



Matriisi-ilmaisoin taktisen ydinaseen ja muiden radioaktiivisten aineiden havainnointiin

Sakari Ihantola, Radis Technologies Oy
Harri Toivonen, HT Nuclear Oy
Kari Peräjärvi, Säteilyturvakeskus

Matriisi-ilmaisin taktisen ydinaseen ja muiden radioaktiivisten aineiden havainnointiin

Sakari Ihantola, Radis Technologies Oy
Harri Toivonen, HT Nuclear Oy
Kari Peräjärvi, Säteilyturvakeskus

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Puolustusministeriö

This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use.
Commercial use is prohibited.

ISBN pdf: 978-951-663-202-8

ISSN pdf: 2984-102X

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2024

Matriisi-ilmaisain taktisen ydinaseen ja muiden radioaktiivisten aineiden havainnointiin

Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja 2024:6

Julkaisija Puolustusministeriö

Tekijä/t Sakari Ihantola, Harri Toivonen, Kari Peräjärvi

Toimittaja/t Sakari Ihantola

Yhteisötekijä Radis Technologies Oy

Kieli suomi

Sivumäärä 22

Tiivistelmä

Kyky havaita ydinaineita ja muita radioaktiivisia aineita on tärkeä osa kansallista turvallisuutta. Tehokkaan havaitsemisen mahdollistavalla ilmaisimella tulee olla erittäin hyvä efektiivisyys lähteen tuottamalle neutroni- ja gammasäteilylle, jolloin säteilevä kohde voidaan havaita kaukaa. Samalla ilmaisinjärjestelmän tulee kyetä paikantamaan lähde automaattisesti. Nopea paikantaminen on ensiarvoisen tärkeää tilanteen hahmottamiseksi ja sen hallintaan saamiseksi.

Tutkimuksessa osoitettiin, että tehokas, suuntaherkkä säteilyilmaisain voidaan rakentaa kustannustehokkaasti matriisiperiaatteella NaI(Tl)-tuikeilmaisimista. Matriisi-ilmaisimen toiminta demonstroitiin rakentamalla pienikokoinen neljään ilmaisinelementtiin perustuva säteilyilmaisainprototyyppi ja sille ohjelmisto, joka analysoi automaattisesti säteilylähteen tyyppin ja suunnan. Prototyyppi kykeni määrittämään gammasäteilylähteiden suunnan alle 5° tarkkuudella ja fissioneutronilähteen suunnan noin 15° tarkkuudella. Simulaatioiden avulla selvitettiin, kuinka ilmaisimen herkkyyttä saadaan parannettua kasvattamalla ilmaisinelementtien kokoa.

Simulaatiotulosten perusteella 1 000 000 neutronia sekunnissa lähettävä taktinen ydinase voidaan havaita 100 m päästä neljästä NaI(Tl)-tuikemateriaalista valmistetusta ilmaisinelementistä koostuvalla ilmaisimella, jonka ilmaisinelementtien kokonaismassa on 60 kg. Tällaisella ilmaisimella ydinase voidaan havaita noin viidessä minuutissa. Jos taktinen ydinase lähettää 200 000 neutronia sekunnissa, kasvaa havaitsemiseen tarvittava aika kahteen tuntiin.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan (MATINEn) tutkimusrahoituksen toimeenpanoa. (www.defmin.fi/matine) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta puolustusministeriön näkemystä.

Asiasanat gammasäteily, neutronit, havaitseminen, paikannus, ydinaseet, CBRNE, maanpuolustus, tutkimus, kokonaismaanpuolustus

ISBN PDF 978-951-663-202-8

ISSN PDF 2984-102X

Julkaisun osoite <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-202-8>

Matrisdetektor för detektering av taktiska kärnvapen och andra radioaktiva material

Publikationer av försvarets vetenskapliga delegation 2024:6

Utgivare Försvarsministeriet

Författare Sakari Ihantola, Harri Toivonen, Kari Peräjärvi

Redigerare Sakari Ihantola

Utarbetad av Radis Technologies Oy

Språk finska

Sidantal

22

Referat

Förmågan att upptäcka nukleära och andra radioaktiva ämnen är en viktig del av den nationella säkerheten. En detektor som möjliggör effektiv detektion måste ha hög känslighet för neutron- och gammastrålning som alstras av källan, så att det emitterande objektet kan detekteras på avstånd. Samtidigt måste detektorsystemet kunna lokalisera källan automatiskt. Snabb lokalisering är mycket viktigt för att kunna uppfatta situationen och få den under kontroll.

Studien visade att en effektiv, riktningssärlig strålningsdetektor kan byggas kostnadseffektivt genom att använda en matris av NaI(Tl) scintillatorelement. Konceptet demonstrerades genom att tillverka en prototyp för strålningsdetektering baserad på fyra små detektorelement och programvara för automatiserad analys av strålkällans typ och riktning. Prototypen kunde bestämma riktningen för gammastrålningskällor med en noggrannhet på mindre än 5° och riktningen för fissionsneutronkällan med en noggrannhet på cirka 15°. Simuleringar användes för att undersöka hur detektorns känslighet kan förbättras genom att öka storleken på detektorelementen.

Baserat på simuleringsresultaten kan ett taktiskt kärnvapen upptäckas på 100 m avstånd med en detektor bestående av fyra detektorelement gjorda av NaI(Tl)-scintillationsmaterial med en total massa på 60 kg. Taktiska kärnvapen som avger 1 000 000 neutroner per sekund detekteras på cirka fem minuter. Om källan avger 200 000 neutroner per sekund ökar detektionstiden till två timmar.

Klausul

Den här publikation är en del i genomförandet av forskningsfinansiering av Försvarets vetenskapliga delegation. (www.defmin.fi/matine) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

Nyckelord

gammastrålning, neutroner, detektion, positionsbestämning, kärnvapen, CBRNE, försvaret, forskning, totalförsvaret

ISBN PDF 978-951-663-202-8

ISSN PDF

2984-102X

URN-adress <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-202-8>

Matrix detector for detection of tactical nuclear weapons and other radioactive materials

Publications of the Scientific Advisory Board for Defence 2024:6

Publisher Ministry of Defence

Author(s) Sakari Ihantola, Harri Toivonen, Kari Peräjärvi

Editor(s) Sakari Ihantola

Group author Radis Technologies Oy

Language Finnish

Pages

22

Abstract

The capability to detect nuclear and other radioactive materials is an important part of national security. A detector that enables effective detection must have high sensitivity for neutron and gamma radiation produced by the source, so that the emitting object can be detected from a distance. At the same time, the detector system must be able to locate the source automatically. Fast localisation is highly important in order to perceive the situation and get it under control.

