



АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

на

Иван Илиев

Тема: „Аерокосмически дистанционни методи за
изследване на радиационната обстановка“

Направление: 4.1. Физически науки (Радиофизика и физическа електроника) в катедра
„Радиофизика и електроника“ на ФзФ

Научен ръководител:

доц. д-р Пламен Данков

София 2019

Актуалност на темата

Познаването на радиационната обстановка винаги е било съществен проблем, особено след няколко сериозни инцидента с атомни електроцентрали в Уиндскейл, Великобритания (1957 г.), Три Майл Айлънд, САЩ (1979 г.), Чернобил, СССР (1986 г.) и Фукушима, Япония (2011 г.), както и след падането на руски спътник в Канада (1978 г.), носещ на борда си ядрено гориво.

Дистанционните методи позволяват да се охарактеризира радиационната обстановка от разстояние, предпазвайки работния екип. Развиването на тези методи търпи най-голям ръст, веднага след възникването на някой по-сериозен инцидент, но и след въвеждането на нови технически средства, които могат да са новооткрити или просто да са станали по-лесно достъпни. [1..8][14, 15][30, 31]

Насочихме се към тази тема, след като стана ясно, че в България, дълги години, не са прилагани такива методи, а предишните изследвания, са били с големи мащаби и тежка апаратура. Първото е било през 1990 г. (4 години след Чернобил), а последното през 1999 г. (преди 20 години). Крайният резултат от дистанционното гама-спектрометрично изследване, се състои в изграждането на карта на мощността на дозата, близо до земната повърхност, както и отделни карти на разпределението на естествени и техногенни радионуклиди.

След като имахме възможността да придобием практически опит в първото от много години такова изследване, забелязахме някои недостатъци, върху които се базира проблематиката на дисертационния ми труд. Това са моделирането, калибрирането, интерпретацията на резултатите, оптимизиране на неопределеността и т.н. [36][40, 41][44]

За изграждането на картите, сме използвали хеликоптери, които летят на 60 до 100 м височина, над площта от земната повърхност, с предполагаемо замърсяване. Това поставя първия основен проблем - ниската пространствена разделителна способност, поради факта, че детекторите нямат насоченост и можем да твърдим, че събират информация от площ пропорционална на квадрата на разстоянието до нея (за равна повърхност ъгъла на видимост се счита за 90°). Друг недостатък, на тези височини е това, че за да се улавя лъчението, идващо от земната повърхност, са нужни големи и тежки детектори. Освен това, съществува опасност за екипажа, както от радиационно облъчване, така и от чисто авиационен характер. Поради тези причини, в настоящата дисертация, преминаваме една стъпка напред, като използваме безпилотни летателни системи (БЛС), за прилагане на дистанционните методи на измерване. Във връзка с тяхното използване за радиационни измервания, за пръв път, в България, е направена публикация през 2014 [117]. В световен мащаб, темата също бурно се развива през последните 5-6 години [122..134], което показва, че успяваме да се движим, заедно с най-актуалните постижения в областта.

Използването на малки БЛС позволява летене на малки височини, но изисква олекотена детекторна система. За да се проведат реални експерименти, трябваше да разработим собствена такава детекторна система с два различни детектора от CsI(Tl). От друга страна, е необходим по-различен подход при създаване на летателен план, за който е нужно да се адаптират методите на Международната атомна агенция (МААЕ), препоръчани за обследвания на големи площи. Като резултат, се получават карти с по-добра разделителна способност и в същото време се постига по-добра минимална детектируема активност, без да се излага на риск екипажа[38][179][187, 188].

Като допълнително приложение на дистанционните методи за изследване на радиационната обстановка, сме предложили изследването на близкия и далечния космос от борда на рояци от малки спътници [186], предназначени за разпространение на високоскоростен сателитен интернет от ново поколение (5G) [160][162..170]. Направена е оценка на генерирания поток от конкретния вид данни и бюджет на връзката със Земята. Използването на малки спътници CubeSat през последните години, също става все по-популярно, включително за радиационни изследвания [151..157][161][173], но ангажирането на цели рояци от малки спътници за тази цел, като тяхна второстепенна задача, не е прилагано до момента.

Цел и задачи на дисертацията

Общата цел на дисертацията е да докаже, че с миниатюризацията на електрониката и усъвършенстване на методите за калибриране и анализ на получените данни, могат да се увеличат възможностите за аерокосмическо гама-спектрометрично картографиране, като освен пилотируеми летателни средства, се използват безпилотни такива и рояци от малки спътници.

Конкретните задачи на дисертацията са:

1. Прилагане на съществуващите методи за въздушно изследване на радиационната обстановка, препоръчани от МААЕ, след модифициране на методите на калибриране към специфичните условия на обследването (размери и релеф на терена, летателно средство, височина, летателен план и др.), с цел получаване на карти на радиоактивността от различни радионуклиди за три различни по площ територии;
2. Адаптиране на методите за пилотируеми аеро- гама-спектрометрични обследвания към условията предоставени от малки безпилотни летателни системи (БЛС);
3. Разработване на олекотена и опростена модулна детекторна система, с два различни детектора от CsI(Tl), подходяща за радиационни обследвания с помощта на БЛС;
4. Провеждане на различни експерименти по гама- спектрометрично картографиране с помощта на БЛС, адаптираните за целта методи и разработената за БЛС детекторна система;
5. Анализ на предимствата и ограниченията на използваните за радиационни изследвания БЛС, с цел предлагане на конкретни подобрения, необходими за разширяване на обхвата им на приложение в по-специализирани мисии (на места без пряка видимост от оператора, в райони със засилен въздушен трафик, в конфликтни зони или в затворени пространства);
6. Оценка на възможностите за прилагане на дистанционните методи за изследване на радиационната обстановка в космоса, с помощта на рояци от малки спътници на ниски орбити.

Съдържание на дисертацията

Дисертацията се състои от общо осем глави.

Първите две глави обобщават основни познания за йонизиращите лъчения, начина на измерване и измерваните величини, спектрометрията и калибрирането в контекста на дистанционните спектрометрични методи за измерване.

В първа глава е направен и експеримент, свързан с измервания на йонизиращи лъчения, с цел оценка на ефекта от потъване на радиоактивен източник в почвата.

В трета глава са описани експериментите по пилотируемо въздушно гама-спектрометрично картографиране и са анализирани и модифицирани методите за калибриране на МААЕ.

В четвърта глава са описани безпилотните летателни системи, като средство за дистанционни мисии, с фокус върху радиационните изследвания.

В пета и шеста глава са разгледани два от проведените експерименти по радиационно картографиране с БЛС (със и без спектрометрия). Сравнени са различни детектори, подходящи за целта, като с два от избраните е разработена олекотена модулна детекторна система, подходяща за изпълнение на експериментите. Подробно са описани адаптираните за БЛС методи на измерване, включващи: калибриране, летателни планове, височина, обработка на резултатите, изграждане на карти на отделни радионуклиди, определяне на активността и неопределеността.

В седма глава са предложени модификации на БЛС, необходими при изпълнение на мисии в зони със засилен въздушен трафик – увеличаване на видимостта за радарните системи, както и за изпълнение на секретни мисии – изследвани са материалите, подходящи за намаляване на ефективната радарна отразяваща повърхност.

В осма глава са предложени технически средства за справяне с ограниченията при използване на БЛС (навигация, комуникация и др.). Много сериозно внимание е обърнато на една иновативна идея. Това е използването на рояци от малки спътници в близкия космос за радиационни изследвания на гама-фотони от близкия и далечния космос. Оценено е количеството информация, което се натрупва при измерванията и е направен бюджет на сателитната комуникационна връзка със Земята.

Кратко изложение на дисертацията*

**Номенклатурата на главите, изображенията, математическите изрази и цитираната литература съответства на тази от текста на Дисертацията, с цел по-лесно осъществяване на връзка между двете работи, в случай на необходимост.*

ГЛАВА ПЪРВА. Йонизиращи лъчения (ЙЛ). Общ преглед. Измерване

За обследване на радиационната обстановка, е необходимо да се наблюдават различни видове йонизиращи лъчения, както и лъчения с различна енергия от дадения вид. В първата глава, е направен общ преглед на йонизиращите лъчения, които представляват интерес за целите на радиационната защита – предпазване на човека и заобикалящата го среда. За оценка на различните видове йонизиращи лъчения, се използват различни подходи, в зависимост от природата на лъчението, за това преди да пристъпим към създаването на методи за измерване, трябва да се запознаем с някои основни характеристики на йонизиращите лъчения, най-често срещани в околната среда и на такива възникващи от човешката дейност. Една от най-значимите характеристики за дистанционното измерване, е пробегът на дадения вид лъчение във въздуха и дебелината на слоя на полуотслабване от различни материали. В много от случаите на въздушно - радиационно обследване, е нужно да оценим източник, който е покрит с някакъв предмет или просто, с времето, е потънал в почвата. За да извършим такава оценка, възможно най-точно, най-добрият начин, е да се пресъздадат, най-често срещаните сценарии и експериментално да се определи техният ефект върху резултатите. За целта, е направен експеримент за определяне на разсейването на лъчението от източник, потънал под тревна растителност, определен слой почва или слой пясък.

Експеримент по измерване на отслабването на гама- лъчите при покрити източници

За тесен колимиран сноп гама- лъчи може да се пресметне поглъщането от известен материал с определена дебелина. Този метод широко се използва в индустрията за технологичен контрол на плътността. Когато точков източник, например гореща частица, потъне в растителността до достигане на почвата, или потъне навътре в почвата, съществен принос би имало обратното разсейване. За да се оцени по-точно този ефект, е изпълнен експеримент в полеви условия, пресъздаващ някои възможни и най-често срещани ситуации:

- задържане на гореща частица (ИЙЛ) върху тревна растителност, на височина 10 cm;
- проникване на източника под тревистата растителност до достигане на повърхността на почвата;
- потъване на източника на дълбочина 10 cm в почвата;
- потъване на източника на дълбочина 10 cm в пясък;
- потъване на източника на дълбочина 10 cm в чакъл.

След измерване на фона, за всеки сценарий, са направени измервания на два различни източника $^{137}\text{Cs}(662 \text{ keV})$ и $^{57}\text{Co}(122 \text{ keV})$ с детектор на две различни височини 1 m и 2 m над повърхността на почвата. За измерванията е използван преносим радиометър, който има същия детектор, като този в разработената за БЛС спектрометрична детекторна система, описана по-подробно в глава шеста (№ 5 от табл. 6.2.1.1).



Фиг. 1.4.1. Поставяне на източника под слой трева (горе, в ляво) и под 10 cm почва (дясно). Измерване с преносим радиометър на височина 2 m (долу, в ляво).

Общата скорост на броене при поставяне на източника на повърхността на тревна растителност, се приема за норма (100%), а останалите резултати от измерванията, са представени в проценти, спрямо нея (табл. 1.4.1). Статистическата неопределеност на всяко измерване е сведена до под 1%, с удължаване на времето на измерване, до постигане на минимум 10^5 импулса. Комбинираната разширена неопределеност на резултатите в таблицата е 4 % (за $k = 2$).

Табл. 1.4.1. Отношенията между скоростта на броене от точков източник върху ниска тревна растителност и скоростта на броене от същия източник под 10 cm слой от различни материали

Височина	Над трева [%]		Под трева [%]		Под почва [%]		Под пясък [%]		Под чакъл [%]	
	1 m	2 m	1 m	2 m	1 m	2 m	1 m	2 m	1 m	2 m
^{137}Cs	100	100	109	106	49	72	73	100	69	97
^{57}Co	100	100	75	17	фон	фон	50	83	38	83

Стойностите дадени в червено показват завишаване на скоростта на броене. Това завишаване е следствие обратното разсейване на гама-квантите в почвата. Когато източникът е поставен върху тревата, има известно разстояние между него и почвата, което намалява ефекта от обратното разсейване. Когато източникът е под тревата, непосредствено върху почвата, ефектът от обратно разсейване, е по-забележим, от колкото ефекта от поглъщането и разсейването на гама-лъчението при преминаването му през тревата. Това тълкование на резултатите, се потвърждава от допълнителните измервания, направени с по-ниско енергиен източник ^{57}Co (122 keV). При по-ниска енергия ефектът от поглъщането и разсейването в тревата, е по-голям от обратното разсейване в почвата. Увеличаване на скоростта на броене, се забелязва и при покриването на източника със слой пясък (резултатите, представени в оранжев цвят). Тогава източникът е обвит от всички страни от относително плътен материал, което отново

увеличава ефекта от разсейването на гама-квантите и го прави съизмерим с поглъщането и разсейването от покриващия слой пясък.

Резултатите от настоящия експеримент, биха могли да се използват при оценка на активност на точков източник, при положение, че е известна позицията му, спрямо повърхностния слой на почвата. Това от своя страна, най-често зависи от възрастта на замърсяването. Тя би могла да се определи, ако е известно, кога е станал инцидентът, предизвикал замърсяването.

ГЛАВА ВТОРА. Калибриране на гама-спектрометрична система

Всяка детекторна система има поведение, характерно за нейният дизайн – форма, размери и материал на изработка, но освен това всеки индивидуален детектор от поредицата, следващи един и същ дизайн, има своите особености. Това налага охарактеризиране на всеки детектор по отделно, с цел определяне на неговата ефективност и то в зависимост от енергията на лъчението, до колкото използваната система е спектрометрична. Този процес, наречен калибриране, се изпълнява в два етапа. Първият етап, е определяне на зависимостта на индикациите на системата от измерваните величини на еталонен ИЙЛ, а втория етап е използването на получената зависимост за определяне на същите величини на неизвестно замърсяване, на база на индикациите на системата. Голяма част от калибрирането на системата за въздушно гама-спектрометрично картографиране, се извършва на земята, с изключение на определянето на отделните компоненти на фона. Този процес, е обвързан с конкретното място на измерване и се изпълнява в максимална близост до него и непосредствено преди момента на полета. Основният процес на наземно калибриране използван общо при гама-спектрометрията, е описан в настоящата глава, а повече конкретика и примери, относно определянето на компонентите на фона, при въздушните дистанционни методи за измерване на радиационната обстановка, са дадени в експерименталната част на трета глава.

Измервания от земята за верификация на резултатите от въздушно обследване

По време на въздушното обследване (или непосредствено преди/след) се вземат проби или се провеждат измервания на място (in-situ). В случаите на описаните в следващите глави гама-спектрометрични обследвания, сме използвали ръчно преносим спектрометър дозиметър със сцинтилационен детектор от CsI(Tl) и подвижен полупроводников спектрометър с термопомпено охлаждане (фиг. 2.4.1).



Фиг. 2.4.1. Подвижна полупроводникова система за измервания на проби и измерване на място (*in-situ*), използвана за сравнителни измервания със системите за въздушно обследване

И двата уреда се калибрират редовно, като за да бъде извършена компетентно калибровката, сме преминали специализирани обучения от представителствата на производителите във Франция и Англия. Това предполага легитимни резултати и позволява използването им за сравнителни измервания с детекторните системи, използвани от въздуха. Тези измервания имат за цел да потвърдят правилната калибровка и резултатите на заводската спектрометрична система използвана с пилотируеми летателни средства. За другите две, разработени от нашия екип, детекторни системи за БЛС, сравнителните измервания служат и за потвърждаване на работоспособността.

ГЛАВА ТРЕТА. Спектрометрично гама- картографиране от въздуха с пилотируеми летателни средства

По време на работата ми във фирма Тита-Консулт ООД и органа за радиационен контрол към фирмата, за повече от 9 години, съм участвал в множество радиационни изследвания, включително и в партньорство със Софийски университет „Св. Климент Охридски“, Технически университет – София, БАН, НЦРРЗ, ДП-РАО, ИАОС и др. Изследванията са били, основно с ръчно преносими уреди и в лабораторни условия, с електретни, газонапълнени и газопроточни детектори, детектори от органични сцинтилатори и сцинтилатори от NaI, CsI, ZnS, ^6Li , пространствено чувствителен CdZnTe за стационарно картографиране, стационарни и *in-situ* HP Ge полупроводникови детектори и др. Две, от най-големите, по мащаб обследвания, бяха изпълнени от въздуха със сцинтилационни детектори от NaI(Tl) с обем $4 \times 4 \text{ l}$. Първото през 2013 г. с хеликоптер Enstrom 480 над територия с площ 12 km^2 , а второто през 2018 г. с хеликоптер Schweizer 333 (269D) над две други територии с площ $3,2$ и $1,2 \text{ km}^2$. Новото въздухоплавателно средство наложи и ново калибриране на системата. Относно работата по тях са изнесени множество доклади на национални и международни конференции (I. Iliev et. al, Nish, 2016) [36], (И. Илиев, София, 2016) [38], (I. Iliev et. al, Viena, 2017) [40], направена е една магистърска дипломна работа (И. Пастухов, София, 2014) [41] и научна публикация (I. Iliev, 2019) [42]. Големият обем от необходимите познания за изпълнението на такъв тип задачи, както и възможността натрупаният опит да се използва за разработване на методи за въздушно гама-картографиране с помощта на БЛС провокира идеята и за настоящия дисертационен труд.

За да имат резултатите от гама-спектрометричните обследвания представителен вид, сравним с международните стандарти, по време на работа, са следвани препоръките на МААЕ. Доста от тях са събрани в TECDOC № 1092 [6], № 1363 [7] и Технически доклад № 323 [8]. Доклад № 53 [1] на Международната комисия за радиологични единици и измервания (ICRU), също е взет под внимание.

Използваната апаратура, също е специално проектирана за въздушни гама-спектрометрични обследвания, в съответствие с предписанията на МААЕ. Съдържа 4 детектора от NaI(Tl), всеки с обем от 4 l и собствен многоканален анализатор с 1024 канала и автоматична енергийна стабилизация по спектъра на ^{40}K . Разделителната способност, е по-добра от 8%, а чувствителността е 144 cps/(nSv/h) за ^{137}Cs и 96 cps/(nSv/h) за ^{60}Co . Всяка двойка детектори, се намира в защитен куфар, а в допълнителен такъв се намира батерийното захранване на системата и комуникационните устройства. Информацията се прехвърля на лаптоп чрез TCP/IP, което дава гъвкавост. Лаптопът е Getac V200, пригоден за работа в тежки условия и снабден с два GPS модула (вграден и външен).



Фиг. 3.2.1. Използваната апаратура за въздушно - гама спектрометрично картографиране SPIR-IDENT MOBILE, произведена за такива цели от Mirion Technologies

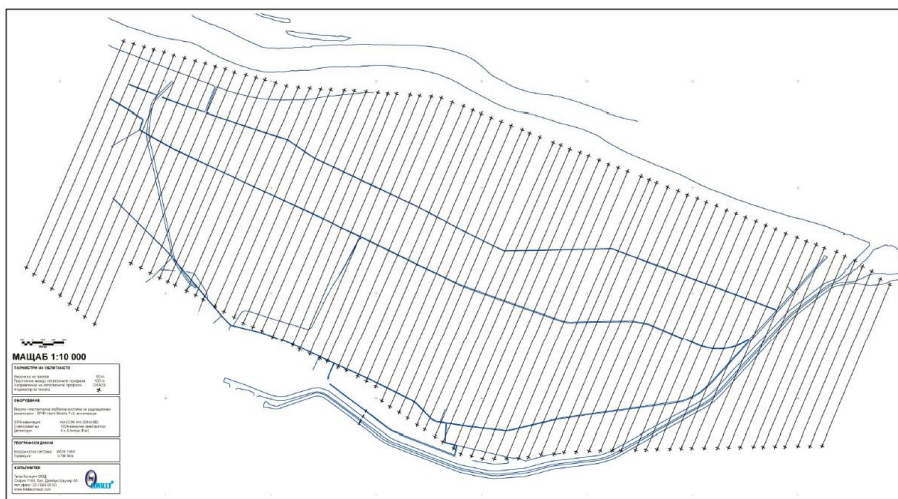
Системата може да работи напълно автономно със собствено батерийно захранване и без връзка с никоя от системите на въздухоплавателното средство. Въпреки това, на борда се качва оператор, за да следи за изправността и правилната работа на апаратурата и при необходимост да нанесе корекции в реално време.

Изборът на въздухоплавателно средство е повлиян от това, че и в двата случая облитаните територии, са сравнително малки по площ и, в близост до тях, няма самолетна писта. Двете, най-големи, предимства на хеликоптерите, остават възможността да поддържат ниска скорост на полета – около 60-80 km/h и малка височина – 60 m.



Фиг. 3.2.2. Хеликоптер Enstrom 480 (ляво) и хеликоптер Schweizer 333 (269D) (дясно) използвани в двете гама спектрометрични обследвания съответно през 2013 и 2018 г.

Направлението на профилите на облитане е избрано така, че да бъде успоредно на по-късата страна на изследваната площ (фиг. 3.2.3). Колкото по-къси са профилите, толкова по-лесно и точно могат да бъдат спазени, тъй като за пилота, контролни точки са само техните краищата.



Фиг. 3.2.3. Летателен план на проучването през 2013, при който профилите са избрани да бъдат по късата страна на терена

Височината на полета е избрана отново според очакваното замърсяване. За равномерно разпределено такова е известно, че мощността на дозата намалява с увеличаване на разстоянието по експоненциален закон, приблизително за всеки 100 m, добавени към височината, откликът в детектора намалява на половина. За точкови източници, тази зависимост се умножава по обратния квадрат на разстоянието. Височината на полета, се определя според МДА, което е необходимо да се постигне. Това става, след като се построи кривата на отслабване на гама-лъчите във височина, спрямо отправна точка, представляваща МДА изчислено на земята, при точно определено разстояние. В нашите обследвания, основната използвана височина е 60 m, която освен с МДА, е съобразена и с изискванията за минимална височина на полета над някои обекти, разположени в облитаната територия, като електрически далекопроводи, напоителни съоръжения и др.

Скоростта на полета е избрана, спрямо времето за интегриране на системата и височината на полета. На практика, е използвано едно просто правило: 60-70% от импулсите идват от овал, с ширина равна на удвоената височина на полета и дължина, равна на удвоената височина плюс пътя, изминат за времето на интегриране. Например, при височина на полета 60 m, скорост на движение 17 m/s и времето за интегриране 1 s, площта, върху която се извършва едно измерване, е овал с ширина 120 m и дължина $120 + 17 = 137$ m. Колкото по-ниска е скоростта, толкова по-симетричен ще е овалът на видимата площ и съответно по-точно ще се интерпретират данните върху картата. Ограничения възникват от минималната скорост на стабилен полет на летателното средство и от съображения за съкращаване на времето и разходите за проучването.

Разстоянието между профилите на облитане е избрано така, че да бъде равно на удвоената височина на полета (фиг. 6.3.2). Определя се така, че видимата зона от детекторите да бъде максимално симетрична. Ако разгледаме отново примера със скорост на движение 17 m/s и височина на полета 60 m, то профилите биха могли да са на разстояние 137 m за по-добра симетричност на зоната на интегриране.

Въпреки широкото използване на детектори от NaI, в продължение на много десетилетия, все още липсва утвърден протокол за калибриране по ефективност с цел количествен анализ. При гама- спектрометричните измервания на място, за оценка на естествените нива на радиоактивност и по-специално съдържанието на ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th , детекторите от NaI(Tl), обикновено се калибрират с помощта на стандартни повърхности, предимно бетонни подложки, съдържащи известна концентрация на радионуклиди. Тези калибровъчни подложки не са удобни за използване навсякъде. От друга страна, те не са лесни за изграждане с необходимата хомогенност, цената е доста висока и освен това са сложни за контрол от гледна точка на радиационната защита (Chiozzi и др., 2000)[47], (Cinelli и др., 2016)[48]. В нашия случай, калибровката по ефективност, е направена с помощта на два точкови източника ^{137}Cs и ^{60}Co , които са едни от най-често срещаните техногенни радиоизотопи в околната среда. Чрез експеримент на земята, с помощта на два източника (^{137}Cs и ^{60}Co) е определена МДА, като постепенно се отдалечават източниците, до момента, в който системата престане да ги разпознава. За този експеримент е нужно източниците и детекторите, да са достатъчно далеч от предмети с голяма плътност, които биха могли да разсеят значителна част от йонизиращото лъчение.

Детекторната система се нуждае от серия калибровки на различните си параметри (IAEA TECDOC-1363, 2003)[7], (Grasty, 1995)[14]. Настройването на високото напрежение и усилването, като част от енергийната калибровка, се изпълняват автоматично на база на пика на ^{40}K при набиране на спектър. Това се случва при всяко стартиране на системата, с цел своевременна корекция на изместване на спектъра в страни, поради различни технически причини. За да се ускори процесът в системата, са поставени допълнителни количества ^{40}K , който се отстранява по време на полет, за да се намали собствения фон. Тъй като скоростта на броене, по време на полет, е ниска, в сравнение с възможностите на електрониката, то корекция за мъртво време, практически, не е необходима.

Калибровката по ефективност, е направена на земята, с помощта на точкови източници ^{137}Cs и ^{60}Co , с известна активност и от определено разстояние. Откликът на системата в съответния ROI, към активността на източника, дава ефективността на системата. Като част от

калибровката, по ефективност, е определена и МДА от техногенни радионуклиди. Тя е осъществена по същия начин, на земята с помощта на ^{137}Cs и ^{60}Co , но този път, чрез откриване на разстоянието, от което системата еднозначно отчита наличието на ИЙЛ. За да се изчисли МДА, трябва да е известно разстоянието до източника и да има добър фонов спектър. Дори, при завишеният естествен фон, поради близостта до земната повърхност, определянето на МДА за ^{137}Cs или ^{60}Co не представлява проблем, тъй като алгоритъмът работи за всеки отделен ROI от спектъра.

Фонът по време на полет, се състои от четири компонента: *собствен, от радон, космичен и от фолаут*. Тъй като, те влияят на системата едновременно, те ,първо, трябва да бъдат разграничени, за да се определи ефектът на всеки един, върху спектъра. На първо време, ефектът от фолаут, е определен като незначителен, тъй като няма информация за аварии или целенасочени ядрени опити, в района. Въпреки това, са направени наземни спектрометрични измервания, на определени места, в близост до обследваната територия, за да бъде определено наличието или, по-скоро, да бъде потвърдено отсъствието на фолаут.

Наличието на радон е проследено, чрез наблюдение на броя импулси в ROI на ^{214}Bi (561 до 657 keV), тъй като ^{214}Bi е стабилен дъщерен продукт на радона, с гама линия с енергия 609 keV. Неговият фотопик е маскиран от комптъновото плато на другите наблюдавани радиоизотопи (K, U и Th) и неговата количествена оценка изисква по-продължително набиране на фонов спектър и по-сложни калкулации (IAEA TECDOC-1363, 2003)[7] или по-специална калибровка. Концентрацията на радон в района на обследването, е наблюдавана, чрез наземни измервания и се счита, че приносът ѝ, може да се пренебрегне за конкретните цели. Друг подход, е летене над водоем, над който, заради поглъщането от водата, естественият фон (в ROI на NORM), трябва да бъде близък до нула. Ако се отчете завишаване на U, това, вероятно означава, наличие на радон. Въпреки тези допълнителни варианти, по време на полет, е следен и ROI на ^{214}Bi , за видими отклонения. Освен импулсите в този ROI, се наблюдава и отношението Bi към U, което трябва да се запазва непроменено за една и съща позиция и височина на полет. Повишаване на това отношение, също би индикирало завишаване на радона през съответния период от време. Наблюдението на това съотношение (Bi/U), е една от причините да се захожда към обследваната площадка, винаги по един и същ маршрут.

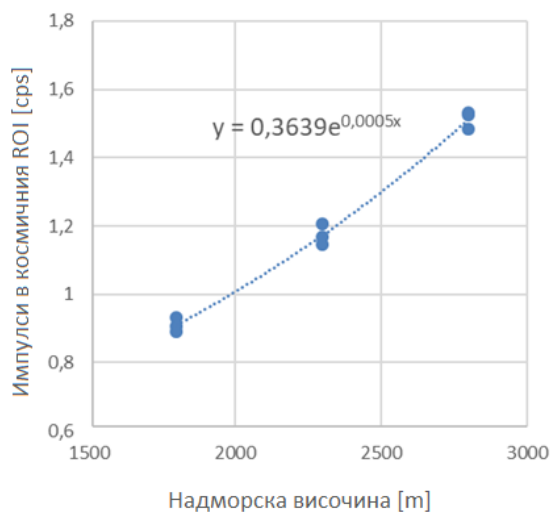
Оценката на собствения фон на системата хеликоптер-детектори и определяне на приноса на космичното лъчение, започват с набиране на спектър, по 15 min, на всяка от надморските височини – 1800 m, 2300 m и 2800 m. Като правило за височинните полети, трябва да се постигнат различни надморски височини над 1000 m и времето да бъде ясно. Космичното лъчение, може да бъде изчислено, за конкретната географска ширина (EURADOS WG5, 2004)[91], но най-точната му оценка, може да се направи емпирично, чрез измервания в реални условия, с конкретната система. Производителят на апаратурата и IAEA (TECDOC-1363, 2003)[7] дават съвети как може да се осъществи това. Избраният теоретичен модел може да се представи в следния вид:

$$D = A.\exp(0,00038.h) + B \quad (3.2.1)$$

където:

- D = мощност на дозата от космично лъчение;
- A = мощност на дозата от космично лъчение на морското равнище;
- h = надморска височина;

B = собствен фон на въздухоплавателното средство;



Фиг. 3.2.5. Експоненциална зависимост на космичното лъчение от височината, построена на база на височинните измервания (2018 г.)

В уравнение (3.2.1) трябва да обърнем внимание на това, че мощността на дозата от космично лъчение (D) и същата на морското равнище (A) трябва да са измерените от конкретната детекторна система стойности, а не реалните мощности на дозата. Различия между реалните и измерените, биха възникнали,

именно поради специфичните особености на детекторната система, като нелинейност на ефективността, ограничен енергиен обхват и др.

