

Csurgai József

Drónra szerelhető radiológiai modul fejlesztési koncepció, hardveres felépítés és nukleáris mérés technikai alapok

Különböző célú és rendeltetésű, merev- vagy forgószárnyú drónokra kialakított szenzoros felépítmények széles skálája valósult már meg, vagy áll megvalósítás alatt. A szerző egy cikk keretében ízelítőt szeretne nyújtani a jelen TKP2021-NVA-16 pályázat keretében kialakítandó légi sugárfelderítő, drónra szerelhető szenzormodul fejlesztéséről.

Jelen cikk röviden áttekinti az alkalmazás műveleti kritériumait, a szenzormodul fejlesztésének előzményeit, a K&F mérés technikai alapjait, kialakítás alatt álló radioszenzoros és általános rendeltetésű érzékelő rendszerét, a hordozóeszköz lehetséges repülési magasságának és sebességének tervezési alapjait.

Kulcsszavak: légi sugárfelderítés, radioszenzoros modul, sugárhelyzet-felmérés

1. Bevezetés

A környezetünk radioaktív sugárzásának mérése többcélú, szerteágazó feladat. Általában arra gondolunk, amit leggyakrabban látunk, hogy telepített monitoringrendszer földközeli meteorológiai adatokat mér, és mellesleg a környezeti gamma-háttérsugárzás adatait is gyűjti és továbbítja. Esetleg az is eszünkbe jut, hogy voltak a világban olyan nukleáris balesetek, amelyek kapcsán a környezetbe jutott radioaktív szennyeződés mértékét is mérésekkel határozták meg. Valójában a környezeti radioaktív sugárzás mérése bonyolult feladatrendszer, összetett monitoring, amely kiterjed a mindenfajta radioaktív sugárzás mérésére, magában foglalja az in situ pontmérésektől kezdve a folyamatos mintavételes méréseken keresztül a különböző környezeti mintavételi eljárásokat (dörzsminta, térfogati minta: levegő, víz, talaj, növényzet, iszap stb.) és a laboratóriumi mintafeldolgozást, valamint energia-, vagyis izotópszелеktív spektrometriás méréseket is. Ezenkívül a mérések, vagyis ezek monitoringrendszerbe foglalása történhet környezet-ellenőrzési, katasztrófavédelmi (nukleárisbaleset-elhárítási), sőt kimondottan katonai célból is. Az in situ mérések lehetnek helyszíni, lokális jellegűek (általában ezt gyalogos felderítésnek hívjuk, mivel leggyakrabban kézi műszerrel, gyalogos módszerrel végzik), vagy valamilyen járművel útvonal- vagy területfelderítés érdekében végeznek. A járművel végzett területfelderítésnek az utóbbi három-négy évtizedben legperspektivikusabb formája, ha ezt a levegőből végzik, vagyis légi sugárfelderítést végeznek.

Nos, eljutottunk ahhoz a ponthoz, amellyel ebben a cikkben a szerző szeretne foglalkozni. Mondjuk úgy, hogy alapvetően a légi sugárfelderítéssel mint felderítési módszerrel, de ezt speciálisan repülő, pontosabban forgószárnyú, kopter típusú drónra szerelt mérőrendszerrel kívánja megvalósítani. Igen, a drónra szerelt szenzorokkal való megfigyelés, mérés az utóbbi két évtized slágertémája, és most a szerző is akar ezen a csonton rágódni egy kicsit.

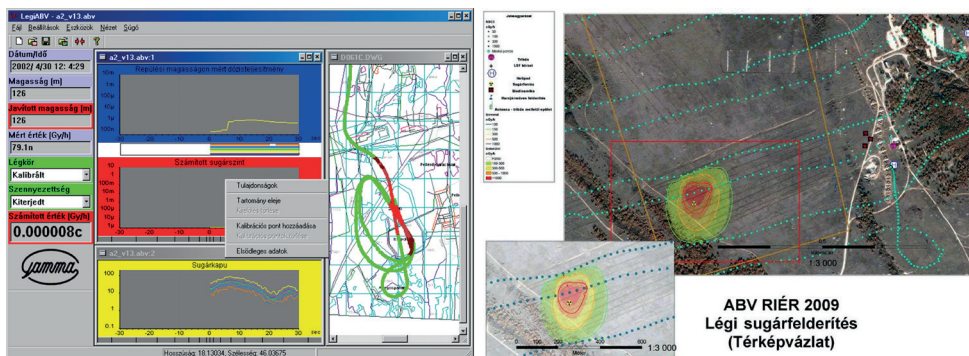
Elsősorban röviden a légi sugárfelderítés technikájára szánunk néhány szót, majd megnézzük, hogyan lehet ezt a méréstechnikát egy repülő drónra felrakni. Végül, persze, kíváncsiak vagyunk rá, vajon milyen lesz a várható eredmény, milyen tartalommal kerül emészthető formában az asztalra.

Még egy fontos megjegyzés: a szerző fenn tartja magának a jogot, hogy a cikk tárgyát képező, drónra szerelhető radiológiai modult helyenként radioszenzoros modulnak, radio-szenzor-modulnak, radiomodulnak, esetleg radiológiai modulnak hívja. Ez ne tévessze meg a kedves Olvasót, minden esetben ugyanarról lesz szó.

2. Szakirodalmi áttekintés

A légi sugárfelderítés módszertanával, ahogyan a bevezetőben is említettük, az utóbbi évtizedekben is behatóan foglalkoztak. A teljesség igénye nélkül, néhány állomást említünk csak, amelyet a szerző fontosnak ítélt. Az első, tudományos értékű alapdokumentumnak tekinthető műnek a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség gondozásában megjelent ajánlásokat tekinthetjük [1], [2]. Ez felöleli a légi sugárfelderítés teljes feladat- és műszaki-tudományos problémarendszerét, három évtized távlatából is nagyon jól alkalmazható módszertant és méréstechnikai sajátosságokat tartalmaz. Máig aktuális például a különböző magasságból mért dózisteljesítménynek a földi, 1 m-es referenciaértékhez való átszámítási módszere, a magasságkorrekciója, illetve a kozmikus háttér-kompenzációs kalibrációs technikája.

Természetesen a hazai fejlesztések sem maradtak el. Sőt, a kétezres évek legelején, konkrétan 2001–2002-ben fejlesztették ki a Magyar Honvédségben majd két évtizedig szolgálatot teljesítő 2 db légi sugárfelderítő konténert (LSF-konténer), amelynek műszaki fejlesztésében, kalibrációjában, tesztjeiben a szerző tevékeny részt vállalt [3], [4]. Itt a hordozó repülőeszköz a MI-24D harci helikopter volt, amely szárnyalatti tartóin hordozta a felderítő konténert. Bár a konténer műszerezettsége korszerű volt, a NATO más fejlett tagállamaiban alkalmazott hasonló rendeltetésű eszközök műszerezettségénél semmiben nem volt jobb. Világszínvonalúvá az eszközt az adatfeldolgozási technikája tette. A konténer mérési adatait megjelenítő szoftver mind offline, mind online adatforgalom esetén teljeskörűen használta a DTA-50 térképészeti adatbázist, a dinamikus magasságkorrekciót GPS, barometrikus magasságmérő műszerek adataival és a DDM-50 digitális domborzati modell használatával végezte. Az ehhez alkalmazott eljárásokat és szoftveres kódokat egy, akkoriban párhuzamosan futó kutatással kapcsolatban fejlesztette ki a szerző, amit szennyező anyagok levegőben való terjedésének numerikus szimulációjához alkalmaztak [5], [6]. Ezenkívül, a valós sugárhelyzetet az ArcInfo/ArcView rendszerébe konvertálta a fejlesztők által írt szoftver.



1. ábra

Az LSF-konténer mérési adatokat megjelenítő szoftvere a DTA-50 adatbázist használó modullal, illetve adatfeldolgozás után a valós sugárhelyzet megjelenítése ArcInfo rendszerben [a szerző]

A konténereszek során kikristályosodott az a módszertan, amely lehetőséget adott három fő pontban megfogalmazott képesség elérésére:

- a terepszennyezés felderítése. A nagy kiterjedésű sugárszennyezés feltérképezése során számítással meg lehet határozni az egyes területek sugárszintjét a repülési magasság, a légköri és talajviszonyok figyelembevételével;
- pontszerű radioaktív források behatárolása, forró pont bemérése. A környezet dózisteljesítmény-viszonyaitól szignifikánsan eltérő pontok alapján meg lehet határozni pontszerű források, illetve forró pontok földrajzi koordinátáit;
- radioaktív izotópok azonosítása. Energiaszelektív mérésekkel támpontot lehet nyújtani a radioaktív szennyezettesség összetételének becsléséhez.

