

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití bezpilotního leteckého prostředku pro
radiační monitoring a leteckou gama spektrometrii

Autor: Michal Šimeček
Vedoucí: Ing. Radek Černý
Akademický rok: 2019/2020



Katedra: KDAIZ

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Michal Šimeček

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Název práce: Využití bezpilotního leteckého prostředku pro radiační monitoring
(česky) a leteckou gama spektrometrii

Název práce: Use of unmanned aerial vehicle for radiation monitoring and airborne
(anglicky) gamma spectrometry

Pokyny pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši možností využití bezpilotního leteckého prostředku (BLP) pro radiační monitoring (mapování radioaktivní kontaminace – měření dávkového příkonu, identifikace radionuklidů – letecká gama spektrometrie s využitím BLP).
2. Vypracujte rešerši možností lokalizace zdroje záření při měření s BLP.
3. Seznamte se s detekčním systémem pro měření s BLP a experimentálně stanovte základní parametry detekčního systému (rozlišovací schopnost, prostorová závislost odezvy), proveďte (ověřte) základní kalibraci detekčního systému.
4. Experimentálně ověřte směrovou závislost detekčního systému a diskutujte možnosti využití pro lokalizaci zdroje.

Doporučená literatura:

- [1] GILMORE, Gordon R. *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008. DOI: 10.1002/9780470861981. ISBN 9780470861981.
- [2] CONNOR, D., P. G. MARTIN a T. B. SCOTT. Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*. 2016, **37**(24), 5953-5987. DOI: 10.1080/01431161.2016.1252474. ISSN 0143-1161.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data, IAEA-TECDOC-1363, IAEA, Vienna. 2003.

Jméno a pracoviště vedoucího bakalářské práce:


Ing. Radek Černý
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Břehová 7
115 19 Praha 1

Jméno a pracoviště konzultanta bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: 14. 10. 2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. 7. 2020

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.


.....
garant oboru


.....
vedoucí katedry


.....
děkan

V Praze dne 14.10.2019



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze

.....
Michal Šimeček

Poděkování

V první řadě děkuji svému vedoucímu práce Ing. Radku Černému za cenné rady při zpracování této práce a také Ing. Kamile Johnové za rady spojené s praktickou částí práce.

Michal Šimeček

Název práce: Využití bezpilotního leteckého prostředku pro radiační monitoring a leteckou gama spektrometrii

Autor: Michal Šimeček

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Radek Černý, Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Abstrakt: Tato práce je zaměřena na využití bezpilotních leteckých prostředků pro radiační monitoring a leteckou gamma spektrometrii. Pojednává o radiačním monitoringu na území České republiky, možném zařazení bezpilotního leteckého prostředku do metod lokalizace radioaktivního zdroje a uvádí příklady jejich možného využití. V práci jsou uvedeny vybrané detekční systémy, které se používají v leteckých průzkumech k lokalizaci radioaktivního zdroje. Též je zpracován přehled vybraných bezpilotních leteckých prostředků, včetně jejich využití ve spojení s detekčními systémy v konkrétních experimentech. Praktická část práce se zaměřuje na stanovení parametrů detekčního systému Georadis D230A. Byla testována směrová závislost odezvy a demonstrováno využití prostorové závislosti k lokalizaci zdroje.

Klíčová slova: Bepilotní letecký prostředek, letecká gama spektrometrie, detekční systémy, radiační monitoring

***Title:* Use of unmanned aerial vehicle for radiation monitoring and airborne gamma spectrometry**

Author: Michal Šimeček

Abstract: This bachelor thesis is focused on the usage of unmanned aerial vehicles for radiation monitoring and airborne gamma spectrometry. It discusses radiation monitoring in the Czech Republic, possibilities of including unmanned aerial vehicle among the methods of radiation source localization and it shows examples of their usage. Examples of detection systems, used in airborne surveys for radioactive source localization, are given in the thesis. The overview of selected unmanned aerial vehicle, including their usage with detection systems from specific experiments, is presented in the text. The practical part of this thesis is focused on determining the parameters of detection system Georadis D230A. The directional dependence of the detector response was tested and the possibility of using spatial dependence for source localization is demonstrated.

Key words: Unmanned aerial vehicle, airborne gamma spectrometry, detection systems, radiation monitoring

Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Úvod	10
1 Využití bezpilotního leteckého prostředku pro radiační monitoring	11
1.1 Radiační monitoring	11
1.2 Zařazení bezpilotního leteckého prostředku do měřicího systému . . .	12
1.3 Využití bezpilotního leteckého prostředku pro letecké měření ionizujícího záření	13
1.3.1 Jaderné havárie	13
1.3.2 Monitoring přírodních zdrojů záření	14
1.3.3 Monitoring radioaktivní kontaminace způsobené zneužitím zdroje ionizujícího záření	15
1.4 Přehled bezpilotních leteckých prostředků s jejich parametry využívaných při leteckých měřeních ionizujícího záření	15
1.5 Přehled vybraných detekčních systémů využívaných při měření BLP a postupů lokalizace zdroje	19
1.5.1 Jaderné havárie	19
1.5.2 Monitoring přírodních zdrojů záření	22
1.5.3 Monitoring radioaktivní kontaminace způsobené zneužitím zdroje ionizujícího záření	24
2 Detekční systém	27
2.1 Anorganické scintilátory	27
2.2 Vlastnosti detektorů	27
2.3 Zástupci anorganických scintilátorů	28
2.3.1 NaI(Tl)	28
2.3.2 LaBr ₃ (Ce)	29
2.3.3 BGO	29
2.4 Polovodičové detektory	29
2.5 Zástupci polovodičových detektorů	30
2.5.1 HPGe	30
2.5.2 CZT	30
3 Praktická část - Experimentální stanovení parametrů detekčního systému	32
3.1 Detekční systém - Georadis D230A	32
3.2 Energetická kalibrace	34

3.3	Experimentální stanovení energetické kalibrace	35
3.4	Rozlišovací schopnost - FWHM	38
3.5	Experimentální stanovení FWHM	39
3.6	Směrová závislost odezvy detektoru	40
3.7	Demonstrace využití prostorové závislosti pro lokalizaci zdroje	46
	Závěr	52
	Použitá literatura	54

Seznam použitých zkratek

BLP	Bezpilotní letecký prostředek
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické
DOPP	Dálkově ovládaný pozemní prostředek
FJFI	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
FWHM	Full width at half maximum
GM	Geiger-Müller
GNSS	Globální navigační satelitní systém
GPS	Global positioning system
INS	Inerciální navigační systém
IZ	Ionizující záření
JE	Jaderná elektrárna
KDAIZ	Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
LiDAR	Light detection and ranging
MDA	Minimální detekovatelná aktivita
MC	Monte Carlo
PC	Personal computer
PFDE	Příkon fotonového dávkového ekvivalentu
SDJ	Scintilační detekční jednotka
SSD	Solid-state drive
SVZ	Síť včasného zjištění
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
TDS	Teledozimetrický systém
TNČ	Těžká nabitá částice
UV	Ultraviolet
VTOL	Vertical take off and landing
Wi-fi	Wireless fidelity
ZO	Zájmová oblast

Úvod

Významný rozvoj technologií bezpilotních leteckých prostředků (BLP) v poslední době znamenal jejich značné rozšíření a praktické využití i v oblastech, kde to nedávna bylo nemyslitelné. S ohledem na rozvoj technologií se také BLP staly ekonomicky dostupnějšími a nalézají své využití nejen v radiačním monitoringu, ale i v řadě dalších odvětvích. Z jejich vlastností vyplývají jejich výhody a nevýhody, které BLP předurčují pro některé aplikace, resp. v jiných aplikacích je limitují. Značnou výhodou je jejich mobilita bez fyzické přítomnosti osob na palubě, dostanou se tedy snadněji na místa, která jsou člověku nedostupná, nebo nebezpečná. Výkonnější BLP také mohou dnes již nést zařízení o relativně vysoké hmotnosti. Například fotografové či kameramani mohou využít BLP pro pořízení snímků takových, které by bez tohoto zařízení mohli s těžší pomocí poříditi. Svě uplatnění nalézají od laického létání pro zábavu až po profesionální lety např. v armádě. Jak již bylo řečeno, BLP mohou nést různá zařízení a je tedy možno pod BLP zavěsit detekční systémy pro detekci a měření ionizujícího záření (IZ). Náplň této práce je zaměřena na využití BLP pro radiační monitoring.

Počátek práce prezentuje možnosti radiačního monitoringu v České Republice a postupné zapojení BLP do radiačního monitoringu. Další kapitoly obsahují přehled možných aplikací a využití BLP pro detekci a měření IZ zahrnující i leteckou gamma spektrometrii, kde je pojednáno o možných situacích ve kterých je vhodné využít BLP. Zejména pro kvantifikaci kontaminace prostředí od jaderných havárií po klasické monitorování půdního systému. Je zde uveden přehled BLP využitých pro letecká měření IZ, včetně jejich vlastností. Dále jsou v práci prezentovány vybrané metody měření využívané k detekci záření v kontaminovaných oblastech a detektory nesené BLP, včetně různých senzorů nejen pro zaznamenávání pozice leteckého prostředku. V práci je věnována pozornost i detekčním systémům se zaměřením na scintilační a polovodičové detektory s ohledem na druh detektoru dostupný na KDAIZ. Je zmíněna základní charakteristika a vlastnosti, které detektory předurčují pro letecká měření, stručný proces scintilace a zároveň vybrané zástupce scintilátorů využívaných při monitoringu BLP.

Praktická část mé bakalářské práce je zaměřena na testování a určení základních vlastností (energetická kalibrace, rozlišovací schopnost) scintilační detekční jednotky detektoru D230A určeného pro letecká měření, který je nově dostupný na KDAIZ. Bylo provedeno proměření energetické kalibrace detektoru a jsou prezentovány výsledky s kalibrační rovnicí. Dále byla stanovena závislost energetické rozlišovací schopnosti detektoru v závislosti na energii záření. Praktická část je uzavřena prezentací experimentů provedených za účelem posouzení směrové a prostorové závislosti odezvy detektoru s diskuzí výsledků a možností využití směrové závislosti odezvy detektoru k lokalizaci zdroje IZ.

1 Využití bezpilotního leteckého prostředku pro radiační monitoring

1.1 Radiační monitoring

Počátky radiačního monitoringu na území ČR sahají do dob Československé republiky k roku 1986. V tento rok došlo k havárii v jaderné elektrárně Černobyl. Několik dní po havárii bylo možné zaznamenat vyšší hodnoty radioaktivity právě z této havárie nejen na území ČR, ale i po celé Evropě. V té době, již docházelo k měřením radioaktivního spadu, příkonu dávkového ekvivalentu, objemové aktivity v ovzduší i ve vodotečích a ostatních povrchových vodách. Také byla stanovována měrná aktivita v potravinách. Na některých místech ČR jsou i dnes měřitelné zvýšené koncentrace některých radionuklidů například ^{137}Cs [6].

V současné době na území České republiky kontrolu radiace zastřešuje Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Tento úřad má na starost řízení radiačního monitoringu ve spolupráci s dalšími institucemi, např.: Státním ústavem radiační ochrany, v. v. i. (SÚRO). Monitoruje se síť rozložená po celém území ČR. Tato síť sleduje radioaktivitu v okolním prostředí, kontroluje obsah umělých radionuklidů v přírodě i v potravním řetězci. Monitoring má za cíl zobrazit odchylky od dlouhodobého měření a tím chránit obyvatele před vnějším či vnitřním ozářením. Pravidelné kontroly jsou zveřejňovány na internetových stránkách SÚJB [8].

Síť včasného zjištění (SVZ) slouží k vyhodnocení odchylek od dlouhodobých průměrů měření ionizujícího záření, které provádí SÚJB. Tato síť měří nepřetržitě a nachází se nejen v okolí jaderných elektráren. Detektory používané při měření jsou umístěny vždy v 1 m nad zemí a v dostatečné vzdálenosti od stromů či budov, které by mohly ovlivnit měření. Cílem je registrace odchylek veličiny přírůstku fotonového dávkového ekvivalentu (PFDE) od přírodního pozadí (kosmické záření, přírodní radionuklidy). Dlouhodobé měření stanovuje na území ČR hodnoty PFDE mezi 0,1 – 0,2 $\mu\text{Sv/hod}$ [6].

SVZ je doplněna v oblastech jaderných elektráren o další základní systém měření a to o teledozimetrické systémy (TDS). Pro obě elektrárny jsou TDS samostatné. Jaderná elektrárna (JE) Temelín má 24 měřících míst uvnitř areálu a 7 mimo areál. JE Dukovany 27 uvnitř a 8 mimo areál. Detektor je umístěn ve výšce 2 m nad povrchem a mimo dosah budov či vegetace. O TDS se stará jejich provozovatel ČEZ, a.s. [6].

O integrální měření se stará systém termoluminiscenčních a elektronických dozimetrů. Na území ČR jich je umístěno cca 300 ks. Místa s využitím integrálních dozimetrů se dělí na dva typy, teritoriální síť a lokální síť. Teritoriální síť je po celé ČR a obsahuje okolo 210 měřících míst, zatímco lokální síť je v okolí JE Dukovany a JE Temelín. Tyto detektory jsou také umístěny ve skladech radioaktivního odpadu, ve skladech vyhořelého paliva či kolem výrobních bloků [6].

Mimo stacionární měření jsou v rámci monitoringu prováděné i terénní měření a to jak pozemní, tak letecké. Letecké monitorování zprostředkovává zejména SÚRO, v. v. i. To provádí měření s vrtulníky ve výškách cca 100 m nad terénem po předem vybraných trasách. Na palubě vrtulníku je detekční systém zaznamenávající hodnoty, které se poté zanášejí do map. V těchto mapách se využívá barevné škály

pro zobrazení úrovně měřené radiace. Toto měření se využívá při obvyklé radiační situaci pouze pro cvičné letecké monitorování předem vybraného území. V případě havárie je nutné zjistit radiační situaci a tato metoda je mnohem vhodnější než pozemní měření. Jedním z důvodů je rychlost kvantifikace kontaminovaného území včetně možnosti zmapování větší plochy území [6].

Dalším způsobem terénního měření je pozemní průzkum. Jde o obdobný systém s leteckým. Dochází k zaznamenávání aktivit z jednotlivých poloh přímo do map. Výsledkem jsou barevně odlišené oblasti s různou aktivitou zobrazené v mapách. Při obvyklé situaci se měření provádí jízdou automobilem jednou měsíčně po vybraných trasách dlouhých cca 50 km. Pokud není možné letecké monitorování, stává se pozemní hlavním ukazatelem radiační situace v případě havárie a tato metoda je zásadní pro rozhodnutí o ochranných opatření [6]. Další z metod pozemního průzkumu spočívá v odběrech vzorků (půd, vod ap.), které jsou následně proměřeny v laboratoři. Také je možnost provést tzv. pochůzkové měření. Detektor se umístí do batohu nebo do sofistikovanějšího nosného systému a následuje měření spočívající v chůzi po zájmové oblasti. Možností monitoringu je poměrně velká řada, ale zaměřím se na metody využívající BLP či jejich kombinaci s jinými prostředky.

1.2 Zařazení bezpilotního leteckého prostředku do měřícího systému

Do doby než technický vývoj umožnil rozšíření BLP a provedení letu s dostatečnými parametry pro využití při měření a detekci záření, se využívalo letecké spektrometrie s detektory umístěnými na palubě vrtulníku či letadla. Bohužel další formou měření bylo až pozemní. Rozšíření BLP zaplnilo mezeru mezi velkoplošným měřením, na která je vhodná klasická letecká spektrometrie a měřením malých ploch, které lze pokrýt pozemním měřením.

Řekněme, že nastala situace, kdy došlo ke ztrátě radioaktivního zářiče. Co tedy zvolit za způsob, jak zářič lokalizovat? Pokud nejde o velkoplošné zamoření či silný zdroj záření, tak klasická letecká spektrometrie nemusí být vhodným řešením.

Letadla, či helikoptéry mají omezenou minimální letovou rychlost, aby nenastalo zřícení prostředku. Praktickým důsledkem minimální rychlosti může být nedostatek dat pro vyhodnocení způsobený řídicí navzorkovanou oblastí. Z toho důvodu jsou využívány detektory s velkým objemem a letadla s helikoptéry se snaží létat nižší rychlostí. Také je celý tento proces finančně nákladný, cena velkoobjemových detektorů i samotný let jsou ekonomicky nákladné. V případě, kdy mohou být ohroženi obyvatelé ionizujícím zářením, je nutné mít rychle k dispozici výsledky měření, ale proces vyhodnocení klasické letecké spektrometrie může být zdlouhavý. V případě nehody jaderné elektrárny ve Fukušimě dle [13] až 11 dní. Ovšem klasická letecká spektrometrie nemá pouze nevýhody. Její značnou výhodou je, že letadla i helikoptéry, jsou schopny prozkoumat mnohem větší oblast než BLP, a tak pro prvotní lokalizaci kontaminovaného území, či zdroje záření, může být klasická letecká spektrometrie výhodnější. Potíže mohou nastat, když letadlo (helikoptéra) vletí do tzv. radioaktivního mraku a povrch leteckého prostředku je kontaminován. V případě pokračování měření jsou data zkreslená a nevyužitelná ke zpracování. Navíc mohou

být piloti i pracovníci na palubě dopravního prostředku vystaveni riziku ozáření. Pokud by nebyla k dispozici další helikoptéra, ztratí se další čas nutný k dekontaminaci, který v případě havárie hraje důležitou roli vzhledem k potencionálnímu ohrožení obyvatel.

Dále, když víme, kde se oblast zhruba nachází využijeme právě BLP. Jako BLP může být využit letoun či dron nesoucí v případě radiačního monitoringu vhodné detekční zařízení pro měření IZ. Bezpilotní letecké prostředky mají menší minimální letovou rychlost a tedy mohou být využity pro přesnější měření než v případě klasické letecké spektrometrie. U všech BLP je jednoznačnou výhodou absence osob na palubě, a tedy zde není riziko ozáření pracovníků. Ovládají se vzdáleně nebo automaticky, či dokonce autonomně. Pilot tedy může zůstat v bezpečné vzdálenosti. Vzdálené ovládání probíhá tak, že pilot ovlivňuje každý pohyb dronu. Autonomní, či automatický let lze provést pomocí předem zadaných GPS souřadnic. Po průletu všemi body zadanými pilotem se dron může vrátit zpět, záleží na nastavení pilotem. Veškerá naměřená data jsou typicky ukládána do interního úložiště, či jsou přenášena bezdrátově k pilotovi do pozemní stanice. Dron, resp. ve spojení s vhodným detekčním systémem, může poskytovat aktuální výsledky měření. Pilot může do automatického měření zasáhnout a například ponechat drona na konkrétním bodě delší dobu. Tím získá větší množství dat. Dron ve spojení s vhodným detekčním systémem může rovnou identifikovat zdroj i jej lokalizovat.

V návaznosti na letecká měření může být zapojena pozemní spektrometrie. Vyšle se pozemní vozidlo, které proměří poměrně malou plochu a lokalizuje zdroj.

Obecně bezpečnost měření s bezpilotními prostředky je mnohem vyšší než při osobním měření. Při měření dálkově ovládaným letounem, dronem či vozítky, není nutné vystavovat pilota či pracovníky případnému ozáření. Toto je zásadní výhodou dálkově ovládaných prostředků.

1.3 Využití bezpilotního leteckého prostředku pro letecké měření ionizujícího záření

V této kapitole se zaměřím na využití BLP při měření intezity IZ a spektrometrii gamma. BLP nalézají své využití v čím dál více aplikacích. S vývojem technologií postupně mizí, či přestávají být relevantní, jejich zásadní nevýhody, mezi které patří například krátká doba letu závislá na výdrži baterie či nosnost prostředku. Již nyní jsou plně zařazeny do některých způsobů měření a detekčních postupů. Přehled jednotlivých BLP a jejich parametrů využitých ve vybraných člancích je prezentován dále v kapitole 1.4. Vybrané detekční systémy spolu s lokalizačními metodami a výsledky jednotlivých článků jsou uvedeny v kapitole 1.5.

1.3.1 Jaderné havárie

Jedno z významných využití našel BLP při posuzování následků jaderných havárií. Jedná se o monitorování oblastí, které jsou pro člověka nepřístupné z důvodu ohrožení lidského zdraví ionizujícím zářením. BLP jsou zařazeny do postupů při lokalizaci kontaminovaných oblastí po výbuších jaderných elektráren viz. článek [13].