The study showed that an efficient, direction-sensitive radiation detector can be built cost-effectively by using a matrix of NaI(Tl) scintillator elements. The concept was demonstrated by manufacturing a radiation detection prototype based on four small detector elements and software for automated analysis of the type and direction of the radiation source. The prototype was able to determine the direction of gamma radiation sources with an accuracy of less than 5° and the direction of the fission neutron source with an accuracy of about 15°. Simulations were used to investigate how the detector sensitivity can be improved by increasing the size of the detector elements.

Based on the simulation results, a tactical nuclear weapon can be detected 100 m away with a detector consisting of four detector elements made of NaI(Tl) scintillation material with a total mass of 60 kg. Tactical nuclear weapon emitting 1 000 000 neutrons per second is detected in about five minutes. If the source emits 200,000 neutrons per second, the detection time increases to two hours.

Provision This publication is part of the implementation of research funding of the Scientific Advisory Board for Defence (MATINE). (www.defmin.fi/matine) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Defence Ministry.

Keywords gamma radiation, neutrons, detection, locationing, nuclear weapons, CBRNE, national defence, research, comprehensive defence approach

ISBN PDF 978-951-663-202-8

ISSN PDF

2984-102X

URN address <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-202-8>

Sisältö

1	Johdanto	7
1.1	Kaupallisesti saatavilla olevat ratkaisut	7
1.2	Hyödyntämismahdollisuudet	8
1.3	Tutkimuksen tavoitteet	11
2	Työn toteutus	12
2.1	Ilmaisimen rakenne ja toimintaperiaate	12
2.2	Ilmaisimen käyttöliittymä ja algoritmit	14
2.3	Suurikokoisen ilmaisinjärjestelmän simulointi	15
3	Tulokset	16
3.1	Gammasäteilylähteiden paikannus	16
3.2	Neutronisäteilylähteiden paikannus	17
3.3	Suurikokoisen ilmaisinjärjestelmän suorituskyky	19
4	Johtopäätökset	20
	Lähteet	21

1 Johdanto

Kyky havaita ydinaineita ja muita radioaktiivisia aineita on tärkeä osa kansallista turvallisuutta. Esimerkiksi räjäyttämällä levitetty radioaktiivinen aine voi pahimmillaan saastuttaa muutaman neliökilometrin alueen siten, että alueella tarvitaan kiireellisiä suojaus- ja puhdistustoimenpiteitä. Ydinmateriaaleja taasen käytetään ydinaseissa, joiden tuhovoima on omaa luokkaansa. Salakuljetus tai muu pahantahtoinen käyttö voidaan pyrkiä estämään havaitsemalla radioaktiivinen aine ajoissa. Tällaista havaitsemiskykyä tarvitaan erityisesti valtakunnan rajoilla, liikenteen solmukohdissa sekä muissa tärkeissä kohteissa [1, 2].

Radioaktiivisia aineita voidaan havaita niiden lähettämän ionisoivan säteilyn perusteella. Tehokkaan havaitsemisen mahdollistavan ilmaisimen tulee olla erittäin herkkä lähteen tuottamalle neutroni- ja gammasäteilylle, jolloin säteilevä kohde voidaan havaita kaukaa. Samalla ilmaisinjärjestelmän tulee kyetä paikantamaan lähde automaattisesti. Nopea paikantaminen on ensiarvoisen tärkeää tilanteen hahmottamiseksi ja sen hallintaan saamiseksi. Pahimmillaan hidas paikannus voi johtaa siihen, että lähdeä kuljettava taho huomaa tullessaan havaituksi tai kohde ehtii kadota, eikä signaalin alkuperää saada selville.

Tehokas, suuntaherkkä säteilyilmaisimien voidaan rakentaa matriisiperiaatteella yhdistämällä useita erillisiä ilmaisinelementtejä. Matriisiperiaate mahdollistaa ilmaisimen koon skaalaamisen vapaasti halutun havaitsemisherkkyyden saavuttamiseksi lisäämällä ilmaisinelementtien määrää. Matriisirakenteella saadaan muodostettua kuva kerätyn informaation jakaumasta ilmaisimen sisällä. Tästä informaatiosta voidaan muun muassa selvittää ilmaisimeen osuneen signaalin tulosuunta ja sitä kautta signaalilähteen sijainti.

1.1 Kaupallisesti saatavilla olevat ratkaisut

Kaupallisesti saatavilla olevat säteilyilmaisimet voidaan jakaa kahteen eri perustyyppiin. Perinteiset säteilyilmaisimet koostuvat tyypillisesti vain yhdestä joko gamma- tai neutronisäteilyä mittaavasta elementistä. Tällaisten ilmaisimien etuna on kohtuullisen hyvä efektiivisyys ja alhainen hankintahinta. Haittapuolena tällaisella ilmaisimella säteilylähteen paikantaminen on hyvin hidasta ja riippuvaista käyttäjän osaamisesta. Lisäksi yksittäisellä ilmaisinelementillä on vaikea saavuttaa erittäin suurta efektiivisyyttä. Koska kukin ilmaisimien kykenee mittaamaan vain yhtä säteilylajia, tarvitaan neutroni- ja gammasäteilyn havaitsemiseen tyypillisesti kaksi erillistä ilmaisinta [3].

Viime vuosina markkinoille on tullut myös kuvantavia gammailmaisimia, jotka pystyvät antamaan tarkan kuvan säteilylähteen sijainnista ja jopa muodosta [4, 5, 6]. Tällaiset puolijohdeisiin perustuvat ilmaisimet ovat kuitenkin hankintahinnaltaan kalliita ja efektiivisyydeltään varsin vaatimattomia. Niinpä ne eivät sovellu kaukana olevien tai heikosti säteilevien kohteiden havaitsemiseen. Myös neutronisäteilyn kuvantamiseen soveltuvia ratkaisuja on tutkittu ja joitakin ratkaisuja on myös kaupallisesti saatavilla [7, 8, 9].

1.2 Hyödyntämismahdollisuudet

Matriisi-ilmaisimia voidaan hyödyntää hyvin erilaisissa sovelluskohteissa.

Sovellus 1: Kiinteä asennus

Kiinteästi asennettuja ilmaisimia voidaan käyttää esimerkiksi raja-asemilla tai tilapäisesti osana korkean tason poliittisten vierailujen turvajärjestelyjä. Kuva 1 havainnollistaa, kuinka kohde voidaan havaita matriisi-ilmaisimilla huomaamattomasti ihmisvirrasta. Perinteisillä ilmaisimilla ihmiset ja ajoneuvot joudutaan ohjaamaan yksitellen mittausalueen läpi, jotta kohde saadaan määritettyä yksiselitteisesti.