Hát, a harmadik pont valójában tényleg csak becslést nyújthatott a szennyezettesség, illetve a talaj izotópleltárára, hiszen a konténerben lévő üreges szcintillációs detektor spektruma négy csatornára lett kiosztva. Ez szükségmegoldás volt, mivel a konténer alapvetően harcászati-hadműveleti követelményekben megfogalmazott kritériumok szerint működött, a hordozó-helikopter pástázó repülést végzett 100–180 km/h sebességgel, az adatlekérdezés 2–4 s gyakoriságú volt, ami egyszerűen nem tette lehetővé spektrum felvételét, így a szcintillációs detektor „csak” egy nagy hatásfokú „fotonvadász” volt, a Compton-tartomány ugyanolyan értékes információt képviselt, mint a spektrumban lévő teljesenergia-csúcsok.

A levegőből való energia-, vagyis izotópszelektív gamma-spektrometriás mérésekre valós igény van, nemcsak nukleárisbaleset-elhárítási feladatok szempontjából, hanem ez a fajta technika igen értékes információt nyújthat a talajkutatásban, talajmorfológiai vizsgálatoknál is. Természetesen ez az alkalmazási forma némi magyarázatra szorul. A talaj szerkezete a fő befolyásoló paraméter számos fizikai, kémiai és biológiai folyamatban. Az üledékek szemcsemérete befolyásolja a talajban lejátszódó transzport-, lerakódási és eróziós folyamatokat [7], [8], valamint az ásványi összetételnek a szerves anyagokat, tápanyagokat és szennyező anyagokat adszorbeáló tulajdonságát. A talaj szerkezete döntő mértékben befolyásolja a hidraulikai vezetőképességet és ezáltal a felszíni víz beszívargását is [9], ami nagymértékben befolyásolja a talajvíz elérhetőségét és az áramló víz útját. A jelenleg megfigyelt anyagszerkezeti jellemzők értékes bizonyítékai a folyók elmozdulási folyamataiból eredő, elhagyott

csatornák feltöltődésével járó fejlődési folyamatoknak, mint például a meanderek és a holtágak kialakulása. A talajban lévő homok-, iszap- és agyagkomponensek mennyiségi analízise hagyományosan közvetlen módszerekkel (például szítálás, üledékképzés, lézerdiffrakciós elemzés) történik, az ezekből eredő hátrányokkal együtt, mint például a vizsgált térfogat korlátozott mérete, esetlegesen időigényes és roncsolásos műveletek [10], [11]. A talajszerkezet közvetett mérései távérzékeléses felmérésekkel áthidalhatják ezeket a korlátokat, nagy felbontású térképeket szolgáltatva a talaj tulajdonságairól. Emellett a műholdak fedélzetére szerelt multispektrális és radarérzékelőkkel végzett talajvisszaverődési mérések [12], valamint a közeli felmérések során szerzett gamma-sugárzási adatok hasznos és ígéretes lehetőségnek bizonyultak a talajszerkezet közelítő becslésére [13]. Az agyag- és iszapszemcsék általában kolloidként viselkednek, és megnövekedett fajlagos felületük felelős a kationok [pl. K(I), U(IV), U(VI) és Th(IV)] adszorpciójáért [14]. Összességében, ásványi szerkezetre összpontosítva, általános szabályként elmondható, hogy a természetes radioizotópok nagyobb mennyiségben fordulnak elő az agyagásványokban (a finom frakcióra jellemző), mint a kvarcban (a homok fő alkotóeleme), ami gamma-spektroszkópiás analízissel vizsgálható.

Itt meg kell jegyeznünk, hogy amikor olyan gamma-spektroszkópiás mérésről beszélünk, amelyet repülőeszköztől végzünk, ezt alapvetően alacsony felbontású szcintillációs technikával feltételezzük, mivel nagy felbontású félvezető (HPGe) technika alkalmazására, főleg, ha kis teherbírású drónról van szó, egyelőre nincs lehetőség, a germánium detektor nitrogénhűtése és a detektor összehasonlíthatatlanul magasabb ára miatt. Persze, manapság már a dinamikus hűtést megvalósító termoelektromos hűtés ki tudja váltani a kriosztátban tárolt folyékony nitrogénnel való statikus hűtést, de számunkra ez sem megoldás, mivel ez még szintén jelentős tömegtöbbletet eredményez, és nagy teljesítményű tápegységet követel. Így hát marad a jó öreg, nagy hatásfokú szcintillációs detektor, amelynek a környezeti mérésekhez csak a hőmérséklet változása okozta spektrumtorzulását kell kompenzálni [15].

Valójában, az LSF-konténer repülései, a rengeteg mérés, teszt inspirálta a szerzőt, hogy kialakítsa a drónra szerelhető radiológiai konténer, röviden radioszenzoros modul fejlesztési koncepcióját, ami főként arra épül, hogy mit tudott, vagy tud a helikopterre, esetleg merev szárnyú repülőeszközeire szerelt légi sugárfelderítő rendszer, illetve mi az, amit nem, vagy csak korlátozottan. Ehhez járul hozzá a légi sugárfelderítő szenzorozott felépítésére, illetve működésére vonatkozó információ, amely szintén az LSF-konténer tapasztalataira épül.

Szóval, tekintsük át azt a koncepciót, amelynek szellemében (és persze a lehetőségek függvényében) a radioszenzor-modul prototípusa lesz kifejlesztve. A pályázat, amely a fejlesztést lehetővé teszi, a TKP2021-NVA-16 megnevezést viseli, maga a radioszenzor-modul a jelen cikk szerzőjétől a „RadiShell” fantomnevet kapta. A prototípus alapverzió „ZERO”, a tervezett, továbbfejlesztett változat „MAX”, két könnyített, kisebb hordozóra tervezett változat a „MINI” és „MICRO” kódneveket viselik.

3. A radioszenzor-modul tervezési kritériumai, felépítése, főbb elemei

A modul hardverének tervezése néhány alapvető szempont, illetve követelmény szerint történt. Ezeket felsorolásszerűen az alábbiakban lehet megfogalmazni:

- vezérlő elv a modul teljes körű autonóm működése, vagyis független volta a repülőeszköz fedélzeti rendszereitől. Ez azt is jelenti, hogy a modulnak önálló tápegységgel,

pozíciómeghatározási képességgel, illetve, online adatforgalom esetén, adattovábbítási kommunikációs rendszerrel kell rendelkeznie. Az offline adatgyűjtés minden esetben a kontroller alaplap kommunikációjában biztosított;

- a szenzormodulnak rendelkeznie kell olyan sugármérő műszerezettséggel, amely egyrészt biztosítja a repülési magasságból történő dózisteljesítmény-mérést és gammaspektrum felvételét, másrészt minimális teljesítményigényű és elegendően kis tömeggel rendelkezik. Ezek a paraméterek egymással „versengők”, vagyis itt mindenképpen szükség van optimalizálásra;
- a modulnak rendelkeznie kell olyan általános rendeltetésű szenzorokkal, amelyek a pozíciómeghatározáshoz és a levegőállapot méréséhez szükségesek;
- a központi adatgyűjtő egységnek, mikrokontrollernek biztosítani kell a perifériák (műszerek, szenzorok, adatkommunikációs egység) kezelését, legyen robosztus, megbízható;
- a mikrokontroller és perifériák legyenek nyílt kódúak, könnyen és megbízhatóan programozhatók C/C++ nyelven. Ez a szempont szubjektív, mivel a fejlesztő szempontjából fontos követelmény;
- a tápegységnek biztosítani kell a modul hardverének teljesítményigényét jelentősen hosszabb ideig, mint a repülőeszköz maximális repülési ideje. Ezt az időt önkényesen határozzák meg, mivel a tápegység a modul belsejében lesz elhelyezve, itt ugyan az akkumulátorok feltöltése kívülről megoldható, de ha egyszer használatos elemekkel történik a táp biztosítása, akkor azok cseréje miatt meg kell bontani a burkot. Alapvetően kívülről, USB-csatlakozással szerelt módon tölthető táp van tervezve, a mikrokontroller és a perifériák 5, illetve 3,3 V feszültségigényű eszközök lesznek;
- a radioszenzoros modul kifelé való adatkommunikációja teljes mértékben nyílt lesz, semmilyen titkosítással vagy védelemmel nem fog rendelkezni. Ez szokatlanul tűnhet, de most egy prototípus áll kialakítás alatt, és kizárólag tudományos-műszaki szempontok szerint történik a fejlesztés. Majd, ha műszaki szempontból sikeres lesz a prototípus (valamelyik változata), és fellép ilyen igény, akkor a protokoll is ki fogja elégíteni azokat a követelményeket, amelyeket majd támasztanak felé.