Autoři článku poukazují na problematiku běžné letecké spektrometrie, která v případě havárie JE Fukushima Daiichi (2011) nebyla schopna poskytnout informace o úniku radioaktivních materiálů až do 11 dne po výbuchu, zejména s ohledem na náročnost zpracování dat. Při nehodě se uvolnilo značné množství radionuklidů do ovzduší, jejichž část následně spadla opět na zemský povrch. Z důvodu poškození běžných kontrolních detektorů (23 z 24) v areálu elektrárny přívalovou vlnou nebyl k dispozici dostatek informací pro kvantifikaci kontaminace území. Tento nedostatek informací přetrvával, jak již bylo zmíněno, 11 dní po úniku. První informace ohledně úniku poskytlo pozemní měření skupinou aut vybavených GM trubicemi. Klasická letecká spektrometrie využívá drahých zařízení, těžkých, citlivých a velkoobjemových detektorů a pohybuje se poměrně ve velkých výškách nad povrchem. V tomto případě, kdy základní monitorovací síť elektrárny selhala, klasická letecká spektrometrie svým dlouhým zpracováním a měřením neposkytla rychlou metodu kvantifikace kontaminovaného území. V případě jakékoliv jaderné havárie je nutné mít dostupné prostředky, které poskytnou rychlé a kvalitní výsledky. Navíc konvenční metody většinou vyžadují účast operátora měření, který je potencionálně vystaven nebezpečí z ozáření. A tak BLP nabízí zajímavou možnost k detekci radiace uniklé do okolí elektráren a umožňují podstatně rychlejší sběr i vyhodnocení dat z úniku radioaktivního materiálu bez významného zdravotního ohrožení operátorů.

V návaznosti na nehodu JE ve Fukušimě, autoři článku [17] využili metod Monte Carlo k simulacím a tvorbě modelů přírodního pozadí v oblasti již zmíněné jaderné elektrárny ve Fukušimě. Zaměřili se na simulace letů BLP s detekčním systémem, na stanovení minimální detekovatelné aktivity a detekční účinnosti. Výsledky ukázaly schopnosti BLP detekovat oblasti o různých aktivitách v různých vzdálenostech dronu od zdroje záření jak výškových, tak horizontálních.

Další možnosti jejich využití diskutovali autoři článku [9]. Obsah článku se opět pojí s nehodou jaderné elektrárny, ale tentokrát v Černobylu. Diskutuje možnosti detekce zakopaného radioaktivního odpadu v zakázaných oblastech nedaleko černobylské jaderné elektrárny. Po nehodě, která se udála roku 1986, byly různé kontaminované materiály z okolí elektrárny umisťovány do výkopů a následně zahrnuty vrstvou půdy. Pozice zákopů s radioaktivním či kontaminovaným materiálem nebyly vždy řádně zaznamenány. Nejen pozice, ale není znám ani jejich přesný počet. Je tedy nutné tyto místa indentifikovat. Hlavním cílem článku bylo využití BLP ke zmapování vegetace v oblasti se zákopy a na základě těchto modelů je lokalizovat. K ověření výsledků bylo využito gamma spektrometrického měření s BLP prezentovaného v [19]. Autoři opět poukazují na výhodu v oblasti radiační ochrany, kterou poskytuje BLP. Měřené prostory zahrnovaly různorodou vegetaci, která ztěžovala vyhodnocení letecké spektrometrie. Článek [19] byl zaměřen právě na lokalizaci zákopů pomocí letecké gamma spektrometrie.

1.3.2 Monitoring přírodních zdrojů záření

BLP je možné využít i k lokalizaci přírodních radioaktivních ložisek. Jedním z nich se zabývá článek [15], který se zaměřuje na testování BLP s detekčním systémem Georadis D230A v oblasti bývalých dolů uranové rudy na Příbramsku. Tato oblast byla již dříve detailně proměřena, a tak ji autoři zvolili k testům schopností

detekčního systému založeného na BLP. Tato oblast se nachází na území České republiky nedaleko města Příbram, u obce Třebsko. Autoři se zaměřili na detekční schopnost měřícího systému se zaměřením na výšku letu. Článek také poskytl zajímavé porovnání klasické letecké spektrometrie se spektrometrií využívající dronů.

Letecká spektrometrie BLP má své využití i v klasickém měření koncentrace radionuklidu ve svrchních vrstvách půd. Článek [14] převážně shrnuje informace ohledně gamma spektrometrie. Informace se týkají leteckých a pozemních průzkumů. Ke spektrometrii radionuklidů obsažených v půdním povrchu za využití detekčních systémů s BLP se využívá měření zejména draslíku, uranu, thoria či cesia. Ukázalo se, že gamma spektrometrie je užitečná metoda pro rychlé zmapování svrchních vrstev půd. Radionuklid ^{137}Cs je možné detekovat v přírodě z důvodu jaderných havárií nebo z testování jaderných zbraní ap. Obsah ^{137}Cs v přírodě je způsoben i tím, že má poměrně dlouhý poločas přeměny (30,2 let). Leteckou gamma spektrometrii je možné kombinovat s dalšími způsoby proměření povrchu půd jako jsou různé 3D metody např. elektromagnetické měření. Spolu s nimi je možné provést kvalitnější průzkumy půdního povrchu.

1.3.3 Monitoring radioaktivní kontaminace způsobené zneužitím zdroje ionizujícího záření

Posledním zmíněným způsobem využitím BLP v mé práci je metoda založená na kombinaci dálkově ovládaného pozemního prostředku (DOPP). Účelem práce byla opět lokalizace radioaktivního zdroje. Článek [12] se zaměřuje na způsoby lokalizace jednoho či více radioaktivních zdrojů záření. Toho může být uplatněno v reakci na potencionální nebezpečí využití zbraní obsahující materiály vyzařující ionizující záření při teroristických útocích. Jednou z možností je použití tzv. špinavých bomb, což jsou bomby obsahující radioaktivní materiály jako jaderný odpad, který by mohl být rozptýlen při výbuchu např. do obydlených oblastí. V těchto případech je nutné bezprodleně lokalizovat zdroje záření. Pro tyto případy je možné využít právě kombinace BLP a DOPP. Zásadní výhodou metody je, že není nezbytně nutné mít k dispozici mapy prostředí, ve kterém se nachází radioaktivní zdroj. BLP se využíval právě k vytvoření 3D map zájmové oblasti, ze kterých se následně určovala trasa měření DOPP. Ten měl za úkol, provést dozimetrické měření zmapované oblasti. Zmíněno je uvažované doplnění detekčním systémem zavěšeným pod BLP, které by zrychlilo lokalizaci zdroje.

1.4 Přehled bezpilotních leteckých prostředků s jejich parametry využívaných při leteckých měřeních ionizujícího záření

V této kapitole jsou prezentovány souhrnné informace o BLP využitých v několika článcích, které zde uvádím v kapitole 1.3. V článcích [12], [13], [15] autoři využili tzv. hexakoptéry, tj. drony s rotorovým systémem obsahujícím šest vrtulí. Článek [9] využil ke kontrole svých metod měření dat z článku [19]. V něm se využil dron s více rotory, tzv. oktakoptéra (8 vrtulový systém). Důvodem byla větší hmotnost

detekčního systému než systémů z předchozích článků, které využívaly hexakoptéry, a tak bylo nutné použít BLP s vyšší nosností. Samotný článek [9] využil ke svému monitorování speciálního dronu. Šlo o malé bezpilotní letadlo, které mohlo své vrtule otáčet a měnit směr letu. Směr letu je myšlen z vertikálního na horizontální a naopak. Tento typ BLP využívá vzletu a přistání ve svislém směru jako klasický dron a při průzkumech může létat jako fixed-wing prostředek. V MC modelech článku [17] autoři simulovali lety fixed-wing BLP. Poslední zmíněný článek [14] popisuje využití nejen BLP, ale i helikoptér a letounů.

Nyní se zaměřím na konkrétní BLP v jednotlivých člancích. Jako první zde představuji BLP využitý v článku [15]. Autoři článku využili BLP zvaný Kingfisher. Jedná se o hexakoptéru vyrobenou českou firmou Robodrone Industries. K nahlédnutí je na obrázku č.1. Tento dron může nést náklad až o 5 *kg*. Jeho rozměry jsou 1200 x 1400 x 220 *mm*. Doba letu je udána na 45 *min* bez nákladu a s nákladem o hmotnosti 4 *kg* na 16 *min*, maximální letová rychlost 19,4 *m/s*. Je schopen létat i při rychlosti větru do 10 *m/s*. Navigace dronu může být manuální či automatická. Při automatickém nastavení je třeba zadat body letu skrze GPS a nastavit výšku letu. Ta je kontrolována barometrickým senzorem s rozptylem 10 *cm*. Před vzletem dronu se nastavuje hodnota barometru na nulovou výšku.

Dalším BLP je hexakoptéra s názvem Hexa XL. Byla využita v článku [13]. Svou pozici zaznamenává pomocí GPS souřadnic. V každé pozici BLP nahrává energetické spektrum záření gamma. Informace o výšce letu zprostředkovává systém LiDAR s chybovostí 10 *mm* ve výšce menší než 100 *m*. Data dron ukládá do interní paměti nebo je možné je přenášet k uživateli se zpožděním 550 *ms*. BLP je možné ovládat manuálně nebo semiautomaticky. Ovládání umožňuje řízení až ze vzdálenosti 7 *km*. Náklad tvořený gamma spektrometrem, LiDAR systémem byl připevněn na dolní část BLP a směřoval k zemskému povrchu. Napájení BLP bylo zajištěno 2 lithio-polymerovými bateriemi o napětí 7,4 *V*. Tyto baterie umožňují provést měření dlouhé 12 *min* o letové rychlosti 25 *m/s*. Teoreticky je možné prozkoumat 18 *km* letecké dráhy. Reálně dron létá nižší rychlostí z důvodu zvýšení citlivosti detekčního systému. Je tedy možné prozkoumat plochy o desítkách či stovkách *m*² na jedno nabití baterií. Tyto baterie se obvykle nabíjí za cca 30 *min*, a tak článek doporučuje mít k dispozici 6 párů baterií pro zajištění kontinuálního měření.



Obrázek 1: Hexakoptéra Kingfisher, výrobce Robodrone Industries, převzato z [15]

Poslední hexakoptéra z vybraných článků o které se zmíním, byla použita v článku [12] a to pro 3D zobrazení kontaminované oblasti. Jednalo se o hexakoptéru DJI typu S800 Spreading wings vybavenou ovládáním DJI Wookong M podporující semiautomatické průzkumy předem zvolených souřadnic. Její rozměry jsou 1 000 x 1 200 x 500 mm. Maximální letová rychlost je 26 m/s, zatímco průzkumné lety se konaly při rychlostech 5 m/s. Při operační letové rychlosti se doba letu uvádí na 10 min. Tento dron poskytuje možnost připevnit náklad o hmotnosti 3 kg. Jeho hmotnost byla 8 kg. K dronu byl připevněn multisenzor vytvořený na míru, který umožňoval přímé zaznamenávání 3D map (včetně výšky BLP) odpovídajících souřadnému systému na povrchu. Toto mapování bylo dostupné i bez známých, přesně lokalizovaných, kontrolních bodů umístěných na zemském povrchu. Multisenzorový systém obsahuje digitální fotoaparát Sony Alfa A7, globální přijímač navigačního satelitního systému (GNSS) Trimble BD982, inerciální navigační systém (INS) SBG Ellipse-E, poslední část systému obsahovala jednoduchý počítač Banana Pi R1. GNSS přijímač měří přesnost pozice s přesností na cm, je vybaven dvěma anténami pro vektorové měření a je také schopen měřit orientaci kolem dvou os. Pozice a orientace kolem dvou os se využívají jako input pro navigační systém INS, který poskytuje výsledky s frekvencí 200 Hz. Všechny senzory jsou synchronizovány a fotky, které systém pořídí jsou ukládány na pevný disk typu solid-state drive (SSD).

Oktakoptéra byla využita v článku [19]. Šlo o oktakoptéru označenou ASPEC-O. K nahlédnutí je na obrázku č.2. Poskytovala možnost nést detekční systém až o hmotnosti 7,5 kg. Bez nákladu je dron schopen letět rychlostí až 10 m/s a ve vzduchu vydrží 20 - 25 min. BLP je schopen létat ve výškách od 1 m do 300 m. Autoři zařadili dron do pomyslné skupiny dronů ovladatelných automaticky na krátké vzdálenosti. Rozměry prostředku jsou 1040 x 1040 mm. K BLP byly připevněny i některé další senzory. Například GPS satelitní navigační sensor, který zaznamenával pozice BLP a zaznamenával souřadnice do úložiště. Pro kvalitnější obraz zkoumané oblasti byl k BLP připevněn i fotoaparát. Veškeré informace naměřené od systémů připevněných k BLP byly zaznamenávány na Micro SD kartu. Data bylo možné sdílet z dronu do PC i online bezdrátově s využitím Wi-fi spojení.



Obrázek 2: Oktakoptéra ASPEC-O, převzato z [19]



Obrázek 3: Zobrazení leteckého prostředku VTOL, převzato z [7]

Zajímavé provedení BLP je prezentováno v článku [9]. Jde o využití BLP, který kombinuje styl letu dronů a malých bezpilotních letadel. Popis této kombinace je již v úvodu této kapitoly 1.4. Dron z tohoto článku se nazýval Quantum Trinity VTOL. Autoři neuvdli ve své práci grafické zobrazení prostředku, a tak na obrázku č.3 není zobrazen VTOL využitý v prezentovaném článku. Náklad připevněný k tomuto BLP měl hmotnost $2,2\text{ kg}$ bez baterií. Doba letu je uvedena na 50 min za průměrné letové rychlosti 17 m/s ve výšce 130 m . Náklad obsahoval multispektrální fotoaparát, který poskytoval základ pro následné modelování 3D vegetace. Lety probíhaly v plně automatickém módu. K BLP nebyl připevněn detektor, pro ověření dat využíval spektrometrických měření článku [19].

Předposledním zástupcem BLP je tzv. fixed-wing BLP. Jedná se o malé bezpilotní letadlo. V článku [17] je označeno pod názvem NH-UAV. Ovládání se skládá ze dvou částí, z leteckého monitorovacího modulu (BLP) a z pozemní kontrolní stanice (PC) ze kterého se BLP ovládá buďto automaticky nebo manuálně. Více informací o tomto prostředku nebylo v článku uvedeno. Zde uvádím grafický příklad fixed-wing BLP viz. obrázek č.4.



Obrázek 4: Zobrazení leteckého prostředku fixed-wings, převzato z [16]

Poslední diskutovaným BLP je hexakoptéra pořízená na KDAIZ FJFI ČVUT pro monitoring přírodních radionuklidů. Jedná se o hexakoptéru od firmy DJI typu Matrice 600 Pro. Její hmotnost je 9,5 kg, přičemž celková vzletová hmotnost je 15,5kg. K dronu je tedy možné připevnit zařízení o hmotnosti až 6 kg. Dron může letět do maximální vzdálenosti 5 km od pozemní řídicí stanice. Je schopen vylétnout až do výšky 500 m, avšak je omezen nadmořskou výškou 2 500 m. Maximální letová rychlost je cca 18 m/s. Výrobce stanovil dobu letu na 32 min. Dron je napájen sadou šesti baterií pro zvýšení bezpečnosti letu při selhání některé z baterií. Každá z baterií má kapacitu 4 500 mAh a nabíjení sady baterií trvá 92 min do úplného stavu baterií. Dron může létat při rychlosti větru až 10 m/s. Jeho rozměry jsou 1 700 x 1 500 x 700 mm. Lze ho provozovat při teplotách od -10 do 40 °C. Parametry probírané u tohoto prostředku jsou dané výrobcem. Konkrétní letové podmínky, za kterých lze provozovat BLP jsou definovány příručkou v rámci povolení k leteckým pracem na území ČR.

1.5 Přehled vybraných detekčních systémů využívaných při měření BLP a postupů lokalizace zdroje

Detekční systémy jsou k BLP obvykle připevněny jako náklad. Hmotnost detekčního systému je tedy omezena nosností BLP. A tak je potřebné zvolit vhodné detekční systémy nejen pro detekci záření, ale i pro kontrolu pozice. V této kapitole jsou popsány postupy a metody použité při experimentech publikovaných ve vybraných článcích využívající specifické detekční systémy se zaměřením na lokalizaci radioaktivních zdrojů v konkrétních situacích. Detekčních systémů je celá řada, ale pro leteckou gamma spektrometrii s využitím BLP se jejich škála značně zmenšuje na spektrometrické detekční systémy kompatibilní s využitím BLP. Autoři článků při různých svých měřeních využívali většinou scintilační detektory viz. [9], [12], [15]. Narozdíl od zmíněných prací byl v článku [13] prezentován systém využívající polovodičový detektor. Detekce pomocí scintilačního a polovodičového detektoru zavěšeného pod BLP byla prezentována v článku [17].

1.5.1 Jaderné havárie

Detekční systémy nesené BLP při analýze dopadů nehody jaderné elektrárny ve Fukušimě včetně lokalizačních metody zdroje ionizujícího záření

Článek [13] reagoval na nehodu JE ve Fukušimě. Cílem této práce bylo demonstrovat schopnost BLP rychle a z bezpečné vzdálenosti detekovat radiační anomálii. V experimentu bylo využito radioaktivních vzorků získaných na jihozápadě Velké Británie. Tyto vzorky jsou převážně žuly s obsahem uranu. K detekci byl využit gamma spektrometrický detektor (GR1 Kromek) o poměrně malém objemu 100 mm³. Jedná se o koplanární mřížkový detektor CZT, jehož měřicí rozsah je od 30 keV do 3 MeV. FWHM je uvedeno pro pík ¹³⁷Cs (662 keV) 2,5%. Elektronický šum je menší než 10 keV.

Byly provedeny 2 experimenty, které měly vést ke zvážení schopností BLP. Autoři vždy porovnávali data získaná pomocí BLP s pozemním měřením. V prvním expe-

rimentu měla sledovaná plocha rozlohu 20 m^2 . Do této plochy byly umístěny vzorky rudy obsahující uran, které zaujímaly plochu 20 cm^2 . Aktivita vzorku byla laboratorně naměřena na hodnotu 260 Bq . Délka měření byla nastavena na 800 s . Letecká trasa byla nastavena předem a let proběhl čistě automaticky. Výška letu byla $2,5\text{ m}$. Výsledky naměřené BLP byly porovnány s pozemním měřením ve výšce 1 m o stejné sledované ploše i umístěním zdroje. Při obou měřeních byl využit tentýž detektor (výše zmíněný CZT). Ložisko uranové rudy bylo v obou případech lokalizováno na stejné pozici a výsledky obdržené z obou měření byly porovnatelné. Autoři zaznamenali rychlý pokles impulzů v detekčním systému s rostoucí vzdáleností detektoru od zdroje, tedy výškou měření představovanou osou Z.

Další experiment byl proveden pro dvě ložiska o velikosti 20 cm^2 umístěné na ploše o rozloze 20 m^2 . Jedno z nich mělo aktivitu 90 Bq a druhé 170 Bq . I přes nižší hodnoty aktivity ložisek byla data získaná pomocí BLP v souladu s pozemním měřením. Rozdíl v intenzitách ložisek se projevil i v měřených datech, ložisko s větší aktivitou zaujímalo ve výsledném grafu větší plochu než ložisko o nižší aktivitě. Rozdíl v pozemním měření a v měření provedeným s využitím BLP byl dán větší intenzitou dopadajícího záření. Pozemní měření bylo blíže ke zdroji záření a tak zaznamenalo vyšší četnost impulzů.

Matematická simulace odezvy detekčního systému, BLP a prostředí po nehodě v JE Fukushima Daichii

Dle článku [17] detekční systém ve spojení s BLP je schopný stanovit poměrně rychle a efektivně informace o poli ionizujícího záření, které je nutné mít při jaderné pohotovosti. Radiační monitoring při vážných jaderných nehodách je náročný úkol a je nutné zvolit relevantní postupy a metody radiačního průzkumu.

