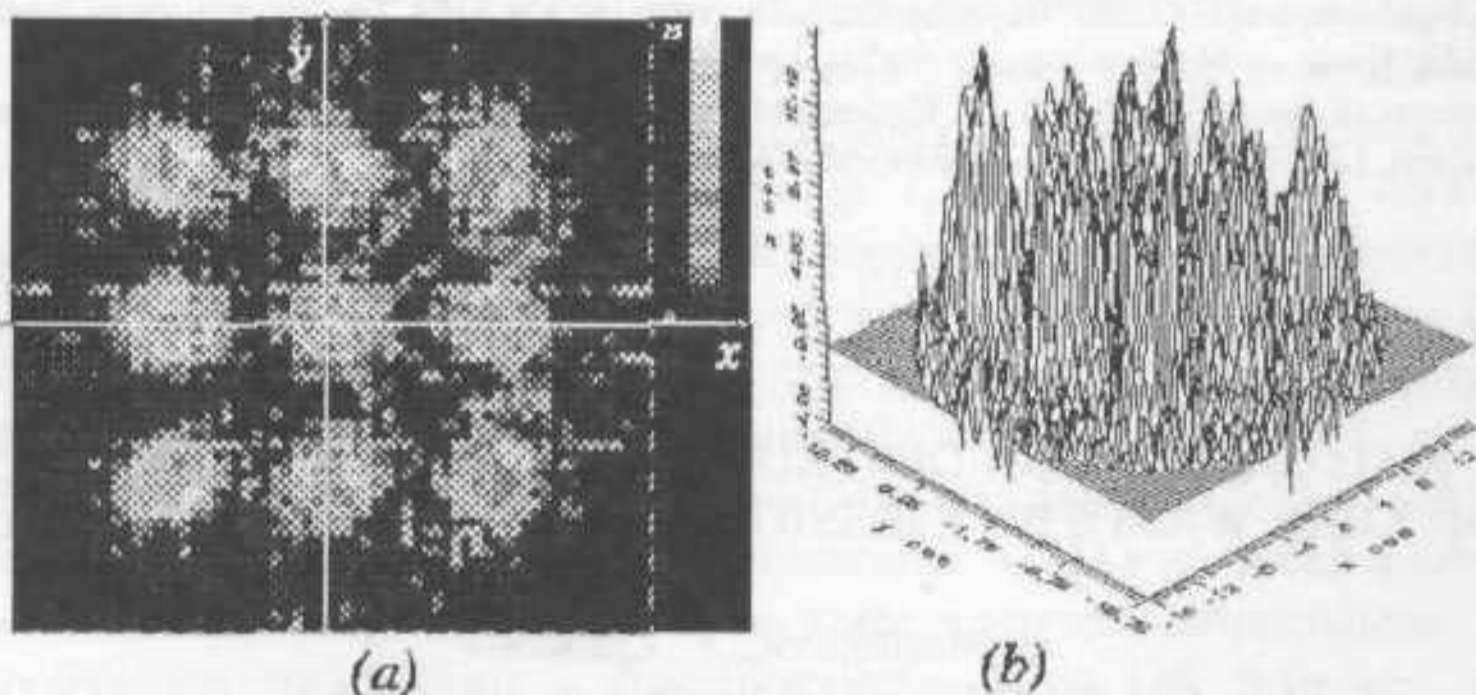
Ideja o korišćenju Angerove gama kamere za snimanje radioaktivnog otpada preuzeta je iz medicinske vizualizacije. Pri tome je kamera modifikovana u cilju prilagođenja novim uslovima snimanja. Scintilator je veće debljine u cilju povećanja efikasnosti detekcije za energije fotona oko i iznad 1 MeV, otvori kolimatora su znatno većih dimenzija (čak i do 20 mm), dok je debljina zidova kolimatora usklađena sa očekivanim energijama gama fotona (reda 1 mm). Zbog velika mase kamere i njenog znatnog gabarita nepraktično je kameru doneti do kontejnera, već je mnogo prihvatljivije da se kontejner donese do uređaja za snimanje gde se nalazi gama kamera, što je usvojeno tehničko rešenje.

Posebna pažnja se mora posvetiti rekonstrukciji slike. Rekonstruisana tomografska slika mora da ostvari pouzdanost u kvantifikaciji u smislu intenziteta, oblika i preciznosti položaja izvora zračenja. Ovaj ambiciozni cilj se teško postiže s obzirom da je ceo proces akvizicije podataka perturbovan mnogim faktorima. Fotoelektričnim efektiom gama fotoni se gube u materijalu, što u znatnoj meri smanjuje broj primarnih fotona koji se mogu detektovati (atenuacioni proces). Proces snimanja je, međutim, u mnogo većoj meri ometen fotonima koji su pretrpeli Komptonovo rasejanje, jer merni sistem registruje i njih ako uđu u paralelni snop

koji prolazi kroz neki od otvora kolimatora. Ovo vodi degradaciji preciznosti lokalizovanja izvora zračenja i smanjuje kontrast u rekonstruisanoj slici. Poznat efekat geometrijske zavisnosti polusenke (penumbre) od dubine izvora je uzrok prostorne zavisnosti odziva detektora sa kolimatorom. Na kraju, perturbaciju izaziva Puasonova statistička priroda emisije fotona, posebno ako je izvor male aktivnosti. Kompenzacija na atenuaciju, odziv detektora, Komptonovo rasejanje i kvantni šum predmet je razmatranja u nuklearnoj medicini preko dve decenije. Svi ovi problemi javljaju se i kod inspekcije buradi sa radioaktivnim otpadom ECT metodom. Primena tomografskih tehnika za određivanje vrste, raspodele i intenziteta zračenja u buradima sa radioaktivnim otpadom zahteva matematičku rekonstrukciju slike sloja na osnovu izmerenih tomografskih projekcija. Do ovog trenutka razvijeno je mnoštvo metoda rekonstrukcije slike sloja, ali pokazalo se da su algebarske metode superiorne u odnosu na transformacione. One omogućavaju jednovremenu korekciju na atenuaciju, rasejanje, geometrijsku zavisnost odziva detektora i kvantni šum, sve uz jednovremeno dobijanje 3D volumetrijske slike objekta snimanja (vokselizovanog objekta). Metod maksimalne verodostojnosti sa Puasonovom statistikom daje (u estimizaciono-maksimizacionoj proceduri - MLEM) sadržaj vokselu objekta snimanja u sledećem iterativnom postupku

