

Zdokonalení systému kontinuálního monitorování radioaktivní kontaminace povrchových vod využitím výpočetního algoritmu

MICHAL FEJGL, MIROSLAV HÝŽA

Klíčová slova: spektrometrie gama – NaI(Tl) – monitorování radiační situace – havarijní monitorování – ^{137}Cs – přenos bázevých komponent

SOUHRN

Stať popisuje praktické aspekty uplatnění algoritmu NASVD při zpracování gama spekter ze sítě kontinuálních monitorovacích stanic gama aktivity v říční vodě (SAGMA) s důrazem na přenos bázevých komponent mezi různými lokalitami. V minulosti byl vliv dekonvoluční metody NASVD na zlepšení citlivosti SAGMA ověřen v poloterénních podmínkách. Po umístění sítě přístrojů SAGMA do reálných říčních podmínek byla metoda NASVD použita také na spektra z těchto přístrojů. Za tímto účelem byl experimentálně proveden přenos konvergovaných bázevých komponent požadových spekter z poloterénního provozu. Výsledky ukázaly dobrou přenositelnost požadové báze v rámci podmínek tekoucí říční vody za dodržení patřičné hloubky ponoru sondy. Pro podmínky stojaté přehradní vody nebyl přenos proveden úspěšně. Ukazuje se, že SAGMA může za dodržení patřičných vlastností monitorovací lokality fungovat také jako mobilní monitorovací stanice s možností využít metodu NASVD okamžitě po umístění na novou lokalitu bez nutnosti zdoluhavého nabírání trénovacích spekter.

ÚVOD

Za účelem zlepšení havarijní připravenosti České republiky byl vyvinut monitorovací systém určený ke kontinuálnímu *in situ* stanovování aktivity gama v povrchových vodách. Monitorovací systém sestává z monitorovacích stanic nazývaných akronymem SAGMA (z anglického Station for Artificial Gamma Activity Measurement). Jsou to monitorovací stanice fungující na bázi ponorného NaI(Tl) detektoru měřícího ve 4π geometrii přímo v mase analyzované vody bez použití stínění. SAGMA je vybaven autonomním zdrojem elektrického napájení a dálkovým přenosem dat, takže splňuje kritéria pro zařazení do skupiny „stand-alone“ přístrojů [1]. Ze tří SAGMA byla sestavena provizorní monitorovací minisít [2], nazývaná akronymem SCOMO (System for Continuous Gamma Activity Monitoring).

Konstrukce SAGMA je popsána v článku Fejgla a kol. [1]. Tato monitorovací stanice je unikátní schopností pracovat v autonomním a automatickém režimu, což je výhodné v případě havarijního monitorování, pro jehož potřeby je primárně určena. Oproti dalším přístrojům stejného určení popsaným v literatuře

vykazuje SAGMA vyšší citlivost detekce [1, 3, 4]. To je zajištěno použitím dekonvolučního algoritmu NASVD (Noise Adjustment Singular Value Decomposition), umožňujícím získání bázevých spekter z výsledků měření pozadí, a tím redukovat vliv odezvy detektoru na kolísání přírodního pozadí [5].

Kolísání příspěvku gama od pozadí je v případě kontinuálního *in situ* měření gama aktivity říčních vod způsobeno především kolísáním aktivity radonu a jeho přeměnových produktů. Vzhledem k tomu, že radon a jeho přeměnové produkty jsou obsaženy přímo v analyzované vodě, toto kolísání ovlivňuje i analýzy vod prováděné nejen pomocí přístrojů s ponornou detekční sondou, ale i pomocí přístrojů vybavených stíněnou detekční komorou, například kontinuální monitorovací stanice vybavené stíněnou Marinelliho nádobou [3]. V případě ponorných monitorovacích stanic dochází také k významnému kolísání dalších složek příspěvku do požadové odezvy, a to kosmického záření zejména v souvislosti s kolísáním vodní hladiny a terestriálního záření v souvislosti s kolísající vzdáleností sondy ode dna a se složením dnových sedimentů. Následkem těchto vlivů jsou monitorovací stanice využívající konstrukci ponorné sondy oproti monitorovacím stanicím se stíněnou detekční komorou méně citlivé [1, 3, 4].