Първите калибровъчни полети и височинните полети, е добре да бъдат над достатъчно голям водоем, за да се елиминира естественият фон, идващ от земята. В близост до изследваната площадка има подходящ водоем, над който бяха направени калибровъчни полети на височина от 60 m, но там не се допускат полети над 1000 m и височинните полети са изпълнени над земята. За да се валидира използваният метод за калибровка, при тези условия, се построява кривата, показваща изменението на броя импулси в космичния ROI, спрямо надморската височина. Зависимостта трябва да бъде експоненциална, доближаваща се до израз 3.2.1. На фигура 3.2.5 емпирично построената крива, отговаря на очакваната експоненциална зависимост, което е достатъчно да приемем калибровъчния метод, за приложим, при тези условия. За да се потвърди правилната калибровка, е направена още една проверка – сравнение между стойности от резултатната карта на активността на отделните радионуклиди и стойности, измерени на земята с полупроводников гама- спектрометър.

С увеличаване на височината, приносът на космичното лъчение във фона, се увеличава. Приносът от радиоактивността в земята намалява, а собственият фон на летателното средство, остава константа. Построявайки графиката на зависимостта, на всеки ROI от надморската височина, може да се изчислят отделните компоненти на фона. Космичното лъчение повлиява скоростта на броене във всички ROI, но в ROI над 3 MeV отброените импулси, са само от космичното лъчение. Използвайки това и знаейки ефективността на детекторите във всеки ROI, можем да изчислим общата нетна стойност на импулсите идващи от космично лъчение. Използваната за изчисленията процедура е по-подробно описана от Grasty и Minty, 1995 [14] и TECDOC-1363 [7]. Линейната регресия (фиг. 3.2.6), изобразяваща отношението на импулсите в ROI на космичното лъчение към импулсите в останалите ROI, дава чувствителността за космично лъчение, представена от наклона на графиката, а пресечната ѝ точка с нулата определя собствения фон на летателното средство за конкретния ROI:

$$N_{ROI} = A_{ROI} \cdot N_{COS} + B_{ROI} \quad (3.2.2)$$

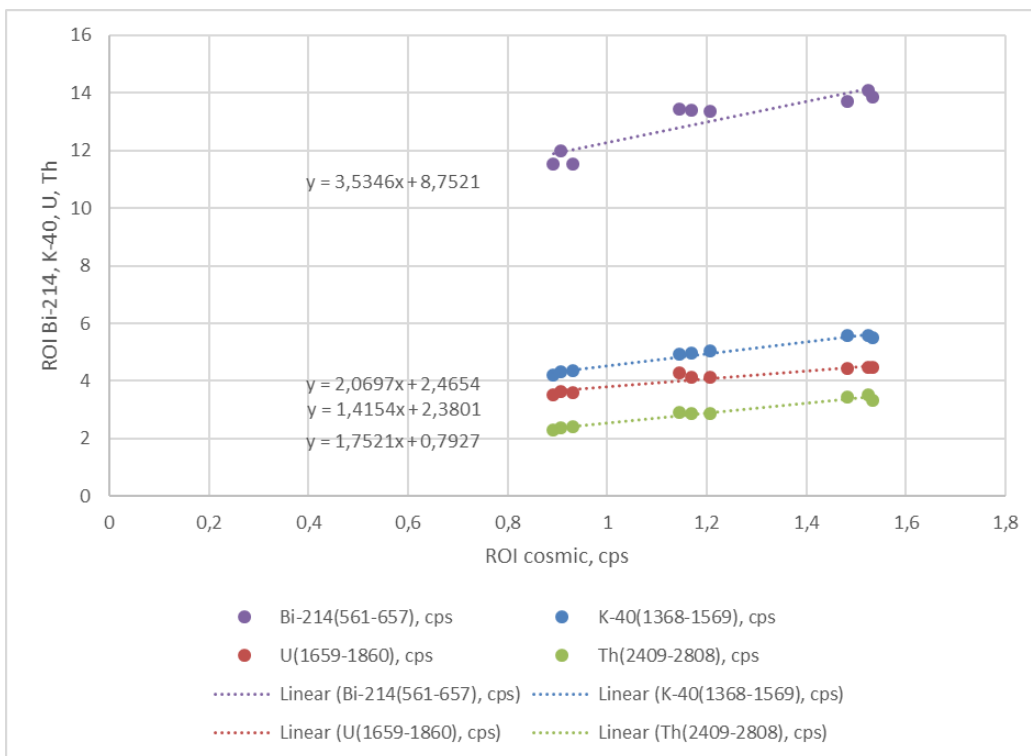
където:

N_{ROI} = собствен фон + космичен фон в дадения ROI;

N_{COS} = фон в космичния ROI;

A_{ROI} = отношение между импулсите от космичен фон в дадения ROI и импулсите в космичния ROI;

B_{ROI} = собствен фон в дадения ROI.



Фиг. 3.2.6.

Линейна регресия на импулсите в космичния ROI към импулсите в другите ROI (2018). С отделни цветове са маркирани отделните ROI. Наклонът представлява

чувствителността за космично лъчение, а пресечната точка с абсцисата дава собствения фон на системата

Такава калибровка трябва е правена всеки път, когато хеликоптерът или част от него се промени, защото собственият фон на системата детектори-хеликоптер, включва горивото, присъствието на оператор на борда и разсейването на гама лъчите в хеликоптера и конструкцията, държаща детекторите. Важна съставна част на фона, също е вторичното лъчение, възникнало от взаимодействието на космичното лъчение, с всяка една от частите на въздухоплавателното средство.

Създаването на картите изисква геореферирани данни да се приведат във формата, който е познат на софтуера, използван за картографиране. В случая, използвания софтуер е ArcGIS на ESRI. Той притежава множество инструменти за визуална интерпретация на числените данни [99].

Изчисленията на активността, се основават на функцията, описваща чувствителността на детектора, спрямо височината. Активността се изчислява за всеки отделен ROI. Резултатът се дава в Bq/m^2 (повърхностна активност) за безкрайния модел на замърсяване и в Bq (обща активност) за модела на точков източник, отделно за всеки радионуклид, съответстващ на конкретния ROI.

Изчисленията на концентрацията са еквивалентни на изчислението на активността, но се взима предвид коефициентът на релаксация β (ICRU Report 53, 1994) [1]. Той представлява вертикалното разпределение на радионуклидите в почвата (определено от релаксационната маса на единица площ). Стойността на β зависи, главно, от възрастта на замърсяването. В същото време, по-голямата част, от гама лъчите, се поглъщат от горните 30 cm на почвата и почти никаква част от гама-лъчението не идва, от повече от 50 cm под повърхността на земята (TECDOC-1363, 2003)[7]. По този начин, масовата или обемната концентрация, може да бъде оценена само за повърхностния слой на почвата.

Изчисляването на мощността на дозата на земята, е извършено в три стъпки. Първо, е измерена дозата в точката на детектора, от която е изваден вътрешният фон, космичният фон и локалният принос на радона. Във втората стъпка, са нанесени височинни корекции, като е използвана еквивалентната височина при стандартни условия и функцията, даваща връзка между височина и чувствителност. Функцията отчита и други параметри, като въздушно налягане и температура на въздуха. В третата стъпка, е добавен космичния фон, изчислен за нивото на земната повърхност. Определянето на активността, при използване на непрекъснатия модел, е извършено чрез пресмятане на полином от четвърта степен от вида:

$$A_{surf} = \left(C_1(h-2)^4 + C_2(h-2)^3 + C_3(h-2)^2 + C_4(h-2) + \frac{1}{Q_{ref}} \right) Q \left(\frac{C_{det}}{\delta} \right) \quad (3.2.3)$$

където:

A_{surf} = повърхностна активността в [Bq/cm²]

$C_1..C_4$ = са коефициентите на полинома получени емпирично (от производителя)

Q = чувствителност към съответния радионуклид (енергиен прозорец) в [cps]

Q_{ref} = референтна стойност, дадена от производителя на системата, за скоростта на броене на един детектор, при наличие на 1 MBq активност от ¹³⁷Cs, поставена на определено разстояние

C_{det} = безразмерен множител, определен от конфигурацията (броя и обема на детекторите)

δ = отслабване в друг екраниращ материал, има стойност 1, при липса на такъв материал

h = относителната височина на полета в [m]

Докато при точковия модел активността е определена с израз от вида:

$$A = \frac{h^2}{4} \cdot \frac{1}{\exp(-0.122\mu h)} \cdot \frac{1}{Q_{ref}} Q \left(\frac{C_{det}}{\delta} \right) \quad (3.2.4)$$

където:

A = активността в [MBq]

Q = чувствителност към съответния радионуклид (енергиен прозорец) в [cps]

Q_{ref} = референтна стойност, дадена от производителя на системата, за скоростта на броене на един детектор при наличие на 1 MBq активност от ¹³⁷Cs поставена на определено разстояние

C_{det} = безразмерен множител, определен от конфигурацията (броя и обема на детекторите)

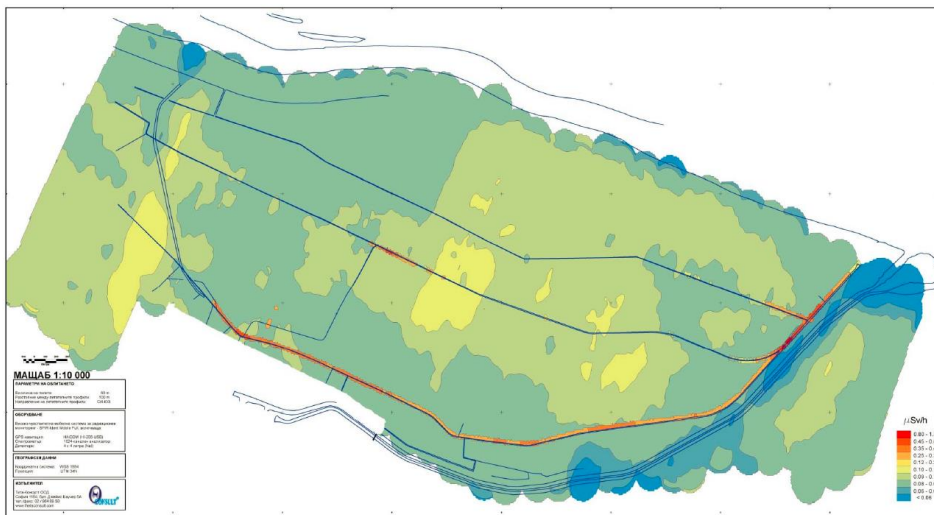
μ = отслабване във въздуха в [cm⁻¹]

δ = отслабване в друг екраниращ материал, има стойност 1, при липса на такъв материал

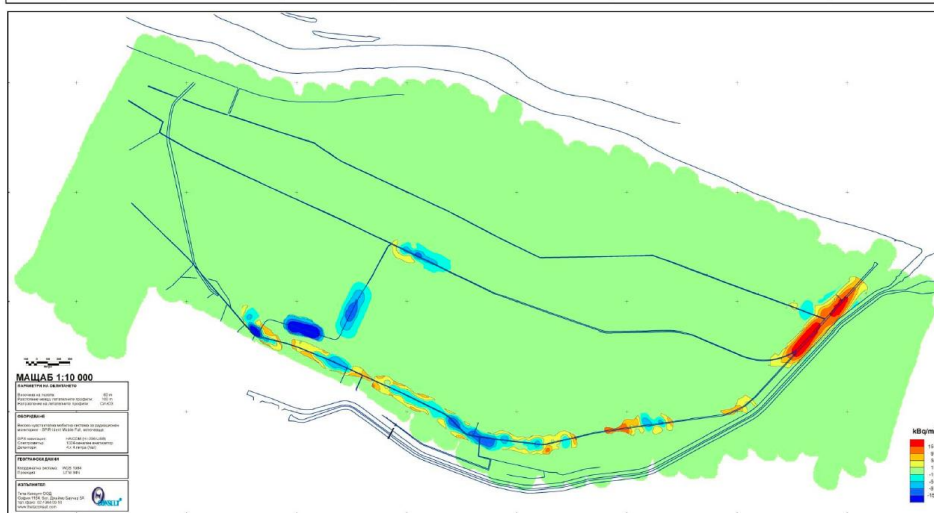
h = относителната височина на полета в [m]

Височинни корекции за точков източник, намиращ се в равнинно поле, са описани и в TECDOC р.67. В много от случаите, обследваната територия, не е равнинна, а пресечена (например около урановите мини). Математически модели за оценка на активността, на база на измервания от въздуха над пресечен терен, дава Schwartz и др., (1992) [16].

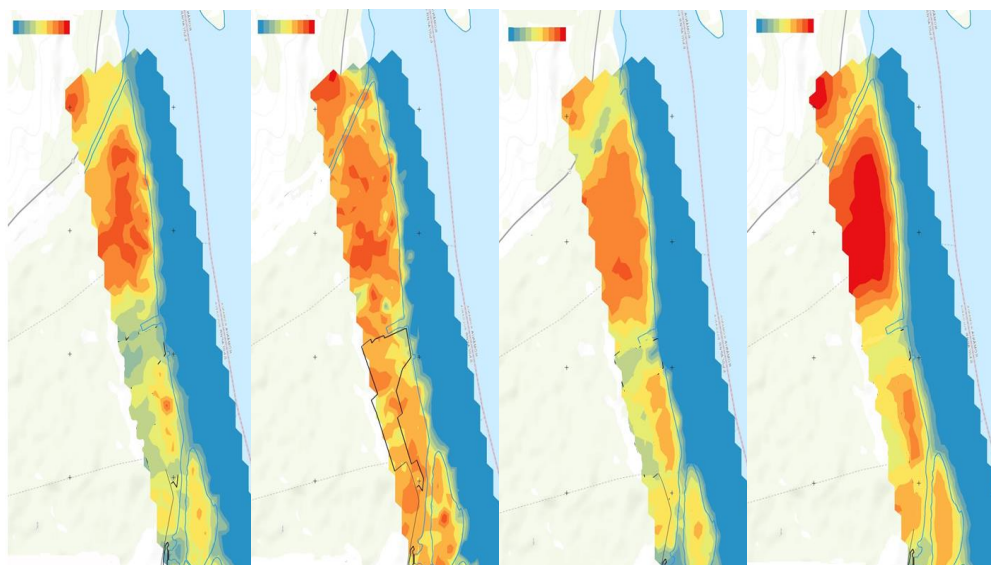
Крайният резултат, се състои от разнообразие от карти, представящи концентрациите на наблюдаваните радиоизотопи и изчислени дози или точки, показващи местоположението и активността на точкови източници. На следващите изображения (фиг. 3.2.3 – 3.2.5), са представени извадки от някои готови гама-спектрометрични карти за илюстративни цели. За всеки отделен ROI и съответно отделен радионуклид, е изготвена отделна карта, както и карти на разликите между предишни гама обследвания на същата територия и настоящото. Изготвени са и обобщаващи карти, които включват общата мощност на дозата, общата активност или активност само на определени групи от радионуклиди.



Фиг. 3.2.3. Карта на гама-фона (мощността на еквивалентната доза)(2013 г.)



Фиг. 3.2.4. Разликова карта на повърхностната активност на ^{137}Cs за периода 1999-2013



Фиг. 3.2.5.
Извадки от
карти на: (а)

концентрация на Th [ppm]; (б) концентрация на U [ppm]; (в) концентрация на ^{40}K [%]; (г) мощност на еквивалентната доза [$\mu\text{Sv/h}$] (2018)

(а)

(б)

(в)

(г)

Мощността на еквивалентната доза (D_{total}) е пресметната, като сума от мощностите на еквивалентната доза създадени от естествени радионуклиди (D_{NORM}), техногенни радионуклиди ($D_{\text{industrial}}$) и от космично лъчение (D_{cosmic}):

$$D_{\text{total}} = D_{\text{NORM}} + D_{\text{industrial}} + D_{\text{cosmic}} \quad (3.2.5)$$

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА. Безпилотни летателни системи (БЛС)

Възможности за използване на БЛС за измерване на радиационната обстановка

В зависимост от размерите на територията, която трябва да бъде изследвана и желаната резолюция на гама-спектрометричната карта, трябва да се избере метода на работа. Той включва: вида на въздухоплатателното средство, детекторната система, плана на полета - скоростта, височината, посоката и разстоянието между профилите. Фактори, като космически радиационен фон, радон във въздуха, естествен фон, температура, налягане и др., имат съществен принос за обследвания от големи височини. По-малката височина на полета, може да ни позволи да избегнем усилията около въздушните изследвания, тъй като, те биха били по-сходни с измерванията на земята. Недостатък е, че малките, по мащаб изследвания, имат по-високи изисквания за позициониране и навигация, отколкото конвенционален GPS може да осигури, но с различни методи за подобряване на прецизността, много скоро използването им, ще бъде по-разумно.

Освен, използваната, до момента от нас апаратура, голяма част от произведените за въздушно обследване детекторни системи, са съставени от отделни детектори, с максимален обем от 4 l. За пилотируемите експерименти, сме използвали 4 такива детектора (общо 16 l). Използването на един детектор, вместо четири, с някои приближения, означава четири пъти по-

малка чувствителност. За да се компенсира това, е нужна 4 пъти по-ниска скорост на полета, която да осигури 4 пъти по-дълго време за интегриране на сигнала. Друг вариант, е да се намали височината на полета. Както е известно откриваемостта на наземен точков източник, силно зависи от височината на полета (уравнение 6.3.1) и понижаване на височината само с 20%, би следвало да увеличи отклика в детектора около 4 пъти. Тоест, избор на височина от 48 m, вместо използваната височина от 60 m, ще бъде достатъчна мярка за компенсиране на 4 пъти по-малкия детектор. От друга страна, използването на един детектор означава, че цялото тегло на детекторната система, може да се сведе до < 20 kg. За мисии с такъв полезен товар, могат да се използват някои многороторни електрически БЛС, които попадат на границата между малките и средните, по размер и се предлагат на свободния пазар на приемливи цени. Този подход, би спестил разработването на специализирана детекторна система за БЛС със съпътстващия софтуер за първична обработка на сигнала.

Използвайки най-пълноценно, преимуществата на БЛС, пред пилотируемите летателни апарати, можем да си позволим полет на много малка височина, от порядъка на 1-2 m, с ниска скорост (≤ 1 m/s). Намалявайки височината 30 пъти, можем да намалим размерите на детекторите с 3-4 порядъка. По-конкретно, от $16\ 000\text{ cm}^3$ (за височина 60 m), можем да намалим размера на детектора до под 2 cm^3 (за височина 2 m), без да повишим МДА (за стационарни измервания). При проведените пилотируеми обследвания, времето за интегриране е между 5 s и 7 s. За постигане на такова време, е необходимо, БЛС да прелети диаметъра на видимата зона (4 m) за 5 до 7 s, което се равнява на скорост около 0,6 m/s. За да увеличим скоростта, то размерите на детектора, или по-точно неговата чувствителност, трябва да се увеличи, но тъй като зависимостта е линейна, може лесно да се намери балансът между по-скъпия или по-тежък детектор, и по-бързото сканиране на обследвания терен. Един добър вариант, би бил смяната на материала на сцинтилатора от NaI с CsI, което би позволило 50% по-висока скорост, достигаща 1 m/s при запазване на същото тегло. По-подробни изследвания в тази насока, са описани и подкрепени с практическо сравнение между различни детектори, в пета глава от дисертацията, т.5.2.1.

ГЛАВА ПЕТА. Експеримент по гама-картографиране с БЛС

За да бъде осъществено въздушно радиационно обследване на малка площ, най-полезен, би бил, летателен апарат с ротиращо крило, поради маневреността и възможността за зависване. Усвояването на методите на картографиране с помощта на БЛС, може да бъде полезно за още един тип измерване, който би могъл да се определи, като свързващо звено, между въздушното и ръчното обследване. Електрически квадрокоптер, би могъл да следва стриктно особеностите на терена и да поддържа изключително малка височина на полета (1-2 метра). Това доближава измерванията до геометрията, използвана при ръчно преносимите радиометри, и съответно начинът на калибриране, би бил значително опростен, за голяма част от моделите на разпределение на замърсяването. В настоящата глава, е описан експеримент по обследване на малка по площ територия, върху която допълнително са поставени тестови ИЙЛ, и в следствие са открити с помощта на БЛС и гама-сцинтилационна детекторна система. Активността им е определена на база, на предварително направена калибровка.

Цел

Основната цел на експеримента, е свързана с развитие на един нов метод за дистанционно гама-картографиране на радиационната обстановка, на различни места от земната повърхност, с помощта на БЛС.

Избор на детектор и БЛС

За оптимални резултати, детекторът и БЛС трябва да представляват два компонента на една неразделна система. Следователно, изборът им, не може да се направи по отделно. Две са основните отправни точки, ръководещи техния избор:

- Разделителната способност, която трябва да притежава резултатната карта;
- МДА, която се изисква.

Разделителната способност, зависи от видимата, от детектора наземна площ, а тя, от своя страна, зависи от височината на полета (IAEA-TECDOC-1363, 2003)[7]. Но не от надморската височина, а от относителната височина, спрямо земната повърхност, където се намира радиоактивността. Това е максималната допустима височина, без да се влоши желаната разделителна способност. За да постигнем определената МДА, при избраната височина на полета, детекторът трябва да има достатъчно висока чувствителност. Чувствителността е пряко свързана с размера и теглото на детектора, а това, от своя страна, ще определи и избора на подходящо БЛС. В настоящия експеримент, са използвани ИЙЛ, предоставени от фирма Тита-Консулт ООД. За да бъдат открити, след като са поставени на земната повърхност, МДА трябва да бъде по-ниска от тяхната активност.

Сравнение на различни видове детектори

В сравнението участва не само материалът, от който е изработена активната част на детектора, а цялостно работещата детектираща система. Това включва: самият детектор (сцинтилатор или друг тип), фотоелектронен умножител (ФЕУ) или друг преобразовател на светлинни импулси в електрически, предусилвател, усилвател, електроника, брояща и записваща импулсите и захранващ блок.



Фиг. 5.2.1.1. Част от сцинтилационните детектори участващи в сравнението (в ляво) и цели детекторни системи използвани в дозиметри (в дясно).

Трите параметъра, които са най-важни за прилагането на детектиращата система в безпилотните методи за изследване са: тегло, чувствителност и ниво на консумация на електрическа енергия. Поради структурата им, газоразрядните броячи, са относително леки, но тяхната ефективност, е ниска (от порядъка на 10-тина cps при мощност на дозата $1 \mu\text{Sv/h}$ за ^{137}Cs).

Чувствителността на сцинтилационните детектори, зависи от размерите, плътността и ефективния атомен номер $Z_{\text{еф}}$ на сцинтилатора (ефективността във фотопика е пропорционална на Z^5). Класическите ФЕУ са с голямо усилване (около 10^9), но се изработват от стъкло, което ги прави тежки и чупливи. Преди да се проектира цялостна детекторна система, е направено сравнение между готови такива системи, използвани в преносима дозиметрична апаратура, където параметрите тегло, ефективност и консумация на ел. енергия, също са решаващи. Според каталожната информация, дадена от производителите на детектори, е избран сцинтилационен детектор от CsI (детектор № 2, Таблица 5.2.1.1). Поради относително добрата си чувствителност, малки размери и малко общо тегло (на детектор с ФЕУ), използването на детектора за експеримента, би било обосновано.

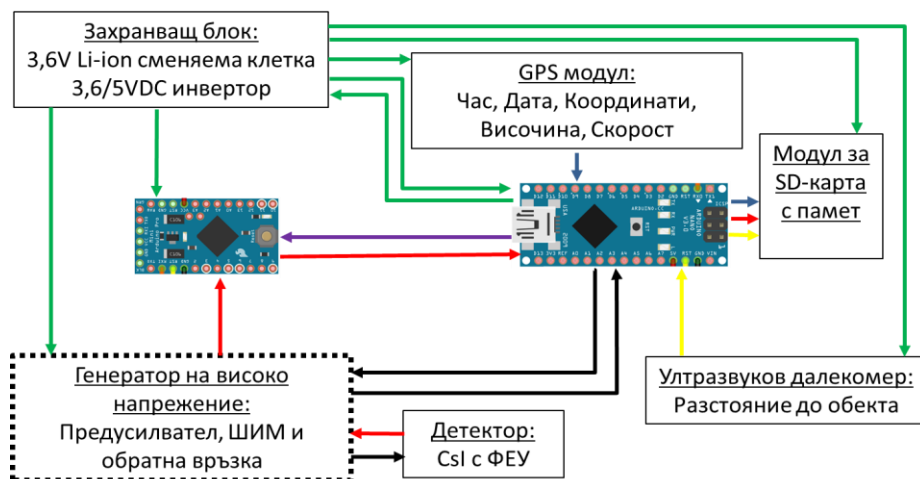
Таблица 5.2.1.1. Сравнителна таблица на изследваните детектори

№	Вид/материал	Размери [mm]	Чувствителност [cps/ μ S/h] (Cs-137)	Тегло [g]
1.	ГМ-брояч	80 × ϕ 10	8	8
2.	CsI	38 × ϕ 13	210	40
3.	CZT	1000 mm ³	1000	50
4.	NaI	25 × ϕ 25	290	120
5.	CsI+Li	38 × ϕ 35	1500	550
6.	NaI	63 × ϕ 63	4600	1400
7.	Органичен сцинтилатор	75 × ϕ 75	1500	1400

Към всеки от детекторите №2 и №№ 4-7, Таблица № 5.2.1.1), като неразделна част, е прикрепен фотоелектронен умножител (ФЕУ), който изисква добра защита от механично счупване на стъкления му корпус и стабилизирано високо захранващо напрежение (до около 1000V).

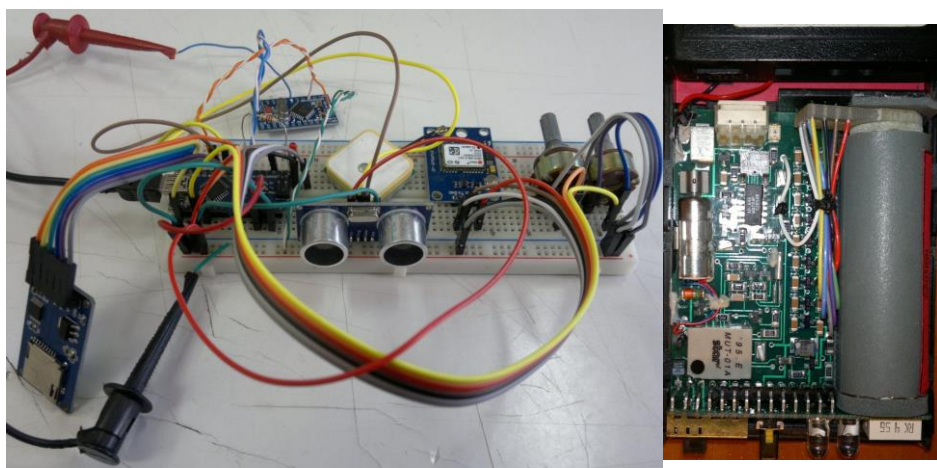
Сглобяване и програмиране на детекторната система

На Фиг. 5.2.2.1. е представена блок-схема на системата, използвана за получаване, обработка и запис на данните от измерването. Тази система е основният консуматор на електроенергия, освен това, тя би могла да се използва при всеки един от детекторите. Поради тези две причини, критерият *консумация на енергия* не присъства в сравнението между различните детектори. Както е видимо и на фиг. 5.2.2.1, импулсите от ФЕУ се подават към операционен усилвател, формираща верига и брояч. Броячът е реализиран с два контролера на базата на ATmega328p (Arduino)[98]. Единият контролер служи само за отброяване на импулсите, в режим на прекъсване, а вторият ги записва на карта с памет. Към записа, се добавят и данните от GPS-приемник и ултразвуков далекомер, необходим за определяне на относителната височина на полета. Спрямо нея, се определя замърсяването, отнесено към земната повърхност или мощността на дозата на 1 m над земната повърхност.



Фиг. 5.2.2.1. Блок схема на детекторната система записваща данните от измерването

В рамките на една секунда (колкото е времето между записите), ултразвуковият далекомер прави 10 измервания и предава на контролера на детекторната система осреднената стойност, от извадка, изключваща стойностите с твърде голямо отклонение от средната. Тоест, използва се плаващо средно от представителна извадка.



Фиг. 5.2.2.2.

Сглобяване на система за запис на данни и тест в лабораторни условия (в ляво); детектор от преносим личен дозиметър от CsI(Tl) с ФЕУ, високоволтово захранване и предусилвател (в

дясно).

Детекторът е сцинтилатор от CsI(Tl) с приблизителни размери $\phi 13 \times 38$ mm. Към него има залепен ФЕУ. Двете части са обвити в предпазна пана и общото им тегло е 40 g. Чувствителността е 210 cps/ $(\mu\text{S/h})$ за поле, създадено от радионуклида ^{137}Cs .



За да бъде пригодна за използване, системата е снабдена със собствена батерия и е вмествана в лека картонена кутия с формата на паралелепипед (фиг. 5.2.2.3).

Фиг. 5.2.2.3. Сглобена броячна детекторна система с детектор от CsI, GPS приемник, ултразвуков далекомер и автономно захранване

Избор на БЛС

Изборът на БЛС се определя по няколко критерия, но основно от мащабите на изгражданата карта. Когато искаме да създадем детайлна гама-карта на сравнително малка площ, то височината на полета трябва също да бъде малка. За да осъществим полет с малка височина, по-разумно и безопасно, би било да се използва БЛС с ротиращо крило (със способност да зависва), от колкото БЛС с фиксирано крило (тип самолет). Основно заради това съображение, за нашия полет, е избран електрически квадрокоптер. Общата му подемна сила е важно да бъде достатъчна, не само за повдигане на теглото на детекторната система, но и за да осигури стабилност и сигурност по време на полета, дори при възникване на внезапни въздушни течения. Различно конструираните БЛС могат да изпълняват мисии с различно тегло на полезния товар, макар и електромеханичните им характеристики, да са сходни. Това, най-добре, може да се определи емпирично, с използването на макет, преди да се натовари скъпата детекторна система.