V tomto článku [17] byl modelován detekční systém pro letecké měření se dvěma detektory. Jeden z nich byl založen na scintilačním krystalu LaBr_3 a druhý byl polovodičový detektor typu HPGe. Tyto detektory byly vyvinuty firmou Interdisciplinary InnoCentre for Nuclear Technology pro radiační monitoring při podobně vážných nehodách, jako byla nehoda v JE Fukushima Daiichi. Modelované situace se zaměřují na detekční účinnost a na stanovení minimální detekovatelné aktivity (MDA). MDA v této práci slouží k zobrazení schopnosti detekovat zdroj v maximální vzdálenosti od BLP. Metodou Monte Carlo (MC) bylo simulováno pozadí související s nehodou v jaderné elektrárně ve Fukušimě včetně experimentů s lety BLP. Dále jsou diskutovány zejména výpočty minimální detekovatelné aktivity BLP, které byly provedeny pro různé výšky, vzdálenosti od centra zdrojové oblasti, či různých velikostí zdrojové oblasti.

Detekční systém obsahoval dva detektory, LaBr_3 a HPGe. LaBr_3 je scintilační materiál, který detekoval záření přímo ze vzduchu a sledoval širokou škálu radioaktivity včetně radioaktivních plynů a aerosolů. HPGe detektor byl stíněn wolframovou vrstvou. Stanovoval radioaktivitu absorbovanou ve filtru, aby bylo možné získat přesné informace o radionuklidech obsažených v aerosolech malého rozsahu. Radioaktivní plyny nebylo možné detekovat kvůli stínění zařízení.

Autoři prezentovali hodnoty MDA pro energie 364 keV a 661 keV . Pro tyto dvě hodnoty předpokládali, že by v jejich modelech částice zdrojů těchto energií měly být spolehlivě detekovatelné. Následující model se zaměřoval na růst vzdálenosti

vertikálním směrem (100-900 *m*). Simulace ohledně detektoru LaBr₃ jejich předpoklad potvrdily, pro detektor HPGe však k potvrzení nedošlo. Gamma záření o energii 364 *keV* detektor HPGe nemusí spolehlivě detekovat pro výšky letu NH-UAV větší než 260 *m*. Pro záření o energii 661 *keV* zjistili, že HPGe detektor nemusí spolehlivě detekovat částice pro výšky letu NH-UAV větší než 597 *m*.

Výsledky simulací MDA, kdy docházelo k růstu vzdálenosti horizontálním směrem od místa ložiska radioaktivity, ukázaly, že detektor obsahující scintilátor LaBr₃ by měl detekovat částice z obou zkoumaných energií ve všech vzdálenostech (100-900 *m*). Nicméně detektor obsahující HPGe by neměl detekovat gamma záření o energii 364 *keV* ve vzdálenosti delší než 809 *m*. Záření o energii 661 *keV* nemá šanci být zaznamenané tímto detektorem v simulovaných vzdálenostech z důvodu radioaktivního pozadí.

Hodnoty MDA v případě zvětšování plochy zdroje byly zkoumány opět pro HPGe i LaBr₃. Ukázka byla vybrána pro energie 364*keV* a pro 661 *keV*. Chyba MDA detektoru LaBr₃ měla klesající tendenci spolu s poklesem plochy zdroje, zatímco chyba MDA detektoru HPGe se zvyšovala s rostoucí plochou zdroje. Z výsledku je možné soudit, že detektor LaBr₃ byl vhodně zvolen k detekci záření těchto dvou energií ve všech simulovaných velikostech zdroje (100-1000 *m*). Detektor HPGe by nebyl schopen detekovat tyto dvě zkoumané energie z důvodu vysokého radioaktivního pozadí [17].

Černobylské zakázané zóny

K leteckému měření kontaminované oblasti využili autoři článku [9] BLP, schopný pořizovat mapy s vysokým rozlišením oblastí s radioaktivní kontaminací bez ohrožení zdraví člověka. Data byla pořizována s využitím BLP Quantum Trinity VTOL a ověřeny oktokořptérou ASPEC-O. K prostředku VTOL byly připevněny další senzory zaznamenávající pozici, výšku letu, tlak či teplotu. Na základě dat získaných prostředkem VTOL bylo možné vytvořit 3D modely vegetace. Systém LiDAR je schopen naměřit přesnou pozici stromu, jeho výšku či objem koruny. Pro ověření výsledků lokalizace zákopů z metody využívající 3D modely vegetace se využily data z článku [19]. V něm byl využit BLP zvaný ASPEC-O se spektrometrem s pěti scintilátory od sebe navzájem oddělenými. Jednalo se o krystaly NaI(Tl) o rozměrech 63 x 63 *mm*. Data z jednotlivých krystalů byla ve výsledku sečtena. Měřicí systém poskytoval možnost řízení citlivosti detektoru metodou zapínání a vypínání jednotlivých scintilátorů. Celková váha detektoru byla 7,5 *kg* s rozměry detekčního systému 30 x 30 *cm*. Detektor se připevnil k BLP (oktakořptéře ASPEC-O). Lety byly provozovány v paralelních linkách od sebe vzdálených 100 *m*. Průměrná výška letu byla 30 *m* a průměrná rychlost 5 *m/s* s měřicím intervalem po 1 *s*. Vysoká váha detektoru nedovolila na BLP přimontovat fyzické stínění, a tak detektor poskytoval informace z úhlu 120 ° se základnou kuželu, ze kterého bylo sbíráno ionizující záření, o průměru okolo 100 *m*. Byla provedena korekce získaných dat a to následujícím způsobem. Detektor poskytl informace o celkové intenzitě záření. Poté byla určena intenzita záření z pozadí pomocí metody klouzavého průměru. Nakonec lokální intenzita byla spočtena z rozdílu celkové zaznamenané intenzity a spočtené intenzity z pozadí. Je vhodné upozornit, že naměřená radioaktivita pochází od vícero zdrojů, z přírodního pozadí jako je kosmické a terestriální záření, z nedaleké kontaminované vegetace, z radioaktivního spadu poblíž měřených míst a ze zakrytých radioaktivních

materiálů v zákopech.

V článku [9] jsou prezentovány měření ze 3 oblastí. První oblast (Yanov station) měla rozlohu okolo 1 km^2 , kde většinu zákopu bylo možné pozorovat pouhým okem z důvodu nízké vegetace. Druhá oblast (Red forest) měla rozlohu 6 ha , kde se nacházela hustá i vysoká vegetace. Třetí oblastí byl bývalý nákladní železniční terminál, ve kterém se částečně nacházela vysoká vegetace.

Měření se setkala v některých oblastech s problémy. Autoři článku [9] očekávali, že na třetím území, které zkoumali, bude lokalizace zákopů metodou 3D mapování vegetace bezproblémová. Reálné měření jejich očekávání potvrdilo a výsledky byly v souladu se spektrometrickým měřením prezentovaným v článku [19]. Stejně tak očekávali, že zákopy v oblasti první budou lokalizovány správně, ale výsledky ukázaly, že jejich identifikace v této oblasti není v souladu s gamaspektrometrickým měřením prezentovaným v článku [19]. Důvodem byla pravděpodobně právě mapovaná vegetace, která zhoršovala výsledky z letecké gamma spektrometrie v článku [19] a zanášela chybu do měření. Další možností je zhoršení výsledků způsobené vrstvou půdy, kterou byl zákop pokryt. Data ze druhé zkoumané oblasti (Red forest) vedly k závěru, že gamma spektrometrickou metodu lokalizace zákopů není vhodné využít. Hlavním problémem byla zalesněná oblast. K získání vhodnějších dat by byl zapotřebí komplexnější model, který by se zabíral vlivem biomasy na výsledky letecké gamma spektrometrie. Spektrometrický model by mohl být vylepšen i o vliv vrstvy půdy zakrývající zakopaný radioaktivní materiál.

1.5.2 Monitoring přírodních zdrojů záření

Oblast v areálu bývalých těžebních dolů radioaktivního materiálu

V článku [15] se tvůrci zaměřili na testování schopností BLP s detektorem Georadis D230A. Zkoumali na území České republiky, nedaleko města Příbram, uranovou anomálii. Jedná se o louku v oblasti bývalých uranových dolů, která je v současné době detailně proměřena pozemním měřením pomocí gamma spektrometru GS-256, tj. detektor vybavený scintilátorem NaI(Tl) o rozměrech $76 \times 76 \text{ mm}$. Stabilizace energetického spektra detektoru GS-256 probíhala pomocí radionuklidu ^{137}Cs . Doba měření byla nastavena na 2 min a v místech s vyšší aktivitou i kratší a to 60 či 30 s . Spektrometr GS-256 byl kalibrován na kalibrační základně ve Stráži pod Ralskem.

Data byla analyzována s ohledem na uranovou přeměnovou řadu. Anomálii proměřili s využitím BLP ve 3 přímých letových drahách procházející skrze anomálii kolmo na její delší osu. Tyto 3 přímky byly paralelní a od sebe vzdáleny 10 m . Vzdálenost měřeného letu byla dlouhá 100 m , přičemž ve vzdálenosti 80 m od počátku měření byla zaznamenána nejvyšší hodnota uranové anomálie na přímce označené profilem 1.

Ke dronu byl připevněn detektor Georadis D230A. Detektor byl vybaven dvěma scintilačními krystaly typu BGO o objemu každého z nich 103 cm^3 . Detektor využíval kalibrace na energetických čarách přírodního pozadí. Rozlišovací schopnost byla uvedena na $13,6 \%$ pro ^{137}Cs (662 keV). Váha neseného detekčního systému byla téměř 4 kg s baterií i konstrukcí, kterou byl detektor připevněn k BLP. Detektor sbíral sekundová spektra.

Velikost uranové anomálie je známá z pozemního měření a to 80 x 40 m a koncentrace uranové rudy je v průměru 25 mg/kg eU, kdežto lokálně může mít i 700 mg/kg eU (maximum na přímce profilu 1). Sumární spektra gamma byla nahrána ve výškách od 5 m do 40 m s postupem po 5 m. Měření ve výšce 40 m ukázalo, že hodnoty uranové anomálie téměř splývali s hodnotami přírodního pozadí. Výsledky ukázaly, že výška letu má značný vliv na hodnoty získané z měření pomocí BLP. S rostoucí výškou letu klesá počet detekovaných impulzů z uranové anomálie. Tento jev byl zaznamenán během všech třech měření.

Článek také uvádí zajímavé porovnání dat klasické letecké spektrometrie a letecké spektrometrie s využitím dronů. Citlivost detektorů pro klasickou leteckou spektrometrii při výšce letu 80m je uvedena na 8 cps(count per second - impulzů za sekundu) na 1 mg/kg eU. Pro výšku 120 m standardního detektoru o objemu 16,8 l je citlivost uvedena na 2,9 cps na 1 mg/kg eU. Letová rychlost malých bezpilotních letadel je 50-60 m/s a helikoptér 25-30 m/s. Na zemském povrchu má Georadis D230a citlivost 0,55 cps vztahený na 1 mg/kg eU a ve výšce 40 m cca 50 % tj. přibližně 0,25 cps mg/kg eU. Letová rychlost dronu v průběhu měření je uvedena na 1 m/s.

Zajímavé je porovnat zaznamenané impulzy detektorem na 100 m ulétlé vzdálenosti. Pro klasickou leteckou spektrometrii ve výšce 80 m a rychlosti 50 m/s se zaznamená 16 impulzů na 100 m délky. Detektor o objemu 16,8 l ve výšce 120 m a rychlosti letu 25 m/s zaznamená 11,6 impulzů na 100 m délky. Zatímco Georadis D230A ve výšce 40 m a letové rychlosti 1 m/s zaznamená 25 impulzů na 100 m délky. Tedy BLP mohou nasbírat data porovnatelné kvality s klasickou leteckou spektrometrii v detailním měřítku.

Dle článku by pravděpodobně klasický gamma spektrometrický letecký průzkum zmiňovanou uranovou anomálií nedaleko Příbrami nezaznamenal. Díky nižší letové rychlosti i menší výšce letu jsou schopny drony případy, jako je tento proměřit. Avšak jejich výhody se mohou stát i nevýhodami v určitých případech. Jejich nízká letová rychlost omezuje vzdálenost letu, a tak drony nejsou vhodné pro rozsáhlé regionální měření.

Průzkum obsahu radionuklidů v půdách

Pro monitorování obsahu radionuklidů v půdním systému pomocí BLP se obvykle využívá scintilačních a polovodičových detektorů. Článek [14] zmiňuje využití scintilátorů NaI(Tl), CsI(Tl), BGO a polovodičového krystalu HPGe. Také udává, že délka měření záleží na typu detektoru a na jeho citlivém objemu. Obecně shrnuje, že čím je delší měření, tím s větší přesností je detektor schopen vyhodnotit výsledky. Pro mapování půdy je možné využít jak pozemního, tak leteckého měření. Pozemní měření využívá prostředků jako jsou auta, batohy, vozítka či stativy. Letecká spektrometrie využívá letadel, helikoptér či BLP jako jsou např. drony.

Detekce radionuklidů v půdě je poměrně náročný proces. Měření je ovlivněno několika faktory. Radioaktivita v půdě podléhá nerovnováze. Zde uvedu pouze faktory spjaté s uranovou přeměnou řadou. Její zastoupení nerovnovážného stavu způsobují následující faktory, selektivní vyluhování radionuklidu ^{226}Ra , plynná difúze radionuklidu ^{222}Rn z vrstev půd nebo také kontaminace podzemní vody ^{226}Ra . Měření mohou ovlivnit i povětrnostní podmínky, denní doba, kdy je ve vzduchu obsaženo

různé množství ^{222}Rn , teplota vzduchu či tlak. Na měření má také vliv roční období a to konkrétně závisí na teplotě a vlhkosti půdy. Vlhkost půdy ovlivňují právě zmíněné roční období, v některých bývá vyšší deštivost, která ovlivňuje obsah radionuklidu a jeho následný výpar do ovzduší či vymývání do podzemních nebo povrchových vod.

Tento článek [14] se zaměřil i na různou geometrii měření. To z důvodu, že tvar terénu (kopce, údolí, budovy) může ovlivnit měření koncentrace radionuklidů i v rádech desítek procent. Při kalibraci detektoru je nutné brát v potaz měřenou geometrii. Obvykle se užívá 2π geometrie.

Dle článku [14] letecká spektrometrie využívaná pro měření zemské vrstvy poskytuje mapy o měřítku např. 1:50 000 nebo 1:25 000. Pozemní měření poskytne mapy o měřítku 1:10 000 či 1:2 500. Avšak tyto údaje jsou závislé na letové výšce a rychlosti průzkumu.

Letecká gamma spektrometrie umožňuje rychlé informační průzkumy. Optimální podmínky k měření půd BLP nastávají, když je suchá půda, nízká vegetace a stabilní klidné počasí v místech s nízkou aktivitou. Výsledkem těchto podmínek je vyšší poměr signál šum a lepší interpretovatelnost dat. V důsledku vyšší rozlišovací schopnosti detektorů je lepší interpretace slabých signálů pocházejících z půdních zdrojů. Avšak letecká spektrometrie může být nepřesná a je vhodné ji doplnit o další měření. Například pozemní, provedené odběrem vzorků pro laboratorní analýzu. Gamma spektrometrie poskytuje jednu značnou výhodu v oblasti geologie. Je schopna proměřit větší hloubky než běžné zobrazující metody. V rašeliništích je schopna získat data z hloubek okolo 1 m a v půdách obsahující minerály z hloubek $30 - 60\text{ cm}$. V oblastech se zhoršeným přístupem jako jsou lesy, přírodní rezervace, zemědělsky obdělávaná půda může letecká gamma spektrometrie s využitím BLP poskytnout cenné údaje. Letecká spektrometrie s BLP má výhodu pokud jde o náklady spojené s měřením a efektivitu, na druhou stranu má vyšší nepřesnost prostorového rozlišení oproti pozemnímu měření [14].

1.5.3 Monitoring radioaktivní kontaminace způsobené zneužitím zdroje ionizujícího záření

Bomby s radioaktivním materiálem - dirty bombs

Článek [12] poukazuje na možné teroristické útoky špinavou bombou a doporučuje využití BLP k rychlému zmonitorování situace s lokalizací oblastí pomocí kombinace BLP a DOPP. Oba prostředky je možné ovládat v semiautomatickém módu. BLP byl využit pro průzkum zájmové oblasti fotografickou metodou. Výsledná mapa sloužila DOPP pro naplánování trasy a nalezení radioaktivních zdrojů. BLP by mohl nést ještě detekční systém pro získání základních informací ohledně pozice radioaktivních zdrojů a urychlil by následnou lokalizaci radioaktivního zdroje prostřednictvím DOPP. Tato metoda je vhodnou kombinací BLP a DOPP pro rychlé a přesné určení zdroje záření. Vhodné kombinace těchto prostředků eliminují jejich nevýhody. Například DOPP je schopen detailněji a s větší přesností proměřit zájmovou oblast (ZO) než BLP. DOPP může setrvat na jedné pozici delší dobu než BLP, a tak získat přesnější informace o zdroji záření. Naopak BLP je schopen rychleji proměřit ZO, a tak poskytnou DOPP primární informace o ZO. Ušetří DOPP čas

při lokalizaci zdroje tím, že je možné naplánovat trasu DOPP vhodnou jeho pohybovým schopnostem a v případě, kdy BLP poskytuje informace o kontaminaci ZO, zásadně urychluje jeho přesnou lokalizaci.

V prvotní fázi měření musí operátor naplánovat průzkum BLP nad oblastí, která by potencionálně mohla být zamořena. Po naplánování trasy letu, BLP provede průzkum skrze přednastavenou trať a pořídí fotografie, které se využijí ke 3D modelu oblasti. Tento 3D model oblasti slouží operátorovi k výběru vhodné trasy DOPP k potencionálnímu zdroji záření. Zájmová oblast je definována polygonem, který je tvořen řadou vrcholů. Poté je DOPP vypuštěn poblíž zmapované oblasti. Cesta k zájmové oblasti je nastavena z map pořizovaných BLP, aby se DOPP vyhnul překážkám či velkým stoupáním. Následně operátor může určit metodu průzkumu zájmové oblasti. Buďto zvolí průzkum oblasti nebo lokalizaci zdroje. První metoda poskytuje informace o distribuci radioaktivity v celé zájmové oblasti, zatímco druhá metoda slouží pro co nejrychlejší lokalizaci zdroje. Poté se data zpracují vhodným způsobem a měření je interpolováno za účelem poskytnutí mapy popisující kontaminaci prostředí nebo souřadnic zdroje záření.

Pozice i obrázky poskytnuté BLP jsou zpracovány pomocí programu Agisoft Photoscan Professional. Tento software poskytuje možnost rekonstrukce zemského povrchu. Výhoda tohoto zpracování dat je ta, že je možné zobrazit i takové oblasti, které jsou špatně přístupné pro člověka. Pro vysokou přesnost systém poskytuje kalibrační proces, který využívá synchronizace zpoždění mezi fotoaparátem a jednotkou INS (inerciální navigační systém).

V prezentovaném experimentu BLP monitoroval oblast o rozloze cca 30 000 m^2 , ve které se nacházel potencionální radioaktivní zdroj. K BLP byl přimontován výše zmíněný mapovací systém. Doba letu trvala 8 *min*. Let byl čistě autonomní a bylo pořizeno 137 fotografií. Fotoaparát byl vybaven 15 *mm* objektivem a let proběhl ve výšce 50 *m* nad zemským povrchem. Rozlišení obrázků bylo 2 *cm/pixel*. Autoři provedli test přesnosti zaznamenání polohy s využitím souřadnic známých bodů a jejich fixací a určili, že chybovost 3D mapy v osách *x*, *y* nepřesáhla 1 *cm* a v ose *z* 2 *cm*. Bez fixovaných souřadnic pozemních bodů určili, že chybovost ve všech osách (*x,y,z*) nepřesáhne hodnotu 3 *cm*. V oblastech, kde se vyskytuje ionizující záření ve vyšší míře se využívá druhé metody (bez fixovaných souřadnic) z důvodu radiační ochrany osob. Zmapování prostoru za účelem kvantifikace kontaminace využívá DOPP. DOPP byl schopen projet trasu s maximálním stoupáním 15 %. Vytvořená mapa sloužila pro výpočty nejbližší a nejrychlejší trasy, kterou je schopen DOPP projet. Započítávají se i různé překážky a výpočet trasy je rychlý, běžný počítač ho zvládne ve velice krátké době. Autoři uvádí v řádu jednotek sekund. Výsledná trajektorie uražená DOPP se od zadané trajektorie skrze zadané body lišila v průměru o 2,8 *cm*.

