

Molnár András

Diszkrét mérési pontos eljárással történő gamma-sugárzás dóziseloszlás-mérés drón segítségével

Számos dóziseloszlási térkép készítésére került sor drónra szerkesztett gammasugárzás-detektorral. A kísérletek eredményei és tapasztalatai alapján kirajolódtak a rendszer hiányosságai és egyben a továbbfejlesztés lehetőségei. A fejlesztés elsődleges célkitűzése a kompaktabb, könnyen hordozható és üzembe helyezhető, de az előzőkhez képest érzékenyebb rendszer volt. A háttérsugárzáshoz képest (a vizsgálati területen jellemzően 0,01 mSv/h) az eddigi kísérletekben +0,009 mSv/h eltérést sikerült megbízhatóan detektálni. Jelen fejlesztésben ezt az értéket sikerült +0,005 – +0,007 mSv/h-ra csökkenteni. Az érzékenység javulását elsődlegesen az egy pontra vetített mérési idő növelésével sikerült elérni. Ezt egy speciális repülésvezérlő szoftver segítségével valósítottuk meg. Ez az érzékenységnövekedés vagy nagyobb szkennelési magasságot (körülbelül +1–2 m), vagy azonos magasságon azonos repülőeszköz esetén egy felszállásból nagyobb terület felmérését teszi lehetővé. Természetesen a szkennelési magasság vagy a szkennelési sebesség jelentősen növekedhet, ha a keresett sugárforrás aktivitása nagy. A kísérleteink során természetes urán ásványt (autunit) alkalmaztunk, amelynek aktivitása messze alulmarad a mesterségesen előállított izotópokkal szemben. A kísérletsorozatban kitértünk több forrás detektálására is, ami modellezi egy esetleges baleset helyszínén szétszóródó aktív források feltérképezésének lehetőségét. Az általunk fejlesztett és bemutatott rendszer fő előnye a gyakorlatban alkalmazott felmérési eljárásokkal szemben, hogy jól mobilizálható, nagy terület felmérhető humán kezelő terepi veszélyeztetése nélkül, valamint alacsony költséggel valósítható meg a terület felmérése. A rendszer célja a forrás jelenlétének kimutatása és olyan mértékű lokalizálása, hogy azt követően kézi vagy más földi eljárással már egyszerűen lehessen pontosítani a lokalizálást. Mivel nem törekszünk centiméteres helymeghatározás-pontosságra, a mérésekhez elegendő a standard GPS-lokalizáció. A mérések során a földrajzi koordinátákat GWS'84 rendszerben értelmezzük. A bemutatott ábrákon a szélességi és hosszúsági körök koordinátáit is ebben a rendszerben tüntettük fel.

Kulcsszavak: *szabadtéri dóziseloszlás-mérés, radioaktív-sugárzás-térképezés drónnal, radioaktív-sugárzás-mérés drónnal*

1. Bevezetés

A kísérletek során megvizsgáltuk két, fizikai elvében eltérő gammasugárzás-detektor alkalmazási lehetőségét. A vizsgálat kiterjedt a detektorrendszer érzékenységének maximalizálása mellett

a rendszer tömegének minimalizálására, a rendszer energiaigényére, valamint a detektor által szolgáltatott adatok információtartalmára. Megvizsgáltuk, hogy a Geiger–Müller-detektor felhasználásával hogyan lehet növelni a rendszer érzékenységét, és összevetettük a használatuk során tapasztalt előnyöket és hátrányokat. Vizsgálat tárgyát képezte továbbá egy szcintillációs detektor is, ahol arra kerestük a választ, hogy lehet-e a detektor alkalmazásával a Geiger–Müller-számláló detektorral azonos érzékenység mellett kisebb tömegű és több információt szolgáltató rendszert kialakítani.

A kísérletek során a detektorokat két multikopterplatformon vizsgáltuk. Méréseket végeztünk egy és két független forrást tartalmazó területen.

2. Alkalmazott detektorok

Mivel a sugárzás energiájának meghatározása a kísérletek e szakaszában nem volt szempont, ezért a Geiger–Müller-csöves részecskeszámláló a célnak megfelelő, digitális eszközökhöz egyszerűen illeszthető detektorként kényelmesen használható. Kézenfekvő ennek az eszköznek a vizsgálata a drónos felmérések során. A témában végzett eddigi kísérleteink [1], [2] azonban rámutattak e detektorok hátrányaira is, ami elsősorban a kiépített rendszer viszonylagos nagy tömege. A modern félvezetőn alapuló szcintillációs detektorok ígéretes alternatívái lehetnek az adott feladat végrehajtása során. Számos, hasonló projekt használ ilyen detektort [3], [4], [5], [6], ezért megvizsgáltuk alkalmazását egy konkrét mérés során. Hazai vonatkozásban is készültek mobil eszközökhöz szcintillációs detektorra épülő mérőkészülékek. Ezek használatára – a szerző ismertetése szerint – elsősorban a drónokhoz viszonyítva nagy tömegű járműveken került sor [7], de születtek javaslatok merevszárnyú robotrepülőgépen történő alkalmazásra is [8]. A szcintillációs detektor esetében nem vizsgáltuk a detektált részecske energiáját, így ezt a detektort is csupán részecskeszámlálónak kezeltük. Ugyanakkor a szcintillációs detektor lehetőséget biztosít – a rendszer továbbfejlesztése során – további információk megszerzésére is. Ilyen a sugárzás jellegét vagy a forrás anyagi minőségét meghatározó energiaspektrum felvétele.

2.1. Geiger–Müller-számláló

A Geiger–Müller-számláló egy kisnyomású gázzal töltött elektromos kisülési cső, amely ionizáló sugárzás detektálására képes. Általában a cső anyagával, illetve bevonatával vagy éppen ablakos kialakításával lehet specifikus sugárzásra érzékenyíteni. Az eszköz működése során elektromos impulzusokat ad minden detektált foton esetében. Ezért is nevezik sokszor a Geiger–Müller-detektort részecskeszámlálónak. A cső kimeneti jele ugyan analóg, de az információtartalom az egységnyi idő alatt megszámlálható impulzusokban van (nem az impulzusamplitúdóban!), ezért digitális rendszerekhez való csatlakoztatása viszonylag egyszerűen, A/D konverter alkalmazása nélkül lehetséges. Kialakítása egyszerű. Egy fém hengerből áll, amely kisnyomású gázzal van töltve. A henger tengelyében a hengertől elszigetelten egy vékony elektróda található. Működéshez a csőre (palást és a központi elektróda) polaritáshelyesen elektromos egyenfeszültséget kell kapcsolni. Ez a feszültség a cső típusától függően 500–800 V körüli érték. Minden egyes impulzus valójában a csővön belül egy elektromos

kisülést jelent. A kisülés ideje alatt a cső újabb foton (ionizáló részecske) detektálására nem alkalmas. Ezt az időt nevezzük holtidőnek. A Geiger–Müller-csövek holtideje típustól függő, de általában 5×10^{-5} – 10×10^{-5} s nagyságrendbe esik. A holtidő hatásával a mérés során számolni kell. Ez a hatás nem jelentős gyenge sugárzás esetén, de a sugárzás növekedésével egyre nő a valószínűsége a nem detektált fotonoknak. A fotonok elvi becsapódása a detektorba véletlenszerű. Éppen ezért gyenge sugárzás esetén is előfordulhat, hogy egy éppen detektált foton által okozott holtidőben további (egy vagy több) fotonok nyelődnek el a detektorban, de azok nem okoznak újabb kisülést, azaz elektromos impulzust. A Geiger–Müller-csőben elektromos kisülést ionizáló sugárzás indukál, de a kisülés, azaz a keletkezett elektromos impulzus alapján nem lehet következtetni a detektált foton energiájára. Ebből adódik, hogy a Geiger–Müller-csövek alkalmazásával a sugárzás minőségére (a gamma-fotonok energiájára, így a bomlást előidéző izotópra) nem lehet következtetni. A Geiger–Müller-cső ugyanakkor nagyon egyszerű és jól működő detektor, amelyet könnyen lehet feldolgozó egységekhez kapcsolni (akár hangszóró, amely a kattogás sűrűségével jelzi a sugárzás intenzitását, vagy számláló, amely időegységre vonatkoztatva jeleníti meg a detektált részecskeszámot), így egyszerű sugárzásdetektorként igen elterjedt.