Využití algoritmu NASVD pro potřeby SAGMA bylo testováno umístěním detekční sondy přístroje do poloterénních podmínek v areálu VÚV TGM v Praze [1]. Spektra z dlouhodobého, přibližně jednoletého, kontinuálního měření byla použita jako tréninkový dataset pokrývající celosezonní kolísání pozadí pro tuto lokalitu. Využitím z něj vygenerovaných bázevých komponent pozadí metodou NASVD přineslo velice příznivé výsledky, jmenovitě pokles hodnot NDA přibližně na polovinu oproti srovnatelné monitorovací stanici vybavené ponornou sondou [1, 4]. Ve srovnání s monitorovací stanicí se stíněnou průtočnou měřicí komorou jsou při desetiminutovém integračním čase v případě SAGMA hodnoty NDA navýšeny faktorem přibližně 1,4 [1, 3]. Dále bylo shledáno, že desetiminutový integrační čas i za nejméně příznivých okolností postačuje k naplnění zákonných požadavků na havarijní monitorování umělé aktivity gama, tedy ^{137}Cs a ^{131}I [6]. Takto významné zvýšení citlivosti bylo umožněno právě získáním bázevých komponent z dlouhodobého požadového datasetu pokrývajícího v podmínkách dané lokality všechna roční období [1].

V období od června do října 2019 bylo uskutečněno zprovoznění tří SAGMA v prostředí reálných říčních podmínek. Jednotlivé SAGMA byly umístěny do monitorovacích bodů vybraných jako vhodné lokality k monitorování aktivity

gama v řekách ČR z hlediska potenciálního přínosu pro připravenost k odezvě na mimořádnou radiační událost. Tím byla vytvořena provizorní forma monitorovací sítě SCOMO [2]. Okamžikem zprovoznění jednotlivých SAGMA bylo zahájeno nepřetržité měření a odesílání změřených spekter systémem dálkového přenosu na server. Integroční čas měření i interval odesílání jsou nastaveny na hodnotu 10 minut.

Po šesti až deseti měsících provozu jednotlivých stanic v rámci minisítě byla provedena srovnávací analýza pozadových spekter, jejímž cílem bylo stanovit detekční citlivost jednotlivých SAGMA stanic a prověřit přenositelnost bázo- vých komponent pozadí mezi monitorovacími lokalitami bez nutnosti zdlo- havého měření pozadí v daném místě.

POPIS LOKALIT

Provizorní podoba monitorovací minisítě SCOMO sestává ze tří SAGMA umístěných v monitorovacích lokalitách na řekách České republiky. Jsou to tárovací kanál VÚV TGM v Praze na řece Vltavě (dále jen Praha), náhon vodní elektrárny Na Réně v Ivančicích na řece Jihlavě (Ivančice) a výpusť přehradní nádrže Kořensko na řece Vltavě (Kořensko).

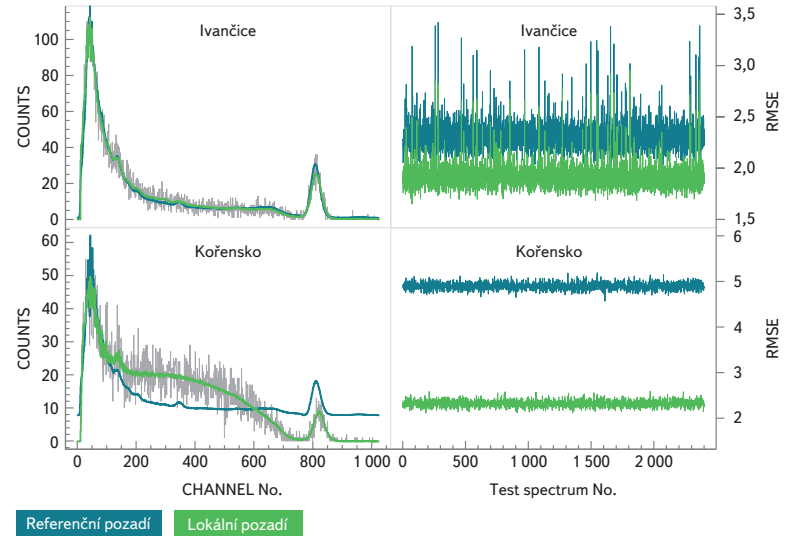
Lokality Praha a Ivančice mají z hlediska hydrologických poměrů podobné vlastnosti, sonda je zanořena do kanálu o hloubce přibližně 2 metry, dno kanálu je vybetonované a vodní hladina se nachází v relativně stabilní úrovni přibližně 80 cm nad horní hranou detektoru. Kanálem protéká mělká voda rychle proudících řek Vltava, resp. Jihlava. Lokalita Kořensko vykazuje zcela odlišné hydrologické vlastnosti, je umístěna v boční stěně přehradní nádrže Kořensko ve vzdálenosti přibližně 8 metrů po proudu od výpusť z přehrady. Spodní hrana sondy je umístěna asi 1,5 metru nad vybetonovaným dnem kanálu, horní hrana sondy je od hladiny vzdálena 2 až 6 metrů, protože hladina vody během sezony značně kolísá. Kanálem protéká stojatá voda z přehradní nádrže Kořensko. Vypouštěná voda se bezprostředně před vypuštěním nacházela ve hloubce dvou a více metrů pod hladinou přehradní nádrže.