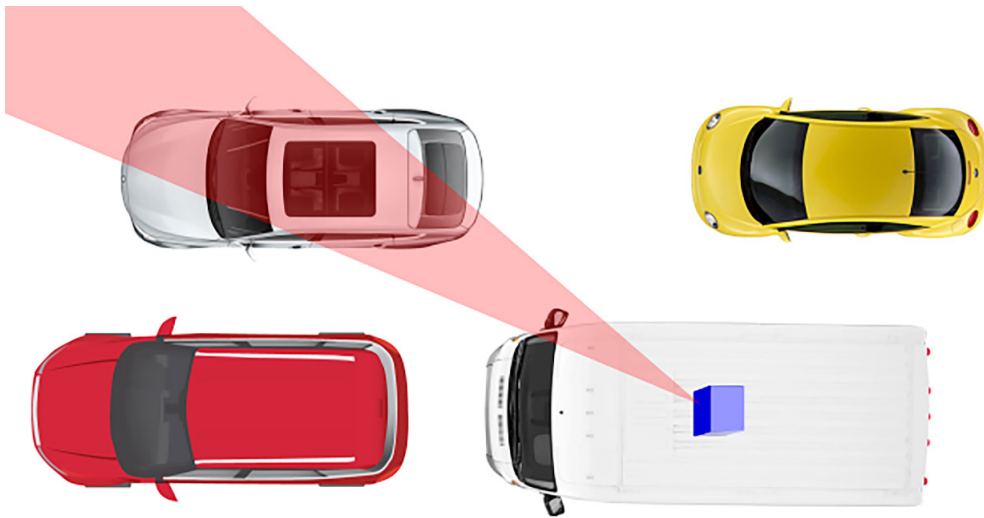
Kuva 1. Säteilylähdettä kuljettava henkilö saadaan identifioitua huomaamattomasti kahdella kiinteästi asennetulla suuntaherkällä matriisi-ilmaisimella.



Sovellus 2: Liikkuvat mittaukset ajoneuvolla

Kohteen paikantaminen on erityisen haastavaa mittauksissa, joissa sekä ilmaisimet että kohde voivat liikkua. Tällainen tilanne syntyy esimerkiksi, kun valvontaa suoritetaan liikkuvalla ajoneuvolla. Ajoneuvolla suoritettavan mittauksen lisähaasteena on, ettei mittausautoa voida usein liikennevirrassa pysäyttää tai palata nopeasti samaan paikkaan, jotta kohde saataisiin manuaalisesti paikannettua. Kuva 2 havainnollistaa, kuinka kohteen tunnistaminen helpottuu huomattavasti matriisi-ilmaisimella.

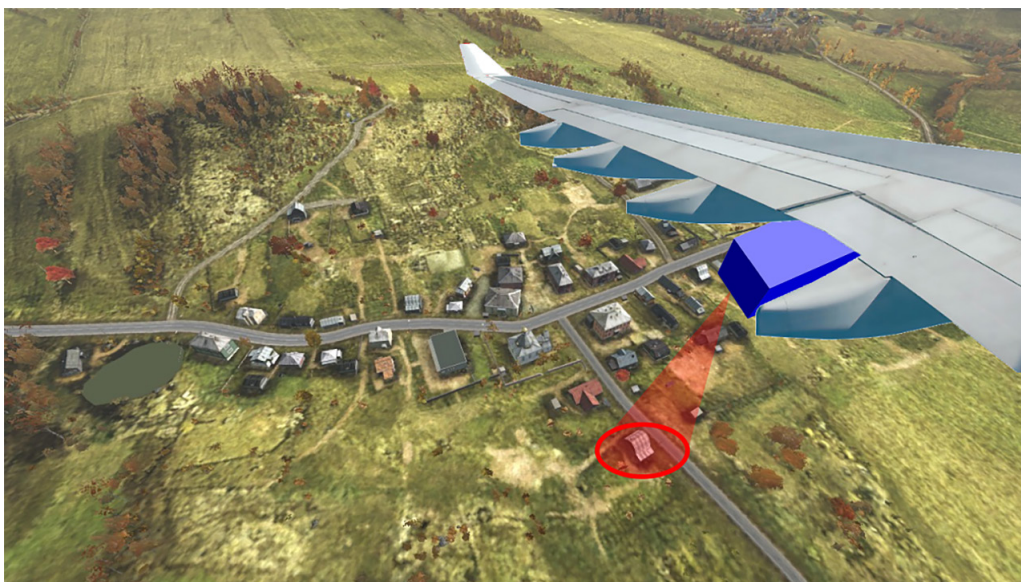
Kuva 2. Ajoneuvoon asennettu suuntaherkkä matriisi-ilmaisin helpottaa huomattavasti kohteen paikantamista liikennevirrassa.



Sovellus 3: Lentomittaukset

Tehokas tapa varsinkin voimakkaiden säteilylähteiden etsinnässä on kartoittaa tutkittava alue lentomittauksilla. Lähteen paikantamiseksi lähteen lähettämän signaalin havaitseminen ei kuitenkaan vielä riitä, vaan perinteisillä menetelmillä lähteen paikka saadaan laskettua vasta jälkikäteen yhdistämällä tutkittavan alueen eri mittauspisteissä havaitut signaalit. Kuva 3 esittää, kuinka suuntaherkällä matriisi-ilmaisimella lähde saadaan paikannettua nopeasti jo yhden mittauspisteen perusteella.

Kuva 3. Lähteen paikan määrittämiseksi lentokoneesta tai helikopterista tarvitaan vain yksi mittaus suuntaherkällä ilmaisimella.



Sovellus 4: Mittaukset merellä

Matriisirakenne mahdollistaa erittäin suurten ja herkkien ilmaisinkokonaisuuksien toteuttamisen. Tästä on erityisesti hyötyä merellä, jossa mitattavat kohteet voivat olla hyvin kaukana, eikä ilmaisimen koko tai paino ole rajoittava tekijä. Herkällä gamma- ja neutroni-ilmaisimella voitaisiin esimerkiksi tarkkailla laivoilla tapahtuvia ydinmateriaalikuljetuksia (ydinaseet, UF6) tai havaita ydinkäyttöisen aluksen reaktori. Merellä tehtävien säteilymittausten etuna on myös vähäinen luonnon taustasäteily.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimushankkeen tavoitteena oli osoittaa, kuinka taktisia ydinaseita ja muita säteilylähteitä voidaan automaattisesti karakterisoida (paikantaa ja tunnistaa) hyödyntämällä neutroni- ja gammasäteilyä erittäin tehokkaasti havaitsevan matriisi-ilmaisimen tuottamaa dataa ja uusia data-analyysimenetelmiä.