K detekci radionuklidu bylo nejdříve využito modelové situace s různými zdroji. Tyto modely byly následně otestovány. Veškeré experimenty probíhaly ve stejné zmapované oblasti BLP a měnily se pouze zdroje záření o různých aktivitách. Dále jsou stručně uvedeny 3 experimenty z prezentovaného článku zaměřené na lokalizaci radioaktivního zdroje pomocí DOPP. Zájmová oblast měla plochu o rozloze cca 438 m^2 . První experiment provedli pro lokalizaci radionuklidů ^{60}Co o aktivitě 8 *MBq*, ^{137}Cs (0,22 *MBq*) a ^{60}Co (0,35 *MBq*). Zdroje byly umístěny v zájmové

oblasti. Oblast byla mapována skrze paralelní přímkové trajektorie od sebe vzdálené 1 m. Měření trvalo 15 min a 3 s. Největší chyba v lokalizaci místa zdroje záření byla 0,06 m. V dalším experimentu byl použit jeden zdroj ^{137}Cs o aktivitě 65,6 MBq. DOPP započal paralelními trajektoriemi a po 3 zmapovaných liniích lokalizoval směr, kterým se přiblížit ke zdroji. Proces lokalizace trval 2 min a 53 s včetně finálního okruhu kolem zdroje kvůli přesnější identifikaci. Chyba lokalizace v tomto případě byla 0,04 m. Tento experiment byl opakován i s jiným zdrojem. Jednalo se o zdroj ^{60}Co o aktivitě 40 MBq. Chyba lokalizace zde byla 0,94 m. V tomto případě nebyl kontrolován azimut v průběhu přibližování se ke zdroji.

Další experimenty využili jiné metody lokalizace, tzv. kruhové metody. Tato metoda využívá prvotního proměření kruhu na libovolném místě, na základě kterého DOPP určí směr, kterým se vydá k přesné lokalizaci zdroje. Tento experiment provedli nejdříve pro jeden zdroj ^{60}Co o aktivitě 40 MBq. Jeho lokalizace trvala 1 min a 28 s s chybovostí určení polohy 0,52 m. Další experiment kruhové metody spočíval v lokalizaci dvou zdrojů záření. Šlo opět o ^{60}Co o aktivitě 40 MBq a také o ^{60}Co o aktivitě 8 MBq. Prvotní okruh byl proveden mezi dvěma zdroji. Prvotní směr lokalizace ^{60}Co o aktivitě 40 MBq nebyl zvolen přesně, ale průběžná kontrola DOPP ohledně lokalizace způsobila, že oba zdroje záření byly lokalizovány poměrně přesně, s chybovostí 0,40 m. Celý průběh lokalizace trval 2 min a 54 s.

Doba po kterou je DOPP schopen měřit odpovídá 120 min a během této doby je schopen proměřit cca 3 500 m². Toto poskytuje značnou výhodu oproti dronům. DOPP poskytují přesnější metody mapování radioaktivních zdrojů. Například při zvolení menších rozestupů trajektorií prostředku, nebo při zastavení na vybrané pozici. U BLP je přesnost na úkor doby měření. BLP se může nad bodem vznášet nebo přistát (jeli to možné), ale dochází k vybíjení baterie, a tak zmenšení měřené oblasti na jedno nabití baterií. Metody lokalizace DOPP byly založeny na dynamických změnách směrů prostředku, které automaticky prováděl DOPP.

2 Detekční systém

S ohledem na výše uvedené informace dostupné z publikovaných prací lze v následujících odstavcích poskytnout shrnutí vybraných typů detektorů používaných pro letecká měření IZ s využitím BLP. Diskutovány jsou i jejich výhody a nevýhody pro tento typ měření. Používány jsou zejména scintilační detektory a některé polovodičové detektory.

V této kapitole se zaměříme na detekční systém poskytující informaci od zdrojů fotonového záření. Konkrétně na detektory obsahující anorganické scintilátory a polovodičové detektory. Ve zkratce, scintilátory jsou materiály, které po interakci například s fotony vytváří malé záblesky neboli scintilace. Této vlastnosti se využívá k detekci záření.

2.1 Anorganické scintilátory

Nejprve se zmíním o terminologii využívané v této kapitole. Pod pojmem scintilátor se rozumí materiál citlivý k IZ - jeho ozáření má za následek vyzáření fotonů viditelného či UV světla. Ze scintilátoru se broušením či různým opracováním následně vyrábí scintilační detektor. Ke scintilačnímu detektoru se přikládá fotonásobič se kterým společně tvoří tzv. scintilační detekční jednotku (SDJ).

Anorganické scintilátory jsou vhodné k měření fotonového záření vzhledem k jejich relativně vysokému protonovému číslu (narozdíl od plynových detektorů či organických scintilátorů). Např. scintilátor NaI(Tl) má $Z_{ef} = 50,17$ [11].

Anorganické scintilátory se mohou dopovat příměsemi, které vylepšují scintilační vlastnosti, avšak ne vždy se tohoto využívá. Scintilátor BGO je čistý monokrystal a využívá se k výrobě scintilačních detektorů. Na druhé straně příkladem, kdy se čistý krystal dopuje je scintilátor NaI(Tl). Čistý monokrystal je ve formě NaI. Tímto se dostává k označení krystalů. Dopovací látka je znázorněna buďto v závorkách za čistým monokrystalem, či je oddělena dvojtečkou, názorný příklad NaI(Tl) či NaI:Tl. Tohoto značení se využívá běžně v literatuře s tematikou anorganických scintilátorů [18].

2.2 Vlastnosti detektorů

V této podkapitole si uvedeme několik pojmů, které rozlišují jednotlivé detektory a poukazují jejich výhody či nevýhody mezi sebou.

Energetická rozlišovací schopnost, označována jako FWHM (full width at half maximum), je tzv. pološířka fotopíku tj. šířka píku v polovině výšky maxima. Udává se absolutně nebo relativně. Absolutní vyjádření je v jednotkách eV , keV ap. Relativní je podíl pološířky $D_{1/2}$ ku energii ve středu píku E násobený 100, tedy $\frac{D_{1/2}}{E} \cdot 100$ % FWHM [18]. Zvykem u anorganických scintilátorů je uvádět relativní FWHM pro pík úplné absorpce ^{137}Cs ($661keV$), u polovodičových absolutní pro pík ^{60}Co o energii $1\,332\,keV$.

Konverzní účinnost je podíl energie výstupní ku vstupní. Tedy energie lumi-

niscenčních fotonů ku celkové energii vstupujících fotonů. Udává se v procentech.[18]

Detekční účinnost je poměr počtu detekovaných impulzů ku počtu fotonů emitovaných zdrojem za určitý čas. Částice procházející detektorem rychle po sobě nemusí být zaregistrovány. Toto vede ke snižování detekční účinnosti.[18]

Mrtvá doba je čas, který uplyne od detekce jedné částice, během kterého není detektor schopen registrovat další částice.[18]

Časové rozlišení je doba po kterou se registruje odezvový signál a než se zpracuje technikou.[18]

Dosvit je doba během které dochází ke scintilaci (vysvícení krystalu).

Světelný výtěžek odpovídá počtu emitovaných fotonů scintilátorem odpovídající absorbované energii 1 MeV . [11].

Hygroskopičnost je vlastnost některých scintilátorů vázat vlhkost. Tato vlastnost je nežádoucí a takové scintilátory je nutné zapouzdřovat.

2.3 Zástupci anorganických scintilátorů

2.3.1 NaI(Tl)

Jedním z nejrozšířenějších scintilátorů pro detekci záření gama je scintilátor NaI(Tl). Jedná se o scintilátor NaI dopovaný thaliem. Jeho zásadní výhodou je jeho cena a dostupnost. Díky své ceně a poměrně dobrým vlastnostem je nejčastěji rozšířeným anorganickým scintilátorem. Další výhody jsou např.: velké detekční objemy, detekční účinnost, rozlišovací schopnost. Dokáže měřit velké četnosti díky krátkému dosvitu cca 230 ns . Rozlišovací schopnost měření ^{137}Cs dosahuje 6% (gamma), (55)Fe >40% (záření X). Čistý krystal NaI má konverzní účinnost při teplotě 77 K přibližně 25% (neaktivovaný). Nechlazený cca 10%. Vlnová délka emisního spektra je 410-420 nm , která téměř nezávisí na teplotě. Světelný výtěžek scintilátoru NaI(Tl) je 38 000 $foton/MeV$.

Časový průběh scintilační luminiscence NaI(Tl) se skládá se exponenciálního náběhu s časovou konstantou 60 ns . Nezávisí jak na druhu částice tak na koncentraci aktivátoru. Dále se skládá z exponenciálního odpadu s časovou konstantou 230 ns , která závisí jak na koncentraci aktivátoru tak na druhu částice. Rozdíl časového průběhu je nejvíce znát při scintilaci způsobenou alfa částicemi a fotony. Pro TNČ jako je alfa částice odpad nastává ihned po náběhu. Pro fotony po náběhu dojde k časové prodlevě cca 130-140 ns a následně dojde k odpadu. K odezvě alfa záření se zabrání umístěním scintilátoru do pouzdra. Pouzdro je tedy absorbátorem alfa částic a scintilátor tyto částice nezaznamená. Dosvit je 230 ns a je velmi teplotně závislý. Při teplotě 154 K je dosvit dlouhý 1 s .

Nevýhodou scintilátoru NaI(Tl) je jeho hygroskopičnost. Z tohoto důvodu se scintilátor zapouzdřuje nejčastěji do hliníkového obalu. To vede ke zhoršení detekce nízkenergetických fotonů a záření alfa. NaI(Tl) je vhodný pro detekci záření gama díky jeho efektivnímu protonovému číslu $Z_{ef} = 50,17$ a hustotě $\rho = 3,67 g \cdot cm^{-3}$ [11].

2.3.2 LaBr₃(Ce)

Tento scintilátor je dopován cerem. Cer patří do skupiny lanthanoidů a je velice reaktivní. Detektory s tímto scintilátorem vykazují FWHM i nižší než 3%. Emisní spektrum dosahuje vlnových délek 380 nm.

Hustota $\rho = 5,08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Díky své hustotě je schopen zaznamenat více impulzů z důvodu vyšší pravděpodobnosti interakce fotonů. To se projevuje i na světelném výtěžku, který má hodnotu 63 000 *foton/MeV*. Dosvit LaBr₃(Ce) má hodnotu 70 ns. Ve všech těchto vlastnostech překonává parametry scintilátoru NaI(Tl) a je jeho silnou konkurencí.

Má také rychlý odpad signálu a nehodí se pro zářiče s nízkými toky fotonů. To z důvodu toho, že LaBr₃(Ce) vykazuje vlastní radioaktivní pozadí, konkrétně z ¹³⁸La. Vlastní radioaktivní pozadí zhoršuje čitelnost spekter zaznamenaných scintilátorem.

Celkově je LaBr₃(Ce) radiačně odolný. Je nutné tento scintilátor zapouzdřit z důvodu jeho hygroskopičnosti [11].

2.3.3 BGO

Scintilační krystal BGO přesněji Bi₄Ge₃O₁₂ je čistý krystal bez dopované složky. Tento krystal se vyznačuje tím, že jeho absorpční vlastnosti jsou stejné jako cca 16 násobně větší objem krystalu NaI(Tl). Hustota $7,13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a efektivní protonové číslo $Z = 73,03$ zajišťují lepší interakci fotonů. Bohužel má tento scintilátor malý světelný výtěžek pro nízkoenergetické fotony a zhoršené FWHM. Naopak pro fotony vyšších energií nalézá více své využití a to z důvodu svých interakčních vlastností. Udávaný světelný výtěžek je 8 – 10 000 *foton/MeV*.

Dosvit scintilátoru je 300 ns, a tak je schopen zaznamenat vysoké četnosti s dobrým časovým rozlišením. Relativní světelný výtěžek se udává pouze na 15-20% NaI(Tl). Vlnová délka emise 480 nm ještě více zhoršuje výtěžek a to na 10-15%. To se projevuje na rozlišovací schopnosti scintilátoru, která má hodnotu 10%. Jsou možné i nižší FWHM, ale je nutné vybrat lepší krystaly a fotonásobiče. Tím se FWHM může dostat i pod 9%, avšak tyto detektory nejsou běžně komerčně dostupné.

BGO má ještě další výhodu, nízkou hodnotu afterglow. V porovnání opět s NaI(Tl), který má hodnotu 0,5-5%, má BGO řádově nižší hodnotu a to 0,005 %. Co se týká materiálu, tak BGO je snadno opracovatelný a neštípe se. Je chemicky odolný, má vyšší tvrdost a je nehygroskopický. Tato vlastnost je pozitivní, není nutné krystal speciálně zapouzdřovat. Bohužel krystal není příliš radiačně odolný [11].

2.4 Polovodičové detektory

Polovodičové detektory jsou velmi vhodné nejen pro spektrometrii gamma. Obecně díky jejich vysokému efektivnímu protonovému číslu jsou dobrými indikátory fotonového záření. Vzhledem k jejich malé energii (3 eV) potřebné k vytvoření jednoho páru elektron díra jsou schopny přesně stanovit složitá a smíšená energetická spektra. Rozdíl mezi scintilačními a polovodičovými detektory je ve značně nižší hodnotě FWHM. Typicky se FWHM udává pro fotopík ⁶⁰Co o energii 1 332 keV. Např. HPGe

detektor je schopen změřit s FWHM až $1,6 \text{ keV}$. Zatímco lepší scintilační detektory vykazují FWHM v řádech desítek keV . Nevýhodou těchto detektorů je, že musí být chlazeny. Tento fakt společně s ekonomickou náročností výroby má za následek méně časté využití s BLP.

Princip polovodičových detektorů spočívá ve správném zapojení polovodiče. Ionizující záření v jeho krystalické mřížce vytváří volné elektrony a díry. Ty jsou sbírané přiloženým elektrickým polem. Pohyb elektronů a děr vyvolá elektrický proud a ten jsme schopni naměřit. Kdyby byl polovodič zapojen klasickým způsobem docházelo by k tomu, že by převyšoval užitečný signál vyvolaný ionizujícím zářením. Tak se tedy využívá zapojení v závěrném směru tzv. p-n nebo p-i-n přechodů. V tomto typu zapojení prochází minimální proud a tak jsou polovodičové detektory specifické svými úzkými píky úplné absorpce. [11].

2.5 Zástupci polovodičových detektorů

2.5.1 HPGe

HPGe detektor patří do skupiny detektoru struktury p-i-n. Jedná se vrstvený polovodič, kde p označuje vrstvu s akceptory (obsahují tzv. díry) a n vrstvu s donory (poskytují elektrony). Vrstva i je tzv. kompenzovaný polovodič, ve kterém je stejné množství donorů a akceptorů. U HPGe detektoru je to vrstva ze superčistého germania.

Výhoda tohoto polovodiče oproti jiným je, že ho není nutné chladit mimo provoz. Tak ušetří náklady spojené s jeho využíváním. U běžného HPGe se využívá ke tvorbě kontaktů více metod. Pro vytvoření donorové vrstvy je možné využít iontové implantace. Ta je finančně nákladnější než metoda difúze lithia, ale poskytuje kvalitnější provedení. Pro tvorbu vrstvy akceptorů se využívá též iontové implantace.

K detekci je možné využít tzv. reverzních HPGe detektorů s lepší detekční účinností pro energie záření do cca 100 keV . FWHM pro pík úplné absorpce ^{60}Co o energii 1332 keV se udává až na $1,6 \text{ keV}$. Pro energii 122 keV (^{57}Co) je FWHM až 620 eV a pro energii $5,9 \text{ keV}$ (^{55}Fe) je FWHM až 360 eV . Za provozu je nutné HPGe detektory chladit na teplotu kapalného dusíku [11].

2.5.2 CZT

CZT detektor je vytvořen z termální směsi $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, kde x nabývá specifických hodnot, viz [11]. Díky šířce zakázaného pásu (nevodivostní pás) této směsi, je možné detektor provozovat i při pokojových teplotách.

Typickou nevýhodou CZT detektorů je jejich špatný sběr děr. Narozdíl od jeho konkurenčních detektorů (CdTe a HgI_2) má odezvy z dlouhodobého hlediska stabilnější, avšak sběr děr pomalejší. Účinná plocha detektoru CZT nebývá větší než 1 cm^2 . CZT detektory se obvykle nevyrábí tlustší než 2 mm .

Relativní rozlišovací schopnost udaná pro CZT pro pík úplné absorpce ^{137}Cs je 1% . Pro porovnání s polovodičovými detektory je názornější převést tuto hodnotu na eV , tedy FWHM je $6,2 \text{ keV}$. V porovnání se scintilátorem NaI(Tl) má nižší

FWHM. Rozlišovací schopnost NaI(Tl) pro ^{137}Cs je až 6%, tedy cca 39,7 keV [11]. Díky malému objemu detektoru CZT s následnou malou detekční účinností ve větších vzdálenostech nejsou tyto detektory běžně užívány pro letecká měření.

3 Praktická část - Experimentální stanovení parametrů detekčního systému

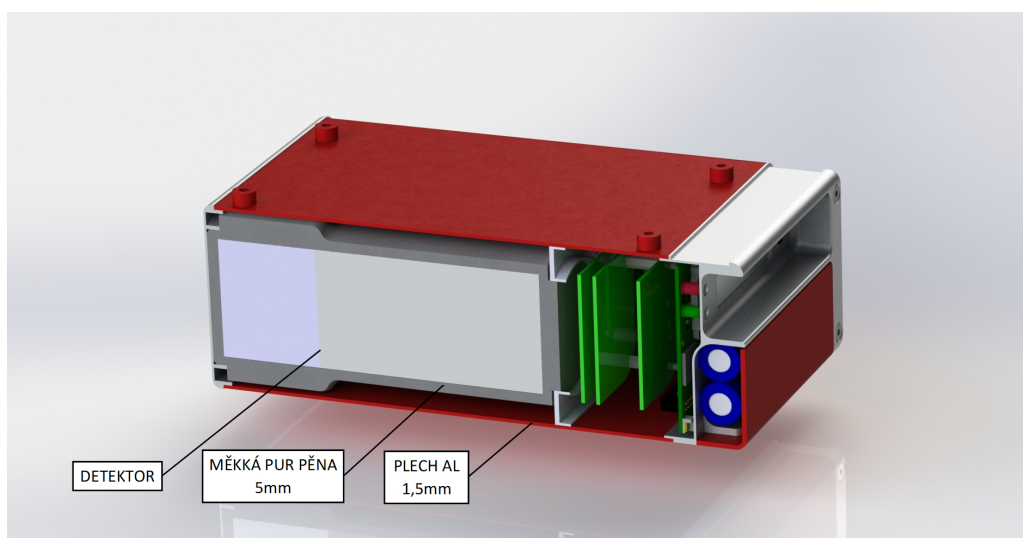
Úkolem praktické části této bakalářské práce bylo zejména seznámení se s detekčním systémem D230A od brněnské firmy Georadis, který je pro letecká měření s využitím dronu DJI Matrice 600 Pro nově dostupný na KDAIZ FJFI ČVUT. Dále bylo úkolem změřit základní parametry detekčního systému s ohledem na měření IZ, tedy experimentálně určit energetickou kalibraci detektoru, energetickou rozlišovací schopnost a směrovou závislost odezvy. Ověřit také možnost využití zapojení detektoru prostřednictvím nezávislých spektrometrických tras pro lokalizaci zdroje záření. Stanovení uvedených parametrů jsem prováděl s využitím speciální měřicí sestavy pro nastavení geometrie experimentu v laboratorních podmínkách.