Az alapvető komponensekről az alábbiakban ejtünk néhány szót. Nagyon fontos és alapvető körülmény, hogy az egész fejlesztés „Arduino” rendszerben és azzal kompatibilis környezetben valósul meg. Miért? Erre a kérdésre néhány pontban ki lehet fejteni a választ:

- legfontosabb, hogy az Arduino és azzal kompatibilis hardverkomponensekből összeállított rendszer tökéletesen és maximálisan kielégíti a levegőből végzett mérések mind nukleáris, mind általános mérés technikai követelményeit, mind az adatkommunikációra vonatkozó műszaki követelményeket;
- az Arduino rendszer komponenseinek ár/érték aránya a legkedvezőbb. Teljesen szükségtelen felesleges kiadásokkal terhelné a fejlesztési projektet, ha a fenti tudományos műszaki követelményeket töredék anyagi ráfordítással is ki lehet elégíteni;
- az Arduino nemzetközi projekt teljesen nyílt kódú, könnyen programozható, ingyenes és megbízható fejlesztőkörnyezettel rendelkezik. Minden hardverkomponenst teljes körű dokumentációval, megbízható, nyílt kódú driverrel látnak el, nincsenek elhallgatások, ipari titkok, egyszóval, ideális környezet biztosított a fejlesztéshez;

- minden hardver- és szoftverkomponens gyorsan, zökkenőmentesen beszerezhető, letölthető;
- alapvetően a szerző által preferált C/C++ környezetben programozható (ahogy már fentebb említve volt), de más (Python, Java stb.) környezetben is könnyen kezelhető, multiplatformos rendszer.

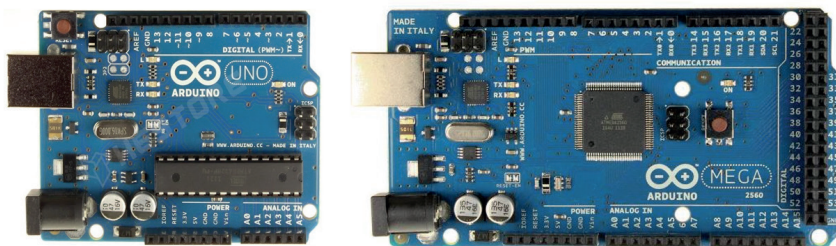
3.1. A radioszenzoros modul hardverkomponensei, perifériái

Itt röviden áttekintjük a tervezett radioszenzor-család változataiban alkalmazott hardverkomponenseket. Egyelőre csak felsorolás módszerével, később a család tagjainak felépítésében specifikáljuk az egyes verziókban alkalmazott egyedi szettek összetételét.

3.1.1. Mikrokontroller

A radiomodul központi „agya” a mikrokontroller. Főbb részei az alaplap, CPU, memória, tápegység, analóg, digitális adatportok és 5/3,3 V-os tápkimenetek.

Az alkalmazott típusok az Arduino UNO és MEGA kontrollerek.



2. ábra
Arduino UNO és MEGA alaplapok [16]

Az UNO alaplap 14 digitális (D0-D13) és 6 analóg (A0-A5) porttal rendelkezik, valamint stabilizált 3,3/5 V tápfeszültséget szolgáltat a perifériák felé. A MEGA alaplap 54 digitális és 16 analóg porttal rendelkezik. Mindkét alaplap USB I/O csatlakozóval és 9 V-os tápbemenettel van ellátva. A tápfeszültséget az USB-n keresztül is fel tudják venni. A prototípusban az alaplap önálló, nagy kapacitású 9 V-os tápegységgel lesz ellátva. Az offline adatgyűjtés az alaplapi USB-portról történik, memóriakártyára vagy memóriamodulra.

3.1.2. Általános rendeltetésű szenzorok

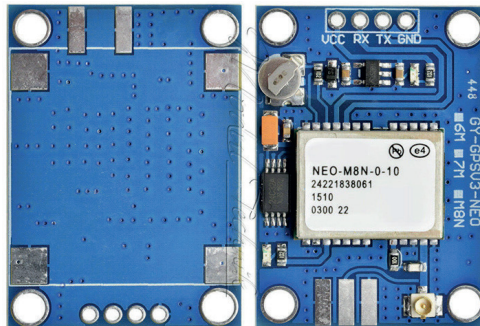
A pozíció meghatározásához, illetve a levegőállapot méréséhez szükséges szenzorok bármilyen méretű és műszerezettségű típusváltozatnak „kötelező” alkotóelemei.

3.1.2.1. GPS-vevő

A pozíció meghatározásához az u-blox® gyártmányú NEO-M8N GPS-vevő bizonyult a legalkalmasabbnak, rendkívül felhasználóbarát, az adatkimenete Adafruit_GPS.h meghajtón keresztül, egész-, illetve lebegőpontos számokban kerül ki egy Adafruit_GPS megnevezésű adatstruktúrába rendezve, ezek közül a legáltalánosabban használtak az 1. táblázatban találhatóak:

1. táblázat
A leggyakrabban használt változói az Adafruit_GPS struktúrának [a szerző]

Változó megnevezése	Jelentés	Változó típusa	Megjegyzés
hour	óra	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
minute	perc	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
seconds	másodperc	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
milliseconds	ezred mp.	16 bites egész	GMT – greenwichi középidő
year	év	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
month	hónap	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
day	nap	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
latitude	szélesség fok/perc	lebegőpontos	DDMM.MMMM
longitude	hosszúság fok/perc	lebegőpontos	DDDMM.MMMM
latitudeDegrees	szélesség fok.tizedfok	lebegőpontos	
longitudeDegrees	hosszúság fok.tizedfok	lebegőpontos	
altitude	magasság	lebegőpontos	Tengerszint feletti magasság
speed	sebesség	lebegőpontos	Sebesség csomóban
angle	haladási irány	lebegőpontos	Földrajzi északtól való eltérés fokokban
lat	É/D félteke	karakter	'N'/'S'
lon	K/NY félteke	karakter	'E'/'W'
satellites	műholdak száma	8 bites egész	

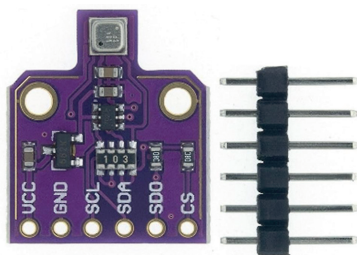


3. ábra
A NEO-M8N GPS-vevő [17]

A GPS-vevő az alaplap 3,3 V-os portjáról kapja a tápfeszültséget, az adatkommunikáció az alaplap két digitális portjáról (D6-rx, D7-tx) történik.

3.1.2.2. Hőmérséklet-, relatív páratartalom- és légnyomásmérő szenzor

A levegőállapot méréséhez a CJMCU-680 megnevezésű szenzor lett kiválasztva, az érzékelője a Bosch gyártmányú BME680 típusú chip, hőmérséklet-, relatív páratartalom- és légnyomásmérő képességgel.



4. ábra

A CJMCU-680 kombinált levegőállapot-mérő a BME680 BOSCH szenzorral [18]

A kombinált mérő az Adafruit_BME680.h driverrel egy Adafruit_BME680 adatstruktúrában adja vissza a mért adatokat, amelynek változói a 2. táblázatban láthatók.

2. táblázat

A mérőszensor adatstruktúrájának kimeneti változói [a szerző]

Változó megnevezése	Jelentés	Változó típusa	Megjegyzés
temperature	hőmérséklet	lebegőpontos	°C
pressure	nyomás	32 bites egész	Pa
humidity	relatív páratartalom	lebegőpontos	%
seaLevel	referencia atmoszferikus nyomás	16 bites egész	bemeneti változó, tengerszinti nyomás vagy referencia relatív talajszinti nyomás
readAltitude(seaLevel)	relatív magasság	lebegőpontos	függvény, referencia nullponti nyomást vár bemenetként, kimenete a relatív magasság, m

A magasságszámításnál a barometrikus magasságmérést alkalmazzuk, mivel az jóval pontosabb, mint a GPS segítségével kapott magasságvérték.

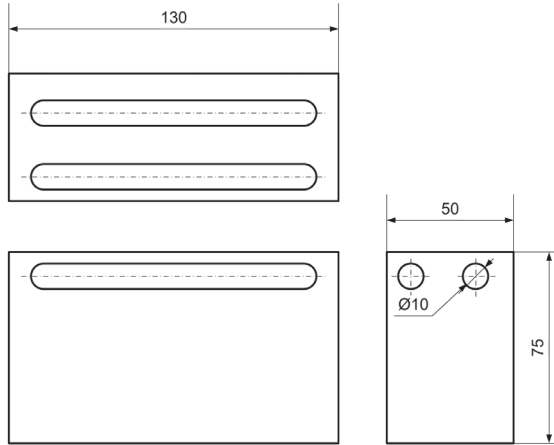
A szenzor az alaplapi táp 5 V-os portját használja, az adatkommunikáció két analóg porton (A4-A5) fog folyni.