Hankkeella pyrittiin vastaamaan erityisesti seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miten matriisi-ilmaisimien voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti?
2. Miten säteilyä lähettävä kohde saadaan paikannettua automaattisesti?
3. Miten teknologiaa voidaan skaalata sovelluksiin, joissa vaaditaan suuria ja erittäin herkkiä ilmaisimia?
4. Kuinka suuri ilmaisimien vaaditaan taktisen ydinaseen havaitsemiseen 100 m päästä (10 kg plutoniumia, josta 90 % Pu-239 ja 10 % Pu-240, neutroniemissio noin 1×10^6 n/s)?

2 Työn toteutus

Hankkeessa kehitettiin pienikokoinen matriisi-ilmaisimien, joka kykenee neutroni- ja gammasäteilyä lähettävien aineiden automattiseen havainnointiin ja paikantamiseen. Lisäksi laite tunnistaa gammasäteilyä lähettävän aineen radioisotoopin. Kehitetyn laitteen avulla validoitiin teknologian toimintaperiaate käytännössä.

Kehitetty ilmaisintyyppi valittiin monivaiheisen esitutkimuksen perusteella. Hankkeen alussa erilaisten ilmaisinvaihtojen suorituskykyä tutkittiin Monte Carlo -simulaatioiden avulla. Simulaatioiden perusteella jatkokehitykseen valikoitui kaksi erilaista matriisi-ilmaisinjärjestelmää, joista toinen koostui muovituikeaineeseen perustuvista ilmaisinelementeistä ja toinen NaI(Tl)-tuikeaineeseen perustuvista ilmaisinelementeistä. Muovituikeaineeseen perustuvasta ilmaisimesta valmistettiin yksi ilmaisinelementti, jolla yksittäisen elementin toimintaa voitiin testata. Komponenttien saatavuusongelmien takia useista muovielementeistä koostuvaa matriisi-ilmaisinta ei kuitenkaan pystytty toteuttamaan hankkeen aikana. Näin ollen rakennettavaksi matriisi-ilmaisimeksi valikoitui NaI(Tl)-tuikeaineeseen perustuva järjestelmä. Ilmaisinjärjestelmää testattiin kattavasti Säteilyturvakeskuksen säteilytyshallissa neutroni- ja gammalähteillä.

2.1 Ilmaisimen rakenne ja toimintaperiaate

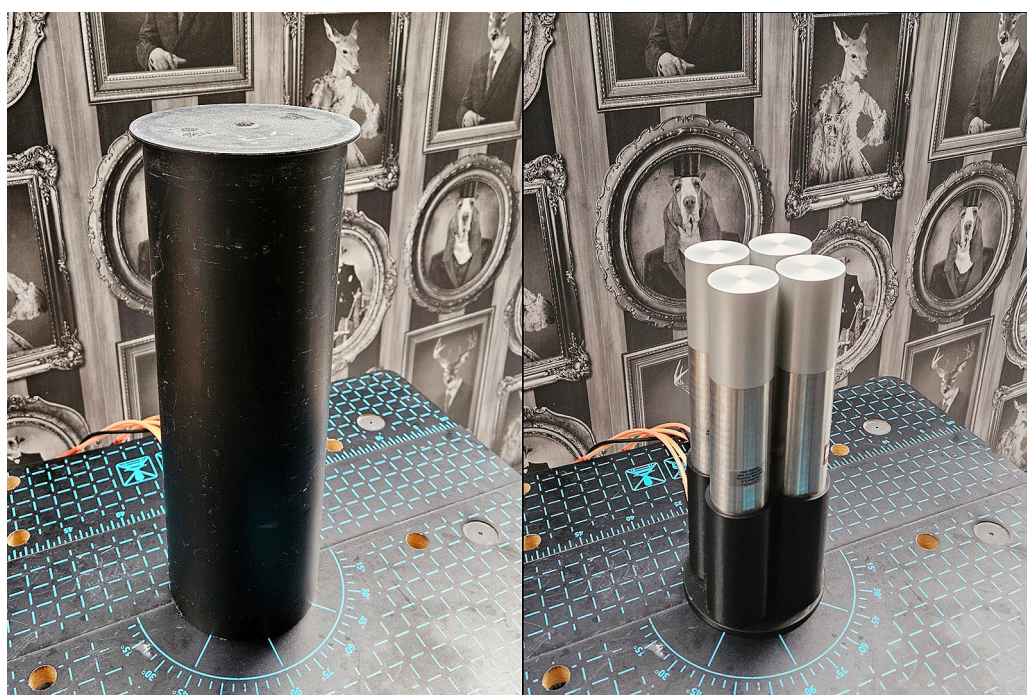
Valokuva hankkeessa kehitetystä matriisi-ilmaisimesta on esitetty kuvassa 4 ja poikkileikkaus kuvassa 5. Ilmaisimien koostuu neljästä sylinterimäisestä NaI(Tl)-tuikeilmaisinelementistä, joiden korkeus on 76 mm ja halkaisija 38 mm. Tuikeilmaisimeen absorboitua gammasäteilyä synnyttää valo, joka muutetaan sähköiseksi signaaliksi valomonistinputken avulla ja edelleen digitaaliseen muotoon. Ideaalitapauksessa havaitun sähköisen signaalin voimakkuus on suoraan verrannollinen ilmaisimeen osuvan gammasäteilyn energiaan.

Neutronien havainnointi ilmaisimella perustuu neutroniaktivaatiossa syntyvän gammasäteilyn mittaamiseen. Neutronien vuorovaikutuksessa aineen kanssa syntyy usein gammasäteilyä, jonka energia voi olla hyvin suuri, jopa yli 10 MeV. Koska luonnon radioaktiiviset isotoopit eivät synnytä korkeaenergistä gammasäteilyä, on yli 3 MeV gammaenergia-alue hyvä indikaattori neutroneille [10]. Yli 3 MeV energia-alueen pieni taustasignaali syntyy pääasiassa kosmisesta säteilystä, erityisesti kosmisen säteilyn synnyttämistä neutroneista. Neutroniaktivaatiota tapahtuu