Фиг. 5.2.3.1.
Квадрокоптер DJI Phantom 4 PRO с броячната сцинтилационна детекторна система

Подемната сила, от четирите ротора, е достатъчна за полет, с товар около 1 kg, но за по-добра стабилност, не се препоръчва товар, по-голям от 500 g. Наличната батерия, с

конструирания макет на детекторната ни система и камера за видео заснемане, качени на борда, осигурява полет, с продължителност около 10-15 min, което е напълно достатъчно за провеждане на експериментите.

Подготовка на полета. Летателен план и калибриране на системата

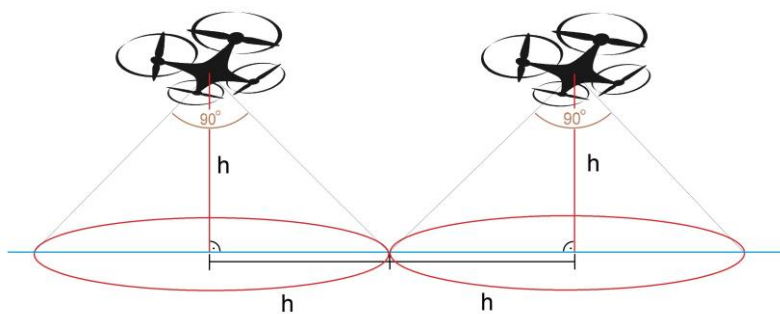
Теренът, избран за тестовия полет, е площадката пред Физически факултет (тревистата площ зад ФМИ), като общите размери са около 20×10 m. Предварително зададените условия, на които теренът трябва да отговаря са: ниска растителност и неравности, по-ниски от 1 m, за да може БЛС, поддържайки равномерна абсолютна височина на полета, относителната височина да се запази близка до 2 m и за да се намали рискът от физически контакт на БЛС със земната повърхност. За самото измерване, от значение не е абсолютната надморска височина, а разстоянието от предполагаемо замърсената земна повърхност до БЛС. Докато при пилотируемите ЛС, летящи на височини от порядъка на 60-100 m, е по-разумно, да се поддържа хоризонтален полет на фиксирана надморска височина, при БЛС, е по-подходящо да се следва релефът на терена, тъй като височината на полета, в много случай, е съизмерима с изменението на релефа, и с различни препятствия по земята. Тъй като в настоящия експеримент детекторната система е отделена от автопилотиращата система, БЛС не получава информация за относителната височина на полета.

Първоначално, се счита, че замърсяването е с неизвестно разпределение, тоест допуска се, че позицията, формата и размерите на източниците не са известни. Следователно, първо, се използва непрекъснат модел на разпределение. Според този модел, летателният план се изготвя така, че целият терен да бъде облетян по профили успоредни както помежду си, така и на дългата страна на терена (IAEA, Report № 323, 1991)[8]. На фиг. 5.3.1. е представен изглед от софтуера Mission Planner, който е със свободен достъп и е предназначен за изготвяне на летателен план на БЛС. По време на полета могат да се следят различни параметри, включително и сигнала от детектора, но в настоящия експеримент от съображения за сигурност, детекторната система е напълно независима от полетния контролер и се използва ръчно пилотиране.



Фиг. 5.3.1. Летателен план, изготвен със софтуера MissionPlanner

Тъй като 60-70% от сигнала в детектора, се формира от кръг с радиус, равен на височината на полета (Фиг. 5.3.2), то разстоянието между профилите, трябва да бъде равно на удвоената височина на полета (Глава 3, точка 3.2).



Фиг. 5.3.2. Видима за детектора зона от земната повърхност без допълнително презастъпване

В случая, е избрано разстояние между профилите равно на височината на полета (тоест на половина от стандартното), поради две причини. Първо, с по-голямото застъпване можем да приемем, че видимата зона на детекторите е по-малка, което би довело до по-добра разделителната способност, по посока перпендикулярна на посоката на движение. Второ, летателното средство позволява много бавна скорост, без затруднения, което може да допринесе за добра разделителна способност и по посоката на движение. На практика, при изпълнение на мисията, може безпроблемно да се следва методът на стъпково наблюдение, използван при орто-фото заснемането, при който сравнително леките БЛС могат бързо да се придвижват до точките на измерване, където да зависват за необходимото време за интегриране на сигнала. При по-голямо застъпване на профилите, трябва да се намали и разстоянието между точките на зависване, а от своя страна, колкото повече се намалява разстоянието между точките, толкова по-малък става и ефектът от използването на метода на стъпковото придвижване. Поради тези факти, експериментът е проведен с равномерна линейна скорост от 1 m/s. Тя е съобразена с времето за интегриране от 1 s и размера на видимата от детекторите зона, която е приета за кръг с радиус 1 m.

След като са избрани параметрите на полета, а в частност относителната височина, може да се направи калибриране. При него е важно, да се възпроизведат условия, максимално близки до условията на измерване. Височината от 2 m не е проблем да се възпроизведе с телескопична сонда над калибровъчен точков източник, поставен на земята. Преди да се постави източникът, е измерен фон до отчитане на поне 10000 imp, след като е поставен източникът на земята, под детекторната система е направено измерване, отново до достигане на 10000 imp. Ефективността на детекторната система, като отношение на активността към скоростта на броене е пресметната по:

$$\varepsilon_x = \frac{A_x}{I_{tot} - I_{bkg}} \quad (5.3.1)$$

където:

A = активността на калибровъчния източник;

I_{tot} = брутната стойност на скоростта на броене;

I_{bkg} = фоновата скорост на броене;

ε_x = ефективността при измерване на радионуклид x в [MBq/cps].

При калибрирането процедурата е изпълнена сертифициран източник, съдържащ ^{137}Cs , за които се получава:

$$\varepsilon_{2m, Cs-137} = \frac{0,362}{28,76 - 27,28} = 0,245 \quad (5.3.2)$$

За да се подsigури калибровка, отговаряща на условията на измерване, използвани при оценка на активността е извършено калибриране, от разстояние 1 m. Резултатите за ефективността са следните:

$$\epsilon_{1m, Cs-137} = \frac{0,362}{35,91 - 27,28} = 0,0419 \quad (5.3.3)$$

Изпълнение на експеримента и първична обработка на данните

За точността на измерванията, всички калибровки, правени от въздуха, са извършени, непосредствено преди измервателните полети. Естественият фон на площадката е измерен с ръчен преносим дозиметър, радиометър Mirion HDS-100. С детекторната система, използвана в експеримента, се измерва фона на същото място до набиране на добра статистика ($>10\,000$ импулса (Манушев, 2001)[18]). Тоест отново се прави така нареченото *лабораторно сравнение*, но вече на място на измерването и непосредствено преди него.

Първият полет е с продължителност около 140 s, височина 2 m и скорост 1 m/s за изграждане на карта по непрекъснатия модел на разпределение.

След кацане, от картата с памет на детекторната система, информацията се сваля на преносим компютър и се визуализира графично с цел, първоначално запознаване с радиационната обстановка (фиг. 5.5.1 и фиг. 5.5.2). След като са забелязани два отчетливи максимума около точки № 50 и № 62 на графиката на фиг. 5.5.1, е направен втори летателен план със зависване над техните координати, но на по-малка височина. При такова зависване има риск от това БЛС, буквално, да отвее радиоактивността, ако е в насипна форма, с което може дори самото БЛС да се замърси. За това, се предпочита по-продължително зависване, пред това на по-малка височина. За да не се намалява твърде много височината на полета, детекторът се окачва на въже с дължина 1 m. По този начин височината на измерване става 1 m, което е еквивалентно на височината при ръчно измерване и няма причина да очакваме различен резултат.



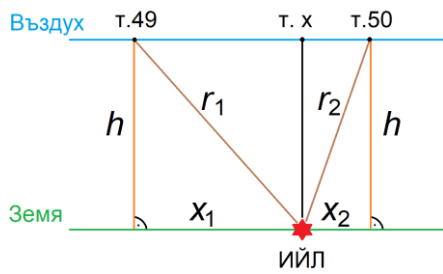
Фиг. 5.4.2. Втори летателен план след приемане на точковия модел на разпределение

Вторият полет е с продължителност около 270 s за по-точно определяне на активността в двете точки, в които са открити точкови

ИЙЛ (Приблизително 130 s зависване над всяка точка, ще са необходими за постигане на статистическа неопределеност по-ниска от 1%).

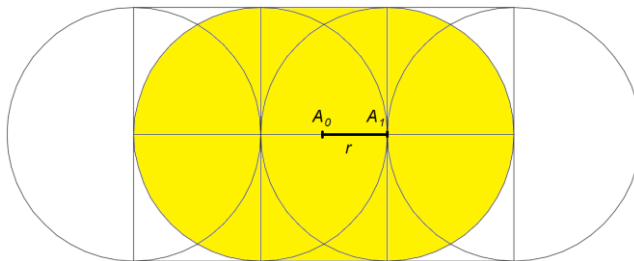
За изготвяне на втория летателен план, важна стъпка е точното определяне на координатите на двете точки на зависване. За да стане това е построен елементарен геометричен модел (Фиг.5.4.3) взимаш, като входни данни, нетният брой импулси в две съседни

точки и даващ разстоянието на предполагаемия максимум на нетния брой импулси от една от точките.



Фиг. 5.4.3. Геометричен модел на измерването в различни точки над ИЙЛ

Преди да сме определили точно координатите на предполагаемия максимум на радиоактивност, трябва да се вземе предвид отместването при геореферирание на резултата, поради факта, че координатите са записани в края на периода на интегриране. Тоест, стойността на скоростта на броене, измерена върху целия овал, описващ видимата зона при движение на детектора, не се обвързва с точка, която е в средата му, а с точка, която е отместена по посоката на движение, с толкова, колкото е половината от изминатия път за един интервал на интегриране. На фиг. 5.4.4 т. A_0 е реалното местоположение на източника, а A_1 е точката на геореферирание на измерената от детектора стойност.



Фиг. 5.4.4. Отместване при геореферирание на резултат интегриран за определено време

Отстоянието r между двете точки е:

$$r = \frac{V \cdot t}{2} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (5.4.11)$$

където:

V = скоростта на летене;

t = времето за интегриране.

Резултатът от направените изчисления показва, че при период на интегриране 1 s и скорост на полета 1 m/s, разликата между нетните скорости на броене в две последователни точки между които се намира ИЙЛ е винаги по-малка от 25% (ако не отчитаме поглъщането във въздуха, което би имало значително влияние при по-големи разстояния и при по-ниски енергии на лъчението). По-голямата разлика би се дължала на лоша статистика на измерването (твърде малко отброени импулси), на подвижен ИЙЛ или на геометрия, не съответстваща на точков източник.

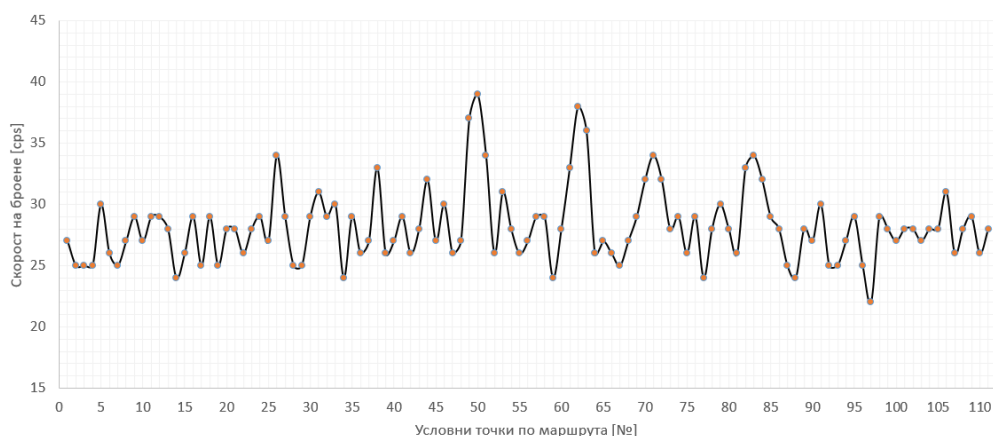
След като знаем координатите на точката трябва да определим и ефективната скорост на броене в тази точка. На практика, решаваме обратната задача – при известно разстояние от точка с известна скорост на броене, пресмятаме неизвестната скорост на броене.

До тук, методът ни позволи определянето на най-високата ефективна скорост на броене и позицията на точката, с тази скорост на броене, по линията на профила на облитане. Радиоактивният източник, разбира се, по-често, не се намира точно на тази линия, както е в конкретния случай. За да определим, къде се намира източникът, е достатъчно да намерим точката, в която се отчита най-висока скорост на броене, по линия, перпендикулярна на профила на облитане и преминаваща през максимума на линията следваща профила на облитане. За целта, методът се прилага и за двата съседни успоредни профила. След като, са

намерени точките с максимална скорост на броене по тях, методът се прилага още веднъж върху правата, която ги свързва.

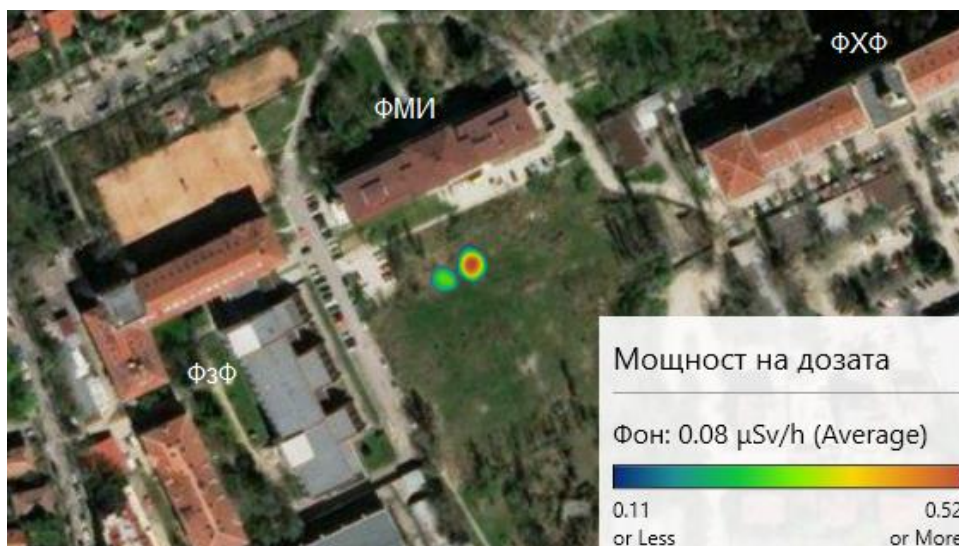
Избор на модел на откритото замърсяване

При първоначалното облитане на терен, с неизвестно замърсяване, се избира непрекъснат модел. Данните от този модел служат за създаване на карта на замърсяването, показваща не толкова абсолютното количество на радиоактивността, колкото нейното пространствено разпределение и относително количество. За да се определи абсолютната стойност на активността, трябва да се вземе предвид моделът на разпределение, според данните получени от първия полет. На фиг. 5.5.1. са представени графично стойностите на скоростта на броене в условните точки по пътя на облитане.



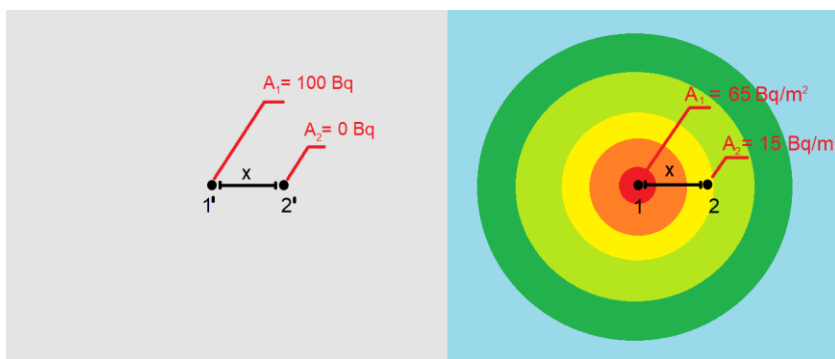
Фиг. 5.5.1.
Времева
диаграма
на
скоростта
на броене в
точките на
облитане

В точка № 50 и точка № 62 ясно се вижда завишена скорост на броене от детектора, но и в точки № 26, 38, 49, 61, 63, 71, 82, 83 също се наблюдават завишения, близо до границата на неопределеността на показанията за фон. Тъй като, тези точки, са съседни на точките № 50 и 62 (става ясно от координатите в Таблица 5.6.2), а в останалите точки показанията са в рамките на флукуациите на естествения фон, няма основание да приемем наличие на повече ИЙЛ. По време на изпълнение на експеримента, между първия и втория полет, може да се построи и още един тип графика ("3D Map") с помощта на Microsoft Excell (Фиг. 5.5.2), за да се изгради по-ясна пространствена представа. Въпреки, че този инструмент е удобен за ползване и дава бърз резултат, има множество ограничения, които го правят неособено подходящ за картографиране.



Фиг. 5.5.2.
Първоначално
визуализиране с
помощта на
Microsoft Excell

Резултатът от направения бърз анализ показва, че при второто облитане, ще се приеме точковият модел на разпределение, приложен за две точки (по-ясно се вижда на фиг.5.5.1). Ако данните от първото облитане, се нанесат на карта, използвайки непрекъснатия модел, то активността приписана на дадена точка, ще бъде разпределена по площта на видимата от детектора зона. По този начин, ситуацията няма да бъде реално оценена. Нуждата от прилагането на точковия модел, също не може да бъде достатъчно обосновано, при липса на допълнителна информация, относно обектите върху терена на обследване, като например видео изображения. Въпреки това, фактът, че в съседните условни точки, не се наблюдава сериозно завишаване на фона, говори, че радиоактивността, е достатъчно далеч от видимата от тях зона, тоест източникът на лъчението, е във вътрешността (близо до центъра) на зоната, в която е открит. На фиг. 5.5.3. (дясно) се вижда, каква грешка може да се допусне за точка 2, на разстояние x от условната точка 1, която се приема за център на наблюдаваната от детектора зона и точката, в която се намира точковият източник. При точковия модел изолиниите и оцветяването нямат физически смисъл, а на картата е по-разумно, да се сложи подложка от снимки на терена. На фиг. 5.5.3, снимките са заменени със сив фон. В случая на точков модел (ляво) на точка 2' не се приписва никаква активност (0 Bq), а на точка 1' – цялата активност, която в случая на примера е 100 Bq. Това описва точно ситуацията, докато с непрекъснатия модел в точка 2 на същото разстояние x от центъра (т. 1) приписваме активност от 15 Bq/m², преоценявайки замърсяването, а в същото време на т.1 приписваме 65 Bq/m² и недооценяваме.



Фиг. 5.5.3. Сравнение
между точков (ляво) и
непрекъснат модел
(дясно), приложени за
точков източник

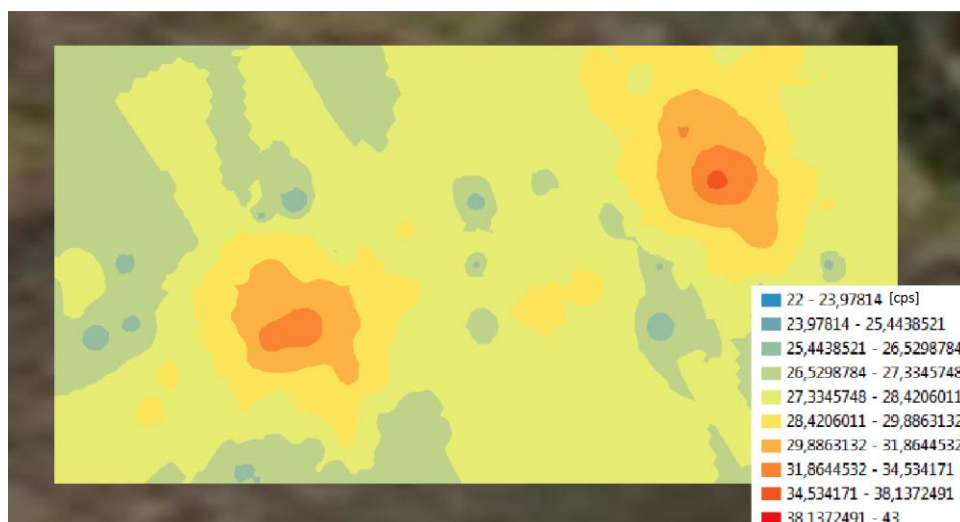
Обработка на резултатите и визуализиране

От табл.5.6.1 и Фиг.4, (т.50 и т.62) се вижда, че отклика в детектора в точките над източниците е около и над 40 cps, или при фон 27 cps, нетната стойност е около и над 13 cps. Това показва, че източниците, подбрани за експеримента създават поле, което е достатъчно силно, с нетна мощност на дозата $\approx 0,06 \mu\text{Sv/h}$.

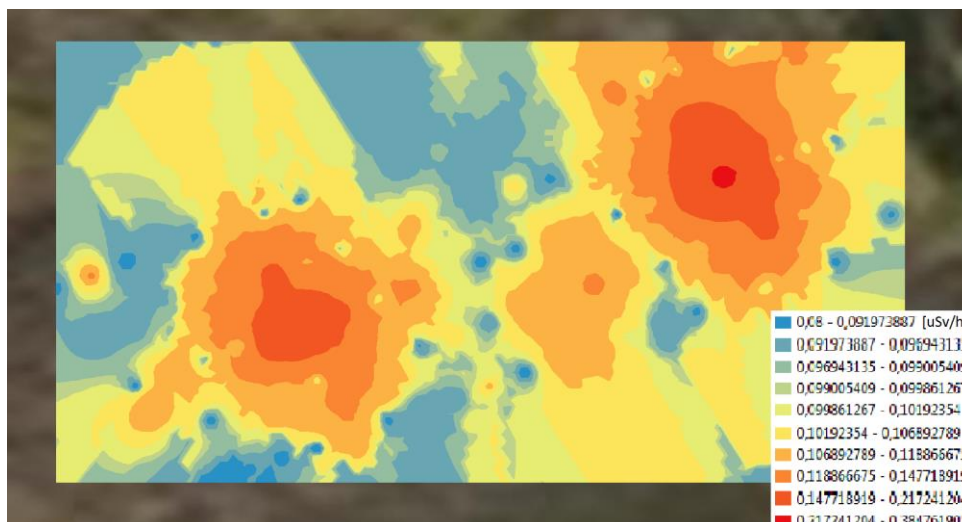
Таблица 5.6.1. Геореферирани резултати от измерванията със завишена мощност на дозата

Точка №	Северна ширина, [deg]	Източна дължина, [deg]	Височина на полета, [cm]	Скорост на броене, [cps]	Нетна стойност, [cps]	Мощност на дозата от ^{137}Cs [$\mu\text{Sv/h}$]
26	42.673963	23.330718	188	34	7	0.198
38	42.673917	23.330586	182	33	6	0.175
49	42.673928	23.330561	202	37	10	0.274
50	42.673932	23.330572	182	39	12	0.269
61	42.673975	23.330693	202	33	6	0.197
62	42.673979	23.330704	200	38	11	0.290
63	42.673982	23.330713	203	34	9	0.257
71	42.673995	23.330693	192	34	7	0.203
82	42.673952	23.330572	189	33	6	0.182
83	42.673948	23.330561	189	34	7	0.199

По време на лабораторните експерименти, детекторната система е програмирана да записва данните от измерването във файлов формат, подходящ за директно прехвърляне в програмата ArcGis, предоставена за целите на експеримента от фирма Тита-Консулт. На фиг. 5.6.1 е представена картата, генерирана с ArcGis, съдържаща измерените скорости на броене. Картата позволява множество манипулации и интерпретации на резултатите, с цел, по-лесен достъп до информацията.



Фиг. 5.6.1. Извадка от гама-карта по скорост на броене, създадена със софтуера ArcGis по непрекъснатия модел



Фиг. 5.6.2.
Извадка от гама-карта по мощността на дозата на височина 2 m, създадена със софтуера ArcGis по непрекъснатия модел

За точното определяне на активността на източниците, съществена роля играе, предварителната калибровка на системата в същата геометрия и със същите източници. При реални замърсявания, би следвало да се спазва геометрията на калибрирането, до колкото е възможно, а точното определяне на активността на замърсеното петно, ще зависи и от това дали замърсяването е от същите радионуклиди, които са използвани при калибрирането. При неизвестен радионуклиден състав на замърсяването, за да се минимизира риска от недооценяване, при изчисление на активността, се използва консервативен подход. При него се използват калибровъчни коефициенти от калибровка, извършена с радионуклид, към който системата има по-ниска чувствителност. Така се гарантира по-добра чувствителност при останалите радионуклиди, чиито активности се измерват.

В конкретния случай, резултатът от измерването на активността, може да се получи чрез пряко използване на ефективността поради съответствие между условията на калибриране и измерване. При нетна скорост на броеве от 12 cps в т.50 (табл. 5.6.1) изчислената активност е:

$$A = I_{net} \cdot \epsilon_{2m, Cs-137} = 12 \cdot 0,245 = 2.94 \text{ MBq} \quad (5.6.1)$$

При нетна скорост на броеве 11 cps в т.62 (табл. 5.6.1) изчислената активност е:

$$A = I_{net} \cdot \epsilon_{2m, Cs-137} = 11 \cdot 0,245 = 2.70 \text{ MBq} \quad (5.6.2)$$

Резултатът получен от 5.6.1 отговаря на активността на използвания тестови източник, докато този в 5.6.2, силно недооценява активността на източника в т. 62. Причината е в различието между енергията на гама-лъчението на двата радионуклида. Този резултат потвърждава важността на калибрирането на детектора, с източник с подходяща енергия. Тъй като, в реални условия, не винаги, е възможно да предвидим радионуклидния състав на замърсяването, възможно решение на този проблем, би било използването на спектрометрична система. Информацията за енергията на лъчението, може да се използва за избора на подходящия коефициент за ефективност, спрямо закона, описващ тази връзка за конкретната спектрометрична система (пример е даден на фиг. 2.2.1). Изпълнението на такъв експеримент е описано в следващата глава.

Оценка на постигнатата МДА и неопределеност

Измереният естествен фон на площадката, предвидена за експеримента е средно 0,08 $\mu\text{Sv/h}$. Ако поле с такава мощност на дозата, се формира само от радионуклида ^{137}Cs , можем да пресметнем какъв сигнал, трябва да се получи от детектора, поставен в това поле по формулата:

$$I_{bkg} = \varepsilon \cdot D \quad (5.7.1)$$

където:

I_{bkg} – скорост на броене на фон в [cps];

ε – ефективност на детектора по съответния радионуклид (в случая по ^{137}Cs) в [cps/ $\mu\text{Sv/h}$];

D – измерената мощност на еквивалентната доза в [$\mu\text{Sv/h}$].

Тоест, очакваният резултат е:

$$I_{bkg} = 210 \cdot 0,08 = 16,8 \approx 17 \text{ cps} \quad (5.7.2)$$

На практика, естественият фон не се формира, само от един радионуклид, а от множество естествени радионуклиди. Това, най-често, са радиоизотопите на К, $U_{\text{ест.}}$, Th, Rn, техните дъщерни продукти и др. Общият им енергиен спектър е богат на линии в областите, както под основната линия на ^{137}Cs (662 keV), така и над. Ефективността на детектора не е константа за всички енергии, а намалява с увеличаване на енергията. В следствие на това, една и съща мощност на дозата, може да се формира, както от голям брой импулси, с малка енергия, така и от малък брой импулси, с голяма енергия. Това обяснява защо използваната за експеримента детекторна система, отброява повече от 17 cps, а именно ≈ 27 cps.

Статистическата неопределеност би била $\sqrt{27} = 5,2$ cps, тоест всички измерени стойности в интервала 21,8 - 32,2 cps, ще се приемат за фонови. Теоретично, няма как при тези условия на измерване (детектор, време на интегриране, геометрия и гама-фон) да постигнем МДА (по скорост на броене) по-малко от 5,2 cps нетна стойност (нетна стойност от ^{137}Cs).

За откриване на замърсявания по непрекъснатия модел неопределеността не е от такова значение, както МДА. Все пак, можем да направим груба оценка, вземайки предвид броя импулси, отчетени за един интервал на интегриране. Оценка на неопределеността на фона е по-сложна, тъй като изисква добавянето на критерии за разграничаване на точките, в които се измерва фон от тези, в които се отчита замърсяване. Такова разграничаване, би имало смисъл при избор на модел на разпределение с дефинирана геометрична форма, тъй като при непрекъснатия модел такова разграничаване няма практически смисъл. Ако приемем използвания за определяне на МДА (по скорост на броене) интервал, от $\pm\sqrt{I_{bkg}}$ и за разграничаване на точките, в които се наблюдават само фонови стойности, можем да кажем, че общият им брой е около 100 (фиг. 5.5.1). Тоест времето за измерване на фон, може да се определи като 100 s или да се възприемат 100 отделни измервания на фона. С известни приближения, по-лесно би било да се пресметне общият брой импулси от фон за 100 s, а именно $100 \times 27 = 2700$ имп. Брутната стойност на импулсите в точката, с най-голяма отчетена стойност, над източника е 39 имп (за т.50). За така определен общ брой импулси за фон и брутна стойност в т.50, неопределеността би могла грубо да се оцени на:

$$\sqrt{\frac{1}{N_{tot}} + \frac{1}{N_{bkg}}} = \sqrt{0,02564 + 0,00037} = k \cdot 16,13 \% = 32,26 \% \text{ (при } k = 2)$$

(5.7.3)

Неопределеността би могла да има решаващо значение при второто облитане, с цел определяне на активността. Интегралния брой импулси за 130 s в точката на ИЙЛ №1 (близо до т.50 от непрекъснатия модел) е 10166 imp, тоест неопределеността би била:

$$\sqrt{\frac{1}{N_{tot}} + \frac{1}{N_{bkg}}} = \sqrt{0,00984 + 0,00037} = k \cdot 10,10 \% = 20,20 \% \text{ (при } k = 2)$$

(5.7.4)

За да се оцени неопределеността, при определяне на активността, трябва да се добави и неопределеността на ефективността. Тази неопределеност от своя страна, зависи от статистическата неопределеност на измерванията, направени по време на калибриране, както и неопределеността на активността на еталонния източник:

$$\begin{aligned} k \cdot \Delta A_{res} &= k \cdot \sqrt{\Delta A_{CAL}^2 + \frac{1}{N_{CALtotal}} + \frac{1}{N_{CALbkg}} + \Delta I_{res}^2} = \\ &= \sqrt{0,0025 + 0,0001 + 0,0001 + 0,010201} = \\ &= k \cdot 11,36 \% = 22,72 \% \text{ (при } k = 2) \end{aligned}$$

(5.7.5)

където:

- ΔA_{res} = неопределеността на получената активност;
- ΔA_{CAL} = неопределеността на активността на калибровъчния източник;
- $N_{CALtotal}$ = общият брой импулси отчетени по време на калибриране;
- N_{CALbkg} = фоновият брой импулси отчетени по време на калибриране;
- ΔI_{res} = неопределеността на резултата получен в скорост на броене.