Egyszerűség kedvéért a szenzort RHTP-mérőnek fogjuk hívni.

3.1.3. GM-számláló

A tervezett dózisteljesítmény-mérő 2, illetve 4 db önállóan vezérelhető és önálló táppal rendelkező modulból fog állni. A detektor 2–4 db SBM-20 típusú GM-csövet fog tartalmazni, ami biztosítja egyrészt a megnövelt számlálási hatásfokot, másrészt meghibásodás esetén a zökkenőmentes működést. A 2 GM-csöves modul dupla-, a 4 db-os modul kvadromodulnak

fogjuk hívni. A modulok saját hatásfokának kimérése alapján a dózisteljesítmény-mérő kumulatív hatásfokát súlyozott átlagolással határozzuk meg (5. ábra).

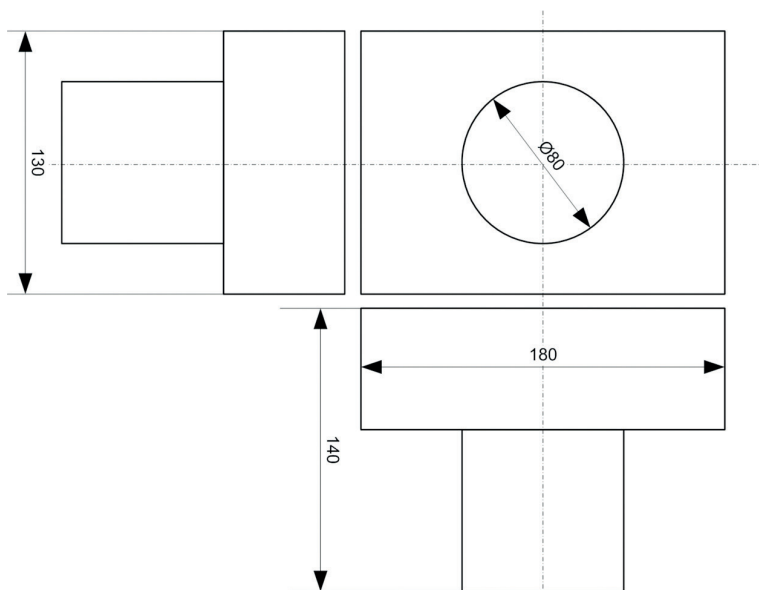


5. ábra
Dupla GM-csöves számláló modul [a szerző]

A dózisteljesítmény-mérő detektor előfeszítése a GM-cső előfeszítésének teljes platóján belül, a 390–550 V feszültség-intervallumba fog esni. Az ideális előfeszítés ebben az esetben 460–480 V között jó, de a nagyobb előfeszítés jobb hatásfokot fog eredményezni. A prototípus előfeszítése 500 V lesz, ez körülbelül 10%-os hatásfokjavulást eredményez. A port baud rate értéke 9600-on lesz tartva, ez rendkívül stabil. A detektor önálló, 4,5 V-os tápegységből fog működni, az alaplap kommunikáció az alaplap digitális portjait (D2-D5) fogja használni.

3.1.4. Szcintillációs detektor

A szcintillációs detektort egy 3 × 3" méretű (a detektorkristály méretét nemzetközileg hüvelyekben adják meg), nagy hatásfokú, függőlegesen orientált NaI(Tl) kristállyal, félvezető alapú fotoelektron-sokszorozó (silicon photomultiplier, SiPM), robusztus alumínium házas kivitelben építjük be. A detektor alapértelmezésben 1024 csatornás analizátorral működik, de az energiafelbontás a rövid idejű spektrumfelvétel miatt 64–256 csatornaszám-tartományban fog működni. A kristály fényhozamának, illetve az elektronikának a hőmérséklet-függését, ami óhatatlanul a spektrum torzulását okozza a környezeti mérések esetén, a detektorház folyamatos hőmérséklet-mérésével és egy erre az esetre kidolgozott kompenzációs algoritmus segítségével lehet kezelni. A detektorház hőmérséklet-mérése a kristályoldal lefelé néző felületével fizikai kontaktusban lévő CJMCU-680 szenzor segítségével fog megvalósulni (6. ábra).



6. ábra
A NaI(Tl) szcintillációs detektor modul [a szerző]

Valójában, a szenzormodul külső burkának tömege mellett, e detektor tömege lesz a meghatározó a szakrészben belül, hiszen csak a kristály tömege 1,3 kg. A detektor össztömege maximum 2 kg, ami egy légi felderítő modulhoz elég soknak tűnik, de csak az ekkora méretű szcintillációs detektor gamma-abszorpciók hatásfoka kellően magas, és ezt légi felderítésnél nem lehet nélkülözni.

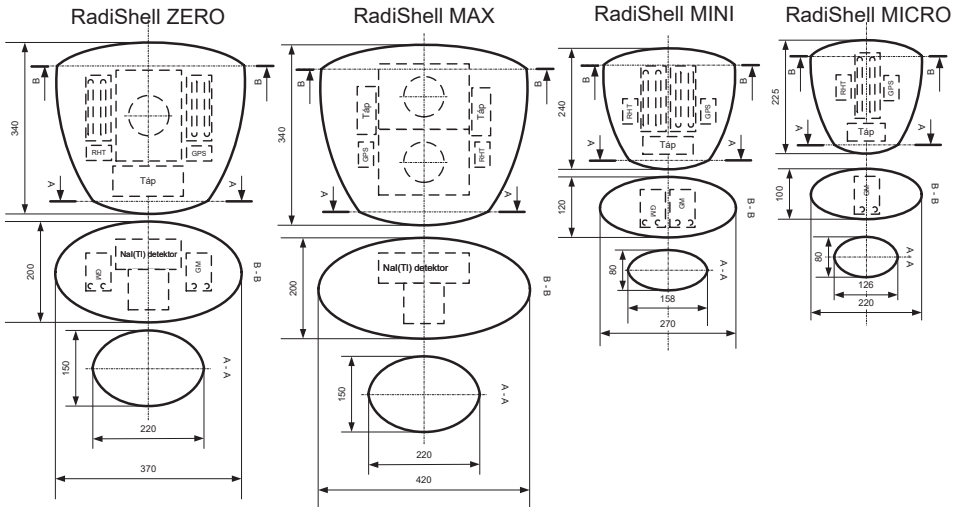
4. A szenzormodul-család tervezett típusai, főbb műszaki és műveleti paramétereit

Mivel már eddig is radiológiai szenzormodul-családról beszéltünk, most nézzük meg, hogy valójában hogy épülnek fel a család tagjai. Ezt a 3. táblázatban összefoglalva láthatjuk, amelyből valójában már látszik is, hogy az adott típusok eltérő hardvere, főleg eltérő műszerezettsége eltérő műveleti paramétereiket, képességeiket fog eredményezni.

3. táblázat
A RadiShell család nagybani felépítése, tervezett műszerezettsége (darabszám) [a szerző]

Modell	Kontroller Arduino	NaI(Tl) detektor	dupla GM-modul	kvadro GM-modul	RHTP-mérő	GPS-vevő
ZERO	MEGA	1	-	1	2	2
MAX	MEGA	2	-	-	3	2
MINI	UNO	-	-	1	1	2
MICRO	UNO	-	1	-	1	2

Az általános rendeltetésű szenzorok közül a GPS-vevő két példányban lesz beépítve a modulokba, ennek az az oka, hogy a pozícióadatok ugyanolyan fontosak, mint a mért sugárzási adatok, valamint a redundancia a pontosabb pozíció meghatározását is lehetővé teszi. Az RHTP-mérők modulonként a külső levegőállapotot mérik, azonban a ZERO és a MAX modellben a kristály hőmérsékletét is szükséges mérni, ezért ezekbe a modellekbe kristályonként egy-egy hőmérsékletszszort is beépítünk. A modellek nagybani felépítése az alábbi, 7. ábrán látható.