2.2. Szcintillációs detektor

Egyes kristályok gamma-sugárzás hatására fényt bocsátanak ki. Valójában a fénykibocsátás nem folyamatos, hanem minden egyes kristályban elnyelődött gamma-foton egy energiájával arányos fényfelvillanást kelt. Ez a szcintilláció jelensége. Amennyiben a kristály egy nagyon érzékeny fényérzékelőhöz van illesztve, és a fényérzékelő minden egyéb fényforrástól el van zárva, akkor a felvillanások elektromos impulzusok formájában detektálhatók. A PMT¹ az első és napjainkban is jól használható ilyen fényérzékelő. Egy tipikus szcintillációs detektor így két fő elemből áll. Egyik maga a szcintillációs kristály, a másik a kristályhoz optikailag illesztett PMT. Az ilyen detektorok nagy előnye, hogy az ionizációs detektorokhoz képest a kristály sűrűsége lényegesen nagyobb, így kisebb méretben is érzékeny eszköz építhető. Ráadásul a szcintillációs detektorok az érzékelt gamma-foton energiájával arányos jelet szolgáltatnak, ami lehetővé teszi a vizsgált sugárforrás további jellemzőinek meghatározását is. Hátránya a hagyományos szcintillációs detektoroknak éppen a PMT alkalmazása. Ez viszonylag nagy méretű, nagy feszültséggel üzemelő és külső elektromágneses zajokra érzékeny eszköz.

Modern eszközökben megjelentek a PMT kiváltását szolgáló félvezető alapú fényérzékelők. Ezek egyike az MPPC.² Ez számos előnnyel rendelkezik a PMT-vel szemben. Kis feszültséggel üzemeltethető, alacsony a fogyasztása, elektromágneses térre kevésbé érzékeny és lényegesen kisebb eszköz. Természetesen használata során gondoskodni kell a stabilizált tápellátásról, valamint a hőkompenzációról.

A sugárzás nagyságától, energiájától és intenzitásától függően eltérő anyagú szcintillációs kristályokat alkalmaznak. Legelterjedtebb kristály a talliummal szennyezett (aktivált) nátrium-jodid NaJ(Tl). Ennek a kristálynak számos előnyös tulajdonsága mellett a vízmegkötő képessége igen jelentős, ami nagy hátrány. A kristálynak a megkötött víz hatására romlik

¹ Photo multiplier tube.

² Multi-pixel photon counter.

az optikai tulajdonsága (sárgul, opálössá válik), ami végül a detektor hatásfokának jelentős gyengülését jelenti. Éppen ezért a NaJ(Tl) kristályokat a detektorban hermetikusan el kell zárni a külső környezettől, hogy a levegő páratartalma ne károsítsa.

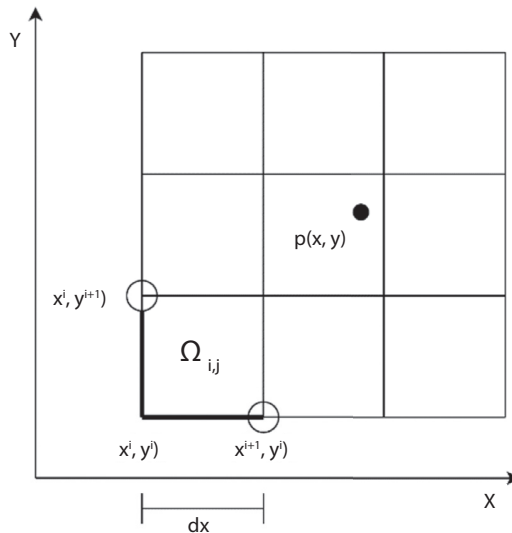
A kristály és a fényérzékelő együttesének összhangban kell lennie. Figyelemmel kell lenni a szcintillációs kristály által kibocsátott fény hullámhosszára és a fényérzékelő érzékelési hullámhosszára. Az MPPC érzékelőkhöz például jól illeszthető a CsJ(Tl) (talliummal aktivált cézium-jodid) [9], [10], [11]. Ugyanakkor a CsJ kristály lágy, sérülékeny és nedvszívó. Általában ezt a kristályt külső bevonattal látják el, elsősorban a felület sérülékenységének csökkentése érdekében.

3. Mérési eljárás

A mérési eljárás két fázisra bontható. Az első fázisban a megtervezett útvonalon az eszköz a kijelölt mérési pontokon (amelyek egy raszteres hálót alkotnak) előre meghatározott ideig lebeg, majd tovább repül a következő mérési ponthoz. A lebegési időt 10 s-ban határoztuk meg. Így a detektor érzékenységének megfelelően az egyes pontokon több adatot tudunk rögzíteni, amelyek koordinátája állandó. Az azonos ponton gyűjtött több adat jobb jel/zaj arányt (sugárzó minta/háttérsugárzás) biztosít, ami növeli a detektálható forrás érzékelésének valószínűségét. Amennyiben a hordozóeszköz üzemideje nem teszi lehetővé a vizsgált terület felmérését, úgy azt több felszállásból is el lehet végezni.

A mérés második szakaszában a repülések során rögzített adatokat offline módon, egy általunk kifejlesztett MATLAB szoftver segítségével dolgozzuk fel, és az eredményt vizualizáljuk.

Az adatok feldolgozásának első lépése során a mérési területet azonos részterületekre osztjuk fel, ahogy az az 1. ábrán látható:



1. ábra
Terület felosztása cellákra [a szerző]

Legyen $\Omega_{i,j} \subset R^2$ X_{min} -től X_{max} -ig és Y_{min} -től Y_{max} -ig tartó befoglaló téglalap alakú terület, ahol

$$X_{min} = \min_{p \in P} p_x \quad (1)$$

$$X_{max} = \max_{p \in P} p_x \quad (2)$$

valamint

$$Y_{min} = \min_{p \in P} p_y \quad (3)$$

$$Y_{max} = \max_{p \in P} p_y \quad (4)$$

ahol p egy mérési pont GPS-koordinátája ($p_x, p_y \in R$), továbbá P az összes pontot tartalmazó halmaz. Az $n \times m$ felosztású befoglaló téglalapot az alábbiak szerint képezzük:

$$\Omega_{ij} = \begin{cases} [x^i, x^{i+1}) \times [y^j, y^{j+1}) & \text{ha } i \in [0, n, \dots, n-2] \text{ és } j \in [0, m, \dots, m-2] \\ [x^i, x^{i+1}] \times [y^j, y^{j+1}) & \text{ha } i = n-1 \text{ és } j \in [0, m, \dots, m-2] \\ [x^i, x^{i+1}) \times [y^j, y^{j+1}] & \text{ha } i \in [0, n, \dots, n-2] \text{ és } j = m-1 \\ [x^i, x^{i+1}] \times [y^j, y^{j+1}] & \text{ha } i = n-1 \text{ és } j = m-1 \end{cases} \quad (5)$$

ahol

$$x^i = x_{min} + i \cdot dx \quad (6)$$

és

$$y^i = y_{min} + i \cdot dy \quad (7)$$

A fentiek alapján meghatározunk egy $f(p)$ függvényt, amely megadja p pont értékét. Az (i, j) -edik cellához tartozó érték a következő összefüggés segítségével határozható meg:

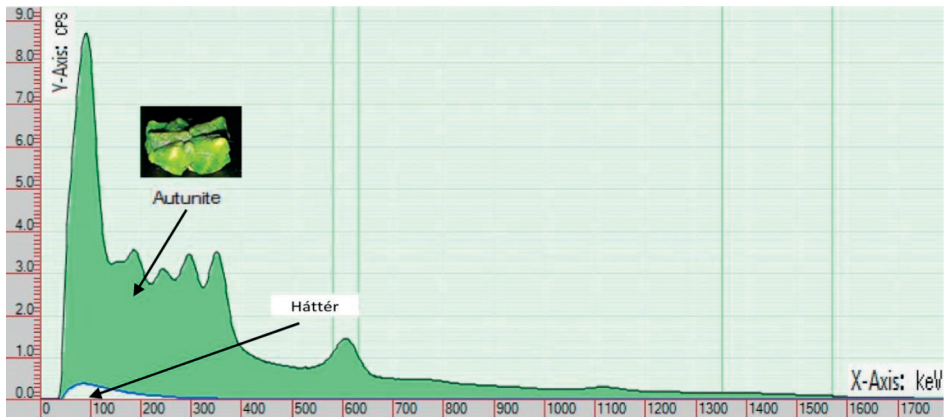
$$\bar{p}\Omega_{i,j} = \frac{\sum_{p \in \Omega_{i,j}} f(p)}{|\{p: p \in \Omega_{i,j}\}|} \quad (8)$$

Az átlagolást végző függvény helyettesíthető bármilyen más függvénnyel, például medián. Tehát a mérési területet előre megadott paraméterek alapján osztjuk fel. Az összes mérési pont egy adott cellához fog tartozni. Egy cella értékét a beállítástól függően a mért gamma-sugárzások átlaga, mediánja vagy maximuma adja.

4. A kísérleti minta hatásos mérési távolságának meghatározása

A kísérleti területen elhelyezett gamma-sugárforrás egy 30 cm átmérőjű korongon elterített autunit [$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \times (10\sim 12)\text{H}_2\text{O}$] ásványdarabokból állt. Ez az ásvány az urán egy természetes előfordulása. Aktivitása a kísérletben felhasznált ásványoknak az egészségügyi

határérték alatt volt. Beszerzése, birtoklása kis mennyiségben engedélyhez nem kötött. A 2. ábra egy autunit minta gammasugárzási spektrumát szemlélteti. A spektrum egy szcintillációs detektorral lett felvéve. A felvétel kiértékelése egy ingyenesen letölthető „Becquerel Monitor” nevű programmal történt [13]. A spektrum felvétele során a minta a detektor közvetlen közelében volt. A szcintillációs kristály és a minta között a detektor szerkezeti felépítéséből adódóan 3 mm távolság volt. A felvétel időtartama 60 min. Az ábrán jól látható a kontrollként felvett háttérsugárzáshoz képest megnövekedett sugárzás. A Geiger-Müller-detektorok nem alkalmasak a detektált gamma-részecske energiaszintjének mérésére, csupán a jelenlétüket lehet kimutatni. A diagramból azonban jól leolvasható, hogy az autunitminta szignifikáns gamma-részecskeszám-növekedést generál. Ezt a tényt alapul véve alkalmaztuk a további kísérletek során az autunit ásványt sugárforrásnak.



2. ábra
A kísérletek során használt egyik autunit ásvány sugárzási spektruma [a szerző]

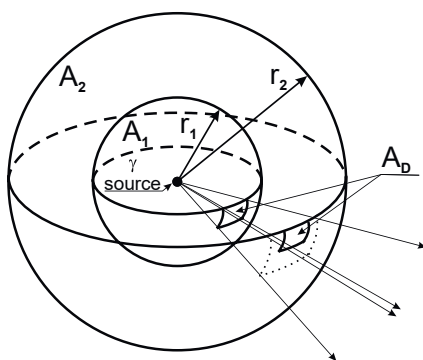
A kísérlethez meg kellett határozni azt a mérési távolságot (repülési magasságot), amelynél még várhatóan az alkalmazott forrás detektálható. A sugárzás terjedésének modellezésénél egyszerű geometriát (3. ábra) alkalmaztunk az alábbi feltételezésekkel:

- a forrás a mérési távolságból pontszerűnek tekinthető;
- a gamma-sugárzás gyengülése a levegőben megtett távolság függvényében a mérési tartományban elhanyagolható, azaz

$$I = I_0 e^{-\mu r} \cong I_0 \quad (9)$$

ahol

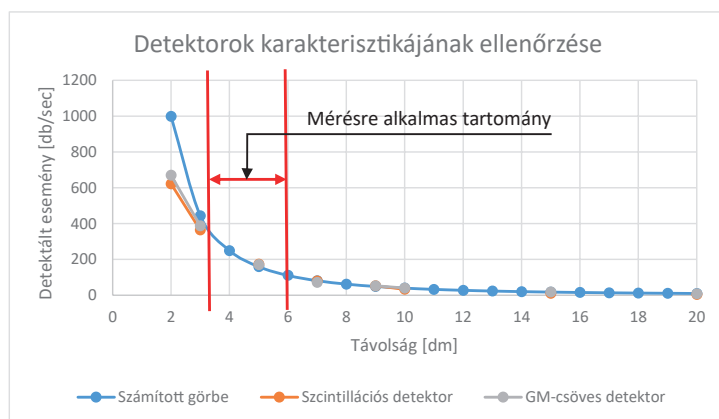
- l: r távolságban számított sugárzás,
- I_0 : a referenciaponton mért sugárzás,
- μ : a közeg gyengítési együtthatója,
- r: a forrástól (referenciaponttól) mért távolság;
 - a forrás a mérési távolságban tisztán csak gamma-sugárzó;
 - a sugárzás izotróp.



3. ábra

A sugárzás távolságtól függő detektálhatóságának modellezése [a szerző]

AD: a detektor felülete; A1: egységnyi távolságot meghatározó gömb felülete; A2: a detektálási távolságot meghatározó gömb felülete; r1: egységnyi távolság a forrástól; r2: detektálási távolság a forrástól



4. ábra

A hatásos mérési távolság meghatározása [a szerző]

A 4. ábra annak a kísérletnek az eredményét szemlélteti, amelyet a későbbi vizsgálatok során felhasznált mennyiségű mintával mértünk különböző távolságokban. A statikus mérés célja az volt, hogy a mérési eredményeket össze lehessen hasonlítani az elméleti számításokkal, és meg lehessen határozni a minimális és maximális mérési távolságokat. Az ábrából kiolvasható, hogy a méréseket célszerű a mintától 6 m-nél nem nagyobb magasságban végezni, mert a forrás jelét ennél nagyobb magasságból már a háttérsugárzástól rövid mérési idővel nem lehet elkülöníteni. A 3 m-nél alacsonyabb mérések ugyan kimutatható eredményt adnak, de a kezdeti megszorítások már nem teljesülnek maradéktalanul. Mivel a tesztelés során használt forrás több apró ásványból áll, ezek együttese közelről már nem tekinthető pontforrásnak. Ebből adódóan a mérés erős hibákkal lesz terhelt, ami nem teszi lehetővé a kvantitatív kiértékelést.