3.1 Detekční systém - Georadis D230A

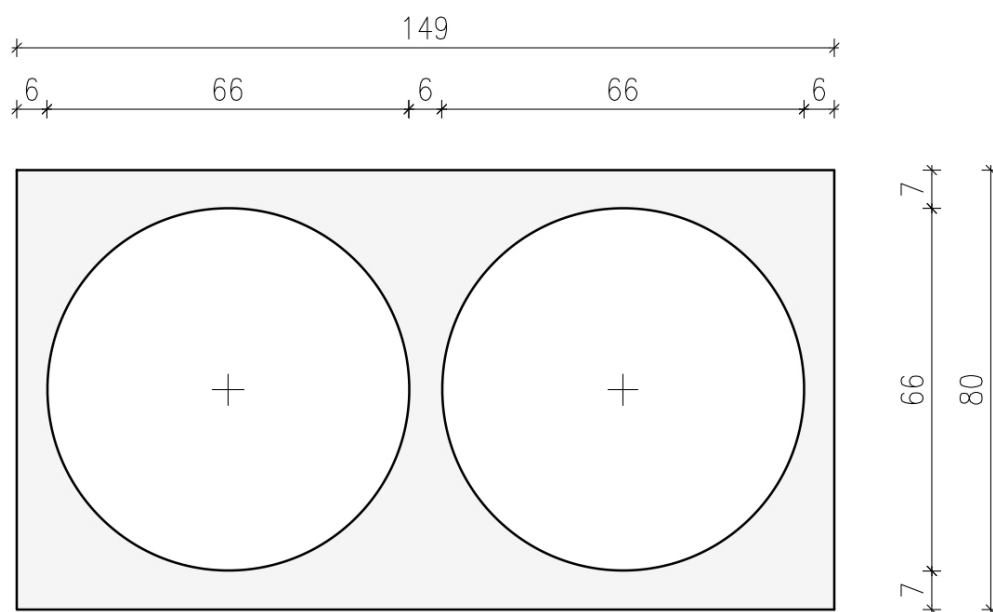
Pro praktickou část bakalářské práce jsem využil detektoru Georadis D230A, který byl na KDAIZ FJFI ČVUT pořízen pro měření přírodních radionuklidů. Tento detektor je určen pro leteckou gamma spektrometrii s využitím BLP. Byl konstruován tak, aby měl nízkou hmotnost a byl zároveň maximálně citlivý. Poskytuje 1024 kanálové spektra v rozsahu 25 - 3000 keV, zaznamená max. 350 000 cps a jeho FWHM je nejvýše 8% pro fotopík ^{137}Cs . Doporučená teplota provozu je v rozmezí -10 až 50 °C. Detektor poskytuje pouze základní krytí proti vodě a prachu.

Detekční systém D230A obsahuje dva scintilační krystaly. V případě tohoto detektoru jsou to scintilátory NaI:Tl (výrobce poskytuje tento detektor i s krystaly BGO). Rozměry krystalů jsou 2" x 2". Oba scintilátory mají svou vlastní elektroniku, a tak je možné získávat data nezávisle jeden na druhém prostřednictvím nezávislých spektrometrických tras. Detektor ukládá sekundová spektra pro levý i pravý scintilátor zvlášť. Také poskytuje informaci a sumárním spektru jednotlivě pro pravý i levý krystal a současně sumární spektrum z obou scintilátorů současně. Tato data ukládá do integrované paměti. Výrobce uvádí, že detektor je schopen uložit několikahodinové měření a kapacitu úložiště dat je možné navýšit. Standardní velikost integrované paměti je 2 x 20 000 spekter. Uložená data se přesouvají po připojení přes USB kabel s využitím softwaru dodaným výrobcem. Detektor je schopen také přenášet data z probíhajícího měření přímo do PC. K tomuto případu poskytuje výrobce společně s detektorem software a hardwarové vybavení pro bezdrátový přenos.

Pouzdro detektoru je vyrobeno z hliníku. Jeho rozměry udávané výrobcem jsou 145 x 78 x 260 mm. Scintilátory spolu s fotonásobiči přiléhají k zadnímu čelu detektoru, zbytek prostoru je vyplněn elektronikou viz. obrázek č.5. Detektor je možné ovládat i rozhraním umístěným v přední části detektoru. Jedná se o menší displej s jedním tlačítkem. Ovládání funguje na principu délky doby stisku tlačítka. Náhled přední části detektoru je poskytnut na obrázku č.12. Schéma řezu zadní částí detektoru je zobrazeno na obrázku č.6 a ukazuje umístění krystalů s jejich ochrannou vrstvou v konstrukci detektoru. Toto schéma obsahuje vzdálenosti, které byly naměřeny posuvným měřítkem po nahlédnutí pod ochranný obal detektoru.



Obrázek 5: Boční řez detektorem, převzato z technické dokumentace dostupné z [3]



Obrázek 6: Schéma řezu detektorem v části obsahující scintilační krystaly, rozměry jsou uvedeny v *mm*

K obalu detektoru je možné připevnit lyžiny, kterými se detektor připevňuje k BLP. Tyto lyžiny jsou připevněny k detektoru např. na obrázku č.19 v kapitole 3.7 pojednávající o směrové závislosti. Na tomto obrázku je detektor pomocí lyžin zavěšen na 2 dlouhých železných tyčích v horizontálním směru připevněných k chemickým stojanům. Více informací o této geometrii je uvedeno v odkazované kapitole 3.7.

Detektor je napájen Li-Ion baterií umístěnou v levé přední části detektoru vedle displeje. Je lehce vyjímatelná a dle výrobce poskytuje výdrž nejméně 4 hodiny při teplotě 20 °C. GPS modul je dodáván společně s detektorem. Není integrovaný, a tak je nutné najít vhodné místo pro jeho upevnění. K detektoru se připojuje pomocí kabelu. Detektor není nutné kalibrovat, využívá kalibraci na základě přírodního záření. Také využívá automatického nastavení zesílení podle píků odpovídajícího přírodního pozadí [3]. Během úvodních experimentů s tímto detektorem se projevíly některé nedostatky tohoto řešení. Jde zejména o problémy s energetickou stabilizací spekter z jednotlivých detektorů a problémy s přenosem a ukládáním dat. Tyto problémy se mohly částečně projevit i ve výsledcích prezentovaných v této práci. V době sepisování této práce jsou zmíněné problémy řešené ve spolupráci s výrobcem detektoru.

Experimenty s tímto detektorem byly uspořádány tak, aby mrtvá doba měření byla vždy menší než konzervativně stanovená maximální hodnota 10% [4].

3.2 Energetická kalibrace

Detekční systém poskytuje informaci o počtu pulzů vztažených k číslům kanálů. Pro přiřazení energetických hodnot jednotlivým kanálům je nutné provést energetickou kalibraci. Jinými slovy, jde o experimentální stanovení vztahu mezi číslem kanálu a odpovídající energií záření. Pro stanovení tohoto vztahu se typicky využívá sady zářičů s monoenergetickými svazky, v tomto případě záření gama. Lze využít i svazky polyenergetických zářičů, nicméně je nezbytné, aby se blízké píky totální absorpce (tzv. fotopíky) nepřekrývaly a ani částečně nepřekrývaly. Z toho důvodu je vhodnější využít monoenergetické zářiče.

Pro kalibraci se využívá již zmíněných fotopíků - píků totální absorpce od známých zářičů. Ty vznikají po interakci ve scintilátoru fotoelektrickým jevem. Ve spektru jsou zastoupeny značným počtem impulzů. V ideálním případě by byl monoenergetický svazek v jednom kanále. Toto ale v reálném světě neplatí a dochází ke statistickému rozptylu okolo zmíněné monoenergetické hodnoty, která je středem píku. Určení čísla kanálu odpovídající energii monoenergetického svazku je možné provést dvěma způsoby. Buďto proložením fotopíku normálním rozdělením, známým také pod jménem Gaussovo rozdělení, nebo přiřazením kanálu s nejvíce zastoupeným počtem impulzů v rozmezí zkoumaného píku. Takto je tedy přiřazen kanál k hodnotě energii zkoumaného zářiče. Pro kalibraci se využívá typicky radionuklidů: ^{241}Am , ^{203}Hg , ^{137}Cs , ^{88}Y , ^{22}Na a jiné.

Souhrn informací o energiích zářičů s příslušnými kanály se zobrazuje graficky a prokládá se lineární funkcí. V oblasti nízkých i vysokých energií může docházet k odchýlení, ale je možné tento jev zanedbat dle [11]. Lineární proklad je nazýván



Obrázek 7: Zobrazení geometrie měření energetické kalibrace

kalibrační přímkou, která nemusí procházet počátkem souřadného systému. Její tvar je tedy:

$$E = a \cdot H + b, \quad (1)$$

kde E je energie, H číslo kanálu, a i b jsou parametry prokladu. Pro určení energetické kalibrace jsem využil následujícího experimentu.

3.3 Experimentální stanovení energetické kalibrace

Detektor Georadis D230A jsem umístil na pomocnou pracovní desku obdélníkového tvaru. V této desce byly vyvrtány závitové otvory ve stejných vzdálenostech od sebe po celé ploše. Do těchto závitů bylo možné zapustit šrouby, na jejichž konci byl vždy umístěn držák se zářičem gama. Tímto mechanismem se velice jednoduše dala nastavit vertikální poloha radioaktivního zdroje. Těto aparatury bylo využito s ohledem na její praktičnost i pro další experimenty zmíněné v této práci.

Do středu šířky detektoru (mezi dvěma scintilátory) v blízkosti jeho zadní části jsem umístil šroub s úchytem pro radioaktivní zdroj. Průřez detektorem je popsán na obrázku č.6 v kapitole o detektoru Georadis D230A. Vertikální polohu jsem zachovával po výměnách zdrojů a to tak, aby byl zdroj umístěn opětovně ve středu výšky detektoru. Umístění detektoru a zářiče je možné zhlédnout na obrázcích č.7 a č.8. Na těchto obrázcích je zobrazen další detektor, který se využíval pro kontrolu mrtvé doby a dostatečné četnosti impulzů. Obsahoval scintilátor NaI:Tl. Pokud by byla mrtvá doba příliš vysoká, docházelo by ke ztrátám impulzů od zářiče. To by vedlo k malému počtu impulzů ve fotopíku i přes značnou četnost dopadajících fotonů od radionuklidu.

Pro měření energetické kalibrace jsem využil následující radionuklidy ^{137}Cs , ^{241}Am ,

^{60}Co , ^{54}Mn , ^{232}Th , ^{22}Na , ^{152}Eu a ^{40}K z radioaktivního pozadí. Tyto radioaktivní zdroje byly etalony pro kontrolu a kalibraci spektrometrů záření gama od Českého metrologického institutu typu EG. S každým radionuklidem bylo provedeno měření dlouhé 5min (live time). Zdroje s radionuklidy byly umísťovány do připravené aparatury viz. obrázek č.8. V případě určení ^{40}K z radioaktivního pozadí bylo měření spuštěno po dobu 1h .

Detektor nahrává informace o sekundových spektrech z obou scintilátorů. Také poskytuje informaci o součtovém spektru z celého měření pro oba detektory (scintilátory) separátně, tak i sumární spektrum z obou detektorů dohromady. K dalšímu zpracování dat jsem využil programu QtiPlot a aplikace Excel. Celková spektra jsem zobrazil pomocí QtiPlotu a z něj určil číslo kanálu píku úplné absorpce. Využil jsem metody nejvíce zastoupeného počtu impulzů ve fotopíku. Energie píků úplné absorpce jsem vyhledával v online tabulkách na webové stránce [5]. Ke kanálům přiřazeným k fotopíkům jsem přiřadil jednotlivé energie.

Výsledky jsem zobrazil pomocí grafu na obrázku č.9 spolu s lineárním prokladem. Tento lineární proklad je kalibrační přímka detektoru získaná prokladem v programu QtiPlot. Její rovnice je

$$E = 3,029 \cdot h - 16,502 \quad (2)$$

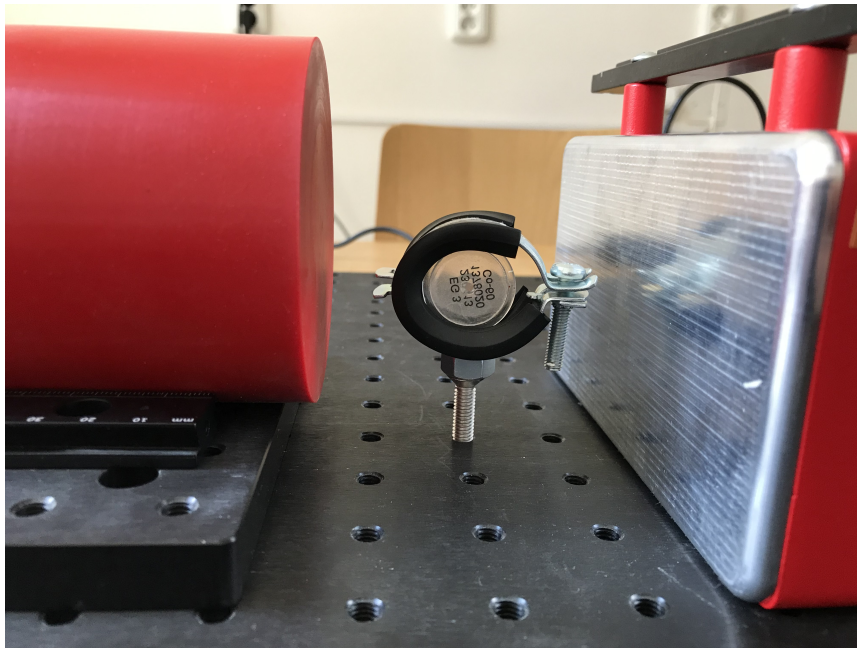
kde h je číslo kanálu a E energie píku úplné absorpce.

Tabulka s daty, které jsem prokládal je k nahlédnutí v tabulce č.1.

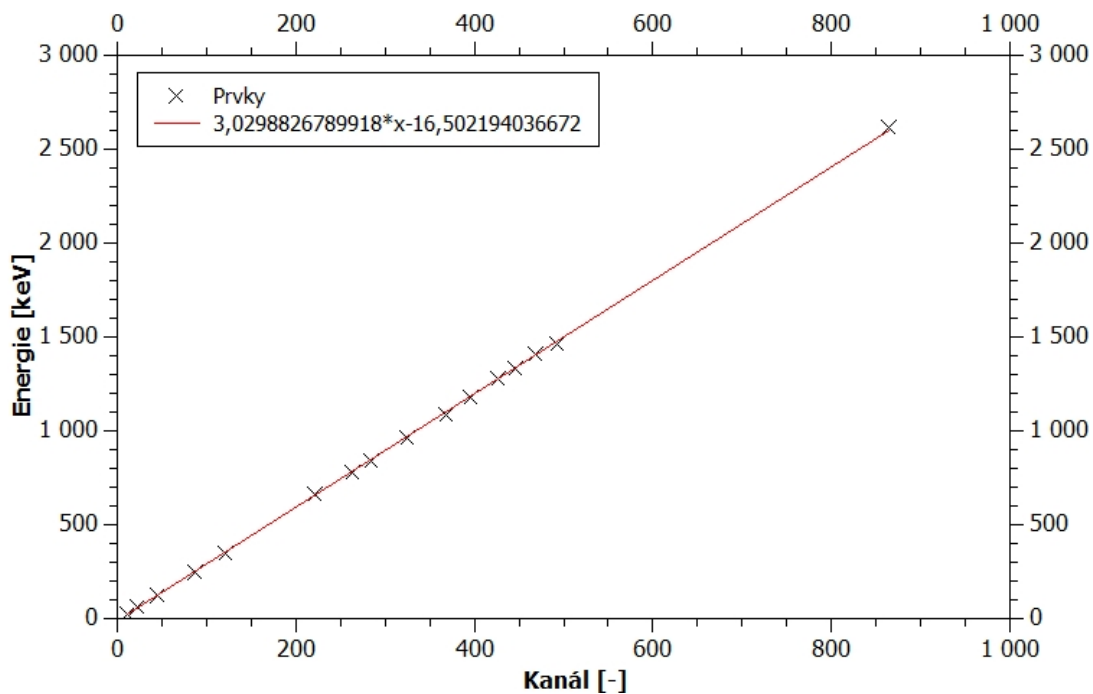
Kanál [-]	Energie [keV]
12	26,3
23	59,5
45	121,8
87	244,7
121	344,3
222	661,7
264	778,9
284	834,8
325	964,1
369	1085,9
395	1173,2
426	1274,5
446	1332,5
469	1408,0
492	1460,8
864	2614,5

Tabulka 1: Tabulka hodnot kanálů a jim odpovídající energie - energetická kalibrace

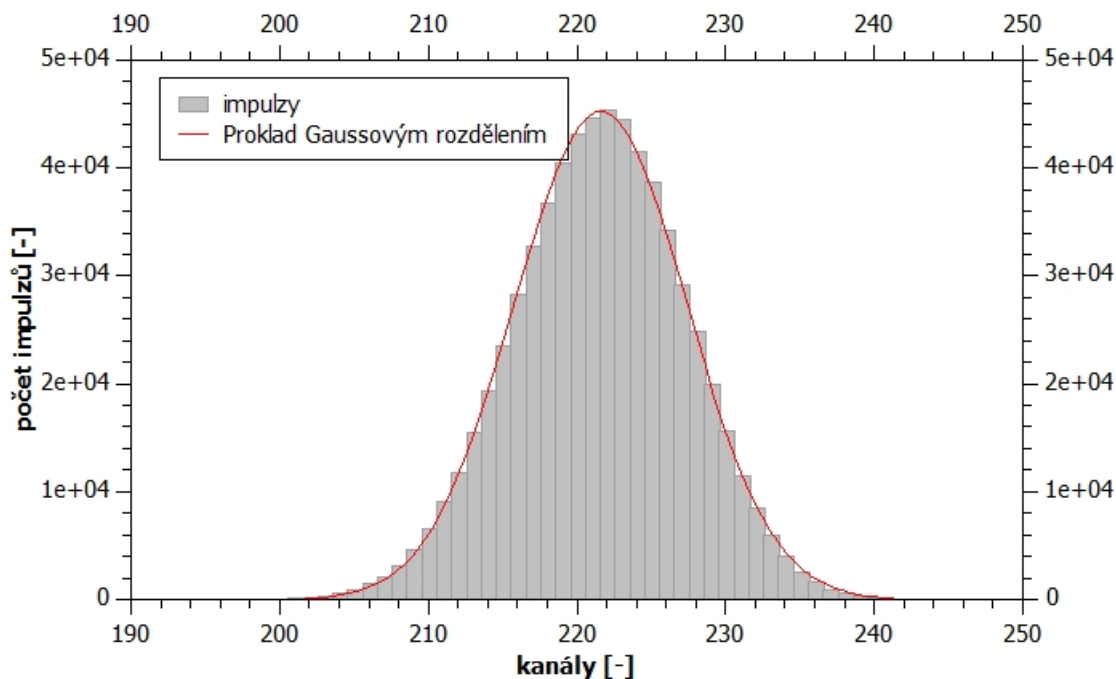
Jak lze vyčíst z uvedeného grafu na obrázku č.9, všechny uvažované píky úplné absorpce sedí výborně na získanou kalibrační křivku a lze kalibraci dále používat.



Obrázek 8: Zobrazení úchytu radioaktivního zdroje v blízkosti detektoru pro měření energetické kalibrace



Obrázek 9: Grafické znázornění závislosti energie na čísle kanálu spolu s kalibrační přímkou



Obrázek 10: Příklad prokladu ořízlého píku úplné absorpce ¹³⁷Cs k určení hodnoty FWHM

3.4 Rozlišovací schopnost - FWHM

Plná šířka v polovině maxima je jedním ze základních parametrů určující kvalitu scintilační detekční jednotky tedy její rozlišovací schopnost. Zkratka FWHM pochází z anglického spojení full width at half maximum.

Jedním z parametrů určující kvalitu detektoru je právě FWHM. Čím je nižší tím lépe se ze spekter vyčítají píky příslušných energií. Také detektor s nízkým FWHM může rozlišit sobě blízké energie píků, které by mohly dát vzniknout součtovému píku v detektoru s vyšší hodnotou FWHM. Pro účely spektrometrie je vhodné měřit detektory s nízkým FWHM.

FWHM se určuje z naměřeného spektra prokladem píku úplné absorpce Gaussovým rozdělením. U scintilačních detekčních systémů se tato hodnota uvádí pro fotopík ¹³⁷Cs. Matematický předpis Gaussova rozdělení je následující

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

kde σ^2 je rozptyl a μ je střední hodnota.

Názorný příklad prokladu Gaussovým rozdělením je možné pozorovat na obrázku č.10, kde jsem proložil oblast píku úplné absorpce ¹³⁷Cs.

Pro výpočet FWHM se využívá právě parametru σ a to následujícím způsobem

$$FWHM = 2,355 \cdot \sigma \quad (4)$$

Odvození výpočtu FWHM zde nebudu uvádět. Původ čísla 2,355 je v přiblížení

Energie [keV]	FWHM [%]	Chyba FWHM [%]
26,3	36,21	5,37
59,5	13,58	0,89
121,8	9,30	0,11
244,7	8,73	0,12
344,3	8,35	0,06
661,7	6,25	0,02
778,9	5,62	0,04
834,8	5,54	0,05
964,1	5,17	0,04
1085,9	5,84	0,05
1173,2	4,69	0,02
1274,5	4,66	0,04
1332,5	4,53	0,01
1408,0	4,40	0,03
1460,8	4,62	0,07
2614,5	3,26	0,03

Tabulka 2: Výsledky stanovení relativní FWHM s chybou pro jednotlivé energie

hodnoty $FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ viz.[1].