7. ábra

A radiológiai szenzormodul-család változatai, vázlatos felépítésükkel és főbb méreteikkel [a szerző]

A 3. táblázatban és 7. ábrán látható szenzormodul-család alapverziója a már említett RadiShell ZERO lesz, vagyis, mint első prototípus, ez lesz kifejlesztve. A további modellekben csak egyféle detektor található, míg az alapverzióban kétféle. Ez feleslegesnek tűnik, mivel ismeretes, hogy a szcintillációs detektor, spektrum felvétele mellett, dózisteljesítmény-mérésre is alkalmas, sőt manapság már egyre elterjedtebb a szcintillációs dózisteljesítmény-mérés. Ezenkívül, a szcintillációs kristály gammafoton-befogási hatásfoka azonos hasznos térfogat esetén mintegy két nagyságrenddel nagyobb, mint a GM-csőé. Akkor vajon minek ez a duplikáció? A válasznál mi sem egyszerűbb, benne van a modell alaprendeltetésében. Ez egy prototípus, tanulmány, kísérleti nyúl, pofozógép. Mivel rendelkezik a további tervezett verziók műszerezettségével, nagyszerűen alkalmas azok műveleti paramétereinek (repülési magasság, sebesség, pásztázási távolság, mintázási frekvencia stb.) kikísérletezéséhez, valamint a mért adatok alapján elvégezni a versengő paraméterek optimalizálását, és végső soron meghatározni a modellek műveleti képességeit és az optimális felderítési paramétereket.

Most pedig meg kell vizsgálni, vajon milyen mérési eredményeket várhatunk különböző magasságban végzett repülés esetén? Ehhez persze nem árt ismernünk a dózisteljesítmény magasságfüggését a referenciamagasságban (1 m-re a talajfelszín felett) mért dózisteljesítményhez képest.

4.1. A dózisteljesítmény magasságfüggése

A magasságfüggés valójában nem más, mint a levegőréteg vastagságától, illetve állapotától függő gyengítési tényező, vagyis egy viszonyszám a referenciamagasságban, illetve egy adott magasságban mért dózisteljesítmény között:

$$k_h = \frac{P_r}{P(h)} \quad (1)$$

ahol

- k_h magasságkorrekciós együttható;
- P_r Gy/h referenciamagasságban mért dózisteljesítmény;
- h m emelkedési (repülési) magasság;
- $P(h)$ Gy/h h magasságban mért dózisteljesítmény.

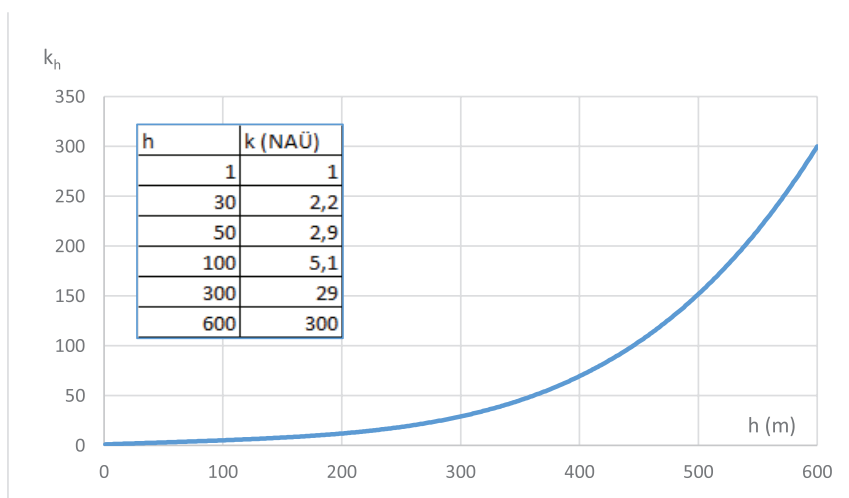
Sajnos, ez az összefüggés nem ilyen egyszerű, mivel a magasság mellett a levegő állapota is befolyásolja a gamma abszorpciót, vagyis:

$$k_h = k(h, p, \zeta_r) \quad (2)$$

ahol

- ζ_r % levegő relatív páratartalma;
- p Pa légnyomás.

Tehát egy egyszerű összefüggésből elég bonyolult keletkezik, de szerencsére az átlagos légköri viszonyok és a légnyomás és relatív páratartalom szélsőértékeinél is az eltérés $\pm 5\%$ intervallumon belül marad.



8. ábra

Az optimalizált magasságkonverziós értékek mint légi gyengítési együtthatók [a szerző]

Az optimalizált magasságkonverziós értékeket tapasztalati forrásból, reális mérési adatok alapján határoztuk meg és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) ajánlásával tettük közzé (8. ábra) [1].

4.2. A GM-számláló várható mérési eredményei

A GM-számlálókkal végzett dózisteljesítmény-mérésnek van néhány sajátossága, amit a levegőből végzett méréseknél fokozottan kell figyelembe venni. Talán úgy lesz ez leginkább érthető, ha felsorolás szinten tekintjük át:

- a GM-számláló uniformizált beütéseket (impulzusokat) számol, ami a mérési idő hozzárendelésével intenzitást eredményez, ami valójában a számláló mérési alappmennyisége. A kalibráció során a tisztán impulzusintenzitás-mennyiséget konvertáljuk valamilyen dózisteljesítmény-mennyiségé (a sugárzási tér súlyozott gamma-átlage-nergijája figyelembevételével), ami, ha szabatosak akarunk lenni, elnyelt dózisteljesítményt eredményez. A biológiai egyenértékdózisban megadott kijelzés valójában egy további konverzió az eredménye, hiszen a műszer elektronikus, élettelen, tehát feltételezve, hogy a környezet dózisterében lévő élő test csak röntgen- és gamma-sugárzásnak van kitéve, az erre vonatkozó sugárzási súlytényezővel (itt a $w_R = 1$) való konverzióval biológiai dózist is kijelzhet egy kalibrált és hitelesített műszer. Mindazonáltal maradunk az alaptételnél: a GM-számláló *impulzusintenzitást* mér;

$$I = \frac{n}{t} \quad (3)$$

ahol

I intenzitás (1/s);

n beütésszám és

t mérési idő (s).

- A beütésszámhoz tartozó statisztikus hiba, mivel adott időintervallumban számolt beütésátlagok a Poisson-eloszlást követik, így azt közelíteni gyökös kifejezéssel tudjuk:

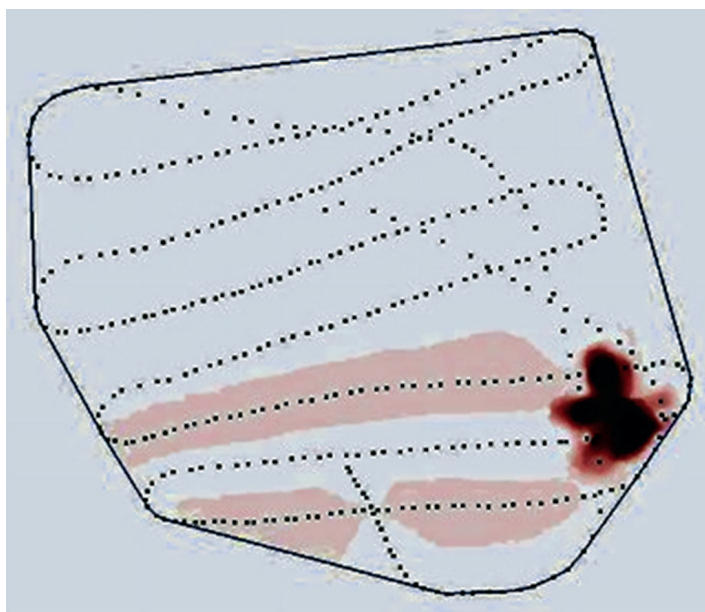
$$\Delta n = \sqrt{n} \quad (4)$$

ahol Δn – beütésszám statisztikus hibája, és mivel az időmérés hibáját elhanyagoljuk a beütésszám hibájához képest, így az intenzitás hibája (ΔI):

$$\Delta I = \frac{\Delta n}{t} = \frac{\sqrt{n}}{t} \quad (5)$$

- a fenti összefüggésekből látványosan következik, hogy a mérések hibája kis értékeknél magas, sőt összemérhető mennyiség a mérésekkel, míg az intenzitás növekedésével a hiba gyorsan csökken;

- a normál háttérsugárzás, amely a Budapest környezetében körülbelül 100 nGy/h elnyelt dózisteljesítménnyel jellemezhető, kimondottan alacsony intenzitású sugárzási teret jelent, ami nagy beütésszám-, azaz nagy intenzitásingadozást okoz a mérések során. Méréstechnikai szempontból ez kétféleképpen csökkenthető: egyrészt a számolási (átlagolási) idő növelésével, másrészt a detektor hasznos térfogatának (vagy számának) növelésével. Voltaképpen a mérődetektor térfogatának növelése, illetve egy adott detektor számának növelése egymással egyenértékű: kétszer akkora detektortérfogat ugyanolyan mértékben csökkenti a mérés relatív hibáját, mint két identikus detektor párhuzamos használata. Talajszínten végzett méréseknél, vagy például telepített monitoringrendszereknél általában a hosszabb átlagolási idő jó megoldás, azonban ha a mérés mozgásban történik, az átlagolási/mintavételi idő korlátozott, mivel a mérési adat csak egy rövid útszakaszra vonatkozhat, amit az útvonal vagy körzet szempontjából pontszerűnek tekinthetünk. Ily módon, a felderítés sebessége (következménye a megtett út) és az átlagolási idő egymással versengő mennyiségek, ami azt eredményezi, hogy alacsony intenzitású dózistérben az egymás mellett lévő pontokra vonatkozó intenzitásértékek erősen ingadoznak. Ha megnöveljük az átlagolási időt, netán mozgóátlagot képzünk, ami a földi méréseknél teljesen elfogadott és jó módszer, akkor a 9. ábrán látható effektust tapasztaljuk.