5. Gyakorlati tapasztalatok

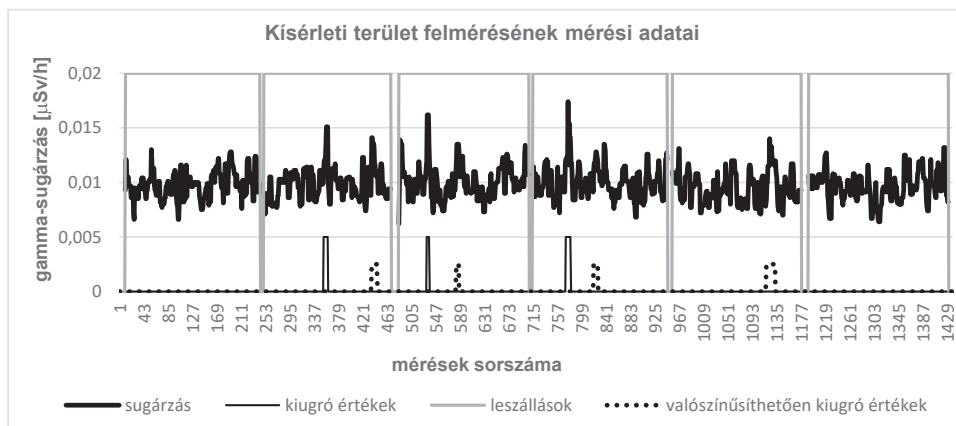
A módszer gyakorlati tesztelése érdekében két különböző detektorrendszerrel ellátott drónt alkalmaztunk. A méréseket egymást követően azonos körülmények között végeztük, hogy az eredmények egymással összehasonlíthatók legyenek. A kísérlet megtervezése során figyelembe vettük a folyamatos repülésekkel készített gammasugárzás-mérési tapasztalatainkat [1], [2].

5.1. *DJI Inspire drónra szerelt Geiger–Müller-detektoros mérések*

Az Inspire a DJI cég egy régebbi terméke. Nagy mérete és teherbírása alkalmassá teszi a drónt nagyobb, akár 1 kg hasznos teher szállítására. Megbízható repülési képessége kimondottan előnyös a sugárzásméréshez összeállított Geiger–Müller-detektorrendszer szállítására. Maga a detektorrendszer négy darab, nagy érzékenységű GM-csőből (LND 7808) [12], az azokat megfelelő feszültséggel ellátó tápegységekből, GPS-modulból, valamint a mérési adatokat rögzítő mikroszámítógépből áll. A rendszer úgy lett kialakítva, hogy egységnyi időközönként minden detektor mérési adatát külön-külön, valamint a négy detektor összesített mérési adatait is tárolja. Ennek köszönhetően utólagosan vizsgálható a detektorcsövek többszörözésének mérési hatékonysága is.

A drón repülési ideje a detektorokkal 10–18 min. Ennyi repülési idő nem volt elegendő a 27 m hosszú és 24 m széles kísérleti terület felméréséhez. A területet 3 × 3 m-es négyzetrácsra bontottuk. A rácpontok mindegyikében a drón 10 s-ot lebegett. A mérést így 6 felszállással valósítottuk meg. A leszállások során a detektorrendszer GPS-egysége folyamatosan üzemelt, amivel igyekeztünk a mérési pontok hibáit minimalizálni. A hat repülés során a terület 1,5 m eltolással kétszer lett végigpásztázva úgy, hogy a mérések rácpontjai végül egymástól 1,5 m-re kerültek.

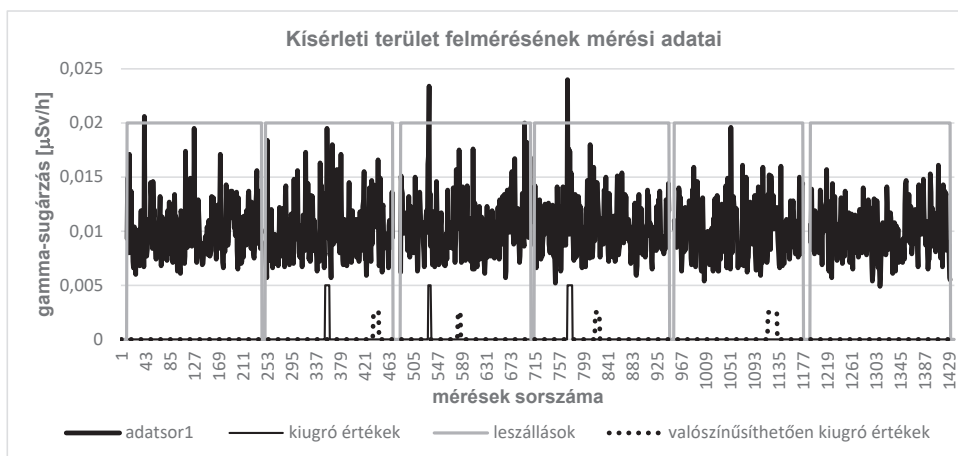
A kísérlet során közel 162 mérési ponton 1620 mérést végeztünk. A mérési adatokat az 5. ábrán látható diagram szemlélteti. Jól látható, hogy a detektorok a területen mérhető jellemző háttérsugárzástól (0,01 mSv/h) csak csekély mértékben eltérő (0,015–0,017 mS/h) aktivitást detektáltak a mérések során. A diagramon a szürke vonal magas értéke a repülési szakaszt, míg az alacsony értéke a földön töltött időt (akkumulátorcserre) mutatja. A diagram alsó vonalai közül a vékony, folytonos vonal magas értéke a minta által generált csúcsokat, míg a szaggatott vonal magas értéke a nagy valószínűséggel a mintához tartozó adatokat mutatja. Mivel a kísérlet úgy lett kialakítva, hogy az egyes mérési pontok és a minta fizikai elhelyezése egymáshoz viszonyítva ne mutasson kapcsolatot, nem volt garantált a minta feletti mérés. A sűrű mérési pontok azonban garantálták, hogy lesz több olyan mérés is, amely a mintához kellően közel van, így az már meg fogja változtatni a mért sugárzási értéket. Ennek eredménye az, hogy lesznek a minta hatását jól jelző mérési pontok, és lesznek a háttérsugárzástól gyengén eltérő, de a mintához kapcsolható mérési pontok is. E mérési pontokat a diagram ugyan tartalmazza, de egyértelműen elkülöníteni őket további információk nélkül nem lehet.



5. ábra

Egy 650 m² terület felett végzett sugárzásmérés medián szűrt adatai, és az egyes csúcsok értelmezése [a szerző]

Az 5. ábrán a detektált sugárzási adatokat egy 5 elemű mediánszűrővel szűrtük. Ennek oka, hogy a mérések diszkrét pontokban történtek. Minden ponton 10 s alatt 10 mérést rögzített a rendszer. A mediánszűrő kiszűrte azokat a csúcsokat, amelyeket csupán egyetlen mérés idejére rögzített. A sugárzás természetes jellege miatt ezek a rövid impulzusok előfordulhatnak, de nem utalnak tartósan magas sugárzás jelenlétére. Azt feltételeztük, hogy a minta a rövid idejű impulzusok helyett több mérésen keresztül, tartósan fennálló emelkedett értékeket generál.