PŘENOS BÁZOVÝCH KOMPONENT – DISKUSE A VÝSLEDKY

Metodou NASVD byly z trénovacích spekter z lokality Praha získány báze komponenty popisující pozadí v lokalitě VÚV TGM (lokalita Praha byla použita jako referenční lokalita, dále jen referenční báze spektra). Obdobně byla zpracována měření z Ivančic a Kořenska, čímž byly získány lokální báze komponenty pozadí. Vzhledem k odlišnostem v nastavení a typu elektroniky byla před samotnou NASVD analýzou spektra přeškálována tak, aby si odpovídaly četnosti v jednotlivých kanálech spekter z různých lokalit.

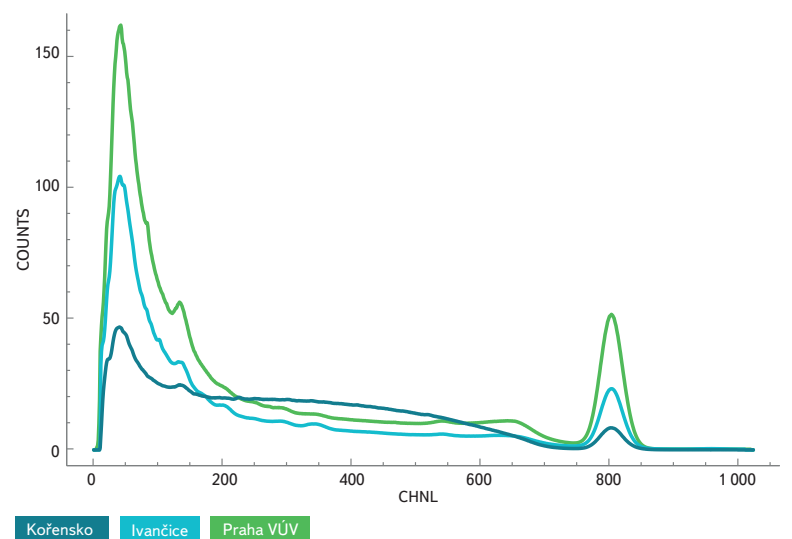
Získané báze komponenty byly použity pro fitování spekter v testovacím datasetu za použití lineárního regresního modelu. V modelu byly použity jak lokální, tak referenční báze komponenty a následně bylo provedeno srovnání výsledků pomocí standardní chyby reziduí (RMSE) pro soubor testovacích spekter, viz obr. 1.

Pro spektra z lokality Ivančice bylo dosaženo poměrně dobré shody a související navýšení MDA pro vybrané radionuklidy (^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs) je rovněž přijatelné – v testovacím datasetu nepřevyšuje 10 až 15 %. Odlišná je situace pro spektra z Kořenska – vzhledem k hloubce uložení a tedy i vyššímu podílu rozptýleného záření a nižšímu vlivu dceřiných produktů radonu se spektra z Kořenska kvalitativně liší od zbylých dvou lokalit. Fitování pomocí referenční báze selhává a metoda je pro tuto lokalitu nepoužitelná. Srovnání středních spekter z jednotlivých lokalit ilustruje obr. 2.