ГЛАВА ШЕСТА. Експеримент по гама- спектрометрично картографиране с БЛС

При обследване на обекти или територии, за които няма достатъчно предварителна информация, има риск дадено замърсяване да бъде недооценено, дори след продължително измерване. За предпазване от тази ситуация, може да послужи анализ на енергийния спектър на гама-лъчението. Чрез него, може да бъде уточнен конкретния наличен радионуклид или коктейл от радионуклиди. За тази цел, е нужна спектрометрична детекторна система. Записът на измерената амплитуда на всеки един импулс, поставя по-високи изисквания към първоначалната аналогова и цифрова обработка – броячът е заменен с многоканален анализатор (МСА). Усложняването на системата прави разумно използването на почувствителен, макар и по-тежък, детектор. Завишаването на теглото, пък изисква БЛС с подобрени възможности. В тази глава е разгледан експеримент по гама- спектрометрично обследване, с помощта на БЛС.

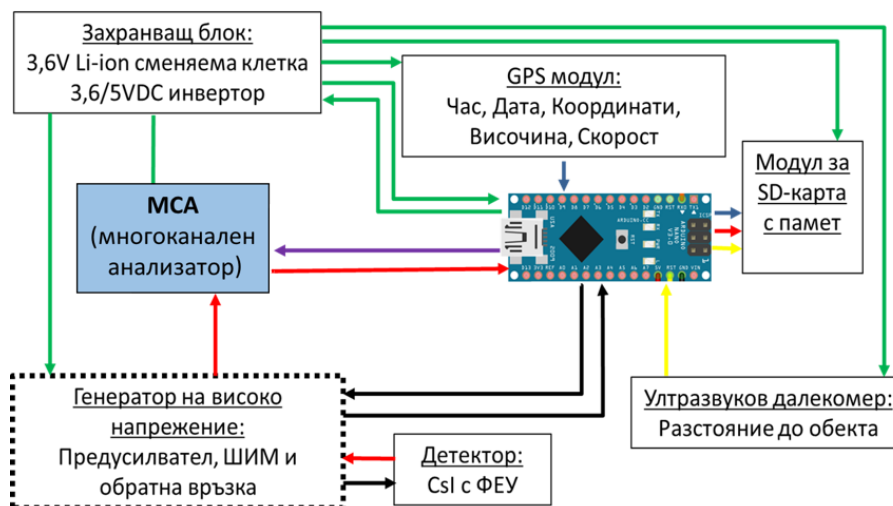
Цел

Целите на експеримент по гама- спектрометрично картографиране, се препокриват с целите на експеримента по картографиране на база на общата скорост на броене, като се

добавят и три нови, постижими след промени в детекторната система: оптимизиране на летателното време, с използването на детектор с по-голяма чувствителност; промяна на детекторната система към спектрометрична; създаване на гама-спектрометрична карта.

Избор на детектор и БЛС

За спектрометрични измервания, по-подходящ, би бил детектор № 5, който е от същият материал (CsI(Tl)), но с по-голям обем, което го прави по-чувствителен. За да се преустрои използваната в предишния експеримент броячна система, в спектрометрична, е достатъчно да се смени контролерът, използван за брояч, с многоканален анализатор (МСА) (фиг. 6.2.1).



Фиг. 6.2.1. Блок схема на спектрометричната система използвана в експеримента

МСА трябва да се избере така, че да отговаря на няколко изисквания. Първо – да има нужния брой канали. Това може да се определи чрез подхода, описан в т. 1.2.6 и по-конкретно формула 1.2.6.1. За целта, използваме предоставената ни от производителя на детектора, разделителна способност $\approx 6\%$ за ^{137}Cs (662 KeV) и енергиен обхват 0.1-3 MeV. Според 1.2.6.1:

$$N_{total} = \frac{3 \cdot 5}{0,622 \cdot 0,06} = \frac{15}{0,03732} \approx 402 \text{ канала} \quad (6.2.1)$$

От общия брой канали могат да бъдат извадени тези, отговарящи на енергии от 0 до 100 keV, където попада шума от електрониката и измерванията не са коректни.

$$N = N_{total} - N_{total} \frac{E_{min}}{E_{max}} = 402 - 402 \cdot \frac{0,1}{3} = 389 \text{ канала} \quad (6.2.2)$$

Тоест МСА трябва да разполага с минимум от 389 канала или по-конкретно входа на АЦП, трябва да има поне 9-битова дискретизация по амплитуда, еквивалентна на $2^9 = 512$ канала. Това може да се постигне от контролера Atmega328p (използван за брояч в предишния експеримент).

Вторият критерий за избор на МСА е скоростта на броене. Контролерът от предишния експеримент запазва ефективна 9-битова разделителна способност, при честота на дискретизация до около 40 kHz, което означава максимална теоретична скорост на броене 20 000 cps (по една измерена стойност на напрежението на импулса и една при отсъствие на импулс). Максималната скорост на броене, би могла да бъде достигната само, ако импулсите се появяват на равни интервали от време, но радиоактивния разпад е случайно събитие и

съответно не може да се предвиди в кой момент ще се прояви. Следователно, преди АЦП на Arduino контролера, трябва да се постави интегрираща верига, запазваща амплитудата на импулса идващ от ФЕУ до момента на дискретизация. Тя трябва да има функцията да се саморазрежда, възможно най-бързо, след този момент за да е готова за следващия импулс. Това става чрез обратна връзка с контролера, задействана при приключилото дискретизиране и записване на амплитудата на импулса. Скоростта на обработка на записа от контролера, е няколко порядъка по-висока от скоростта на дискретизация и процеса не създава значително мъртво време на системата. Предвижданата скорост на броене е от порядъка на 550 cps, пресметната на база на резултатите от предходния експеримент, но приравнена към по-високата чувствителност на новия детектор. Теоретично, максималната скорост на броене, е почти два порядъка по-висока, което би осигурило достатъчен запас, въпреки това, са направени лабораторни измервания на реални ИЙЛ, за да се потвърди стабилното поведение при необходимата скорост на броене. След като детекторната система не е стационарна, а монтирана на БЛС и разстоянието до ИЙЛ може лесно да се коригира, за настоящия експеримент, не е нужно да се предвиждат големи скорости на броене.

Другите критерии за избор на МСА, са свързани с размерите и консумацията на електрическа енергия. Тъй като контролера, използван в първия експеримент може задоволително да покрие необходимите изисквания, е използван именно такъв.

Детекторната система е сглобена върху легло от шуплест полиуретан, който да я защити от вибрации или удар, а отвън е покрита с по-твърда защитна обвивка, поддържаща компактна форма (фиг. 6.2.2).



Фиг. 6.2.2. Снимки на детекторната система със сцинтилатора използван за спектрометричното картографиране



Фиг. 6.2.3. Броячната детекторна система използвана в предишните експерименти (в дясно) до спектрометричната използвана в настоящия експеримент (в ляво)

Изискванията към БЛС са възможност за полет с ниска скорост, на малка височина и с възможност за зависване се запазват, както при първия експеримент, но с една разлика. Тъй като за спектрометричните измервания, се използва по-голям и тежък детектор, теглото на полезния товар на БЛС трябва да бъде поне 1,5 kg, тоест почти 5 пъти по голямо. За целта, квадрокоптерът е заменен с хексакоптер, с по-голяма подемна сила и по-добра стабилност, по време на полет (фиг. 6.2.4).



Фиг. 6.2.4. Хексакоптер DJI Matrice 600 използван за гама-спектрометричната карта

Подготовка на полета. Летателен план и калибриране на системата

За преследването на първата поставена цел оптимизиране на скоростта (и/или подобряване на МДА), експериментът е разделен на два етапа. Първи етап – сравнение между МДА на броячната система и МДА на спектрометричната. Целта е оптимизиране на скоростта, без да се променя МДА от предходния експеримент. Втори етап – спектрометрично обследване.

Измерванията по време на първия етап са свързани с определянето на МДА. Използваният метод описан в т. 5.7 за броячна система, може да се приложи и в този случай, но би бил твърде консервативен. На практика, със спектрометричната система не наблюдаваме, единствено общия брой импулси, а можем да извършим калкулацията описана в т. 5.7 за всеки ROI. Броят импулси от фона във всеки ROI е по-малък, като абсолютна стойност, което означава, че по-малък брой импулси, като нетна стойност, ще могат да бъдат възприети, като отклонение с достатъчна достоверност. За експеримента, по определяне на МДА, е направена серия от

измервания на различни височини, над източник от ^{137}Cs с определена активност. За да се намали летателното време, измерванията по определяне на МДА, са правени с окачване на детекторната система на дълга телескопична дръжка, над земята. Възможността лесно да се възпроизведе геометрията на измерване, с наземни технически средства, е голямо предимство за дистанционните методи използващи БЛС, пред тези използващи пилотируеми летателни средства. Целта на конкретното измерване, е да се определи зависимостта на нетното количество импулси в ROI отговарящ на ^{137}Cs , от височината. Резултатът е сравнен с теоретично пресметнатия, като се отчете обратния квадрат от разстоянието и затихване на гама лъчите във въздуха. При нормални условия на атмосферния въздух, теоретичната зависимост на скоростта на броене от височината, за точков източник би имала следния вид:

$$I = I_1 \cdot \frac{1}{h^2} \cdot e^{-\mu h} \quad (6.3.1)$$

където:

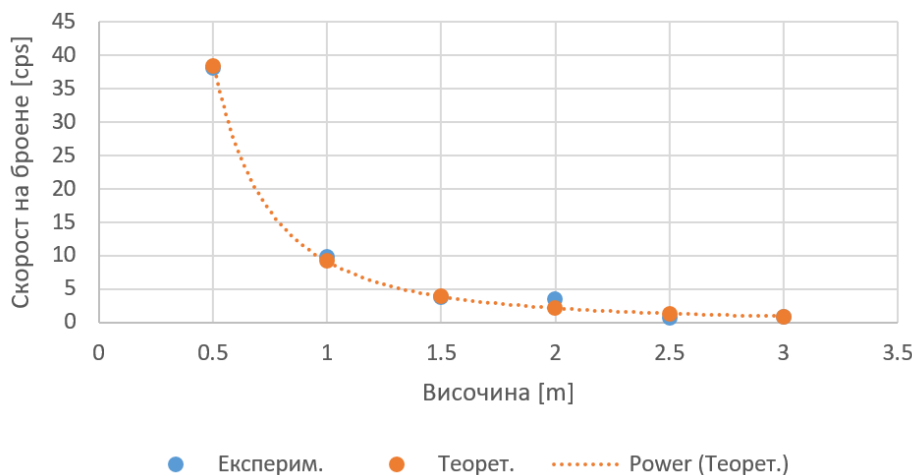
I = резултатната скорост на броене [cps];

I_1 = референтната скорост на броене (измерена на височина 1 m) [cps];

h = височината на полета [m];

μ = константа равна на 0.077 m^{-1} , оразмеряваща поглъщането на гама лъчите с енергия 662 keV (^{137}Cs) във въздух [m^{-1}] (NIST)[106].

Резултатите от експеримента, са сравнени графично с теоретичните на фиг. 6.3.1. Наблюдава се добро съвпадение, което показва, че уравнение 6.3.1, може да се използва, за да се пресметне височината, от която източника, би престанал да се отличава от фона, ако измерването се извършва за същия времеви интервал, за който се интегрира сигнала по време на картографиране.



Фиг. 6.3.1.
Зависимост между височина и нетна скорост на броене в ROI на ^{137}Cs за разработената гама-спектрометрична система над точков източник ^{137}Cs сравнена с теоретично пресметнатата по

(6.3.1)

Според фона на обследваната площадка от около 2,4 cps в ROI на ^{137}Cs , отчетен при няколко различни височини в рамките на 0,5 - 3 m, може да се пресметне минималната отличима скорост на броене по:

$$MDCS_{Cs-137} = \frac{\sqrt{t \cdot I_{bkg}}}{t} = \frac{\sqrt{6 \cdot 2,4}}{6} = 0,63 \text{ cps} \quad (6.3.2)$$

където:

$MDCS_{Cs-137}$ = минималната отличима скорост на броене [cps];

t = времето за интегриране на сигнала от видима зона (прелитане над кръг с радиус 3 m със скорост 1 m/s), равно на 6 s [s];

I_{bkg} = измерения фон на площадката в ROI на ^{137}Cs [cps].

След като знаем и пълната скорост на броене за фона в целия спектър $I_{bkg} = 112$ cps, по 6.3.2 можем да пресметнем $MDCS_{total} = 4,32$ cps, което е близо 7 пъти по-голяма стойност от достигнатата чрез спектрометрия.

Първата оптимизация в сравнение с експеримент по картографиране, с по-малък детектор и без спектрометрия, би могла да бъде в скоростта на летене. За да пресметнем новата скорост, с която можем да постигнем МДА от другия експеримент трябва да знаем, каква би била фоновата скорост на броене на една и съща площадка от двата детектора. Тази информация би могла да се предположи и на база на каталожната чувствителност на двата детектора, съответно $\varepsilon_1 = 210$ cps/ $\mu\text{Sv/h}$ и $\varepsilon_2 = 1500$ cps/ $\mu\text{Sv/h}$ (662 keV). Тоест, фоновата скорост на броене ще бъде около $1500/210 \approx 7,14$ пъти по-висока, а $MDCS_{total}$, съответно ще се увеличи $\sqrt{7,14}$ пъти. В същото време оклика в детектора предизвикан от източника (нетната скорост на броене), ще се увеличи 7,14 пъти. От друга страна, с намаляване времето на измерване на фон 7,14 пъти ще получим същата $MDCS_{total}$ и същия брой импулси от източника. Може да се обобщи, че отношението между скоростите, е обратнопропорционално на отношението на ефективностите на двата детектора:

$$\frac{\sqrt{t_1 D \varepsilon_1}}{\varepsilon_1 t_1} = \frac{\sqrt{t_2 D \varepsilon_2}}{\varepsilon_2 t_2} \Rightarrow \frac{t_2}{t_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (6.3.3)$$

където:

t_1, t_2 = времето за прелитане на видимата зона (кръг с радиус 2 m – от предишния експеримент) [s];

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ = ефективността на съответния детектор [cps/ $\mu\text{Sv/h}$];

D = мощността на дозата в точката на детектора [$\mu\text{Sv/h}$].

Тоест, без загуби на МДА, с по-чувствителния детектор скоростта на полет може да се увеличи на 7,14 m/s.

Допълнителното подобряване на МДА, чрез спектрометрия, също би могло да се използва за увеличаване на скоростта на полет. Вземайки предвид 6.3.3 и измерените скорости на броене в ROI на ^{137}Cs (2,4 cps) и в целия спектър (112 cps) можем да формулираме уравнението:

$$\frac{\sqrt{112 t_2}}{t_2} = \frac{\sqrt{2,4 t_3}}{t_3} \quad (6.3.4)$$

където:

t_2 = времето t_2 изчислено по 6.3.3, равно на 0,56 s [s];

t_3 = оптимизираното време на прелитане на видимата зона (кръг с радиус 2 m) при използване на спектрометрия и запазване на МДА [s];

За t_3 получаваме 0,012 s, а за скоростта оптимизирана, чрез по-големия детектор и спектрометрия, резултатът е около 333 m/s. Такава висока скорост няма практически смисъл, а

по-скоро показва сериозните преимущества на по-големия детектор и използването на спектрометричния метод за откриване на източници.

По (6.3.1) можем да оценим и разликата в максималната височина на полета за откриване на един и същ източник със и без спектрометрия, но само ако познаваме добре различните компоненти на фона, които ще имат различен принос при по-драстични промени във височината.

Следва втория етап – гама спектрометрично обследване. На база на опита, натрупан по време на експериментите с БЛС и броячна детекторна система, за настоящия експеримент е избрана по-голяма територия за обследване. Целта е да се намали ефектът от отклоненията на използваната система за позициониране. Освен това, е избрана територия, която да бъде в извън-градска среда, далече от високи сгради, намаляващи броя на видимите GPS-сателити. При първоначалното облитане, отново се приема непрекъснатия модел на разпределение (фиг. 6.3.2).



Фиг. 6.3.2.
Визуално представяне на летателния план за гама спектрометричното обследване

За разлика, от предходния експеримент (с по-малък детектор), разстоянието между профилите е увеличено от 2 m на 6 m, а височината от 2 m на 3 m. За точков източник, увеличаването на разстоянието с 50%, би намалило отклика в детектора с ~45%, което ще бъде компенсирано от това, че използвания за спектрометричното обследване детектор има многократно по-голяма чувствителност (над 700% разлика). Въпреки повишаването на чувствителността, не е избрана по-висока скорост на полета (от 1 m/s), за да се осигури, възможно, по-голям брой, импулси в спектъра набран в рамките на всяко видимо от детектора петно.

За новата детекторна система и новите условия на измерване е необходима нова калибровка. Тъй като системата е спектрометрична, не е достатъчно да се определи ефективността само за един радионуклид, а трябва да се построи кривата, описваща енергийната зависимост на ефективността, на база на колкото е възможно повече гама линии (фиг. 2.2.1). Производителят на сцинтилатора препоръчва използването на ^{241}Am (60 keV), ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1173 keV) и ^{60}Co (1333 keV). Тъй като долния енергиен праг на нашата детекторна система е 100 keV, калибровката по ^{241}Am (60 keV) губи своя смисъл и не е направена. За всеки един от останалите нуклиди се анализира спектър с поне 10000 импулса чиста площ на фотопика. С тази площ, се работи отново по начина, описан в т. 5.3. При спектрометричното измерване за определянето на фона, се взема общият брой импулси, в подложката на

съответния пик. По този начин за всеки конкретен спектър, може да бъде определен фона и не е нужно да се правят отделни фонове измервания. Ефективността на детекторната система, като отношение на активността към скоростта на броене в съответния пик е пресметната по:

$$\varepsilon_x = \frac{A_x}{I_{tot} - I_{bkg}} \quad (6.3.3)$$

където:

A = активността на калибровъчния източник [kBq];

I_{tot} = брутната стойност на скоростта на броене за съответния пик на пълно поглъщане [cps];

I_{bkg} = фоновата скорост на броене – подложката под пика на пълно поглъщане [cps];

ε_x = ефективността при измерване на радионуклид x в [kBq/cps].

При калибрирането процедурата е изпълнена с два сертифицирани източника, съдържащи ^{137}Cs и ^{60}Co (1333 keV). За да се подsigури калибровка, отговаряща на условията на измерване при зависване (1 m) и удобна за привеждане към други височини, е извършено калибриране от разстояние 1 m. Резултатите за ефективностите са следните:

$$\varepsilon_{1m, \text{Cs-137}} = \frac{1088}{31,8 - 2,4} = 37,01 \text{ [kBq/cps]} \quad (6.3.4)$$

$$\varepsilon_{1m, \text{Co-60}} = \frac{259}{11,9 - 1,6} = 25,15 \text{ [kBq/cps]} \quad (6.3.5)$$

Изпълнение на експеримента и първоначална обработка на данните

След първото облитане отново е направен експресен анализ на записите, с цел определяне на наличието и формата на разпределение на замърсяването. Анализът се състои в начертаване на 5 графики, по една за всеки ROI, който е обект на наблюдение, с цел оценка на NORM (табл. 3.2.1) и още 2 за ROI съответно за ^{137}Cs (562 keV - 762 keV) и ^{60}Co (1070 keV – 1270 keV и 1230 keV – 1430 keV).

Благодарение на натрупания опит от предишните експерименти, графиките се начертават, директно под формата на карти (като например фиг. 5.6.1), а не като времеви диаграми (фиг. 5.5.1). За целта, на преносимия компютър, използван за експресен анализ, е инсталиран софтуерът ArcMap (ESRI ArcGis). Използваният, в предходния експеримент, Excell 3D Map, не може да предостави добра разделителна способност при малките мащаби на обследваната територия (фиг. 6.4.2).

Изборът на трите прозореца, отговарящи на енергиите на двата техногенни радионуклида (^{137}Cs и ^{60}Co), е провокиран от това, че те са поставените, за целите на експеримента, източници и не по-малко важно – те са едни от, най-често, използваните в индустрията. Наблюдавайки общия брой импулси, не могат да се установят сериозни отклонения на точно определено място, тоест, не може еднозначно да се установи наличието на точков източник. След изграждане на карта, на скоростта на броене в ROI на ^{137}Cs , отчетливо се вижда предполагаем точков източник.

След първото облитане, отново е направен преглед на данните и във вид на карта, с помощта на инструмента Excel 3D Map (фиг. 6.4.3 и 6.4.4), но резултата не е задоволителен, поради липсата на подходящи допълнителни софтуерни инструменти за подчертаване на

нужната информация. За това, се предпочита използването на специализиран софтуер за картографиране, като ArcGis.



Фиг. 6.4.4. Предварителен оглед на резултатите, във вид на карта, генерирана с Microsoft Excel, за ROI на ^{137}Cs . Вижда се предполагаем точков източник, но възможностите на софтуера не позволяват постигане на по-ясна карта

Летателният план за втория полет, с цел определяне на активност включва зависване над позицията, в която се забелязва наличие на точков източник. Времето за зависване е 300 s, а точните координати се определят по метода, описан в т.5.4.

Избор на модел на откритото замърсяване

След експресния анализ на записите, на място, е установено наличие на един точков източник. Следователно, моделът, който би бил най-удачен за описване на замърсяването, е точков. Критичен момент, е точното определяне на местоположението на източника. С наличната система за позициониране, е възможно да възникнат отклонения от 2,5 до 4 m (това е разгледано по-подробно в т.6.6). За да се елиминира това отклонение, е възможно откриване на източника с ръчно управление на БЛС, за което е нужна допълнителна комуникационна връзка, изпращаща информация за скоростта на броене, в реално време. Към момента, такава връзка, не се използва. За сметка на това, се използва видеокамера, която предава изображение, в реално време, на пилота, намиращ се на земята. Така може да се позиционира, изключително точно, БЛС, ако източникът е визуално забележим. При търсене на горещи частици, с миниатюрни размери, този метод не е приложим.

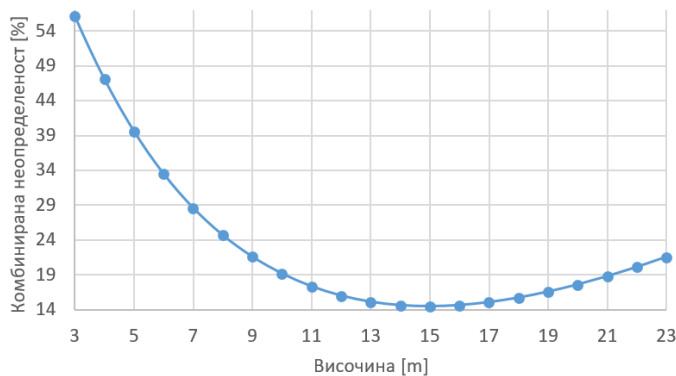
За описване на естествената радиоактивност, е използван непрекъснатият модел за всеки един от наблюдаваните радионуклиди.

Допълнителен полет

След приключване на първоначалния анализ на данните, на място, и установяване наличието на точков източник, неговите координати се задават, като точка на зависване във втория полет. Целта на втория полет, е по-точното определяне на активността, което се постига след измерване, с по-голяма продължителност или от по-малка височина. При такова измерване, от съществено значение, е определянето на координатите на източника и точното позициониране на БЛС над него. Системата за позициониране на конкретното БЛС, при идеални условия, може да има отклонения от 1,5 m, в хоризонталната равнина. При такива отклонения, не е разумно, да се намалява разстоянието до източника, чрез допълнително намаляване на височината под 3 m, тъй като хоризонталните отклонения, ще влияят твърде силно на

разстоянието детектор-източник. Менящото се, по посока и големина, хоризонтално отклонение на навигационната му система, кара БЛС да се движи между точки, чиито осреднени координати са зададените. Тоест, за достатъчно дълъг период на зависване, вероятностното разпределение на реалните координати, ще има максимум в точката на зададените, като вероятността за отклонения над 1,5 m, рязко ще намалява. Чрез записите на координатите, направени от детекторната система, не може да се направят по-сигурни изводи, тъй като, те ще имат още по-широко разпределение. Това се дължи на вероятността за наслагване на двете отклонения, когато БЛС, физически се премести, в преследване на неточни координати, а детекторната система отчете координати с допълнително отклонение, в същата посока (отново в следствие от неточността). Чрез решаване на проста геометрична задача, можем да определим, каква допълнителна неопределеност може да възникне, в следствие на отместване от координатите на източника, както и от неточното им определяне, по време на сканиращия полет. Такава оценка е направена в т. 6.9.

Благодарение на опита, натрупан по време на предходните експерименти с БЛС, е направено предположение, свързано с оптимизиране на височината на полета. То е базирано на факта, че с повишаване на височината, отклонението при позициониране намалява приноса си за неопределеността, а по-ниската скорост на броене, увеличава неопределеността. Кривата на фиг. 6.6.2. описва комбинираната неопределеност от отклонението, при позициониране и статистическата неопределеност, зависеща от броя импулси, като функция на височината. С увеличаване на височината, броят импулси намалява с квадрата на разстоянието, и в същото време, заради поглъщането във увеличаващия се, по дебелина слой въздух.



Фиг. 6.6.2. Графика описваща зависимостта на комбинираната неопределеност (съставена само от неточност на позициониране и статистика на броенето) от височината

Комбинираната неопределеност е пресметната по следния начин:

$$u_c = \sqrt{\left(1 - \frac{h^2}{2\Delta_{GPS}^2 + h^2}\right)^2 + \frac{h^2}{N_1}} \quad (6.6.1)$$

където:

h = относителна височината на полета;

Δ_{GPS} = отклонението при позициониране еднакво по O_x и O_y ;

N_1 = референтен брой импулси, приблизително равен на 100 000 при 1 m височина.

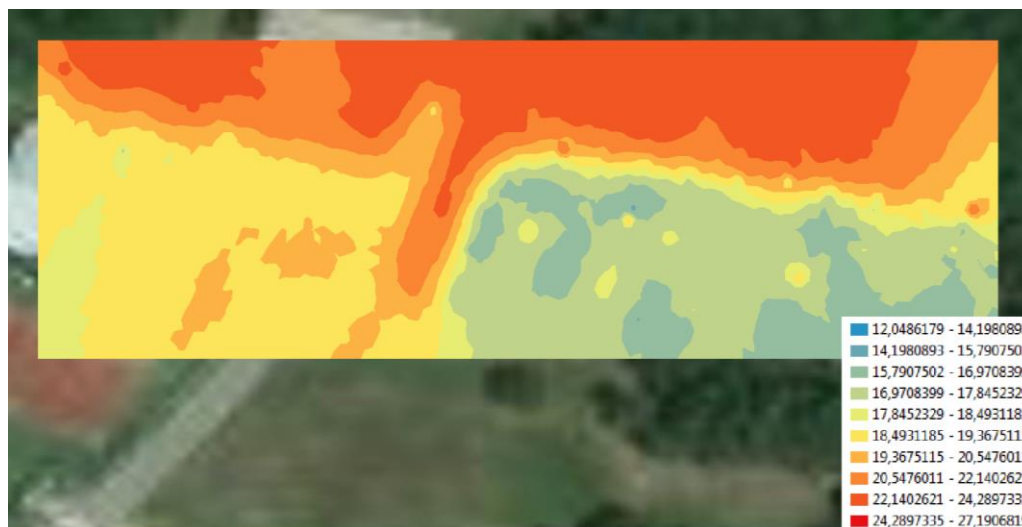
Избран е такъв брой импулси, тъй като той би осигурил приемлива статистическа неопределеност от 1% при разстояние от 3 m. Този брой импулси намалява с увеличаване на височината по закона описан в 6.3.1.

При височина от 15 m за отброяване на 10 000 имп, ще е необходимо твърде дълго време, което не може да се постигне от познатите към момента БЛС. Практически-полезен

извод от направения анализ е, че е нужна по-точна навигационна система, за да се постигне по-точно измерване на активността. Докато, при използване на наличната, увеличаването на височината, дори два-три пъти, по-скоро би намалило неопределеността, от колкото да я увеличи.