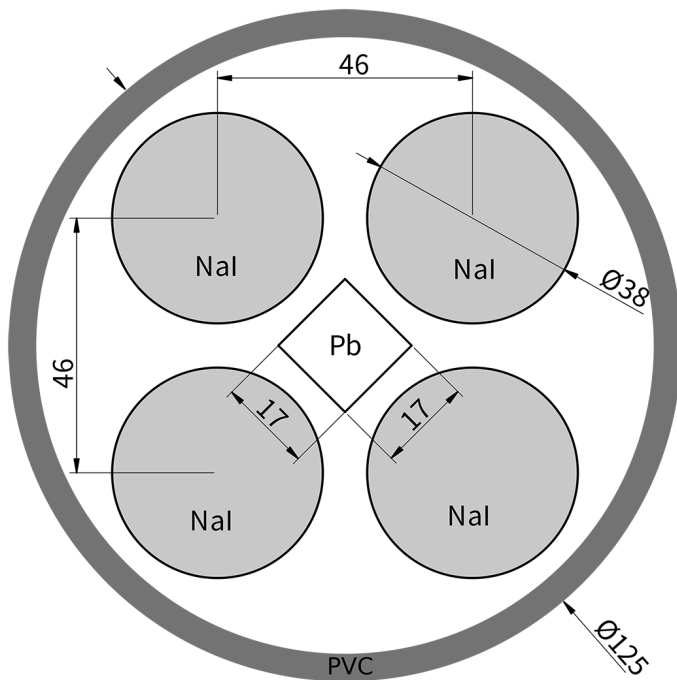
sekä ilmaisimen NaI(Tl)-tuikemateriaalissa, ilmaisimen muissa rakenteissa sekä ympäristössä. Fissioneutronilähde synnyttää korkeaaenergistä gammasäteilyä myös suoraan.

Ilmaisimen havaitsemiskykyä neutroneille parannettiin lisäämällä ilmaisimatriisiin ympärille 7 mm paksu kerros PVC-muovia. PVC edistää neutronien havaitsemista kahdella tavalla. Ensinnäkin muovin sisältämä vety hidastaa tehokkaasti neutroneja, jolloin termiselle energialle hidastuneiden neutronien määrä kasvaa. Toiseksi PVC:n sisältämä kloori absorboi tehokkaasti termisiä neutroneja ja absorptiossa syntyy runsaasti gammasäteilyä. PVC:n lisäksi neutronihavaitsemistehokkuutta yritettiin parantaa myös gadolinium- (Gd) ja kadmium- (Cd) kerroksilla, mutta parhaaseen tulokseen päästiin PVC-muovilla.

Kuva 4. Kehitetty ilmaisinsuojakotelon kansa (vasen) ja ilman koteloa (oikea).



Kuva 5. Ilmaisimen rakenteen poikkileikkaus. NaI-tuiekiteitä ympäröivä PVC-muovi tehostaa neutronihavainnointia. Ilmaisimen keskellä oleva lyijy (Pb) tehostaa gammasäteilyn suunnan määrittystä.



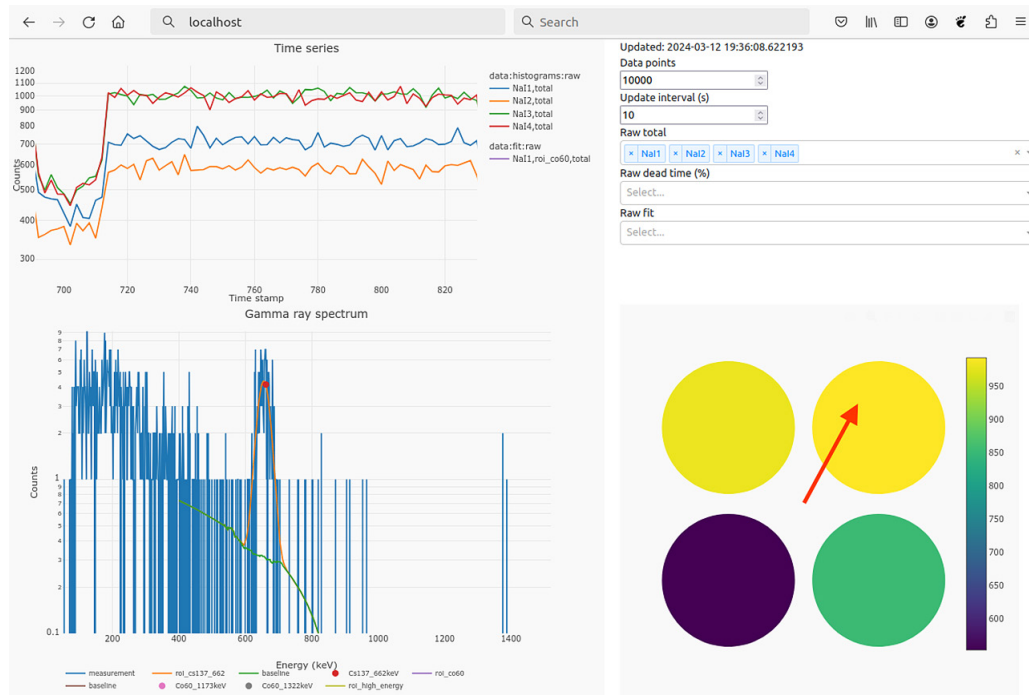
2.2 Ilmaisimen käyttöliittymä ja algoritmit

Ilmaisimen toimintaa ohjataan web-pohjaisella käyttöliittymällä. Käyttöliittymän kolme päänäyttöä on esitetty kuvassa 6.

Aikasarja ja energiaspektri esittävät yksittäisten ilmaisinelementtien signaaleja. Aikasarja kuvaa, kuinka ilmaisinelementin havaitsema pulssimäärä muuttuu ajan funktiona. Energiaspektri näyttää ilmaisinelementin havaitsemien gammojen määrän energian funktiona. Energiaspektrinäkymässä näkyy myös havaituille gammapiikeille tehdyt sovitukset, joita käytetään radioisotooppien tunnistuksessa.

Lähteen suunta esitetään nuolella ja se lasketaan neljän ilmaisinelementin havaitsemien pulssimäärien erosta. Nuolen alla näkyvien ilmaisinelementtien väri kuvaa laskennassa käytettyä pulssimäärää. Lähteen suuntavektori saadaan yksinkertaisesti ilmaisinelementtien keskipisteiden suuntavektoreiden painotetusta keskiarvosta. Painokertoimina voidaan käyttää joko kaikkia ilmaisinelementissä havaittuja pulsseja, tietyllä energia-alueella havaittuja pulsseja tai havaitun gammapiikin pinta-alaa. Menetelmä on kuvattu julkaisussa [11].

Kuva 6. Ilmaisimen web-pohjainen käyttöliittymä. Käyttöliittymä koostuu kolmesta pääikkunasta: signaalien aikasarja (vasemmalla ylhäällä), mittauksen energiaspektri (vasemmalla alhaalla), säteilylähteen suuntanäyttö (oikealla alhaalla).