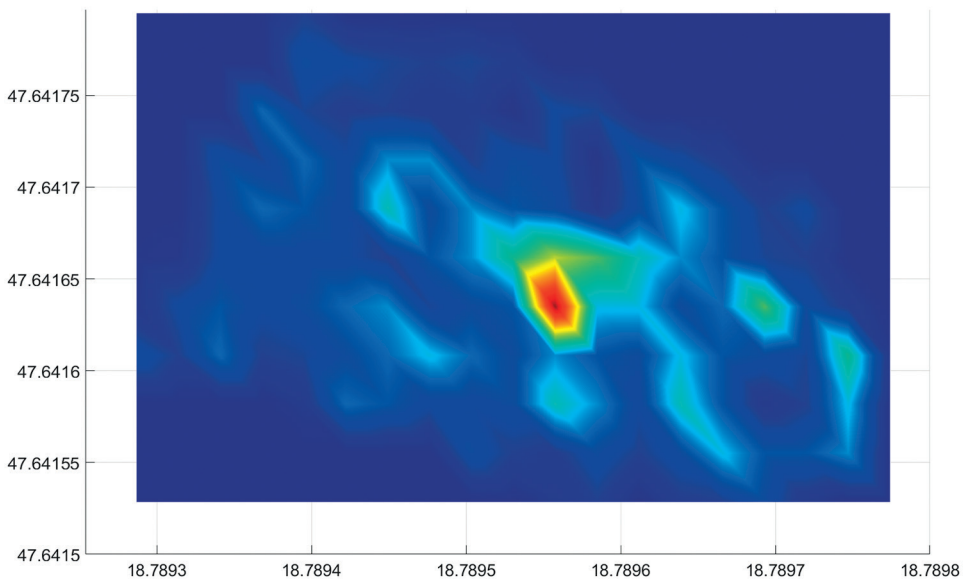
6. ábra

A kísérleti mérés szűretlen sugárzási adatai [a szerző]

A 6. ábra a mérés szűretlen adatait szemlélteti. Látható, hogy a szűretlen adathalmazban nehezen található meg a minta jele, illetve számos hamis csúcs is megjelenik.

Tekintettel arra, hogy minden sugárzási méréshez a mérés koordinátáját is rögzítjük, fel lehet használni ezt a többletinformációt az adatok elemzése során [14], [15], [16]. A vizsgálati területet felosztottuk $m \times m$ részegységekre. Az elemzések során „m” érték 1; 2; 3 és 4 m voltak. Ez a felosztási méret a repülések során meghatározott diszkrét mérési pontok távolságához igazodik. A sugárzási adatokat az egyes részterületekhez rendeltük, és e részterületeket a hozzájuk rendelt sugárzási értékek mediánjával jellemeztük.

Elvileg minél kisebb az elemi részterületek mérete, annál pontosabb és részletesebb lokalizáció lehetséges. A tapasztalat azonban az, hogy a valós mérési pontok távolságától lényegesen kisebb területfelosztás hamis forráspontokat eredményez. Legjobb eredményt a valós mérési pontok távolságánál valamivel kisebb elemi részterület beállításával kaptuk. Például, 3×3 m-es mérési raster esetén a feldolgozáshoz alkalmazott 2×2 m-es elemi területfelosztás nyújtotta a legjobb eredményt.



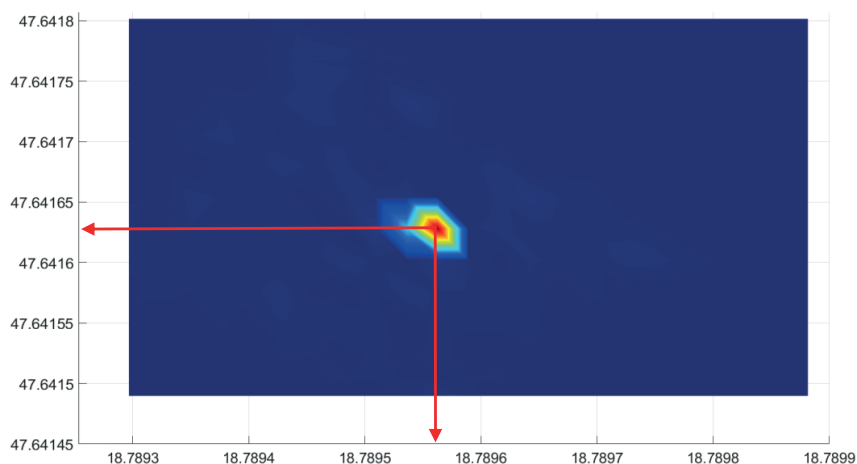
7. ábra

A kísérleti terület gamma-sugárzás intenzitásának eloszlása 3×3 m-es feldolgozási egységekkel [a szerző]

A 7. ábra szemlélteti a fenti mérési adatok síkban ábrázolt gamma-sugárzás intenzitáseloszlását. A kísérleti területen elhelyezett minta markánsan elkülönül a terület többi részétől. Figyelemre méltó a minta szignifikáns hatása a képen. A minta hatása diagramon történő megfigyelés során lényegesen gyengébben elkülönülő.

Annak érdekében, hogy ellenőrizhessük a feldolgozás által jelzett forrás földrajzi koordinátájának helyességét, kontrollmérést végeztünk. A kontrollmérés során az eszközzel kizárólag a minta felett lebegett a drón úgy, hogy a detektor 50 cm-re volt a forrástól. Ennek eredményeképp a háttérsugárzástól erősen elkülönülő értékeket kaptunk. A háttérsugárzáshoz képest szignifikánsan magasabb érték csak a minta feletti koordinátán volt mérhető. A területen egyéb, a mintánál mérhető sugárzási értékhez közel eső értékek nem voltak, így

a feldolgozás során zavaró csúcsok nem keletkeztek. A rögzített koordinátaértékeket statisztikai módszerekkel értékeltük ki. Ennek során a kiugró értékeket elhagytuk, és a megmaradt értékek mediánját vettük a minta statikus koordinátájának. Tekintettel arra, hogy a lokalizáció elsődlegesen a kézi keresés kezdeti lépéseinek megkönnyítését kell hogy támogassa, a mérési hibák a lokalizáció elvárásain belül voltak.



8. ábra

A kísérleti terület ellenőrző gamma-sugárzás mérése 3 × 3 m-es feldolgozási egységekkel [a szerző]

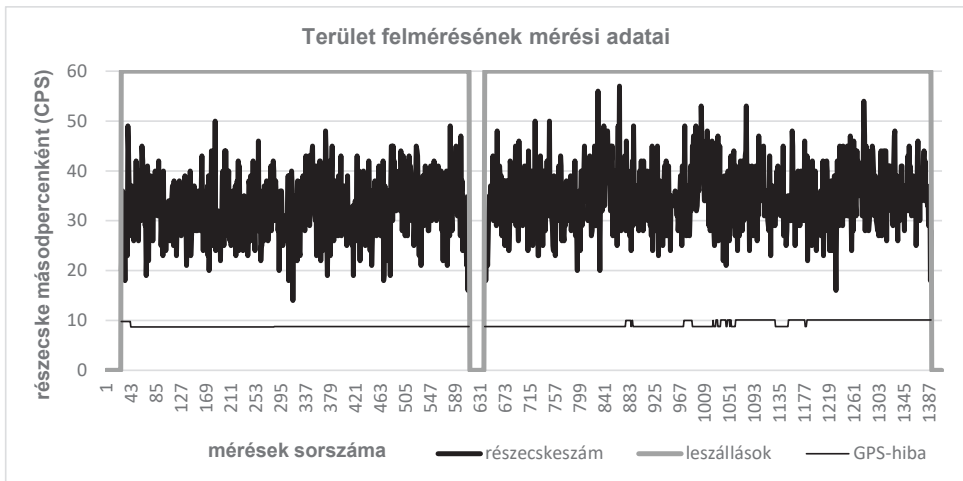
A 8. ábra a kontrollmérés adatainak feldolgozását szemlélteti. Látható, hogy a képen csak a sugárforrás helye rajzolódik ki. Az ábrán nyilak jelölik a forrás földrajzi koordinátáit, ami meg- egyezik a 7. ábrán látható, kísérleti mérés feldolgozása során kimutatott forrás elhelyezkedésével.