Обработка на информацията и визуализиране

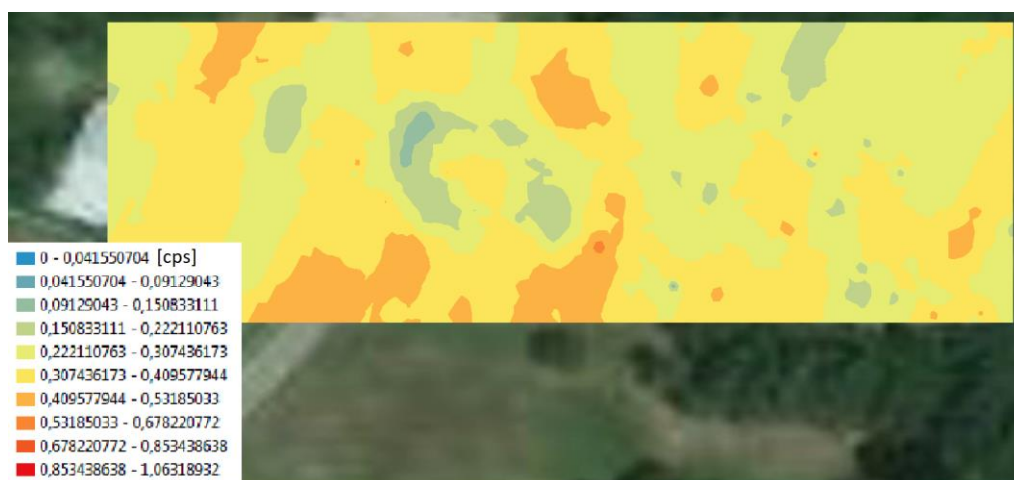
Скоростта на броене, е първичната информация от обследването. Картата на общата скорост на броене е представена на фиг. 6.7.1.



Фиг. 6.7.1.

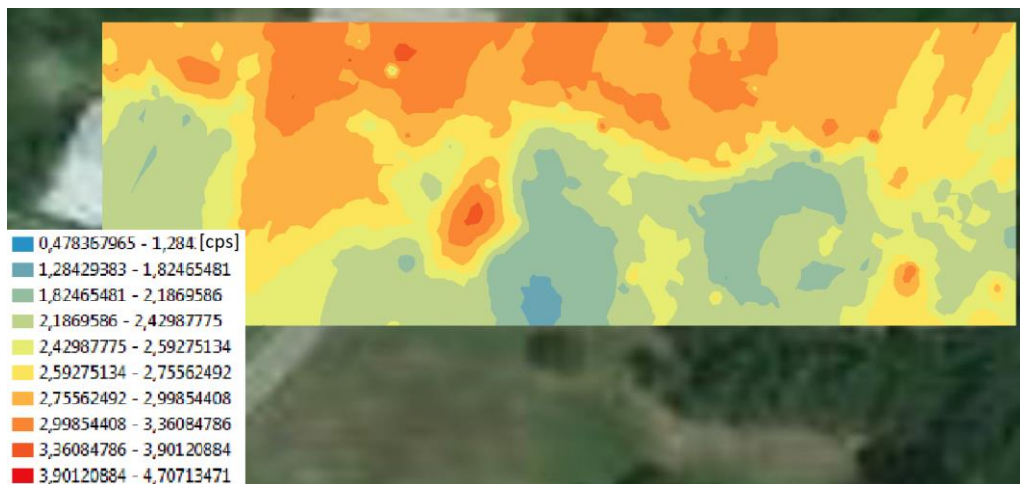
Изводка от карта на скоростта на броене [cps] в общия ROI (410-2810 keV)

Така представената карта, предполага замърсяване, в зоните, оцветени в по-тъмни нюанси на оранжево. Проверка на това твърдение се прави с изграждане на карти, на всеки отделен ROI, отговарящ на даден радионуклид. Извадки от такива карти са представени на следващите фигури (от фиг. 6.7.2 до фиг. 6.7.6).

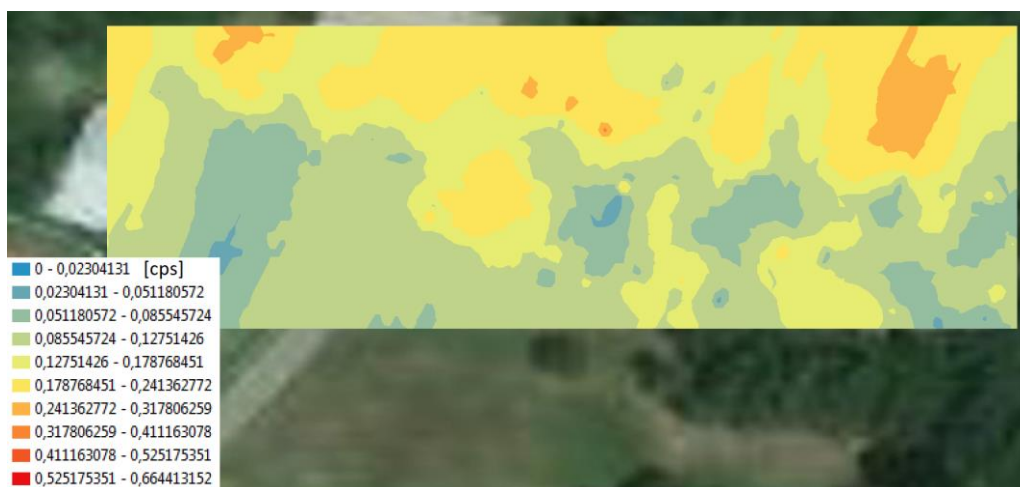


Фиг. 6.7.4.

Изводка от карта на нетната скорост на броене в ROI на U (1660-1861 keV)



Фиг. 6.7.2.
Извадка от карта на нетната скорост на броене в ROI на ^{40}K (1370-1571 keV)



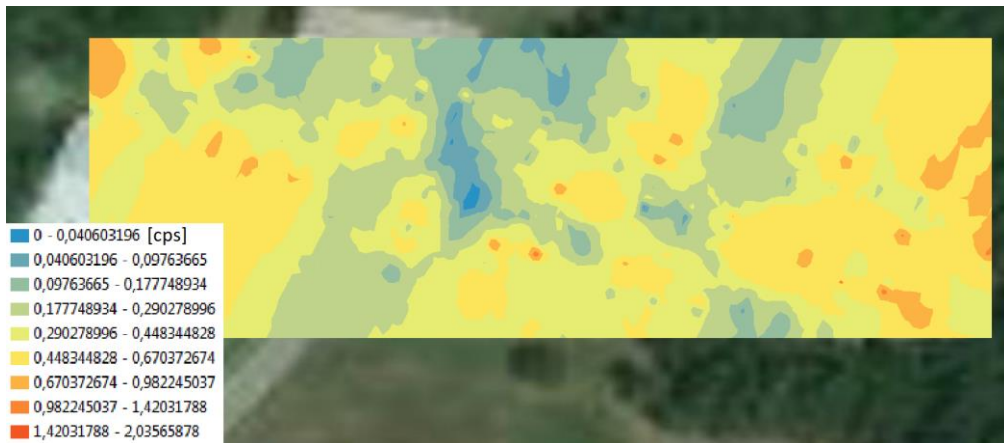
Фиг. 6.7.3.
Извадка от карта на нетната скорост на броене в ROI на Th (2410-2811 keV)

След анализ на картите, представени на фиг. 6.7.2 и 6.7.3 става ясно, че завишената активност (в тъмно оранжевите зони) на картата на общата скорост на броене (фиг. 6.7.1), се дължи на повишена концентрация на естествените радионуклиди ^{40}K и Th. Тяхното наличие показва, че обследваният терен, е покрит с почва. Това твърдение е вярно (забележимо от въздушните снимки – фиг. 6.7.1). На местата с по-ниска скорост на броене, на импульсите, идващи от тези естествени радионуклиди, има асфалтова покривка върху почвата. Тоест, отново имаме потвърждение на грубата направената оценка на получените първични резултати.



Фиг. 6.7.5.
Извадка от карта на нетната скорост на броене в ROI на ^{137}Cs . Долу, в дясно, се забелязва петно наподобяващо ефекта на точков

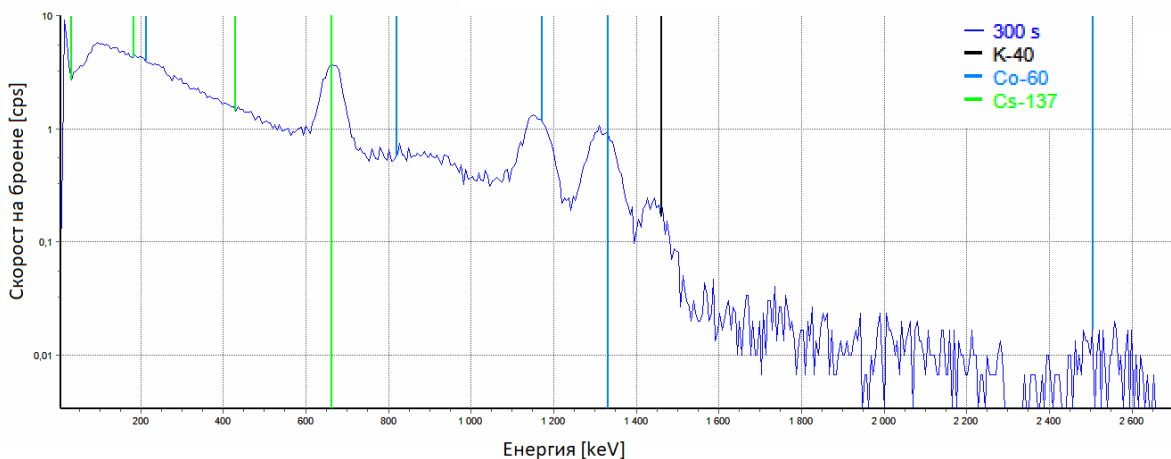
ИЗТОЧНИК



Фиг. 6.7.6. Извадка от карта на нетната скорост на броене в ROI на ^{60}Co (1230-1430 keV)

При преглед на картата на общия брой импулси в целия спектър (410-2810 keV) не може еднозначно да се определи наличието на точков източник (фиг. 6.7.1), докато на картата на ROI на ^{137}Cs (фиг. 6.7.5), ясно се вижда максимум на скоростта на броене, предполагаща наличието на такъв. Този ефект е нагледно доказателство на това, как спектрометричния детектор, би бил по-полезен, за откриване на техногенни радионуклиди, от чисто броячна система. На база на това доказателство считаме, че една от целите на експеримента – подобряване на МДА, за постигната и експериментално потвърдена.

Резултатът от втория полет (със зависване на височина 1 m), е спектър, натрупан за по-продължително време (300 s) (фиг. 6.7.7).



Фиг. 6.7.7. Спектър, натрупан от височина 1 m над точковия източник, от който става ясно, че са открити техногенни радионуклиди ^{137}Cs и ^{60}Co и се определя тяхната активност

От сравнение на първичните карти за ROI, на техногенните радионуклиди, може да се обобщи, че в позицията на точковия източник, първоначално, е открит само ^{137}Cs , докато при втория полет, със зависване на височина 1 m, едновременно се отчита присъствие на гамалинията в ROI на ^{137}Cs и по една в двата ROI на ^{60}Co . Тоест, в точковия източник присъстват тези два радионуклида и тяхната активност е по-висока от МДА.

Резултатът от измерването на активността, може да се получи, чрез пряко използване на ефективността, поради съответствие между условията на калибриране и измерване. Нетната

скорост на броене за ^{137}Cs се определя, като се премахне подложката (фона) от пика, отговарящ на енергия 662 keV. Това се изпълнява автоматично от използвания софтуер за анализ на спектри SMI.

При нетна скорост на броене в прозореца на ^{137}Cs (562-763), равна на 27,9 cps, изчислената активност на ^{137}Cs в точковия източник е:

$$A = I_{\text{net}} \cdot \varepsilon_{1\text{m,Cs-137}} = 27,9 \cdot 37,01 = 1032,58 \text{ kBq} \quad (6.7.1)$$

Тъй като, изкуствено поставеният източник ^{137}Cs е с активност $1088 \text{ kBq} \pm 5\%$, можем да кажем, че има задоволително съвпадение между реалната и измерената стойност на активността.

При нетна скорост на броене в прозореца на ^{60}Co (1230-1430) равна на 10,4 cps, изчислената активност на ^{60}Co в точковия източник е:

$$A = I_{\text{net}} \cdot \varepsilon_{1\text{m,Co-60}} = 10,4 \cdot 25,15 = 261,56 \text{ kBq} \quad (6.7.2)$$

Изкуствено поставеният източник ^{60}Co е с активност $259,01 \text{ kBq} \pm 5\%$ (към датата на провеждане на експеримента), което отново показва добро съвпадение между реалната и измерената стойност на активността.

Оценка на постигнатата МДА и неопределеност

За откриване на замърсявания по непрекъснатия модел, неопределеността не е от такова значение, както МДА. Все пак, можем да направим груба оценка, вземайки предвид броя импулси, отчетени за един интервал на интегриране, в пика на пълно поглъщане. Оценката на неопределеността, на фона при спектрометрично обследване, зависи и от критерия, по който се определя границата между фона и нетната площ на пика. Друг важен въпрос, е дали ще бъде осреднен фона от всички спектри или ще се определя фона за всеки спектър. Определянето на средна стойност на фона от всички спектри има смисъл, предимно за техногенните радионуклиди, чието присъствие не е задължително и, най-вероятно, не са равномерно разпределени. Ако се осредни стойността на фона от всички измервания, то неопределеността от измерване на фона, ще бъде пренебрежима. Ако се разглежда фона, измерен за всяка видима от детекторите зона (кръг с радиус 3 m), при скорост 1 m/s и съответно време за интегриране 6 s, може да се направи оценка на общия брой отчетени импулси, като се умножи скоростта на броене по времето. При скорост на броене в ROI на ^{137}Cs от 2,4 cps, нетна скорост и 5 cps обща скорост на броене, можем да оценим комбинираната разширена неопределеност за този ROI, като:

$$k \cdot u_c = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{tot}}} + \frac{1}{N_{\text{bkg}}}} = \sqrt{0,03(3) + 0,0694(4)} = k \cdot 32,06 \% = 64,12 \% \text{ (при } k = 2) \quad (6.8.1)$$

МДА може да се определи по същия критерий, като скоростта на броене трябва да се умножи по съответната ефективност за ^{137}Cs на разстояние 3 m. За определяне на ефективността за височина 3 m е използвана функцията, охарактеризираща ефективността на детектора във височина (6.3.1). За стойността на МДА по време на първия полет, получаваме:

$$\text{МДА}_{\text{първи полет}} = 0,63 \text{ cps} \cdot 388,51 \text{ kBq/cps} = 244,76 \text{ kBq} \quad (6.8.2)$$

При втория полет фона и нетната скорост на броене в пика на ^{137}Cs , се определят от събрания за 300 s спектър, над откритото замърсяване. При тази ситуация, се предполага, че наличието на замърсяване, вече е установено и оценката на стойността на МДА, няма практически смисъл. От по-съществена важност е оценката на неопределеността. След анализа на събрания за 300 s спектър над точковия източник, са определени следните стойности: интегралния брой импулси в ROI на ^{137}Cs е 9480 imp; нетната стойност е 8370 imp; фона съответно 1110 imp. Тогава неопределеността би била:

$$u_c = \sqrt{\frac{1}{N_{tot}} + \frac{1}{N_{bkg}}} = \sqrt{0,000106 + 0,00090} = k \cdot 3,17 \% = 6,34 \% \text{ (при } k = 2)$$

(6.8.3)

За да се оцени неопределеността, при определяне на активността, трябва да се добави и неопределеността на ефективността. Тази неопределеност, от своя страна, зависи от статистическата неопределеност на измерванията, направени по време на калибриране, както и неопределеността на активността на еталонния източник:

$$\begin{aligned} k \cdot \Delta A_{res} &= k \cdot \sqrt{\Delta A_{CAL}^2 + \frac{1}{N_{CALtotal}} + \frac{1}{N_{CALbkg}} + \Delta I_{res}^2} = \\ &= \sqrt{0,0025 + 0,0001 + 0,0001 + 0,0317} = \\ &= k \cdot 18,55 \% = 37,1 \% \text{ (при } k = 2) \end{aligned} \quad (6.8.4)$$

където:

ΔA_{res} = неопределеността на получената активност;

ΔA_{CAL} = неопределеността на активността на калибровъчния източник;

$N_{CALtotal}$ = общият брой импулси отчетени по време на калибриране;

N_{CALbkg} = фоновият брой импулси отчетени по време на калибриране;

ΔI_{res} = неопределеността на резултата, получен в скорост на броене.

Допълнителна, и то много по-значителна, неопределеност възниква от неточността на определяне на височината. В много ситуации, точната височина, е трудно да се определи, поради неясното разположение на източника, спрямо предметите около него, които могат да заблудят използвания ултразвуков далекомер. Такива предмети, биха могли да бъдат паднали листа, клони, или ниска растителност, а след аварийна ситуация, може да се очакват и много други, които могат да внесат от порядъка на 15-20 % неопределеност. При силно начупен релеф на повърхността, неопределеността ще се увеличи, поради ширината на основния лъч на далекомера (30°), като може да достигне 40% и дори повече. Не рядко срещана ситуация, е пренасяне на горещи частици върху твърди повърхности, което е симулирано в нашата опитна постановка. Тогава неопределеността на разстоянието, зависи само от далекомера, за който експериментално установената е около 0,33 %. Поради относителната ѝ несъщественост и за улеснение, тя няма да бъде взета предвид в по-нататъшните пресмятания.

Исклучително съществена неопределеност възниква от неточността на метода за позициониране с използваните, до момента, технически средства. Отклонението, което допуска производителят на БЛС, е в рамките на 1,5 m. Отклонението на GPS приемника на детекторната система е до 2,5 m. И двете стойности са значителни и почти съизмерими с видимата зона на детекторите, и биха могли да внесат голяма неопределеност, при определяне на позицията на замърсяването, но още по-критични биха могли да бъдат отклоненията при определяне на

активността. За да се осъществи това, БЛС трябва да зависи точно над източника, при което може да възникнат две отклонения. Първото е от неточно определяне на позицията на източника. При идеалните условия, разгледани в експеримента, с броячна система, не е допуснат такъв вариант и е представен математически модел за определяне на източника, когато се намира между точките на запис. В настоящия експеримент, са установени очакваните отклонения. За да се оцени неопределеността в оценката на активността, може да се реши една проста геометрична задача, определяща разликата в разстоянието източник-детектор при максимални противоположни хоризонтални отклонения. Ако сумата от допустимите отклонения на БЛС и детекторната система по O_x е:

$$1,5 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 4 \text{ m} = x \quad (6.8.5)$$

и съответно отклонението по O_y е:

$$1,5 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 4 \text{ m} = y \quad (6.8.6)$$

то разстоянието r (фиг. 6.8.1) е равно на:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} = 6,4 \text{ m} \quad (6.8.7)$$

При увеличаване на разстоянието от 3 m до 6,4 m, скоростта на броене ще се намали ($6,4 / 3)^2 = 4,55$ пъти (или със 78 %). Тоест, е възможно активността да бъде недооценена с до 78 %.

Вземайки предвид отклонението на позиционирането, което може да доведе само до недооценяване се получава:

$$\begin{aligned} k. u_c &= \sqrt{\frac{1}{N_{tot}} + \frac{1}{N_{bkg}} + \frac{78^2}{100^2}} = \sqrt{0,03(3) + 0,0694(4) + 0,6084} = k. 84,33 \% = \\ &= 168,7 \% \text{ (при } k = 2) \end{aligned} \quad (6.8.8)$$

Оценката на МДА и неопределеността за ROI на ^{60}Co се пресмята по аналогичен начин. По-ниска МДА и неопределеност могат да се постигнат, чрез включване и на допълнителен прозорец, в който попадат импулсите от другата значителна гама- линия на ^{60}Co (1173 keV).

ГЛАВА СЕДМА. Формулиране на изисквания към мисиите за дистанционно гама спектрометрично обследване

При изпълнение на мисии по гама спектрометрични обследвания, често има редица допълнителни изисквания към въздухоплателното средство, без значение дали е безпилотно или пилотируемо. Конкретно за ситуациите, когато се изпълняват секретни разузнавателни мисии, важен критерии за избора на летателно средство представлява неговата „откриваемост“ от радарните системи. В такива случай е важно неговата ефективна отразяваща повърхност (ЕОП) да бъде намалена, както и да се сведе до минимум радиокомуникацията, по време на полет, за сметка на автопилот (при БЛС). От друга страна, в ситуациите, в които гама-спектрометричното обследване се прави близо до район с често прелитащи въздухоплателни средства, е необходимо „видимостта“, на използваното летателно средство, за радарните системи, да бъде подобрена, което може да стане отново чрез изкуствено манипулиране на ЕОП. Темата е актуална и набира популярност, поради което е разгледана и доразвита в

настоящата дисертация, въпреки, че намира приложение и за мисии, различни от гама-спектрометричното обследване.

Изкуствено манипулиране на ЕОП

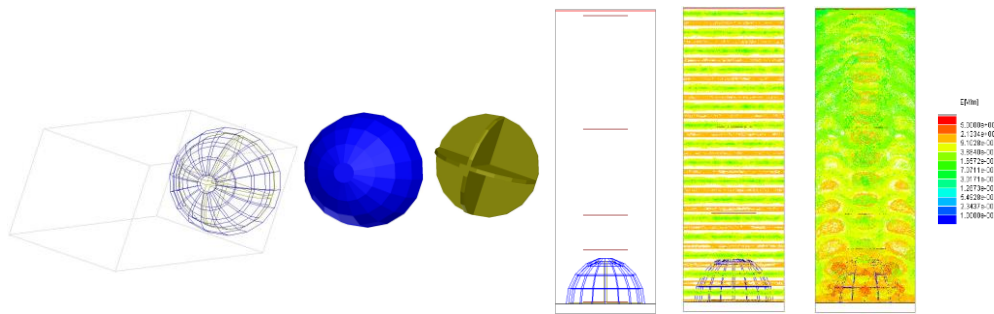
На база на натрупан опит по теоретичното и експерименталното определяне на ЕОП са изготвени бакалавърската и магистърската ми дипломни работи. В първата, съм засегнал проблема теоретично, като експериментално съм определил характеристиките на антени използвани за радиолокация и полицейски радари в Ка обхват (И. Илиев, 2013)[60]. Темата на магистърската ми работа е именно ЕОП. Направени са модели за електромагнитни симулатори и са сравнени с реални измервания на различни обекти, специално разработени за повишаване на ЕОП (И. Илиев, 2013)[61].

Увеличаване на ЕОП

При проектиране на гражданските въздухоплавателни средства, задължително се предвижда възможен удар с птица, но корпусът, батерията и двигателите, дори на най-малкото БЛС, се състоят от множество метални части, които, за разлика от костите и тъканите на птицата, биха имали много по-разрушителен ефект при съприкосновение с пилотируемо въздухоплавателно средство. Това е един, от най-често повтаряните сценарии, поради който не се допуска използването на БЛС, в близост до места с нископрелитащи самолети. В нашия случай, при дистанционно изследване на радиационната обстановка, именно в такава среда от въздуха, една възможна предпазна мярка, би било, именно увеличаването на ЕОП на БЛС. Това може да стане просто, с поставяне вътре в корпуса, на силно-отразяващи пирамидални структури, изработени от олекотени материали с метализирано покритие. За да не се влошават аеродинамичните характеристики на БЛС, върху този тип отражатели, трябва да се сложи радиопрозрачен похлупак (радом), с диелектрична проникваемост, близка до тази на въздуха. Един широко използван отражателен обект в предната (лицевата) част на БЛС, е фигура, състояща се от четири трихедрала върху една обща основа, като всеки от тях има по две общи стени с останалите (Фиг. 7.1.1.1). Странично, на дълго БЛС, може да се постави отражател (обект 1), съставен от шест трихедрала, подредени в редица. За измерване на ЕОП, се използва референтен отражател с $ЕОП = 2 \text{ m}^2$.



Фиг. 7.1.1.1. Преден отражател (обект 2) от тип “кръстачка”, съставен от четири трихедрала (вляво); страничен отражател (обект 1), съставен от шест трихедрала, подредени в редица (в средата) и референтна мярка за $ЕОП = 2 \text{ m}^2$ (вдясно)

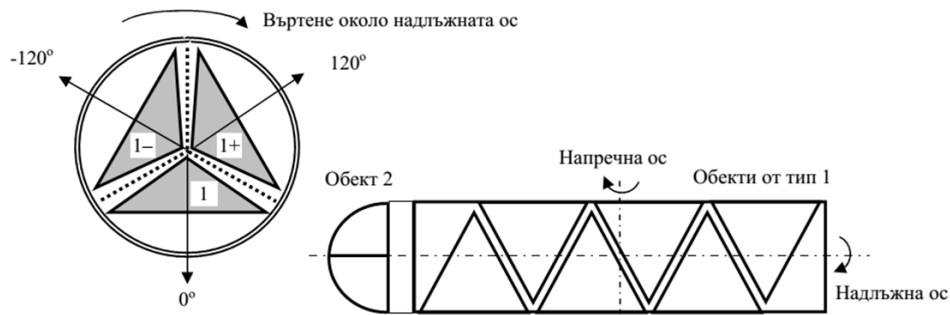


Фиг. 7.1.1.2. 3D модел на „кръстачка“ и защитен капак (радом) в излъчваща кутия (radiation box), и представяне на падащата плоска вълна и отразената вълна от целия обект

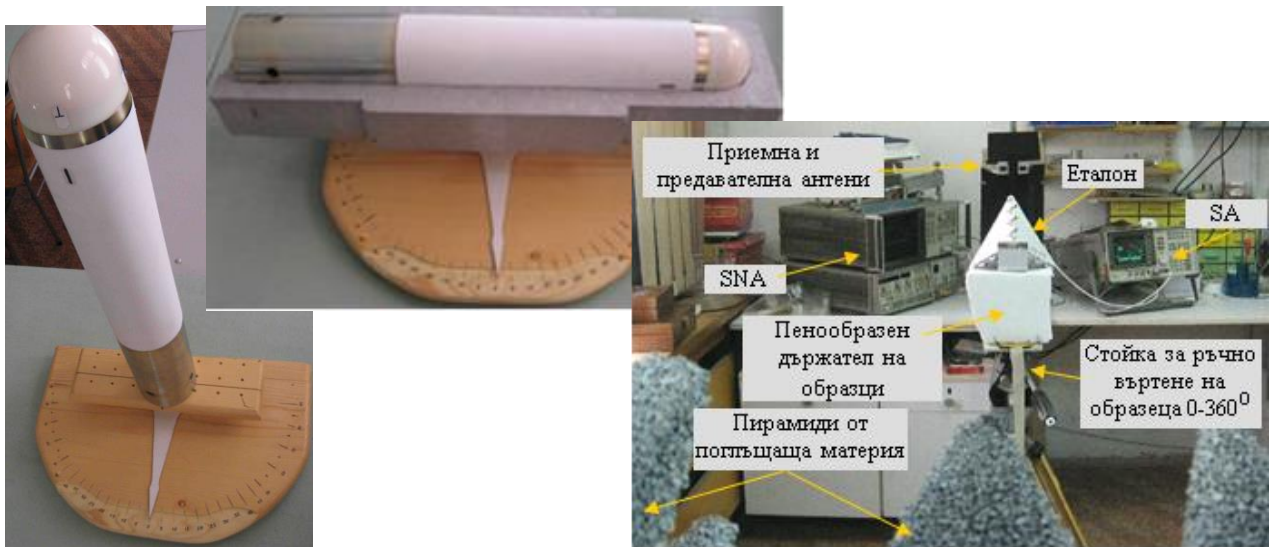
С цел, предварително оптимизиране на отразяващите обекти, и влиянието на покритието, сме използвали лицензиран електромагнитен симулатор Ansoft® HFSS8. С помощта на този симулатор, сме създали виртуално 3D отразяващи обекти, облечвани с плоска вълна в специално конструирана кутия с неотразяващи стени (radiation box) и сме наблюдавали и изчислили количествено отразения сигнал. На фиг. 7.1.1.2 е показан 3D-модел и симулация на електричното поле, в един от разглежданите обекти („кръстачка“), за вълна с линейна и кръгова поляризация.

В лабораторни условия, е направено изследване, на отделните отражатели и на сложен отражател, показан на фиг. 7.1.1.6, с измерителна постановка с две антени за 15 GHz – фиг. 7.1.1.7. Например, средната ЕОП, само от обект „кръстачка“, се увеличава 1,7 пъти, в сравнение с тази на еквивалентен диск със същия диаметър за отклонение на ъгли от 0° до 50° (средно ЕОП $\sim 0,65 \pm 0,53 \text{ m}^2$ за „кръстачка“ вместо $0,39 \pm 0,63 \text{ m}^2$ за диск). При плоския диск, отражението е силно само в интервал на ъглите $\pm 3^\circ$, докато при обект „кръстачка“, се получава допълнително силно отражение, в интервала $\pm 30-40^\circ$, което прави обекта „по-видим“ за радара за тези ъгли. За линейния обект 1, увеличението е 2.35 пъти: ЕОП $\sim 1,10 \pm 1,01 \text{ m}^2$ в сравнение с $0,47 \pm 0,69 \text{ m}^2$ за еквивалентен правоъгълник (това може да се види на фиг. 7.1.1.8).

Сложният отражател наподобява корпус на безпилотен самолет (без крилата), който включва един преден (лицев) отражател (обект 2), под диелектричната полусфера и три странични отражатели (обекти 1), разположени на 120° с общ гръб, обвити в диелектричен тънкостенен цилиндър. При измерването на отражателната способност, обектът може да се върти около надлъжната или около напречната си ос, както е показано на експерименталната постановка на фиг. 7.1.1.7. При измерването, се сравнява мощността на падащия и отразения сигнал и се изчислява ЕОП, след референтни измервания от еталон с ЕОП = 2 m^2 при същите условия.