2.3 Suurikokoisen ilmaisinjärjestelmän simulointi

Taktisten ydinaseiden havaitseminen pitkiltä mittausetäisyyksiltä vaatii suuren ilmaisinjärjestelmän, jollaista hankkeessa ei ollut mahdollista toteuttaa. Tästä syystä suuren ilmaisinjärjestelmän suorituskykyä tutkittiin Geant4-koodilla tehtyjen Monte Carlo -simulaatioiden avulla. Simulaatioissa lähtökohdaksi otettiin ilmaisim, joka koostuu neljästä 4 L NaI-tuikteilmaisimesta, joiden yhteenlaskettu massa on noin 60 kg. Taktista ydinasetta kuvattiin pistelähteellä, joka emittoi 200 000–1 000 000 fissioneutronia sekunnissa. Suorituskykyä testattiin kattavasti erilaisilla ympäristöissä (meri, maa, tunneli) ja eri havainnointietäisyyksillä.

3 Tulokset

3.1 Gammasäteilylähteiden paikannus

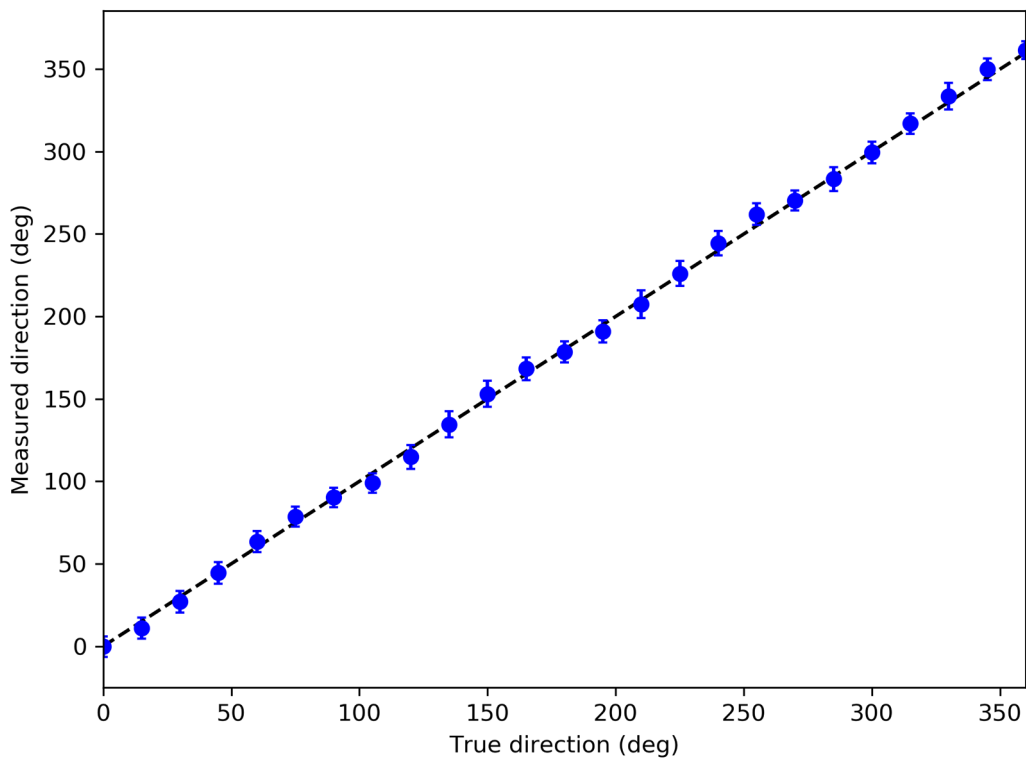
Kehitetyn ilmaisimen kykyä paikantaa säteilylähteitä tutkittiin Säteilyturvakeskuksen säteilytyshallissa Am-241, Cs-137 ja Co-60- gammalähteillä. Näiden lähteiden avulla pystyttiin tutkimaan ilmaisimen vaste laajalla 60–1 332 keV gammaenergia-alueella. Paikannustarkkuuden kulmariippuvuutta tutkittiin pyörittämällä ilmaisinta ja toistamalla mittaus 15 asteen välein.

Taulukko 1 esittää ilmaisimen määrittämän suuntakulman epävarmuuden 1 s mittauksessa. Epävarmuus on saatu laskemalla keskihajonta ilmaisimen määrittämistä lähteen suunnista todelliseen lähteen suuntaan nähden eri lähteen kulmilla tehdyistä mittauksista. Cs-137-lähteen mittaustulokset eri lähteen kulmilla on esitetty kuvassa 7.

Taulukko 1. Ilmaisimen määrittämän säteilylähteen suunnan epävarmuus 1 s mittauksissa.

Isotooppi	Aktiivisuus (MBq)	Etäisyys (m)	Suunnan epävarmuus
Am-241	1 850	10	6,2°
Cs-137	7,97	2	7,6°
Co-60	2,00	2	13,7°

Kuva 7. Ilmaisimen määrittämä Cs-137-gammalähteen suunta todellisen suunnan funktiona. Piste osoittaa kaikkien kyseisellä kulmalla tehtyjen 1 s mittauksen tulosten keskiarvon ja virherajat 1 s mittauksen keskihajonnan.



3.2 Neutronisäteilylähteiden paikannus

Kehitetyn ilmaisimen neutronilähteiden paikannuskykyä tutkittiin Säteilyturva-keskuksen säteilytyshallissa Cf-252-neutronilähteellä, joka emittoi $7,73e7$ neutronia sekunnissa. Koska Cf-252-neutronituotto perustuu spontaaniin fission, on syntyvien neutronien energiaspektri hyvin lähellä plutoniumlähteen lähettämien neutronien energiaspektriä.