Takto se tedy získává FWHM absolutní. U scintilátorů je zvykem FWHM uvádět relativně v %. Toho se dosáhne jednoduše. Stačí vydělit absolutní FWHM celkovou energií fotopíku E_f .

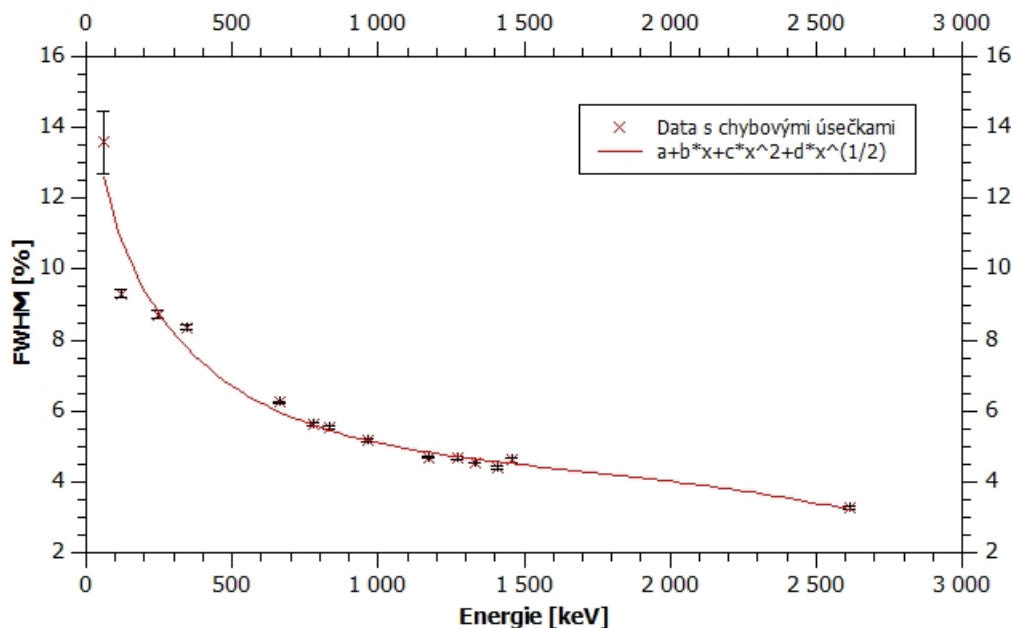
$$FWHM_{rel} = 2,355 \cdot \frac{\sigma}{E_f} \quad (5)$$

3.5 Experimentální stanovení FWHM

Pro stanovení FWHM jsem využil naměřených spekter získaných během předchozího měření energetické kalibrace. Geometrie měření a umístění radioaktivních zdrojů je zobrazeno na obrázcích č.7 a č.8. FWHM jsem určil nejen pro základní radionuklid, dle kterého se uvádí kvalita scintilátoru (^{137}Cs), ale i pro další radionuklidy: ^{241}Am , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{232}Th , ^{22}Na , ^{152}Eu a ^{40}K . Toto umožnilo sestavit energetickou závislost FWHM.

Získaná spektra z detektoru jsem zpracoval v programu Excel a QtiPlot. Před výpočtem FWHM jsem odečítal zaznamenané pozadí ve fotopíku. K tomu jsem využil lineárního prokladu cca 5 bodů před a 5 bodů za fotopíkem. Po této opravě jsem již mohl korektně proložit fotopík Gaussovským rozdělením (3). Jako příklad grafického zpracování uvádím ořízlé a proložené spektrum Gaussovým rozdělením, zobrazené na obrázku č.10. Z tohoto rozdělení jsem využil parametru σ a pomocí vztahu (4) a (5) jsem stanovil FWHM jak absolutní, tak relativní.

Výsledky experimentu jsou k nahlédnutí na obrázku č.11. Křivku prokladu jsem vybral dle článku [10]. Jednotlivé výsledky jsou k nahlédnutí v tabulce č.2.



Obrázek 11: Závislost relativní FWHM na energii

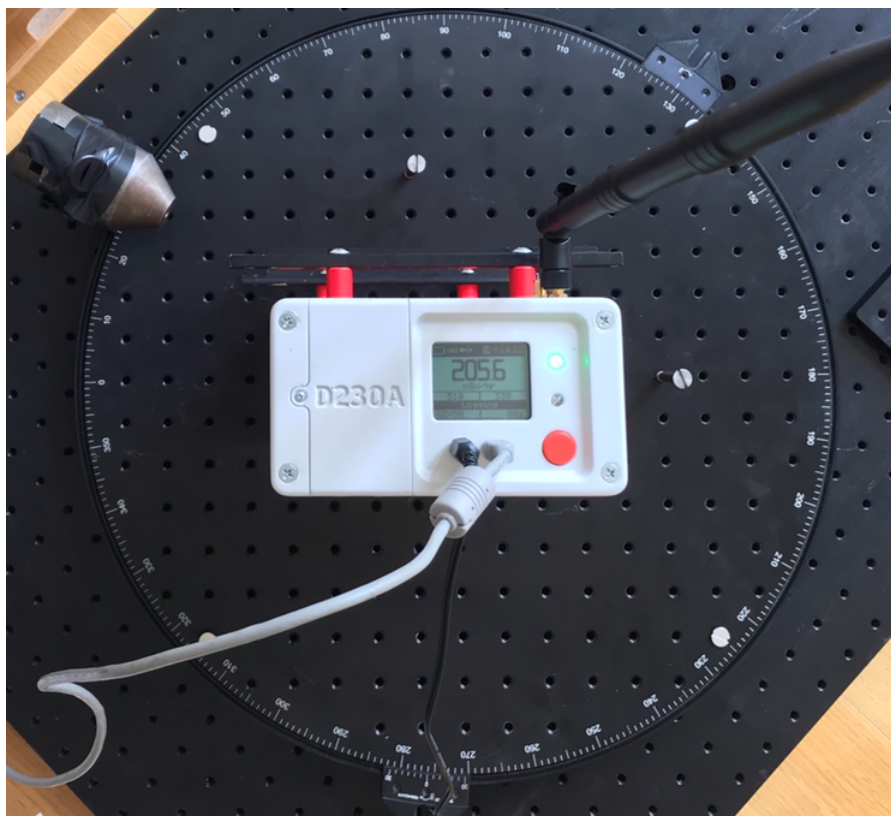
3.6 Směrová závislost odezvy detektoru

Cílem experimentu bylo zjistit, jakou má detektor směrovou závislost odezvy kolem svislých os jednotlivých scintilátorů a kolem osy procházející mezi jejich středy. Využil jsem již zmiňované geometrie měření na základě desky s otvory pro šrouby. Na tuto desku jsem umístil další, ale kruhovou a to do výšky cca 5 cm nad povrch spodní obdélníkové desky. Na okraji kruhové desky byl umístěn posuvný držák, kterým se dal nastavit libovolný úhel pro umístění zdroje vůči detektoru. Také byla na okraji kruhové desky vyznačena úhlová stupnice. S ní již bylo možné snadno nastavit úhel ozáření detektoru úzkým kolimovaným svazkem. Na posuvný držák jsem umístil pomocí objímky a šroubu s matkami ocelový kolimátor, do kterého jsem vložil radioaktivní zdroj ^{137}Cs . Výšku ozařování jsem nastavoval pomocí podložení detektoru hliníkovými destičkami.

Do připravené aparatury jsem umístil detektor tak, aby osa souměrnosti scintilátoru procházela středem kruhové desky a přitom tento scintilátor byl plně stíněn zbytkem detektoru pod úhlem 0° . Zobrazení aparatury měření je na obrázku č.12.

Při tomto měření bylo nutné označit scintilátory uvnitř detektoru. Po nahlédnutí do dat poskytujících detektorem je on sám rozdělují do složek det1 a det2. Osobně jsem jejich označení stanovil podle stran při pohledu na displej detektoru (levý na levé straně detektoru, pravý na pravé straně detektoru), jelikož nebylo známo, který scintilátor nese označení det1 a det2. Později určíme zda levý resp. pravý scintilátor odpovídá označení det1 resp. det2.

Měření proběhlo pro pět různých geometrií. První měřená geometrie měla vycentrovanou středovou osu celého detektoru s ozařováním ve výšce 3,5 cm od dolní hrany detektoru (na obrázku č.12 je pohled na přední stranu detektoru, spodní hrana je hrana dotýkající se kruhové desky). Další 3 geometrie byly provedeny pro vycent-



Obrázek 12: Zobrazení aparatury pro měření prostorové závislosti

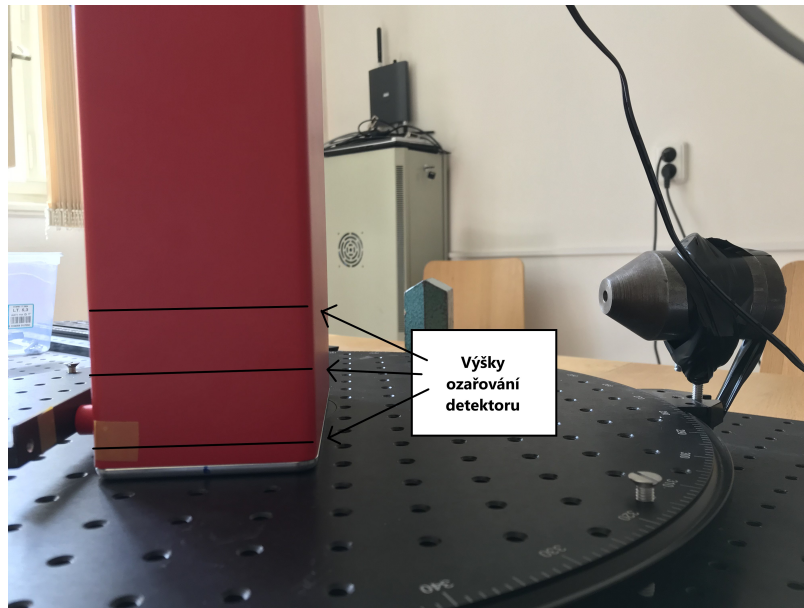
rovaný levý scintilátor. Každá geometrie byla měřena v jiné výšce krystalu. Měření jsem provedl ve výšce 1 cm , $3,5\text{ cm}$ a $5,5\text{ cm}$. Pátá geometrie byla nastavena pro výšku $3,5\text{ cm}$ vycentrovaného pravého krystalu. Schématický nákres výšek měření na fotografii detektoru je zobrazen na obrázku č.13.

Při jednotlivých měření byl postupně posouván zdroj záření po 30° . Pro jednu geometrii bylo provedeno 11 měření, jelikož 12. měření (360°) by bylo totožné s měřením pod úhlem 0° .

Doba Měření pro jeden úhel byla nastavena na 4 min .

Nyní se přesuneme ke zpracování dat získaných při experimentu. Data jsem zpracovával pro každý scintilátor zvlášť. Detektor poskytoval spektra jak pro levý, tak pro pravý scintilátor. Ze spekter jsem chtěl získat plochu píku úplné absorpce. Plochu s její nejistotou jsem stanovil pomocí programu Gamma Acquisition & Analysis. K určení plochy bylo zapotřebí vložit rovnici energetické kalibrace. Využil jsem kalibraci z měření popsaného výše v této bakalářské práci. Než-li jsem výsledky zobrazil, provedl jsem přepočet plochy píku na jednu sekundu a to tak, že jsem plochu píku podělil dobou live time měření (doba, kdy detektor je schopen zaznamenat impulzy).

Výsledky prezentuji v následujících grafech, kde na y ose je plocha píku (četnost impulzů) přepočtená na jednu sekundu, je zobrazena i s její nejistotou a na x ose je nanesena informace o úhlu natočení kolimovaného svazku vůči ose otáčení. Na obrázku č.14 je vyobrazena měřicí geometrie s vycentrovanou středovou osou scintilační detekční jednotky. Na obrázcích č.15,16 a 17 jsou zobrazeny výsledky měření



Obrázek 13: Zobrazení geometrie pro měření směrové závislosti odezvy detektoru, zde je kolimátor nastaven pro měření výšky 5,5 cm

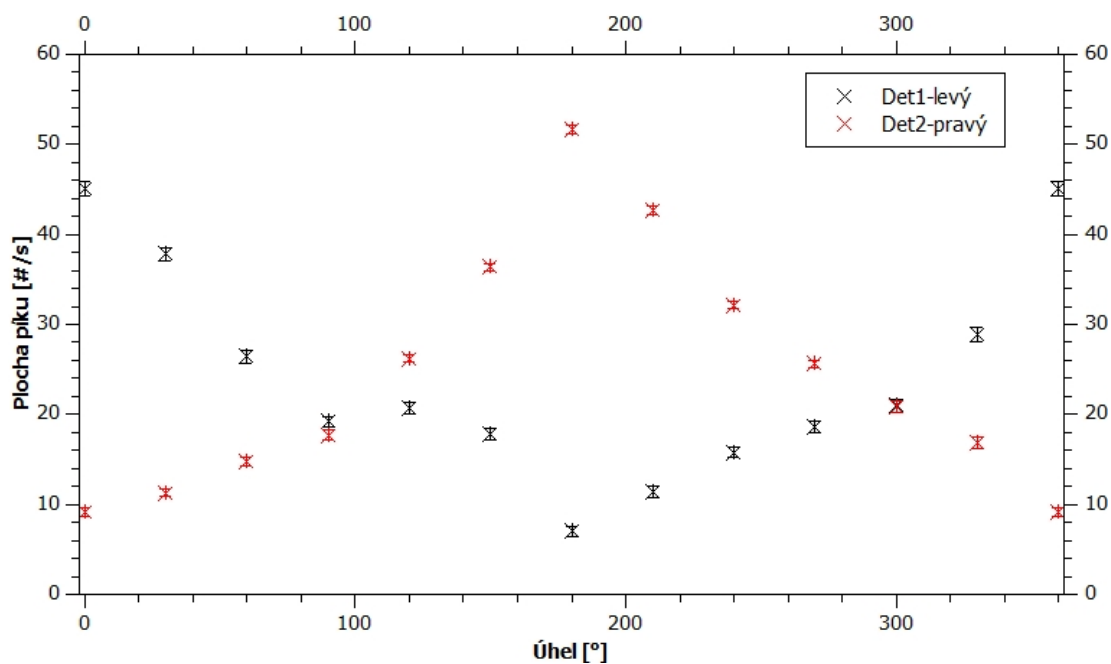
geometrie s vycentrovaným levým krystalem ve 3 různých výškách a na obrázku č.18 je zobrazena geometrie s vycentrovaným pravým krystalem ve výšce 3,5 cm.

V grafickém znázornění výsledků je vidět několik vyskytujících se jevů. Na obrázku č.16 je možné pozorovat, že při nulovém úhlu, kde byla nastavena geometrie tak, že levý krystal (vycentrovaný na střed kruhové plochy) byl nejvíce ovlivněn stíněním pravou částí detektoru (nejen druhým scintilátorem). V grafu jsou znázorněny plochy píků od det1 i det2. Zde mohu usoudit, že mnou označený scintilátor jako levý je od výrobce označen jako det1, scintilátor pravý jako det2. Tento závěr se shoduje s výsledky dalších měření kolem ostatních os otáčení v průběhu měření kolem celé osy scintilátoru či středu celého detektoru.

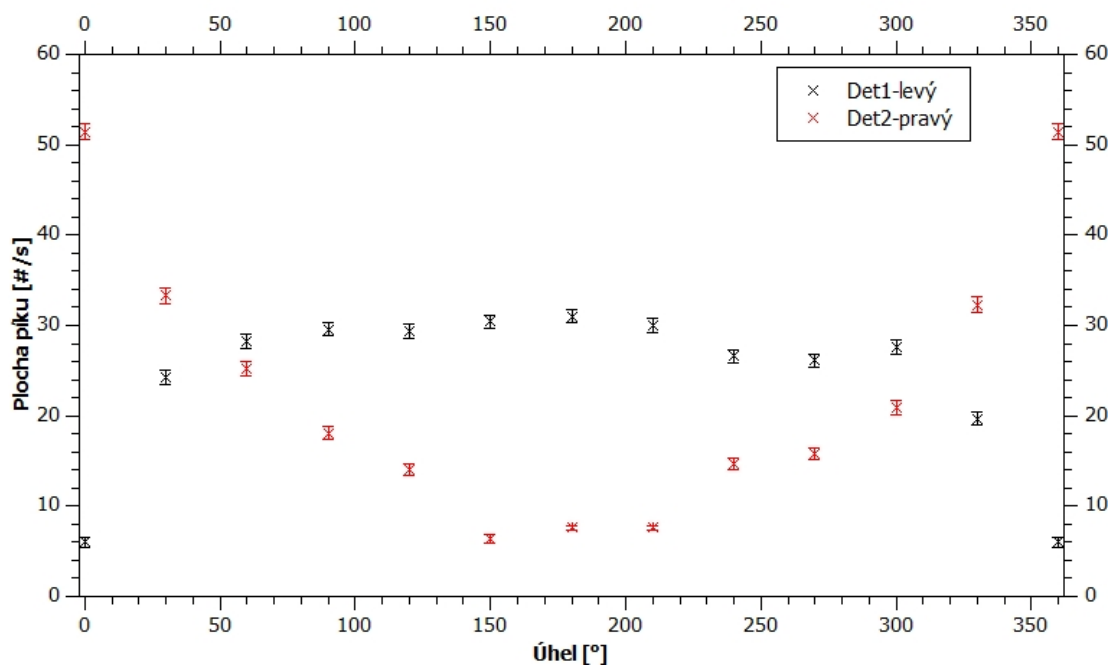
V datech zobrazených ve výše zmiňovaném grafu se také projevuje vliv tvaru celého detekčního systému - zejména tvar schránky detektoru a výplně, ve které jsou scintilátory umístěny. Primárně se zde projevuje kovová konstrukce tvaru kvádra. Ve vodorovném řezu, odpovídající směru záření, se projevuje obdélníkový tvar příčného průřezu boxem detektoru. V datech se projevuje nejvíce v hodnotách ploch píků pro 120° a 240° , při které spojnice detektoru a zdroje prochází rohy obdélníkového příčného průřezu detekčního systému.

Z grafu na obrázku č.16 lze vyčíst i předpokládané stínění jednoho scintilátoru druhým. Z počátku již zmíněné maximální stínění scintilátoru det1, s rostoucím úhlem postupně zvyšování píku det1 za klesajícího průběhu na scintilátoru det2 až do 180° . Po této hodnotě nastává opačná tendence, pokles plochy píku z det1 a nárůst píku na det2. Obdobné průběhy závislostí odezvy na úhlu natočení kolimovaného zdroje vůči detektoru jsou pozorované ve všech měřeních provedených v tomto experimentu.