Фиг. 7.1.1.6. Разположение на трихедралите (обектите от тип 1) и „кръстачката“ (обект от тип 2) в корпуса на сложен отражател, наподобяващ БЛС



Фиг. 7.1.1.7. Лабораторно измерване на сложен отражател и еталон при завъртане на различни ъгли

Изчисляването на ЕОП в m^2 става по следната формула:

$$RCS = \left(\frac{P_R}{P_T} \right) \frac{(4\pi)^3 D^4}{G^2 \lambda^2} \quad (7.1.1.1)$$

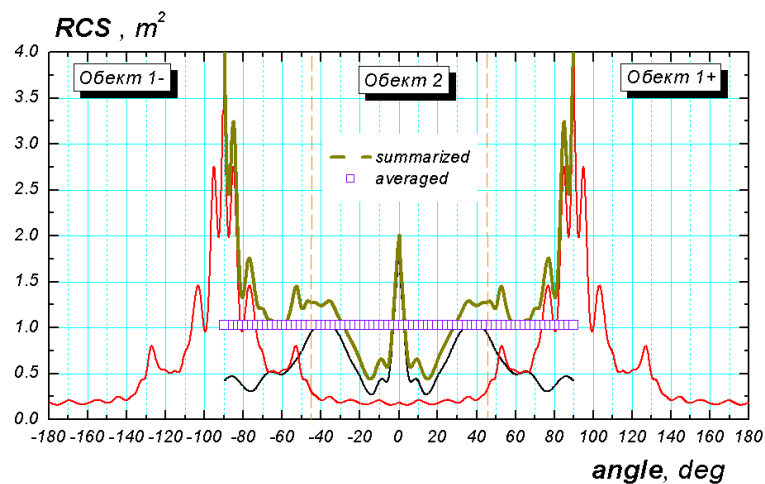
D = разстоянието между антените и обекта [m];

λ = дължината на вълната [m];

G = усилването на антените [dBm];

P_T и P_R = мощностите на сигнала в предаващата и приемащата антени.

Дължината на вълната и разстоянието между антените и обекта, се измерват в метри. Усилването на двете антени, се приема за еднакво и е безразмерна величина (измерва се в пъти). Мощностите на предадения и приетия сигнал, се измерват непосредствено на входовете на антените в dBm (или в mW), а отношението между двете мощности следователно е безразмерна величина.



Фиг. 7.1.1.8. Рапределение на ЕОП със сумиране на приносите на ЕОП от отделните му части

Измерванията ни показват, че при вертикално въртене на сложния отражател (около собствената му ос), се измерва максимално ЕОП (\max) = $7,3 m^2$ и осреднена ЕОП = $0,246 \times 7,3 = 1,8 m^2$. При хоризонтално въртене на само от предната част на изделието и малко встрани (т.е. под ъгли

$\pm 150^\circ$), се измерва максимално ЕОП (\max) = 7,2 m² и осреднена ЕОП = 0,125 x 7,2 = 0,9 m². Във всички изследвани случаи средното ЕОП на изделието надхвърля стойност 0,5 m², която позволява на стандартен радар да открие обекта, от достатъчно голямо разстояние. За граждански цели, този сложен отражател би могъл да направи БЛС по-лесно откриваем, както от наземните радиолокационни системи, така и от тези на останалите въздухоплателни средства за да се намали вероятността от сблъсък. Това е критично за мисии по радиационни обследвания в районите на летища и на места, където е възможно съприкосновение с други летателни средства. Лесната откриваемост от радари, би улеснила органите по ръководство на въздушното движение.

Намаляване на ЕОП

За изпълнение на секретни мисии с БЛС би било полезно неговата ЕОП да бъде минимизирана за да се намали „видимостта“ му за радарната система (Dallmann, 2015)[69]. Това може да предотврати, дори умишленото унищожаване на безпилотното летателно средство, когато съществува такъв риск, например при изпълнение на военни мисии по радиационно обследване. Три са основните методи за намаляване на ЕОП на БЛС (G.A. Rao, S.P. Mahulikar, 2002)[53]:

Първият метод е, така наречената „стелт“ технология – при нея е важна геометрията на корпуса на летателното средство (Rostec, 2014) [70]. Плоските повърхности с остри ръбове между тях отвеждат отразените сигнали далеч от приемната антена на радара. Тази геометрия може драстично да влоши летателните способности на въздухоплателното средство поради влошаване на аеродинамиката.

Вторият метод е използването на метаповърхности (метаматериали), които променят поляризацията на отразената вълна и проявяват свойства силно зависими от честотата на вълната (E. Ameri et al., 2019) [52], (Fui, 2016)[72], (New Scientist, 2010)[73]. Такива повърхности обикновено не са устойчиви на възникващите тежки условия по време на полет.

Третият метод използва покрития от поглътители на електромагнитни вълни (Miacci and Rezende, 2012)[71]. Те позволяват различни геометрии, като най-външния им слой може да се направи достатъчно устойчив на неблагоприятни атмосферни условия. Един от недостатъците на хомогенните поглътители е, че използвани самостоятелно, не могат да намалят достатъчно ЕОП. Това, до голяма степен, се дължи на високите изисквания към материалите от които са изработени, тъй като е необходимо те да имат малка, отразяваща способност и големи загуби. Тези две качества, е трудно да бъдат постигнати едновременно. Един от начините, е да се предаде градиент на способността им да поглъщат падащата електромагнитна вълна. Тази технология се използва и е по-добре позната при лещата на Лъонеберг (Baev et al., 2008)[83]. При нея всеки следващ слой, от вън навътре, има по-голяма диелектрична проницаемост ϵ , докато при градиентните поглътители, освен на диелектричната проницаемост, градиент трябва да се придаде и на тангесът от ъгъла на диелектричните загуби $tg\delta$.

Частите на БЛС, с най-голяма ЕОП и съответно тези места, на които поставянето на градиентни поглътители, би имало най-значим ефект са корпуса, където се намира и батерията и, до известна степен, електромоторите.

В настоящата глава е представено изследването на няколко градиентни поглътителя, с оглед на оценка на тяхната относителна ЕОП, резултати от което са публикувани на научната конференция PIERS 2017 в Сингапур, а пълният текст на публикацията може да се прочете на

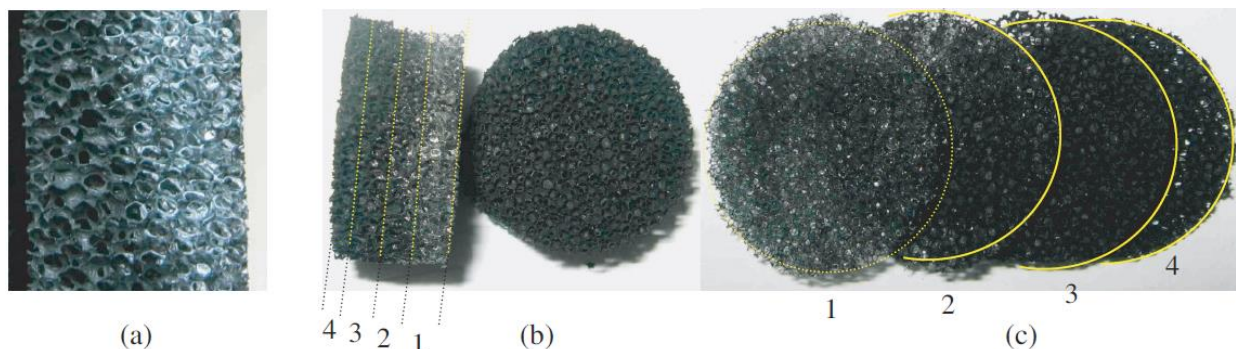
сайта на IEEE (P.Dankov and I.Iliev, 2018)[68]. Изследването е проведено и със съдействието на проект по Фонд научни изследвания към МОН по договор DN07-15/2017. Задачите на изследването са изпълнени в следните стъпки:

- Измерване на диелектричните параметри на градиентно-въглеродните абсорбери и изграждане на максимално реалистичен 3D-модел, подходящ за симулации на отражателна способност на абсорбера;
- Създаване на аналитичен слоест модел на градиентно-въглеродните абсорбери, подходящ за изчисляване на отражателната способност на абсорбера;
- Проверка на моделите с изчисляване на отражателната способност от градиент-въглерод и обикновени (изотропни) абсорбери - резултати до 40 GHz;
- Пример за 3-D симулации на ЕОП на конструкции с градиентни въглеродни и обикновени абсорбери;
- Сравнителни измервания на отражателната способност на градиентни въглеродни и обикновени абсорбери.

Създаването на модел на абсорбер, подходящ за въвеждане в 3D електромагнитни симулатори не е лесна задача, тъй като производителите обикновено не представят пълна информация за диелектричните и магнитните параметри на материалите. Те дават, основно, затихването на единица дебелина (в dB/cm) и евентуално отражателната способност на повърхността (в dB) за определен честотен диапазон. В конкретния случай, на градиент-въглеродни абсорбери не можем да извлечем никаква подходяща информация за техните параметри. Методите за измерване и оценка на диелектричните (и евентуално магнитните) параметри на абсорберите са разгледани в статията (Levcheva et al., 2009)[74]. Един от най-популярните, е методът на свободното пространство, базиран на измервания на S-параметри на структура с две антени и образец между тях [75]. Той е ефективен в широк честотен диапазон, но е необходимо разстоянията между двете антени и образца да бъдат добре оптимизирани, системата да е механично стабилна и да се вземе предвид поляризацията на антените. Недостатъци на метода са, че е нужен образец с доста голям размер и резултатите са интегрални характеристики на материала. Методите на предавателните линии също са приемливи, тъй като могат да характеризират материалите в широк честотен диапазон. Два са най-популярните метода: използването на натоварени коаксиални линии с отворен край (Chen et al., 2005)[76] и затворени или частично отворени правоъгълни вълноводи (Baginski, 2005)[77]. Получените резултати отново зависят от условията на измерване и дебелината на образца, а методите на вълновода изискват още по-голяма точност при подготовката на образците. Резонансните методи обикновено дават по-точни резултати, но проблемът е, че загубите в абсорбера лесно разрушават резонансните криви. Частично решение е методът на резонансни смущения (например, Ivanov и Vachev, 1984)[78]), където образецът е сравнително малък, но и точността значително намалява с намаляване на размера. Този метод е приложим за силно поглъщащ абсорбер, но за образци от разпенени абсорбери не може да постигне желаната точност. В изследванията на абсорберите от пяна от серията ECCOSORB®HR, е приложен метода на два резонатора описан от (Dankov, 2006)(Levcheva, 2008)(Dankov, 2010)[79..81]. Това е метод за определяне на сложните диелектрични параметри на различни образци, включително слаби абсорбери в успоредни и перпендикулярни посоки по отношение на повърхността на образца. От резултатите могат да се направят две заключения:

- наличните образци са дебели (10, 15 и 25 mm) и практически напълно поглъщат полетата;

- диелектричните параметри се разпределят неравномерно по дължината на дебелината.



Фиг. 7.1.2.2. Образец от въглероден градиентен погълтател ECCOSORB® HR A15: а) изглед от страни; (b) диск с пълната дебелина; (c) четири отрязани слоя.

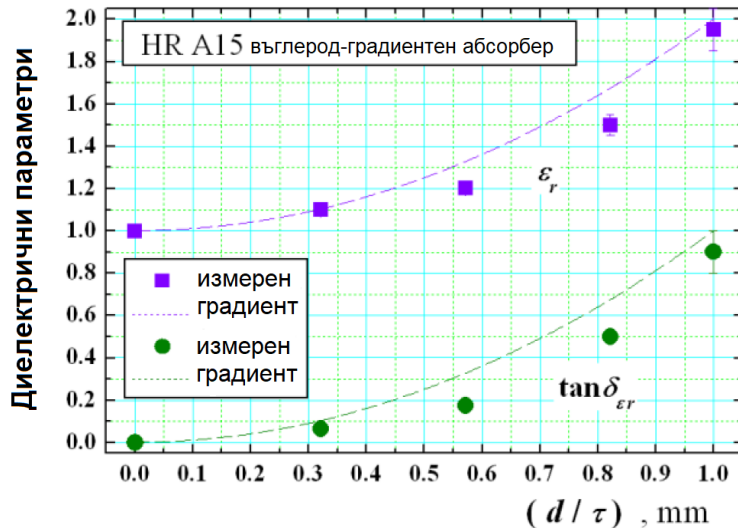
Благодарение на опита с подобни материали, използвани за Luneburg антени (Baev, 2008)[83], изследването е направено на параметрите на отделни части от абсорбера, след като той е нарязан на слоеве с дебелина от 2,5 до 4,5 mm (Фиг. 7.1.2.2). Ако получените тънки слоеве, се приемат за квази-изотропни, стойностите на диелектричната проницаемост и тангенса на загубите, могат да се определят. Резултатите са показани в таблица 7.1.2.1 за честотния диапазон 6-38 GHz.

Таблица 7.1.2.1. Основни диелектрични параметри на абсорбер HR A15 в обхватите X, Ku, K и Ka

Спецификация на погълтителя		Диелектрични параметри	
Име на материала или слоя	Дебелина [mm]	ϵ_r	$\tan\delta_{\epsilon_r}$
Един слой от въглероден градиентен погълтател ECCOSORB® HR A15	Общо 14,0	1,324*	0,222*
Слой 1 (от горната страна, светло сив)	4,5 ± 0,2	1,10 ± 0,01	0,065 ± 0,001
Слой 2	3,5 ± 0,2	1,20 ± 0,02	0,175 ± 0,005
Слой 3	3,5 ± 0,2	1,50 ± 0,05	0,50 ± 0,01
Слой 4 (задна страна, тъмно сив)	2,5 ± 0,2	1,95 ± 0,10	0,90 ± 0,10
Еднослоен погълтател (пяна) ECCOSORB® LS26	3,3 ± 0,2	2,73 ± 0,15	0,93 ± 0,15

* Изчислени по следния начин: $\epsilon_{eff} = \prod_{i=1}^n (\epsilon_{r_i})^{h_i/h_{total}}$ и $\tan \delta_{\epsilon_{eff}} = \prod_{i=1}^n (\tan \delta_{\epsilon_{r_i}})^{h_i/h_{total}}$

На практика образците не са напълно изотропни, което е компенсирано с осредняване на резултатите от измервания направени успоредно и перпендикулярно на разреза. От представените в таблица 7.1.2.1, стойности е определена зависимостта на диелектричната константа и тангенса на диелектричните загуби спрямо дебелината на образца (HR A15; 14 mm). Резултатите са много близки до очакваното, така наречено, градиентно разпределение. Това доказва и обявената от производителя ниска отразяваща способност на материала.



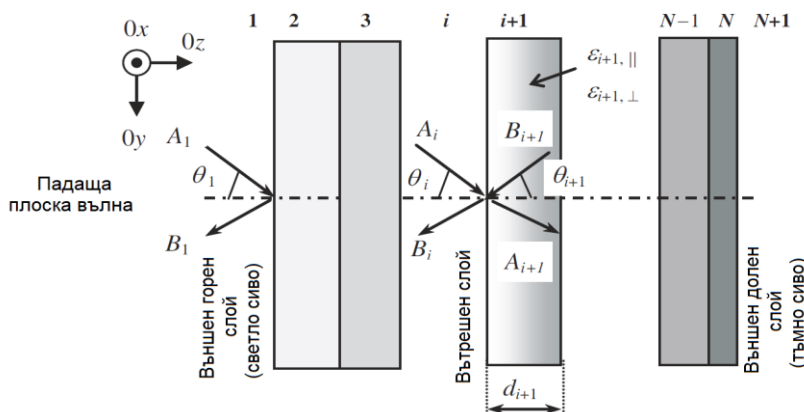
Фиг. 7.1.2.3. Изменение на диелектричната константа и тангенса на диелектричните загуби във въглерод-градиентен абсорбер HR15 с дебелина 14 mm

Идеята за наричането на изследвания материал на отделни тънки слоеве може да бъде полезна и за създаването на теоретичен слоест модел на

градиентен поглъtitел. Разработването на такъв модел, е необходимо за пресмятането, на отразяващите способности на материала. Той е близък и до модела, разработен за радиопрозрачните анизотропни антени обтекатели (Peshlov et al., 2005)[84], (Dankov et al, 2008)[85]), но и до този за известните антени с лещи на Лъонеберг (Baev et al., 2008)[83]. Въпреки, че представените стойности за диелектричната проницаемост и тангенса на загубите в Таблица 7.1.2.1 са дадени в квази-изотропна форма, за теоретичния модел ще запазим разликата между успоредните ($\epsilon'_{||}$ и $\tan \delta_{||}$) и перпендикулярните (ϵ'_{\perp} и $\tan \delta_{\perp}$) компоненти. Приемаме геометричното конструиране и обозначенията на параметрите в многослойния модел показани на Фиг. 7.1.2.4.

Моделът се състои от $N-1$ отделни слоя, с относителни комплексни диелектрични константи, $\epsilon_{i,||} = \epsilon'_{i,||}(1-j\tan\delta_{i,||})$ – успоредно на повърхността (в равнина Oxy) и $\epsilon_{i,\perp} = \epsilon'_{i,\perp}(1-j\tan\delta_{i,\perp})$ - перпендикулярно на оста (в равнината Oz)($i = 2, 3..N$). Приема се, че слоевете $i = 1$ и $i = N + 1$ са свободно пространство (въздух). Приемаме, че вълната пада от ляво надясно (т.е. по оста Oz) и сключва с горния слой на абсорбера (със светлосив цвят) ъгъл на падане θ_1 . В резултат на това четири тангенциални електрични компоненти се появяват във всеки i -ти преход: два за падащата A_i, A_{i+1} и два за отразената вълна B_i, B_{i+1} (а също и за магнитното поле: падаща F_i, F_{i+1} и отразен G_i, G_{i+1} (не са показани на фиг. 7.1.2.4)). Съответните ъгли на пречупване θ_i и θ_{i+1} могат да бъдат определени от разширяването на закона на Снелиус за случая на анизотропни слоеве:

$$\cos \theta_i = \sqrt{1 - (\epsilon_{1,||}/\epsilon_{i,||})^2 \sin^2 \theta_1} \quad (7.2.1)$$

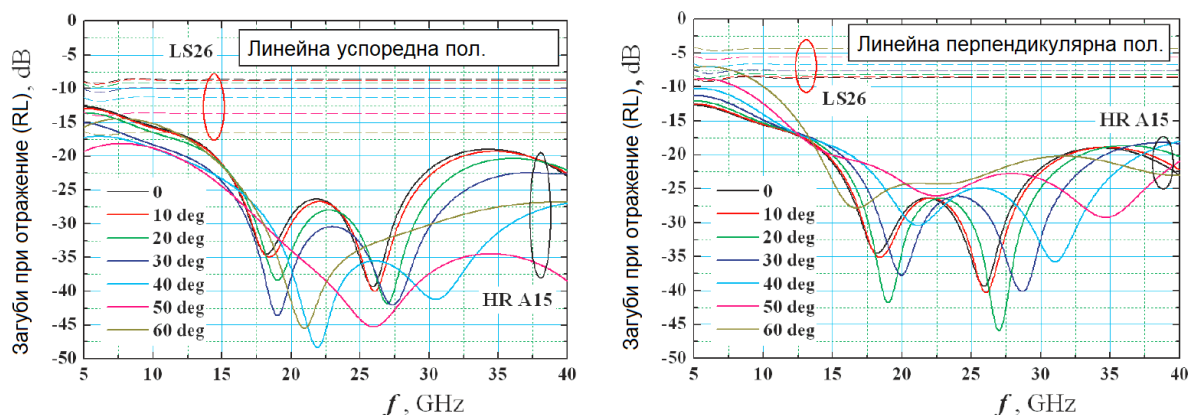


Фиг. 7.1.2.4. Многослоен модел на градиентно-въглероден абсорбер за плоска вълна падаща отляво надясно.

В общия случай, се разглеждат три варианта на облъчване в зависимост от поляризацията на падащата вълна в равнината Oxy , а именно за нормална (NP), паралелна (PP) и кръгова (CP) поляризация. Следвайки аналитичната процедура, описана в [86], можем да получим повтарящи се отношения за тангенциалните компоненти на всеки i -ти преход и накрая, можем да изразим предавателните характеристики и загубите на многослойния градиент-въглероден поглъtitел.

Нека да представим израз за загуби при отражение (RL) за тази структура, при плоска падаща вълна. В случая на перпендикулярна поляризация, електричният компонент E_x е нормален към инцидентната равнина Oyz . В случая, на паралелна поляризация, магнитният компонент H_x е нормален към равнината Oyz , докато електричният вектор E лежи в равнината Oyz . Изразите за определяне на RL са дадени в работата (P.Dankov and I.Iliev, 2018)[68] (тук не са представени).

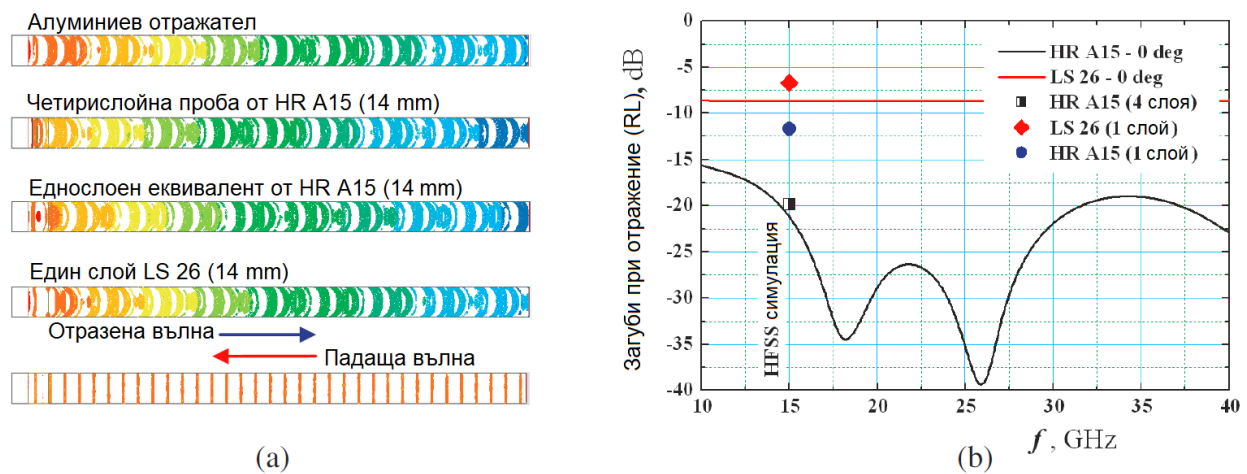
Проверка на модела е направена, като са въведени практически получените параметри от Таблица 7.1.2.1. На фиг. 7.1.2.5 са представени семейство честотни зависимости за загуби при отражение RL от два образца HR A15 ($\tau = 14$ mm; четирислоен модел) и LS 26 ($\tau \approx 14$ mm), изчислени по израза 7.1.5.2 за ъгли на падане в интервала $0-60^\circ$ (диелектричните параметри са взети от трета и четвърта колони на Таблица 7.1.2.1, а дебелината на слоя - от втората колона). Разликата между ефективността на двата абсорбера от пяна е очевидна. Изчислените RL за градиентния поглъtitел са повече от 15 dB за честоти над 15 GHz, при всички разглеждани ъглите на падане, докато RL за обикновения поглъtitел са значително по-малки без значение честотата.



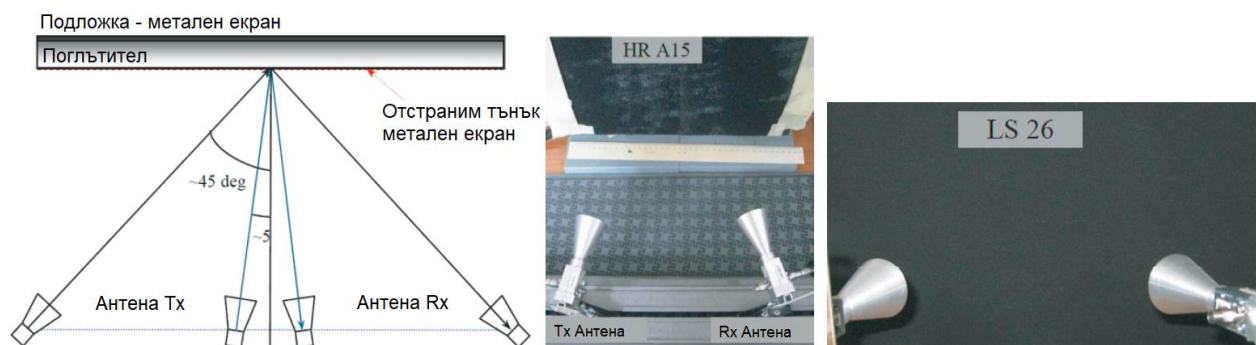
Фиг. 7.1.2.5. Загуби при отражение (RL), изчислени по израза (7.1.2.2) за градиентен абсорбер HR A15 и абсорбер LS 26 (дебелина 14 mm).

Разработеният модел може да бъде проверен и чрез електромагнитна 3D-симулация. За тази цел трябва да се създадат прости 3D-моделни на разглежданите абсорбери. Един такъв модел се изгражда върху метален екран с проводимост $3,7 \cdot 10^7$ S/m. Цялата структура се поставя в дълго, но тясно пространство, с неотразяващи стени (radiation box) и се облъчва с плоска вълна (Фиг. 7.1.2.6 (a)). Чрез изчисляване на интегрираната падаща и отразена мощност (вектора на Пойнтинг) във всяка точка от това пространство може да се определят RL (ако RL от референтния метален екран се приравняват на 0 dB). Симулираните RL за 15 GHz са представени на фиг. 7.1.2.6 (b); съвпадението с изчислените RL от аналитичния модел, е доста добро. С такъв тип симулация е направена проверка и на изчислените, чрез 4-слойния модел параметри на градиентен поглъtitел показани в първия ред на таблица 7.1.2.1.

След създаването на теоретичен модел и направените 3D електромагнитни симулации, са изпълнени и практически измервания на ЕОП на метална повърхност покрита с двата вида поглътител. На фиг. 7.1.2.7, е показана измервателната постановка с предаваща (Tx) и приемаща (Rx) антени насочени на определени ъгли (5° и 45°) и векторен анализатор на вериги (не е показан). След насочване на антените, чрез получаване на максимален отразен сигнал, системата се калибрира, като получената стойност без поглъtitел, се приеме за 0 dB. Поглъtitелят се прилепва към екрана. Този метод осигурява добра възпроизводимост, независимо от избрания ъгъл между антените. За да се покрие честотния диапазон от 8 до 40 GHz са използвани три двойки рупорни антени. Резултатите от измерването, са представени на фиг. 7.1.2.9. В ляво (a) е показана разликата между измерената ЕОП на обикновен и градиентен поглъtitел при еднаква дебелина (14 mm). На фиг. 7.1.2.9. (b) е показано сравнението им с панел от обикновени пирамидални абсорбери използвани в безеховите камери.

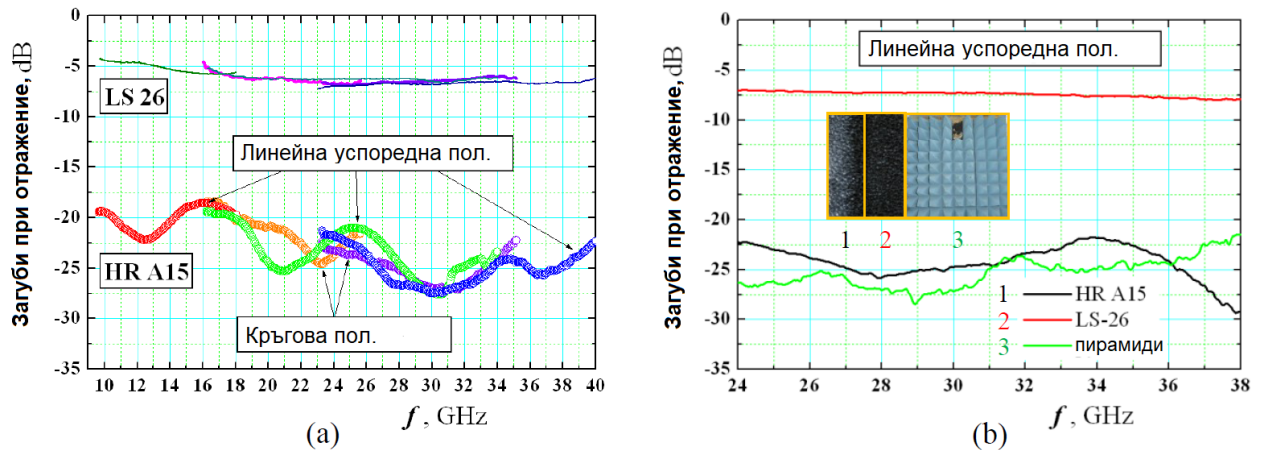


Фиг. 7.1.2.6. Сравнение между симулация с ANSYS® HFSS и изчисление чрез израз (7.1.2.2) на загубите при отражение (RL) за различни структури (при ъгъл на падане 0°): а) снимки на падащите и отразените електрични полета; б) зависимост на RL от честотата.



Фиг. 7.1.2.8. Измерване на ЕОП на абсорбери с две антени (Tx и Rx)

Отражателят от градиентен поглъtitел показва значително по-добра ефективност (поголеми загуби), които са съизмерими дори с тези при известните пирамиди. Освен това получените резултати съвпадат с разработените аналитични модели за прогнозиране на ефективността. Разликата между RL (ЕОП) на абсорберите HR A15 и LS26 е около 15 -20 dB, както от експериментите, така и от аналитичните и софтуерните 3D симулации.



Фиг. 7.1.2.9. Резултати от измервания на HR A15 с три двойки антени (9-40 GHz). Сравнение между обикновен и градиентен погълтател LS 26 (a); сравнение с пирамиди от абсорбираща пяна (b)



Фиг. 7.1.2.10. Предна част от БЛС с екран и със и без градиентен погълтател; отражателната способност е измерена в безехова камера

Получените числени и експериментални резултати са много оптимистични за реализацията на идеята, за намаляване на ЕОП на БЛС, дори абсорберите да са поставени, само в някои от техните части, като крила, централно тяло, опашка и др. Идеята е тези абсорбиращи слоеве да бъдат механично включени, директно, под композитните стени на БЛС. Други специални симулации показват, че ако диелектричната константа на такива покрития е по-малка от 1.2-1.25, ефекта на вградения градиентен погълтател остава достатъчно значим.