5.2. DJI Mavic drónra szerelt szcintillációs detektoros mérések

A DJI cég Mavic elnevezésű drónjai viszonylag új fejlesztések. Maga a drón lényegesen kisebb, mint az Inspire-sorozat. Repülési stabilitása és pontossága is felülmúlja a régebbi fejlesztéseket. Kisebb méretéből adódóan szállítása, tárolása, üzemeltetése egyszerűbb régebbi, nagyobb társainál. Kompakt kialakítása azonban kissé nehézkessé teszi az eszközre felszerelni kívánt kiegészítők elhelyezését. Teherbírása is kisebb, mint az Inspire drónoké, így a már kialakított Geiger–Müller-detektoros rendszer felszerelése a Mavic drónra nem lehetséges. A kis méretű és kis tömegű félvezető érzékelős szcintillációs kristállyal rendelkező sugázmérők azonban elhelyezhetők az eszközön. Így a Mavic Pro drónra egy ilyen kis méretű szcintillációs detektor és az adatait feldolgozó Raspberry PI került. A kísérletek során azt vizsgáltuk, hogy a statikus mérések során megfelelő érzékenységet mutató szcintillációs detektor mennyire ad megbízható adatokat repülés közben. Az alkalmazott detektor szerkezetét tekintve egy $13 \times 13 \times 47$ mm kubaturájú CsJ(Tl) kristályból és MPPC-érzékelőből áll. A detektor 0,01 mSv/h sugárzás (a kísérleti területen mérhető háttérsugárzás) esetén átlagosan 30 részecsketalálatot detektál.

Tekintettel arra, hogy célunk egy kis méretű, könnyen szállítható rendszer megvalósítása volt, az egyik hordozó rendszer egy DJI Mavic Pro multikopter lett. A korlátozott teherbíróképesség okán a fedélzetre szerelt rendszerek esetében a szükséges minimumot határoztuk meg. Természetesen RTK-lokalizáció esetén a mérési pontok meghatározása cm alatti pontosságot szolgáltatna, de a rendszerünknel ezt a pontosságot nem tűztük ki célul. A kutatási, fejlesztési koncepciónk szerint a standard GPS (polgári) mérési pontossága elegendő volt.

Mivel a Mavic a rászertelt detektorrendszerrel 10–12 min repülésre képes, a terület mérését két felszállással lehetett biztosítani. A drón az első felszállással 36 mérési ponton, a második felszállással 45 mérési ponton, pontonként 10 s időtartamig mért. A mérési eredményeket a mérési pontok koordinátaival együtt a Raspberry PI egy SD-kártyára rögzítette.



9. ábra

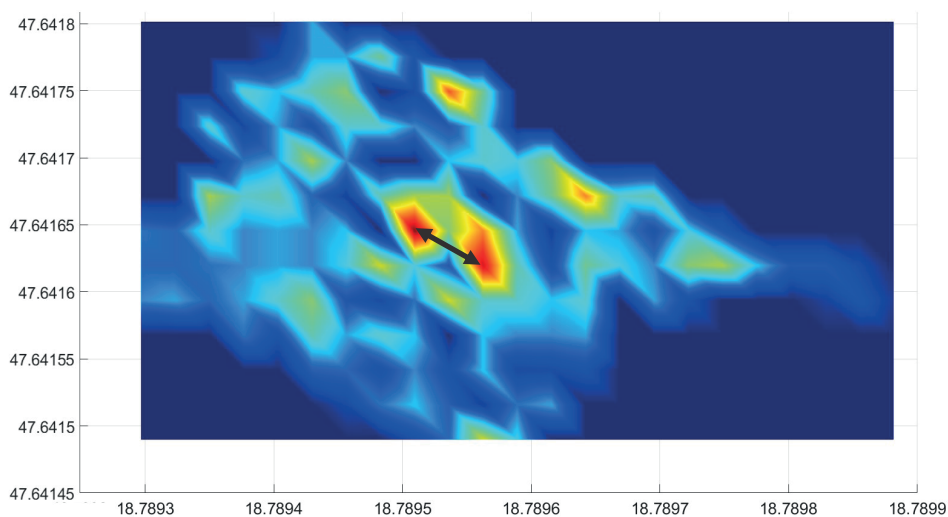
Egy 650 m² terület felett végzett sugárzásmérés s-onkénti eseményszámainak diagramja [a szerző]

A szcintillációs detektor ugyan alkalmas a detektált gamma-részecske energiájának meghatározására, jelen kísérlet során ezt nem vettük figyelembe. A rögzített adatok csupán az egységnyi időre vetített gamma-részecskék detektálásának számát tartalmazzák (9. ábra).

A 9. ábrán látható mérési adatokban szignifikáns kiugrások nem tapasztalhatók. Az adatsor alapján nem lehet megmondani, hogy volt-e a mérési területen a háttérsugárzástól eltérő intenzitású sugárforrás.

Az adatok síkban történő ábrázolásával (10. ábra) azonban láthatóvá válik a forrás. A 10. ábrán két forrás látható (eltekintve a képen látható zajoktól, ami azért van, mert a forrás intenzitása a mérési helyeken alig volt nagyobb a háttérsugárzás intenzitásától). A 9. ábrán látható diagramon megjelenítettük a mérés ideje alatt rögzített GPS-pontosságot is. Látható, hogy a mérés idejének második harmadában a pontosság romlott (magasabb lett az érték). Ezzel egy időben a méréshez használt műholdak száma az adatok alapján 10-ről 9-re csökkent (ezt az értéket nem ábrázoltuk). A megnövekedett mérési pontatlanság okán a rögzített GPS-koordináták is eltértek a pontosabb mérési időszakhoz képest.

A kísérletek során hasonló helymeghatározási pontatlanságot eredményeztek a mérés során bekövetkező műholdváltások. Amennyiben a mérés olyan időszakban történt, amikor a GPS-vevő számára egy műhold a mérés során a horizont alá került (lekerül a feldolgozható műholdak listájáról), és helyette új műhold jelent meg, akkor a méréshez használatos műholdak száma ugyan nem csökkent le, de a holdak megváltozott geometriai helyzete eltérő lokalizációs értéket (GPS-koordinátát) eredményezett. Ez az eltérés általában a mérés hátralévő időtartama alatt állandó volt, és így kialakul a 10. ábrán is látható kettős forrás hamis képe.



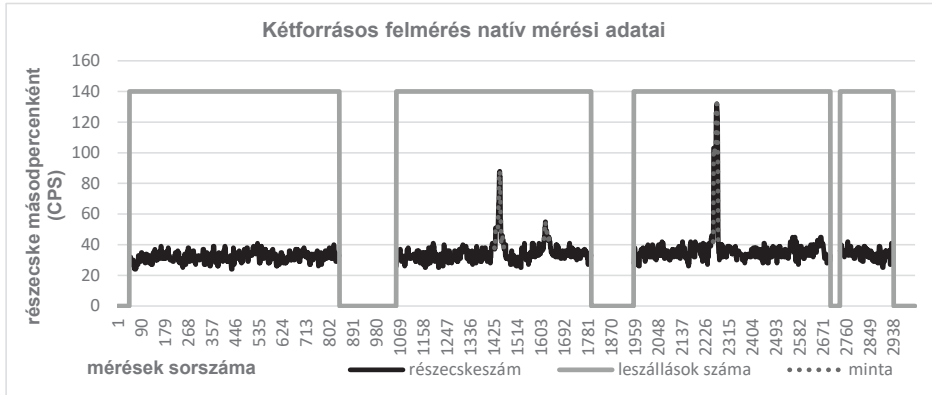
10. ábra

A kísérleti terület gamma-sugárzás intenzitásának eloszlása az eddigi feldolgozások paramétereivel [a szerző]

A két forrás megjelenése tehát a 10. ábrán a mérés során bekövetkezett GPS-hiba megnövekedésével magyarázható. Az ábrán fekete nyíllal jelölt két forráspont közötti távolság ~4 m. Ez a távolság megfelel a mérési bizonytalanság megnövekedéséből adódó pozícióhibának.