9. ábra

Légi sugárfelderítés hosszabb mozgóátlag-képzéssel [a szerző]

Az ábrán a légi sugárfelderítő konténer forró pont bemérésének pásztázási útvonala látható, a pontokhoz tartozó dózisteljesítmény-értékek a szürke-piros-fekete színmélységgel arányosak. A hosszabb idejű mozgóátlag-képzés eredménye lesz az a háttértől elütő színű „csóva”,

amelyet a forró ponttól távolodva mért a konténer, ahol a pontokhoz és környezetükhöz tartozó „valós” értékek nyilvánvalóan teljesen mások, mint amit a mérések mutatnak.

- Tehát, marad a viszonylag rövid átlagolási idő, mozgóátlag-képzés nélkül, és ha figyelembe vesszük, hogy a kis magasságon végzett repüléssel, ha elfogadható felbontással akarjuk végezni a pásztázó felderítést, egy 5 s-os átlagolási idő, 3–5 m/s-os felderítési sebesség mellett 15–25 m-es pontok közötti távolságot eredményez. Nos, nézzük meg, hogy normál háttér mellett ez mit eredményez. Az alábbi, 4. táblázatban a talajszinten végzett gyakorlati mérések intenzitásértékei vannak feltüntetve (I_x), a hozzá tartozó statisztikus hibával (ΔI_x), illetve relatív hibával (Δx). Az index a két vagy négy GM-csöves detektorral való mérést jelöli. A talajszinti méréseket átszámoltuk különböző magasságra, ennek megfelelően az őket terhelő statisztikus és relatív hiba értékeit is.

4. táblázat

5 s-os átlagolási idővel mért, illetve adott magasságra átszámolt intenzitás- és hibaértékek [a szerző]

h (m)	kh	dupla GM-modul			kvadro GM-modul		
		I2 (cpm)	$\Delta I2$ (cpm)	$\Delta 2$ (%)	I4 (cpm)	$\Delta I4$ (cpm)	$\Delta 4$ (%)
1	1	54,2	28,8	53	108,4	40,3	37
5	1,17	46,4	26,6	57	92,8	37,3	40
10	1,36	39,7	24,6	62	79,5	34,5	43
20	1,76	30,9	21,7	70	61,7	30,4	49
30	2,15	25,2	19,6	78	50,4	27,5	55

A relatívhiba-értékekből látszik, hogy az egymást követő mérési adatok ingadozása nagy és a repülési magasság növelésével jelentősen megnövekszik, hiszen 30 m-es repülési magasságban, dupla modul esetén 78%-ot ér el, de talajszinten is már 53%. Nem sokat javít a helyzeten, ha kvadromodullal mérünk, a relatív hiba itt is csak körülbelül 70,7%-ra csökken (pontosabban $-\sqrt{2}/2$ -részére). Ilyetén az 5 s-os átlagolási idő rövidnek tűnik, kivéve, ha kvadromodult alkalmazunk 10 m-es emelkedési magasságig.

Ha megnöveljük az átlagolási időt 10 s-ra, az alábbi táblázatból látható, hogy a relatív hiba lecsökken $\sqrt{2}/2$ -részére, ami azt jelenti, hogy dupla modulal szerelt felderítő alacsony, 10 m-es magasságon végezhet felderítést, míg a kvadromodul 30 m-es magasságig elfogadható adatsorokat fog küldeni.

5. táblázat

10 s-os átlagolási idővel mért, illetve adott magasságra átszámolt intenzitás- és hibaértékek [a szerző]

h (m)	ka	dupla GM-modul			kvadro GM-modul		
		I2 (cpm)	$\Delta I2$ (cpm)	$\Delta 2$ (%)	I4 (cpm)	$\Delta I4$ (cpm)	$\Delta 4$ (%)
1	1	54,2	20,7	38	108,4	29,3	27
5	1,17	46,4	19,2	41	92,8	27,1	29
10	1,36	39,7	17,8	45	79,5	25,1	32
20	1,76	30,9	15,7	51	61,7	22,1	36
30	2,15	25,2	14,1	56	50,4	20,0	39

Most már csak egy dolgot kell megmagyarázni: vajon miért fogadható el a nagyjából 40%-os relatív hiba, hiszen ez még mindig nagy ingadozást eredményez az adatsorozatban? Megmagyarázzuk:

- először is, a felderítési adatok egy irreguláris ponthalmazként jelentkeznek, és térképi adatbázisba illesztés során raszteres koordináta-rendszerbe való konverzió, súlyozott átlagképzéses eljárás (például krigelésen) esnek át, ami egyben simító művelet is;
- továbbá, a számítások normál háttérsugárzási értékekre vonatkoznak. A mérések célja valójában a normál háttérnél lényegesen magasabb dózisteljesítmény-szintek feltérképezése, akár szennyezés, akár például egy uránkibúvás okozza, mint Kővágószőlősn, ahol a dózisteljesítmény egy nagyságrendet emelkedik, és ilyen esetben a relatív hiba a töredékére csökken.

4.3. A szcintillációs detektor várható mérési eredményei

A szcintillációs detektorral nagyobb szerencsénk van, mivel általában véve e detektor jellemzője a nagy fotonabszorpciós hatásfok. A gyakorlatban végrehajtott mérések szerint a 3×3 kristálméretű detektor spektrumintenzitása 400–600 cps körül van abban a környezetben, ahol a dózisteljesítmény-mérések 100–120 nGy/h elnyelt dózisteljesítményt mutatnak. A földfelszín feletti méréseknél a spektrumintenzitás csökkenését ugyanúgy figyelembe kell venni, mint dózisteljesítmény-méréseknél, ezenkívül a 10–30 m vastag levegőrétegnek van Compton-tartomány-növelő hatása is. Ennek azonban csak a spektrum kis energiájú régiójában van jelentősége, hiszen már 300 keV energiánál a levegő gamma abszorpciós felezési rétegvastagsága 50 m felett van [19], így a talaj U, Th sorainak és 40K tartalmának vizsgálata során ez nem releváns probléma. Valós problémát a már fentiekben tárgyalt, a repülőeszköz mozgása során rendelkezésre álló korlátozott, mintegy 5–10 s-os mérési idő jelenthet.

Mozgásban lévő objektumról való méréseknél figyelembe kell vennünk néhány sajátosságot:

- általában nem végzünk spektrometriás méréseket, mivel azokat egy adott pontra vonatkoztatjuk. Itt most szemléletet váltunk, és a spektrum felvételének ideje alatt megtett szakasz geometriai középpontjára vonatkoztatjuk a spektrum által hordozott információt. Ez mindenképpen járulékos hibával terheli a méréseket;
- a gamma-spektrometriában általában „nem szeretjük” a Compton-tartományt, igyekszünk csökkenteni, elnyomni, azonban a légi felderítés során az is hordoz értékes információt, spektrumösszintenzitás-növelő hatása miatt, hiszen az anomáliák, esetleges forró pontok pozicionálása miatt a spektrumösszintenzitás is az egyik nagyon fontos mérési adat;
- a spektrum felvételének időtartama – a GM-számlálóval végzett mérésekhez hasonlóan – korlátozott, aminek következtében a spektrum összebeütésszáma viszonylag kevés. Ez egyrészt szintén statisztikus hibanövelő hatású, másrészt befolyásolja a spektrum felbontását is. A kis beütésszám kompenzálásának egy lehetséges módszere, ha a spektrum csatornafelbontását csökkentjük úgy, hogy az A csatornaszámú spektrumot átkonvertáljuk B csatornaszámúra, az alábbi algoritmus szerint:

Legyen $A, B, i, j, n, m \in \mathbb{N}, n > m$

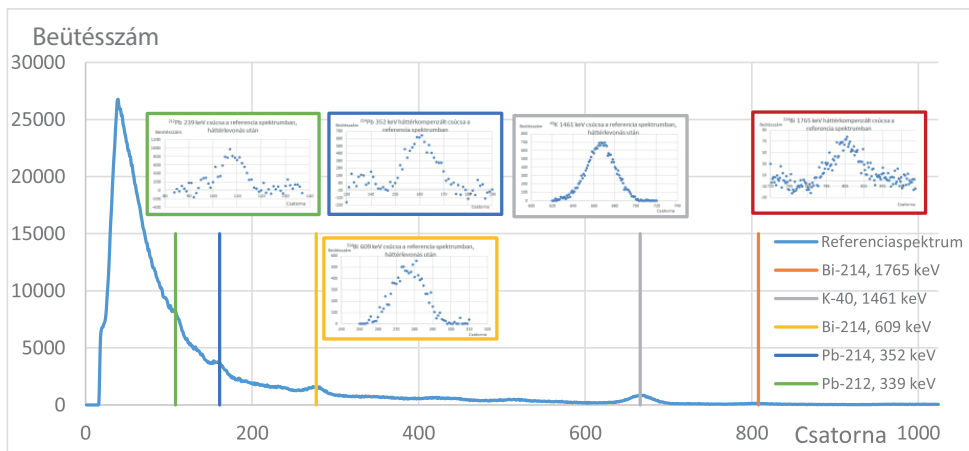
$$A = 2^n, B = 2^m$$

$$j = \left\lfloor \frac{i}{n-m} \right\rfloor \quad (6)$$

$$B_j = \sum_{j(n-m)}^{(j+1)(n-m)-1} A_i$$

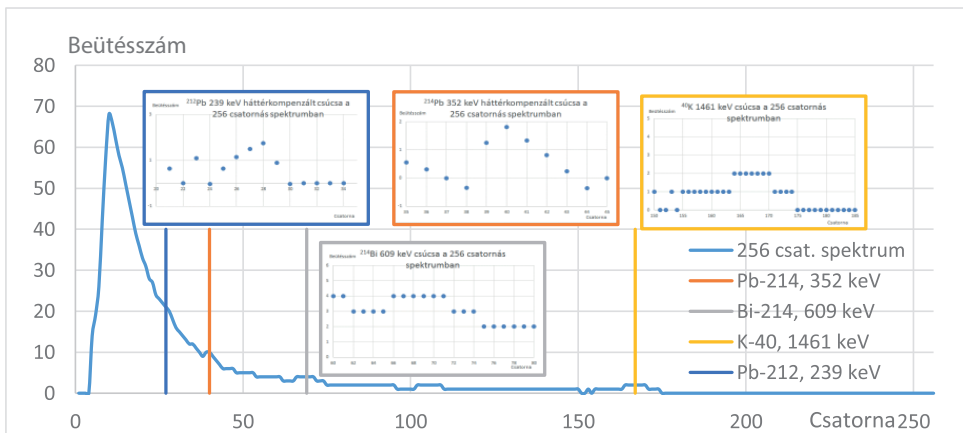
A 10–13. ábrán látható elemzés során megbecsültük, hogy egy környezeti mérés (Budapest, NKE, 47°29'38.0"N 19°07'01.2"E) során felvett gamma-spektrum ismeretében milyen kisebb csatornaszámú spektrumok várhatók, valamint a referenciaspektrumból jól kiértékelhető csúccsal rendelkező természetes radioaktív izotópok közül melyek azonosíthatók, illetve kvantitatíve kiértékelhetők. A referenciaspektrum egy 3 × 3" kristályméretű NaI(Tl) szcintillációs detektorral, 3600 s mérési idővel és 1 m talajszinttől való magasságban lett felvéve, a meghatározható izotópok:

- 212Pb, 232Th sor, 239 keV centroid energia;
- 214Pb, 238U sor, 352 keV centroid energia;
- 214Bi, 238U sor, 609 keV centroid energia;
- 40K, 1461 keV centroid energia;
- 214Bi, 238U sor, 1765 keV centroid energia.



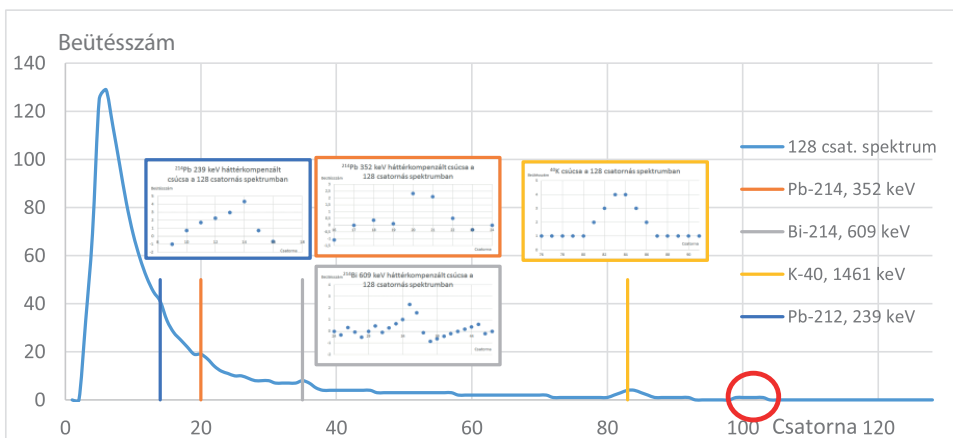
10. ábra
Az elemzés alapját képező referenciaspektrum [a szerző]

A 10. ábrán látható referenciaspektrumból a (6) algoritmus alapján, a beütésszámokat 5 s-os mérésre, illetve 30 m magasságra átszámolva láthatjuk a várható, vagyis becült spektrumokat (11–13. ábra). A számítások során elhanyagoltuk egyrészt azt, hogy a magassági gyengítési tényező egy, a dózisteljesítményre vonatkoztatott átlagérték, adott magasságon a gamma-energia növekményével ez csökken, valamint a vastagabb levegőréteg Compton-tartomány-növelő hatása. Ennek ellenére, látszik, hogy a referenciaspektrumban kijelölt csúcsok közül, a 214Bi 1765 keV-os csúcsa kivételével (ez csak a 128 csatornás spektrumban, piros körrel kiemelve látható, de kvantitatíve nem értékelhető) a nevezetes csúcsok meghatározhatók és kiértékelhetők, természetesen viszonylag nagy statisztikus hibával.



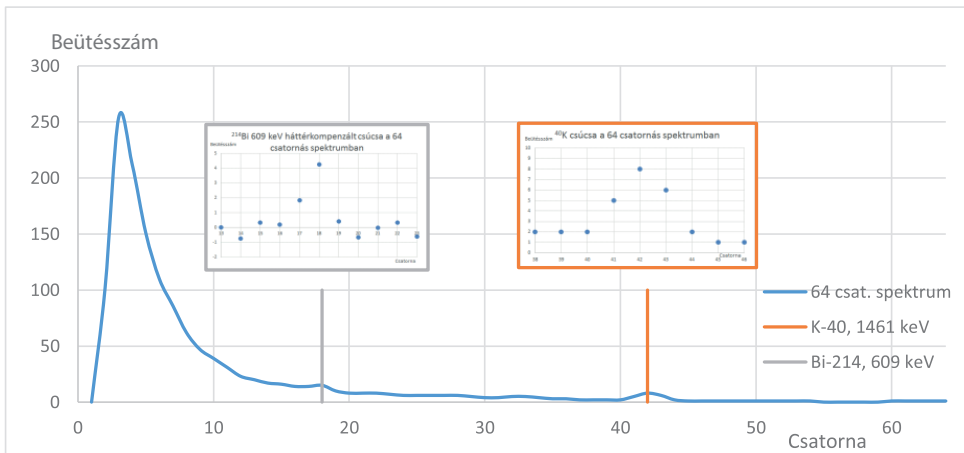
11. ábra

A referenciaspektrum alapján 5 s mérési időre és 30 m magasságra, valamint 256 csatornára átkonvertált spektrum [a szerző]



12. ábra

A referenciaspektrum alapján 5 s mérési időre és 30 m magasságra, valamint 128 csatornára átkonvertált spektrum [a szerző]



13. ábra

A referenciaspektrum alapján 5 s mérési időre és 30 m magasságra, valamint 64 csatornára átkonvertált spektrum [a szerző]

A 64 csatornára konvertált spektrumban, az alacsony felbontás ellenére, azok a csúcsok, amelyek a konverzió kumulatív eljárása miatt nem „vesznek el”, nagyobb intenzitással és lényegesen kisebb statisztikus hibával értékelhetők ki, ezért párhuzamos használata indokolt lesz valószínűleg.