На фиг. 7.1.2.10 е показана опитна постановка за измерване на отражателната способност в безехова камерва от предния корпус на малко БЛС с метален екран в два случая – със и без поставен отражателен абсорбер. Измерените обратни загуби намаляват с -17 dB на 28 GHz, т.е. над 40 пъти.

ГЛАВА ОСМА. Допълнителни въпроси от дистанционното гама-катрографиране

В тази глава, е направен анализ на различни проблеми, възникнали по време на провеждане на експериментите и са обсъдени някои допълнителни въпроси от дистанционното гама - картографиране. Коментирани са недостатъците и ограниченията на избраните БЛС и детекторните системи и са предложени варианти за подобрене. Двата основни, са изпращане на данните в реално време и използване на навигационна система за закрити пространства.

Разгледана е и една, изцяло нова идея за непрекъснат мониторинг на интензитета и спектъра на високоенергийно гама лъчение, от далечния космос, изпълнен като вторична мисия с помощта на рояци от малки спътници, от близкия космос, чиято първична мисия е посветена на доставка на широколентов интернет по съвременна 5G технология към потребители на Земята. За тази цел, всеки спътник от рояка трябва да бъде допълнително оборудван с ефективен, лек и евтин гама детектор с ниска енергийна консумация (аналогичен на разработения за БЛС). Разгледана е технологията за събиране на данни, при такъв непрекъснат мониторинг и е оценено количеството допълнителни данни от подобно приложение в гама астрономията на спътникови рояци за целите на онлайн картографиране, на гама лъчението върху звездната карта, наблюдавана от Земята. Дискутирани са подходящите честотни обхвати, антенни системи и технологията на комуникационните сесии и е представен енергиен баланс на връзката от LEO орбити между 700 до 1500 km.

Оптимизиране на измервателната система

В процеса на проектиране на детекторната система, са открити множество слаби места на използваните технически средства, както и на оптимизирането на техните ресурси. Разработването на специализирана детекторна система, е ключов момент от целия процес на гама-спектрометричното картографиране, от който зависи по-нататъшната работа по разработването на всички останали параметри на измерването и обработката на информация. Проектирането на детекторната система, е предвидено да се прецизира на много по-високо ниво и да се реализира, по време на друг дисертационен труд във Физически Факултет на Софийски Университет.

Някои от устройствата на БЛС и детекторната система, се дублират. Сериозна оптимизация от техническа гледна точка, би било обединението на дублиращите се сензори, като GPS приемника, далекомерите и видео камерите.

Допълнително затруднение предизвика използването на програмите MissionPlanner и 3D Maps (към пакета на Microsoft Excel) поради факта, че те са адаптирани към по-едромашабни карти. В описаните експерименти, се използваша техните пределни възможности. Разработването на специализиран софтуер, би допринесло много за постигане на конкретно поставените цели, особено при изследвания на обекти с по-специфична геометрия.

За по-маломашабни обследвания на открито, е необходимо БЛС да е снабден с навигационна система, осигуряваща бързо позициониране с по-голяма точност от тази на стандартен GPS-приемник. Едно широко използвано средство е RTK (Real-Time-Kinematic) позиционирането (Euler et al., 2003)[109], (Dai et al., 2001)[110]. За да бъде използвано, е необходима постоянна връзка на БЛС, с мрежа от наземни станции. Постигнатата точност от 2-3 см, би позволила обследванията, да се провеждат изцяло на автопилот, дори без пряка видимост между БЛС и оператора на дистанционното му управление. Услугата за RTK позициониране (използването на сървър за връзка с мрежата от фиксирани наземни станции), вече се предлага и на българския пазар, от няколко различни доставчика. С подобряване на позиционирането, ще се намали значително и възможното недооценяване на измерваната радиоактивност.

Навигационна система за закрити пространства

За да се ориентира, без намесата на човек и без използване на GPS-навигация, БЛС трябва да разполага със собствени сензори, определящи разстоянието до заобикалящите го обекти. За тази цел, предлагаме три варианта: ултразвукови далекомери, LIDAR и видео заснемане.

Най-лесният вариант за реализация, би бил **вариантът използващ ултразвук**. Достатъчно е да се поставят ултразвукови предаватели и приемници от всички страни (в тримерното пространство) на БЛС. Докато един от тях, осигурят поддържане на предварително зададеното разстояние за последователно сканиране на всеки засечен обект, записите от останалите далекомери ще послужат за изграждане на триизмерна карта на цялата вътрешна повърхност на изследваното пространство. Недостатък на този метод, е необходимостта, от поставянето на твърде много сензори (колкото повече сензори се използват, толкова по-добра ще бъде разделителната способност на изградения тримерен модел, и по-малък рискът от незабелязване на близък предмет). Друг съществен недостатък, е неточността на измерване, при промяна на въздушния поток, създаден от пропелерите на БЛС. При постоянен поток, би могла да се използва калибровка и измерванията да са относително точни, но при промяна на потока (при маневри на БЛС) скоростта на звука във въздуха се променя, което повлиява резултата от ултразвуковия далекомер. Този ефект и фактът, че максималният обхват на работа е около 4 m, правят метода, не особено подходящ за големи помещения или силно урбанизирана среда (с открити пространства). Потокът би се променил и при близко преминаване покрай различни предмети. Въпреки всички недостатъци, за помещения със сравнително правилни геометрични форми, ултразвуковите далекомери биха били добър вариант за навигация, поради тяхното малко тегло, елементарна структура и сравнително малко отклонение в резултатите (около 5 - 10 mm). Малкото количество данни, които генерират не биха затруднили твърде много контролера на БЛС и детекторната система, което им дава още едно предимство пред останалите варианти.

Използването на LIDAR за навигация на БЛС, е от най-бързо налагащите се варианти за закрити помещения. Лазерният лъч (или силно фокусиран инфрачервен лъч) на LIDAR-а сканира заобикалящото пространство, като изгражда тримерен модел от точки, след като измери разстоянието до всяка точка и ъгъла под който тя се вижда. За да се постигне това, е необходима бързоподвижна механична система, работеща достатъчно прецизно. Това прави LIDAR не толкова елементарен, както ултразвуковите далекомери, което означава – по-висока цена, по-голямо тегло и по-голяма консумация на електричество. По-голямото количество натрупана информация, която трябва да се обработи в реално време, изисква по-бързи процесори. Въпреки това, LIDAR има голямо преимущество, именно поради много по-подробните триизмерни модели, които създава, както и по-стабилната му работа при променящи се условия на въздушната среда.

Използването на видео камери е методът, предоставящ най-пълна информация. Необходимо е поставянето на достатъчно камери за покриване на цялата 4л геометрия със 50% процента презастъпване на изображението между всеки две съседни камери. Броят камери може да се намали, чрез използването на повече летателно време за въртене на БЛС около вертикалната му ос. Създаденото, чрез презастъпване изображение, носи чисто визуална информация, но и служи за измерване на разстояние до обектите. За да се обработи тази информация, в реално време, до формат, удобен за създаване на тримерен модел на

помещението, е нужна добра осветеност и изключително сложна и бърза обработка на големи масиви от данни. Това изисква използването на високопроизводителни процесори, специализиран софтуер и голямо количество електроенергия. С развиването на технологиите в тази насока, този метод също придобива популярност, както за закрити, така и за открити пространства, където проблемът с осветеността, може да се избегне. Едни от най-големите му предимства, са изграждането на свръх реалистични тримерни модели, с наслагване на изображение върху тях и възможността да се използва БЛС за заснемане на обект от всички страни, когато заобикалящото го пространство позволява.

Изпращане на данните в реално време

При пилотируемите обследвания, данните се наблюдават, в реално време от оператор на борда на летателното средство. Предаване в реално време не е непостижимо, но за граждански цели не е обосновано, предвид големите мащаби на обследваните територии. Обикновено, обстоятелствата, налагащи използването на БЛС, като например високия риск за екипажа на пилотируемото летателно средство, крият и риск от загубване на натрупаните по време на обследването данни. Същото важи и при по-деликатни мисии, при които е важна бърза реакция, след откриване на замърсяване или има риск от загуба на летателното средство. Тогава изпращането на резултатите в реално време е от съществено значение.

Гама спектрометрична система, която има способността да геореферира спектрите от измерванията, трябва да разполага с достатъчно бърза комуникационна линия, за предаване на координати, относителна височина на полета и натрупания спектър за един период на интегриране. Като допълнителна възможност, е изпращането на надморската височина, което би имало смисъл при обследване на по-големи терени, в рамките на които същата се изменя значително.

Най-обемната част от изпращаните данни е спектър с определен брой канали. Броят канали, зависи от многоканалния анализатор (МСА), а информацията във всеки канал е едно положително цяло число, чиято максимална стойност зависи от очакваната максимална скорост на броене в един канал, умножена по времето на интегриране. За удобство при изчисленията, времето за интегриране се избира 1 s, което означава, че натрупаният брой импулси ще бъде равен на скоростта на броене в $[s^{-1}]$ или [cps]. Максималният брой импулси, се определя на база на бързодействието на системата или по-конкретно на мъртвото време. За да се намали приноса на мъртвото време не трябва да се измерват полета с твърде голям интензитет, тоест не е необходимо във всеки един канал от спектъра да се предвижда голям брой импулси. След като е изминал един цикъл на интегриране (1 s), спектъра се записва във файл на картата с памет и съответно се изпраща, заедно с точно време, координати, надморска и относителна височина. Ако прогнозираният брой импулси за една секунда надвишава много броя на каналите, по-ефективен начин за записване на спектъра, е да се заделят толкова клетки памет, колкото са каналите, а размера на тези клетки да бъде достатъчен за прогнозния максимален брой импулси в един канал. Когато импулсите са значително по-малко от броя канали, тогава записът на спектъра, би бил по-компактен, ако се заделят толкова клетки от паметта, колкото са импулсите, а размера на всяка клетка, да бъде достатъчен за да съдържа номера на канала.

След като детекторната система не е стационарна, а монтирана на БЛС и разстоянието до ИЙЛ може лесно да се коригира, за настоящия експеримент не е нужно да се предвиждат

много големи скорости на броене. При мощност на дозата $10 \mu\text{Sv/h}$ (^{137}Cs), максималната скорост на броене е от порядъка на 15 000 cps. Тъй като броя канали на МСА е достатъчно голям за разделителната способност на детектора, не е възможно всичките 15 000 импулса да попаднат в един канал, а най-много половината, тоест около 7500 импулса = 2^{13} . При така направената оценка на необходимия брой импулси и броя канали описан в т. 6.2, можем да пресметнем, че обема от паметта необходим за запис на един спектър би бил $389 \times 13 \text{ bit} = 5057 \text{ bit}$. За всички импулси с енергия по-висока от максималната предвидена, детекторът има много ниска чувствителност и би било достатъчно да отделим още един канал, тоест 14 bit.

Втората част, е информацията, нужна за позициониране и часът на измерването, служещ като идентификатор на всяко едно измерване и запазващ поредността при възпроизвеждане.

За представянето на час след кодирането на формата HH:mm:ss, $2 \times 3 \times 5 \times 9 \times 5 \times 9 = 12150 \approx 2^{14} = 14 \text{ bit}$ биха били достатъчни. За запис на координатите във вид, идентичен със записа им в NMEA съобщение от типа на DDMM.MMMMM, DDDMM.MMMMM са нужни $\approx 85 \text{ bit}$. За запис на надморската височината с точност до сантиметър са нужни $500\,000 \text{ cm} \approx 2^{19} = 19 \text{ bit}$, а за относителната височина, измерена от ултразвуков далекомер, с точност до сантиметър: $400 \approx 2^9 = 9 \text{ bit}$. Общото необходимо пространство е:

$$5057 + 14 + 14 + 85 + 19 + 9 = 5188 \text{ bit} = 649 \text{ B}$$

Тоест, минималният поток от данни за детектор от CsI(Tl), при предвидена максимална надморска височина от 5000 m, абсолютна височина 4 m, точност на координатите съвместима с RTK GPS (1 cm) и максимална мощност на дозата от $10 \mu\text{Sv/h}$ (^{137}Cs) би бил: 649 B/s. Разбира се, нужно е да се отделят пакетите един от друг със служебни думи, или да се използва готов комуникационен протокол, което ще увеличи необходимия поток.

От казаното до тук, може да се обобщи, че количеството на изпращаните данни от радиационното измерване е относително малко. То може да се увеличи, ако е необходимо и визуално наблюдение. Почти всички БЛС, използвани за комерсиални цели, имат осигурен канал за видео предаване, който позволява достатъчно голяма скорост, най-малкото за предаване на изображение с цел управление на БЛС. Нужната скорост на изпращане на данни от радиационното измерване, е около 10^5 пъти по ниска, което означава, че не би представлявала никакво затруднение за използвания комуникационен канал.

Разстоянието, от което е добре да бъде изпращана информацията, е разстоянието на пряка видимост от човека, тъй като към момента, това е максималното разрешено разстояние за радиоуправление на БЛС. Повечето БЛС за комерсиални цели предвиждат управление от 2 km до 7 km (при управление по видео изображение). Използването на автопилот също не е разрешено без визуален контакт с оператора на БЛС.

Измервания по сателитна орбита

В последната точка от дисертацията, сме направили смело предложение за използване на бъдещите спътникови рояци с основна функция – широколентова интернет доставка от близкия космос, за да изпълним вторичната мисия – събиране на данни от наблюдение в почти реално време на гама-лъчи от дълбокия космос. През последните няколко години, малките спътници успешно поемат отговорността за извършване на важни задачи, в гама-астрономията, дори и като добре оборудвани единични гама-телескопи. Ако те са проектирани да работят като спътниково формирание, дори няколко телескопа с гама-детектори могат да „покрият”

цялото пространство около Земята. Нашето предложение надгражда тази идея. Ако планираните за пускане хиляди малки спътници работят като големи рояци, за внедряване на нови комуникационни технологии за бърз широколентов сателитен интернет достъп за милиони наземни потребители, членовете на рояка могат пасивно, заедно да помагат и за детекцията на гама-лъчи. За целта, всеки член на рояка, трябва да бъде снабден с опростен гама-детектор с достатъчна чувствителност, малка консумация на енергия и малко тегло, инсталиран софтуер за контрол на детектора и осигуряване на изпращането на натрупаните данни за последваща обработка в командния център на рояка. Това предложение е много подобно на вече действащия проект за откриване на свръхвисокоенергийни космични лъчи от оптичните камери на милионите смартфони използвани на Земята, тъй като има много общи проблеми с него. Основното предимство на наблюдение, осъществявано от рояка е, че детекторите на спътниците на LEO могат да открият гама-лъчение с по-малка енергия - MeV и дори стотици keV, поради липсата на поглъщане в атмосферата.

Избраният за качване на БЛС детектор, отговаря и на голяма част от изискванията към детектор, подходящ за изпращане в близкия космос, на борда на малък сателит (CubeSat), а именно малкото тегло и размери; ниска консумация на енергия; добро съотношение на чувствителността към теглото; ниско мъртво време и оптимална енергийна разделителна способност за минимално количество на натрупаните данни между две комуникационни сесии за изпращане на резултатите към наземната станция или космическия команден център.

Оценка на необходимата скорост на комуникационната линия необходима за гама-спектрометрична система на база на детектор от CsI(Tl)

Детекторът, избран от нас, за безпилотните гама-спектрометрични изследвания беше от сцинтилатор CsI(Tl), същият, който е избран за качване на спътника BurstCube, което е практическо доказателство за неговата приложимост и за мисии в космоса. Между детекторната система за БЛС и такава за близкия космос има още нещо общо. На LEO също има възможност да се използва GPS за позициониране [180], тъй като височината на GPS сателитите е от порядъка на 20 000 km, много повече от LEO (за проекта StarLink от 340-1150 km). За да се предават спектрите от измерванията обвързани с координати, трябва да бъде осигурена достатъчно бърза комуникационна линия за предаване на данни към земята след всеки период на интегриране или в моментите, когато има видимост към наземната станция, да се предаде цялата натрупана информация наведнъж. Най-обемната част от изпращаните данни е спектър с определен брой канали. Броят канали зависи от многоканалния анализатор (MCA) и разделителната способност по енергии на сцинтилатора, а информацията във всеки канал е едно положително цяло число, чиято максимална стойност зависи от очаваната максимална скорост на броене в един канал умножена по времето на интегриране. Принципът на определяне на броя канали, е описан подробно в т.1.2.6 и т.6.2. За космични изследвания интерес би представлявал, по-широк енергиен обхват, което не е проблем да се постигне с избрания сцинтилатор, но трябва да се използва MCA с повече стъпки на дискретизация по амплитуда (осигуряващи повече канали). Ефективността на, малък по размери, сцинтилатор спада значително с повишаване на енергията, което прави неоправдано разширяването на енергийния спектър твърде много. Енергии до около 10 MeV, биха били подходяща горна граница за спектрометрия, а за по-високи енергии може да се предвиди по-груба оценка (с лоша разделителна способност) Според израза 1.2.6.1 за енергиен обхват до 10 MeV са нужни ≥ 1340 канала (ще е нужен АЦП с 11 bit дискретизация, осигуряващ 2048 канала). Този енергиен

обхват би бил достатъчен за анализ на голяма и важна част от гама-лъчението. За енергии от 10 до 100 MeV може да се използва втори АЦП, със същата стъпка. Тоест целият спектър ще се състои от 4096 канала, дясната половина на който ще бъде с 9 пъти по-лоша разделителна способност. За изучаване на бързи процеси с нискоенергийни фотони (до 500 keV), би могло да се добави още един детектор със значително по-малки размери и с тънък алуминиев прозорец в металната му херметична обвивка. За по-тесния енергиен обхват ще са достатъчни ~67 канала (6 bit дискретизация), но за улавяне на бързите процеси трябва да се намали времето на интегриране на около 0,063 s (около 16 Hz). Удачно би било всеки краткосрочен спектър, да има свой пореден номер, нулиран в рамките на всяка секунда, който ще запълни допълнителни 4 bit запис към всеки кратък спектър. За един период на интегриране ще допуснем натрупването на до около 8000 импулса във всеки канал, за записа на които ще са нужни 13 bit. Така общият резултат за записване на спектрите ще бъде:

$$4096 * 13 \text{ bit} + 16 * ((67 * 13 \text{ bit}) + 4 \text{ bit}) = 67\,248 \text{ bit} \quad (8.4.4.1)$$

Към тях трябва да се добави запис за час (с точност до секунда), дата, координати и височина на орбитата:

$$67\,248 \text{ bps (спектри)} + 14 \text{ bps (час)} + 20 \text{ bps (дата)} + 85 \text{ bps (координати)} + 24 \text{ bps (височина)} = 67\,391 \text{ bps} = 8,423 \text{ kBps} \quad (8.4.4.2)$$

Изпращаната информация може да се намали допълнително, като се игнорира датата и височината на орбитата, при запазване на техните стойности от предходното измерване. Примерни изчисления на нужното количество памет за запис на часа и координатите са дадени в т.8.3.

Можем да обобщим, че нужният поток от данни за детектор от CsI(Tl), при предвидена максимална височина на орбитата 1500 km, използване на GPS координати и максимална скорост на броене във всеки един канал 8000 cps, би бил: 8,423 kBps или 12,6 kBps с осигуряване на необходимите допълнителни 50% марж за резерв. Разбира се, нужно е да се отделят пакетите един от друг със служебни думи (header, tail и т.н.), или да се използва готов комуникационен протокол, което ще увеличи необходимия поток. При всички случаи, при непрекъснатата връзка, скоростта на потока от данни не би трябвало да надвиши 20 kBps, от всеки сателит в рояка. За по-добра пространствена разделителна способност или при констатиране на твърде интензивни потоци от частици, времето за интегриране може да се намали, което от своя страна ще повиши скоростта на потока от изпращани данни. При време на интегриране 0,2 s, скоростта ще се увеличи на 100 kBps. Тъй като комуникационната сесия с наземна станция не трае твърде дълго, трябва да се предвиди памет за запис на данните докато сателита е в сянката на Земята. Тогава за 90 минутна обиколка, натрупаните 540 MB, ще трябва да се изпратят за 3 min, колкото трае една комуникационна сесия, със скорост 3 MBps. Ако се използва само една комуникационна сесия за денонощие, необходимата скорост на пренос ще бъде съответно 48 MBps. Ако един сателит, представляващ информационен хъб на рояка, изпраща цялата информация към земята, то получената скорост трябва да се умножи по числеността на рояка. За 1000 спътника, нужната скорост ще бъде, 48 GBps. Този пример показва, как малкото количество данни може да се умножи поради чисто организационни причини в рояка. На практика, тъй като общото покритие на рояците от спътници обхваща почти цялото земно кълбо, чрез междусателитни връзки информацията може да се изпраща непрекъснато към земята. Благодарение на това, скоростта

необходима за предаване на информацията към земята е в рамките на $20.N$ kVps, където N е броя на сателитите в рояка, които носят детектори на борда си.

Бюджет на сателитен комуникационен канал необходим за предаване на данни от гама-спектрометрия

Дневната пропускателна способност, за данни, е ключов параметър за осъществяване на комуникационната функция на малките спътници, както за един, така и за синхронизиран рояк от спътници. Тя зависи от много фактори, но най-важните от тях са: предавателните мощности на спътника P_{sat} (ограничена) и на наземната станция P_{GS} ; фиксирани честоти и честотните ленти (ограничени); отношението усилване/насоченост на антената; отношението усилване/температура на антената (G/T), входния праг на цифровия модем E_b/N_0 (енергия за един бит E_b над шума в системата N_0); използвана модулация и кодиращи схеми; компресиране на данни без загуби; време за достъп в рамките на една комуникационна сесия с дадена земна станция (ограничено); брой на земните станции (в определени ситуации) и т.н. Можем да оценим този важен параметър с помощта на прост анализ [181]. На първо място, необходимата брутна скорост в dBbps може да бъде определена от

$$R_b, \text{dBbps} = (C/N_0 - E_b/N_0 - \text{Марж}) \quad (8.4.5.1)$$

Което позволява достигане на максимална скорост r_b [bps] = $10^{R_b/10}$. Спектралната плътност на отношението носеща вълна-шум C/N_0 [dB.Hz] се пресмята по:

$$C/N_0 = \text{EIRP}|_{Tx} + G/T|_{Rx} + 228.6 - \text{Загуби} - \text{BO} \quad (8.4.5.2)$$

където:

$\text{EIRP}|_{Tx} = G_{Tx} + P_{Tx}$ = еквивалентната изотропна мощност (EIRP) на предавателя (Tx);

$G/T|_{Rx}$ = отношението усилване/температура за приемника (Rx) (типични стойности за температурата на шума са $T \approx 290^\circ\text{K}$ за Uplink (UL) канала и $T \approx 30^\circ\text{K}$ (най-лошия случай) за Downlink (DL) канала)

BO = входно-изходния отстъп (няколко dB, които не са взети предвид в тази ситуация).

Загуби - основна част от загубите са от свободното пространство = $20 \log(4\pi d/\lambda)$ (където d е височината); друга причина за загубите е неточност в насочеността на антената, като те могат да бъдат оценени, ако знаем диаграмата на насоченост на антената;

Марж – резерв зависещ от конкретния използван стандарт за комуникация.

Първо, нека за конкретния анализ да изберем няколко комуникационни ленти, разпределени от ITU за канал надолу (Downlink (DL)), за „аматорски“ спътникови услуги [182] (все още не е известно, дали големите рояци от спътници ще използват точно тези канали за доставка на интернет, но те са най-подходящи за цели не изискващи специален лиценз). Избраните честотни ленти за DL канали са представени в първата колона на таблица 8.4.5.1 и съответната разрешена лента BW - във втората колона, а именно: 435-438 MHz; 2,40-2,45 GHz; 5,83-5,85 GHz; 10,45-10,5 GHz; 24-24,05 GHz. Част от тези групи съвпадат със свободните ISM (индустриални, научни, медицински) групи. Добавихме и два широко разпределени честотни ленти 8,025-8,40 GHz и 25,5-27,0 GHz, предназначени за сателитни изследвания на Земята (Earth Exploration Satellite Services (EESS)) космически приложения за DL канали. Таблица 8.4.5.2 представя също резултатите за необходимата брутна битова скорост R_b в dB.bps и максимална достижима битова скорост r_b в Mbps за избраните обхвати с по-малка ефективна широчина на

честотната лента $BW_{eff} < BW$, намалена поради доплеровото отместване на избраните LEO 800/1500 km, В таблица 8.4.5.2 може да се види, че максималната постижима битова скорост постижима за чиста QPSK модулация (без прилагане на каквито и да е допълнителни кодиращи схеми или схеми с разширен спектър, увеличаващи допълнително скоростта на предаване), зависи главно от увеличената ширина на лентата и може да достигне стойности $\sim 14-74$ Mbps за $BW_{eff} \approx 10-50$ MHz (при подходящо кодиране тези стойности могат да надхвърлят 100 Mbps, както е показано в [183]).

Таблица 8.4.5.2. Максимално постижима битова скорост r_b [Mbps] за QPSK модулация в ефективна честотна лента BW_{eff} (намалена поради доплеровото отместване) и необходимата брутна скорост R_b [dB.bps]

Предвидена честотна лента [GHz]	Макс. рарешена BW [MHz]	Макс. Доплерово отместване [kHz]*	Мин. ефективна BW_{eff} [MHz]*	Макс. Битова скорост r_b , [Mbps (QPSK)]*	Нужна брутна битова скорост R_b , [dB.bps (QPSK)]
0,435-0,438	0,02	$\pm 10,2/9,3$	0,01/0,0011	0,03	44,77
2,427-2,443	10	$\pm 57,2/52,1$	9,89/9,90	14,8/14,9	71,71
5,83-5,85	10	$\pm 101,9/92,8$	9,70/9,73	14,5/14,6	71,65
10,37-10,45	10	$\pm 244,8/223,0$	9,51/9,55	14,3/14,4	71,55
24,05-24,25	10	$\pm 568,1/517,6$	8,86/8,96	13,3/13,4	71,28
8,025-8,175	50*	$\pm 191,5/174,5$	49,62/49,65	74,4/74,5	78,72
25,50-27,00	50*	$\pm 632,6/576,3$	48,73/48,84	73,1/73,3	78,65

* честотни канали предвидени за EESS; * двойка параметри за орбити с височина 800/1500 km

Таблица 8.4.5.3.a Възможното отношение E_b/N_0 и марж M [dB] в Downlink (DL) каналите за QPSK модулация с използване на единична плоска антена с фиксиран коефициент на усилване +7 dB и еквивалентна антена (чиния) с диаметър 1,2 m за наземната станция ($P_{GS} = 2$ W)

Центр. честота към ширина на лентата f/BW [GHz /MHz]	Височина на LEO [km]	Загуби при преноса [dB]*	C/N_0 [dB.Hz]*	Постижимо E_b/N_0 ; Марж M ($P_{sat} = 1$ W; $P_{GS} = 2$ W с антена екв. на 1.2 m чиния)* [(%/100);dB]	Необходима мощност P_{sat} ($E_b/N_0 = 9.6$ dB; $M = 3.5$ dB)* [W]
2,435/10	800/1500	158,2/163,7	89,3/86,84	(17,60;8,00)/(12,15;2,55)	0,355/1,25
5,84/10	800/1500	163,3/171,2	89,3/86,84	(17,65;8,05)/(12,22;2,63)	0,350/1,23
10,41/10	800/1500	170,9/176/3	89,3/86,84	(17,70;8,10)/(12,30;2,70)	0,346/1,22
8,10/50*	800/1500	168,7/174,1	89,3/86,84	(9,58;0,98)/(5,11; -4,49)	1,785/6,28

* честотни канали предвидени за EESS; * двойка параметри за орбити с височина 800/1500 km

Таблица 8.4.5.3.6 Възможното отношение E_b/N_0 и марж M [dB] в Downlink (DL) каналите за QPSK модулация само в X-обхвата (10,41 GHz/10 MHz) за различни бордови антени и еквивалентна антена (чиния) с диаметър 1,8 m за наземната станция ($P_{GS} = 4$ W)

Вид на бордовата антена	Усилване на антената/ $\Delta\theta/\Delta\varphi$ (-3dB) [dB/deg/deg]	Височина на LEO [km]	C/N_0 [dB.Hz]*	Постижимо E_b/N_0 ; Марж M ($P_{GS} = 4$ W с антена екв. на 1.8 m чиния)* [(%/100);dB]	Необходима мощност P_{sat} ($E_b/N_0 = 9.6$ dB; $M = 3.5$ dB)* [W]
единичен елемент	+9,4/ 61,1/61,1	600/1500	97,6/89,7	(19,3; 9,7)/ (10,4; 0,8)	0,24/1,50
решетка с 2 елем.	+12,7/ 27,5/61,1	600/1500	101,0/93,1	(22,7; 13,1)/ (14,8; 5,2)	0,107/0,68
решетка с 4 елем. в линия	+16/ 13,8/61,1	600/1500	104,3/96,4	(26,0; 16,4)/ (18,1; 8,5)	0,051/0,317
решетка 2x2 елем.	+12,9/ 27,1/27,1	600/1500	101,2/93,2	(22,9; 13,3)/ (15,0; 5,4)	0,104/0,65

* двойка параметри за орбити с височина 600/1500 km

Друг интересен въпрос, е определянето на необходимата мощност P_{sat} на сателитните предаватели, за осъществяване на пренос на данни със задоволително ниска честота на битовите грешки (BER), по-малка от 10^{-5} (отново без прилагане на допълнителни техники за подобряване). Таблиците 8.4.5.3(а и б) съдържат резултатите от първоначалния бюджет на връзката при различни условия: за една антена плоска антена на борда - таблица 8.4.5.3а, и за антенни решетки - таблица 8.4.5.3б. На всякъде са представени две опции: стойности на наличните E_b/N_0 и съответния марж M за фиксирани мощности P_{sat} и P_{GS} , и обратно, необходимите мощности P_{sat} за фиксиран праг $E_b/N_0 = 9,6$ dB и марж $M = 3,5$ dB за две типични височини на LEO: 800 и 1500 km (горната граница за StarLink е 1150 km). Таблица 8.4.5.3а за единичен планарен антенен елемент показва, че необходимата мощност P_{sat} се увеличава с ширината на честотната лента и с надморската височина. Можем да видим, че изискванията за E_b/N_0 и маржа M не са удовлетворени за някои случаи (последният ред има малък или дори отрицателен марж).