Obr. 1. Vlevo – ukázka fitu referenčními a lokálními bázeovými komponentami v Ivančicích a Kořensku (integrační doba 3 600 s); vpravo – související průběh RMSE napříč testovacím datasetem

Fig. 1. Left – demonstration of local base component fit for the spectra from Ivančice and Kořensko (integration time 3 600 s); right – related course RMSE across the testing dataset



Obr. 2. Střední spektra z jednotlivých lokalit; spektrum Kořensko vykazuje odlišný průběh oproti lokalitám Praha a Ivančice

Fig. 2. Mean spectra from the individual location; spectra from the location Kořensko demonstrates different course compared to the locations Prague and Ivančice

Dále byla lokální báze spektra z Ivančic a z Kořenska použita pro výpočet hodnot NDA v těchto lokalitách. Tyto hodnoty jsou v případě Ivančic přibližně o 40 a v případě Kořenska o 75 % nižší než v lokalitě Praha [1]. V tabulce 1 jsou uvedeny typické hodnoty NDA objemové aktivity pro ^{137}Cs při použití jednohodinového integračního času. Pro ilustraci jsou použita data z množiny „všechna spektra“ [1, 2].

Vyšší citlivost SAGMA při umístění v lokalitách Ivančice a Kořensko je dána především hydrologickými poměry v daných lokalitách (vyšším průtokem), v lokalitě Kořensko také umístěním sondy do větší hloubky.

Tabulka 1. Typické hodnoty objemové aktivity NDA pro ^{137}Cs při použití NASVD metody pracující s lokálními báзовými komponentami, integrační čas 1 hodina

Table 1. Minimal detectable activity values for ^{137}Cs activity concentration typical for the individual locations; integration time is 60 minutes, NASVD deconvolution method is employed

Lokalita	Praha	Ivančice	Kořensko
NDA [Bq/L] „všechna spektra“	0,83	0,50	0,21

ZÁVĚR

Přenos báзовých komponent požadových spekter z referenční lokality se ukazuje jako efektivní metoda pro hodnocení spekter po dobu, kdy ještě pro danou lokalitu není k dispozici dostatečně velký počet ($\sim 10^4$) spekter pro vytvoření báзовých komponent. Podmínkou přenositelnosti je, že obě lokality vykazují podobné hydrologické charakteristiky a zároveň je dodržena podobná geometrie měření. To v případě popisované situace znamená ponoření sondy do volně tekoucí říční vody do hloubky > 1 m.

Dále je možné metodu výhodně doplnit o kontinuální updatování NASVD – po instalaci sondy v nové lokalitě je nejprve použit model s referenčními báзовými komponentami, který se s přibývajícími lokálními spektry postupně přizpůsobuje místním podmínkám. Pro tyto účely existují poměrně efektivní výpočetní algoritmy, které lze ještě dále urychlit pomocí paralelizace [6]. SAGMA byla koncipována jako „stand-alone“ monitorovací stanice odolná vůči následkům mimořádné radiační události. Vzhledem k jednoduchosti konstrukce je možné SAGMA použít také jako přenosnou monitorovací stanici. Naše předchozí publikace [1] předpokládá, že přemístění systému na novou lokalitu zneumožňuje plné využití metody NASVD pro zvýšení citlivosti systému, dokud nedojde k nahromadění tréninkového datasetu pokrývajícího celosezonní přirozené variace pozadí.

Experimentální přenos referenčních báзовých komponent pro účely použití NASVD na spektra z jiné lokality prokázal, že za dodržení charakteristických podmínek monitorovací lokality NASVD lze metodu účinně využít i po přemístění SAGMA na novou lokalitu, a to s překvapivě nízkým, maximálně 15% navýšením detekčních mezí. SAGMA tím získává uplatnění také jako mobilní monitorovací stanice. To navyšuje flexibilitu SCOMO v rámci jeho plánovaného uplatnění v systému připravenosti k odezvě na mimořádnou radiační událost. Za nejméně příznivých podmínek (po bouřích či průtržích mračen) v rámci tří studovaných lokalit je při použití přenesených báзовých komponent hodnota NDA pro stanovení objemové aktivity ^{137}Cs při desetiminutovém integračním čase maximálně 2,6 Bq/L.

Oproti stíněným průtočným monitorovacím stanicím jsou hodnoty NDA při využití NASVD s přenesenými báзовými komponentami pro ^{131}I a ^{137}Cs navýšeny přibližně faktorem 1,6, zatímco oproti jiným monitorovacím stanicím využívajícím ponornou sondu pracující s NaI(Tl) detektorem jsou hodnoty NDA sníženy přibližně faktorem 1,8 [3, 4]. Je třeba zdůraznit, že konstrukce žádné ze srovnávaných monitorovacích stanic není vhodná k okamžitému přemístování mezi lokalitami, a to především kvůli závislosti na zdroji elektrického napájení či kvůli absenci dálkového přenosu dat.