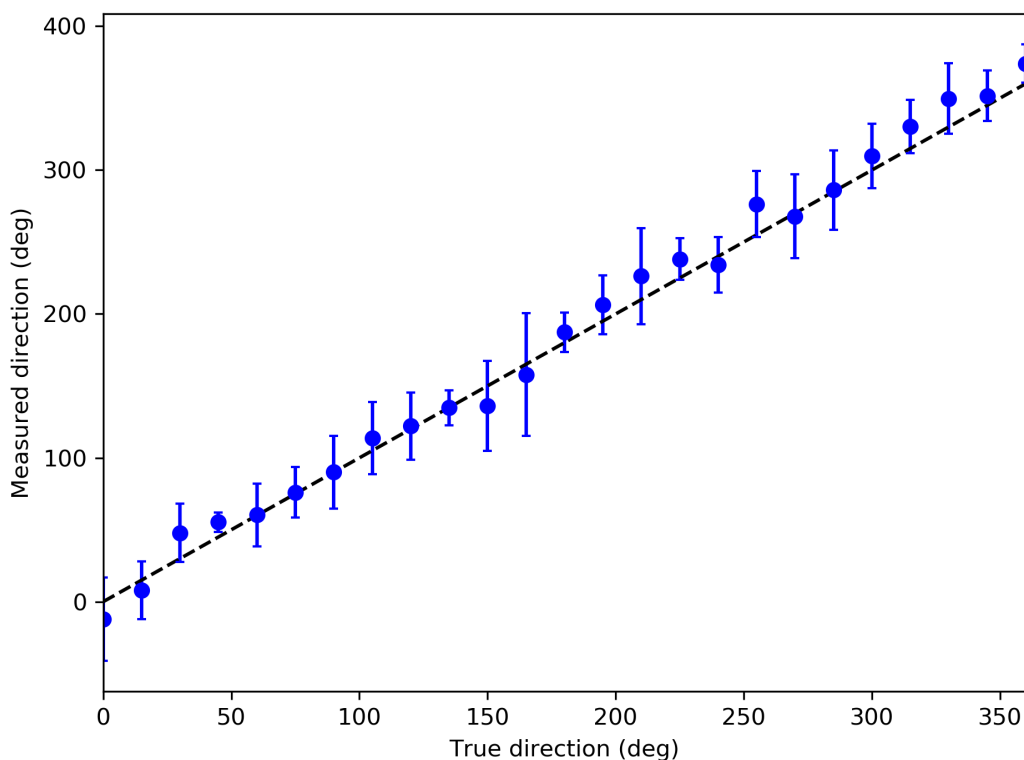
Kahden metrin etäisyydellä läheteestä ilmaisim havaitti korkeanergistä (yli 3 MeV) signaaleja 93 1/s taajuudella. Ilman PVC-konvertteria neutronilähteestä mitattu pulssitaajuus oli 18 % pienempi kuin PVC-konvertterin kanssa. Taustapulssitaajuus, joka mitattiin PVC-konvertterin kanssa ilman neutronilähdettä, oli 1,2 1/s.

Ilmaisimen määrittämä neutronilähteen suunnan epävarmuus oli 10 s mittausajalla 25,8 astetta. Epävarmuus on saatu laskemalla keskihajonta ilmaisimen määrittämisestä lähteen suunnista todelliseen lähteen suuntaan nähden eri lähteen kulmilla tehdyistä mittauksista. Pidentämällä mittausaika saatiin suunnan epävarmuudeksi 15°. Neutronilähteen suunnan mittaustulokset eri lähteen kulmilla on esitetty kuvassa 8.

Ilmaisimen energiaspektrin avulla voitiin myös tunnistaa neutronilähteen tyyppi. AmBe-neutronilähteen lähettää 4,4 MeV gammasäteilyä. Koska mitatuissa Cf-252 spektreissä ei näy signaalia kyseisellä energialla, voidaan kohtalaisella varmuudella olettaa, että kyseessä on fissioneutronilähde.

Vertailun vuoksi samassa geometriassa suoritettiin mittauksia myös erityisesti neutronien havaitsemiseen kehitetyllä nFacet-ilmaisimelle [12, 13]. Ilmaisimessa on 64 ilmaisinelementtiä, jotka koostuvat PVT-tuikemuovista tehdystä kuutiosta, jotka on pinnoitettu termisille neutroneille herkällä Li6-ZnS-tuikemateriaalikerroksella. Ilmaisinelementtien yhteenlaskettu massa on 8 kg. nFacet-ilmaisimen havaitsema neutroniabsorptiopulssitaajuus oli 9 460 1/s eli 102x suurempi kuin tässä tutkimushankkeessa kehitetyn ilmaisimen havaitsema pulssitaajuus. Ero selittyy nFacet-ilmaisinelementtien 7x suuremmalla poikkipinta-alalla ja ilmaisimen korkealla havaitsemiseffektiiivisyydellä siihen osuville neutroneille. Samoin kuin tutkimushankkeessa kehitetty ilmaisim, myös nFacet pystyy määrittämään neutroni- ja gammalähteiden suunnan. nFacet mittaa myös ilmaisimeen osuvien neutronien energiaspektrin.

Kuva 8. Ilmaisimen määrittämä Cf-neutronilähteen suunta todellisen suunnan funktiona. Piste osoittaa kaikkien kyseisellä kulmalla tehtyjen 10 s mittauksien tulosten keskiarvon ja virherajat mittausten keskihajonnan.



3.3 Suurikokoisen ilmaisinjärjestelmän suorituskyky

Neljstä suuresta (4 L) NaI-ilmaisimesta koostuvan ilmaisinjärjestelmän simuloitu suorituskyky on esitetty yksityiskohtaisesti dokumentissa *Detection and Localization of Weapons Grade Plutonium with an Array of NaI Detectors* [14]. Tässä kappaleessa esitetään joitakin simulaatiotutkimuksen pääkohtia.

Simulaatiotutkimus osoitti selvästi, ettei havaittu neutronien pulssimäärä ole kääntäen verrannollinen mittausetäisyyden neliöön. Tästä syystä ilmaisimen tehokkuutta pitkällä mittausetäisyyksillä ei voida suoraan laskea lyhyillä mittausetäisyyksillä tehdyistä mittauksista tai simulaatioista. Neutronisignaali vaimenee etäisyyden kasvaessa selvästi vähemmän kuin mitä neliöllisen vaimenemisen perusteella voisi olettaa, mikä tehostaa merkittävästi neutronilähteen havaitsemista pitkällä mittausetäisyyksiltä. Esimerkiksi yksinkertaistetussa simuloitussa maaympäristössä havaittu signaali oli 100 m mittausetäisyydelle miltei kolme kertaa suurempi kuin mitä 2 m etäisyydellä saadusta simulaatiotuloksesta olisi neliöllisen vaimenemisen perusteella voinut olettaa.

Ilmaisimen havaitsema pulssimäärä riippuu myös hyvin voimakkaasti ympäristöstä. Esimerkiksi 20 m mittausetäisyydellä yksinkertaistetussa maaympäristössä simuloitu ilmaisimen efektiivisyys oli kolme kertaa suurempi kuin tyhjiössä simuloitu tulos. Meriympäristössä simuloitu efektiivisyys oli 20 m mittausetäisyydellä vain hieman maaympäristöä pienempi, mutta ero korostui pidemmällä mittausetäisyyksillä. Ääritapauksena simuloitiin neutronilähteen havaitsemista betonisessa tunnelissa, jolloin havaittu pulssitaajuus oli 20 m etäisyydellä lähteestä jopa kuusi kertaa suurempi kuin maaympäristössä saatu simulaatiotulos.