Достигнати са удовлетворени резултати за 2 или 4 антенни елемента в X-обхвата - резултатите в таблица 8.4.5.3б за височини 600 и 1500 km. Антените са избрани с подходящо усилване и ширина на лъча. Ако усилването на антената се увеличи, необходимата предавана мощност от сателита определено намалява, дори и за височина на орбитата от 1500 km (която попада във вътрешния радиационен колан на Van-Allen).

Следва да оценим пропускателната способност в X-обхвата по DL канала от един CubeSat. Бърз анализ на LEO (напр. ~ 600 km надморска височина и $\sim 84^\circ$ наклон) показва, че един сателит ще преминава над фиксираната наземна станция, обикновено, веднъж дневно. Ако използваме единична антена с $\sim 60^\circ$ (-3 dB) ширина на лъча (еквивалентна на ~ 500 km ширина на „комуникационната следа“ върху земната повърхност), спътникът ще бъде "открит" за високоскоростен пренос на данни $r_b \approx 30-60$ Mbps (с QPSK модулация, $P_{sat} = 0,24$ W и $P_{GS} = 2,3$ W) с дадена наземна станция за интервал от около 2-3 min. Това е малък LoS период, но ако използваме превключваема антенна решетка с 4 елемента ($P_{sat} = 50$ mW, $P_{GS} = 490$ mW), този период може да се увеличи до 8-9 min със средно $r_b \approx 0,35 \cdot r_{b,max}$ (съображенията са описани по-

подробно в статиите [184, 185], където е предложена концепция за продължителни комуникационни сесии между малкия спътник и земната станция). Тази стойност може да се увеличи при по-голяма P_{sat} . Следователно, общият обем данни, който може да бъде прехвърлен за една комуникационна сесия, се оценява на ≥ 10 GB за един споделен DL канал. Това е напълно достатъчно (според нас) за обезпечаване на предложени проект за наблюдение на гама-радиация от CubeSat рояци, като тяхна вторична функция, заедно с осигуряването на комуникационния трансфер на данни, определен, като основна функция на тези рояци (за доставка на широколентов бърз интернет). При по-висока орбита (например 1500 km) битовата скорост намалява повече от 6 пъти, но все още остава достатъчно голяма.

Разбира се, не е добра идеята всеки спътник от рояка, отделно да комуникира с наземната станция за прехвърляне на натрупаните данни от гама-детектора, по време на орбитален тур около земното кълбо. Както е предложено в [171], обикновените членове на рояка (подчинените спътници), могат да комуникират и да изпращат натрупаните данни към главния спътник чрез установените междуспътникови връзки; в този случай само главният спътник ще бъде отговорен за прехвърлянето на данни към земната станция (междувременно главният спътник може да има възможности за предварителна бордова обработка на данните от наблюдението на гама-радиацията с цел допълнително намаляване на техния обем). Във всички случаи, когато връзките на членовете на рояка, се основават на принципа "главен-подчинен" сателит, пропускателната способност за данните ще се увеличи, а главният спътник може да използва специално предназначен канал за натрупаните от гама-мониторинга данни от целия рояк.

С направените изчисления показахме, че натрупаните данни от един гама-спектрометър няма да надвишават разумният обем от 20 kB и тяхното предаване към наземната станция няма да нарушават първичната комуникационна сесия в канала за връзка (необходимата скорост е по-малка от 0,16 Mbps/детектор, на фона на предложената скорост на връзката от 1000 Mbps, за сателитен интернет от ново поколение). Ако регистрираните в целия рояк данни се събират в главният спътник, то той трябва да носи отговорността да изпраща събраните и предварително обработени данни на избрана наземна станция в рамките на специални комуникационни сесии в определен период от време.

Научни приноси

1. При дистанционните методи за гама-картографиране, за получаване на достоверни резултати, сериозен проблем представлява калибрирането на цялата измервателна система, тъй като измервания се провеждат в условия много различни от лабораторните. В дисертацията сме адаптирали общите препоръки на *Международната агенция за атомна енергия* (МААЕ) за въздушни гама-спектрометрични обследвания към различни условия, като различни височини (от един до десетки m), различни терени, открити или закрити площи. Създаден е модифициран модел за калибриране, използващ различна геометрия и височина на калибрационните полети, след което експериментално е доказана неговата приложимост за пилотируеми летателни средства, чрез наземни сравнителни измервания.

2. Със създадения модел на калибриране на системата е извършено, за пръв път, пилотируемо въздушно гама-спектрометрично картографиране на няколко големи по площ територии с голямообемни детектори от NaI(Tl). Създадени са карти на концентрацията на естествените радионуклиди К, U и Th, карти на активността на техногенните ^{137}Cs и ^{60}Co , карта на общата мощност на дозата приведена към нивото на земната повърхност и сравнителни карти, които от една страна доказват точността на калибровката (по нивата на естествените радионуклиди), и от друга страна търсят нови замърсявания (от техногенни радионуклиди).

3. За целите на предложените в дисертацията методи за безпилотно дистанционно измерване на радиоактивност, е разработена олекотена универсална модулна детекторна система с два различни детектора. Разработената система позволява замяна и добавяне на отделни електронни модули в зависимост от поставените цели на конкретното изследване. Всички модули, за обработка на сигнала, геореферирание, запис на данни и запазване са свързани чрез управляващ модул и разработен за конкретните цели firmware.

4. В хода на изследванията свързани с дистанционните методи за гама-картографирането се установи поява на значителна неопределеност в измерването на радиоактивността, главно поради недостатъци в навигационните системи на *безпилотното летателно средство* (БЛС) и на детектора. С цел минимизиране на ефекта, е направена оценка на тази неопределеност и са предложени корекции в методите на измерване, а като допълнителна алтернатива за по-нататъшна работа, са избрани технически средства, подобряващи точността при позициониране (до 2-3 cm).

5. Използвайки БЛС, универсалната олекотена измервателна система, методиката за намаляване на неопределеността в позиционирането, адаптираните летателни планове и модифицирани модели за калибриране, са проведени два експеримента по картографиране и оценка (със и без спектрометрия) на активността на изкуствено поставени източници от ^{137}Cs и ^{60}Co . Сравнителни измервания с ръчно-преносим детектор, при същите условия, доказват приложимостта на получените резултати и достоверността на създадените карти.

6. Предложени са различни технически и методологични подобрения на аерокосмическите средства за осъществяване на дистанционните методи за гама-картографиране – БЛС и рояци от спътници, при изпълнение на чувствителни мисии по гама-регистрация за граждански, военни и научни цели. Специално внимание е отделено на методи за намаляване и увеличаване на *ефективната радарна отразяваща повърхност* (ЕРОП) на БЛС и са направени измерване, разработване и изследване на градиентни поглътители за намаляване на ЕРОП.

Публикации

1. I. Iliev, Calibration of a system for air-borne gamma spectrometry survey and mapping implementation, Bulgarian Chemical Communication (accepted for publishing in Vol. 4/2019), Sofia, 2019

2. P. Dankov and I. Iliev, Characterization and modeling of gradient-carbon absorber layers suitable for radar cross section reduction of UAVs, IEEE Xplore, 2018, PIERS 2017, DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293509
3. I. Iliev, Remote radio isotope identification using unmanned aerial vehicle, Bulgarian Journal of Physics (accepted for publishing), Sofia, 2019
4. И. Илиев, П. Данков, Дистанционни методи за гама-картографиране с помощта на безпилотни летателни средства (БЛС), Годишник на СУ, Том 111, 2018
5. И. Илиев, Радиоактивност и гама спектър, измерени чрез безпилотни летателни средства (БЛС), Светът на физиката, Том 02'2019, София, 2019
6. Iliev, I., V. Vasilev, M. Mladenova, "Airborne Gamma-Spectrometry Mapping", Int. Conf. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT), Vienna, Austria, 26-28.06.2017
7. Iliev, I., I. Pastuhov, V. Gourev, "Implementation of Airborne Gamma-Spectrometry Survey", [RAD Conference 2016](#), Nish, Serbia, 23-27.05.2016, [online available](#)
8. И. Илиев, П. Данков, И. Пастухов, „Анализ на възможностите за използване на безпилотни летателни средства и малки спътници за отдалечен контрол на радиационната обстановка“, Трети национален конгрес по физически науки, 29.09-02.10.2016, София, Интер Експо Център
9. I. Iliev, P. Dankov, Estimation of data-transfer rate from online gamma-ray monitoring performed by small satellite swarms in the near space, изпратена за публикуване в Годишника на СУ, Физически факултет, том 111, 2019

Благодарности

На целия екип на фирма Тита-Консулт ООД за безрезервната финансова, материална и интелектуална подкрепа.

На съпругата ми Христина и на децата – Илиан и Дафина за проявеното търпение и всички преглътнати лишения.

На научния ми ръководител доц. Пламен Данков за непрестанния заразен ентузиазъм към работата въпреки всички възникнали затруднения.

На НИС към СУ „Св. Климент Охридски“ за финансиране на проекти: № 80-10-82/2017 и № 80-10-209/2018.

На фонд „Научни изследвания“ към МОН за финансиране на проекта за изследване на градиентни поглътители № DN07-15/2017.

Литература

- [1] ICRU Report 53, Gamma-Ray Spectrometry in the Environment, International commission on radiation units and measurements, U.S.A, 01.12.1994.
- [2] Beck, H. L., DeCampo, J. and Gogolak, C. (1972). In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry, Report HASL-258 (U.S. Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory, New York).
- [3] Beck, H. L., and De Planque, G., The Radiation Field in Air Due to Distributed Gamma-Ray Sources in the Ground, USAEC Report HASL-195, May (1968)
- [4] Beck, H. L., Condon, W. J. and Lowder, W. M. (1964). Spectrometric Techniques for Measuring Environmental Gamma Radiation, Report No. HASL-150 (U.S. Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory, New York).
- [5] Finck, R. R. (1992). High Resolution Field Gamma Spectrometry and Its Application to Problems in Environmental Radiology, Ph.D dissertation (Lund University, Malmo, Sweden).
- [6] IAEA-TECDOC-1092, Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency, International Atomic Energy Agency IAEA, 1999.
- [7] IAEA-TECDOC-1363, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, International Atomic Energy Agency IAEA, 2003.
- [8] IAEA, 1991. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, Technical Report Series, No. 323, IAEA, Vienna
- [14] Grasty, R.L. & Minty, B.R.S. , 1995. A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys. Australian Geological Survey Organisation, Record 1995/60.
- [15] Minty, B.R.S. , 1992. Airborne gamma-ray spectrometric background estimation using full spectrum analysis. Geophysics, 57, 279-287.
- [16] Schwartz, G.F., Klingele, E.E., Rybach, L., 1992. How to handle rugged topography in airborne gamma ray spectrometry surveys. First Break, v. 10, n. 1, 11-17.
- [18] Б. Манушев, Практическа метрология на ядрените лъчения, Тита-Консулт ООД, София, 2001.
- [30] Connor, D. T., P. G. Martin, and 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
- [31] Zavala, M., Autonomous Detection and Characterization of Nuclear Materials Using Co-Robots, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, May 2016, online available
- [36] Iliev, I., I. Pastuhov, V. Gourev, "Implementation of Airborne Gamma-Spectrometry Survey", RAD Conference 2016, Nish, Serbia, 23-27.05.2016, online available
- [38] И. Илиев, П. Данков, И. Пастухов, „Анализ на възможностите за използване на безпилотни летателни средства и малки спътници за отдалечен контрол на радиационната обстановка“, Трети национален конгрес по физически науки, 29.09-02.10.2016, София, Интер Експо Център
- [40] Iliev, I., V. Vasilev, M. Mladenova, "Airborne Gamma-Spectrometry Mapping", Int. Conf. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT), Vienna, Austria, 26-28.06.2017 (to be published in Journal of Physical Science and Application, ISSN 2159-5348)
- [41] И. Пастухов, Въздушно обследване на земни територии за естествена и техногенна радиоактивност, Магистърска дипломна работа, Физически Факултет на СУ, София, 2014
- [42] Winkelmann, I., Schmerbeck, S. and Endrulat, H. J. (1990). Rapid Determination of soil contamination by helicopter gamma ray spectrometry", pages 405 to 410 in Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol. 1, IAEA STI/PUB/825 (International Atomic Energy Agency, Vienna).
- [44] I. Iliev, Calibration of a system for air-borne gamma spectrometry survey and mapping implementation, Accepted for publishing in Bulgarian Chemical Communication, Sofia, 2019

- [47] Chiozzi, P., Pasquale, V., Verdoya, M., De Felice, P., 2000. Practical applicability of field g-ray scintillation spectrometry in geophysical surveys. *Appl. Radiat. Isotopes*, 53, 215e220
- [48] G. Cinelli, L. Tositti, D. Mostacci, J. Bar, Calibration with MCNP of NaI detector for the determination of natural radioactivity levels in the field, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016
- [52] E. Ameri, S. H. Esmali, S. H. Sedighy, Ultra Wideband Radar Cross Section Reduction by Using Polarization Conversion Metasurfaces, *Nature*, 2019
- [53] G.A. Rao, S.P. Mahulikar, 2002, Integrated review of stealth technology and its role in airpower, *Aeronautical Journal* 106 (1066): 629–641
- [60] И. Илиев, Дипломна работа: „Радиолокация - Физични основи и приложения (пример: полицейски радар в Ка обхвата)“. Софийски Университет, ФзФ, 2010
- [61] И. Илиев, Дипломна работа: Измерване на радарна ефективна отразяваща повърхност, Софийски Университет, ФзФ, кат. РФЕ, 2013
- [68] P. Dankov and I. Iliev, Characterization and modeling of gradient-carbon absorber layers suitable for radar cross section reduction of UAVs, *IEEE Xplore*, 2018, PIERS 2017, DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293509
- [69] T. Dallmann, “Through the eyes of a radar: The visibility of UAVs to radar systems,” IHFT, RWTH Aachen, Feb. 7, 2015
- [70] N.N. Youssef, “Radar cross section of complex targets” *Proc. of the IEEE*, Vol. 77, No. 5, 722-734, May 1989, DOI: 10.1109/5.32062
- [71] Miacci, M. A. S. and M. C. Rezende, “Basics on radar cross section reduction measurements of simple and complex targets using microwave absorbers,” *Applied Measurement Systems*, Z. Haq, ed., InTech, 2012, ISBN: 978-953-51-0103-1.
- [72] Fui, Q., et al., “Ultra-broad band radar cross section reduction of waveguide slot antenna with metamaterials”, *Radio-Engineering*, Vol. 25, No. 2, 241-246, Jun. 2016, DOI:10.13164/re.2016.0241
- [73] “A new engineered stealth metamaterial is the blackest ever”, *New Scientist*, Jun. 2010, <https://www.newscientist.com/lastword/>
- [74] Levcheva, V. P., I. I. Arestova, B. R. Nikolov, and P. I. Dankov, “Characterization and modelling of microwave absorbers in the RF and antenna projects”, *Telfor Journal*, Vol. 1, No. 2, 57-60, 2009, <http://journal.telfor.rs/Published/Vol1No2/Vol1No2 A6.pdf>
- [75] “Keysight application notes”, http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/FreeSpace-SeminarRev2.pdf
- [76] Chen, C.-P., Z. Ma, T. Anada, and J.-P. Hsu1, “Further study on two-thickness-method for simultaneous measurement of complex EM parameters based on open-ended coaxial probe”, 35th EuMC' 2005, 505-508, Paris, Oct. 2005
- [77] Baginski, M. E., D. L. Faircloth, and M. D. Deshpande, “Comparison of two optimization techniques for the estimation of complex permittivities of multilayered structures using waveguide measurements”, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, Vol. 53, No. 10, 3251-3259, Oct. 2005
- [78] Ivanov, S. A. and K. V. Bachev, “Measurement of the complex dielectric constant, saturation magnetization and linewidth of microwave ferrites by a resonance method”, *Bulg. J. Phys.*, Vol. 11, 513-519, 1984
- [79] Dankov, P. I., “Two-resonator method for measurement of dielectric anisotropy in multi-layer samples”, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique*, Vol. 54, No. 4, 1534-1544, Apr. 2006
- [80] Levcheva, V. N., B. N. Hadjistamov, and P. I. Dankov, “Two-resonator method for characterization of dielectric substrate anisotropy”, *Bulg. J. Phys.*, Vol. 35, 33-52, 2008
- [81] Dankov, P. I., B. N. Hadjistamov, I. I. Arestova, and V. P. Levcheva, “Measurement of dielectric anisotropy of microwave substrates by two-resonator method with different pairs of resonators”, *PIERS Online*, Vol. 5, No. 6, 501-505, 2010
- [83] Baev, S. R., S. M. Gechev, B. N. Hadjistamov, and P. I. Dankov, “Modeling and simulation of lounenburg lens antennas for communication purposes”, *Proc. 16 Telecommunication Forum TELFOR 2008*, 488-491, Serbia, Belgrade, Nov. 25-27, 2008

- [84] Peshlov, V. N., P. I. Dankov, and B. Hadjistamov, "Models of multilayer antenna radomes with anisotropic materials", 1st European Conference on Antennas and Propagation EuCAP'2005, Nice, France, Nov. 2005, DOI 10.1109/EUCAP.2006.4584550
- [85] Dankov, P. I., V. N. Peshlov, and M. Gachev, "Modelling and characterization of multilayer antenna radomes with anisotropic materials", 30th ESA Antenna Workshop on Antennas for Earth Observation, Science, Telecommunications and Navigation Space Missions, 505-508, Special COST Action ASISTS Session, Nordwijk, The Netherlands, May 27-30, 2008, Online: http://www.radio.feec.vutbr.cz/ic0603/files/esa_workshop/cost_at_estec.pdf
- [86] Paris, D. T., "Computer-aided radome design", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 18, 7-15, Jan. 1970
- [91] EURADOS WG5, Directorate-General for Energy and Transport, Directorate H – Nuclear Energy, Unit H.4 – Radiation Protection, Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew, Radiation Protection 140, European Commission, 2004
- [98] Описание на работата на софтуер Gamma Design: <https://www.gammadesign.com/Features.aspx>
- [99] Описание на работата на софтуер ArcGis (пакет): <http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis>
- [106] National Institute of Standards and Technologies (NIST), U.S. Department of Commerce, <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>
- [109] Euler, H.-J., Zelzer, O., Takac, F., Zebhauser, B.E. (2003): Applicability of Standardized Network RTK Messages for Surveying Rovers, ION GPS/GNSS 2003, September 9-12, 2003, Portland OR
- [110] Dai, L., Han, S., Wang, J., Rizos, C. (2001): A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning. ION GPS 2001, 392-403
- [117] А. Филипов, Л. Цанков, Използване на безпилотни летателни системи за оценка на радиационната обстановка, ГСУ Геолого-географски факултет, 2014, Том 106, Книга-2, 343-349
- [122] Kurvinen, K., P. Smolander, R. Pöllänen, S. Kuukankorpi, M. Kettunen, and J. Lyytinen. 2005. "Design of a Radiation Surveillance Unit for an Unmanned Aerial Vehicle." Journal of Environmental Radioactivity 81 (1): 1–10. doi:10.1016/j.jenvrad.2004.10.009.
- [123] Pöllänen, R., H. Toivonen, K. Peräjärvi, T. Karhunen, T. Ilander, J. Lehtinen, K. Rintala, T. Katajainen, J. Niemelä, and M. Juusela. 2009. "Radiation Surveillance Using an Unmanned Aerial Vehicle." Applied Radiation and Isotopes 67 (2): 340–344. doi:10.1016/j.apradiso.2008.10.008.
- [124] Boudergui, K., F. Carrel, T. Domenech, N. Guenard, J.-P. Poli, A. Ravet, R. Woo. 2011. "Development of a Drone Equipped with Optimized Sensors for Nuclear and Radiological Risk Characterization." In 2011 2nd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and Their Applications, 1–9. doi:10.1109/ANIMMA.2011.6172936.
- [125] Cao, Y., X.-B. Tang, P. Wang, J. Meng, X. Huang, L.-S. Wen, and D. Chen. 2015. "Spectrum Correction Algorithm for Detectors in Airborne Radioactivity Monitoring Equipment NH-UAV Based on a Ratio Processing Method." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 797: 290–296. doi:10.1016/j.nima.2015.07.012.
- [126] Furutani, T., K. Uehara, K. Tanji, M. Usami, and T. Asano. n.d. "A Study on Micro-Scale Airborne Radiation Monitoring by Unmanned Aerial Vehicle for Rural Area Reform Contaminated by Radiation." no. 1: 1–9. http://www.ists.co.jp/wordpress_en/wp-content/uploads/Study-report.pdf
- [127] Han, J., and Y. Chen. 2014. "Multiple UAV Formations for Cooperative Source Seeking and Contour Mapping of a Radiative Signal Field." Journal of Intelligent & Robotic Systems: Theory and Applications 74: 323–332. doi:10.1007/s10846-013-9897-4.
- [128] Han, J., Y. Xu, L. Di, and Y. Chen. 2013. "Low-cost Multi-UAV Technologies for Contour Mapping of Nuclear Radiation Field." Journal of Intelligent & Robotic Systems 70 (1–4): 401–410. doi:10.1007/s10846-012-9722-5.
- [129] MacFarlane, J. W., 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. 2014. "Lightweight Aerial Vehicles for Monitoring, Assessment and Mapping

of Radiation Anomalies.” *Journal of Environmental Radioactivity* 136: 127–130. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.05.008

[130] Martin, P. G., O. D. Payton, J. S. Fardoulis, D. A. Richards, and T. B. Scott. 2015. “The Use of Unmanned Aerial Systems for the Mapping of Legacy Uranium Mines.” *Journal of Environmental Radioactivity* 143: 135–140. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.02.004.

[131] Martin, P. G., O. D. Payton, J. S. Fardoulis, D. A. Richards, Y. Yamashiki, and T. B. Scott. 2016. “Low Altitude Unmanned Aerial Vehicle for Characterising Remediation Effectiveness Following the FDNPP Accident.” *Journal of Environmental Radioactivity* 151: 58–63. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.09.007.

[132] Sanada, Y., and T. Torii. 2015. “Aerial Radiation Monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Using an Unmanned Helicopter.” *Journal of Environmental Radioactivity* 139: 294–299. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.06.027.

[133] Towler, J., B. Krawiec, and K. Kochersberger. 2012. “Radiation Mapping in Post-Disaster Environments Using an Autonomous Helicopter.” *Remote Sensing* 4 (12): 1995–2015. doi:10.3390/rs4071995.

[134] D. Connor, P. G. Martin & T. B. Scott (2016) Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems, *International Journal of Remote Sensing*, 37:24, 5953-5987, DOI: 10.1080/01431161.2016.1252474

[151] E. L. Shkolnik (2018), “On the verge of an astronomy CubeSat revolution”, *Nature Astronomy*, vol. 2, May 2018, pp. 374-378, www.nature.com/natureastronomy

[152] M. Knapp, S. Seager (2015), “ASTERIA: A CubeSat for exoplanet transit and stellar photometry”, ESS/AAS Meeting 3 106.08 (Am. Astronom. Soc.; <https://aas.org/>)

[153] PicSat mission website, <https://picsat.obspm.fr/>

[154] P. Kaaret (2017), “HaloSat – a CubeSat to study the hot galactic halo”, Am. Astronom. Soc. Meeting 328.03 (2017), <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017AAS...22932803K>

[155] B. T. Fleming et al. (2017), “The Colorado Ultraviolet Transit Experiment (CUTE): a dedicated cubesat mission for the study of exoplanetary mass loss and magnetic fields”, *SPIE Conf. Series*, Vol. 10397 (SPIE, 2017), <https://arxiv.org/pdf/1801.02673.pdf>

[156] E. Shkolnik, et al. (2017), “Monitoring the high-energy radiation environment of exoplanets around low-mass stars with SPARCS (star-planet activity research CubeSat)”, *Astrobiol. Sci. Conf.* 2017 1965; <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018AAS...23122804S>

[157] J. Racusin, et al. (2017), “BurstCube: a CubeSat for gravitational wave counterparts”, Preprint at <https://arxiv.org/abs/1708.09292> (2017).

[160] N. Olsen, et al. (2013), “The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products”, *Earth Planets Space*, 65, pp. 1189–1200, 2013

[161] I. Levchenko, M. Keidar, J. Cantrell, Y.-L. Wu, H. Kuninaka, K. Bazaka, S. Xu “Explore space using swarms of tiny satellites”, *Nature*, vol. 562, 11 Oct. 2018, pp. 185-187

[162] D. Messier (2014), “Is Google Planning Son of Teledesic?”, *Parabolic Arc.*, 2014-06-14

[163] OneWeb site: <https://www.oneweb.world/>

[164] S. Clark (2019), “First six OneWeb satellites launched from French Guiana”, *Spaceflight Now*; retrieved 2019-03-04

[165] P. B. de Selding (2015), “OneWeb Taps Airbus To Build 900 Internet Smallsats”, *SpaceNews*, 2015-06-15, retrieved 19 June 2015

[166] SpaceX's site: <https://www.spacex.com/>

[167] Starlink: [https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_\(satellite_constellation\)#cite_note-announcementEvent-6](https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_(satellite_constellation)#cite_note-announcementEvent-6)

[168] SpaceX Seattle 2015: <https://www.youtube.com/watch?v=AHeZHyOnsm4>

[169] <https://www.starlink.com/>

[170] M. Wall (2019), “Elon Musk Says It's 'So Far, So Good' for SpaceX's 1st 60 Starlink Satellites”, <https://www.space.com/elon-musk-says-spacex-starlink-satellites-doing-well.html>

[171] S. Ivanov, B. Konstantinov, S. Tzokov, T. Ivanov, T. Kanev, V. Zlateva, M. Avramov, B. Ivanov, N. Neshev, V. Vassilev, O. Ognyanov, and P. Dankov (2017), “Space Debris Identification, Classification and

Aggregation with Optimized Satellite Swarms”, in Innovative Ideas for Micro/Nano-Satellite Mission, edited by R. Sandau, R. Kawashima, S. Nakasuka, J. J. Sellers, IAA Publ., International Academy of Astronautics, Book Series; ISBN 978-2-917761-28-1, vol. 4

[173] W.T. Vestrand, D.J. Forrest, K.A. Levenson, C. Whitfordz, D. Fletcher-Holmesz, A. Wellsz, and A. Owens (1999), “CATSAT: A Small Satellite for Studying Gamma-Ray Bursts”, AIP Conference Proceedings, Dec. 1999, DOI: 10.1063/1.1302231

[179] I. Iliev, P. Dankov (2018), “Distance Methods for Gamma Mapping with Unmanned Aerial Vehicles (UAV)” (in Bulgarian), Annuaire de l’Université de Sofia “St. Kliment Ohridski”, Faculté de Physique, v. 109, 2018 (online available)

[180] O. Montenbruck (2003), “Kinematic GPS positioning of LEO satellites using ionosphere-free single frequency measurements”, Aerospace Science and Technology 7 (2003) 396–405

[181] M. Gachev (2007), “Satellite Communications”, Heron press, ISBN 978-954954954-580-223-0 (2007)

[182] ITU-R, Amateur and amateur-satellite services, Ch.3 „Amateur-satellite services“ (2008); online available: <http://www.itu.int/en/ITU-R/space/AmateurDoc/AmateurSatServiceFreq.pdf>

[183] J. A. King, J. Ness, G. Bonin, M. Brett, D. Faber (2012), “Nanosat Ka-Band Communications - A Paradigm Shift in Small Satellite Data Throughput”, 26th Annual AIAA/USU Conf. on Small Satellites, Logan, Utah USA, Aug. 2012

[184] P. Dankov, M. Gachev, V. Vassilev, K. Zlatkov, Z. Kiss'ovski, D. Mateev, O. Ognyanov, I. Krassimirov, C. Simeonov (2013), "Small Satellite Mission in Support of the Science Expeditions' Activities of in the Antarctic", in "Innovative Ideas for Micro/Nano-Satellite Mission", edited by R. Sandau, R. Kawashima, S. Nakasuka, J. J. Sellers, IAA Publ., International Academy of Astronautics, Book Series, ISBN 978-2-917761-28-1, Tokyo, Japan, vol. 1, No. 3 pp. 88-100

[185] P. Dankov, M. Gachev, O. Ognyanov (2012), “Improvement of the Communication Function of Small University Satellites for Support of Human Activities in the Polar Regions”, Section “Small Spacecrafts”, XVI Int. Conf. “RESHETNEV READINGS”, Nov2012, Krasnoyarsk, Russia

[186] I. Iliev, P. Dankov, Estimation of data-transfer rate from online gamma-ray monitoring performed by small satellite swarms in the near space, (приета за публикуване) Годишника на СУ, Физически факултет, том 111, 2019

[187] И. Илиев, П. Данков, Дистанционни методи за гама-картографиране с помощта на безпилотни летателни средства (БЛС), Годишник на СУ, Том 111, 2018

[188] И. Илиев, Радиоактивност и гама спектър, измерени чрез безпилотни летателни средства (БЛС), Светът на физиката (приета за публикуване), София, 2019