A felderítés adatbázisának kiértékelése során a spektrumkonverzió műveletét dinamikusan alkalmazva, vagyis a különböző felbontásokat ugyanarra a mért adatsorra, a viszonylag alacsony beütésszám ellenére a szignifikáns csúcsok (és a mögöttük rejtőző izotópok) detekálhatók és kvantitatíve meghatározhatók.

A 10–13. ábrákon látható spektrumokban kijelölt nevezetes csúcsok a diagramban ki vannak emelve, ezek egy része esetében, ott ahol az adott csúcs nagy intenzitású Compton-háttéren „ül”, a kiemelésben a csúcs háttérkompenzált alakját tüntettük fel.

A mérési idő 10 s-ra növelése természetesen szebb csúcsalakokat, illetve kisebb statisztikus hibát nyújt, valamint a mérés során az esetlegesen alacsonyabb repülési magasság szintén növeli a beütésszámot, ami a kiértékelés pontosságát tovább növeli.

5. Összefoglalás

Jelen cikk áttekintette a drónra szerelhető radioszenzoros modulcsalád főbb szerkezeti, hardverelemeit, természetesen elhanyagolva a fejlesztés során olyan lényeges kérdéseket, mint a tervezés, méretezés kérdéseit, az elemek közötti kommunikációs protokollt, a modul gépészeti, amortizációs és rögzítési problémáit.

Kiemelten fontos volt a modul nukleáris mérés technikájával kapcsolatos kérdéskör, a sugárzástektoroktól az adott repülési paraméterek figyelembevételével várható mérési adatok elemzése, hiszen majd a kész prototípus(ok)kal való gyakorlati munka során kristályosodik ki igazán a drónnal végrehajtott légi sugárfelderítés részletes módszertana.

Ennek ellenére, már most látszik néhány igen fontos sajátossága a drónnal végzett légi sugárfelderítésnek. Összehasonlítva a helikopterre kifejlesztett légi sugárfelderítő konténer alkalmazási elveivel, a drón képes (és követelmény is) kisebb magasságon felderítést végezni, kisebb a repülési sebessége, ez mindenképpen pontosabb mérést tesz lehetővé. A drón korlátozott repülési ideje, kisebb sebessége egyszersmind jóval kisebb területpásztázási teljesítőképességet is jelent. A felderítés kezdőpontja és az operátor közötti távolság viszonylag kicsi kell hogy legyen, vagyis a felderítendő terepszakaszhoz közel kell települni (szennyezett terepszakasz esetén ez igen fontos). A radiomodul műszerezettsége is döntő körülmény, a GM-csőes detektorral felszerelt modul kisebb sebességgel és kisebb magasságból végez megbízható mérést, mint a szcintillációs detektorral felszerelt változat. Mindazonáltal a drón tetszőleges helyen, gyakorlatilag nagyon kis magasságon képes lebegve mérést végezni, például spektrumot felvenni, ami nagyon nagy előny a hot spot analízis során. A repülőeszköz és a radioszenzoros modul üzemeltetési költsége valószínűleg töredéke lesz a helikopteres felderítő változatnak (csak a repülőeszközt figyelembe véve).

Össességében, a légi sugárfelderítés két „műfaja”, a helikopteres és a drónos változatok semmiképpen nem váltják ki, azonban igen jól kiegészítik egymást, és megfelelően kombinálva lehetővé teszik adott esetben egy szennyezett, vagy más szempontból kijelölt terepszakasz korrekt és pontos felderítését. Valószínűleg ebben az esetben a földi felderítés jórészt lekorlátozódhat a forró, vagy műveleti szempontból kiemelten fontos pontokról való mintavétel, illetve in situ mérések végrehajtására.

Irodalomjegyzék

- [1] International Atomic Energy Agency, *Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying*. IAEA Technical Reports Series No. 323. Vienna, 1991. Online: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/072/22072114.pdf
- [2] International Atomic Energy Agency, *Guidelines for Radioelement Mapping using Gamma Ray Spectrometry Data*. IAEA-TECDOC-1363, 2003. Online: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1363_web.pdf
- [3] Zelenák J. et al., „A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett vagy ellopott sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során,” *Hadmérnök*, 4. évf. 1. sz. pp. 46–62. 2009,
- [4] Manga L. et al., „Pilóta nélküli repülők a sugárfelderítésben,” *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi Online Tudományos Folyóirat*, 2. évf. 2. sz. pp. 63–75. 2017. Online: www.vedelemtudomany.hu/articles/11/2/05-manga-katai-vass-csurgai.pdf
- [5] Ács B. et al., „ABV-anyagok terjedésének numerikus, számítógépes szimulációja,” *Haditechnika*, 39. évf. 1. sz. pp. 13–19. 2005.
- [6] Csurgai, J. et al., Numerical Simulation of Transmission of NBC Materials, *AARMS*, 5. évf. 3. sz. pp. 417–434. 2006.
- [7] Madarász B. et al., „Lézeres szemcseösszetétel elemzés néhány előkészítő eljárásának vizsgálata nagy szervesanyag-tartalmú talajokon,” *Agrokémia és Talajtan*, 61. évf. 2. sz. pp. 381–398. 2012. Online: <https://doi.org/10.1556/agrokem.60.2012.2.11>
- [8] Pécsi M. et al., „Negyedidőszaki éghajlatváltozások, talajok-löszök képződése a Kárpát-medence térségében,” *Földtani Közöny*, 132. évf. pp. 23–41. 2002.

- [9] Elek B., Talajok szerves folyadékviszatarató- és folyadékvezető-képessége, PhD-értekezés. Keszthely, Pannon Egyetem, 2009.
- [10] Kettler, T. A., Doran, J. W., Gilbert, T. L., Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses, *Soil Science Society of America Journal*, 65. évf. 3. sz. pp. 849–852. 2001. Online: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653849x>
- [11] Taubner, H., Roth, B., Tippkötter, R., Determination of Soil Texture: Comparison of the Sedimentation Method and the Laserdiffraction Analysis, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172. évf. 2. sz. pp. 161–171. 2009. Online: <https://doi.org/10.1002/jpln.200800085>
- [12] Verőné Dr. Wojtaszek M., *Földhasználati tervezés és monitoring 3. Távérzékelés, mint földhasználati adatforrás*. Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010. Online: <https://dtk.tankonyvtar.hu/handle/123456789/7658>
- [13] Matula R., Tóth T., „Talajok agyagtartalmának becslése gamma-spektroszkópai mérésekkel,” *Agrokémia és Talajtan*, 68. évf. 2. sz. pp. 367–383. 2019. Online: <https://doi.org/10.1556/0088.2019.00034>
- [14] M, Nagy N., „loncsere-folyamatok az agyagásványok 'nanolaboratóriumában',” *Magyar Kémiai Folyóirat*, 123. évf. 1. sz. pp. 25–31. 2017. Online: <https://doi.org/10.24100/MKF.2017.01.25>
- [15] Csurgai, J., Padányi, J., Földi, L., “Temperature Dependence of NaI(Tl) Radiation Scintillation Detectors' Characteristics,” *Advances in Military Technology*, 15. évf. 1. sz. pp. 201–212. 2020. Online: <https://doi.org/10.3849/aimt.01328>
- [16] www.hestore.hu/images/comp/full/QXJkdWlub1Vubwbw.jpg, <https://cdn.sos.sk/productdata/9f/72/3748880e/arduino-mega2560-rev3-a000067.jpg>
- [17] www.ebay.com/itm/273805129497
- [18] https://img.fruugo.com/product/6/23/559668236_max.jpg
- [19] The National Institute of Standards and Technology, *X-Ray Mass Attenuation Coefficients*. é. n. Online: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

Drone-Mountable Radiology Module Development Concept

A wide range of sensor architectures for fixed- or rotary-wing drones with different purposes and uses have been or are being implemented. The author would like to give a taste of the development of an airborne sensor module for drone-mounted airborne beam detection to be developed in the framework of the present call TKP2021-NVA-16. The present paper briefly reviews the operational criteria for the application, the background of the development of the sensor module, the measurement fundamentals of the R&D, the radiological sensor and general purpose sensor system under development, the design fundamentals of the possible flight altitude and speed of the launch vehicle.

Keywords: *airborne radiological reconnaissance, radio sensor module, radiological survey*

Dr. Csurgai József
egyetemi docens
Nemzeti Közsolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Műveleti és Támogató Tanszék

csurgai.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-4770-7997

József Csurgai, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Sciences and Officer
Training
Department of Operations and Support
csurgai.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-4770-7997

„A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