5.3. DJI Mavic drónnal végzett kétforrásos felmérés

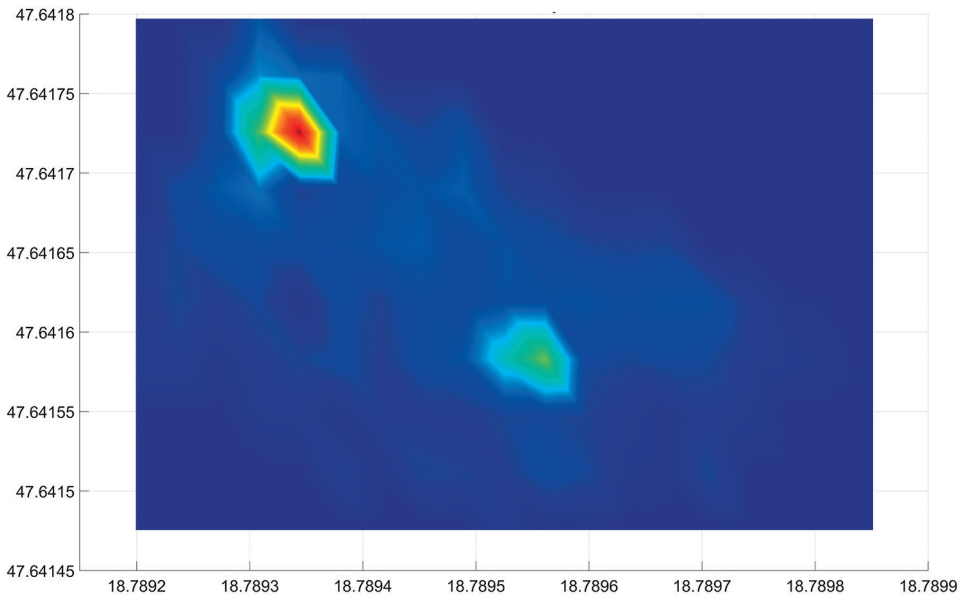
A további tesztek során megvizsgáltuk a teszterületen egymástól távol elhelyezett források detektálásának lehetőségét. A minták egymástól 25 m távolságban voltak, aktivitásuk közel azonos mértékű volt. A kísérlet az előzőkhez képest kissé nagyobb területen zajlott, hogy a kihelyezett minták ne a mérési terület széleire essenek. A kísérleti terület így az előző mérésekhez képest (27 m × 24 m) változott, 39 m hosszú és 24 m széles lett. A mérési pontok száma 117 volt, ami 9 sorban, soronként 13 mérési pontra tagolódott. Minden ponton az eszköz 10 s időtartamig lebegett. Ezt a mérést négy felszállással lehetett megvalósítani. A mérési eredmények kiértékelése a már ismertetett módon történt. A nyers mérési adatokat a 11. ábrán látható diagramok szemléltetik.



11. ábra

Kétforrásos felmérés nyers adatainak megjelenítése [a szerző]

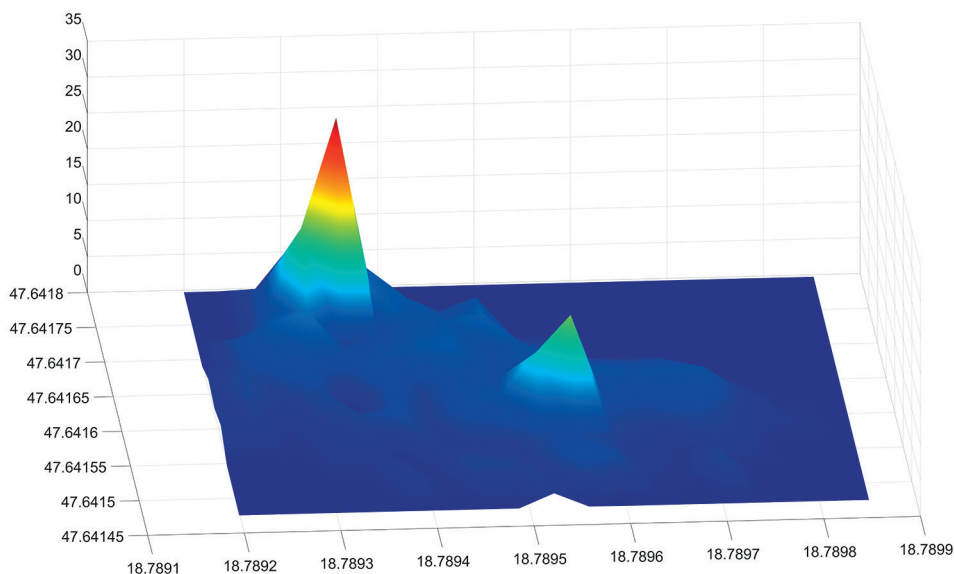
A 11. ábrán látható, hogy a háttérsugárzás 20–40 közötti CPS-értéket eredményezett. A minta közelében ez az érték szignifikánsan megemelkedett. A második repülés idején 2 csúcs látható. Mindkét csúcs egyazon forráshoz tartozik. Azért keletkezett két csúcs, mert a mérési pontok közül két esetben is a detektálási távolságon belül volt az eszköz. A harmadik repülés során egy viszonylag nagy csúcs látható, amely a második forrás közelében történő mérés során keletkezett.



12. ábra

Kétforrásos felmérés adatainak vizuális megjelenítése [a szerző]

A mérési eredményeket a már ismertetett eljárással területi eloszlástérkép formájában a 12. ábra szemlélteti. A képen a két forrás helye jól elkülönül, koordinátáik a valóságos helyzetüknek megfelelő. A módszerrel tehát a vizsgált területen több, független forrás kimutatása is megbízhatóan megvalósítható. Meg kell jegyezni ugyanakkor, hogy a kísérleti rendszer nem alkalmaz RTK helymeghatározó eszközt, ezért a független források minimális elkülönítési távolsága 4–5 m, függően a mérés során esetlegesen előálló GPS-hibától (lásd 9–10. ábrák és azok magyarázatai).



13. ábra

Kétforrásos felmérés adatainak 3D megjelenítése, ahol a magasság az 1 s-ra számított detektálási számmal (CPS) arányos [a szerző]

Az ábrán a háttérsugárzás átlagos értékével korrigáltuk az adatokat, így a Z tengely mentén a háttérhez képest többlet detektálási értékek szerepelnek.

A 13. ábra a már bemutatott kétforrásos mérés 3D reprezentációja. A felület magassága arányos a mért gamma-sugárzással, pontosabban a detektor által rögzített s-onkénti eseményszámmal (*Count per Second, CPS*). A jobb áttekinthetőség érdekében az ábrázolás során eltávolítottuk a háttérsugárzás tartományába eső eseményeket, így a felület kiemelkedései már a többletsugárzást szemléltetik. Ennek megfelelően a 13. ábra Z tengelyén az adott területhez tartozó CPS-értékek olvashatók le. A színezés ugyan arányos a CPS-értékkel, de abszolút értékkel nem rendelkezik. A színpalettát minden diagramon a legjobb vizuális élményhez igazítottuk.