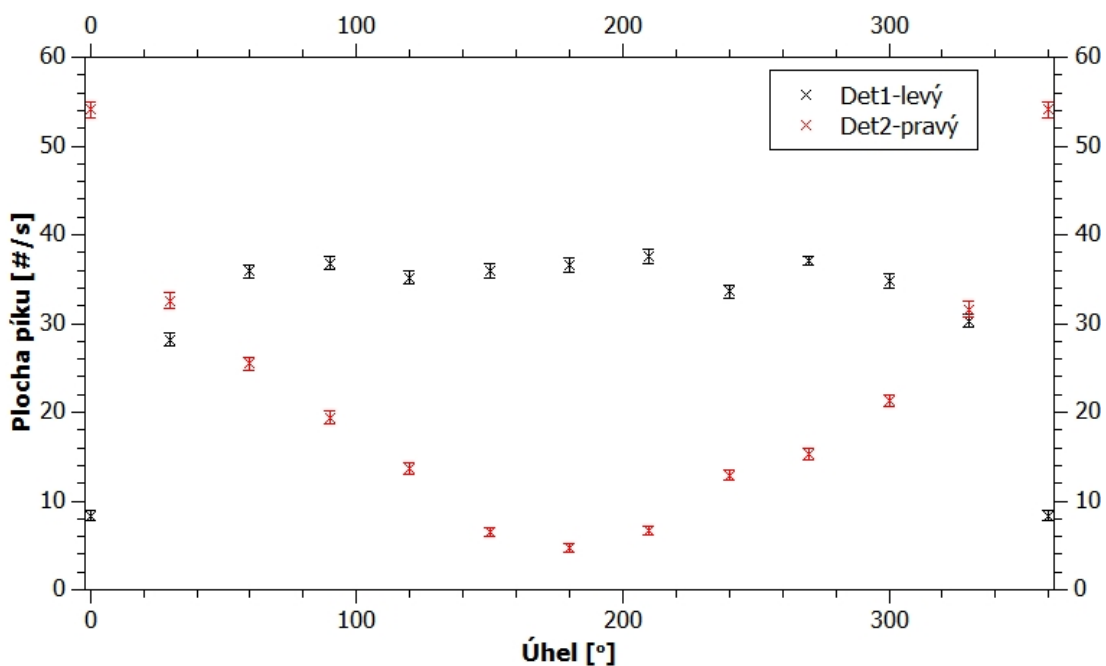
Průběh odezvy scintilátorů na obrázku č.14 je od ostatních odlišný. Odlišný průběh je způsoben jinou geometrií měření, kdy vycentrována byla osa detektoru a střed



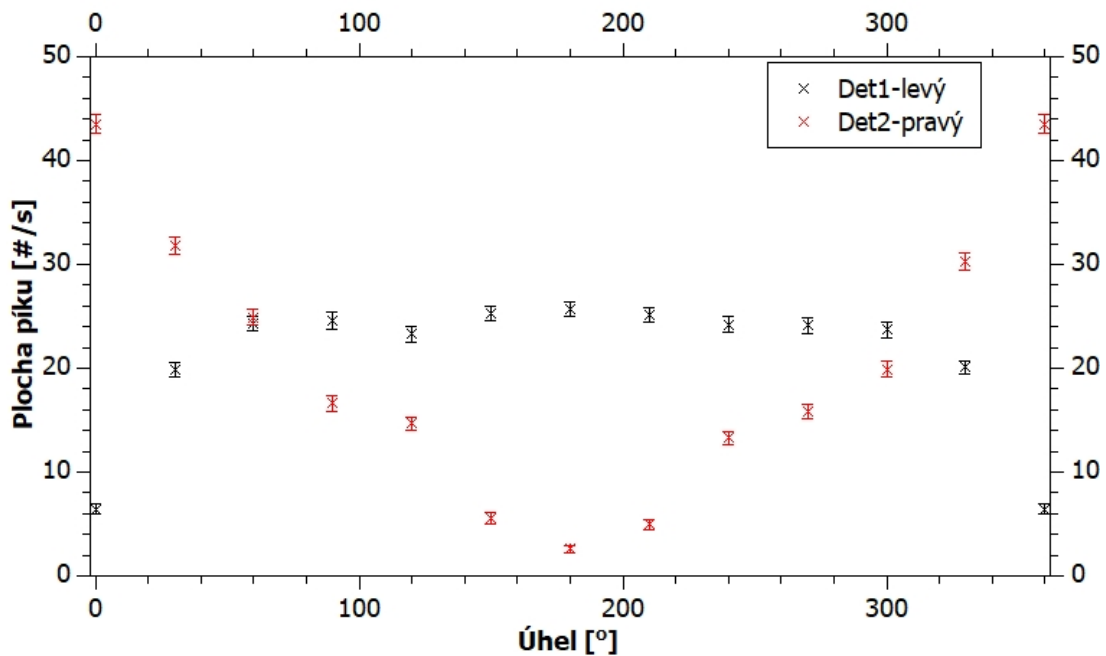
Obrázek 14: Zobrazení závislosti plochy píku (vztažené k jedné sekundě měření) a úhlu ozáření, vycentrována osa středu detektoru, ozáření ve výšce detektoru 3,5 cm



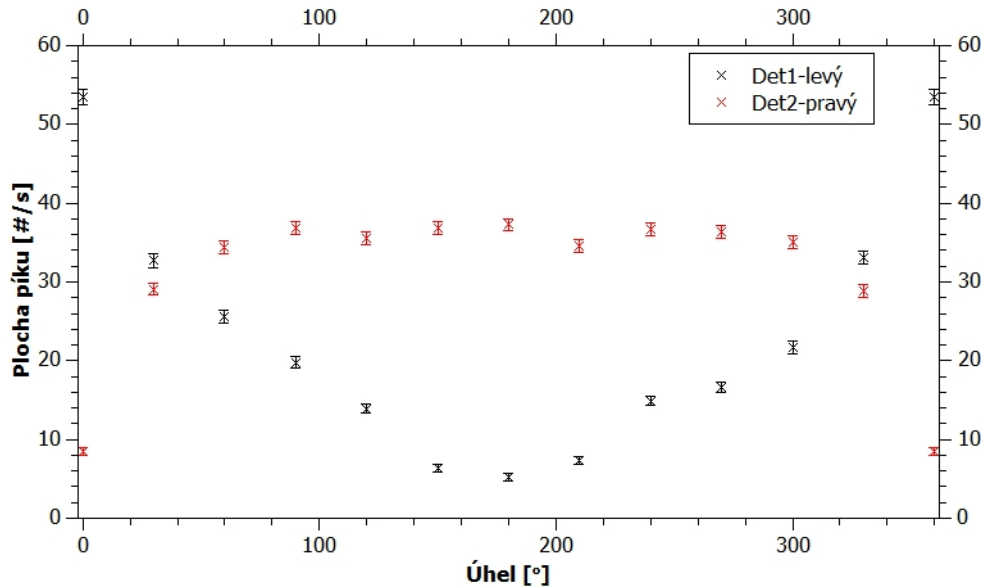
Obrázek 15: Zobrazení závislosti plochy píku (vztažené k jedné sekundě měření) a úhlu ozáření, vycentrována osa levého scintilátoru (nejvíce stíněn při úhlu 0°), ozáření ve výšce detektoru 1 cm



Obrázek 16: Zobrazení závislosti plochy píku (vztažené k jedné sekundě měření) a úhlu ozáření, vycentrována osa levého scintilátoru (nejvíce stíněn při úhlu 0°), ozáření ve výšce detektoru 3,5 cm



Obrázek 17: Zobrazení závislosti plochy píku (vztažené k jedné sekundě měření) a úhlu ozáření, vycentrována osa levého scintilátoru (nejvíce stíněn při úhlu 0°), ozáření ve výšce detektoru 5,5 cm



Obrázek 18: Zobrazení závislosti plochy píku (vztažené k jedné sekundě měření) a úhlu ozáření, vycentrována osa pravého scintilátoru (nejvíce stíněn při úhlu 0°), ozáření ve výšce detektoru 3,5 cm

obou scintilátorů byl od této osy stejně vzdálený. V průběhu odezvy jsou pozorovatelné symetrie detektoru. Dle geometrie jsem očekával, že v úhlech 0° (360°) a 180° budou maxima a zároveň minima ploch píků. Tomu tak opravdu je. Zároveň se ukázala i jistá symetrie a to při ozáření z úhlu 90° . V této pozici byl naměřen podobný počet impulzů jak v levém tak pravém scintilátoru. Stejný jev bych očekával i pro úhel 270° , ale dle mého experimentu tomu tak není. K tomuto jevu dle grafu došlo při měření pod úhlem 300° . Domnívám se, že důvodem je posunutá stabilizace spektra v průběhu měření viz. výše zmíněné problémy s energetickou stabilizací detektoru. Toto usuzuji dle nesouměrného reliéfu v oblasti 90° až 180° . Z naměřených dat jsem vypočetl, že k posunu došlo při měření pod úhlem 120° a pro zbylé měření zůstala posunutá stabilizace. Detektor si ji automaticky nastavuje podle přírodního pozadí a zřejmě v případě neobvyklého pole záření, v tomto případě produkovaného umělým zdrojem ^{137}Cs , může dojít k chybné stabilizaci energetického spektra. Výsledky jsem se rozhodl ponechat z důvodu ukázky této chyby, kterou tento detektor způsobil nejen v experimentech mé bakalářské práce.

Uvedené výsledky jednoznačně ukazují na směrovou závislost odezvy detektoru na úhlu ozáření vzhledem k podélným osám detekčního systému, resp. jednotlivých scintilačních detektorů. Této vlastnosti může být s výhodou využito pro lokalizaci zdroje záření - v případě vyhledávání zdroje, kdy je nezbytná rychlost provedení. Bylo by vhodné uvážit případnou možnost programového porovnání online přenášených dat z jednotlivých scintilátorů za účelem stanovení odhadu úhlu ozáření. Vhodné by bylo taktéž zvážit možnou instalaci vhodného stínícího materiálu mezi jednotlivé scintilační krystaly, čímž by došlo ke zvýraznění této směrové závislosti detektoru.



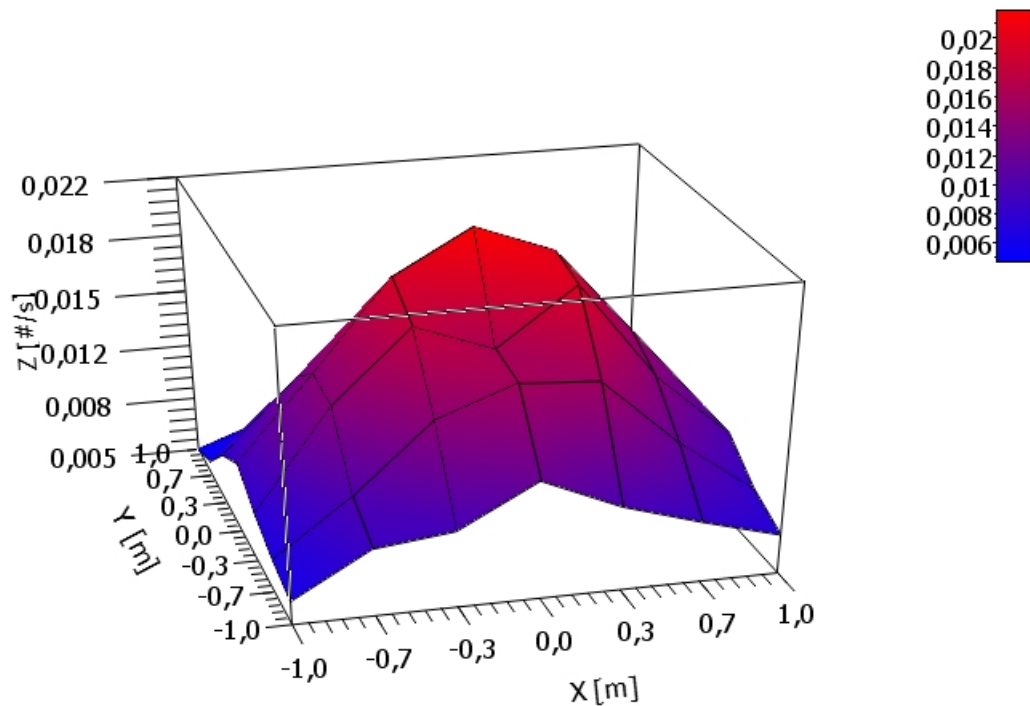
Obrázek 19: Zobrazení aparatury pro měření směrové závislosti a vyznačené sítě

3.7 Demonstrace využití prostorové závislosti pro lokalizaci zdroje

Prostorovou závislost odezvy detektoru jsem se rozhodl demonstrovat následujícím experimentem. Spektrometrický detektor jsem zavěsil ve výšce jednoho metru na železnou tyč, které byly připevněné ke vhodným chemickým stojanům s kovovou podstavou. Označil jsem na detektoru jeho střed, tedy střed celé detekční soustavy (ne střed mezi scintilátory), který jsem promítl na podlahu a označil jsem tento bod lepicí páskou. Dále jsem po podlaze vytvořil čtvercovou síť o rozměrech $2 \times 2 \text{ m}$ jejíž střed byl právě promítnutý bod středu detektoru. Počet vyznačených bodů v síti byl celkem 49. Pro lepší orientaci jsem body přiřadil do řad a sloupců. V jednom sloupci i řadě bylo 7 bodů. Veškeré body byly rozmístěné v ekvidistantních vzdálenostech od sebe. Názorná ukázka aparatury se sítí (bez jedné řady) je na obrázku č.19. Ke měření jsem využil 3 zdroje ^{137}Cs typu EG3 o celkové aktivitě 480 kBq . Tyto zdroje jsem posouval po síti, čímž jsem simuloval pohyb detektoru nad oblastí se zdrojem záření. Ve výsledku jsem provedl 49 měření. Jedno měření v každém bodě bylo dlouhé 4 min .

Pro orientaci zde uvádím, jak jsou osy situovány vzhledem ke geometrii detektoru. Osa x je paralelně se šířkou detektoru, osa y s jeho délkou a osa z s výškou. Na osách x, y jsou znázorněny rozměry sítě. Jako počátek os souřadného systému jsem určil středový bod sítě (projekce středu detektoru na podlahu). Z tohoto důvodu je na osách nanesena záporná hodnota vzdáleností. Konkrétně, dle obrázku č.19, osa x je kolmá na stěnu v zadní části obrázku a osa y paralelní s touto stěnou. Pokud bych zdroj posunul z počátku souřadného systému, dle fotografie na obrázku č.19 směrem do pravého dolního rohu na nejvzdálenější bod sítě, měl by tento bod hodnotu $[X;Y]=[1 \text{ m}; 1 \text{ m}]$, analogicky směrem do pravého horního rohu $[X;Y]=[-1 \text{ m}; 1 \text{ m}]$.

K vyhodnocení bylo zapotřebí z naměřených dat získat plochu píku od ^{137}Cs .



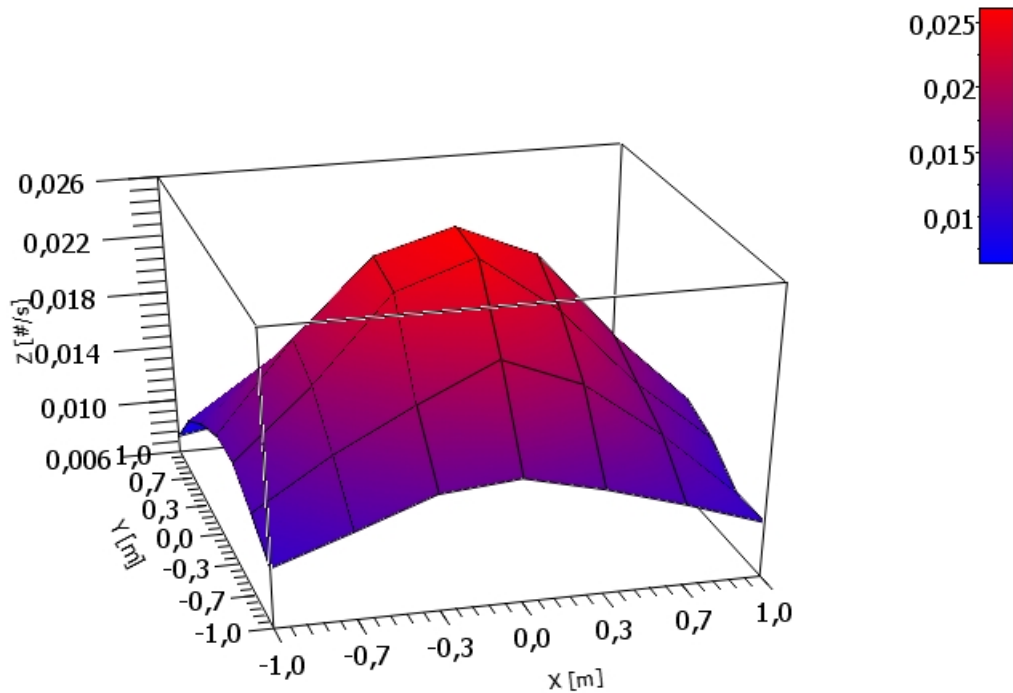
Obrázek 20: Zobrazení ploch píku (osa z) detektoru det1 v bodech sítě rozmístěných na ploše $2 \times 2 \text{ m}$ (osy x,y)

K tomu mi pomohl program Gamma Acquisition & Analysis [2]. Získané plochy jsem zpracoval v programu Excel. Jednalo se o přepočítání plochy od fotopíku zdroje na jednu sekundu měření a té pak přiřadit souřadnici sítě.

Výsledky jsem zobrazil pomocí programu QtiPlot. Výsledný graf ze scintilátoru det1 je zobrazen na obrázku č.20 a ze scintilátoru det2 na obrázku č.21. Z těchto dvou grafů je na první pohled vidět, že zobrazení plochy det1 je deformované. K tomuto problému se vyjádřím později. Nyní se zaměřím na vyhodnocení výsledků z různých pohledů grafu det2.

Nejprve popíši pohled na osu x. Tento pohled je zobrazen na obrázku č.22. Pro lépe čitelné rozdíly jsem graf zobrazil z opačné strany. Porovná-li krajní hodnoty na ose x v bodech -1 m a 1 m , mohu vidět rozdílné hodnoty na ose z. Rozdíl má hodnotu zhruba $0,002 \text{ #/s}$, což není příliš významný rozdíl. Tento rozdíl je způsoben pravděpodobně více faktory. Jedním z důvodů je geometrie měření. Z tohoto pohledu byl střed scintilátoru det2 umístěn od středové osy (paralelní s osou y procházející hodnotou 0 m na ose x) o cca. 6 cm blíže k bodům na pravé straně (záporným). Další jev, co napomohl tomuto rozdílu hodnot je stínění materiálem detektoru. Scintilátor det2 je umístěn z tohoto pohledu na pravé straně detektoru. Stínění je scintilátorem det1 a materiálem ve kterém jsou scintilátory uloženy. Dle očekávání je zde pozorována klesající tendence plochy píku ve směru vzdalujícím se od detektoru se zdrojem záření. Ta je způsobena dosahem částic ve vzduchu.

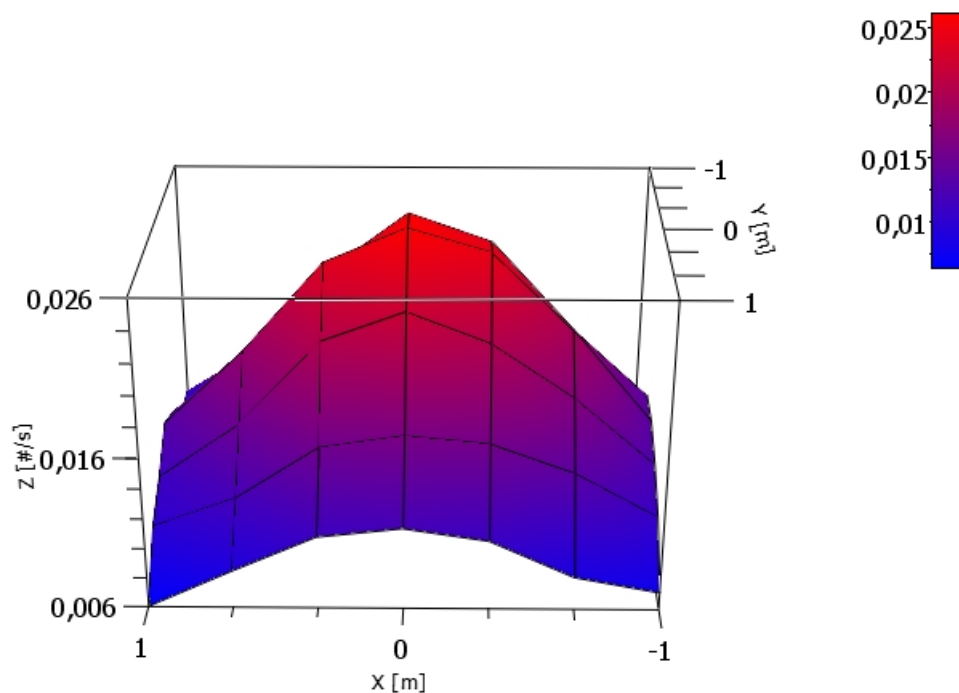
Dále okomentuji vývoj závislosti velikosti odezvy dle osy Y. Pohled na osu Y je



Obrázek 21: Zobrazení ploch píku (osa z) detektoru det2 v bodech sítě rozmístěných na ploše $2 \times 2 \text{ m}$ (osy x,y)

k nahlédnutí na obrázku č.23. Opět je vhodné se zaměřit na konečné body měření. Na obrázku je nejbližší osa y. Detektor byl situován jeho delší stranou podél této osy. Zde je vidět mnohem významnější rozdíl v plochách píku než při pohledu na osu x. Důvodem je opět stínění a poloha scintilátoru v detektoru. Z tohoto pohledu byl střed scintilátoru umístěn o cca 7 cm na levé straně. V tomto případě zde stínění det2 hrálo větší roli. Na pravé straně od detekčního objemu bylo mnohem více materiálu, který ovlivnil měření. Z grafu lze vyčíst, že se jedná o rozdíl zhruba $0,005 \text{ #/s}$. Nejvyšší hodnota plochy píku je v bodě $[X;Y]=[0 \text{ m}; 0 \text{ m}]$. Z tohoto pohledu je také zajímavé se zaměřit na neodpovídající si hodnoty osy z v bodech vzdálených $0,33 \text{ m}$ na pravou i levou stranu sítě z tohoto pohledu. Levý bod $[X;Y]=[0 \text{ m}; -0,33 \text{ m}]$ má téměř totožnou hodnotu s bodem $[X;Y]=[0 \text{ m}; 0 \text{ m}]$. Nejprve jsem hlavní důvod této hodnoty přiřazoval umístění krystalu, ale po důkladnějším zkoumání mého experimentu jsem si uvědomil, že v tomto bodě byl zdroj záření umístěn na podložce chemického stojanu o výšce $2,5 \text{ cm}$ narozdíl od všech ostatních bodů sítě. Zdroj byl tedy blíže k citlivému objemu detektoru. Dále sehrálo roli i stínění scintilátoru (více z pravé strany nežli z levé). Tyto jevy přispěly k zaznamenání více částic v bodě $[X;Y]=[0 \text{ m}; -0,33 \text{ m}]$ než v bodě $[X;Y]=[0 \text{ m}; 0,33 \text{ m}]$. Avšak zejména se na odchylce mohla významně podílet malá asymetrie v geometrii měření a stínění detektoru tyčkami použitých chemických stojanů.