Přenos báзовých spekter pro podmínky hluboké vody je problematický. Zároveň je třeba zdůraznit, že pro potřeby havarijního monitorování jsou podmínky hluboké vody všeobecně méně vhodné (nedochází k prudkým fluktuacím objemové aktivity po kontaminaci), a tak pro tento typ lokality není použití SAGMA jako mobilní monitorovací stanice relevantní. Na druhou stranu SAGMA umístěná v hluboké tekoucí vodě dosahuje mimořádně nízkých detekčních mezí při použití lokálních báзовých komponent (viz tabulka 1, lokalita Kořensko). V těchto podmínkách je systematicky dosahováno citlivosti potřebné pro

splnění legislativního požadavku na stanovení objemové aktivity ^{137}Cs (0,1 Bq/L podle [6]) při použití integračního času 24 hodin.

Od května 2020 je SCOMO v rámci implementačního plánu provozováno jako doplňkový prostředek pro analýzy vod v rámci MRS. Srovnáním s přístroji popsány v literárních zdrojích je možné SCOMO považovat za „State of the art“ prostředek pro havarijní monitorování aktivity gama v povrchových vodách.

Poděkování

Výzkum byl podpořen projektem Ministerstva vnitra České republiky (projekt VI20172020083).

Literatura

- [1] FEJGL, M. and HÝŽA, M. Development of an autonomous station for measurements of artificial gamma activity in surface water bodies. *J. Environ. Radioact.*, 2019, 204, p. 42–48.
- [2] FEJGL, M., HÝŽA, M. a HŮLKA, J. Systém pro kontinuální monitorování radioaktivní kontaminace povrchových vod. *VTEI*, 2019, č. 6, s. 32–39.
- [3] CASANOVAS, R., MORANT, J.J., and SALVADÓ, M. Implementation of gamma-ray spectrometry in two real-time water monitors using NaI(Tl) scintillation detectors. *Appl. Radiat. Isot.*, 2013, 80, p. 49–55.
- [4] STEINMANN, P. Radioactivity in river water below nuclear plants, the new network monitors the Aare and the Rhine on an ongoing basis. *Aqua & gas*, 2013, 10.
- [5] MINTY, B. and HOVGAARD, J. Reducing noise in gamma-ray spectrometry using spectral component analysis. *Explor. Geophys.*, 2002, Vol. 33, No. 3, p. 172–176.
- [6] SÚJB 360/2016 Sb. Vyhláška o monitorování radiační situace. 2016.
- [7] YAMAZAKI, I., KURZAK, J., LUSZCZEK, P., and DONGARA, J. Randomized algorithms to update partial singular value decomposition on a hybrid CPU/GPU cluster. *International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, SC*, 1–12. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/2807591.2807608>. 2015

Autoři

Mgr. Michal Fejgl, Ph.D.

✉ michal.fejgl@suro.cz

ORCID: 0000-0002-6207-297X

Ing. Miroslav Hýža

✉ miroslav.hyza@suro.cz

ORCID: 0000-0001-6719-1524

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2020.05.004

A COMPUTATIONAL ALGORITHMS USED FOR IMPROVEMENT OF THE SYSTEM FOR CONTINUOUS MONITORING OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF SURFACE WATERS

FEJGL, M.; HYZA, M.

National Radiation Protection Institute, p.r.i.

Keywords: gamma spectrometry – NaI(Tl) – monitoring of radiation situation – emergency monitoring – ¹³⁷Cs – portable monitoring station

The article describes practical aspects of the NASVD algorithm application in the processing of gamma spectra from the network of stations for continuous monitoring of gamma activity in river water (SAGMA). Transfer of base components between different localities is emphasised in the article. In the past, the effect of the NASVD deconvolution method on the improvement of SAGMA sensitivity was verified in semi-field conditions. After placing the network of SAGMA instruments in real river conditions, the NASVD method was applied for data processing again. For this purpose, the transfer of converged spectral components of the background spectra from semi-field operation was performed experimentally. The results showed good transferability of the background spectral components from the sites of running river water while maintaining the appropriate depth of immersion of the probe. For standing dam water conditions, the transfer was not successful. These results show, that SAGMA can be also operated as a mobile monitoring station, while maintaining the appropriate characteristics of the monitoring site. The NASVD method can be used immediately after placement in a new site without the need for lengthy acquisition of training spectra.