$$f_k^{(p+1)} = \frac{1}{\sum_m R_{mk}} \sum_m P_m \frac{R_{mk} f_k^{(p)}}{\sum_i R_{mi} f_i^{(p)}}, \quad (1)$$

gde je  $f_k^{(p)}$  estimacija sadržaja  $k$ -tog vokselu objekta snimanja u  $p$ -toj iteraciji,  $P_m$  je projekcija u  $m$ -tom snopu, dok je  $R_{mk}$  član matrice odziva sistema [4]. Matrica odziva sistema uračunava uticaje atenuacije, rasejanja i geometrijskog faktora. Iako ovaj iterativni postupak daje dobar kvalitet rekonstruisane slike, on nije pogodan za rutinsku primenu zbog spore konvergencije i nepoželjne tendencije pojačavanja artefakata sa iteracijama [5]. Stoga su razvijene druge iterativne procedure koje treba da daju sliku u malom broju iteracija bez intenziviranja artefakata [6].



Slika 2. Rekonstruisana slika transferalnog sloja u kontejneru sa radiaktivnim otpadom (a); trodimenzionalna predstava toga sloja (b)

## VALIDIZACIJA ECT ZA SNIMANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Mogućnost korišćenja ECT za snimanje nuklearnog otpada u buradima demonstrirana je na slici 2 na kojoj je prikazan transferalni sloj u cilindričnom kontejneru

(radijusa 16 cm), koji ima regularnu matricu (koraka 8 cm) sa devet cevi (radijusa 17.5 mm) u kojima se nalazi radioaktivni materijal. Pritom je modelovano snimanje samo gama linije Cs-137 na energiji 661.6 keV. Matrica odziva sistema određena je trodimenzionalnim modelom projektora koji uključuje rasejanje, atenuaciju, geometrijski faktor i odziv detektora. Sinogram digitalnog fantoma formiran je Monte Karlo simulacijom pomoću programa MCNP-4B [7] i standardne biblioteke fotonskih podataka MCPLIB. Rekonstrukcija slike obavljena je metodom MLEM u rezoluciji 64 x 64 piksela sa dimenzijom piksela od 0.5 cm x 0.5 cm. Vidi jasna lokalizacija izvora zračenja, a odstupanja podataka rekonstruisanih na bazi tomografskih projekcija i onih zadatih u definiciji fantoma su u granicama od nekoliko procenata.

## ZAKLJUČAK

Potvrđena je mogućnost korišćenja automatizovane nedestruktivne analize nuklearnog otpada srednjeg i niske aktivnosti i transuranijskog otpada, smeštenog u kontejnerima (buradima), pomoću emisije kompjuterizovane tomografije. Osnovna prednost ove metode je inspekcija bez otvaranja kontejnera. Glavni nedostatak je mala osetljivost sistema, što iziskuje relativno dugo vreme snimanja.

## LITERATURA

- [1] H.E. Martz, G.P. Roberson, C. Robert-Coutant, D.J. Schneberk, and D.C. Camp. "Quantitative Waste Assay Using Gamma-Ray Spectrometry and Computed Tomography". *Proc. 14-th Annual ESARDA Meeting, Salamanca, Spain, May 4-8, 1992, p.273*
- [2] H.O. Anger, "Scintillation camera with multichannel collimators". *J. Nucl. Med., Vol.5, pp.515-531, 1964.*
- [3] "Waste Inspection Tomography (WIT)", *Innovative Technology, Summary Report, DOE/EM-0597, U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Office of Science and Technology, April, 2001.*
- [4] A.C. Kak and M. Slaney, "Principles of computerized tomographic imaging", *IEEE Press., 1988.*
- [5] P.J. Green, "Bayesian reconstruction from emission tomography data using a modified EM algorithm", *IEEE Trans. Med. Imaging, Vol. MI-9, No.1, pp.84-93, march 1990.*
- [6] S. Lee, A. Rangarajan, and G.Gindi, "Bayesian image reconstruction in SPECT using high-order mechanical models as priors", *IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.14, pp.669-680, 1995.*
- [7] J. J. Briesmeister (Editor), "MCNP<sup>TM</sup> - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M Report, Los Alamos National Laboratory (March 1997).

## ABSTRACT

### AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE CHARACTERIZATION OF NUCLEAR WASTE BY EMISSION COMPUTERIZED TOMOGRAPHY

P. Marinković, V. Ljubenov<sup>1</sup>

Faculty of Electrical Engineering, Belgrade,

<sup>1</sup> Institute of Nuclear Science "Vinča", Belgrade

The objective of this paper is discussion of the possibility to use an automated non-destructive analysis of medium and low-level radiation waste and transuranic waste, lodged in drums, by means of emission computerized tomography (ECT). Attenuation, scatter, quantum noise and depth blurring are treated. It was recognized that iterative algorithms for image reconstruction are the best solution because they allows all needed corrections simultaneously.