Nyní se přesuneme k zobrazení rozdílů v plochách píků úplné absorpce odpovídající plochám det2 a det1. Tento rozdíl je zobrazen na obrázku č.24. Očekával jsem plochu, na které by se dalo vyzorovat vzájemné stínění scintilátorů, jenže se v

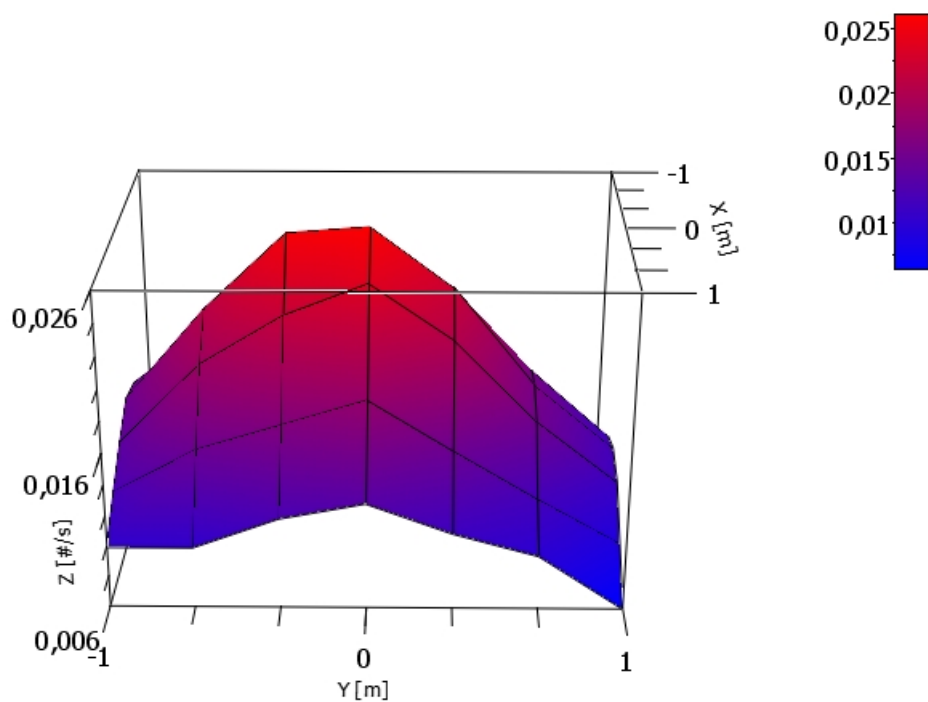


Obrázek 22: Zobrazení ploch píku (osa z) detektoru det2 z pohledu na osu x v bodech sítě rozmístěných po ploše $2 \times 2 \text{ m}$ (osy x,y)

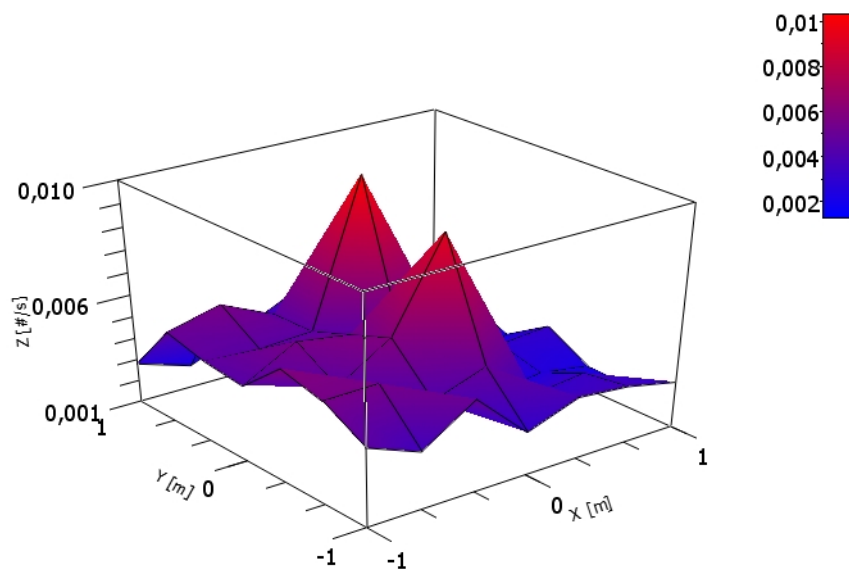
grafu objevily 2 značné píky. V grafu pro scintilátor det1 na obrázku č.20 je v známé ploše vidět propad. Podobné pozorovatelné snížení odezvy bylo i na opačné straně ve stejné vzdálenosti. Tyto dva propady v odezvě zapříčinily píky v rozdílu ploch det1 a det2 viz obrázek č.24. Nachází se v bodech $[X,Y]=[0 \text{ m}; -0,33 \text{ m}]$ a $[X,Y]=[0 \text{ m}; 0,33 \text{ m}]$. Tyto dva body se nacházely v ose paralelní s osou scintilátorů. Příčina těchto propadů odezvy byla diskutována výše.

Zkoumal jsem zda by na tento jev mělo vliv stínění. V takovém případě by bylo snížení odezvy pozorováno symetricky i u druhého scintilátoru. Tuto možnost jsem zavrhl, jelikož by se tyto značné poklesy plochy píků v těchto bodech objevily i v grafu na obrázku č.21 od scintilátoru det2. Bylo by vhodné měření provést znovu a zaměřit se právě na tuto problematiku. Možná příčina anomálií v odezvě detektoru byla diskutována výše, nicméně bylo by vhodné v rámci dalších experimentů tento problém ověřit a pokusit se přesněji identifikovat příčinu.

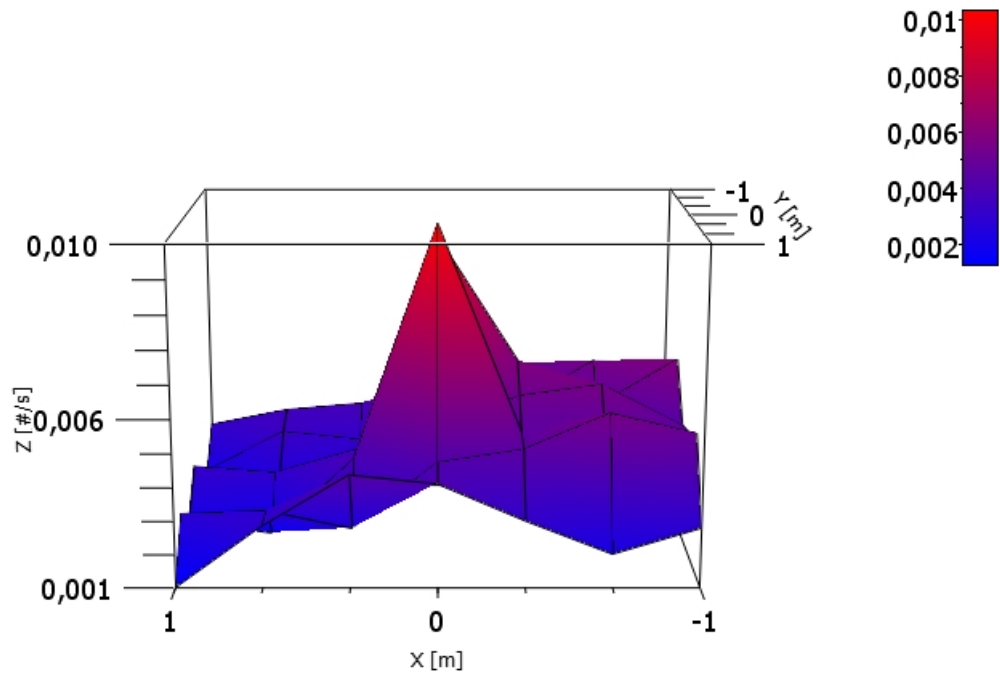
I přes artefakty vzniklé rozdílem scintilátorů det2 a det1 jsem se pokusil vypořádat jejich vzájemné stínění. Zkoumal jsem ho opět v grafu zobrazující rozdíly jejich ploch. Vybral jsem následující pohled, který je zobrazen na obrázku č.25. Z tohoto grafu je čitelné, jak se scintilátory navzájem stíní. Z tohoto pohledu byl scintilátor det2 umístěn na pravé straně detektoru a det1 na levé. Odečítal jsem plochu píku det1 od plochy det2. Z tohoto důvodu v levé části grafu jsou hodnoty odpovídající souřadnici Z nižší než v pravé části grafu. Ve výsledku mohu potvrdit, že se scintilátory navzájem stíní a případným přidáním vhodného stínícího materiálu mezi detekční krystaly by mohlo dojít ke zvýraznění tohoto rozdílu. Vhodným softwaro-



Obrázek 23: Zobrazení ploch píkú (osa z) detektoru det2 z pohledu na osu y v bodech síťe rozmístěných po ploše $2 \times 2 \text{ m}$ (osy x,y)



Obrázek 24: Zobrazení rozdílu ploch píkú det2 a det1 (osa z) v bodech síťe rozmístěných po ploše $2 \times 2 \text{ m}$ (osy x,y)



Obrázek 25: Zobrazení rozdílu ploch píků det2 a det1 (osa z) v bodech sítě rozmístěných po ploše $2 \times 2 \text{ m}$ (osy x,y)

vým zpracováním dat by pak mohla být získána přibližná informace o úhlu ozáření detekčního systému. Vzniklé píky v tomto grafu jsem objasnil v odstavcích výše.

Závěr

Významný rozvoj technologie dálkové ovládaných a automatických dopravních prostředků včetně jejich masivního rozšíření vedou k jejich prosazování v různých oborech, to se týká i bezpilotních leteckých prostředků. Z povahy jejich vlastností nacházejí uplatnění zejména v místech která jsou pro člověka nepřístupná, nebo nebezpečná. To je i případ radiačního monitoringu, který je nedílnou součástí při zajištění bezpečnosti obyvatel před ionizujícím zářením. V kombinaci s vhodným detekčním systémem, nejlépe vyvinutým pro tento typ měření, může letecké měření s využitím BLP plně nahradit klasické letecké měření a stává se tak i dostupnější pro širší škálu aplikací. Fyzická nepřítomnost osob na palubě pak systém předurčuje i k použití ve velmi zamořených oblastech, např. po jaderné havárii, či v případě teroristického útoku tzv. špinavou bombou. Jedna z nejzásadnějších výhod BLP je absence operátora v místě měření. Tím je eliminováno či výrazně sníženo jeho ohrožení ionizujícím zářením. BLP ve spojení s vhodným detekčním systémem je možné využít i k lokalizaci radioaktivních anomálií či kontaminovaného území a zobrazení poměrně přesných map s vyznačením oblastí se zvýšenou koncentrací radionuklidů. Detekční systém využívající BLP je schopen zmapovat oblasti rychleji oproti běžné letecké spektrometrii a také se díky narůstajícímu rozšíření BLP stává značně dostupnější metodou. Z povahy vlastností běžných BLP plyne vhodnost využití toho způsobu měření zejména pro lokální průzkumy menších oblastí. Monitoring rozsáhlých oblastí zůstává doménou leteckého měření s helikoptéry a letadly. I přes menší změřenou plochu a menší objemy detekčních systémů je schopen poskytnout kvalitní výsledky zejména s ohledem na rychlou dostupnost. Toho je dosaženo nízkou letovou rychlostí a výškou měření. BLP běžně léta ve výškách od 1 m výše minimální letovou rychlostí 1 m/s. Také poskytuje možnost vznášení se nad zájmovým místem. Tím je prodloužen čas měření v jedné pozici, který vede ke zlepšení interpretace výsledků. BLP tímto stylem může poskytnout přesnější data než klasická letecká spektrometrie, avšak nezmapuje rozsáhlé plochy kvůli poměrně krátké letové době, která je značně limitována kapacitou baterií a hmotností nesených senzorů. K detekci částic se v letecké spektrometrii využívá scintilačních detektorů. Je možné využít i polovodičové detektory, ale vzhledem k jejich malým detekčním objemům a komplikovanějším nárokům na provoz, se využívají o poznání méně. V klasické letecké spektrometrii se využívá velkoobjemových anorganických scintilátorů ke zvýšení detekční efektivity. Při využití BLP je třeba zvolit menších detekčních jednotek z důvodu omezené nosnosti, menší objemy detektorů jsou, jak již bylo zmíněno, kompenzovány nižší výškou letu a nižší rychlostí. Pro tyto účely je vytvořen například detektor Georadis D230A, který jsem využil v praktické části této práce. Ten obsahuje dva anorganické scintilátory NaI:Tl, každý o objemu 104cm^3 . Na základě získaných informací z rešeršní části mohu využití BLP při radiačním monitoringu doporučit, zejména s ohledem na rychlou lokalizaci a stanovení odhadu kvantifikace radioaktivní kontaminace. Pro kvalitní a přesné lokalizace radioaktivních oblastí je vhodné využít kombinace BLP s prostředky pro klasickou leteckou spektrometrii a zejména pozemní měření. Ve vhodné kombinaci společně tvoří velice účinný systém měření pro lokalizaci a určení zdroje ionizujícího záření.

V praktické části této bakalářské práce jsem se zaměřil na testování scintilační

detekční jednotky Georadis D230A určené pro letecké měření s využitím BLP. Na základě laboratorně provedených experimentálních měření jsem stanovil její základní parametry jako je energetická kalibrace a energetickou rozlišovací schopnost. Pro tyto experimenty jsem navrhl vhodnou geometrii jejich uspořádání s využitím speciální měřicí sestavy dostupné na KDAIZ. Tato experimentální geometrie je díky uspořádání snadno reprodukovatelná a lze měření snadno zopakovat se stejnými parametry.

Dále jsem se zabýval prostorovou a směrovou závislostí odezvy. Nejprve jsem se zaměřil na proměření směrové závislosti odezvy kolem podélné osy detekčního systému i jednotlivých scintilátorů s využitím úzkého kolimovaného svazku. Z výsledků měření je patrná jasná směrová závislost odezvy na úhlu ozáření detektoru. V určitých úhlech je scintilační krystal více stíněn druhou detekční jednotkou, či částmi detekčního systému. Porovnáním odezvy z jednotlivých scintilátorů by na základě poměru odezev mohlo být usuzováno na směr ozáření detektoru a tedy i na lokalizaci zdroje. Tento odhad by mohl být při praktickém měření zpřesněn i sledováním změny poměru odezev při změně orientace BLP s detekčním systémem. Pro praktické využití směrové závislosti detektoru k lokalizaci zdroje by bylo vhodné uvážit přidání stínění z vhodného materiálu mezi jednotlivé scintilátory, které by mohlo vést ke zvýraznění rozdílu mezi odezvami z jednotlivých scintilátorů při určitých úhlech ozáření. Tuto možnost by bylo vhodné zvážit při navrhování dalších experimentů v rámci budoucí práce. Závěrem práce jsem se pokusil demonstrovat prostorovou závislost odezvy detektoru s využitím měření ve výšce 1 *m* nad sítí měřících bodů s kalibračním zdrojem IZ.

V rámci měření byly identifikovány i některé problémy s detekčním systémem, zejména problémy s energetickou stabilizací spektra, které jsou v době sepsání této práce řešeny s výrobcem detektoru. V rámci budoucích měření by bylo vhodné vybrat měření zopakovat a ověřit vyřešení problému.

Použitá literatura

- [1] Gaussian function. <https://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html>. Accessed: 31.7.2020.
- [2] Genie, 2000 gamma analysis software. <https://www.mirion.com/products/genie-2000-gamma-analysis-software>. Accessed: 31.7.2020.
- [3] Georadis system for detection radiation d230a. <http://www.georadis.com/en/products/d230a.html>. Accessed: 15.8.2020.
- [4] Johnová, kamila, odborný asistent experimentu. Ústní sdělení. 25.6.2020.
- [5] The lund/lbnl nuclear data search. <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>. Accessed: 31.7.2020.
- [6] O radiacním monitorování. https://www.sujb.cz/aplikace/monras/?lng=cs_CZ#tld. Accessed: 27.5.2020.
- [7] Quantum-systems products tron f9. <https://www.mining-technology.com/products/tron-f9/#quantum-systems>. Accessed: 15.8.2020.
- [8] Státní úřad pro jadernou bezpečnost. <https://www.sujb.cz/uvod/>. Accessed: 4.8.2020.
- [9] Sebastian Briechele, Andriy Sizov, O Tretyak, V Antropov, Norbert Molitor, and Peter Krzystek. Uav-based detection of unknown radioactive biomass deposits in chernobyl's exclusion zone. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 05 2018.
- [10] R Casanovas, JJ Morant, and M Salvadó. Energy and resolution calibration of nai (tl) and labr3 (ce) scintillators and validation of an egs5 monte carlo user code for efficiency calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 675:78–83, 2012.
- [11] J Gerndt and P Pruša. Detektory ionizujícího záření. *Vydavatelství CVUT, Prague*, 2011.
- [12] Tomas Lazna, Petr Gabrlik, Tomas Jilek, and Ludek Zalud. Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(1):1729881417750787, 2018.
- [13] "J.W. MacFarlane, O.D. Payton, A.C. Keatley, G.P.T. Scott, H. Pullin, R.A. Crane, M. Smilion, I. Popescu, V. Curlea, and T.B. Scott". Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies. *Journal of Environmental Radioactivity*, 136:127 – 130, 2014.
- [14] Nadja Reinhardt and Ludger Herrmann. Gamma-ray spectrometry as versatile tool in soil science: A critical review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(1):9–27, 2019.

- [15] Ondřej Šálek, Milan Matolín, and Lubomír Gryc. Mapping of radiation anomalies using uav mini-airborne gamma-ray spectrometry. *Journal of environmental radioactivity*, 182:101–107, 2018.
- [16] K Sekar, M Ramesh, Naveen R, Prasath M S, and D Vigneshmoorthy. Aerodynamic design and structural optimization of a wing for an unmanned aerial vehicle (uav). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 764:012058, 03 2020.
- [17] Xiao-Bin Tang, Jia Meng, Peng Wang, Ye Cao, Xi Huang, Liang-Sheng Wen, and Da Chen. Efficiency calibration and minimum detectable activity concentration of a real-time uav airborne sensor system with two gamma spectrometers. *Applied Radiation and Isotopes*, 110:100 – 108, 2016.
- [18] Vojtěch ULLMANN. Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. *Ullmann V.: "AstroNuklFyzika"-jaderná fyzika, astrofyzika, kosmologie, filosofie [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>.*
- [19] YL Zabulonov, VM Burtnyak, and LA Odukalets. System for effective remote control and monitoring of radiation situation based on unmanned aerial vehicle. *Sci. Innov*, 13(4):40–45, 2017.