Taulukossa 2 on esitetty kahden eri Cf-252-neutronilähteen havaitsemiseen kuluva aika eri mittausetäisyyksillä. Ilmaisimen efektiivisyydet on saatu maaympäristöllä tehdyistä simulaatioista. Ilmaisimen taustapulssitaajuudeksi on käytetty arvoa 6.4 1/s, joka on saatu julkaisusta [10]. Havaitsemisrajat on laskettu 0.1 % "false positive" ja 50 % "false negative" todennäköisyyksillä.

Taulukko 2. Suurikokoisella NaI-ilmaisinjärjestelmällä Cf-252-lähteen havaitsemiseen tarvittava mittausaika simuloituna eri etäisyyksillä.

Etäisyys (m)	Lähde: 200 000 n/s Mittausaika (s)	Lähde: 1 000 000 n/s Mittausaika (s)
10	5,2	0,21
30	165	6,6
50	720	28,8
100	6 765	270

4 Johtopäätökset

Tässä työssä rakennettiin neljästä pienestä NaI(Tl)-ilmaisinelementistä koostuva matriisi-ilmaisiprotyyppi neutroni- ja gammasäteilyn havainnointiin. Tutkimus osoitti, että matriisi-ilmaisimella voidaan rakentaa kustannustehokkaasti NaI(Tl)-materiaalista. NaI(Tl) on yksi edullisimmista epäorgaanisista ilmaisimateriaaleista, ja valmiita ilmaisinelementtejä on markkinoilla yleisesti saatavilla eri kokoisina.

Prototyypin ilmaisimen osoitettiin pystyvän määrittämään säteilylähteen suunta nopeasti. Säteilylähteen paikka saadaan automaattisesti laskettua kahden ilmaisimen antamista suuntakulmista. Jos lähteestä havaittu gammasignaali on voimakas, saadaan lähteen suunta määritettyä alle 5° tarkkuudella. Fissioneutroneita lähettävän säteilylähteen suunta saadaan määritettyä noin 15° tarkkuudella, kun havaittu signaali on voimakas.

Teknologia voidaan helposti skaalata suuremmaksi ja herkemmäksi kasvattamalla ilmaisinelementtien kokoa ja määrää. Esimerkiksi neljästä 4 L-kokoisesta NaI(Tl)-elementistä saadaan kustannustehokkaasti erittäin herkkä ilmaisimella, jonka ilmaisinelementtien kokonaismassa on noin 60 kg, eli miltei 50x suurempi kuin prototyypin ilmaisimen ilmaisinelementtien massa. Sovelluksissa, joissa tarvitaan vieläkin suurempaa ja tehokkaampaa ilmaisinta, on suositeltavaa kasvattaa ilmaisinelementtien määrää.

Tehtyjen simulaatioiden perusteella 1 000 000 neutronia sekunnissa lähettävä taktinen ydinase voitaisiin havaita neljästä 4 L-kokoisesta NaI(Tl)-ilmaisimesta koostuvalla ilmaisinjärjestelmällä sadan metrin päästä noin viidessä minuutissa. Jos taktinen ydinase lähettää 200 000 neutronia sekunnissa, kasvaa tarvittava mittausaika sadan metrin etäisyydellä kahteen tuntiin. Neutronsäteilyn simulointeihin liittyy kuitenkin aina merkittäviä epävarmuuksia. Siksi tulokset tulisivatkin varmistaa suurikokoisella matriisi-ilmaisimella ja Cf-252-säteilylähteellä tehtävillä mittauksilla.

Suurikokoinen matriisi-ilmaisimella soveltuu erittäin hyvin turvallisuusvalvontaan valtakunnan rajoilla, ja se on tehokas keino havaita ydinase materiaalien salakuljetus. Suuren tehokkuuden ilmaisimella on ainoa tekninen tapa yrittää havaita ydinaseen kuljetus tai sijoittaminen tiettyyn kohteeseen.

LÄHTEET

- [1] CBRNE-strategiatyöryhmä. Kansallinen CBRNE-strategia 2017, Sisäministeriö, 2017, <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-324-166-4>.
- [2] K. Peräjärvi. Ydinaineiden ja muiden radioaktiivisten aineiden valtakunnallinen havaitsemisarkkitehtuuri, Säteilyturvakeskus, STUK-A 266, 2022.
- [3] S. Ihanola et al. European Reference Network for Critical Infrastructure Protection: Radiological and Nuclear Threats to Critical Infrastructure Thematic Group: Novel detection technologies for nuclear security, EUR 29270 EN, <https://doi.org/10.2760/703301>.
- [4] iPIX – Ultra Portable Gamma-Ray Imaging System, Mirion Technologies Inc. 2019 https://www.mirion.com/assets/ipix-ultra-portable-gamma-ray-imaging-system_gv3Kx6N.pdf.
- [5] H100 Gamma Ray Imaging Spectrometer, H3D Inc. 2021, <https://h3dgamma.com/H100Specs.pdf>.
- [6] GeGI Germanium Gamma-Ray Imaging HPGe Spectrometer, PHDS Co. 2022, <https://phdsco.com/products/gegi>.
- [7] M. Wonders. Development of a Cost-effective Portable Neutron Imager and Spectrometer Using Sinusoid-based Multiplexing of Silicon Photomultipliers and Plastic Scintillators, PhD dissertation, The Pennsylvania State University, 2020.
- [8] A. Pola et al. DIAMON: A portable, real-time and direction-aware neutron spectrometer for field characterization and dosimetry, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 969, 2020.
- [9] R. Bedogni et al. The NCT-WES directional neutron spectrometer: validation of the response with monoenergetic neutron fields. The European Physical Journal Plus 138.3, 2023.
- [10] P. Holm et al. Neutron detection with a NaI spectrometer using high-energy photons, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 697, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.09.010>.

[11] H. Toivonen, M. Dowdall, and S. Ihantola. On the Symmetry of Photon Detection Arrays: A Directionally Sensitive 3D Model, Applied Radiation and Isotopes, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111219>.

[12] S. Ihantola and A. Vacheret. nFacet 3D neutron detector web page. <https://nfacet.com/>.

[13] S. Bonomally, S. Ihantola and A.Vacheret. Enhancing source detection for threat localisation, Nuclear security science network 2017, https://www.nusec.uk/assets/events/imperial_college_vacheret_source_detection_poster_2017.pdf.

[14] H. Toivonen, M. Dowdall. Detection and Localization of Weapons Grade Plutonium with an Array of NaI Detectors, Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja, Puolustusministeriö, 2024.



Puolustusministeriö
Försvarsministeriet
Ministry of Defence



Puolustusministeriö

MATINE

Maanpuolustuksen tieteellinen
neuvottelukunta

Eteläinen Makasiinikatu 8, Helsinki

PL 31, 00131 Helsinki

defmin.fi

ISSN PDF: 2984-102X

ISBN PDF: 978-951-663-202-8