6. Összegzés

A detektorok összehasonlítását célzó két vizsgálat egy napon, a minta változatlan pozícióban hagyásával, azonos mérési paraméterekkel készült, így lehetőség van azok tárgyilagos összehasonlítására. Látható, hogy a minta beazonosítása mindkét esetben megvalósult, ugyanakkor minőségi eltérések mutatkoznak az eredmények tekintetében. A szcintillációs detektorral szerelt Mavic mérése esetén az eredmény zajosabb lett, ami annak tulajdonítható, hogy a detektorrendszer kevésbé volt érzékeny. Ennek egyik oka, hogy a 4 csőből álló Geiger–Müller-számlálós detektorrendszer lényegesen nagyobb felületű, mint a 8 cm³-es szcintillációs kristály. Bár a szcintillációs kristály nagyobb anyagsűrűsége okán több gamma-részecskével lép kölcsönhatásba ugyanakkora térfogaton, mint a Geiger–Müller-csővek, mégis, a kis méret miatt a detektálás valószínűsége valamivel alacsonyabb.

Hordozó tekintetében a Mavic drón sokkal precízebben volt képes a kijelölt mérési pontokra beállni, és ott a mérés idejéig a pozícióját tartani. Hordozhatósága, kis mérete kezelhetőbb, kompaktabb eszközt valósít meg a robusztus Inspire drónhoz képest.

A diszkrét pontokon történő mérés a folyamatos repüléses méréshez képest pontosabb eredményt adott, mivel nem volt szükség a mozgásból adódó helykoordináta korrekciójára. További előnye a diszkrét pontokon történt mérésnek, hogy a detektálási idő megnőtt, ami a minta jeleinek a háttérzajtól történő jobb elkülönítését tette lehetővé.

A több forrás vizsgálata jól szemléltette, hogy egy területen szétszóródó radioaktív törmelékcsoportok vagy nagyobb, különálló törmelékek a mérési módszerrel jól detektálhatók és lokalizálhatók.

Felhasznált irodalom

- [1] Molnár A., „Gammadózis teljesítmény-eloszlási térkép készítése kis méretű drón alkalmazásával,” *Haditechnika*, 53. évf. 2. sz. pp. 8–13. 2019. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.2.02>
- [2] A. Molnár, D. Stojcsics, Zs. Domozi, I. Lovas, „Gamma Radiation Distribution Map Creation Using a Small-Sized Drone,” in *IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2018)* Budapest, 2018. pp. 161–166. Online: <https://doi.org/10.1109/CINTI.2018.8928202>
- [3] A. Parshin, V. Morozov, N. Snegirev, E. Valkova, F. Shikalenko, „Advantages of Gamma-Radiometric and Spectrometric Low-Altitude Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Systems with Small Scintillation Detectors,” *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 5. p. 2247. 2021. Online: <https://doi.org/10.3390/app11052247>
- [4] S. Mochizuki, et al., „First Demonstration of Aerial Gamma-Ray Imaging Using Drone for Prompt Radiation Survey in Fukushima,” *Journal of Instrumentation*, Vol. 12, No. 11. p. P11014. 2017. Online: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/11/P11014>
- [5] J. Aleotti, et al., „Detection of Nuclear Sources by UAV Teleoperation Using a Visuo-Haptic Augmented Reality Interface,” *Sensors (Switzerland)*, Vol. 17, No. 10. p. 2234. 2017. Online: <https://doi.org/10.3390/s17102234>
- [6] T. Hinterhofer, M. Pfennigbauer, S. Schraml, M. Hofstätter, „UAV Based Multi-Sensor System With Real-Time Data Processing and Downlink for Survey of Nuclear Disaster

- Locations for First-Responder Support," in *Proceedings of the AUVSI XPONENTIAL*, Dallas, TX, USA, 8–11 May 2017. Online: <https://doi.org/10.1117/12.2304353>
- [7] J. Zelenák, J. Csurgai, L. Halász, J. Solymosi, Á. Vincze, „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.
- [8] Pintér I., *A járműfedélzeti sugárszintmérés elvei és gyakorlati megvalósításuk harctevékenység, illetve nukleáris baleset-elhárítás során*. PhD-értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2002.
- [9] D. T. Connor et al., „Radiological Comparison of a FDNPP Waste Storage Site during and after Construction,” *Environmental Pollution*, Vol. 243, pp. 582–590. 2018. Online: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.099>
- [10] O. Šálek, M. Matolín, L. Gryc, „Mapping of Radiation Anomalies Using UAV Mini-Airborne Gamma-Ray Spectrometry,” *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 182, pp. 101–107. 2018. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.033>
- [11] P. Martin et al., „Radiological Identification of Near-Surface Mineralogical Deposits Using Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle,” *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 21. p. 3562. 2020. Online: <https://doi.org/10.3390/rs12213562>
- [12] LND, Inc. Oceanside, New York, USA, *Gamma detector product datasheet*. Online: www.lndinc.com/products/geiger-mueller-tubes/7808/
- [13] Sync, *BecqMoni2011 is an amateur freeware Japanese MCA software*. Online: <https://ln.sync.com/dl/cbafeba20/87sjrujv-%C2%ADr9tziicq-%C2%ADpz9ncmsy-%C2%ADnphcjsk5/view/default/1092926230010>
- [14] V. Fedorovsky, et al., *Aerospace Geological Map of the North-Eastern Part of zones Chernorud & Tomota*. Irkutsk, Russia, Geological Institute of RAS & Institute of Earth's Crust, 2013.
- [15] A. V. Parshin, A. E. Budyak, V. N. Babyak, „Interpretation of Integrated Aerial Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Vehicles in Mining: A Case of Additional Flank Exploration,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 459, No. 5 p. 052079. 2020. Online: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052079>
- [16] A. V. Parshin, et al., „Complex UAS-Geophysical Surveys at the First Stages of Geological Prospecting: Case in the Western Sayan (Russia),” In *Proceedings of the First EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles*, Toulouse, France, 2–4 December 2019. pp. 1–5. Online: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903321>

Evaluation of the Dose Distribution of Gamma Radiation by a Discrete Measuring Point Method Using Drones

The primary objective of the development was to create a more compact, easily portable, and deployable system, but one which, in contrast with the previous ones, is more sensitive. Despite background radiation (typically 0.01 $\mu\text{Sv/h}$ in the testing areas), a difference of +0.009 $\mu\text{Sv/h}$ has reliably been detected in the experiments made so far. In this present development, this value was successfully reduced to +0.005 – +0.007 $\mu\text{Sv/h}$. The improvement in sensitivity was achieved primarily by increasing the measurement time per point, which was realised using special flight control software. This sensitivity increase either allows higher scanning altitude (approximately

+1–2 m) or, in case of an identical flight device at an identical altitude, a larger survey area with one take-off. In our experiments, we used a natural uranium mineral (Autunite) with activity far below that of artificially produced isotopes. In this series of experiments, we also covered the identification of several sources, which models the possibility of mapping active sources scattered around the site of a possible accident.

The main advantage of the system developed and introduced by us over the survey procedures used in practice is that it is easy to mobilise, a large area can be surveyed at low cost without putting an operator at risk in the field. The purpose of the system is to detect the presence of the source and to localise it to such an extent that the localisation can subsequently be easily specified by manual or other ground procedures. Since we do not strive for centimeter positioning accuracy, standard GPS localisation is sufficient for measurements. During the measurements, the geographical coordinates are interpreted in the WGS'84 system. The circles of latitude and longitude coordinates are also shown in this system in the figures presented.

Keywords: dose distribution measurement on field, radioactive mapping with drone, radiation measurement with drone

Prof. Dr. Molnár András általános rektorhelyettes Óbudai Egyetem Neumann János Informatikai Kar molnar@uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-4330-6547	András Molnár (PhD) Lecturer Óbuda University John von Neumann Faculty of Informatics molnar@uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-4330-6547
---	---